

استفاده از مدل ژئوشیمیایی معکوس و روش‌های هیدروژئوشیمی در جهت بررسی منشأ شوری آبخوان سروستان

سعیده سامانی^{۱*}، فردین بوستانی^۲، مراد ایرجی زاده^۳

۱- دکتری هیدروژئولوژی، استادیار پژوهشی موسسه تحقیقات آب

۲- استاد گروه مهندسی منابع آب، دکتری مهندسی آب، دانشکده علوم کشاورزی، دانشگاه آزاد شیراز

۳- کارشناسی ارشد مهندسی منابع آب، دانشکده علوم کشاورزی، دانشگاه آزاد شیراز

* نویسنده مسئول: samani_1386s@yahoo.com

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۹/۰۳/۰۲

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۸/۱۰/۱۸

چکیده

در این مطالعه مدل ژئوشیمیایی معکوس با استفاده از نرم‌افزار فری کیو سی و روش آماری آنالیز خوشه‌ای برای تعیین منشأ تشکیل‌دهنده‌های شیمیایی و منشأ شوری در آبخوان دشت سروستان به کار گرفته شده است. محدوده مطالعاتی سروستان در جنوب حوضه آبریز دریاچه‌های طشک - بختگان و مهارلو واقع شده است. برای بررسی کیفیت آب زیرزمینی در منطقه مورد مطالعه، ۲۵ منبع انتخابی کیفی آب زیرزمینی در خردادماه سال ۱۳۹۷ مورد استفاده قرار گرفته است. از روش آماری آنالیز خوشه‌ای جهت خوشه‌بندی نمونه‌های آب زیرزمینی استفاده گردید و با استفاده از این روش نمونه‌های آب زیرزمینی به دو گروه واقع در منطقه تغذیه و تخلیه تقسیم‌بندی گردید، به‌طوری‌که گروه ۱ با تیپ کلرید کلسیم دارای آب تغذیه شده از ارتفاعات جنوب شرق و شرق منطقه است و گروه ۲ با تیپ کلرید سدیم جز منطقه تخلیه و واقع در بخش غرب و شمال غرب دشت و مناطق مجاور با دریاچه مهارلو می‌باشند. در روش آماری تحلیل عاملی دو عامل مؤثر در فرآیندهای هیدروژئوشیمیایی که کیفیت آب زیرزمینی دشت سروستان را تحت تأثیر قرار داده‌اند شناسایی گردید. عامل اول مربوط به شور شدگی آبخوان است و عامل دوم هوازدگی سازندهای آهکی با محتوای بالای کلسیت واقع در بخش شرق و جنوب شرق منطقه را مؤثر در کیفیت آب زیرزمینی نشان داد. نتیجه مدل ژئوشیمیایی معکوس به کمک روش آماری آنالیز خوشه‌ای و نمایه‌های اشباع نتایج روش آماری تحلیل عاملی را تأیید می‌کند. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که ادغام نتایج آماری از داده‌های هیدروژئوشیمیایی با مدل ژئوشیمیایی معکوس در شناسایی فاکتورهای زمین‌شناسی مؤثر در کیفیت آب زیرزمینی کمک شایانی می‌نماید. در این محدوده مطالعاتی مهم‌ترین مکانیسم مؤثر در کیفیت آب گروه دوم و شوری آب در این گروه تحت تأثیر حضور سازندهای هرمز و ساچون واقع در بخش‌های شمال و شمال شرقی محدوده مطالعاتی و جریان‌های معکوس از سمت دریاچه مهارلو به سمت آبخوان است.

واژه‌های کلیدی: مدل ژئوشیمیایی، نرم‌افزار فری کیو سی، منشأ شوری، دشت سروستان.

۱- مقدمه

در مطالعات منابع آب زیرزمینی به همان اندازه که کمیت آب‌های زیرزمینی مهم است، کیفیت آن نیز حائز اهمیت است (والتون^۸، ۱۹۷۰). هیدروژئولوژی شیمیایی، مطالعه انرژی شیمیایی سیستم هیدروژئولوژیکی است و می‌تواند به عنوان مطالعه کنترل‌های زمین‌شناسی و هیدرولوژیکی بر روی خصوصیات شیمیایی آب زیرزمینی تعریف گردد (الی^۹، ۱۹۹۳). تقریباً همه آب‌های زیرزمینی از آب باران و برفی که به درون خاک نفوذ کرده است، به وجود می‌آیند و خاک توانایی بی‌نظیری برای تغییر دادن کیفیت شیمیایی آب دارد. هنگامی که آب در خطوط جریان از منطقه تغذیه به سمت منطقه تخلیه حرکت می‌کند، شیمی آن توسط انواع گوناگونی از فرآیندهای ژئوشیمیایی تحت تأثیر قرار می‌گیرد. هیدروشیمی آب‌های زیرزمینی، اثرات حال و گذشته عواملی همچون اقلیم، زمین‌شناسی، هیدرولوژی و بیولوژی را که بر روی شیمی آب‌ها مؤثر می‌باشند مورد ارزیابی قرار می‌دهد. این عوامل شامل شیمی آب نفوذی، که عمدتاً به وسیله درجه حرارت هوا کنترل می‌شود، تناوب، میزان و مدت زمان بارش، کانی‌شناسی، پوشش گیاهی، خاک و نرخ تولید گاز خاک می‌باشند. عوامل دیگری که بر روی شیمی آب زیرزمینی مؤثر هستند، شامل ضخامت لایه‌های زمین‌شناسی، نوع تخلخل و وضعیت توپوگرافی می‌باشند. در حقیقت این عوامل نرخ تغذیه، مسیر جریان و زمان ماندگاری آب زیرزمینی را کنترل می‌نمایند.

برخی از مطالعات نشان داده‌اند که کیفیت آب می‌تواند از طریق واکنش بین آب و سنگ و رسوبات مسیر جریان تحت تأثیر قرار گیرد. بنابراین استفاده از یون‌های اصلی به عنوان ردیاب‌های طبیعی یک روش قابل قبول برای تعیین مسیر جریان در آبخوان است. در این صورت واکنش‌های مسیر

جریان آب زیرزمینی با مواد آبخوان را می‌توان از طریق مدل‌های تکامل هیدروژئوشیمیایی مورد بررسی قرار داد (وایت^{۱۰} و همکاران، ۱۹۸۰؛ هیم^{۱۱}، ۱۹۸۵؛ بک^{۱۲}، ۱۹۸۶). فریز و چری^{۱۳} در سال ۱۹۷۹ اهمیت فرایندهای ژئوشیمیایی را در تفسیر تکامل شیمیایی آب زیرزمینی مورد بررسی قرار دادند. جرلا^{۱۴} در سال ۱۹۹۲ مسیر جریان و تکامل ژئوشیمیایی آب زیرزمینی در محدوده دره قرمز واقع در شمال دوکاتا (آمریکا) را مورد بررسی قرار داد. با توجه به رابطه تعادلی بین کانی و آب زیرزمینی، ایشان به این نتیجه رسیدند که ترکیب آب زیرزمینی این منطقه تحت تأثیر هوازدگی کربنات، انحلال ژیپس و تبادل یونی است. یک سری محققان دیگر نیز رابطه بین شیمی آب زیرزمینی و هوازدگی کانی را مورد بررسی قرار داده‌اند (گارلز و ماکنزی^{۱۵}، ۱۹۶۷؛ بوزر و جوز^{۱۶}، ۲۰۰۲).

مفهوم رخساره‌های هیدروژئوشیمی در شناسایی خصوصیات شیمیایی آب و سیستم هیدروژئولوژی توسط یک سری محققان مورد استفاده قرار گرفته است (بک، ۱۹۶۰؛ مورگان و وینر^{۱۷}، ۱۹۶۲؛ سیبر^{۱۸}، ۱۹۶۵). به‌طوری که رخساره‌های هیدروژئوشیمی بیانگر تأثیر روندهای شیمیایی در محیط سنگ‌شناسی و مسیر جریان آب است. محیط سنگ‌شناسی تعیین‌کننده نوع رخساره و مسیر جریان کنترل‌کننده توزیع رخساره است. بنابراین رخساره‌های هیدروژئوشیمی فراهم‌کننده مدلی جهت بیان منشأ و توزیع انواع گونه‌های شیمیایی در آب زیرزمینی در محدوده مطالعاتی است (بک و هانشاو^{۱۹}، ۱۹۶۵). یک سری از محققان (کیمن اسکی^{۲۰}، ۱۹۵۸؛ چبوتارو^{۲۱}، ۱۹۹۵) سه زون هیدرودینامیکی عمودی در انواع آب‌ها شناسایی کردند. بالاترین زون با کمترین مقدار انحلال با تیپ بیکربنات است. در منطقه وسط مقدار انحلال افزایش یافته

¹⁵ Garrels and Mackenzie

¹⁶ Bowser and Jones

¹⁷ Morgan and Winner

¹⁸ Seaber

¹⁹ Back and Hanshaw

²⁰ Kamensky

²¹ Chebotarev

⁸ Walton

⁹ Alley

¹⁰ White

¹¹ Hem

¹² Back

¹³ Freeze and Cherry

¹⁴ Gerla

تعریف می‌گردد در آبخوان موجود باشد (گولر و تاینی، ۲۰۰۴). در مطالعات متعددی از این مدل برای شناسایی ترکیب هیدروژئوشیمیایی آبخوان، منشأ شوری آبخوان، واکنش‌های مسیر جریان، بررسی تبادل آب‌های سطحی و زیرزمینی و همچنین پیش‌بینی کیفیت منابع آب سطحی استفاده گردیده است (سامانی و مقدم، ۲۰۱۵؛ نادری و جلالی، ۲۰۱۶؛ غالی و همکاران^{۲۹}، ۲۰۱۷؛ ابراهیم و همکاران، ۲۰۱۸؛ مانوج^{۳۰} و همکاران، ۲۰۱۹).

هدف این مطالعه تعیین منشأ تشکیل‌دهنده‌های شیمیایی و منشأ شوری در آبخوان دشت سروستان است. برای رسیدن به این هدف روش آماری آنالیز خوشه‌ای و تحلیل عاملی مورد استفاده قرار گرفته، نمایه‌های اشباع محاسبه گردیده است و در نهایت مدل ژئوشیمیایی معکوس جهت شناسایی مکانیسم‌های کنترل‌کننده کیفیت آب زیرزمینی در آبخوان دشت سروستان به کار گرفته شده است. در ضمن جهت تأیید نتایج مدل معکوس، مدل صحت سنجی گردیده است.

۲-۱- توصیف محدوده مطالعاتی

۲-۱-۱- وضعیت جغرافیایی محدوده مطالعاتی

محدوده مطالعاتی دشت سروستان در جنوب حوزه آبریز دریاچه‌های طشک - بختگان و مهارلو، در ۳۰ کیلومتری جنوب شرقی شیراز واقع در استان فارس قرار دارد شکل (۱). این محدوده با مساحت ۱۶۴۱ کیلومتر مربع از سمت شمال به گشنگان مرودشت، از شمال غرب به شیراز، جنوب به شهرستان جهرم، و از شرق به شهرستان فسا محدود شده است. دریاچه شور مهارلو در غرب دشت واقع شده است. حداکثر ارتفاع در این محدوده ۲۹۷۰ متر در قله کوه کهدان در جنوب غرب دشت و حداقل آن ۱۴۶۰ متر در خروجی محدوده به سمت دریاچه مهارلو بوده است.

و تیپ آب سولفات است. پایین‌ترین زون که درجه بالای انحلال را نشان می‌دهد و تیپ کلرید سدیم است. جهت مدیریت اطلاعات و رسیدن به تفسیرهای قابل اعتماد، آنالیزهای آماری در مطالعات هیدروژئوشیمیایی ضروری است. روش‌های آماری متعددی جهت تعیین و مشخص نمودن دلایل تغییرات در کیفیت آب زیرزمینی مورد استفاده قرار گرفته است. از جمله این روش‌ها روش آماری آنالیز خوشه‌ای و تحلیل عاملی است. برای مثال گولر و تاینی^{۲۲} در سال ۲۰۰۴ از روش آماری آنالیز خوشه‌ای و مدل ژئوشیمیایی معکوس برای شناسایی عوامل کنترل‌کننده کیفیت آب زیرزمینی در منطقه‌ای در کالیفرنیا استفاده نمودند. این مطالعه نشان داد که کیفیت آب زیرزمینی در محدوده مطالعاتی تحت تأثیر هوازدگی سیلیکات، انحلال نمک، رسوب کلسیت و تبادل یونی است. بلخیری و همکاران در سال ۲۰۱۰ نیز از این روش‌ها برای شناسایی دلیل شوری آب زیرزمینی در منطقه آلبجریا استفاده نمودند. روش آماری آنالیز خوشه‌ای و تحلیل عاملی توسط محققان زیادی جهت تفسیر هیدروژئوشیمیایی آب زیرزمینی مورد استفاده قرار گرفته است (گردنی^{۲۳} و همکاران، ۱۹۹۶؛ سرون^{۲۴} و همکاران، ۱۹۹۹؛ سانچز-مارتوس^{۲۵} و همکاران، ۲۰۰۱؛ بلخیری و همکاران^{۲۶}، ۲۰۱۰). مدل ژئوشیمیایی معکوس با نرم‌افزار فری کیوسی بر اساس یک مدل تعادلی ژئوشیمیایی است که در شناسایی واکنش‌هایی که در طول مسیر جریان، هیدروشمی آب را تحت تأثیر قرار می‌دهند به کار می‌رود (پلامر و بک^{۲۷}، ۱۹۸۰؛ پلامر و همکاران، ۱۹۹۹؛ پارخواست و اپلو^{۲۸}، ۱۹۹۹). این مدل بر اساس یک سری فرض‌هایی است که شامل موارد زیر هستند: فرایند پراکندگی در مسیر جریان روی نمی‌دهد، واکنش‌های شیمیایی از نظر ترمودینامیکی قابل اعتماد باشند و فاز کانی که برای مدل

²⁷ Plummer and Back

²⁸ Parkhurst and Appelo

²⁹ Ghali

³⁰ Manoj

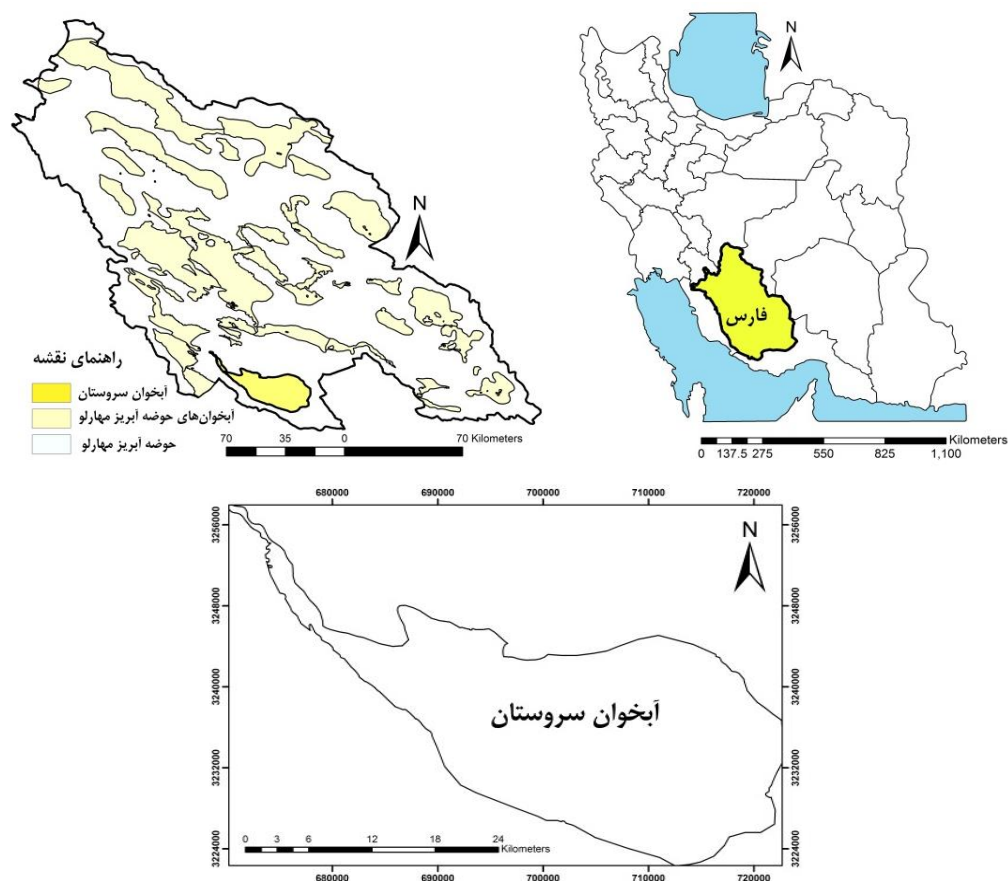
²² Güler and Thyne

²³ Grande

²⁴ Ceron

²⁵ Sanchez-Martos

²⁶ Belkhiri



شکل ۱: نقشه جغرافیایی محدوده مورد مطالعه

۱-۲-۲- زمین شناسی و آب زمین شناسی منطقه

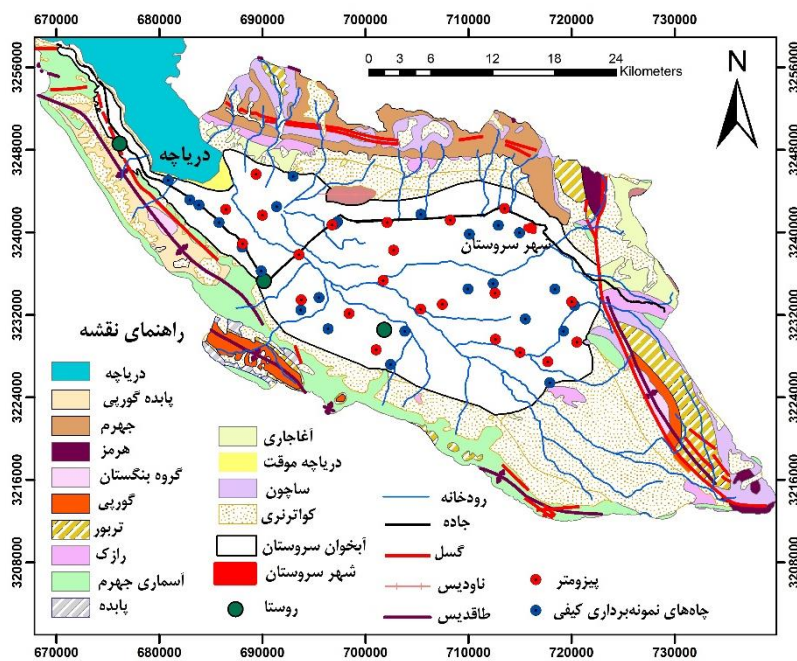
گستره مورد مطالعه از نظر چینه شناختی در بخش زاگرس چین خورده قرار دارد. واحدهای چینه رخنمون یافته در سطح منطقه از نظر جنس و سن بسیار متنوع است به طوری که رسوباتی از جنس گچ، نمک، انیدریت، مارن، آهک، دولومیت، ماسه سنگ آهکی، کنگلومرا، شن، ماسه، رس، سیلت و نهشته های ریزدانه دریاچه ای از دوره های زمین شناسی از دوره اینفرا کامبرین تا عهد حاضر در سطح حوضه قابل بررسی و مشاهده است (شکل ۲).

در ارتفاعات محدوده مطالعاتی سروستان سازندهایی همچون آسماری - جهرم، تربور، گروه بنگستان، آغاچاری، بختیاری، رازک، ساچون، پابده - گورپی و هرمز به ترتیب با وسعت ۲۳۶/۷۳، ۶۹/۳۲، ۱۲/۹۸، ۴۰/۲۳، ۹/۰۷، ۳۲/۴۲، ۷۶/۶۴ و ۷۶/۷۷ کیلومتر مربع رخنمون دارند. سازند آسماری - جهرم متشکل از سنگ آهک می تواند

نفوذپذیری مناسبی داشته باشد. سازند تربور نیز با لایه بندی خوب از نفوذپذیری نسبتاً مناسبی می تواند برخوردار باشد. گروه بنگستان خود شامل سازندهای کژدمی، سروک و ایلام است که از این میان سازند سروک (سنگ آهک) قابلیت نفوذ نزولات جوی را دارا است. سازند آغاچاری متشکل از ماسه سنگ قابلیت نفوذ چندانی نداشته، سازند بختیاری متشکل از کنگلومرا در صورت وجود سیمان آهکی بین ذرات تشکیل دهنده قابلیت نفوذ مناسب نزولات جوی را دارا است. سازند مارنی رازک (آهک رس) و شیل های پابده - گورپی نمی توانند به خاطر ماهیت متشکله آنها از نفوذپذیری مناسبی برخوردار باشند. سازند تبخیری ساچون (ژیپس و انیدریت) و هرمز (متشکل از نمک، ژیپس، انیدریت و...) هر چند امکان نفوذ نزولات جوی را دارا هستند، اما باعث کاهش کیفیت آب های زیرزمینی می گردند (افزایش هدایت الکتریکی در شرق دشت از اثرات

آن از سال ۱۳۷۰ تاکنون، اندازه‌گیری سطح آب در ۳۲ حلقه چاه مشاهده‌ای در سفره آبرفتی این محدوده مطالعاتی توسط شرکت آب منطقه‌ای فارس انجام گردیده است (شکل ۲، جدول ۱).

وجود این سازندها است). همچنین وسعت آبخوان آبرفتی این محدوده مطالعاتی ۶۴۷/۸ کیلومترمربع است. آبخوان دشت سروستان یک آبخوان آزاد و تک لایه‌ای است. به‌منظور اندازه‌گیری عمق و تراز آب زیرزمینی و تغییرات



شکل ۲: وضعیت زمین‌شناسی محدوده مورد مطالعه

جدول ۱: نتایج آنالیز ۲۵ چاه انتخابی کیفی در خردادماه ۹۷

UTMX	UTMY	Name	Group*	K ⁺	Na ⁺	mg	Ca ⁺²	SO ₄ ⁻²	Cl ⁻	HCO ₃ ⁻	PH	EC
680890	3245053	p1	Group 2	1.1	61.01	50	60	26.55	135	7	7.32	16140
682993	3243147	p2	Group 2	0.42	33.84	20	45	20.32	75	3.5	7.17	9891
683875	3242652	p3	Group 2	0.45	11.05	25	35	6.3	60.5	4	7.28	7065
685815	3240942	p4	Group 2	0.36	15	35	25	10.89	60	4	7.82	7442
688052	3238543	p5	Group 2	0.55	28.27	43	27	9	82.5	6	7.41	9562
691401	3242484	p6	Group 2	0.82	92.68	15	15	19.36	98	3.5	7.67	10362
693015	3245419	p7	Group 2	0.87	50.24	50	25	23.25	98.5	4	7.29	12246
697317	3241010	p9	Group 2	0.85	57.34	30	40	25.61	98.5	6	7.28	12246
697096	3240813	p10	Group 2	0.95	41.55	70	20	16.35	112	3.5	7.08	12246
695514	3233669	p12	Group 2	0.88	95.28	12	40	28.82	112	6	7.15	14130
705419	3241740	p13	Group 2	0.52	19.43	37.5	32.5	12.86	72.5	3	7.43	8761
703845	3230419	p15	Group 2	0.35	24.84	17.5	22.5	21.32	40	3.5	7.88	6359
709985	3234512	p16	Group 2	0.47	38.35	25	35	22.92	72.5	2.5	7.72	9703
712410	3235016	p17	Group 2	0.55	83.7	22.5	12.5	30.8	82.5	4.5	7.34	10093
710112	3239817	p18	Group 1	0.35	32.81	23	22	12.82	61.5	3.6	7.29	7536
712915	3240672	p19	Group 1	0.22	2.64	6	32	22	15	4.5	7	3957
714983	3239964	p20	Group 1	0.16	9.39	9.5	12.5	16.5	10	5.5	7.32	3015
715534	3231575	p21	Group 1	0.26	7.29	10	32	5.87	40	3	7.78	4993

718412	3234476	p22	Group 1	0.45	18.35	20	30	17.4	47.5	3	7.8	6689
720312	3232895	p23	Group 1	0.14	4.86	9	10	7.79	12	3	7.66	2374
719242	3230412	p24	Group 1	0.35	25.01	24.5	32.5	29	50	2.5	6.92	8007
718010	3225466	p25	Group 1	0.37	17.95	25.5	32	11.96	60	2.7	7.54	7442
689909	3236257	p8	Group 1	0.08	2.58	9	4	3.2	7.5	5	7.96	1508
693752	3232470	p11	Group 1	0.07	2.29	7.5	4.5	3.4	3.5	7.5	7.6	1413
696413	3230639	p14	Group 1	0.12	7.24	9	6	6.89	10.5	4.5	7.68	2167

* گروه بندی نمونه های آب زیرزمینی از طریق روش آنالیز خوشه ای صورت گرفته و در بخش های بعدی در رابطه با آن صحبت شده است.

۲- مواد و روش ها

برای بررسی کیفیت آب زیرزمینی در منطقه مورد مطالعه، ۲۵ منبع انتخابی کیفی آب زیرزمینی در خردادماه سال ۱۳۹۷ مورد استفاده قرار گرفته است. این نمونه ها به صورت یکنواخت در کل دشت پراکنده شده اند.

۱-۲- بررسی وضعیت داده ها

در ابتدا وضعیت داده ها از لحاظ نرمال بودن از طریق رسم هیستوگرام داده ها و مقایسه آن با منحنی چگالی توزیع نرمال، مورد بررسی قرار گرفت و به دلیل عدم نرمال بودن مراحل زیر روی نمونه ها اجرا گردید:

۱- تبدیل لگاریتمی رویدادهای صورت گرفت

۲- و از طریق معادله زیر استاندارد سازی صورت گرفت

$$Z = \frac{x - u}{s} \quad \text{رابطه (۱)}$$

x : مقدار پارامتر، u : میانگین مقدار پارامتر و s : انحراف معیار است. این استاندارد سازی داده ها منجر به ایجاد وزن برابر در متغیرها می گردد به خصوص که روش متوسط فاصله اقلیدسی تحت تأثیر متغیرهایی با وزن بالاتر است (گولر و همکاران ۲۰۰۲).

۲-۲- روش آنالیز خوشه ای

آنالیز خوشه ای یک روش آماری برای گروه بندی داده ها با توجه به شباهت و درجه نزدیکی آن ها است. آنالیز خوشه ای به دو صورت Q-mode (خوشه بندی مشاهدات) که در آن خوشه بندی نمونه ها مدنظر است و R-mode (خوشه بندی متغیرها) که در آن خوشه بندی بر اساس متغیرها صورت می گیرد، قابل اجرا است. روش های مختلفی در خوشه بندی

وجود دارد ولی خوشه بندی سلسله مراتبی^{۳۱} یکی از پرکاربردترین روش ها در علوم زمین است و معمولاً در طبقه بندی داده های هیدروژئوشیمیایی کاربرد دارد (گولر و همکاران، ۲۰۰۲؛ ساودها^{۳۲} و همکاران، ۲۰۰۹). در این مطالعه از روش خوشه بندی سلسله مراتبی Q-mode برای طبقه بندی نمونه های هیدروژئوشیمی در گروه های مجزا استفاده گردید. در آنالیز خوشه ای معمولاً P صفت بر روی N ماده اندازه گیری و سپس یک ماتریس $N \times P$ از داده های خام تشکیل می شود. سپس ماتریس داده های خام به ماتریس شباهت ها یا فاصله ها تبدیل شده و با استفاده از یکی از روش های طبقه بندی، مواد را بر اساس شباهت بین آن ها گروه بندی می کنند (مورفی^{۳۳}، ۲۰۱۲).

۲-۳- محاسبه ضریب شباهت در صفات کمی

برای محاسبه ضریب شباهت در صفات کمی روش های مختلفی مانند ضریب متوسط فاصله اقلیدسی، ضریب تفاوت شکل، ضریب کسینوس و... وجود دارد. روش بکار رفته در این تحقیق، روش متوسط فاصله اقلیدسی^{۳۴} است (گولر و همکاران، ۲۰۰۲).

از مزایای این ضریب آن است که اگر ماتریس داده ها دارای مقادیر از دست رفته ای باشد باز هم می توان از آن استفاده کرد. این ضریب (e_{jk}) از فرمول زیر به دست می آید:

$$e_{jk} = \left[\sum_{i=1}^2 (X_{ij} - X_{ik})^2 \right]^{0.5} \quad \text{رابطه (۲)}$$

X_{ij} مقدار صفت i ام برای فرد j ام است.

³³ Murphy

³⁴ Squared Euclidean Distances

³¹ Hierarchical Clustering

³² Suvedha

۴-۲- انتخاب روش خوشه‌بندی

برای خوشه‌بندی و قرار دادن نمونه‌ها در گروه‌های جداگانه روش‌های مختلفی مانند روش‌های خوشه‌بندی همبستگی منفرد^{۳۵}، همبستگی کامل^{۳۶}، روش وارد^{۳۷} وجود دارد. جهت گروه‌بندی نمونه‌های آب زیرزمینی از روش وارد استفاده شده است (گول و همکاران، ۲۰۰۲؛ وارد، ۱۹۶۳). که در این روش در هر مرحله از آنالیز، ترکیب هر جفت از نمونه‌ها ممکن است موردتوجه قرار گیرد و هر دودسته‌ای که ادغام آن‌ها سبب افزایش میزان واریانس به میزان کمتری شود، در یک دسته قرار می‌گیرند و این موضوع در مراحل بعدی گروه‌بندی نیز رعایت می‌گردد.

۵-۲- تحلیل عاملی Principal components analysis

تشخیص مجموعه‌ای از شرایط هیدروژئولوژیکی و فرآیندهای هیدروشیمیایی که کیفیت آب زیرزمینی را تحت تأثیر قرار می‌دهد مشکل است. به همین جهت هیدروژئوشیمیست‌ها از تحلیل‌های عاملی استفاده می‌کنند. تحلیل عاملی یک روش آماری چندمتغیره است که هدف آن ساده کردن روابط پیچیده و مختلفی است که بین متغیرهای قابل‌مشاهده وجود دارد. در مطالعات هیدروژئوشیمی، نتایج آنالیزهای شیمیایی آب به‌عنوان متغیرهای مشاهده‌ای در نظر گرفته می‌شود. این روش یک روش مفید برای تفسیر داده‌های کیفی آب زیرزمینی و ارتباط دادن آن‌ها با فرآیندهای خاص هیدروژئولوژیکی است. هدف اصلی از چنین آنالیزهایی، یافتن چند عامل یا فاکتور است که می‌توانند پراکندگی داده‌های هیدروشیمیایی را توجیه کنند (اسمیت^{۳۸}، ۲۰۰۲). تفسیر و تعیین منشأ هر یک از فاکتورها بر اساس بارهای عاملی، شرایط هیدروژئولوژیکی، زمین‌شناختی و فرآیندهای هیدروشیمیایی صورت می‌گیرد. تحلیل عاملی با استفاده از روش کایسر (کایسر^{۳۹}، ۱۹۶۰). و چرخش واریماکس برای تعیین تعداد فاکتورها در ۲۵ نمونه آب زیرزمینی به کار

گرفته شد.

۶-۲- دیاگرام‌های ترکیبی

نمودارهای ترکیبی ابزار مفیدی جهت شناخت منشأهای مختلف آب زیرزمینی و روندهای کنترل‌کننده هیدروژئوشیمی آب زیرزمینی می‌باشند. عوامل مؤثر و کنترل‌کننده تکامل هیدروژئوشیمیایی آب زیرزمینی، شیمی آب تغذیه‌کننده، رابطه متقابل بین آب و مواد آبخوان (تبادل یونی) و زمان ماندگاری آب در آبخوان است. در کل سه عامل اصلی بیشترین تأثیر را در کیفیت آب زیرزمینی دارند که شامل: انحلال کانی‌های تبخیری، انحلال کانی‌های کربناته و هوازدگی سیس‌ها، است (گارل و ماکنزی، ۱۹۷۱). محققان زیادی در سرتاسر دنیا از نمودارهای ترکیبی جهت شناخت فرآیندهای ژئوشیمیایی مؤثر بر کیفیت آب‌های زیرزمینی استفاده نموده‌اند (مازور^{۴۰}، ۱۹۹۱). الگوی آرایش نقاط معمولاً تک خوشه‌ای، دو خوشه‌ای، مثلثی، خطی و یا پراکنده است که هر کدام با توجه به دو فاکتور موردسنجش (X,Y) توصیف خاص خود را دارند.

۷-۲- شاخص‌های اشباع

شاخص اشباع برای شناسایی درجه تعادل کانی‌های مشخص در آب به کار می‌رود. تغییر در وضعیت اشباع برای شناسایی تکامل هیدروژئوشیمیایی مفید است و می‌تواند به شناسایی واکنش‌های ژئوشیمیایی حاکم بر شیمی آب مؤثر باشد.

رابطه بین شاخص اشباع و اکتیویته یون‌ها به‌صورت زیر است:

$$SI = \log(IAP/K_{SP}) \quad \text{رابطه (۳)}$$

K_{SP} ثابت تعادل است. در حالت تعادل IAP برابر با K_{SP} بوده و نمایه اشباع برابر با صفر و چنانچه SI منفی باشد محلول تحت‌اشباع و در حالت فوق اشباع مقدار SI بزرگ‌تر از یک است.

³⁸ Smith

³⁹ Kaiser

⁴⁰ Mazor

³⁵ Single Linkage

³⁶ Complete Linkage

³⁷ Ward

۲-۸- مدل ژئوشیمیایی معکوس

مدل ژئوشیمیایی معکوس در شناسایی واکنش‌هایی که در طول مسیر جریان، هیدروشمی آب را تحت تأثیر قرار می‌دهند به کار می‌رود. برای اجرای این مدل دو ترکیب آب در دونقطه مختلف در طول مسیر جریان به‌علاوه تعریف یک سری فاز کانی در طول این مسیر موردنیاز است (پارخوآست و همکاران، ۱۹۸۰). این مدل مجموعه‌ای از انتقال فاز و واکنش‌های طول مسیر جریان را تعیین می‌نماید. برای محاسبه مدل ژئوشیمیایی معکوس در دشت سروستان از نرم‌افزار PHREEQC استفاده گردید (پارخوآست و اپلو، ۱۹۹۹). مسیر جریان آب بر اساس مطالعات هیدروژئولوژی (نقشه تراز و جهت جریان آب زیرزمینی) تعیین گردید. میانگین داده‌های هر گروه برای نمایش ترکیب ابتدایی و انتهای مسیر جریان به کار گرفته شد.

۲-۹- صحت سنجی و آنالیز حساسیت

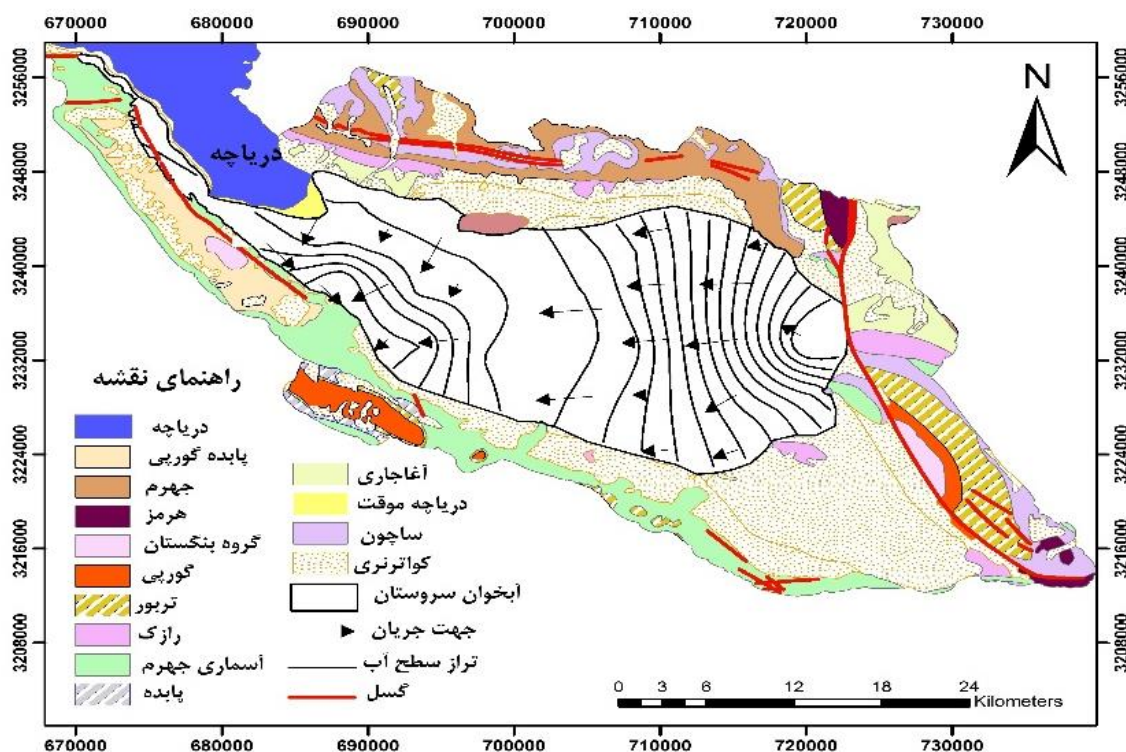
صحت سنجی فرآیندی است که در طول آن مدل از نظر پارامترهای بدست آمده از مرحله واسنجی مورد ارزیابی قرار داده می‌شود.

آنالیز حساسیت عبارت است از ارزیابی کمی تغییرات خروجی‌های مدل نسبت به تغییرات ورودی‌های آن. آنالیز حساسیت مشخص کننده پارامترهایی است که باید به منظور تعیین صحیح و دقیق پیش‌بینی مدل تغییر داده شوند.

۳- نتایج و بحث**۳-۱- سطح ایستایی آب زیرزمینی و جهت جریان**

برای بررسی نحوه تغییرات جریان آب زیرزمینی یکی از مناسب‌ترین روش‌ها رسم منحنی تراز یا خطوط هم‌مقدار

سطح ایستایی است. بنابراین منحنی تراز سطح آب زیرزمینی دشت سروستان برای داده‌های پیزومتری خردادماه ۹۷ رسم گردید (شکل ۳). با توجه به این شکل، حداکثر سطح آب زیرزمینی در قسمت شرق منطقه به میزان ۱۵۴۲ متر و حداقل آن در قسمت‌های غربی دشت حدود ۱۴۴۰ متر مشاهده می‌شود. تغذیه آبخوان از سازندهای مجاور دشت، منحنی‌های تراز سطح آب زیرزمینی را در قسمت‌های شرقی را تحت تأثیر قرار داده و به علت ایجاد گرادیان هیدرولیکی بالا، فاصله منحنی‌ها کم و به هم فشرده هستند. با کاهش تغذیه آبخوان به سمت مرکز دشت، فاصله منحنی‌ها در این راستا بیشتر می‌گردد. همان‌طور که در نقشه مشاهده می‌شود جهت جریان آب زیرزمینی در کل دشت از ارتفاعات شرق به سمت غرب منطقه است. گسل واقع در بخش شرقی آبخوان یک گسل تراوا است و مانع حرکت جریان از ارتفاعات به سمت آبخوان نگردیده است. جهت جریان همچنین در انتهای دشت از سمت دریاچه مهارلو به سمت آبخوان است. بر اساس توپوگرافی جهت جریان باید از آبخوان به سمت دریاچه باشد، منتها به دلیل برداشت بیش از حد از آبخوان این جهت جریان به‌صورت معکوس در آبخوان در آمده است. جهت حرکت آب‌های زیرزمینی در شمال و غرب آبخوان آبرفتی به سمت ارتفاعات آهکی می‌تواند ناشی از پمپاژ چاه‌های بهره‌برداری در این محدوده‌ها یا تغذیه آهک از آبرفت باشد. لازم به ذکر است که گسل واقع در بخش شمال شرق منطقه یک گسل نفوذناپذیر است و جریان‌های خروجی آن بخش از آبخوان در امتداد گسل حرکت کرده است و در سازندهای آهکی آسماری جهرم واقع در غرب منطقه تخلیه می‌گردد.



شکل ۳: نقشه سطح آب زیرزمینی و جهت جریان در خرداد ماه ۹۷

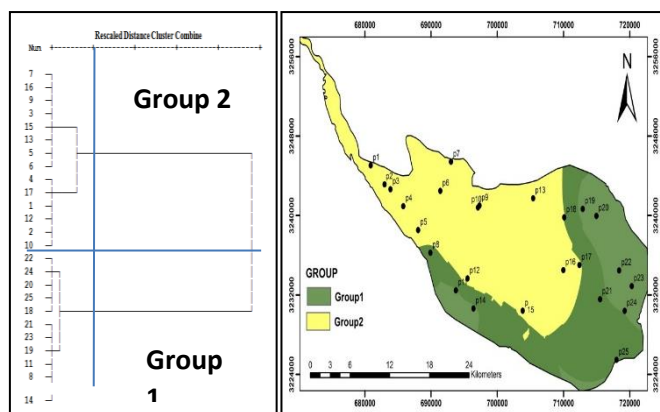
۳-۲- گروه‌بندی نمونه‌های آب زیرزمینی

بر اساس مطالبی که در بخش‌های قبل بیان شد و با استفاده از نرم‌افزار SPSS، نمونه‌های آب زیرزمینی مورد بررسی آماری قرار گرفت. ۹ متغیر هیدروژئوشیمیایی (pH، EC، Ca، Na، Mg، K، Cl، SO₄ و HCO₃) در آنالیز خوشه‌ای مورد استفاده قرار گرفتند.

در این تحقیق معیار دسته‌بندی در دندروگرام با نظر کارشناسی در فاصله ۵ در نظر گرفته شده است و بر این اساس دو گروه در دندروگرام شناسایی گردید که هرکدام بیانگر رخساره‌های مختلف هیدروژئوشیمی می‌باشند. موقعیت این دو گروه آب زیرزمینی در شکل (۴) نمایش داده شده است. به‌طوری‌که نمونه‌های گروه اول در بخش شرقی و جنوبی آبخوان و گروه دوم در بخش شمال و شمال غرب آبخوان واقع شده‌اند.

گروه اول از نمونه‌های شماره ۱۸، ۱۹، ۲۰، ۲۱، ۲۲، ۲۳، ۲۴، ۲۵، ۸، ۱۱ و ۱۴ تشکیل شده است و ۴۴ درصد از نمونه‌های آب در این گروه واقع شده است. تیپ آب در این

گروه کلرور کلسیم است. بالا بودن غلظت یون کلسیم در این گروه به دلیل حضور سازند آسماری - چهارم متشکل از سنگ آهک و سازند مارنی رازک (آهک‌رس) در بخش شرق و جنوب شرق منطقه مورد مطالعه است. گروه دوم از نمونه‌های شماره ۱، ۲، ۳، ۴، ۵، ۶، ۷، ۹، ۱۰، ۱۲، ۱۳، ۱۵، ۱۶ و ۱۷ تشکیل شده است و ۵۶ درصد نمونه‌های آب زیرزمینی در این گروه واقع شده است. تیپ آب در این گروه را کلرور سدیم است. شوری آب در این گروه می‌تواند تحت تأثیر حضور سازندهای تبخیری هرمز، ساچون و دریچه مهارلو باشد. بر اساس این خوشه‌بندی می‌توان آب زیرزمینی در منطقه مورد مطالعه را به دو منطقه تغذیه و تخلیه تقسیم‌بندی نمود، به‌طوری‌که گروه ۱ دارای آب منطقه تغذیه می‌باشند و از ارتفاعات جنوب شرق و شرق منطقه تغذیه می‌گردند. گروه ۲ جز منطقه تخلیه و واقع در بخش غرب و شمال غرب دشت و مناطق مجاور با دریچه مهارلو می‌باشند.

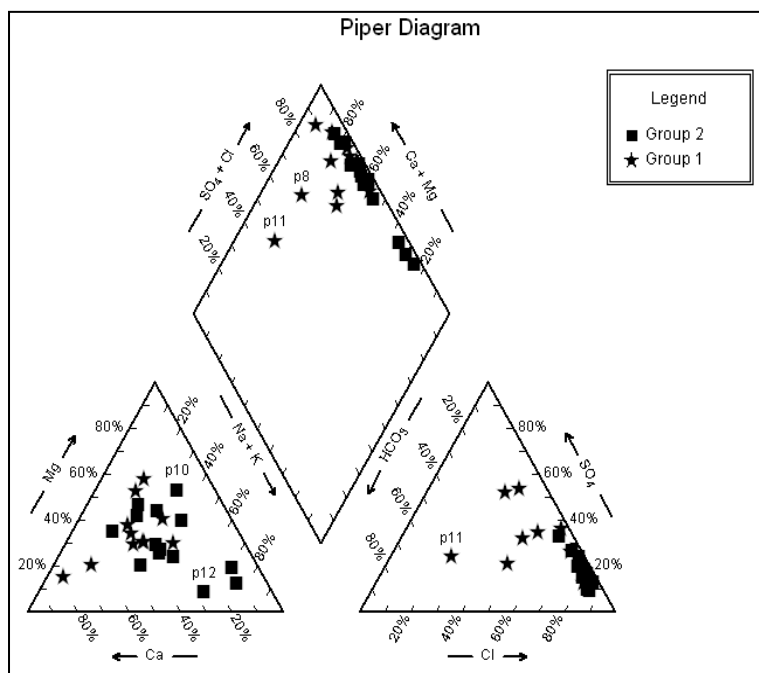


شکل ۴: دندروگرام نمونه‌های آب زیرزمینی و موقعیت گروه‌های مختلف نمونه‌های آب زیرزمینی

۳-۳- دیاگرام پایپر

جهت تعیین تیپ آب زیرزمینی از دیاگرام پایپر استفاده شده است. شکل (۵) دیاگرام پایپر برای دو گروه آب زیرزمینی را نشان می‌دهد. با توجه به این دیاگرام نمونه‌های گروه ۲ در محدوده آب‌های خیلی شور واقع شده‌اند و منشأ

دریایی را نشان می‌دهند که بیانگر تأثیر دریاچه مهارلو روی کیفیت نمونه‌های این گروه است. نمونه‌های گروه اول نیز در محدوده‌ای واقع شده‌اند که سختی غیر کربناته از ۵۰ درصد تجاوز می‌کند.

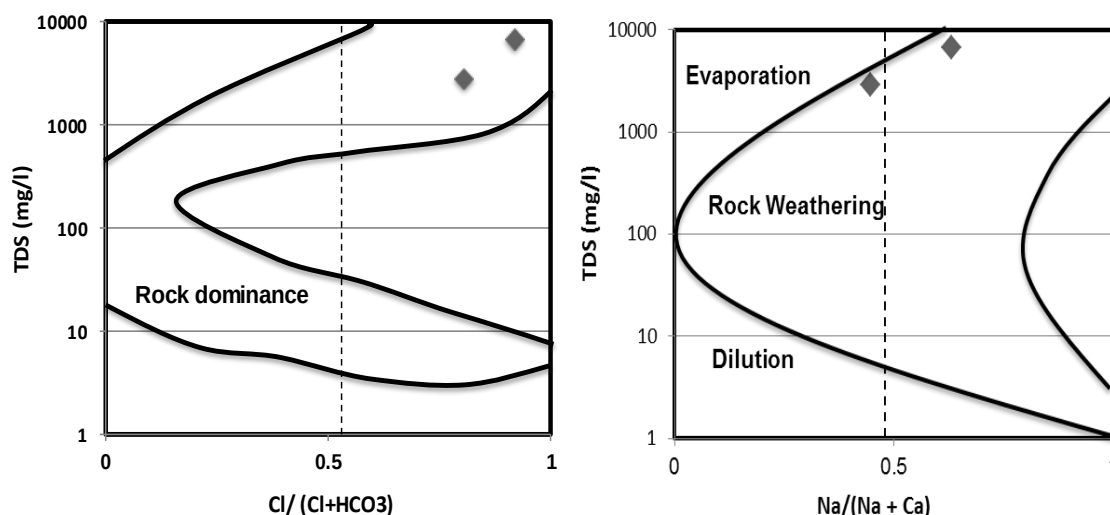


شکل ۵: دیاگرام پایپر نمونه‌های آب زیرزمینی محدوده مطالعاتی

۳-۴- دیاگرام گیبس

یکی از نمودارهایی که در تعیین عوامل مؤثر بر کیفیت شیمیایی آب زیرزمینی کاربرد زیادی دارد، نمودار گیبس است (گیبس، ۱۹۷۰). در شکل ۶ دیاگرام گیبس دو گروه

نمونه‌های آب زیرزمینی ارائه شده است. همان‌طور که در این نمودارها دیده می‌شود، در هر دو گروه نمونه‌های آب زیرزمینی مهم‌ترین فرآیند مؤثر بر ترکیب شیمیایی آب زیرزمینی، هوازگی و انحلال سازندها است.



شکل ۶- دیاگرام گیبس دو گروه آب زیرزمینی دشت سروستان

تأثیر هوازدگی کانی در کیفیت آب زیرزمینی دانست. فاکتور دو ۱۷ درصد از واریانس کلی را به خود اختصاص داده است. مقدار بار عاملی این فاکتور برای یونهای آب زیرزمینی Ca ، HCO_3 و PH بالا است (جدول ۲). گزینه‌ای که می‌تواند ناشی از این بار عاملی باشد، وجود سازندهای آهکی با محتوای بالای کلسیت واقع در بخش شرق و جنوب شرق منطقه است. بنابراین بار بالای Ca و HCO_3 در این عامل را می‌توان به هوازدگی و انحلال این کانی‌ها نسبت داد. به دلیل اینکه هوازدگی کانی‌های کربناته منجر به افزایش pH می‌گردد بنابراین pH نیز در این فاکتور بار عاملی بالایی را نشان می‌دهد.

۳-۶- دیاگرام‌های ترکیبی

در نمودار ترکیبی $\text{Ca}+\text{Mg}$ در مقابل SO_4+HCO_3 در شکل (۷ شماره a)، نقاطی که نزدیک به خط ۱:۱ واقع شده‌اند نمایانگر این است که یونهای این نمونه‌ها از هوازدگی سلیس و انحلال کربنات حاصل شده‌اند. نقاطی که از خط دور می‌شوند اگر که نمونه‌ها به سمت SO_4+HCO_3 تمایل داشته باشند هوازدگی سیلیکات‌ها سهم بالاتری در کیفیت آب خواهد داشت و اگر نمونه‌ها به سمت $\text{Ca}+\text{Mg}$ تمایل داشته باشند انحلال کربنات سهم بالاتری در کیفیت آب خواهد داشت (داتا و تایگی^{۴۱}،

۳-۵- تحلیل عاملی Principal components analysis

مدل عاملی بکار رفته در این تحقیق شامل دو عامل و نه متغیر است. نتایج حاصل از تحلیل عاملی نشان‌دهنده آن است که این عامل‌ها حدود ۷۱٪ از کل میزان اشتراک را در بردارند. بطوریکه از این مقدار ۵۴٪ به‌وسیله عامل یک و ۱۷٪ توسط عامل دو تعیین می‌شود. از میان ضرایب هر عامل، ضرایب بالای ۰/۵۵ که به‌صورت پررنگ در جدول ۱ نشان داده شده‌اند، نشانگر پارامترهای مؤثر در هر عامل هستند.

فاکتور یک ۵۴ درصد از واریانس کلی را به خود اختصاص داده است. مقدار بار عاملی این فاکتور برای یونهای آب زیرزمینی Na ، Ca ، Mg ، Cl و SO_4 بالا است (جدول ۱). فاکتور یک نشان می‌دهد که رابطه متقابل بین آب و سنگ یک نقش اصلی را در هیدروژئوشیمی آب ایفا می‌نماید. بار عاملی بالا در یونهای Na ، Cl و SO_4 بیانگر یک منبع مشترک برای این سه یون در آب زیرزمینی است و عاملی است که کنترل‌کننده شوری آب است. به دلیل اینکه شوری آب به‌خصوص در گروه دوم مشاهده شده است این بار عاملی بالا در فاکتور یک را می‌توان به این بخش از منطقه واقع در غرب و شمال غرب دشت و مجاورت دریاچه مهارلو نسبت داد. در ضمن بار عاملی بالا برای یون K را می‌توان تا حدی

⁴¹ Datta and Tyagi

واقع در گروه اول و دوم نسبت پائینی از Na/Cl را نشان می‌دهند. بالا بودن نسبت کلرید به سدیم ممکن است که در نتیجه فرایند تبادل یونی یا آلودگی در اثر فعالیت‌های انسانی باشد.

دیاگرام ترکیبی کلر در مقابل سولفات (شکل ۷ شماره c) نمایانگر این است که منشأ سولفات در گروه دوم به‌خصوص در نمونه‌های مجاور دریاچه مهارلو متفاوت با گروه اول است. که می‌توان حدس زد که این منشأ متفاوت می‌تواند تحت تأثیر دریاچه مهارلو باشد.

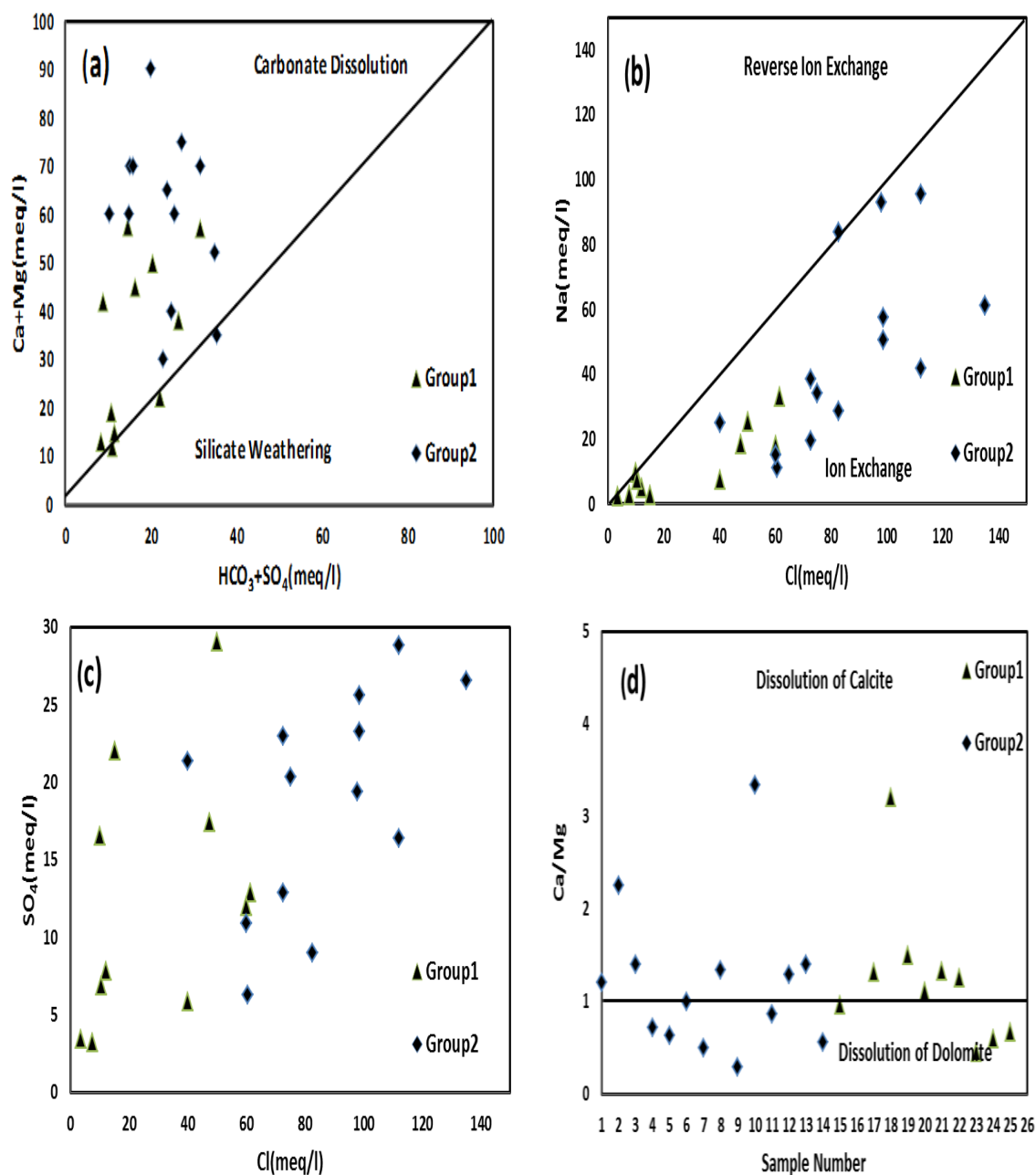
نمودار نسبت کلسیم به منیزیم (شکل ۷ شماره d) نشان می‌دهد که اکثر نمونه‌های آب زیرزمینی تحت تأثیر انحلال کلسیت هستند تا دولومیت، که این عامل می‌تواند تحت تأثیر ترکیب آهک دولومیتی سازند چهارم در محدوده مطالعاتی باشد.

(۱۹۹۶). با توجه به این دیاگرام بخشی از نمونه‌های گروه اول نزدیک به خط ۱:۱ واقع شده‌اند بنابراین در کیفیت آب این نمونه‌ها دو فرایند هوازدگی سلیس و انحلال کربنات نقش داشته است. نمونه‌های گروه دوم در محدوده انحلال کربنات واقع شده‌اند. دلیل این عامل برای این گروه را می‌توان به بالا بودن میزان یون کلسیم در نمونه‌های آب نسبت داد. بالا بودن یون کلسیم در این نمونه‌ها را می‌توان به تبادل یونی بین سدیم آب این نمونه‌ها و کلسیم مواد آبخوان نیز نسبت داد.

دیاگرام ترکیبی سدیم در مقابل کلر برای شناسایی منبع شوری در آب زیرزمینی مورد استفاده قرار گرفت (شکل ۷ شماره b). در این دیاگرام اگر نسبت Na/Cl بالاتر از یک باشد نمایانگر این است که یون سدیم در نمونه‌های آب زیرزمینی از هوازدگی سیلیکات حاصل شده است. نمونه‌های

جدول ۲: پارامترهای شیمیایی گروه‌های مختلف نمونه‌های آب زیرزمینی

Parameters	Component	
	Factor 1	Factor 2
k	.957	.005
EC	.992	.083
Na ⁺	.889	.071
Mg ⁺²	.641	.415
Ca ⁺²	.741	-.812
SO ₄ ⁻²	.698	-.375
Cl ⁻	.953	.226
HCO ₃ ⁻	.276	-.774
pH	-.248	.614

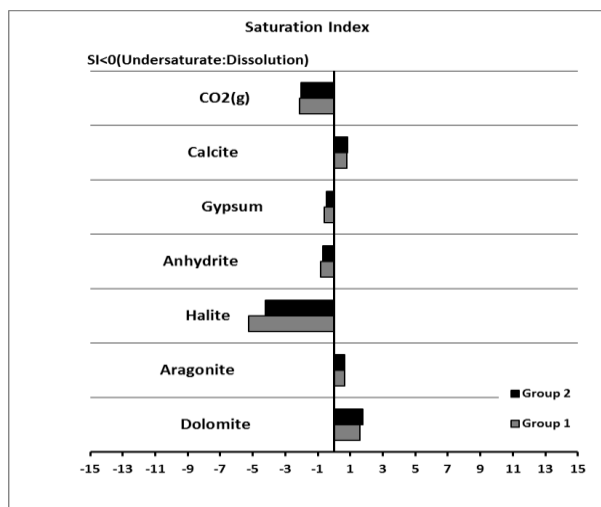


شکل ۷: نمودارهای ترکیبی نمونه‌های آب زیرزمینی آبخوان دشت سروستان

زیرزمینی نسبت به کانی‌های کربنات فوق اشباع هستند. این فوق اشباع بودن می‌تواند در نتیجه حضور کانی‌های مختلف کربناته در مواد آبخوان باشد. همه نمونه‌ها نسبت به اندریت، ژیپس و هالیت تحت اشباع هستند.

۳-۷- شاخص‌های اشباع

نمایه اشباع (SI) دو گروه آب نسبت به کانی‌ها با استفاده از نرم‌افزار فری کیوسی محاسبه گردیده است که این نتایج در شکل (۸) نشان داده شده است. با توجه به شکل نمونه‌های آب



شکل ۸: نمایه‌های اشباع آب زیرزمینی آبخوان دشت سروستان

۳-۸- مدل ژئوشیمیایی معکوس

است. در ضمن در ناحیه گروه دوم همان‌طور که نقشه جهت جریان نشان می‌دهد جریان‌هایی از سمت دریاچه مهارلو به سمت آبخوان وجود دارد که شوری آب در این گروه را می‌توان به این عامل نسبت داد. بنابراین می‌توان به‌جای هالیت در منطقه در فرمول بالا دلیل شور شدگی آب در گروه دوم را ناشی از حضور سازندهای تبخیری و جریان معکوس از سمت دریاچه به سمت دشت در قسمت انتهایی آبخوان معرفی کرد. در این صورت مدل معکوس بین گروه ۱، ۲ به‌صورت زیر بازنویسی می‌گردد:

Ca-Cl water (G1) + CO₂ gas + the presence of evaporative formations in the study area + reverse flow from the Maharlo Lake toward the plain → Na-Cl water (G2) + calcite

جدول ۳: مدل ژئوشیمی معکوس بین گروه ۱ و ۲

Groups 1 and 2				
Mineral phases		Phase mole transfers		
CO ₂ (g)	CO ₂	1.124E-02	1.044E-02	1.261E-02
Calcite	CaCO ₃	-8.890E-03	-7.171E-03	-8.694E-03
Halite	NaCl	7.124E-02	5.566E-02	6.452E-02

۳-۹- صحت سنجی مدل ژئوشیمیایی معکوس

جهت صحت سنجی مدل ژئوشیمیایی معکوس، مدل برای داده‌های مربوط به یک دوره آماری متفاوت (آذرماه ۹۶) مجدداً اجرا گردیده است. جهت انجام این کار بار دیگر نمونه‌های کیفی آب زیرزمینی محدوده مطالعاتی با استفاده از روش آماری آنالیز

میانگین داده‌های گروه ۱ به‌عنوان ترکیب اولیه و گروه ۲ به‌عنوان ترکیب انتهایی برای مدل تعریف گردید. برای تعریف فاز کانی در مدل از نمایه‌های اشباع کمک گرفته شد. این فازها به‌صورت انحلال هالیت، آندریت، ژپس و CO₂ گازی و رسوب کلسیت و دولومیت تا رسیدن به حالت اشباع، برای مدل تعریف گردیدند. سه مدل احتمالی برای این مدل معکوس در جهت تکامل آب از ترکیب اولیه به نهایی حاصل گردید. این مدل‌ها ترکیبات احتمالی مختلف بر اساس آنالیزهای آماری در نرم‌افزار فری کیوسی از واکنش‌دهنده‌ها و محصولات هستند که بر اساس تغییر کیفیت در مسیر جریان ارائه شده است. نتایج در جدول (۳) بر اساس mol/kg آب گزارش شده است. مقادیر مثبت نمایانگر انحلال و مقادیر منفی نمایانگر رسوب از محلول است.

مدل ژئوشیمیایی معکوس بین گروه ۱ و ۲ را می‌توان به‌صورت زیر نوشت:

Ca-Cl water (G1) + CO₂ gas + halite → Na-Cl water (G2) + calcite

اساس این مدل ترکیبات حل‌شده در گروه دوم از انحلال هالیت حاصل شده است. بر اساس اطلاعات زمین‌شناسی کانی تبخیری در منطقه مورد مطالعه ناشی از سازند هرمز و ساچون واقع در بخش‌های شمال و شمال شرقی محدوده است که شوری آب به‌خصوص در گروه دوم ناشی از حضور این سازندها در منطقه

جدول ۵: آنالیز حساسیت مدل ژئوشیمی معکوس بین گروه ۱ و ۲

Groups 1 and 2				
Mineral phases		Phase mole transfers		
CO ₂ (g)	CO ₂	1.124E-02	1.044E-02	1.261E-02
Calcite	CaCO ₃	-8.890E-03	-7.171E-03	-8.694E-03
Halite	NaCl	7.124E-02	5.566E-02	6.452E-02

۴- نتیجه‌گیری

نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که ادغام نتایج آماری داده‌های هیدروژئوشیمیایی با مدل ژئوشیمیایی معکوس، در شناسایی فاکتورهای زمین‌شناسی مؤثر در کیفیت آب زیرزمینی کمک شایانی می‌نماید. همچنین از این روش‌ها می‌توان در شناسایی منشأ شوری آبخوان‌ها نیز استفاده نمود (سامانی و مقدم، ۲۰۱۵؛ ابراهیم و همکاران، ۲۰۱۸). این مطالعات نشان دادند که روش‌های آماری اهمیت زیادی در طبقه‌بندی منابع آب زیرزمینی جهت شناسایی مکانیسم‌های مؤثر بر آب زیرزمینی دارد. در ضمن ادغام نتایج آماری با دانش زمین‌شناسی، هیدروژئولوژی و هیدروژئوشیمی منجر به درک بهتر جریان آب زیرزمینی و پیچیدگی‌های سیستم آبخوان می‌شود (فارنهام^{۴۲} و همکاران، ۲۰۰۰؛ استزن‌بج^{۴۳} و همکاران، ۲۰۰۱). در این محدوده مطالعاتی کیفیت آب زیرزمینی در بخش جنوب و شرق منطقه مورد مطالعه به دلیل منطبق بودن با مناطق تغذیه نسبت به مکان‌های دیگر بهتر است به‌طوری‌که این منطقه در طبقه‌بندی آنالیز خوشه‌ای جز گروه اول با تیپ کلرید کلسیم است بالا بودن غلظت یون کلسیم در این گروه به دلیل حضور سازند آسماری - جهرم متشکل از سنگ‌آهک و سازند مارنی رازک (آهک‌رس) در بخش شرق و جنوب شرق منطقه مورد مطالعه است. وجود گنبد نمکی در شمال شرق محدوده، سازند تبخیری ساچون به‌خصوص در بخش شمال غرب محدوده مطالعاتی و دریاچه مهارلو در شمال غرب، منجر شده که کیفیت‌های آب زیرزمینی در بقیه نقاط آبخوان نامناسب باشد. این منطقه در گروه‌بندی آنالیز خوشه‌ای در گروه دوم با تیپ کلرید سدیم واقع شده است.

خوشه‌ای، گروه‌بندی شدند. به‌طوری‌که مجدداً نمونه‌ها در دو گروه، مشابه حالت قبل واقع شدند، سپس میانگین کیفیت نمونه‌های آب دو گروه محاسبه گردید و فرایند مدل‌سازی برای داده‌های جدید مجدداً تکرار گردید و نتایج در جدول (۴) ارائه گردیده است. در این وضعیت نیز سه مدل احتمالی برای مدل معکوس در جهت تکامل آب از ترکیب اولیه به نهایی حاصل گردید. مقایسه نتایج بین مدل معکوس در داده‌های مربوط به خردادماه ۹۷ و آذرماه ۹۶ نشان می‌دهد که در دو حالت کانی‌های مشابه وضعیت انحلال و رسوب مشابه را ارائه دهند، بنابراین مدل صحیح است.

جدول ۴: صحت سنجی مدل ژئوشیمی معکوس بین گروه ۱ و ۲

Groups 1 and 2			
Mineral phases	Phase mole transfers		
CO ₂ (g)	1.063E-02	1.154E-02	1.063E-02
CO ₂			
Calcite	-8.120E-03	-8.120E-03	-8.674E-03
CaCO ₃			
Halite	6.125E-02	6.125E-02	5.102E-02
NaCl			

۳-۱- آنالیز حساسیت مدل ژئوشیمیایی معکوس

برای بررسی آنالیز حساسیت مدل از روش متفاوت میانگین‌گیری استفاده شده است. به‌طوری‌که در مدل قبلی میانگین بین گروه‌ها با روش میانگین حسابی انجام گردیده درحالی‌که در بحث آنالیز حساسیت از میانگین هندسی استفاده شده است و حساسیت مدل ژئوشیمیایی معکوس نسبت به این گزینه موردبررسی قرار گرفته است.

در این حالت پنج مدل احتمالی برای این مدل معکوس در جهت تکامل آب از ترکیب اولیه به نهایی حاصل گردید. نتایج در جدول (۵) بر اساس mol/kg آب گزارش شده است. با توجه به متفاوت بودن تعداد مدل‌ها و میزان فاز انتقالی کانی، می‌توان گفت که مدل‌ها نسبت به روش میانگین‌گیری حساس می‌باشند.

⁴³ Stetzenbach

⁴² Farnham

مکانیسم مؤثر در کیفیت آب گروه دوم و شوری آب در این گروه تحت تأثیر حضور سازندهای هرمز و ساچون واقع در بخش های شمال و شمال شرقی محدوده مطالعاتی و جریانهای معکوس از سمت دریاچه مهارلو به سمت آبخوان است؛ در ضمن صحت سنجی مدل معکوس، صحت مدل را تأیید نمود. آنالیز حساسیت مدل ژئوشیمیایی معکوس نشان داد که مدلها نسبت به روش میانگین گیری حساس می باشند.

برای اثبات دقیق تر ارتباط بین دریاچه مهارلو با آبخوان دشت سروستان نیاز به انجام مطالعات ایزوتوپی و مدل سازی های دقیق ارتباط بین آبخوان و منابع آب سطحی می باشد که پیشنهاد می گردد در مطالعات بعدی در نظر گرفته شود.

۵- منابع

آقاباتی، ع.، ۱۳۸۳، زمین شناسی ایران، سازمان زمین شناسی و اکتشاف معدنی کشور.

Alley, W. M., 1993, Regional Ground-Water Quality, Van Nostrand Reinhold, New York .

Back, W., 1960. Origin of hydrochemical facies of ground water in the Atlantic Coastal Plain. In Proceedings of 21st international geological congress, Copenhagen (Vol. 1, pp. 87-95.)

Back, W. and Hanshaw, B.B., 1965. Advances in hydro-science. Chemical geohydrology, 11, p.49.

Bowser, C.J. and Jones, B.F., 2002. Mineralogic controls on the composition of natural waters dominated by silicate hydrolysis. American Journal of Science, 302(7), pp.582-662.

Belkhiri, L., Boudoukha, A., Mouni, L., & Baouz, T. 2010. Multivariate statistical characterization of groundwater quality in Ain Azel plain, Algeria. African Journal of Environmental Science and Technology, 4(8), pp.526-534.

Ceron, J.C., Pulido-Bosch, A. and Bakalowicz, M., 1999. Application of principal components analysis to the study of CO₂-rich thermomineral waters in the aquifer system of Alto Guadalentin (Spain). Hydrological sciences journal, 44(6), pp.929-942.

Chebotarev, I.I., 1955. Metamorphism of natural waters in the crust of weathering—1. Geochimica et Cosmochimica Acta, 8(1-2), pp.22-48.

Datta, P. S., and Tyagi, S. K., 1996. Major ion chemistry of ground water in Delhi area: chemical weathering processes and ground water flow regime. Journal of Geological Society of India, 47, pp.179-188 .

با توجه به دیاگرام پایپر نمونه های گروه ۲ در محدوده آب های خیلی شور واقع شده اند و منشأ دریایی را نشان می دهند که بیانگر تأثیر دریاچه مهارلو روی کیفیت نمونه های این گروه است.

مدل عاملی بکار رفته در این تحقیق دو عامل مؤثر بر کیفیت آب زیرزمینی آبخوان سروستان را نشان می دهد. فاکتور یک نشان می دهد که رابطه متقابل بین آب و سنگ یک نقش اصلی را در هیدروژئوشیمی آب ایفا می نماید. علاوه بر این بار عاملی بالا در یون های Na، Cl و SO₄ بیانگر یک منبع مشترک برای این سه یون در آب زیرزمینی است و عاملی است که کنترل کننده شوری آب است. به دلیل اینکه شوری آب به خصوص در گروه دوم مشاهده شده است این بار عاملی بالا در فاکتور یک را می توان به این بخش از منطقه واقع در غرب و شمال غرب دشت و مجاورت دریاچه مهارلو نسبت داد. مقدار بار عاملی فاکتور دوم برای یون های آب زیرزمینی Ca، HCO₃ و PH بالا است. گزینه ای که می تواند ناشی از این بار عاملی باشد، وجود سازندهای آهکی با محتوای بالای کلسیت واقع در بخش شرق و جنوب شرق منطقه است. بنابراین بار بالای Ca و HCO₃ در این عامل را می توان به هوازدهی و انحلال این کانی ها نسبت داد. به دلیل اینکه هوازدهی کانی های کربناته منجر به افزایش pH می گردد بنابراین pH نیز در این فاکتور بار عاملی بالایی را نشان می دهد.

نمونه های آب زیرزمینی در آبخوان دشت سروستان نسبت به کانی های کربنات فوق اشباع هستند. این فوق اشباع بودن می تواند در نتیجه حضور کانی های مختلف کربناته در مواد آبخوان باشد. همه نمونه ها نسبت به انیدریت، ژپس و هالیت تحت اشباع هستند. که این تحت اشباع بودن نمایانگر این است که آب زیرزمینی در محدوده مطالعاتی هنوز قابلیت انحلال سازندهای تبخیری را دارد و کیفیت آب در آبخوان در آینده همچنان کاهش می یابد.

نتیجه مدل ژئوشیمیایی معکوس به کمک روش آماری آنالیز خوشه ای و نمایه های اشباع نتایج روش آماری تحلیل عاملی را تأیید می کند. نتایج این مطالعه نشان می دهد که مهم ترین

- Morgan, C.O. and Winner Jr, M.D., 1962. Hydrochemical facies in the 400 foot and 600 foot sands of the Baton Rouge area, Louisiana. US Geol. Surv. Prof. Paper, 450, pp.120-121.
- Murphy, K.P., 2012. Machine learning: a probabilistic perspective. MIT press.
- Mazor, E., 1991, Applied Chemical and Isotopic Groundwater Hydrology, John Wiley, New York .
- Naderi Peikam, E. and Jalali, M., 2016. Application of inverse geochemical modelling for predicting surface water chemistry in Ekbatan watershed, Hamedan, western Iran. Hydrological Sciences Journal, 61(6), pp.1124-1134.
- Parkhurst, D. L., and 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, pp. 54-73, 98-103.
- Parkurst, D.L., Thorstenson, D.C. and Plummer, L.N., 1980. PHREEQE, a computer program for geochemical calculations. US Geological Survey Water Resources Investigations Report, 80, 96 pp.
- Smith, L. I., 2002. a tutorial on principal components analysis. Cornell University, USA, pp.51- 52.
- Plummer, N. and Back, W., 1980. The mass balance approach: application to interpreting the chemical evolution of hydrologic systems. American Journal of Science, 280(2), pp.130-142.
- Plummer, L.N., Prestemon, E.C. and Parkhurst, D.L., 1994. An interactive code (NETPATH) for modeling net geochemical reactions along a flow path, version 2.0. Water-Resources Investigations Report, 94, p.4169.
- Samani, S. and Moghaddam, A.A., 2015. Hydrogeochemical characteristics and origin of salinity in Ajabshir aquifer, East Azerbaijan, Iran. Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology, 48(3-4), pp.175-189.
- Sanchez-Martos, F., Jimenez-Espinosa, R. and Pulido-Bosch, A., 2001. Mapping groundwater quality variables using PCA and geostatistics: a case study of Bajo Andarax, southeastern Spain. Hydrological Sciences Journal, 46(2), pp.227-242.
- Seaber, P.R., 1965. Variations in chemical character of water in the Englishtown Formation, New Jersey. US Government Printing Office.
- Smith, L.I., 2002. A tutorial on principal components analysis.
- Stallard, R.F. and Edmond, J.M., 1983. Geochemistry of the Amazon: 2. The influence of geology and weathering environment on the dissolved load. Journal of Geophysical Research: Oceans, 88(C14), pp.9671-9688.
- Stetzenbach, K.J., Hodge, V.F., Guo, C., Farnham, I.M. and Johannesson, K.H., 2001. Geochemical and statistical evidence of deep carbonate groundwater within overlying volcanic rock aquifers/aquitards of southern Nevada, USA. Journal of Hydrology, 243(3-4), pp.254-271.
- Farnham, I.M., Stetzenbach, K.J., Singh, A.K. and Johannesson, K.H., 2000. Deciphering groundwater flow systems in Oasis Valley, Nevada, using trace element chemistry, multivariate statistics, and geographical information system. Mathematical Geology, 32(8), pp.943-968.
- Freeze, R. A., and J. A. Cherry. 1979. Ground Water. Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ.
- Gerla, P.J., 1992. Pathline and geochemical evolution of ground water in a regional discharge area, Red River Valley, North Dakota. Groundwater, 30(5), pp.743-754.
- Garrels, R. M., and Mackenzie, F. T., 1971. Evolution of sedimentary rocks.
- Garrels, R.M. and Mackenzie, F.T., 1967. Origin of the chemical compositions of some springs and lakes.
- Ghali, T., Marah, H., Qurtobi, M. and El Mansouri, B., 2017, November. Application of Inverse Geochemical Modelling to Understand Geochemical Evolution of Groundwater in Berrechid Aquifer, Morocco. In Euro-Mediterranean Conference for Environmental Integration, pp. 683-684.
- Gibbs, R.J., 1970. Mechanisms controlling world water chemistry. Science, 170(3962), pp.1088-1090.
- Grande, J.A., Gonzalez, A., Beltran, R. and Sánchez-Rodas, D., 1996. Application of Factor Analysis to the Study of Contamination in the Aquifer System of Ayamonte-Huelva (Spain). Groundwater, 34(1), pp.155-161.
- Güler, C., Thyne, G. D., McCray, J. E., and Turner, K. A., 2002. Evaluation of graphical and multivariate statistical methods for classification of water chemistry data. Hydrogeology Journal, 10(4), pp. 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.
- Hem, J.D. 1985. Study and Interpretation of the Chemical Characteristics of Natural Water. US Geological Survey, Water Supply Paper, 2254.
- Ibrahim, K.M. and El-Naqa, A.R., 2018. Inverse geochemical modeling of groundwater salinization in Azraq Basin, Jordan. Arabian Journal of Geosciences, 11(10), pp.237.
- Kaiser, H. F., 1960. The application of electronic computers to factor analysis. Educational and psychological measurement, pp.141-151.
- Kamensky, G.N., 1958. Hydrochemical zoning in the distribution of underground water. In Symposium of Ground Water Proceedings, Calcutta. pp. 292.(
- Manoj, S., Thirumurugan, M. and Elango, L., 2019. Hydrogeochemical modelling to understand the surface water-groundwater interaction around a proposed uranium mining site. Journal of Earth System Science, 128(3), pp.49.

- Ward Jr, J.H., 1963. Hierarchical grouping to optimize an objective function. *Journal of the American statistical association*, 58(301), pp.236-244.
- White, A.F., Claassen, H.C. and Benson, L.V., 1980. The effect of dissolution of volcanic glass on the water chemistry in a tuffaceous aquifer, Rainier Mesa, Nevada. US Government Printing Office.
- Suvedha, M., Gurugnanam, B., Suganya, M., and Vasudevan, S., 2009. Multivariate statistical analysis of geochemical data of ground water in Veeranam catchment area, Tamil Nadu. *Journal of the Geological Society of India*, 74(5), pp. 573-578.
- Walton, W. C., 1970, *Groundwater Resource Evaluation*, McGraw-Hill, Inc.
- Ward Jr, J. H., 1963. Hierarchical grouping to optimize an objective function. *Journal of the American Statistical Association*, 58(301), pp. 236-244