

امکان‌سنجی ارتباط هیدرولیکی آبخوان ساحلی دشت آذرشهر با دریاچه ارومیه با استفاده از نسبت‌ها و مدل‌سازی معکوس ژئوشیمیایی

اصغر اصغری مقدم^{۱*} و علیرضا دو چشمه گرگیج^۲

۱. استاد هیدروژئولوژی، دانشکده علوم طبیعی، دانشگاه تبریز

a.gorgij@gmail.com

۲. دانشجوی دکتری هیدروژئولوژی، دانشکده علوم طبیعی، دانشگاه تبریز

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۴/۱۱/۲۰

تاریخ وصول مقاله: ۱۳۹۴/۰۲/۷

چکیده

مطالعه حاضر ارتباط هیدرولیکی آبخوان ساحلی دشت آذرشهر و دریاچه ارومیه را با روش‌های ژئوشیمیایی و مدل‌سازی ژئوشیمیایی بررسی نموده است. بدین منظور اقدام به نمونه‌برداری از آب زیرزمینی منطقه گردیده و نتایج آنالیز این نمونه‌ها با آب دریاچه از نظر عناصر اصلی مقایسه گردید. سپس دیاگرام‌های ژئوشیمیایی و اندیس‌های رایج برای بررسی نفوذ آب شور به سفره‌های ساحلی مورد استفاده قرار گرفت. در نهایت به مدل‌سازی معکوس ژئوشیمیایی آب زیرزمینی منطقه مورد مطالعه با استفاده از نرم افزار PHREEQC مبادرت و نتایج برای ۳ محور مجاور دریاچه بررسی گردید. نتایج حاصل نشان داد که علیرغم مواجهه بودن آبخوان دشت آذرشهر با نفوذ آب شور، بررسی‌های ژئوشیمیایی اثری از ارتباط هیدرولیکی دریاچه ارومیه با آب زیرزمینی دشت آذرشهر نشان نداد. بدین صورت که تیپ آب دریاچه از نوع سدیم-کلراید بوده در صورتی که تیپ غالب آب زیرزمینی آبخوان کلسیم-سدیم بیکربنات است. اندیس‌های ژئوشیمیایی، نفوذ آب شور را نه از دریاچه بلکه از شوره‌زارهای مرز شمال غربی آبخوان نشان دادند. مدل‌سازی معکوس ژئوشیمیایی نیز ارتباط منطقی بین اندیس‌های اشباع کانی‌های محتمل در آبخوان و دریاچه، نشان نداد. از این رو به نظر می‌رسد برداشت مازاد از آبخوان دشت آذرشهر بر نفوذ آب شور از لایه‌های نیمه‌تراوای نمکی شمال غرب آبخوان اثرگذار است و نه سطح آب دریاچه ارومیه.

کلیدواژه

دریاچه ارومیه، آذرشهر، نفوذ آب شور، مدل‌سازی معکوس ژئوشیمیایی، ارتباط هیدرولیکی.

۱. سرآغاز

زیرزمینی منجر به ایجاد جریان معکوس شده و نفوذ آب شور را به سفره باعث می‌شود.

دشت آذرشهر از جمله دشت‌های آبرفتی مجاور دریاچه ارومیه می‌باشد که به واسطه افزایش بی‌رویه در استخراج آب زیرزمینی در مهر و موم‌های اخیر با خطر بالا رفتن مقدار شوری مواجه گردیده که طبیعتاً منجر به کاهش کیفیت آب زیرزمینی منطقه می‌گردد. از سویی دیگر دریاچه ارومیه با مساحت تاریخی ۴۵۰۰ تا ۵۵۰۰ کیلومتر

آب زیرزمینی به عنوان منبع اصلی تأمین آب در مناطق ساحلی قلمداد می‌شود، اگرچه نفوذ آب شور محدودیت عمده استفاده از آب زیرزمینی در این مناطق محسوب می‌شود. نفوذ آب شور یک مسئله رایج در مناطق ساحلی است؛ جایکه آبخوان‌ها در ارتباط هیدرولیکی با دریا هستند (Abd-Elhamid & Javadi, 2011). تحت شرایط طبیعی و بدون دخالت انسانی، آب شیرین به سمت دریا حرکت می‌کند ولی افزایش در برداشت از سفره آب

Garing, Han et al. 2014, Tillman et al. 2014, Suma et al. و Gopinath and Srinivasamoorthy, 2015 (2015). ژئوشیمیست‌ها عموماً نسبت های شیمیایی Na^+ / Ca^{++} ، Mg^{++} ، Ca^{++} / $(HCO_3^- + SO_4^{--})$ و Cl^- / $(HCO_3^- + CO_3^{--})$ و بررسی ایزوتوپ‌های اکسیژن و هیدروژن را به عنوان شاخص های تشخیص منبع شوری و ارتباط هیدرولیکی سفره های ساحلی با منبع آب دریای مجاور آن‌ها ارائه می‌کنند (Jones et al. 1999). مطالعه حاضر برای نخستین بار به بررسی ارتباط هیدرولیکی بین دریاچه ارومیه و آبخوان دشت آذرشهر با استفاده از شاخص های نسبت ژئوشیمیایی و مدل سازی معکوس ژئوشیمیایی پرداخته است.

۲. مواد و روش بررسی

دریاچه ارومیه با بیش از ۵۰۰۰ کیلومتر مربع وسعت با درازای ۱۴۰ کیلومتر و پهنای ۱۵ تا ۵۰ کیلومتر از گسترده‌ترین و کم ژرف‌ترین دریاچه‌های جهان است و آب آن فوق اشباع از نمک است. رودخانه‌های دائمی و بسیاری از رودهای فرعی دائمی و یا فصلی سرازیر شده از کوه‌های اطراف و بسیاری از چشمه‌های زیر دریاچه‌ای تأمین‌کننده آب دریاچه هستند. بروز تغییرات وسیع و نامطلوب در سیستم آب و اکولوژیکی این دریاچه حدوداً از دودهمه پیش شروع شده و طی این مدت حجم دریاچه از ۳۲ میلیارد مترمکعب در سال ۱۳۷۴ به کمتر از ۱۴ میلیارد مترمکعب در سال ۱۳۹۰ کاهش یافته است (تحقیقات منابع آب، ۱۳۹۲). شکل ۱ تغییرات دریاچه ارومیه را در بازه زمانی سال ۱۳۶۴ تا سال ۱۳۹۰ نشان می‌دهد.

محدوده مطالعاتی آذرشهر یکی از ۱۲ آبخوان مجاور دریاچه بوده که دارای مرز مشترک با آن است و در حدفاصل طول‌های جغرافیایی ۴۵ درجه و ۴۶ دقیقه تا ۴۵ درجه و ۵۰ دقیقه شرقی و عرض‌های ۳۷ درجه و ۴۳ دقیقه تا ۳۷ درجه و ۵۲ دقیقه شمالی قرار گرفته است. شکل (۲) موقعیت منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد.

مربع، دریاچه‌ای نسبتاً بزرگ با شوری بسیار زیاد است که به عنوان دومین دریاچه شور دنیا، بزرگ‌ترین زیستگاه طبیعی آرتمیا و به عنوان یکی از نادرترین ذخایر بیوسفری ایران و جهان مورد توجه خاص در سطوح ملی و بین‌المللی قرار داشته است. به نحوی که یونسکو در سال ۱۳۵۴ در برنامه جهانی انسان و زیست کره دریاچه ارومیه را به عنوان یکی از ۹ نقطه واجد حفاظت انتخاب نمود (تحقیقات منابع آب، ۱۳۹۲).

دریاچه ارومیه دارای اهمیت بالایی در بخش‌های اقتصادی، اجتماعی، گردشگری و محیط زیستی کشور دارا می‌باشد. این دریاچه به دلایل متعددی طی سالیان اخیر با کاهش شدید تراز سطح آب مواجه گردیده است. تاکنون تحقیقات بسیاری در زمینه های مختلف از جمله تغییر اقلیم، خشکسالی، کاهش آبدهی رودخانه‌ها و تغییر کاربری اراضی در خصوص علل رخداد این امر انجام گرفته است که بر اساس تحقیقات صورت گرفته مهم‌ترین عامل خشک شدن تدریجی دریاچه، افزایش مصرف منابع آب در بخش کشاورزی است (تحقیقات منابع آب، ۱۳۹۲). مشاهده می‌شود که در هیچ یک از مطالعات صورت گرفته، تبادلات آبی سفره‌های آب زیرزمینی مجاور دریاچه مورد بررسی و تحلیل قرار نگرفته است. همچنین از آنجا که منابع آب زیرزمینی به‌عنوان با ارزش‌ترین ذخایر آب شیرین جهان می‌باشند. حفاظت و مدیریت صحیح بهره‌برداری آن‌ها از حساسیت و اهمیت بالایی برخوردار بوده و یکی از مولفه‌های اصلی بیلان حوضه می‌باشد.

درک تغییرات فضایی ترکیب شیمیایی آب زیرزمینی که ناشی از ورودی های مختلف است، بسیار دشوار است؛ خصوصاً اگر ترکیب شیمیایی در طی زمان دچار تغییر شده یا شرایط مرزی دچار جابجایی شوند (Zghibi et al. 2013) که این امر یک پدیده رایج در سفره های ساحلی است. استفاده از ژئوشیمی در بررسی ارتباط بین منابع آب مختلف خصوصاً در مناطق ساحلی در تحقیقات بسیاری صورت پذیرفته است (Dongmei et al. 2011, et al. 2013).

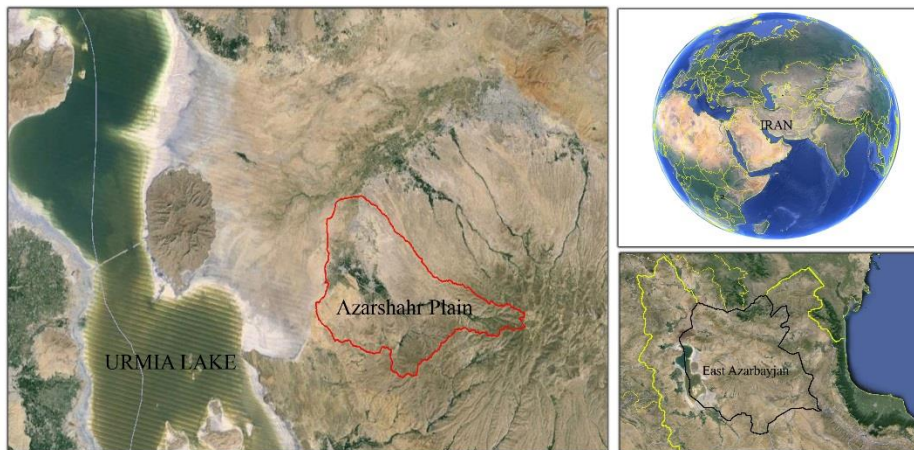


(ب)



(الف)

شکل ۱. تصویر ماهواره‌ای از محدوده دریاچه ارومیه (الف) سال ۱۳۶۴، (ب) سال ۱۳۹۰



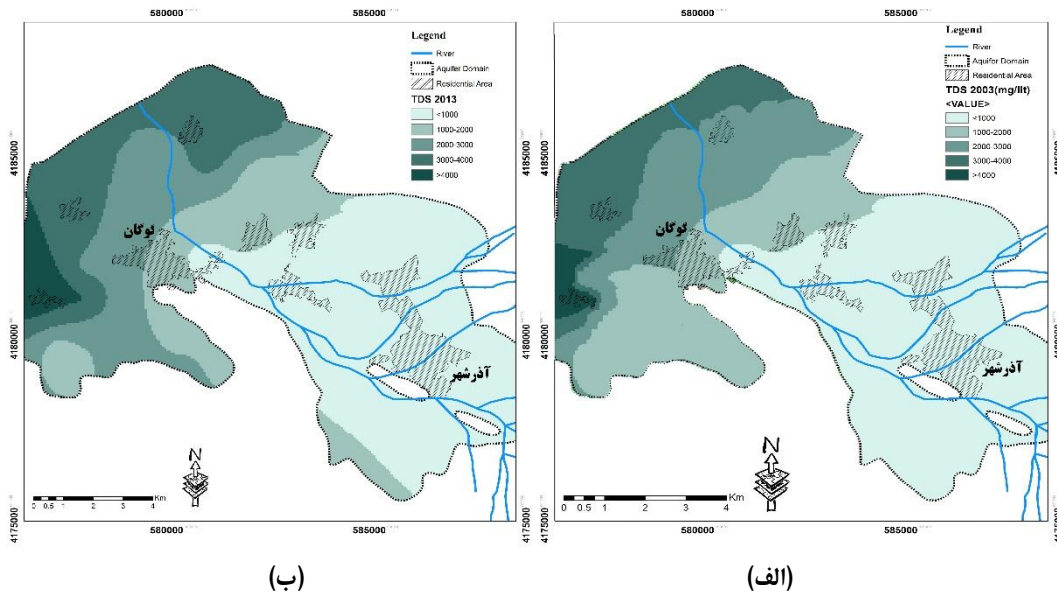
شکل ۲. موقعیت قرارگیری دشت آذرشهر در مجاورت دریاچه ارومیه (برگرفته از Google Earth)

دریا می‌باشد. براساس اطلاعات هواشناسی موجود، متوسط سالانه بارندگی منطقه در طول دوره آماری ۳۰ ساله ۲۲۱/۲ میلی‌متر و متوسط سالانه تبخیر برابر ۱۵۷۹ میلی‌متر بوده است. مهم‌ترین رودخانه منطقه، آذرشهرچای می‌باشد که

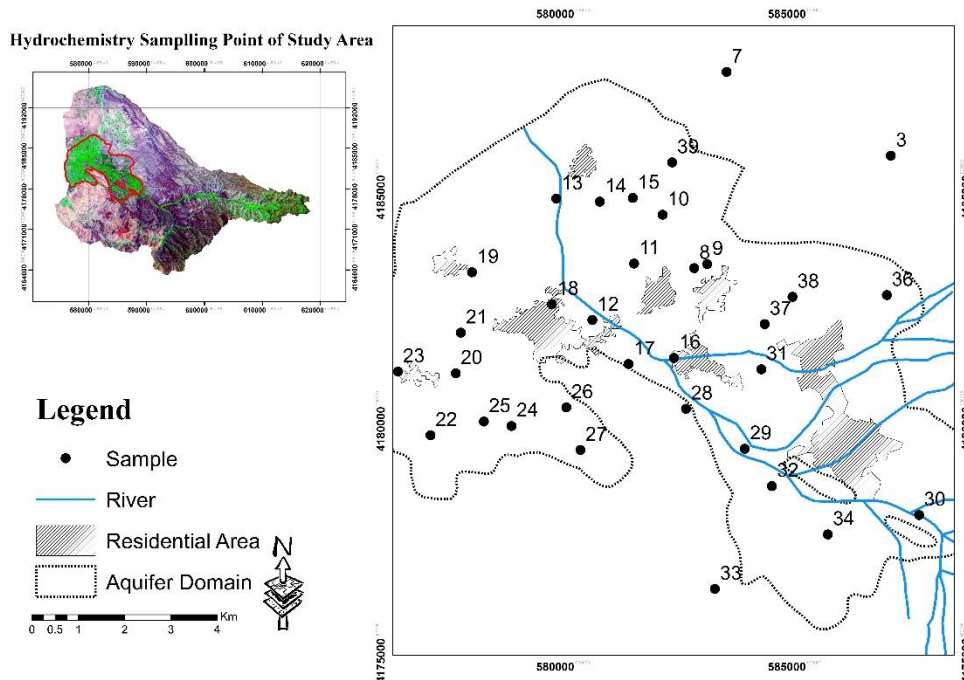
وسعت کل محدوده مطالعاتی آذرشهر برابر ۴۵۷ کیلومترمربع است که حدود ۱۲۴ کیلومترمربع آن را دشت آذرشهر تشکیل می‌دهد. ارتفاع بلندترین و پست‌ترین نقاط محدوده به ترتیب برابر با ۳۷۰۰ متر و ۱۲۸۲ متر از سطح

رسم میزان هدایت الکتریکی برای محدوده مطالعاتی نشان داد که با گذر زمان و در فاصله بین سال‌های ۱۳۸۰ تا ۱۳۹۲ میزان هدایت الکتریکی که مشخصه بارزی از میزان شوری موجود در آب است، روند افزایشی داشته و از سمت مرز غربی و شمال غربی آبخوان که در مجاورت دریاچه است در حال پیشروی است (شکل ۳)

دارای روند عمومی جنوب شرقی-شمال غربی بوده و آب‌های سطحی منطقه را زهکشی می‌کند. در منطقه آذرشهر، جمع تخلیه سالانه منابع آب برابر ۹۰/۶۴ میلیون مترمکعب می‌باشد (مشاور یکم، ۱۳۸۵) که یکی از دلایل کاهش سطح آب آبخوان و در نتیجه نفوذ آب شور به آن شده است.



شکل ۳. گسترش هدایت الکتریکی در محدوده آبخوان (الف) سال ۱۳۸۰ و (ب) سال ۱۳۹۲



شکل ۴. پراکنش نقاط نمونه‌برداری شده در محدوده مورد مطالعه

آبخوان را پوشش دهد لذا نمونه‌ها در مسیر حرکت و با پراکنش منطقی برداشت گردید. شکل شماره ۴ نقاط نمونه‌برداری از منطقه مطالعاتی را نشان می‌دهد. پس از آنالیز عناصر اصلی نمونه‌ها، بررسی ارتباط هیدرولیکی آبخوان با دریاچه در سه مرحله صورت پذیرفت که در ادامه به آن اشاره خواهد شد. جدول ۱ رابطه آماری نمونه‌های برداشت شده از منطقه مطالعاتی را نشان می‌دهد.

افزایش میزان شوری آب زیرزمینی آبخوان دشت آذرشهر به علت افزایش بهره‌برداری بیش از حد از منابع آب موجود در منطقه از یک سو و افت سطح آب دریاچه از سوی دیگر این نکته را محتمل می‌سازد که نفوذ آب شور به آبخوان دشت آذرشهر در اثر افزایش پمپاژ با افت سطح دریاچه در ارتباط است. به منظور بررسی این ارتباط، در خردادماه سال ۹۲ از ۳۹ نقطه در محدوده دشت نمونه برداری گردید. تلاش گردید تا نمونه‌برداری تمامی منطقه

جدول ۱. رابطه آماری عناصر نمونه‌های برداشت شده از منطقه مطالعاتی

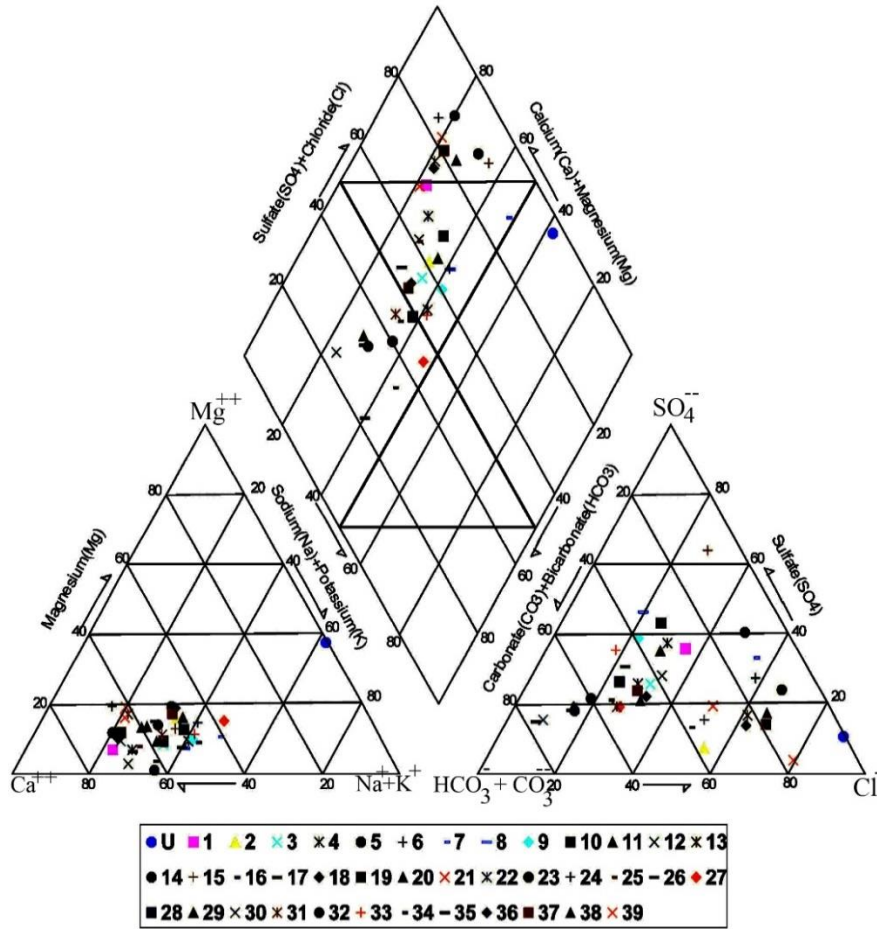
Parameter	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Na ⁺	K ⁺	HCO ₃ ⁻	CO ₃ ⁻⁻	Cl ⁻	SO ₄ ⁻⁻
Samples	39	39	39	39	39	39	39	39
Arithmetic Average	18.09	7.05	8.11	0.25	7.49	0.06	17.69	8.02
Standard Deviation	13.33	7.1	6.43	0.14	4.38	0.16	19.26	7.48
Variation Coefficient (%)	73.69	100.7	79.28	56	58.48	266.7	108.9	93.27
Maximum	57.74	38.07	30.64	0.75	23.4	0.64	85.61	33.78
Minimum	3.77	0.16	1.38	0.08	2.24	0	0.99	0.87
Mode	4.8922	2.835	2.423	0.2633	6.12	0	5.914	6.2863
Mean	14.44	3.94	6.93	0.24	6.52	0	8.45	6.29
Variation Range	53.97	37.91	29.26	0.67	21.16	0.64	84.62	32.91
Skewness	1.13	2.38	1.65	1.95	1.88	2.78	1.75	1.84
Variance	177.65	50.37	41.28	0.02	19.15	0.03	371.1	55.93

ارومیه را نشان می‌دهد. نمودار ستاره‌ای برای نمونه‌های زیاد و برای مقایسه نمونه‌های مختلف با یکدیگر استفاده می‌شود. این نمودار و اشکال چندضلعی پدید آمده روش بصری مقایسه‌ای مناسبی ایجاد می‌کنند.

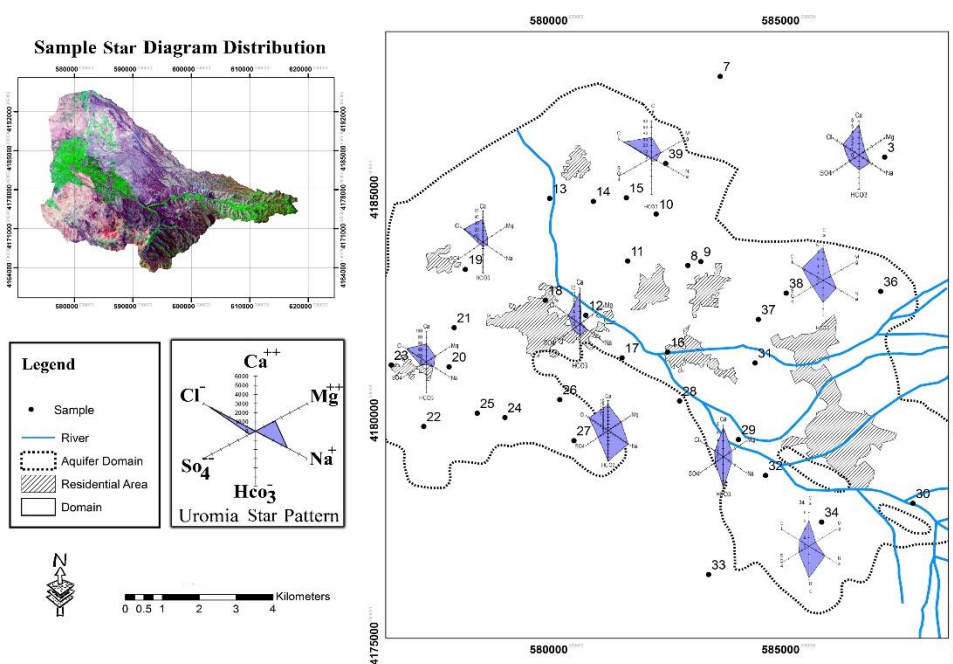
برای مقایسه درصد تشکیل دهنده‌های اصلی آب از دیاگرام دایره‌ای استفاده می‌شود. در این دیاگرام به‌جای استفاده از میزان غلظت عناصر از درصد آن‌ها استفاده می‌شود (اصغری مقدم، ۱۳۸۹). شکل ۷ نمودار دایره‌ای نمونه‌های آب زیرزمینی آبخوان و نمونه آب دریاچه را نشان می‌دهد. همچنین جدول ۲ نتیجه آنالیز نمونه آب دریاچه را بیان می‌کند.

۲.۱. روش‌های گرافیکی

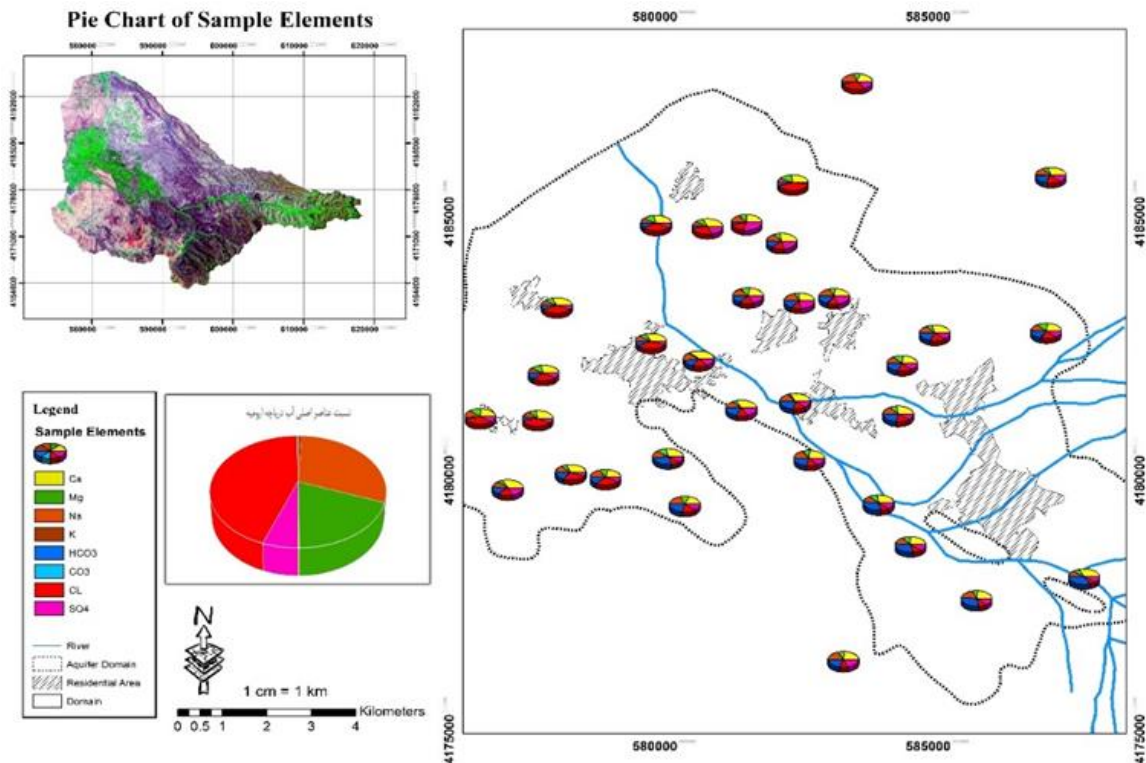
از میان روش‌های گرافیکی رایج ۳ شیوه گرافیکی پایپر، ستاره‌ای و دایره‌ای انتخاب و نمونه‌های آب پس از آنالیز ژئوشیمیایی در این دیاگرام‌ها رسم گردیده و با نمونه آب دریاچه ارومیه مقایسه گردید. نمودار پایپر برای مقایسه تعداد زیادی آب به‌طور هم‌زمان استفاده می‌شود و قابلیت مشخص نمودن تیپ آب را داراست. از سوی دیگر این نمودار وسیله‌ای مفید برای نشان دادن تفاوت‌ها و شباهت‌های بین آب‌هاست (نخعی، ۱۳۸۸). شکل ۵ نمودار پایپر نمونه‌های برداشت شده از منطقه مطالعاتی و دریاچه



شکل ۵. نمودار پایپر نمونه‌های برداشت شده از منطقه مطالعاتی و دریاچه ارومیه



شکل ۶. نمودار ستاره‌ای نمونه‌های منتخب آب زیرزمینی و نمونه آب دریاچه برحسب میلی‌اکی‌والان برلیتر



شکل ۷. نمودار دایره‌ای نمونه‌های آب زیرزمینی و دریاچه

جدول ۲. غلظت عناصر اصلی در آب دریاچه ارومیه (سال ۱۳۹۰)

Parameter	K ⁺	Na ⁺	Mg ⁺⁺	Ca ⁺⁺	SO ₄ ⁻⁻	Cl ⁻	HCO ₃ ⁻	CO ₃ ⁻⁻
Concentration (meq/lit)	99	3600	2262	18	655	5300	26.1	0

نسبت $So_4^- + Hco_3^- Mg^{++} >$ شناخته می‌شوند در حالی که آب‌های جوی (رقیق یا شور) حتی اگر به وسیله ترکیبات دریایی دچار تغییر شوند، نسبت $Cl^- Na^+ >$ را نشان می‌دهند. ژئوشیمیست‌ها عموماً نسبت‌های ژئوشیمیایی زیر را به عنوان شاخص‌های تشخیص منبع شوری ارائه می‌کنند: $Cl^- Na^+ / Mg^{++} Ca^{++}$ و $Hco_3^- + So_4^- / Hco_3^- + Co_3^- Cl^-$ (Jones et al. 1999). علاوه بر نسبت‌های ژئوشیمیایی از ایزوتوپ‌هایی چون برم، اکسیژن و هیدروژن نیز استفاده می‌شود. جدول شماره ۳ نسبت‌های ژئوشیمیایی محاسبه شده برای ۳۹ نمونه آب زیرزمینی آبخوان دشت آذرشهر نشان می‌دهد.

۲.۲. نسبت‌های ژئوشیمیایی

حالت عمومی آب‌های شور غالب بودن کلسیم و سدیم با نسبت مولی $0/86$ و مازاد بودن کلسیم نسبت به عناصر قلیایی (سدیم و پتاسیم) است. همچنین منیزیم به صورت بسیار زیادی بیشتر از کلسیم است یعنی $(Mg^{++} = 4.5 - Ca^{++})$ (5). در عوض آب شیرین قاره‌ای به وسیله ترکیب شیمیایی بسیار متغیر شناخته می‌شود اگرچه آنیون‌های غالب آن Hco_3^- ، So_4^- و Cl^- می‌باشد (Bear and Cheng, 2010). اگر آلودگی انسان‌زاد وجود نداشته باشد، کاتیون اصلی Ca^{++} و Mg^{++} است و به میزان بسیار کمتر قلیایی‌های Na^+ و K^+ در بسیاری از موارد Ca^{++} بر Mg^{++} غالب است. محلول‌های دریایی به صورت ویژه‌ای به وسیله

جدول ۳. نسبت‌های ژئوشیمیایی نفوذ آب شور برای نمونه‌های منطقه مطالعاتی

Sample	X	Y	/ Cl ⁻ Na ⁺	/ Mg ⁺⁺ Ca ⁺⁺	/ HCO ₃ ⁻ + SO ₄ ⁻ Ca ⁺⁺	/ HCO ₃ ⁻ + CO ₃ ⁻ Cl ⁻
1	582896	4192518	0.396442	118.8148	0.49243	1.267356
2	583631	4191801	0.392814	36.73661	0.471794	1.429217
3	587076	4185730	0.686137	78.04503	0.404836	0.810254
4	586803	4188658	0.912312	62.04774	0.338716	0.678028
5	585453	4189431	1.192491	603.9753	0.358415	0.331801
6	583960	4189666	0.174408	39.61317	0.676958	3.934829
7	583531	4187539	0.644159	45.63178	0.447545	4.534645
8	582834	4183303	1.259556	82.0388	0.26388	0.562346
9	583113	4183390	1.121071	57.24762	0.252328	0.556034
10	582150	4184456	0.808358	70.76471	0.318764	0.819418
11	581536	4183402	0.740242	35.1156	0.278221	0.828325
12	580635	4182186	0.607553	259.4123	0.521899	0.862545
13	579854	4184804	0.224874	42.33631	0.718405	2.765535
14	580796	4184738	0.260857	68.14379	0.579191	4.44827
15	581508	4184819	0.836514	46.54815	0.306777	3.084074
16	582397	4181364	0.865964	194.4628	0.330005	0.419021
17	581415	4181233	0.706037	118.856	0.335946	0.483147
18	579762	4182524	0.240498	76.50954	0.837321	2.594824
19	578038	4183214	0.22841	66.00823	0.96611	3.599756
20	577687	4181034	0.257931	53.12858	0.749234	3.922747
21	577796	4181909	0.255512	46.20576	0.551113	1.707122
22	577141	4179695	0.551056	110.8938	0.399648	0.923288
23	576440	4181071	0.35286	30.3357	0.740413	6.843492
24	578889	4179896	0.514604	36.19072	0.399587	1.491726
25	578293	4179993	0.385666	94.76896	0.551403	1.238816
26	580074	4180296	1.071557	43.56543	0.257665	0.223478
27	580377	4179377	0.997577	29.36562	0.207145	0.496203
28	582656	4180267	0.954858	45.79108	0.259162	0.460101
29	583926	4179404	0.912807	50.92063	0.240322	0.226418
30	587685	4177975	1.235576	83.17037	0.253971	0.118341
31	584283	4181119	0.700841	58.36517	0.301557	0.477994
32	584510	4178599	0.970297	46.63162	0.230465	0.238787
33	583281	4176378	1.387051	48.82418	0.227582	0.378193
34	585718	4177555	1.618428	62.70782	0.203203	0.217641
35	588862	4179008	2.634479	80.73314	0.193157	0.094936
36	586990	4182722	0.547426	30.46534	0.305114	0.745626
37	584355	4182095	0.585182	34.51287	0.27648	0.618785
38	584953	4182683	0.585755	73.19345	0.347747	0.65607
39	582357	4185585	0.167662	37.80471	1.387549	4.741398

اشباع و مقادیر مثبت SI حالت فوق اشباع را نشان می‌دهند.

بهترین روش برای انجام این محاسبه خاص و محاسبات تعادلی به کار بردن یک کد کامپیوتری نظیر PHREEQC است. مزایای استفاده از این کد این است که سنگینی محاسبات توسط کامپیوتر انجام می‌شود و سازگاری پایگاه داده ثابت‌های تعادل امکان مقایسه نتایج از مطالعات مختلف را فراهم می‌آورد.

تشریح کمی واکنش‌های شیمیایی مشخصاً به مقادیر عددی برای ثابت تعادل نیاز دارد. چنین مقادیری می‌تواند با استفاده از اصول ترمودینامیکی یا از جدول‌های موجود در کتاب‌های مرجع ژئوشیمی محاسبه شود. ثابت‌های تعادل، به صورت تابعی از دما بیان می‌شوند که در پایگاه‌های اطلاعاتی کدهای کامپیوتری برای مدل‌سازی دستگاه‌های آبی نظیر PHREEQC نیز موجود هست. در مدل‌سازی هیدروژئوشیمیایی محدوده مورد مطالعه از نرم‌افزار PHREEQC استفاده گردیده است. این نرم‌افزار بر مبنای مدل آبی اشتراک یون‌ها بنا شده است و به منظور اجرایی نمودن محاسبات اندیس اشباع و گونه‌زایی شیمیایی طراحی شده است (Parkhurst and Appelo, 1999). به منظور مدل‌سازی شیمیایی رابطه آب زیرزمینی آبخوان دشت آذرشهر با دریاچه ارومیه از اختلاط شیمیایی نمونه‌های برداشت شده از آب زیرزمینی آبخوان دشت آذرشهر و بادر نظر گرفتن جنس لایه آبدار آبخوان استفاده گردیده و نتایج این اختلاط با نمونه آب دریاچه ارومیه مقایسه گردید. شکل ۸ جهت‌های اختلاط نمونه‌ها را نشان می‌دهد که عبارتند از نمونه‌های شماره ۱۸ و ۱۹، ۲۰ و ۲۳ و نمونه‌های ۲۵ و ۲۲ در حضور لایه آبدار آبخوان. نتایج اولیه کانی‌های محتمل بر اساس ترکیب شیمیایی نمونه‌های آب برداشت شده از منطقه مطالعاتی در جدول ۴ و نتایج اندیس اشباع کانی‌های حاصل از اختلاط و مقایسه آن با نمونه آب دریاچه در جدول ۵ آورده شده است.

۲.۳. مدل‌سازی معکوس ژئوشیمیایی

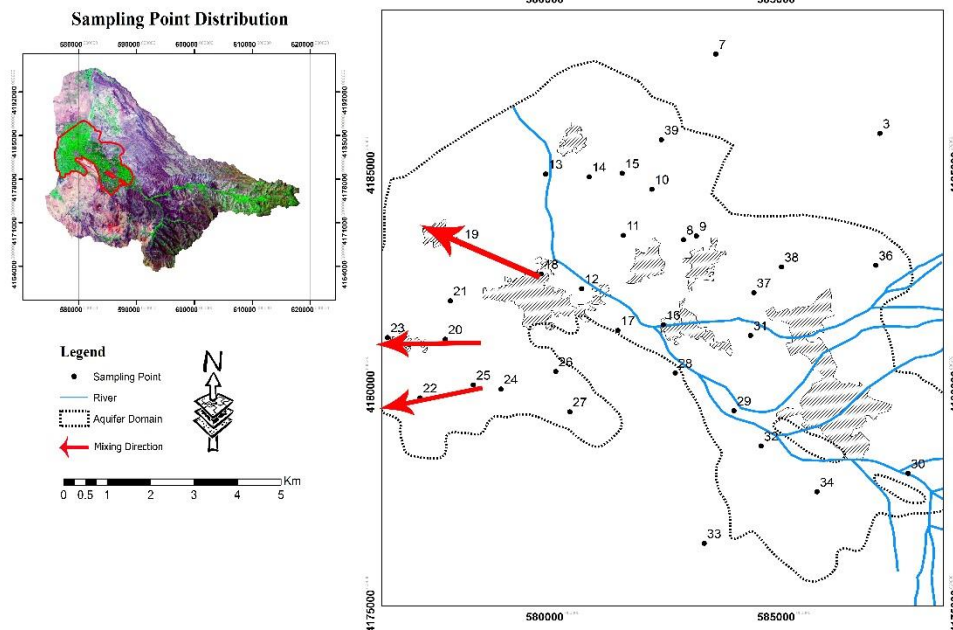
مدل‌سازی معکوس ژئوشیمیایی یکی از ابزارهای مهم برای پی بردن به فرآیندهای ژئوشیمیایی رخ داده در درون آب زیرزمینی می‌باشد. در فرآیند مدل‌سازی، فرآیندهای ژئوشیمیایی رخ داده در طی مسیر حرکت آب (از جمله انحلال، رسوب‌گذاری، اختلاط، تبادل کاتیونی) شبیه‌سازی می‌گردد و با ترکیب نهایی آب مد نظر مقایسه می‌گردد.

تجمع مواد حل شده در آب زیرزمینی را می‌توان به صورت واکنش آب با مجموعه کانی‌های دربرگیرنده محیط متخلخل در نظر گرفت. هیدروژئولوژیست‌ها داده‌های شیمیایی آب را برای دسته‌بندی حالت‌های تعادل نسبت به کانی‌های مختلف به کار می‌برند. این محاسبات در بررسی منطقه‌ای کیفیت آب به شرح این مسئله که چرا شیمی یون‌های اصلی و فرعی در اثر واکنش‌های رسوب‌گذاری و انحلال کانی تغییر می‌یابد، کمک می‌کند.

حرکت از یک واکنش تعادلی به صورت نسبتی از محصول اکتیویته یون (IAP) به ثابت تعادل (K) تعیین می‌شود. محصول اکتیویته یون از طریق جایگزینی مقادیر اکتیویته نمونه در بیان قانون جرم برای یک واکنش محاسبه می‌گردد.

این تئوری حالت اشباع آب زیرزمینی نسبت به یک یا چندین فاز کانیایی را تعیین می‌کند. وقتی $IAP/K < 1$ باشد، آب زیرزمینی در حالت تحت اشباع نسبت به کانی مورد نظر قرار دارد. وقتی $IAP/K = 1$ باشد، آب زیرزمینی در تعادل شیمیایی با کانی است و وقتی $IAP/K > 1$ باشد، آب زیرزمینی فوق اشباع است. برای ایجاد حالت تحت اشباع نسبت به یک کانی، باید کانی وجود داشته باشد. برای ایجاد حالت فوق اشباع در شبکه رسوب‌گذاری کانی، باید هسته مناسب موجود باشد.

حالت اشباع اغلب بر حسب شاخص اشباع (SI) بیان می‌شود که به صورت لگاریتم IAP/K تعریف شده است. وقتی یک کانی در تعادل با یک محلول قرار دارد، شاخص اشباع صفر است. مقادیر منفی SI نشانگر حالت تحت



شكل ٨. جهت‌هاى انجام واكنش نمونه‌هاى محدوده مطالعاتى

جدول ٤. نتايج اوليه كانى‌هاى محتمل بر اساس تركيب شيميايى نمونه‌هاى آب برداشت شده از منطقه مطالعاتى در محيط نرم افزار PHREEQC

Sample	18	19	20	22	23	25
Phase	SI					
Anhydrite	-1.07	1.03	-0.78	1.40	-0.55	-1.16
Aragonite	0.30	0.24	-0.24	2.73	-0.02	-0.10
Calcite	0.45	0.39	-0.09	2.88	0.13	0.05
CO2(g)	-1.44	-1.51	-1.04	0.12	-1.29	-0.98
Dolomite	0.32	0.30	-0.58	4.80	0.12	-0.54
Gypsum	-0.67	-0.65	-0.39	1.77	-0.17	-0.78
H2(g)	-21.83	-21.82	-20.83	-22.00	-21.24	-21.04
H2O(g)	-1.75	-1.70	-1.72	-1.73	-1.69	-1.70
Halite	-5.22	-5.13	-4.76	-3.10	-4.39	-5.34
O2(g)	-42.88	-42.24	-44.45	-42.08	-43.22	-43.80
Sylvite	-6.01	-5.88	-5.89	-3.57	-5.29	-6.12
	log IAP					
	-5.25	5.23	-4.97	-2.79	-4.75	-5.36
	-7.99	8.05	-8.53	-5.56	-8.31	-8.39
	-2.78	-2.88	-2.40	-1.24	-2.67	-2.35
	-16.55	-16.61	-17.47	-12.09	-16.80	-17.45
	-5.25	-5.23	-4.97	-2.82	-4.75	-5.36
	-24.91	-24.90	-23.91	-25.07	-24.32	-24.12

ادامه جدول ۴. نتایج اولیه کانی‌های محتمل بر اساس ترکیب شیمیایی نمونه‌های آب برداشت شده از منطقه مطالعاتی در محیط نرم افزار PHREEQC

Sample	18	19	20	22	23	25
	-0.00	-0.00	-0.00	-0.01	-0.00	-0.00
	-3.66	-3.57	-3.20	-1.54	-2.83	-3.78
	-45.70	-45.07	-47.28	-44.91	-46.06	-46.63
	-5.21	-5.06	-5.08	-2.76	-4.46	-5.30
log K						
CaSO4	-4.18	4.20	-4.19	-4.19	-4.20	-4.20
CaCO3	-8.28	-8.29	-8.29	-8.29	-8.29	-8.29
CaCO3	-8.43	-8.44	-8.44	-8.44	-8.44	-8.44
CO2	-1.35	-1.37	-1.36	-1.36	-1.38	-1.37
CaMg(CO3)2	-16.86	-16.91	-16.89	-16.90	-16.92	-16.91
CaSO4:2H2O	-4.58	-4.58	-4.58	-4.58	-4.58	-4.58
H2	-3.07	-3.08	-3.08	-3.08	-3.08	-3.08
H2O	1.75	1.70	1.72	1.71	1.69	1.70
NaCl	1.56	1.56	1.56	1.56	1.56	1.56
O2	-2.82	-2.83	-2.83	-2.83	-2.84	-2.83
KCl	0.80	0.82	0.81	0.81	0.83	0.82

۳. نتایج و بحث

که اکثر نمونه‌های آب زیرزمینی آبخوان دشت آذرشهر در منطقه‌ای قرار گرفته‌اند که هیچ آنیون یا کاتیونی غالب نیست و یا در منطقه‌ای که اسیدهای ضعیف بر اسیدهای قوی برتری داشته و مجموع کاتیون‌های کلسیم و منیزیم بر سدیم و پتاسیم غالب است. اما نمونه آب دریاچه در محدوده سدیم-کلراید قرار گرفته است. نزدیک‌ترین نمونه به این ترکیب نمونه شماره ۷ می‌باشد که خارج از محدوده آبخوان و با فاصله از مرز آبخوان با شوره‌زارهای دریاچه قرار گرفته است و احتمالاً متأثر از فعالیت‌های انسان‌زاد در منطقه است. باتوجه به دیاگرام پایپر رسم شده برای نمونه‌های برداشت شده می‌توان این‌چنین بیان کرد که تیپ غالب آب زیرزمینی آبخوان از نوع کلسیم-سدیم بیکربناته است و در منطقه شمال و غرب دشت از نوع کلسیم-سدیم کلراید است. دیاگرام استیف رسم شده برای نمونه‌های منتخب نیز تشابهی بین میزان عناصر اصلی موجود در نمونه‌های آب زیرزمینی و نمونه آب دریاچه

نتایج حاصل از آنالیز ژئوشیمیایی نمونه‌های آب برداشت شده از آبخوان دشت آذرشهر و مقایسه آن با ترکیب شیمیایی آب دریاچه ارومیه نشان داد که بیشترین میزان کاتیون‌ها در آب زیرزمینی و آب دریاچه به ترتیب متعلق به Ca^{++} و Na^+ می‌باشد که اولی مشخصه آب‌های شیرین قاره‌ای و دومی مشخصه بارز آب دریا و آب‌های فوق شور می‌باشد. همچنین آنیون‌های غالب به ترتیب در جهت عمومی جریان و همگام با تغییر تیپ غالب آب از HCO_3^- شروع به SO_4^{--} در میانه جریان و Cl^- در انتهای مسیر جریان تبدیل می‌شود که نشان‌دهنده سیر طبیعی تغییر تیپ آب در اثر حرکت در محیط متخلخل است. آنیون غالب برای آب دریاچه نیز Cl^- می‌باشد. که صفت بارز آب‌های فوق شور است.

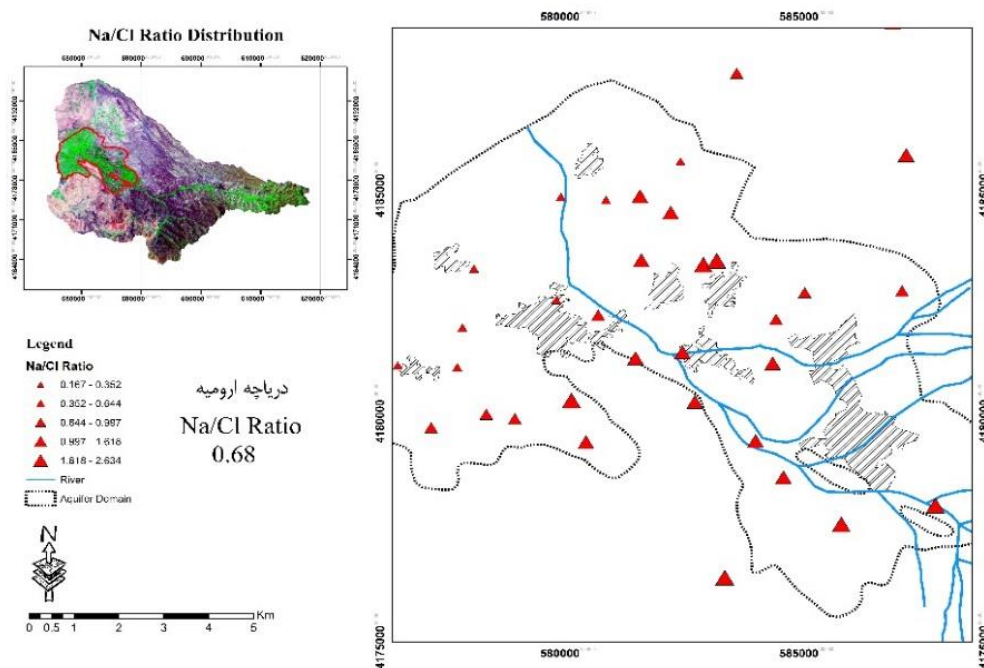
رسم دیاگرام پایپر برای نمونه‌های آب زیرزمینی دشت و همچنین نمونه آب دریاچه ارومیه (شکل ۵) نشان داد

میزان این نسبت متعلق به شمال غرب آبخوان می باشد که به علت نفوذ آب شور میزان کلراید آن بسیار بیشتر از سدیم می باشد.

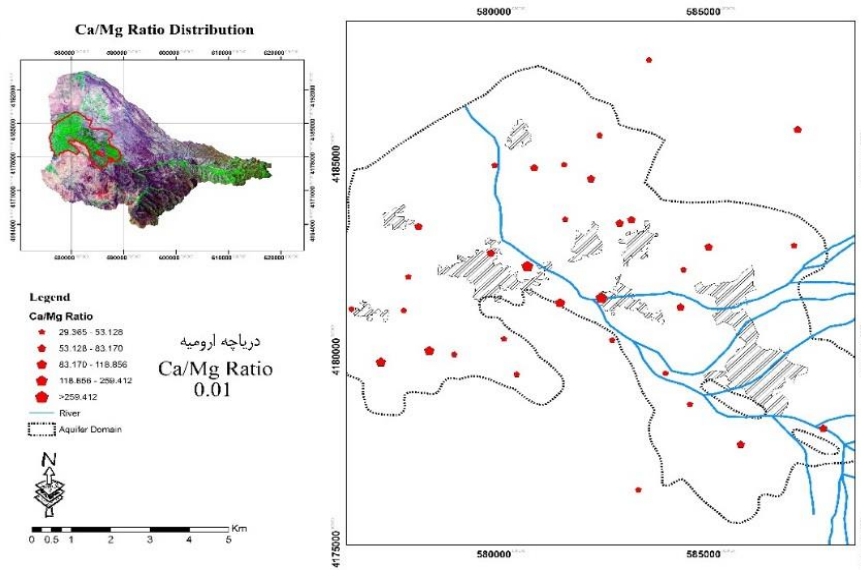
یک از مشخصه های بارز نفوذ آب شور به آبخوان ساحلی نسبت $(Ca^{++} / (HCO_3^- + SO_4^-) / Mg^{++} Ca^{++})$ است. که با غنی شدگی Ca^{++} نسبت به غلظتش در آب دریا مشخص است. نسبت های بزرگ تر از ۱ مشخصه بارز آب قاره ای هستند و هرچه به آب شور نزدیک می شوند این نسبت کوچک تر می شود. چنانکه مشاهده می شود این نسبت در آب دریاچه ارومیه به ۰/۰۱ می رسد. شکل ۱۰ به ترتیب نشان دهنده نسبت $Mg^{++} Ca^{++}$ و $(Ca^{++}) / (HCO_3^- + SO_4^-)$ است.

نشان نداد که دلیلی بر عدم ارتباط هیدرولیکی آب آبخوان و دریاچه می باشد.

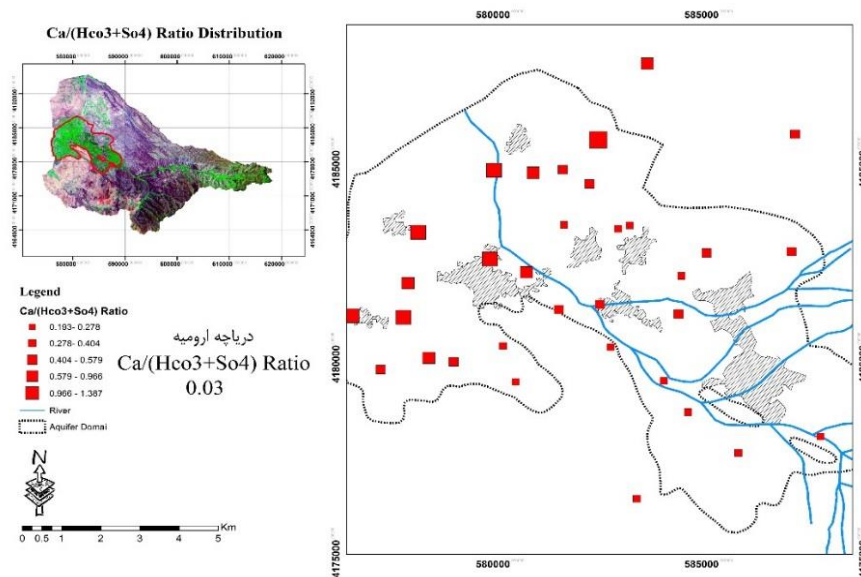
بررسی نسبت های ژئوشیمیایی یکی از راه های پایش نفوذ آب شور است و نشان دهنده ارتباط هیدرولیکی دریا و سفره ساحلی. نسبت $Cl^- Na^+$ در نفوذ آب شور معمولاً کمتر از مقادیر دریاست (یعنی نسبت مولار < 0.86). از سویی دیگر نسبت بالای ۱ عموماً مشخصه فعالیت های انسان زاد نظیر فاضلاب شهری است. بنابراین نسبت های پایین $Cl^- Na^+$ ترکیب شده با دیگر پارامترهای ژئوشیمیایی می تواند به نفوذ آب شور را بازگو کند. حتی در مقادیر غلظت پایین کلراید در مراحل اولیه شور شدن (Bear and Cheng, 2010). شکل ۹ گسترش نسبت $Cl^- Na^+$ در محدوده مطالعاتی را نشان می دهد. کمترین



شکل ۹. گسترش نسبت $Cl^- Na^+$ در محدوده مطالعاتی



(الف)

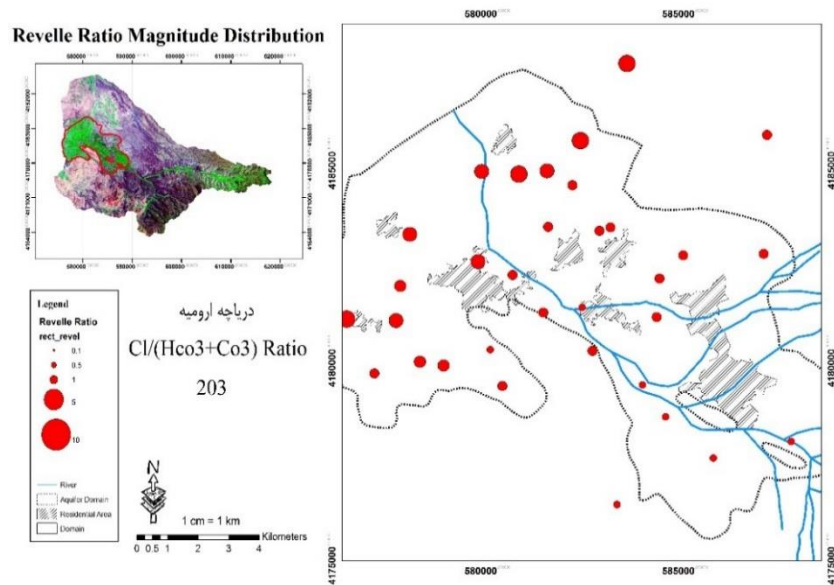


(ب)

شکل ۱۰. گسترش نسبت‌های الف) Ca^{++} / Mg^{++} و ب) $(Ca^{++} / (HCO_3^- + SO_4^{--}))$

می‌باشد. این گسترش احتمالاً بیانگر اختلاط آبی شور با آب شیرین سفره است اما با توجه به نحوه گسترش آن و از طرف دیگر با مقایسه این نسبت با آب دریاچه، احتمال می‌رود که منبع نفوذ آب شور از دریاچه نبوده بلکه احتمالاً از آب محبوس شده در شوره‌زار مجاور آبخوان می‌باشد.

Revelle (1941) نسبت $[Cl^- / (HCO_3^- + CO_3^{--})]$ را به‌عنوان معیاری جهت تشخیص نفوذ آب شور به آبخوان ساحلی بیان کرده است. این نسبت جهت رتبه‌بندی فاکتور تأثیر وجود آب شور نفوذ کرده استفاده می‌گردد. نسبت بیشتر از ۱/۵ بیانگر نفوذ آب شور به آبخوان ساحلی است. شکل ۱۱ بیانگر گسترش این نسبت در محدوده مطالعاتی



شکل ۱۱. پراکنش و دانسیته نسبت Revelle در محدوده مطالعاتی

واکنش‌های شیمیایی محتمل با محیط متخلخل و مقایسه نتایج آن با اندیس‌های اشباع همین کانی‌ها در آب دریاچه مشخص گردید که هیچ‌گونه شباهتی بین ترکیبات منتج از واکنش و ترکیب آب دریاچه وجود ندارد و احتمال ارتباط هیدرولیکی آب زیرزمینی دشت آذرشهر با دریاچه به حداقل می‌رسد.

نتایج مدل‌سازی ژئوشیمیایی و اختلاط نمونه‌های آب زیرزمینی با یکدیگر در جهت جریان و نزدیک‌ترین فاصله به دریاچه ارومیه، در جدول ۵ و به صورت مقایسه اندیس‌های اشباع کانی‌های محتمل آورده شده است. پس از اعمال اختلاط نمونه‌های آب زیرزمینی آبخوان در حضور لایه آبدار منطقه مورد مطالعه، و محاسبه

جدول ۵. مقایسه اندیس‌های اشباع کانی‌های محتمل در آب زیرزمینی منطقه مطالعاتی با آب دریاچه

Phase	SI	SI MIX(25-22)	SI MIX(20-23)	SI MIX(18-19)
Anhydrite	-2.83	1.03	-0.65	-1.05
Aragonite	-2.60	2.40	-0.15	0.27
Calcite	-2.46	2.55	-0.00	0.42
CO ₂ (g)	-2.88	-0.20	-1.15	-1.47
Dolomite	-2.43	4.16	-0.24	0.31
Gypsum	-2.54	1.41	-0.26	-0.66
H ₂ (g)	-22.05	-37.18	-10.82	-10.28
H ₂ O(g)	-1.51	-1.72	-1.70	-1.73
Halite	-3.50	-3.62	-4.55	-5.18
O ₂ (g)	-39.19	-11.61	-64.27	-65.64
Sylvite	-4.66	-4.08	-5.51	-5.94

جریان تپ آب زیرزمینی ابتدا بیکربناته، سپس سولفات‌ها و در نهایت کلراته می‌شود. نسبت‌های ژئوشیمیایی استفاده شده نشان دادند که آبخوان دشت آذرشهر با نفوذ آب شور مواجه است اما نه از سمت دریاچه بلکه به نظر می‌رسد وجود آب محبوس در لایه‌های نمکی نیمه تراوای شمال غرب و غرب آبخوان موجب این شوری باشد که ترسیم اندیس رول و روند آن مؤید این نظر می‌باشند. به‌منظور بررسی بیشتر از مدل‌سازی ژئوشیمیایی آب زیرزمینی دشت آذرشهر استفاده گردید که نمونه‌های آب واکنش داده شده با هم و محیط متخلخل محدوده مورد مطالعه ترکیبات احتمالی بسیار متفاوتی با آب دریاچه را نشان دادند که مبین این نکته است که حتی با در نظر گرفتن واکنش آب زیرزمینی آبخوان دشت آذرشهر در جهت جریان و با محیط متخلخل محدوده مورد مطالعه باز هم ارتباطی بین نمونه آب دریاچه و آب زیرزمینی آبخوان دشت آذرشهر مشاهده نمی‌شود. تحقیق حاضر نشان داد که استفاده از روش‌ها و مدل‌سازی ژئوشیمیایی در شرایطی که امکان مطالعات ایزوتوپی وجود ندارد، ابزاری کارا و مناسب در جهت بررسی ارتباط هیدرولیکی منابع آب مختلف با یکدیگر است.

۴. نتیجه‌گیری

مسئله نفوذ آب شور دریاچه ارومیه به آبخوان‌های مجاور دریاچه که با حجم پمپاژ بالایی مواجه هستند یکی از موارد محتمل در کاهش سطح آب دریاچه ارومیه و بحران آن است که در صورت ارتباط هیدرولیکی آبخوان‌های مجاور با دریاچه امکان‌پذیر خواهد بود. مطالعه حاضر برای نخستین بار با بهره‌گیری از روش‌های ژئوشیمیایی در جهت مطالعه ارتباط هیدرولیکی آبخوان دشت آذرشهر با دریاچه گام برداشته است بدین صورت که، بررسی آنالیز شیمیایی نمونه‌های گردآوری شده از آب زیرزمینی آبخوان دشت آذرشهر و مقایسه آن‌ها با ترکیب نمونه آب دریاچه ارومیه نشان داد که شباهت کمی بین این دو وجود دارد. همچنین رسم دیاگرام‌های پایرو ستاره‌ای کمترین میزان تشابه بین نمونه‌های مذکور را نشان دادند؛ چنان که تپ آب دریاچه ارومیه سدیم کلراید بوده و نمونه‌های آب زیرزمینی در زون اختلاط قرار گرفته و علاوه بر آن هیچ‌گونه شباهت بصری بین نمونه آب دریاچه ارومیه و نمونه‌های آب زیرزمینی آبخوان دشت آذرشهر وجود ندارد. بررسی نتایج نسبت‌های ژئوشیمیایی رایج پیرامون نفوذ آب شور نشان داد که آب زیرزمینی دشت سیر تکاملی عادی خویش را طی می‌کند یعنی در راستای جهت

منابع

- اصغری مقدم، الف. ۱۳۸۹. اصول شناخت آب‌های زیرزمینی، چاپ اول، انتشارات دانشگاه تبریز، تبریز.
- تحقیقات منابع آب. ۱۳۹۲. گزارش بررسی تغییر شرایط محیطی در حوضه آبریز دریاچه ارومیه (وضعیت آب زیرزمینی).
- شرکت مهندسين مشاور یکم. ۱۳۸۵. مطالعات آب زیرزمینی دشت آذرشهر، جلد اول.
- نخعی، م. ۱۳۸۸. مقدمه‌ای بر آب‌های زیرزمینی، چاپ اول، انتشارات آراد کتاب، تهران.
- Abd-Elhamid, H. F., and Javadi, A. A. 2011. A Density-Dependent finite element model for analysis of saltwater intrusion in coastal aquifers, *Journal of Hydrology*.
- Bear, J., and Cheng, A. H. D. 2010. *Modeling groundwater flow and contaminant transport*, Springer.
- Dongmei, H., Claus, K., Xianfang, S., Guoqiang, X. and Jilong, Y. 2011. Geochemical and isotopic evidence for paleo-seawater intrusion into the south coast aquifer of Laizhou bay, China. *Applied Geochemistry*.
- Garing, C., Luquot, L., Pezard, P. A. and Gouze, P. 2013. Geochemical investigations of saltwater intrusion into the coastal carbonate aquifer of Mallorca, Spain. *Applied Geochemistry*.

- Gopinath, S., and Srinivasamoorthy, K. 2015. Application of geophysical and hydro geochemical tracers to investigate salinization sources in Nagapatnam and Karaikal coastal aquifers, South India. International Conference on Water Resources, Coastal and Ocean Engineering (ICWRCOE).
- Han, D. M., Song, X. F., Currell, M., Yang, J. L. and Xiao, G. Q. 2014. Chemical and isotopic constraints on evolution of groundwater salinization in the coastal plain aquifer of Laizhou bay, China. Journal of Hydrology.
- Jones, B. F., Vengosh, A., Rosenthal, E. and Yechieli, Y. 1999. Geochemical investigations. Chapter 3. In: Seawater intrusion into coastal aquifers concepts, methods and practices, Kluwer.
- Parkhurst D. L., and Appelo C.A.J. 1999. User's guide to PHRE-EQC (Version 2) - A computer program for speciation, batch reaction, one-dimensional transport and inverse geochemical calculation. Water Resources Investigation Report, USGS.
- Revelle, R., 1941. Criteria for recognition of seawater in groundwater, American Geophysics Union.
- Suma, C. S., Srinivasamoorthy, K., Saravanan, K., Faizalkhan, A., Prakash, R. and Gopinath, S. 2015. Geochemical modeling of groundwater in Chinnar River Basin: A source identification perspective. International Conference on Water Resources, Coastal and Ocean Engineering (ICWRCOE).
- Tillman, F. D., Oki, D. S., Johnson, A. G., Barber, L. B. and Beisner, K. R. 2014. Investigation of geochemical indicators to evaluate the connection between inland and coastal groundwater systems near Kaloko-Honokohau national historical park, Hawaii. Applied Geochemistry.
- Zghibi, A., Tarhouni, J. and Zouhri, L. 2013. Assessment of seawater intrusion and nitrate contamination on the groundwater quality in the Korba coastal plain of Cap-Bon (North-east of Tunisia). Journal of African Earth Sciences.