



Application of Statistical Methods, Saturation Indices, and the Composite Diagrams in the Groundwater Quality Assessment in the Kerman Plain Aquifer

M. Rezaei^{1*}

Abstract

The hydrogeochemical characterization of the Kerman plain aquifer, in central Iran, has been studied. Chemical characteristics from 58 deep well samples were used. Physicochemical characteristics and the major elements (Na^+ , K^+ , Ca^{++} , Mg^{++} , Cl^- , SO_4^{--} and HCO_3^-) were analyzed for these samples. Different methods including composite diagrams, saturation indices, and multivariate statistical methods were employed to assess groundwater quality. The results showed that the main hydrochemical facies of the aquifer representing 73% of the samples are (Na, K-Cl, SO_4). The solubility of Calcite, Dolomite, Gypsum, and Aragonite were assessed in terms of the saturation index indicating supersaturation with respect to Calcite and Dolomite. Clustering analysis showed three distinctive groundwater groups indicating different groundwater residence time and different rock-water interaction history. The results of factor analysis indicated that five factors explain about 96.3% of the total sample variance. The first and most important factor is mainly controlled by Halite dissolution in the Kerman plain. Dissolution of Gypsum is the second most important source of salinity.

Keywords: Groundwater, Multivariate analysis, Hydrogeochemistry, Saturation Index.

کاربرد آنالیزهای چند متغیره، اندیس‌های اشباع و دیاگرام‌های ترکیبی در تحلیل کیفی آبخوان آبرفتی دشت کرمان

محسن رضایی^{۱*}

چکیده

خصوصیات شیمیایی آبخوان آبرفتی دشت کرمان مورد مطالعه قرار گرفته و از نتایج آزمایشات فیزیکی و شیمیایی مربوط به ۵۸ حلقه چاه عمیق استفاده گردیده است. در این نمونه‌ها خصوصیات فیزیکی و شیمیایی و یون‌های اصلی (Na^+ , K^+ , Ca^{++} , Mg^{++} , Cl^- , SO_4^{--} , HCO_3^-) مورد سنجش قرار گرفته‌اند. روشهای مختلف شامل دیاگرام‌های ترکیبی، اندیس‌های اشباع و آنالیزهای چند متغیره در ارزیابی پارامترهای کیفی استفاده شده است. نتایج نشان داده‌اند که رخساره هیدروشیمیایی غالب (Na , $\text{K}-\text{Cl}$, SO_4) در ۷۳ درصد از نمونه‌ها می‌باشد. اندیس اشباع از کلسیت، دولومیت، ژپس و آراگونیت محاسبه و نشان دهنده وضعیت فوق اشباع نسبت به کلسیت و دولومیت می‌باشد. تحلیل خوشه‌ای، منابع آب را در سه گروه مجزا قرار می‌دهد که منطبق با زمان ماندگاری آب و میزان واکنش با مواد آبخوان از هم مجزا می‌شوند. نتایج تحلیل عاملی نشان می‌دهد که ۹۶/۳ درصد از تغییرات کیفی آب توسط ۵ عامل کنترل می‌شود. عامل اول و مهمترین عامل، انحلال هالیت موجود در آبرفت‌های دشت کرمان است. انحلال ژپس که کماکان در آبخوان اتفاق می‌افتد، در درجه دوم اهمیت قرار دارد.

کلمات کلیدی: آب‌برزمینی، آنالیز چند متغیره، هیدروژئوشیمی، اندیس اشباع

تاریخ دریافت مقاله: ۲۹ مرداد ۱۳۸۶

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۲ مهر ۱۳۸۸

1- Assistant Prof. Geology department of Tarbiat Moallem University, Tehran, Iran. Email: m_rezaei@tmu.ac.ir
*- Corresponding Author

۱- استادیار گروه زمین‌شناسی دانشگاه تربیت معلم تهران، تهران، ایران
*- نویسنده مسئول

۱- مقدمه

هدایت الکتریکی آب به بیش از ۳۰۰۰ میکرومهموس بر سانتی‌متر رسیده است. شوری بالا می‌تواند به دلیل انحلال رسوبات تبخیری، واکنش‌های آب و رسوب مانند پدیده تبادل کاتیونی، تبخیر از آب‌های زیرزمینی و آب‌های برگشتی کشاورزی باشد. در این مقاله سعی گردیده از روش‌های مذکور برای بررسی علت کاهش کیفیت آب‌های زیرزمینی دشت کرمان استفاده گردد.

۲- محدوده مورد مطالعه

۲-۱- موقعیت جغرافیایی و آب و هوایی

گستره مورد مطالعه در غرب و جنوب غرب شهر کرمان، در جنوب شرقی ایران قرار گرفته و در حد فاصل مختصات ۳۰ درجه و ۱۵ دقیقه تا ۳۰ درجه و ۲۲ دقیقه و ۳۰ ثانیه عرض شمالی و ۵۶ درجه و ۵۲ دقیقه و ۳۰ درجه تا ۵۷ درجه طول شرقی واقع گردیده است. این ناحیه دارای آب و هوای گرم و خشک با تفاوت درجه حرارت زیاد در شب و روز می‌باشد. از اصلی‌ترین ویژگی‌های آب و هوایی این منطقه تابستان گرم و سوزان و زمستان‌های سرد و خشک می‌باشد. متوسط دما در تابستان ۳۵ و در زمستان ۶ درجه سانتی‌گراد محاسبه گردیده است. متوسط بارندگی سالیانه ۱۶۱ میلی‌متر و بارش بین مقادیر کمینه ۷۹ و بیشینه ۲۴۸ میلی‌متر متغیر می‌باشد.

۲-۲- زمین‌شناسی و هیدروژئولوژی

از نظر زمین‌شناسی محدوده مورد تحقیق شامل قسمتهایی از چهارگوشه‌های زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ کرمان و باغین می‌باشد. شکل ۱ موقعیت زمین‌شناسی محدوده را نشان می‌دهد. آبخوان دشت در رسوبات آبرفتی دوران چهارم تشکیل گردیده است. این رسوبات در دامنه ارتفاعات، دانه درشت بوده و بتدریج رو به نواحی مرکزی دشت، اندازه دانه‌ها کاهش می‌یابد و در مرکز و منتهی الیه دشت تبدیل به رس و سیلت می‌گردد. رسوبات رودخانه‌ای در ابتدای ورود به دشت، دانه درشت بوده و شامل قلوه سنگ، ریگ و شن می‌باشند و به سمت مرکز دشت، دانه‌بندی آنها ریزتر و درصد رس در آنها افزایش می‌یابد.

بر اساس لوگ‌های زمین‌شناسی و شواهد موجود، آبخوان دشت کرمان، تنها در اعماق ۱۵۰ متر به بعد که لایه‌های درشت‌دانه‌تر وجود دارند، می‌تواند تشکیل شده باشد. این آبخوان در اعماق ۱۵۰ تا ۲۰۰ متری زیر شهر کرمان و در یک لایه درشت دانه از جنس شن، ماسه و قلوه سنگ تشکیل شده است. بر روی این لایه آبدار چندین لایه رسی-سیلتي با نفوذپذیری کم و ضخامت‌های متفاوت و عمدتاً

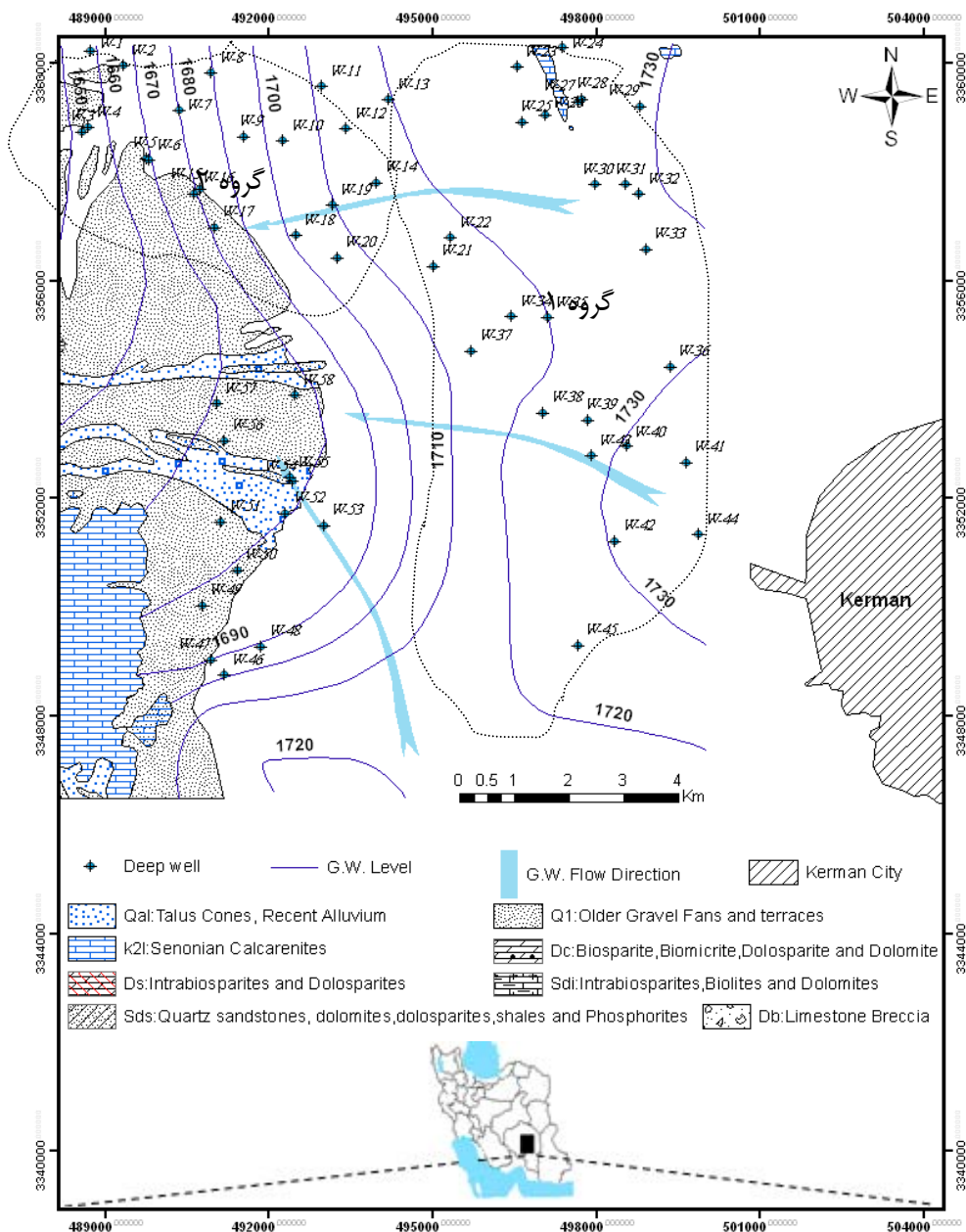
ترکیب شیمیایی اجزاء محلول در آب متأثر از واکنش‌های مختلفی است که در تقابل بین آب و مواد آبخوان اتفاق می‌افتد. بررسی ترکیب شیمیایی هم از جهت شناخت کیفیت آب بسیار مهم است و هم می‌تواند در شناخت واکنش‌های عامل شوری، راهگشا باشد. روش‌های مختلفی برای شناخت منشاء املاح در تحقیقات مختلف مورد استفاده قرار گرفته است. یکی از این روشها استفاده از نمودارهای ترکیبی جهت شناخت منشاء شوری می‌باشد. محققین از نمودارهای ترکیبی مختلفی جهت شناخت فرایندهای ژئوشیمیایی مؤثر بر شوری آب‌های زیرزمینی در مناطق مختلف دنیا استفاده نموده‌اند. (Back, 1966, Henry & Schwartz, 1990, Howard and Mullings, 1996, Stober & Bucher, 1999, Marie & Vengush, 2001, Gosselin et al., 2001 and Cloutier, 2004). بررسی مقادیر نمایه‌های اشباع ترکیبات مختلف و ارتباط آنها نیز ابزار مفید دیگری است که برای شناسایی عوامل مؤثر بر هیدروشیمی آب‌های زیرزمینی توسط محققین مورد استفاده قرار می‌گیرد (Nordstorm et al., 1989, Jeong, 2001).

روش‌های آماری چند متغیره نیز در سال‌های اخیر برای بررسی ترکیب شیمیایی و اطلاعات کیفی آب استفاده فراوانی داشته‌اند. این روشها ابزار قدرتمندی هستند که در بررسی روابط بین متغیرها، می‌توانند بطور همزمان چند پارامتر را مورد تحلیل قرار دهند (Johnson & Wichern, 1988). در بررسی هیدروشیمی آب زیرزمینی از روش‌های تحلیل عاملی و خوشه‌ای استفاده می‌گردد. در روش تحلیل عاملی فرایندهای عمده کنترل کننده شیمی آب، در قالب عامل‌های پیونددهنده مجموعه‌ای از متغیرهای دارای وابستگی بالا بیان می‌شوند (Jeong, 2001). در روش تحلیل خوشه‌ای، نمونه‌های آب بر اساس شباهت ترکیب شیمیایی گروه بندی می‌شوند (Beatriz et al., 1998). محققین از روش‌های آماری چندمتغیره در بررسی و تحلیل کیفی و مطالعه هیدروشیمی آب‌های زیرزمینی در مناطق مختلف جهان استفاده نمودند (Beatriz et al., 1998, Dawdy & Feth, 1967, Hitchen et al., 1971, Dalton & Upchurch, 1978, Usunoff & Guzman, 1989, Subbarao et al., 1996, Reghunath et al., 2002 and Liu et al., 2003).

آبخوان دشت کرمان از لحاظ کیفیت آب زیرزمینی دارای شرایط ویژه‌ای است. از آنجایی که دشت کرمان تأمین کننده آب مورد نیاز بخش کشاورزی می‌باشد، حفظ و حراست از منابع آبی این دشت از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در بعضی از بخش‌های این دشت،

می‌دهد که رقوم منحنی‌های تراز آب زیرزمینی در دشت کرمان بین ۱۷۳۰ و ۱۶۵۰ متر متغیر می‌باشد. بررسی روند منحنی‌ها و جهت جریان آب زیرزمینی مؤید این مطلب است که آبهای زیرزمینی از نواحی جنوبی و شرقی به سمت نواحی غرب و شمال‌غرب در حرکت می‌باشند.

در غرب و جنوب‌غرب و شمال‌غرب و بخش مرکزی تشکیل شده‌اند و سبب کاهش نفوذپذیری رسوبات در این مناطق شده‌اند. به سمت شرق منطقه به دلیل تغییر رخساره، این لایه‌ها، درشت‌دانه‌تر شده و نفوذپذیری آنها افزایش می‌یابد و در بخش جنوب غربی عمدتاً رخساره‌های تبخیری وجود دارند که به سمت شرق به رخساره‌های آهکی تبدیل می‌گردند. نقشه تراز آب زیرزمینی (شکل ۱) نشان



شکل ۱- موقعیت زمین شناسی، تراز آب زیرزمینی و جهت جریان آب زیرزمینی در دشت کرمان

۳- مواد و روش‌ها

(شکل ۲). از نمونه‌های آنالیز شده ۷۳ درصد تیپ کلروره (Na,K-Cl,SO₄) ۲۷ درصد تیپ بی‌کربناته دارند. اولویت کاتیونی در هر دو تیپ با کاتیون سدیم می‌باشد. تیپ بی‌کربناته عمدتاً در محل‌های نواحی شرق و تیپ کلروره در نواحی شمالغرب چهارگوش مطالعاتی واقع شده‌اند. این تغییر تیپ آب با جهت جریان آب زیرزمینی همخوانی دارد و در جهت تکامل آب، از تیپ بی‌کربناته به تیپ کلروره تغییر می‌نماید. روند تکامل و تغییر یون‌ها در شکل ۲ با فلش مشخص گردیده است. در جهت جریان، یون‌های کلسیم، منیزیم و بی‌کربنات منابع آب کاهش می‌یابد و بر میزان یون‌های کلر و سدیم آنها افزوده می‌گردد.

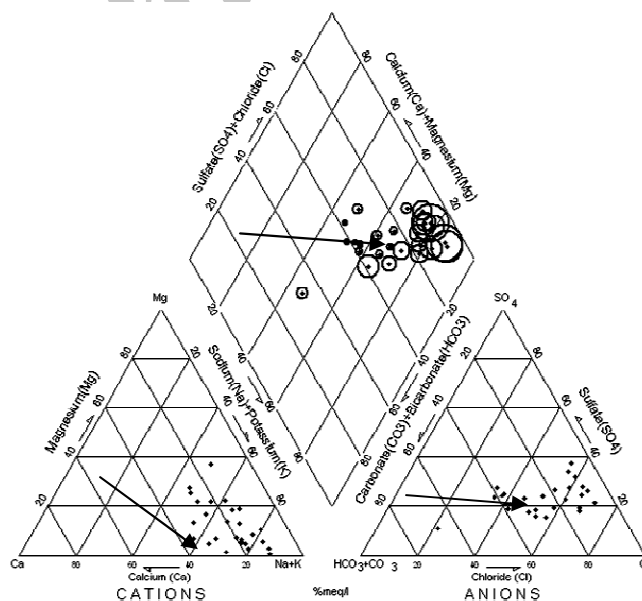
۴-۱- دی‌گرام‌های ترکیبی

ترکیب شیمیایی منابع آب دشت کرمان در نمودارهای ترکیبی مختلفی رسم گردیده است. شکل ۳ نمودار دو متغیره غلظت کلر را در مقابل غلظت یون‌های کلسیم، منیزیم، سدیم، بی‌کربنات، سولفات، پتاسیم و کل یون‌های محلول (TDI) نشان داده است. علت انتخاب غلظت کلر بعنوان یک محور ثابت در رسم گراف‌ها، پایدار بودن (Conservative) و عدم شرکت این یون در واکنش‌های شیمیایی مثل تبادل کاتیونی و رسوبگذاری می‌باشد. غلظت اکی والانی سولفات و کلسیم هم نسبت به هم رسم گردیده است.

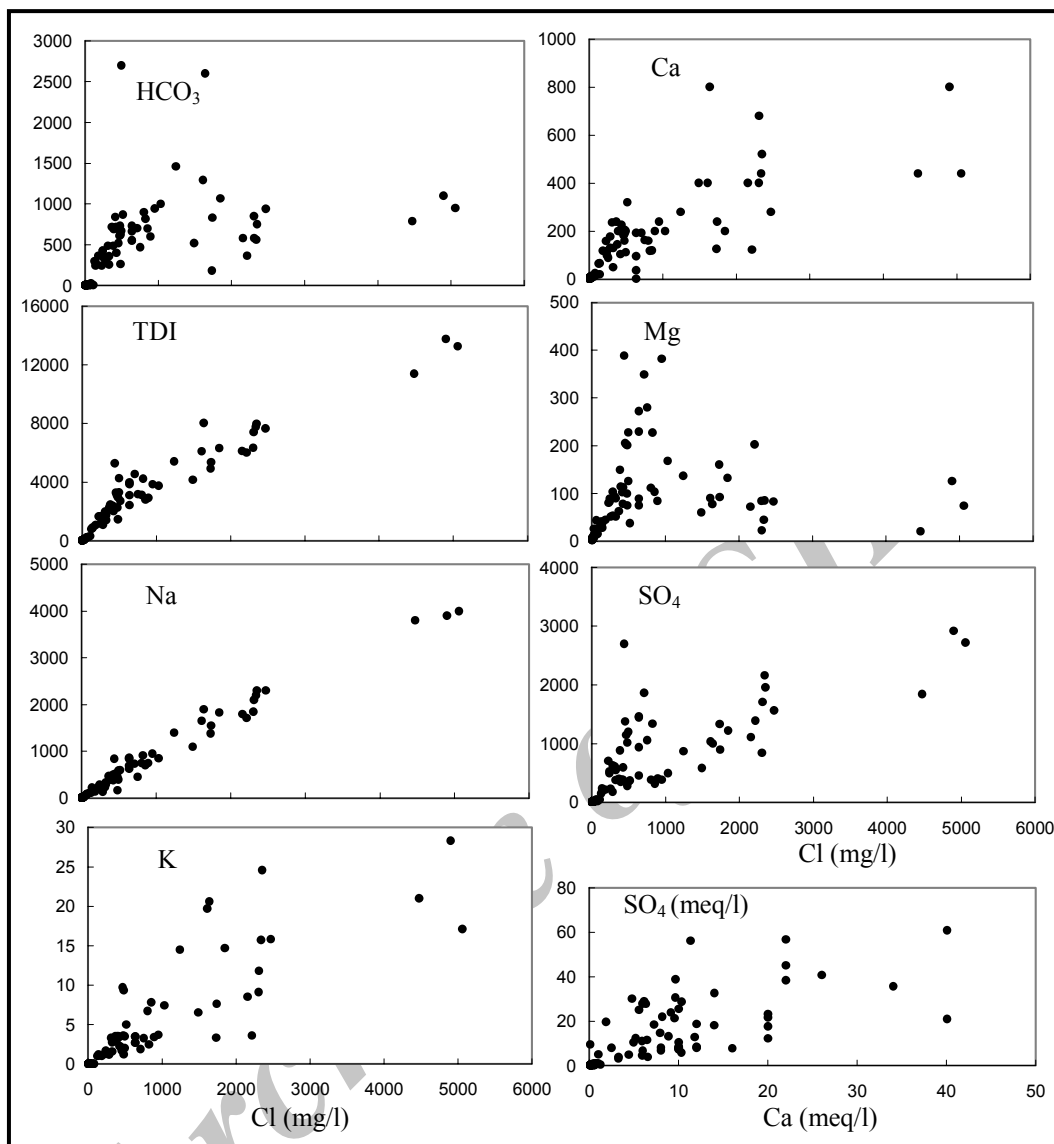
به منظور بررسی روندهای تکاملی آب زیرزمینی و تشخیص فرایندهایی که آب‌های زیرزمینی را تحت تاثیر قرار می‌دهند، از نتایج شیمیایی مربوط به ۵۸ حلقه چاه آبرفتی عمیق استفاده شد. در شکل ۱، موقعیت این چاه‌ها نشان داده شده است. در بررسی‌ها، از رفتار شیمیایی عناصر اصلی آب و نسبت آنها به یکدیگر استفاده گردیده است. ابتدا تیپ منابع آب در نمودار مثلثی تعیین گردید. ترکیب شیمیایی نمونه‌ها در دی‌گرام‌های ترکیبی مختلفی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. اندیس اشباع نمونه‌های آب نسبت به ترکیبات مختلفی محاسبه و تفسیر گردید. در ادامه روش تحلیل خوشه‌ای برای گروه‌بندی منابع آب دشت، مورد استفاده قرار گرفت. این تحلیل با استفاده از روش‌های R-Mode و Q-Mode صورت پذیرفت. در حالت اول، روابط بین متغیرها و در حالت دوم روابط بین مشاهدات مورد بررسی قرار گرفتند. و در نهایت برای شناسایی عوامل حاکم بر تغییرات کیفیت آب زیرزمینی و روابط بین متغیرها از روش تحلیل عاملی استفاده گردید.

۴-۲- بحث در نتایج

منابع آب دشت کرمان عمدتاً شور می‌باشند. هدایت الکتریکی منابع آب بین مقادیر کمینه ۳۰۰ و بیشینه ۳۲۰۰ میکرومهموس بر سانتی‌متر در تغییر می‌باشد. نمونه‌های آب در دو تیپ قرار می‌گیرند



شکل ۲- نمودار مثلثی منابع آب دشت کرمان



شکل ۳- دیاگرام‌های ترکیبی متغیرهای شیمیائی آب‌های زیرزمینی (غلظت یون‌ها بر حسب mg/l)

موضوع نشان‌دهنده نقش انحلال ژپیس در تغییر کیفیت آب می‌باشد (Freeze and Cherry, 1979).

غلظت TDI با افزایش کلر بصورت خطی افزایش می‌یابد. و این بیانگر تأثیر انحلال هالیت در تعیین غلظت بالا و شوری نمونه‌های آب می‌باشد. هر چند انحلال ژپیس هم در این نمونه‌ها به صورت اولیه تأثیرگذار بوده است. غلظت یون منیزیم با افزایش کلر کاهش یافته است. از طرفی نسبت یونی $Mg^{++}/(Ca^{++}+Mg^{++})$ در اکثر نمونه‌ها کمتر از ۰/۵ است به همین دلیل منشاء منیزیم نمی‌تواند ناشی از هوازدگی دولومیت باشد. غلظت یون‌های کلر و سدیم تقریباً

نتایج در شکل ۳ نشان می‌دهند که غلظت بی‌کربنات با افزایش کلر، در ابتدا کمی افزایش و سپس کاهش داشته است و این امر به این دلیل است که نمونه‌های با شوری کم و کلر پایین که عمدتاً مربوط به مناطق تغذیه می‌باشند، تحت تأثیر انحلال کربنات‌ها می‌باشند. اما با افزایش شوری و افزایش قدرت یونی محلول، رسوبگذاری کربنات‌ها و لذا کاهش بی‌کربنات رخ می‌دهد. از طرفی با افزایش غلظت کلر، یون کلسیم افزایش می‌یابد و رابطه خطی بین غلظت یون‌های سولفات و کلسیم نیز وجود دارد که نشان‌دهنده فرایند انحلال ژپیس در آبخوان می‌باشد. نسبت یونی $HCO_3^-/Sum.Anions$ کمتر از ۰/۸ و مقدار سولفات بالاست، این

برابری نشان می‌دهند و این بیانگر منشاء یکسان و انحلال‌هالیت در آبخوان می‌باشد. به عبارتی ترکیب شیمیایی آب در آبخوان در نهایت از انحلال‌هالیت متأثر می‌گردد.

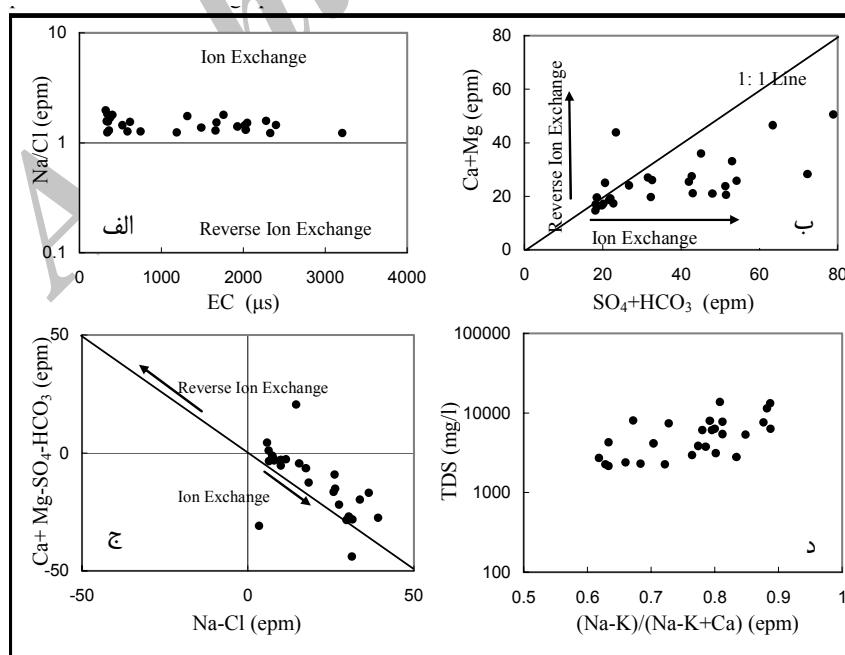
سکانس تکامل شیمیایی آب زیرزمینی دشت کرمان در ارتباط کامل با انحلال‌هالیت مشخص می‌گردد، اما انحلال سولفات نیز در مراحل اتفاق افتاده است. به خاطر انحلال سریع‌هالیت مرحله سولفات مشاهده نمی‌شود و آب زیرزمینی از مرحله اول تکامل شیمیایی (بیکربناته) به کلروره تغییر می‌نماید.

رابطه بین هدایت الکتریکی و مجموع املاح محلول که از ویژگی‌های شیمیایی آبخوان می‌باشد، برای آبخوان دشت کرمان به صورت زیر بدست آمده است. در واقع این معادله بهترین خط شیب برازش داده شده به نمودار هدایت الکتریکی اندازه‌گیری شده در مقابل کل املاح محلول می‌باشد:

$$TDS (mg/l) = 3.52 * EC (\mu mhos/Cm) + 1257 \quad (1)$$

جهت نمایش فرایندهای تبادل یونی و تبادل یونی معکوس در آبخوان دشت کرمان، چهار نمودار ترکیبی با استفاده از توابع بین متشکله‌های شیمیایی متأثر از فرایند تبادل یونی تهیه گردیده‌اند. در شکل ۴-الف، نمودار Na/Cl در مقابل EC برای نمونه‌های آب زیرزمینی دشت کرمان نشان داده شده است. نمونه‌هایی که در بالای خط $Na/Cl=1$ واقع شده‌اند، منشاء دوگانه دارند یعنی علاوه بر

انحلال‌هالیت ترکیب شیمیایی آنها، می‌توانند تحت تأثیر تبادل کاتیونی یا انحلال یک کانی سدیم دار دیگر هم قرار گرفته باشند. در شکل ۴-ب نمودار دو متغیره Ca+Mg در مقابل HCO_3+SO_4 نشان داده شده است. خط ۱:۱ نشان‌دهنده فرایندهای انحلال کلسیت، دولومیت و ژپس می‌باشد. نمونه‌هایی که در امتداد خط در مقادیر کمتر از 5meq/l واقع شده باشند، نشان دهنده انحلال کلسیت و دولومیت می‌باشند. اکثر نمونه‌های دشت کرمان زیر خط ۱:۱ و در بیشتر از 10meq/l واقع شده‌اند که نشان دهنده تأثیر انحلال ژپس همزمان با پدیده تبادل کاتیونی در ترکیب شیمیایی آب دشت می‌باشد. شکل ۴-ج نمودار Na-Cl در مقابل Ca+Mg- HCO_3-SO_4 و رخداد فرایند تبادل یونی را نشان داده است. 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 گرفته‌اند، در طول خط شیب ۱- قرار می‌گیرند (Jankowski, et al., 1998). در اکثر نمونه‌ها، فرایند تبادل کاتیونی مشاهده می‌گردد. در شکل ۴-د، نسبت $(Na-K)/(Na-K+Ca)$ با افزایش TDS افزایش یافته و به سمت ۱ میل می‌نماید و این بیانگر تأثیر تبادل کاتیونی می‌باشد.



شکل ۴- نمودارهای ترکیبی چند متغیره غلظت یون‌ها

۴-۲- نمایه‌های اشباع

باعث رسوبگذاری دولومیت و لذا کاهش میزان منیزیم با افزایش شوری می‌گردد. روند کاهش منیزیم با افزایش شوری در نمودار ترکیبی منیزیم با کلر (شکل ۳) نشان داده شده است.

بررسی اندیس اشباع نسبت به ترکیبات مختلف (شکل ۵) نشان می‌دهد که قریب به اتفاق منابع آب در مقادیر CI بیشتر از ۱۵۰۰ میلی‌گرم در لیتر نسبت به کلسیت اشباع و فوق اشباع می‌باشند. با افزایش میزان کلر و شوری، خروج منیزیم با فرایند تبادل کاتیونی باعث می‌شود که در تعدادی از نمونه‌هایی با شوری بالا، اشباع از دولومیت مشاهده گردد.

۴-۳- تحلیل خوشه‌ای

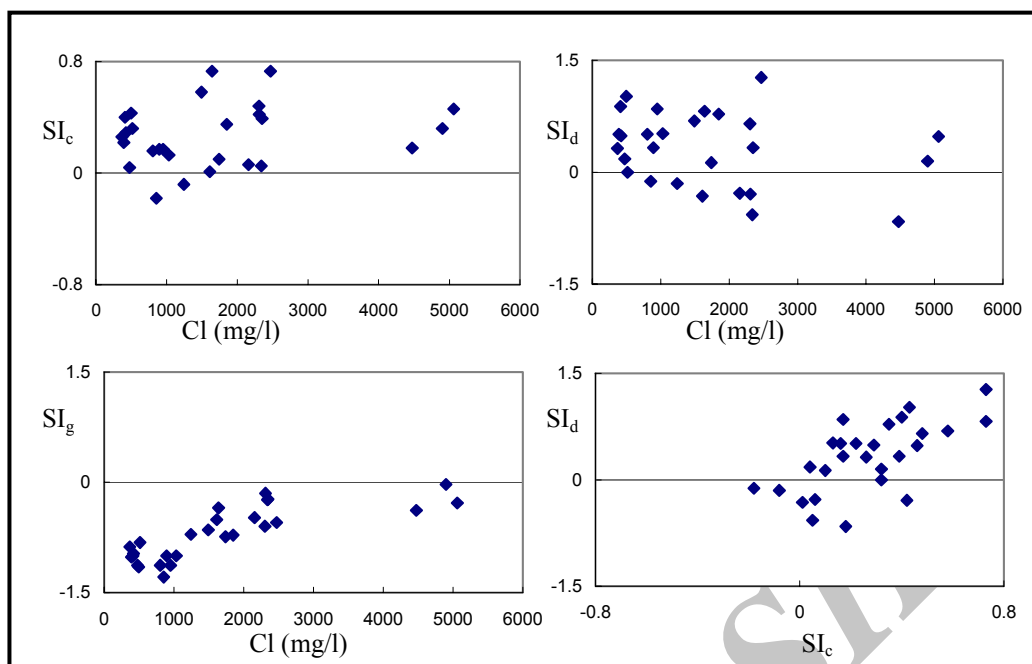
نمودار حاصل از تحلیل خوشه‌ای متغیرهای کیفیت، شامل pH، EC و یونهای اصلی در شکل ۶ ارائه گردیده است. کلسیم، منیزیم، پتاسیم و pH در یک گروه، کلر و سدیم در یک گروه، سولفات و EC در گروه دیگر و بیکربنات در گروه منفردی قرار می‌گیرد. تحلیل خوشه‌ای نشان می‌دهد که هدایت الکتریکی بیشتر متأثر از یون سولفات می‌باشد و ارتباط بسیار نزدیکی با غلظت یون‌های سدیم و کلر دارد. در سطحی بالاتر، بیکربنات به گروه کلسیم و منیزیم نزدیکی بیشتری نشان داده است. همچنان که انتظار می‌رود، بین pH و قلیائیت نیز رابطه نزدیکی برقرار می‌باشد.

نمایه‌های اشباع نسبت به کلسیت، دولومیت و ژپس در نمونه‌های آب زیرزمینی دشت کرمان با استفاده از نتایج مدل‌سازی با کد کامپیوتری PHREEQC محاسبه گردیده و در جدول ۱ ارائه گردیده‌اند. نتایج نشان می‌دهند که تمام نمونه‌های آنالیز شده نسبت به ژپس تحت اشباع می‌باشند و می‌توانند کماکان ژپس را در خود حل نمایند. به جز در چند نمونه، در بقیه نمونه‌های فوق، اشباع نسبت به کلسیت و دولومیت وجود دارد. افزایش غلظت یون‌های کلسیم، منیزیم، کربنات و بیکربنات از منشاءهای غیر از انحلال کلسیت و دولومیت مانند انحلال سریع ژپس و انیدریت، باعث فوق اشباع نمونه‌های آب زیرزمینی نسبت به کلسیت و دولومیت شده است.

تفسیر نمایه‌های اشباع، جهت بررسی عوامل زمین‌شناسی کنترل‌کننده ترکیب شیمیایی آب زیرزمینی دشت کرمان با استفاده از نمودارهای دو متغیره صورت گرفته است. از آنجا که اکثر نمونه‌های آب زیرزمینی دشت کرمان تیپ کلروره داشته، یون کلر پایدار می‌باشد و شوری آب زیرزمینی دشت کرمان نیز عمدتاً بر اثر افزایش یون کلر (در اثر انحلال هالیت) است، بنابراین نمودارهای دو متغیره نمایه‌های اشباع کلسیت، دولومیت و ژپس در مقابل غلظت کلر تهیه شده‌اند (شکل ۵). ورود یون‌های منیزیم و کلسیم به واکنش‌های انحلالی مختلف باعث ایجاد اثر یون مشترک می‌گردد. این موضوع

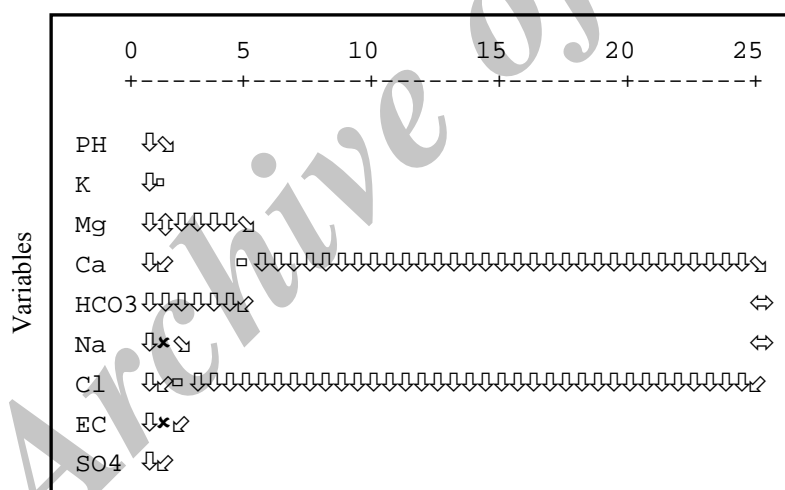
جدول ۱- اندیس اشباع آب نسبت به کلسیت، دولومیت و ژپس

	SI _c	SI _d	SI _g		SI _c	SI _d	SI _g
W1	۰/۰۱	-۰/۳۲	-۰/۵۱	W21	۰/۵۸	۰/۶۹	-۰/۶۵
W3	۰/۷۳	۰/۸۲	-۰/۳۵	W23	۰/۲۶	۰/۳۲	۰/۸۸
W5	-۰/۰۸	-۰/۱۵	-۰/۷۱	W25	۰/۴۳	۱/۰۲	-۱/۱۵
W7	۰/۴۶	۰/۴۸	-۰/۲۸	W27	۰/۴	۰/۸۸	-۱/۰
W8	۰/۳۹	۰/۳۳	-۰/۲۳	W29	۰/۱۷	۰/۳۳	-۱/۰
W9	۰/۱۸	-۰/۶۶	-۰/۳۸	W31	۰/۲۲	۰/۵۱	-۱/۰۲
W10	۰/۰۵	-۰/۵۷	-۰/۲۴	W32	۰/۲۹	۰/۴۹	-۰/۹۷
W11	۰/۴۲	-۰/۲۹	-۰/۱۵	W33	۰/۰۴	۰/۱۸	-۱/۱۳
W12	۰/۰۶	-۰/۲۸	-۰/۴۸	W36	۰/۳۲	۰/۰	-۰/۸۲
W13	۰/۴۸	۰/۶۵	-۰/۶	W40	۰/۱۷	۰/۸۵	-۱/۱۳
W14	۰/۱	۰/۱۳	-۰/۷۴	W43	۰/۱۶	۰/۵۱	-۱/۱۳
W15	۰/۳۵	۰/۷۸	-۰/۷۲	W44	-۰/۱۸	-۰/۱۲	-۱/۲۹
W17	۰/۷۳	۱/۲۷	-۰/۵۵	W51	۰/۱۳	۰/۵۲	-۱/۰



شکل ۵- دیاگرامهای ترکیبی اندیس اشباع کلریت، ژیبس و دولومیت نسبت به یون کلر

Rescaled Distance Cluster Combine



شکل ۶- نمودار تحلیل خوشه‌ای متغیرهای کیفیت آب زیرزمینی دشت کرمان

گروه ۱: نمونه‌هایی که در خوشه شماره ۱ قرار گرفته‌اند، شامل منابع آبی می‌گردند که در بالادست مسیر جریان آب زیرزمینی دشت کرمان واقع شده‌اند. نمونه‌های این گروه چاههای عمیق ۲۱، ۲۳، ۲۵، ۲۷، ۲۹، ۳۱، ۳۲، ۳۳، ۳۶، ۴۰، ۴۳ و ۴۴ می‌باشند. شکل ۱ نشان می‌دهد که نمونه‌های این گروه در منطقه تغذیه قرار دارند. هدایت الکتریکی اعضای این گروه از ۸۰۰ میکرومهموس بر سانتی‌متر کمتر می‌باشد.

شکل ۷ نتیجه تحلیل خوشه‌ای بر اساس غلظت یون‌های اصلی، pH و EC را نشان داده است. مطابق شکل، نمونه‌های آب زیرزمینی دشت کرمان در ۳ گروه متفاوت قرار می‌گیرند. گروه‌های دوم و سوم تشابه بیشتری نشان می‌دهند و در سطح بالاتری یک دسته می‌شوند. بیشتر نمونه‌های آب در گروه شماره ۱ قرار می‌گیرند. و بعد از آن گروه ۳ تعداد بیشتری را شامل می‌شود. نحوه توزیع مکانی خوشه‌های به دست آمده در شکل ۱ نشان می‌دهد که خوشه‌های اصلی ۱ و ۳ به طور مشخصی از یکدیگر تفکیک شده‌اند. هر سه گروه در زیر به اختصار توضیح داده شده‌اند:

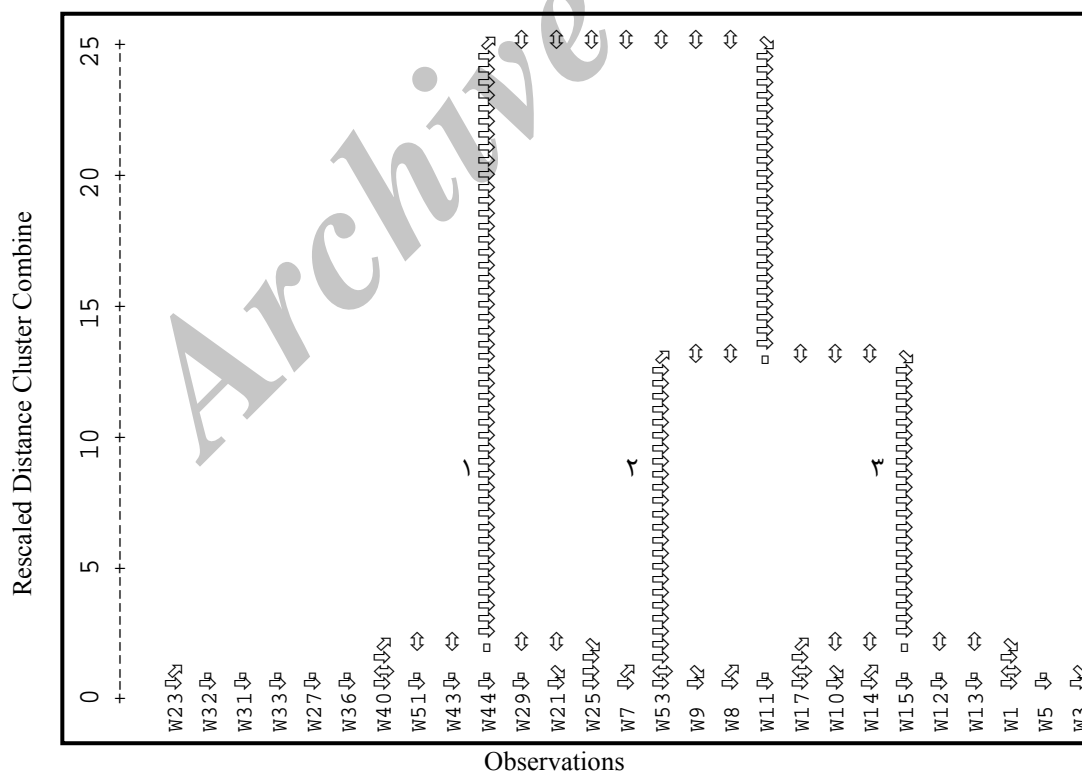
شماره ۲ ارائه شده است. عامل اول با کلرید و به میزان کمتری سولفات در ارتباط می‌باشد. این عامل شامل انحلال کانیهای هالیت در مرتبه اول و ژپس در مرتبه دوم می‌باشد و مسئول ۵۳/۷ درصد تغییرات کیفیت آب زیرزمینی است. تبخیرها از جمله هالیت و ژپس در رسوبات دشت کرمان وجود دارد. ۱۲/۱ درصد از تغییرات ترکیب شیمیایی آب زیرزمینی دشت توسط عامل دوم کنترل می‌گردد. در این عامل بیکربنات بالاترین بار عاملی را نشان می‌دهد که نشان‌دهنده تغذیه ناشی از بارندگی در دشت می‌باشد (Lawrence & Upchurch, 1982). انحلال کربناتها، غلظت بیکربنات، کلسیم و pH منابع آب دشت را کنترل می‌نماید. حدود ۳۵ درصد تغییرات کیفیت آب زیرزمینی دشت کرمان نیز توسط ۳ عامل باقیمانده کنترل می‌گردد. این عوامل مرتبط با غلظت بیکربنات، کلسیم و منیزیم می‌باشند. این فاکتورها می‌تواند به عوامل گوناگونی مرتبط باشند. براساس اطلاعات موجود شاید نتوان ماهیت مشخصی برای آنها معین نمود، اما همبستگی مشخصی بین کلسیم و منیزیم و این فاکتورها وجود دارد و این امر می‌تواند معرف پدیده تبادل کاتیونی باشد. تأثیر این عامل در بخش‌های قبلی مقاله اشاره شده است.

گروه ۲: نمونه‌های شماره ۷، ۹ و ۵۳ که شورترین منابع می‌باشند و در خروجی دشت قرار دارند در این گروه قرار گرفته‌اند. در گروه دوم هدایت الکتریکی از همه منابع بیشتر و بالاتر از ۲۰۰۰ میکرومهموس بر سانتی‌متر می‌باشد. با کمی اغماض می‌توان این دسته را از گروه ۳ دانست.

گروه ۳: در خوشه شماره ۳ نمونه‌هایی قرار دارند که در ادامه مسیر جریان به سمت خروجی دشت واقع شده‌اند. نمونه‌های شماره ۱، ۳، ۵، ۸، ۱۱، ۱۲، ۱۳، ۱۴، ۱۵ و ۱۷ در این گروه قرار دارند. این نمونه‌ها به علت زمان ماندگاری بیشتر و واکنش بیشتر با مواد آبخوان، هدایت الکتریکی بیشتری (بیشتر از ۱۲۰۰ میکرومهموس بر سانتی‌متر) دارند.

۴-۴- تحلیل عاملی

تحلیل عاملی بر اساس پارامترهای کیفیت، شامل غلظت یون‌های اصلی، هدایت الکتریکی و pH نشان می‌دهد که ۹۶/۳ درصد تغییرات کیفیت آب زیرزمینی دشت کرمان توسط ۵ عامل کنترل می‌گردد. بار ۵ عامل اول نسبت به پارامترهای کیفیت در جدول



شکل ۷- نمودار تحلیل خوشه‌ای نمونه‌های آب زیرزمینی دشت کرمان

جدول ۲- مقدار بار عامل‌ها بر اساس چرخش Varimax

متغیرها	عامل‌ها				
	1	2	3	4	5
EC	.221	-.127	-.063	.036	-.116
pH	-.021	1.082	.256	.031	.308
Ca ⁺⁺	-.228	.161	-.081	.102	1.620
Mg ⁺⁺	.066	.033	-.096	1.050	.201
Na ⁺	.277	.046	.037	.019	-.301
K ⁺	.217	-.135	.101	-.013	-.190
HCO ₃ ⁻	.015	.267	1.099	-.090	-.166
SO ₄ ⁻	.219	.081	-.029	.024	-.061
Cl ⁻	.286	.045	.000	.025	-.351
درصد واریانس هر عامل	53.7	12.1	11.6	11.5	7.4
تجمعی درصد واریانس	53.7	65.8	77.4	88.9	96.3

۵- نتیجه گیری

تحلیل خوشه‌ای براساس تشابه نمونه‌های آب زیرزمینی در دشت کرمان، سه گروه متمایز را معرفی می‌کند. این گروه‌ها از نظر زمان ماند آنها در آبخوان و تغییر ترکیب شیمیایی آب زیرزمینی به سمت خروجی دشت از یکدیگر متفاوت می‌باشند. گروه اول با شوری کمتر، منابع منطقه تغذیه را شامل می‌شود. گروه‌های دوم و سوم که نزدیکی بیشتری به هم دارند، به سمت منطقه خروجی دشت قرار می‌گیرند و بیشتر تحت تأثیر محیط آبخوان آبرفتی هستند. شوری منابع مشمول این دو گروه زیاد و در این بین منابع گروه دوم شوری بیشتری دارند.

ترکیب شیمیایی منابع آب در محدوده (Na,K-Cl,SO₄) واقع گردیده است. در جهت جریان آب زیرزمینی، یون‌های کلسیم، منیزیم و بیکربنات، منابع آب کم و بر میزان یون‌های کلر و سدیم افزوده می‌گردد. بررسی نمودارهای ترکیبی اجزاء محلول مختلف آب نشان می‌دهد که سکانس تکامل شیمیایی آب زیرزمینی دشت کرمان در ارتباط کامل با انحلال هالیت مشخص می‌گردد، اما انحلال سولفات نیز در مراحل اتفاق افتاده است. به دلیل انحلال سریع هالیت، مرحله سولفات مشاهده نمی‌شود و آب زیرزمینی از مرحله اول تکامل شیمیایی (بیکربناته) به کلوره تغییر می‌نماید. نمودارهای ترکیبی چند متغیره نیز وقوع پدیده تبادل کاتیونی را به مقیاس وسیع نشان می‌دهند. بررسی اندیس اشباع نسبت به ترکیبات مختلف نشان می‌دهد که قریب به اتفاق منابع آب در مقادیر Cl بیشتر از ۱۵۰۰ میلی‌گرم در لیتر نسبت به کلسیت اشباع و فوق اشباع می‌باشند. با افزایش میزان کلر و شوری، خروج منیزیم با فرایند تبادل کاتیونی

باعث شده است که در تعدادی از نمونه‌های با شوری بالا، اشباع از دولومیت مشاهده گردد.

نتیجه تحلیل عاملی نشان می‌دهد که ۹۶/۳ درصد تغییرات کیفیت آب زیرزمینی دشت کرمان توسط ۵ عامل کنترل می‌گردد.

عامل اول شامل انحلال کانیهای هالیت در مرتبه اول و ژپیس در مرتبه دوم و مسئول ۵۳/۷ درصد تغییرات کیفیت آب زیرزمینی است. ۱۲/۱ درصد از تغییرات کیفی آب به عامل دوم که در ارتباط با بیکربنات می‌باشد و از طریق انحلال کربنات‌ها غلظت بیکربنات، کلسیم و pH منابع آب دشت را کنترل می‌نماید، مربوط می‌گردد. حدود ۳۵ درصد تغییرات کیفیت آب زیرزمینی دشت کرمان نیز توسط ۳ عامل باقیمانده کنترل می‌گردد که از ماهیت بیرونی این عوامل فقط می‌توان به پدیده تبادل کاتیونی اشاره کرد.

۶- مراجع

- Back, W. (1966), Hydrochemical facies and groundwater flow patterns in northern part of Atlantic Coastal Plain. U.S. Geological Survey Professional Paper 498-A
- Beatriz, A.H., Vega, M., Barrado, E., Pardo, R. and Fernandez, L. (1998), A case study of hydrochemical characteristics of an alluvium aquifer influenced by human activities, Air, water and Soil pollution Bulletin.
- Cloutier, V. (2004), Origin and geochemical evolution of groundwater in the Paleozoic Basses-Laurentides sedimentary rock aquifer system, St. Lawrence Lowlands, Québec, Canada. PhD Thesis, INRS-

- Lawrence, F.W. and Upchurch, S.B. (1982), Identification of water recharge areas using geochemical factor analysis, *Groundwater*, 20(6), pp. 680-687.
- Liu, C.W., Lin, K.H. and Kuo, Y.M. (2003), Application of factor analysis in the assessment of groundwater quality in a blackfoot disease area in Taiwan, *The Science of Total Environment*, V.313, pp.77-89.
- Marie, A. and Vengosh, A. (2001), Sources of salinity in groundwater from Jericho area, Jordan Vally, *Grounwater*, 39(2), pp. 240-248.
- Nordstrom, D. K., Ball, J.W., Donahoe, R.J. and Whittemore, D. (1989), Groundwater chemistry and water-rock interaction at Stripa. *Geochem. Cosmochem. Acta*, 53, pp. 1727-1740.
- Parkhurst, D.L., Appelo, C.A.J. (1999), User's guide to PHREEQC (version 2)—A computer program for speciation, batch-reaction, one-dimensional transport, and inverse geochemical calculations. U.S. Geological Survey, Water-Resources Investigations Report 99-4259
- Piper, A.M. (1944), A graphic procedure in the geochemical interpretation of water-analyses. American Geophysical Union. Papers, Hydrology, pp. 914-923
- Reghunath, R., Murthy, T.R.S. and Raghvan, B.R. (2002), The utility of multivariate statistical techniques in hydrogeochemical studies: an example from Karnataka, India, *Water Research*, Vol. 36., pp. 2437-2442.
- Stober, I. and Bucher, K. (1999), Deep groundwater in the crystalline basement of the Balck Forest region, *Applied Geochemistry*, 14, pp. 237-254.
- Subbarao, C., Subbarao, N.V. and Chandu, S.N. (1996), Characterization of groundwater contamination using factor analysis, *Environmental Geology*, V.28 No. 4, pp. 175-180.
- Usunoff, E.J. and Guzman-Guzman, A. (1989), Multivariate analysis in hydrochemistry: An example of the use factor and correspondence analysis. *Groundwater*, 27, pp. 27-34.
- Eau, Terre & Environnement, Québec, Canada [in French and English]
- Dalton, M.G. and Upchurch, S.B. (1978), Interpretation of hydrochemical facies by factor analysis, *Groundwater*, V. 16, pp. 228-233
- Dawdy, D.R., Feth, J.H. (1967), Application of factor analysis in steady of chemistry of groundwater quality, Mojaveriver Vally, California, *Water Resour. Res.*3(2), pp. 505-510.
- Freeze, R.A. and Cherry, J.A. (1979), *Groundwater*, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey
- Gosselin, D.C., Harvey, F.E. and Frost, C.D. (2001), Geochemical evolution of ground water in the Great Plains aquifer of Nebraska: Implications for the management of a regional aquifer system. *GroundWater* 39(1): pp. 98-108.
- Hem, J.D. (1985), Study and interpretation of the chemical characteristics of natural water. U.S. Geological Survey Water-Supply Paper 2254, Third Edition.
- Hendry, M.J. and Schwartz, F.W. (1990), The chemical evolution of ground water in the Milk River Aquifer, Canada. *Ground Water* 28(2): pp. 253-261.
- Hitchon, B., Billing, G.K. and Kolvan, J.E. (1971), Geochemistry and origin of formation waters in the western Canada sedimentary basin, III. Factor controlling chemical composition, *Geochem. Cosmochem. Acta*, 35, pp. 567-598.
- Jankowski, J., Shekarforosh, S. and Acworth, R.I. (1998), Reverse ion exchange in a deeply weathered prophyritic dacit fractured aquifer system, Yass, New South Wales, Australia, In Arehord G.B. & Hulston R. (eds.) Proceeding of 9th International Symposium on Water Rock Interaction, Taupo, New Zealand, Rotterdam: Balkema, pp. 243-246.
- Jeong, C. (2001), Mineral-water interaction and hydrogeochemistry in the Samkwang mine area, Korea. *Geochemical Journal*, Vol. 35, pp. 1-12
- Ken W. F. Howard. and Mullings, E. (1996), Hydrochemical Analysis of Ground-Water Flow and Saline Incursion in the Clarendon Basin, Jamaica, *Groundwater*, 34(6), pp. 801-810.