

کاربرد تحلیل عاملی و خوشه‌بندی در ارزیابی هیدروژئوشیمیایی آبخوان دشت قائم‌شهر

همایون مقیمی؛ دانشگاه پیام نور واحد ابهر

پذیرش ۹۶/۰۶/۱۹

دریافت ۹۴/۱۰/۰۵

چکیده

برای تشخیص فرایندهای کنترل‌کننده و تعیین منشأ یون‌های موجود در آب زیرزمینی از ۲۶ چاه بهره‌برداری که مربوط به میانگین دو دوره حداقل و حداکثر سطح ایستابی از سال ۱۳۹۰ و ۱۳۹۴ است، استفاده شده است. در این نمونه-برداری یون‌های اصلی و نیترات همراه با سختی، قلیائیت، EC، TDS، pH ارزیابی شده است. در این پژوهش در تحلیل عاملی و خوشه‌بندی از نرم‌افزار SPSS و در تحلیل خوشه‌بندی از روش وارد و فاصله اقلیدسی استفاده شده است. نتایج تحلیل عاملی نشان داد، سه مؤلفه‌ای که تغییرات کیفی آب زیرزمینی را کنترل می‌کنند در دوره حداقل و حداکثر سطح ایستابی مقدار واریانس تجمعی آن‌ها ۸۳/۵٪ در حداقل و ۸۰/۱٪ در حداکثر هستند. این مؤلفه‌ها شامل شوری، انحلال و فعالیت‌های انسانی است. پس از انجام خوشه‌بندی و تعیین زیرخوشه‌ها برای تعیین فرایندهای شیمیایی حاکم بر آبخوان دشت قائم‌شهر از نمودارهای گیبس، پایپر و تبادل یونی استفاده و نمودارهای ترکیبی آن‌ها ترسیم شد. در نمودار گیبس عامل هوازدگی و تبخیر و تبلور کنترل‌کننده شیمی آب زیرزمینی هستند. در نمودار پایپر نوع آب‌ها اکثراً کلسیم-بی‌کربنات هستند و تعداد کمی نیز سدیم-کلرایدی و یا اختلاطی (کلسیم، منیزیم و کلراید) هستند و نوع آخر شامل سدیم-منیزیم بی‌کربنات است. این نوع آب‌ها ناشی از هوازدگی و انحلال رسوبات کربناته، نفوذ آب شور دریا و نشت از آبخوان‌های شور هستند که بر اثر فرایندهای تبادل یونی و یا عکس آن همراه با واکنش‌های شیمیایی به‌وقوع می‌پیوندد. به‌طور کلی سه فرایند طبیعی، غیرطبیعی و اختلاط این دو، وضعیت شیمی آب زیرزمینی را کنترل می‌کنند. فرایند طبیعی شامل؛ تعامل بین آب-سنگ، نفوذ آب شور و تبخیر از سطح ایستابی است. فرایند غیرطبیعی (فعالیت‌های انسانی) شامل؛ ورود فاضلاب‌های شهری و روستایی، پساب مراکز صنعتی و پساب‌های کشاورزی که ناشی از انواع کودهای شیمیایی (ازته، سولفات و فسفات) است. در فرایند سوم مجموعه عوامل طبیعی و انسانی است. زیرا با برداشت‌های بی‌رویه از آبخوان باعث افت سطح ایستابی شده و در نتیجه نفوذ و پیش‌روی آب شور از دریا و آبخوان‌های شور را سبب می‌شوند. این تحقیق نشان داد که استفاده از روش‌های آماری چند متغیره در تجزیه و تحلیل روش‌های معمول هیدروژئوشیمیایی سودمند هستند.

واژه‌های کلیدی: فاصله اقلیدسی، روش وارد، هیدروژئوشیمی، نمودار پایپر، تبادل یونی.

مقدمه

آب‌های زیرزمینی از مهم‌ترین منابع تهیه آب شرب، کشاورزی و صنعتی در تمام دنیا است و اهمیت آن به‌دلیل رشد جمعیت و تغییرات اقلیمی بیش‌تر از پیش شده است. روند کاهش کیفیت آب زیرزمینی، شرایط تهدید کننده‌ای بر فعالیت‌های انسانی گذاشته و در حال تبدیل شدن به بحرانی در ابعاد جهانی است. کیفیت منابع آب زیرزمینی بر اثر

عوامل انسانی و توسعه فعالیت‌های صنعتی و کشاورزی به سرعت در حال کاهش است بررسی و مطالعه این منابع به منظور حفظ، نگهداری و اصلاح کمی و کیفی آن لازم و ضروری است [۱۴]. از مهم‌ترین اقدامات در مدیریت منابع آب زیرزمینی، شناخت اساسی فرایندهای حاکم هیدروژئوشیمیایی بر سیستم آبخوان است. حاصل این فرایند، شکل‌گیری ترکیب شیمیایی آب زیرزمینی است که به وسیله چندین عامل مانند ترکیب شیمیایی آب باران، فعالیت‌های انسانی، ساختارهای زمین‌شناسی و کانی‌شناسی حوضه آبریز و آبخوان کنترل می‌شوند [۱۵]، [۱۶]. روش‌های گرافیکی متداول در آب زیرزمینی و روش‌های تحلیل آماری چندمتغیره از جمله روش‌هایی هستند که در تحلیل کیفیت آب زیرزمینی مؤثر هستند. در همین رابطه، با استفاده از روش تحلیل عاملی، هیدروژئوشیمی آبخوان ساحلی آبدان-دیر بررسی شده و سه فرایند اصلی تبخیر، نفوذ آب‌های آهکی و آب برگشتی از کشاورزی از عوامل اصلی کنترل‌کننده کیفیت آبخوان تشخیص داده شده است [۱۱]. مناطق همگن از لحاظ کیفیت منابع آب زیرزمینی دشت قیر در استان فارس با کمک روش‌های تحلیل عاملی و خوشه‌ای بررسی شده است. متغیرها با بالاترین بارهای عاملی در تحلیل خوشه‌ای استفاده شده و بدین ترتیب چاه‌های محدوده بررسی شده به پنج خوشه طبقه‌بندی شده‌اند. براساس این طبقه‌بندی، کیفیت پارامترها از طبقه یک تا پنج افزایش یافته و چاه‌هایی که در طبقه یک قرار دارند از لحاظ کیفیت مناسب‌ترین چاه‌ها هستند [۸]. تغییرات کیفی دشت لنجان در اصفهان با استفاده از روش آماری چند متغیره (تحلیل عاملی و خوشه‌بندی) بررسی و با استفاده از ۱۴ پارامتر انتخابی که دارای هم‌بستگی قوی تا متوسط هستند تجزیه و تحلیل شدند. براین اساس ۷۰ درصد تغییرات کیفی، متأثر از سه عامل اصلی است که شامل منشأ انسانی، عوامل خارج از محیط طبیعی محدوده و تشکیلات زمین‌شناسی است [۴]. منابع آب دشت شیرامین با استفاده از روش‌های آماری چندمتغیره بررسی شد. در تحلیل عاملی چهار مؤلفه و در خوشه‌بندی سلسله مراتبی دو خوشه شناسایی و استخراج شد. این روش‌ها در شناخت عوامل مؤثر بر کیفیت آب بسیار سودمند هستند [۱۲]. آبخوان ساحلی پوری (هندوستان) با استفاده از روش‌های آماری چند متغیره (روش خوشه‌بندی و تحلیل عاملی) بررسی شد. براساس تحلیل عاملی، قبل از باران‌های مانسون چهار و بعد از آن دو عامل در تعویض یونی، رقیق شدن محلول کانی و تجزیه مواد آلی نقش دارند. در این مطالعه نتایج به دست آمده نشان می‌دهد، روش خوشه‌بندی و تحلیل عاملی روش بسیار مناسبی در تعیین سازو کار ژئوشیمی آبخوان‌های ساحلی هستند [۲۰]. در تحقیقات آبخوان آبرفتی دشت مند (بوشهر) عوامل کنترل‌کننده شوری با روش تحلیل عاملی و نمودارهای ترکیبی بررسی شد. نتایج تلفیق این دو روش نشان می‌دهد؛ عواملی مانند انحلال کانی‌های سولفات، انحلال هالیت (گنبد نمکی) همراه با نفوذ آب دریا و انحلال گاز کربنیک در آب نفوذی به آبخوان از مهم‌ترین عوامل کنترل کیفیت محسوب می‌شوند [۳]. با توجه به مکان قرارگیری دشت قائم‌شهر در بین ارتفاعات البرز و دریای خزر و اهمیت آن از لحاظ طبیعی و اقلیمی، توریستی، کشاورزی و صنعتی شرایط ویژه‌ای را از نظر استفاده از منابع آب زیرزمینی ایجاد کرده است. به سبب این شرایط، عوامل تأثیرگذار بسیاری در کیفیت آب محدوده بررسی شده نقش ایفا می‌کنند. بر پایه این عوامل و پارامترهای تأثیرگذار، یکی از مناسب‌ترین روش‌های شناخت فرایندهای حاکم بر محیط آب زیرزمینی، استفاده از انواع دیاگرام‌های (پایپر، گیبس، ترکیبی و نظایر آن) رایج در هیدروژئوشیمی است. اگرچه روش‌های گرافیکی و متداول برای ارزیابی فرایندهای حاکم بر آب زیرزمینی به کار می‌روند، اما برای ارزیابی بعضی از پارامترها همانند استفاده نکردن از برخی پارامترهای شیمیایی (نیترات، سیلیس،

آرسنیک، فلئور و نظایر آن) و غیرشیمیایی (دما، ویسکوزیته و نظایر آن) با محدودیت مواجه هستند [۲۲]. به همین منظور در این بررسی در کنار استفاده از روش‌های گرافیکی، از روش‌های تحلیل عاملی^۱، تجزیه به مؤلفه‌های اصلی^۲ و خوشه‌ای^۳ که از روش‌های آماری چند متغیره محسوب می‌شوند، در تجزیه و تحلیل هیدروژئوشیمی آب‌های زیرزمینی و تشخیص عوامل و پارامترهای تأثیرگذار استفاده شده است.

به‌طور کلی، اهداف مورد نظر در این تحقیق را می‌توان بدین‌صورت طبقه‌بندی کرد:

- (۱) رده‌بندی کیفی آب و نقاط نمونه‌برداری با روش‌های آماری.
- (۲) تشکیل و توصیف جوامع آماری داده‌ها (توزیع مکانی چاه‌ها) و واکنش‌های صورت گرفته در این محدوده.
- (۳) استفاده از روش‌های آماری، ارزیابی و تفسیر آن با روش‌های متداول (نمودار پایپر، گیبس و نظایر آن)

مواد و روش‌ها

معرفی محدوده بررسی شده

دشت قائم شهر از نظر جغرافیایی در شمال‌شرق ایران و از شمال با دریای خزر و از جنوب با رشته کوه‌های البرز محدود است. محدوده بررسی شده در 35° تا 52° تا $23'$ تا 53° طول شرقی و 35° تا $44'$ تا 36° عرض شمالی در استان مازندران واقع شده است. مساحت کل دشت $558/3$ کیلومترمربع است (شکل ۱).



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی محدوده دشت قائم‌شهر

دشت قائم‌شهر مانند دیگر آبخوان‌های آبرفتی ساحلی دریای خزر، مانند کاسه‌ای است که از فروافتادگی تدریجی دریا شکل گرفته است، به‌گونه‌ای که در انتهای جنوبی و شمالی کم‌ترین ضخامت و در بخش میانی بیش‌ترین ضخامت را دارد [۹]. بر اساس پژوهش‌های ژئوفیزیکی، رسوبات آبرفتی دشت از جنوب تا شمال مشخصات مختلفی را نشان می‌دهند. پژوهش‌های ژئوفیزیکی نشان می‌دهد، در بخش سطحی تا عمق ۸۰ الی ۹۰ متر در جنوب تا بخش میانی مقادیر از ۴۰ تا ۱۷ اهم‌متر و در شمال (ساحل دریای خزر) به یک اهم‌متر کاهش می‌یابد. این محدوده با مشخصات ارائه شده، آبرفت آبخوان آزاد را مشخص می‌کند. در زیر این آبخوان، چندین آبرفت به‌صورت مرکب با مقاومت ظاهری

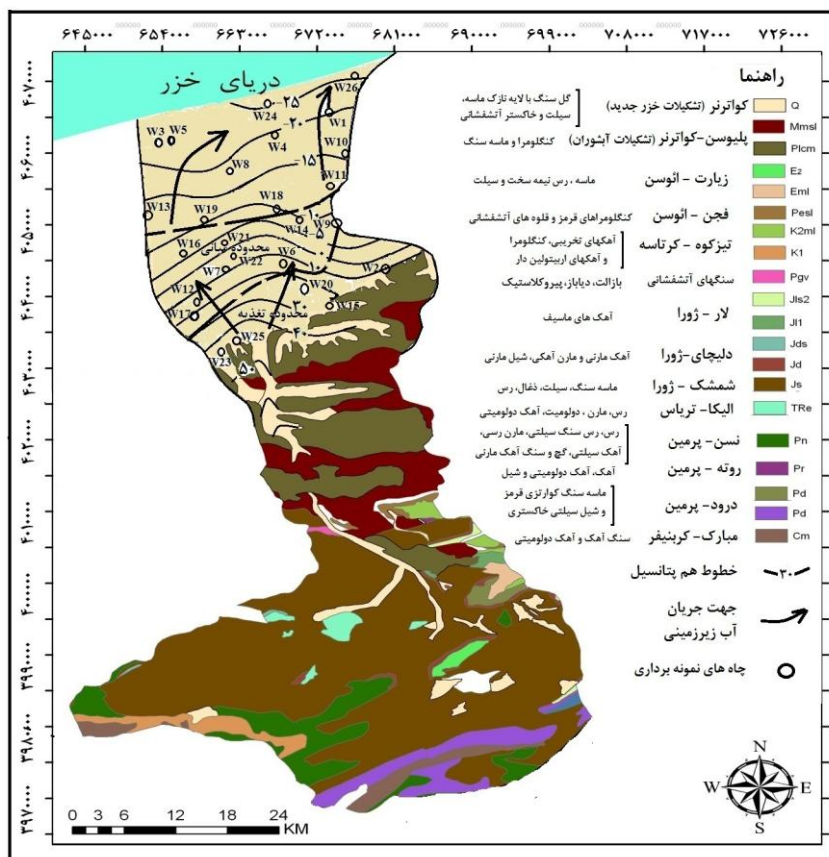
1. Factor Analysis (FA)
2. Principal Component Analysis (PCA)
3. Cluster Analysis (CA)

متفاوتی تشکیل شده است. مقاومت ظاهری در انتهای این بخش از جنوب به شمال از ۵ تا ۰/۵ اهم متر کاهش یافته که در واقع سنگ کف آبخوان‌ها را نشان می‌دهد. عمق این بخش در کناره‌ها بین ۵۰ تا ۱۰۰ متر و در بخش میانی بین ۲۰۰ الی ۲۵۰ است. شکل‌گیری این دشت هم‌زمان با عقب‌نشینی دریا جبهه آب شیرین از ارتفاعات سعی در شستشو و عقب راندن آب شور کرده ولی به‌طور کامل انجام نگرفته و در جای‌جای آبرفت محدوده‌های آب شور به‌جای مانده و به‌وسیله رسوبات پوشانده شده و آبخوان‌های شور را تشکیل داده‌اند [۷].

دشت قائمشهر از نظر هیدرولوژی بخشی از حوضه آبریز دریای خزر به‌شمار می‌رود و از نظر منابع آب سطحی بسیار غنی است. شرایط اقلیمی محدوده بررسی شده متأثر از آب و هوای کوهستانی ارتفاعات جنوبی و مرطوب دریایی در شمال است که در نتیجه دارای اقلیم نیمه مرطوب معتدل است. براساس آمار ۱۷ ساله (۹۴-۱۳۷۸) در محدوده بررسی شده ۱۹۵۰۵ عدد چاه عمیق و نیمه‌عمیق، ۴ رشته قنات و ۵۸ دهنه چشمه با مجموع تخلیه 712 MCM باعث می‌شود به‌طور میانگین سالانه $7/8 \text{ MCM}$ از حجم مخزن کاسته شود. این میزان حجم آب خروجی به‌طور میانگین سبب افت سالانه بین ۷ الی ۱۰ سانتی‌متر در سطح ایستابی می‌شود. براساس میانگین آمار ۲۶ ساله (۹۰-۱۳۶۴)، مقادیر سالانه دما، بارش، تبخیر و تعرق پتانسیل در محدوده بررسی شده به‌ترتیب $16/4^{\circ}\text{C}$ (ماه‌های مرداد و دی گرم‌ترین و سردترین ماه‌ها)، $729/1$ میلی‌متر (ماه‌های آبان و تیر بیش‌ترین و کم‌ترین بارش) و $899/1$ میلی‌متر (ماه‌های دی و مرداد کم‌ترین و بیش‌ترین تبخیر و تعرق پتانسیل) است [۶]. از لحاظ زمین‌شناسی، در حوضه آبریز قائمشهر سازندهای مختلفی از پالئوزوئیک تا کواترنر شناسایی شده است (شکل ۲). اکثر سازندها در ارتفاعات از رسوبات آهکی، مارنی، دولومیتی و ماسه‌سنگی دوره‌های ژوراسیک، کرتاسه و ائوسن تشکیل می‌شود. در محدوده دشت، از جنوب به شمال را رسوبات مخروط افکنه و در بخش میانی به‌سمت ساحل را رسوبات دانه‌ریز پوشانده است. در سطح دشت این رسوبات شامل ماسه، رس‌های سخت نشده، سیلت و لایه‌ای نازک از خاکسترهای آتشفشانی است که با نام رسوبات جدید خزر (کواترنر) تعریف می‌شوند. در زیر این رسوبات، سازند آپشوران که از رس، مارن، ماسه سخت نشده، کنگلومرا و لایه‌ای نازک از خاکسترهای آتشفشانی با سن پلیو-کواترنر قرار دارد. مخروط افکنه‌ها و رسوبات خزر جدید از نظر هیدروژئولوژی به‌عنوان نفوذپذیر و تشکیلات آپشوران نیمه‌نفوذپذیر تعریف می‌شوند. این طبقه‌بندی بر اساس لاگ چاه‌های اکتشافی و آنالیز دانه‌بندی (جورشدگی، شکل، اندازه و تخلخل)، آزمون‌های پمپاژ و پژوهش‌های ژئوفیزیکی انجام شده است.

اکثر سازندها در ارتفاعات از رسوبات آهکی، مارنی، دولومیتی و ماسه‌سنگی دوره‌های ژوراسیک، کرتاسه و ائوسن تشکیل می‌شود. در محدوده دشت، از جنوب به شمال را رسوبات مخروط افکنه و در بخش میانی به‌سمت ساحل را رسوبات دانه‌ریز پوشانده است. در سطح دشت این رسوبات شامل ماسه، رس‌های سخت نشده، سیلت و لایه‌ای نازک از خاکسترهای آتشفشانی است که با نام رسوبات جدید خزر (کواترنر) تعریف می‌شوند. در زیر این رسوبات، سازند آپشوران که از رس، مارن، ماسه سخت نشده، کنگلومرا و لایه‌ای نازک از خاکسترهای آتشفشانی با سن پلیو-کواترنر قرار دارد. مخروط افکنه‌ها و رسوبات خزر جدید از نظر هیدروژئولوژی به‌عنوان نفوذپذیر و تشکیلات آپشوران نیمه نفوذپذیر

تعریف می‌شوند. این طبقه‌بندی بر اساس لاگ چاه‌های اکتشافی و آنالیز دانه‌بندی (جورشدگی، شکل، اندازه و تخلخل)، آزمون‌های پمپاژ و پژوهش‌های ژئوفیزیکی انجام گرفته است.



شکل ۲. نقشه زمین‌شناسی، تراز آب زیرزمینی و مکان چاه‌های نمونه‌برداری دشت قائم‌شهر

مکان و زمان نمونه‌برداری و آنالیزها

محدوده بررسی شده از جنوب به شمال (تغذیه به تخلیه) به سه بخش کوهپایه (تغذیه)، میانی و ساحلی (تخلیه) تقسیم شده‌است. داده‌های تجزیه نمونه‌های آب از ۲۶ حلقه چاه انتخابی که مربوط به حداقل و حداکثر سطح ایستابی سال‌های ۱۳۹۰ تا ۱۳۹۴ است، از سازمان آب منطقه‌ای قائم‌شهر اخذ شد. در شکل ۲ موقعیت مکانی دشت، چاه‌ها و میانگین نقشه تراز سطح ایستابی (۷۸-۱۳۹۴) ارائه شده است. آنالیز نمونه‌های آب شامل اندازه‌گیری غلظت کاتیون و آنیون‌های اصلی همراه با نیترات و EC، T.D.S، pH، سختی و قلیائیت است. خطای آزمایش نمونه‌ها کمتر از ۵ درصد بوده است [۱۸] که با توجه به آن تجزیه و تحلیل شده است.

آنالیز آماری چند متغیره

روش‌های تحلیل آماری چند متغیره به‌طور گسترده برای کمک به حل مشکلات زیست‌محیطی و ارائه راه‌کارهایی برای درک و شناخت برخی از فرایندهای طبیعی استفاده می‌شود. زیرا متغیرهای فیزیکی و شیمیایی پیچیده‌ی مختلفی می‌تواند بر کیفیت آب زیرزمینی اثر داشته باشد. درک و شناخت وضعیت هیدروژئوشیمیایی غالب بر آب زیرزمینی محدوده بررسی شده کار سخت و مشکلی است [۱۶]. روش‌های تحلیل آماری چندمتغیره برای پارامترهایی

که هم‌بستگی دارند، قابل استفاده هستند. از این رو ابتدا جدول هم‌بستگی پیرسون برای پارامترهای مورد نظر آماده شده است [۱۷] (جدول ۱). مقادیر هم‌بستگی بین ± 1 در تغییر است. معمولاً مقادیر بیش از ۰/۷ به معنی هم‌بستگی قوی، بین ۰/۵ تا ۰/۷ هم‌بستگی متوسط معنی‌دار و کم‌تر از ۰/۵ به عنوان هم‌بستگی ضعیف تعریف می‌شود. در این بررسی از نرم‌افزار SPSS-Ver.18 استفاده شده است. از همین نرم‌افزار برای نرمال و استاندارد بودن داده‌ها از روش کولموگراف-اسمیرنوف (K-S) و برای کفایت داده‌ها از روش کایسر-میر-ولکین (KMO) استفاده و سپس جدول هم‌بستگی پیرسون تهیه شد.

تحلیل عاملی

یکی از روش‌های آنالیز چند متغیره آماری اعمال شده در این تحقیق، روش تجزیه به مؤلفه‌های اصلی است و از این روش برای استخراج فرایندهای مؤثر استفاده شده است. فرایندهای زمین‌شناسی و هیدروژئولوژیکی معمولاً پیچیده هستند و این پیچیدگی با توزیع غیریک‌نواخت در بسیاری از اندازه‌گیری‌ها نمایان‌تر می‌شود. اندازه‌گیری‌های زمانی و مکانی فرایندهای فیزیکی یا شیمیایی معمولاً نمی‌توانند به‌وضوح فرایندهای اصلی حاکم را با کاهش داده‌ها و طبقه‌بندی، تفسیر یا آشکار کنند. تحلیل عاملی روش آماری چندمتغیره‌ای است که هدف آن ساده کردن مجموعه‌های پیچیده و مختلفی است که بین متغیرهای مشاهده‌ای وجود دارد. این روش برای توصیف تغییرپذیری بین متغیرهای مشاهده‌ای به تعدادی محدود از متغیر مشاهده نشده که عامل نامیده می‌شوند، استفاده می‌شود [۲۵]. تحلیل عاملی دخالت متغیرها با اهمیت کم‌تر را به وسیله چرخش واریمکس به ماتریس بارهای عاملی کاهش می‌دهد. یعنی روش چرخش واریمکس [۱۹] برای متمایز کردن متغیرهایی با بارهای عاملی زیاد (بار عاملی نزدیک به ± 1) به متغیرهایی با بار عاملی کم (بار عاملی نزدیک به صفر) اعمال شد. بر پایه مجموعه‌ای از قوانین پایه‌ریزی شده، این چرخش، متغیرهای جدیدی که عامل متغیر نامیده می‌شود را تولید می‌کند [۵]، [۱۳]. این عامل‌ها رابطه بین متغیرها و میزان اهمیت آن‌ها را مشخص می‌کند و از این طریق می‌توان عوامل مؤثر در فرایندهای هیدروژئوشیمیایی را تشخیص داد.

تحلیل سلسله مراتبی

تحلیل خوشه‌ای نیز یکی از روش‌های پُر کاربرد در تحلیل هیدروژئوشیمی و پژوهش‌های زیست محیطی است و یکی از کاربردی‌ترین روش‌های به کار برده شده در علوم زمین است. تحلیل سلسله مراتبی روشی طبقه‌بندی داده‌هاست. در این روش قبل از تحلیل، نخست باید یک مقیاس کمی بر پایه هم‌خوانی (تشابه) بین مشاهدات انتخاب کرد. این شاخص‌ها (مقیاس کمی، فاصله و تشابه) با توجه به الگوریتم تشکیل خوشه‌ها، ماهیت مکانی، متغیرهای موجود و مقیاس اندازه‌گیری انتخاب شده و در نتیجه این عملیات یک نمودار درختی ترسیم می‌شود. در این نمودار اغلب مشاهدات مشابه با فواصل مشخص به یک‌دیگر متصل می‌شوند. در این روش نمونه‌های آب زیرزمینی با روش وارد^۱ و فاصله اقلیدسی^۲ متصل و گروه‌بندی شده‌اند. بدین ترتیب هرچه فواصل کم‌تر باشد تشابه مشاهدات (چاه‌ها) بیش‌تر است و بالعکس فاصله بیش‌تر تشابه کم‌تری را نشان می‌دهد. در این مطالعه از روش سلسله مراتبی برای گروه‌بندی نمونه‌های آب زیرزمینی استفاده شده است. از ویژگی مهم این روش انتخاب تعداد خوشه به صورت خودکار است در صورتی که

1. Ward Method
2. Euclidean Distance

در روش‌های دیگر باید تعداد خوشه مشخص باشد. از مزایای دیگر این روش تشکیل یک نمونه به تنهایی به‌عنوان خوشه و ارائه یک نمودار درختی است [۱۷].

فرایند تبادل یونی و تبادل یونی معکوس

در این فرایند سدیم و پتاسیم محلول با کلسیم و منیزیم جامد تعویض می‌شوند. در حالت دیگر کلسیم و منیزیم محلول با سدیم و پتاسیم جامد عکس تعویض را انجام می‌دهند. این فرایند در جایی رخ می‌دهد که کانی‌های رسی غنی از سدیم مانند مونت مورینیت با کلسیم و منیزیم آب زیرزمینی واکنش داده باعث ورود سدیم به آب زیرزمینی می‌شود. برای نمایش فرایندهای تبادل یونی و عکس آن از دو نمودار ترکیبی EC-Na/Cl و Na-Cl در برابر $(Ca+Mg)-(SO_4+HCO_3)$ استفاده می‌شود.

نمودار گیبس و پایپر

برای بررسی ترکیب شیمیایی نمونه‌های آب از لحاظ فرایندهای اثرگذار بر شیمی آب می‌توان از مدل ارائه شده را گیبس (۱۹۷۰) استفاده کرد. نمودار این مدل براساس نسبت موجود بین TDS با کاتیون‌ها و آنیون‌های اصلی که نماینده آب‌های شیرین تا بسیار شور هستند، ترسیم می‌شود. در مدل گیبس سه فرایند اصلی به‌عنوان عوامل کنترل‌کننده شیمی آب تعریف شده است. این سه عامل شامل؛ بارش جوی، واکنش آب-سنگ (هوازگی) و تبخیر و تبلور است. برای بررسی ترکیب شیمیایی منابع آب زیرزمینی محدوده بررسی شده از دیاگرام پایپر که از دو مثلث کاتیونی و آنیونی و نسبت مجموع آن‌ها یا لوزی تشکیل شده و برای رده‌بندی نوع آب استفاده می‌شود. مثلث‌های یونی به میدان‌های مختلف که با نوع آب یا رخساره‌های شیمیایی متناظر هستند، تقسیم می‌شوند.

جدول ۱. آمار توصیفی پارامترهای موجود در آب زیرزمینی دشت قائم‌شهر در حداکثر و حداقل سطح ایستابی بین سال‌های آبی ۹۴-۱۳۹۰ (TDS(mg/l), EC(μ S/cm), عناصر برحسب mg/l TH برحسب mg/l کلسیم کربنات و

آلکالینیتی بر حسب mg/kg کلسیم کربنات، (Cat.; Cation: An; Anion(meq/l)) [۳]

P	EC	TDS (mg/l)	pH	Na (mg/l)	K (mg/l)	Ca (mg/l)	Mg (mg/l)	NO3 (mg/l)	HCO3 (mg/l)	Cl (mg/l)	SO4 (mg/l)	TH	Alk.
حداکثر سطح ایستابی (۹۴ - ۱۳۹۰)													
Min	762	481.7	7.1	20.7	2.8	95	12.4	7	258.1	40.8	10.8	325	233.8
Max	2704.7	1869	7.9	353.8	4.8	216.5	51.9	52.7	985.1	501.4	168.6	711.6	807.8
Mean	1433.1	956.7	7.4	125.4	4.1	145.3	26.8	20.3	488.3	176.8	81.9	473.9	400.4
SD	498.1	349.2	0.17	100	0.5	32.6	8.7	11.6	140.8	123.8	40	101.7	115.4
حداقل سطح ایستابی (۹۴ - ۱۳۹۰)													
Min	806	528	7	281.2	2.8	94	13.5	4.5	356.1	50.6	9.6	308.7	292
Max	3000	2212	7.8	328	5.1	323.5	56.7	33.8	1194	458.8	177.6	1038.5	979.1
Mean	1502	993.2	7.4	125.5	4.1	148.4	26.5	18.3	510.7	175	75.3	479.7	419.6
SD	593.5	420	0.14	91.3	0.56	50.2	11.3	9.6	175.8	123.4	44.7	162.3	143.6
St(WHO)	500- 1500	1000- 1500	6.5- 8.5	200	12	250	30	50	500	250	250	500	600

نتایج و بحث

تحلیل آماری چند متغیره

پارامترهای مختلفی بر کیفیت منابع آب زیرزمینی اثر دارند، تعدادی از آن‌ها به دلیل فعالیت‌های انسانی (کشاورزی، دامپروری، صنعتی، پساب‌ها و فاضلاب‌های شهری و روستایی) و برخی دیگر طبیعی (سازندهای زمین‌شناسی، اقلیم، آب‌های سطحی و نظایر آن) و در حالت سوم مجموعه‌ای از دو حالت مذکور است. در جدول ۱ آمار توصیفی پارامترهای موجود در آب زیرزمینی از قبیل حداکثر، حداقل، میانگین، و انحراف معیار نشان داده شده است.

با توجه به جدول ۱ و هم‌بستگی بین پارامترهای اندازه‌گیری شده و میانگین آن‌ها، تواتر کاتیونی و آنیونی در حداکثر و حداقل سطح ایستابی به صورت $\text{Ca} > \text{Na} + \text{K} > \text{Mg}$ و $\text{HCO}_3 > \text{Cl} > \text{SO}_4$ است. با بررسی میانگین داده‌ها در جدول ۱ مقادیر نیمی از پارامترهای حداقل سطح ایستابی تا حدودی بیش از حداکثر است به جز pH، سولفات و نیتрат که بیش از حداقل است. با افزایش pH مقادیر منیزیم در هر دو دوره تقریباً مساوی هستند و در مقایسه با کلسیم بسیار کمتر است. که این نشان‌دهنده انحلال کم‌تر منیزیم از دولومیت‌ها نسبت به کلسیم از آهک‌ها است. منشأ منیزیم دوگانه است هم از انحلال دولومیت‌ها (طبیعی) و هم از پساب کارخانه‌هایی که به مقدار زیاد منیزیم مصرف می‌کنند (مانند کارخانه‌های باتری سازی، صنایع فلزی، خودرو سازی و لوازم جانبی و نظایر آن). افزایش نیترات و سولفات در حداکثر کاملاً ناشی از فعالیت‌های انسانی است (به دلیل استفاده از کودهای سولفات و ازته). با توجه به پراکندگی تقریباً یک‌نواخت بارش‌ها در طول سال و افزایش نسبی آن در مهر و آبان و کاهش آن در تیر و مرداد سبب کاهش غلظت و افزایش آن در ماه‌های مذکور می‌شود. در فصل بارش‌ها و افزایش حجم آب ورودی به آبخوان باعث افزایش انحلال آهک، دولومیت و مارن می‌شود. در حالی که در حداقل سطح ایستابی به دلیل تغذیه کم، نفوذ آب شور از آبخوان‌های شورزیرین و دریای خزر و بهره‌برداری بی‌رویه باعث کاهش سطح ایستابی شده و از طرف دیگر با افزایش تبخیر مخصوصاً در محدوده تخلیه غلظت نیز افزایش می‌یابد. در نتیجه تاحدودی زیاد بودن اکثر مقادیر در حداقل دور از انتظار نیست. مقادیر ردیف حداکثر در جدول ۱ به جز پتاسیم در مقایسه با حد استاندارد بسیار زیاد است که بیان‌گر نامناسب بودن کیفیت آب برای مصارف مختلف در بعضی از نقاط است. نیترات یکی از پارامترهای مهم و مضر در کیفیت آب محسوب شده و چنان‌که دیده می‌شود میزان حداکثر نیترات در حداقل و حداکثر سطح ایستابی بیش از استاندارد (۵۰ mg/l یا ۰/۸ meq/l) است. همین‌طور زیاد بودن میزان سختی هدایت الکتریکی و قلیائیت از حد استاندارد مشکلات زیادی در مصارف کشاورزی، صنعتی و شرب ایجاد می‌کند که باید به آن توجه شود. زیاد بودن مقادیر حداکثر در هر دو دوره و ادامه روند فعلی می‌تواند در آینده نزدیک سبب افزایش و فراگیر شدن مقادیر در کل محدوده بررسی شده شود.

قبل از استفاده از آمار داده‌های موجود، داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار SPSS استاندارد (Zscore) شده و نرمال بودن آن‌ها نیز از روش کلوموگراف-اسمیرنوف (K-S) آزمایش و تأیید شده است. برای تعیین کفایت و مناسب بودن داده‌ها از روش کایسر-میر-اولکین (KMO) استفاده شده است. با توجه به جدول ۲ داده‌ها در حداکثر و حداقل سطح ایستابی در حد خوب و مناسب به دست آمده و نشان‌دهنده تناسب داده‌ها برای تحلیل عاملی و روش خوشه‌ای است [۱۹].

جدول ۲. ارزیابی کفایت داده‌های شیمیایی محدوده بررسی شده با روش KMO و تست بارتلت

	حداقل سطح ایستایی (۱۳۹۰-۹۴)	حداکثر سطح ایستایی (۱۳۹۰-۹۴)	آزمون KMO از کفایت داده ها
	0.761	0.746	
Bartlett's Test	1251	862.08	تقریب مجذور کای
	105	78	درجه آزادی
	0	0	سطح معناداری
	شایستگی و تناسب داده ها		مقدار KMO
	عالی		≤ 0.9
	خیلی خوب		0.8 - 0.89
	<u>خوب</u>		<u>0.70 - 0.79</u>
	نسبتاً خوب		0.60 - 0.69
	بد		0.5 - 0.59
	غیر قابل قبول		≥ 0.49

هم‌بستگی

هم‌بستگی پارامترهای شیمیایی منابع آب زیرزمینی محدوده بررسی شده در جدول ۳ ارائه شده است. چنان‌که دیده می‌شود، هدایت الکتریکی و یا TDS با اکثر پارامترها در حداقل و حداکثر سطح ایستایی به‌جز pH و نیترات هم‌بستگی متوسط تا قوی را نشان می‌دهد. هم‌چنین با پارامترهای سدیم، پتاسیم، کلراید هم‌بستگی قوی و با سولفات، کلسیم، منیزیم و بی‌کربنات هم‌بستگی متوسط معنی‌دار دارد و این مطلب نشان می‌دهد، EC و یا TDS بیش‌تر تحت تأثیر انحلال این عناصر و موادمها هستند. pH و نیترات هم‌بستگی معنی‌داری با هیچ یک از پارامترها ندارند. یعنی این دو، پارامترهایی با کم‌ترین تأثیر در شرایط شیمیایی منابع آب محدوده بررسی شده هستند (با توجه به میانگین ۷/۴ pH). pH در حداکثر سطح ایستایی هم‌بستگی مثبت در حداقل سطح ایستایی هم‌بستگی منفی با نیمی از پارامترها دارد (به‌جز EC, TDS, کلراید، سدیم سولفات). وجود هم‌بستگی مثبت بین EC با سدیم و کلراید در هر دو دوره می‌تواند بیان‌گر تأثیر نفوذ آب شور دریا، نفوذ از آبخوان‌های شور زیرین و یا تبادل یونی (تعویض یا عکس آن) بین محلول آب با رسوبات رسی که حاوی سدیم هستند، باشد. بین کلسیم، منیزیم و بی‌کربنات در حداقل و حداکثر هم‌بستگی متفاوتی وجود دارد. ولی هم‌بستگی بین این پارامترها ناشی از وجود سازندهای آهکی، دولومیتی و مارنی و انحلال آن‌ها در محدوده بررسی شده است. سختی و قلیائیت نیز در حداقل سطح ایستایی نسبت به حداکثر هم‌بستگی قوی‌تری با کلسیم، منیزیم و بی‌کربنات دارد. به‌طور کلی میزان هم‌بستگی بین پارامترها نسبت به‌هم در حداقل و حداکثر متفاوت است. به‌طور مثال؛ در حداکثر هم‌بستگی EC با سدیم، کلراید بیش‌تر از حداقل است ولی بقیه پارامترها در حداقل بیش از حداکثر است. این مسئله ناشی از افزایش غلظت و کاهش حجم آب نفوذی به آبخوان در حداقل سطح ایستایی است. وضعیت سدیم و کلراید در محدوده کاملاً متفاوت است و به‌نظر می‌رسد در کنار حجم سدیم کلراید تزریقی به آبخوان از طریق آب‌های شور (نفوذ از آب دریا و نشت از آبخوان‌های شور) افزایش فرایندهای شیمیایی و آزاد شدن سدیم (از طریق واکنش‌های شیمیایی آب و کانی‌های رسی غنی از سدیم) باعث افزایش هم‌بستگی در حداکثر سطح ایستایی می‌شود.

جدول ۳. رابطه همبستگی پیرسون بین پارامترهای کیفی آب زیرزمینی دشت قائم شهر (۹۴-۱۳۹۰)

P; Parameter, Min.; Minimum, Max; Maximum, W.T.; Water Table

P (Max.W.T)	EC	TDS	pH	Na	K	Ca	Mg	Cat.	NO3	SO4	Cl	HCO3	An.	TH	Alk	P (Min.W.T)
EC	1	0.99**	0.1	0.92**	0.81**	0.76**	0.78**	0.98**	0.20	0.90**	0.92**	0.78**	0.98**	0.81**	0.78**	EC
TDS	0.97**	1	0.09	0.90**	0.80**	0.79**	0.79**	0.99**	0.23	0.87**	0.90**	0.81**	0.99**	0.83**	0.82**	TDS
pH	0.15	0.19	1	0.18	-0.11	-0.12	-0.09	0.05	-0.11	0.11	0.23	-0.18	0.05	-0.12	-0.18	pH
Na	0.94**	0.94**	0.12	1	0.68**	0.49*	0.61**	0.90**	0.01	0.78**	0.97**	0.58**	0.90**	0.55*	0.59**	Na
K	0.73**	0.74**	0.05	0.62**	1	0.71**	0.58**	0.78**	0.20	0.73**	0.67**	0.64**	0.79**	0.71**	0.70**	K
Ca	0.68**	0.72**	0.42*	0.52**	0.73**	1	0.73**	0.72**	0.18*	0.57**	0.43**	0.78**	0.72**	0.98**	0.78**	Ca
Mg	0.63**	0.69**	0.009	0.54**	0.5**	0.41**	1	0.81**	0.39	0.74**	0.63**	0.79**	0.81**	0.85**	0.79**	Mg
Cat.	0.97**	0.99**	0.21	0.96**	0.73**	0.72**	0.64**	1	0.2	0.70**	0.87**	0.72**	1.0**	0.76**	0.72**	Cat.
NO3	0.04	0.13	0.35	-0.009	0.24	0.39*	0.1	0.11	1	0.14	0.22	-0.03	0.21*	0.18	0.03	NO3
SO4	0.77**	0.76**	0.03	0.69**	0.71**	0.58**	0.59**	0.75**	0.09	1	0.60**	0.31**	0.70**	0.61**	0.31**	SO4
Cl	0.95**	0.91**	0.08	0.97**	0.61**	0.52**	0.48**	0.93**	-0.06	0.68**	1	0.32**	0.87**	0.43**	0.32**	Cl
HCO3	0.72**	0.82**	0.38	0.67**	0.63**	0.81**	0.67**	0.81**	0.29	0.48**	0.57**	1	0.72**	0.81**	1.0**	HCO3
An.	0.97**	0.99**	0.21	0.96**	0.73**	0.72**	0.64**	1.0**	0.11	0.75**	0.93**	0.81**	1	0.76**	0.72**	An.
TH	0.76**	0.81**	0.33	0.60**	0.77**	0.95**	0.68**	0.80**	0.34	0.67**	0.57**	0.88**	0.80**	1	0.81**	TH
Alk	0.72**	0.82**	0.38	0.67**	0.63**	0.81**	0.67**	0.81**	0.29**	0.48**	0.57**	1.0**	0.82**	0.88**	1	Alk

**. Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed). *. Correlation is significant at the 0.05 level (2-tailed).

تحلیل عاملی (تحلیل مؤلفه‌های اصلی)

تحلیل عاملی براساس پارامترهای کیفیت، شامل غلظت یون‌های اصلی، pH، TDS، EC و قلیائیت انجام گرفته است. در این روش، عامل‌ها با روش تجزیه به مؤلفه‌های اصلی و بار عاملی یا ضریب تأثیرگذاری هر پارامتر با روش چرخش واریمکس به دست آمده است. در مرحله اول، برای اعمال این روش وجود همبستگی است که در جدول ۲ نشان داده شد. عموماً در تحلیل عاملی بارهای عاملی نزدیک به یک به عنوان عوامل مؤثر در سیستم در نظر گرفته می‌شود.

تحلیل مؤلفه‌های به دست آمده

از میان مؤلفه‌ها، اولین مؤلفه بیش‌ترین واریانس و به‌ترتیب مؤلفه‌های بعدی مقادیر کم‌تری از واریانس را نشان می‌دهد. در جدول ۴ بار یا ضرایب هر عامل ارائه شده است و ضرایب بالای ۰/۷ به صورت پررنگ و خط‌دار و مقادیر ۰/۵-۰/۷ با ضرایب متوسط و پررنگ مشخص شده‌اند که نشان‌گر پارامترهای مؤثر در آن مؤلفه هستند. بدین ترتیب اعمال روش تحلیل مؤلفه‌های اصلی منجر به استخراج سه مؤلفه در حداقل و حداکثر سطح ایستابی شده است. نتایج حاصل نشان‌دهنده آن است که این مؤلفه‌ها در حداقل ۸۳/۵ و در حداکثر سطح ایستابی ۸۰/۱٪ از کل میزان اشتراک

را در بردارند. در جدول ۴ بارهای عاملی تبیین‌کننده، درصد واریانس و واریانس تجمعی هر مؤلفه ارائه شده است.

جدول ۴. ماتریس عاملی دوران یافته درصد عامل‌ها، درصد واریانس و واریانس تجمعی پارامترهای

هیدروژئوشیمیایی در تحلیل عاملی محدوده بررسی شده در سال‌های ۹۴-۱۳۹۰

پارامترها	دوره	مؤلفه‌های حداقل سطح ایستابی			پارامترها	دوره	مؤلفه‌های حداکثر سطح ایستابی		
Cl	حداقل سطح ایستابی	0.953	0.141	0.019	Na	حداکثر سطح ایستابی	0.958	0.119	0.131
Na		0.939	0.075	-0.142	Cl		0.954	0.057	0.089
EC		0.827	0.528	0.033	EC		0.878	0.396	-0.009
Anion		0.813	0.574	0.029	Cation		0.874	0.47	0.066
Cation		0.810	0.577	0.03	Anion		0.873	0.473	0.066
TDS		0.781	0.584	0.068	TDS		0.861	0.474	-0.02
SO4		0.654	0.339	0.133	SO4		0.643	0.203	-0.283
K		0.584	0.46	0.243	K		0.512	0.5	-0.229
Alk		0.229	0.916	-0.066	TH		0.397	0.878	-0.074
HCO3		0.229	0.916	-0.066	Ca		0.338	0.842	0.033
TH		0.229	0.895	0.195	HCO3		0.409	0.825	0.122
Ca		0.271	0.864	0.237	Alk		0.409	0.825	0.122
Mg		0.327	0.801	0.056	Mg		0.385	0.562	-0.3
NO3		0.284	-0.08	0.787	NO3		-0.105	0.548	0.183
pH		0.309	-0.228	-0.643	pH		0.102	0.163	0.874
توضیحات		شوری و تبادل یونی	اتحلال، تغذیه از بارش و فعالیت انسانی	واکنش شیمیایی و انحلال پذیری، فعالیت انسانی		شوری و تبادل یونی	اتحلال، تغذیه از بارش و فعالیت انسانی	واکنش شیمیایی، انحلال پذیری	
درصد واریانس		38.14	37.066	8.298			42.111	30.792	7.266
درصد تجمعی واریانس		38.14	75.208	83.50			42.111	72.903	80.17

Extraction Method: Principal Component Analysis. Rotation Method: Varimax with Kaiser Normalization.

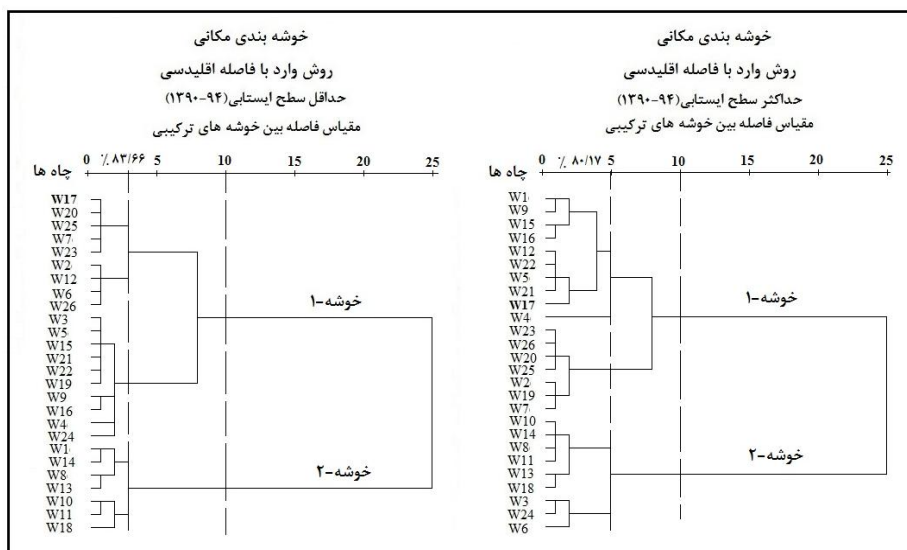
واریانس مؤلفه‌های اول و دوم در حداقل سطح ایستابی نزدیک به هم است و تقریباً ۷۵٪ کل واریانس تجمعی را به‌خود اختصاص داده و مجموع این دو در حداقل، کل تغییرات شیمیایی را در محدوده کنترل می‌کند. درحالی‌که در حداکثر سطح ایستابی، فاصله این مقادیر نسبتاً زیاد است در نتیجه هرکدام از مؤلفه‌ها به تنهایی مؤثر خواهند بود. مسئله قابل توجه در این جدول جابه‌جایی پارامترها نسبت به هم است. در این میان پارامترهای EC و یا TDS، سولفات، پتاسیم، منیزیم، نیتрат و pH جابه‌جا نشده‌اند. با توجه به این‌که رسوبات هالیدی و ژپسی در محدوده وجود ندارد، در مؤلفه‌های اول، سدیم و کلراید دارای بار عاملی بیش از ۰/۹ هستند که مقدار این بار در حداقل بیش‌تر از حداکثر است. منشأ اصلی کلراید، سدیم‌کلراید است، در صورتی‌که سدیم منابع مختلفی دارد. اکثر منشأ یون سدیم در نتیجه تبادلات یونی و از مارن‌های (آهک + رس) ارتفاعات مشرف به دشت، رسوبات رسی غنی از سدیم (رسوبات آبرفتی بخش میانی تا خروجی دشت) با کلسیم و منیزیم واکنش داده و سبب آزاد شدن سدیم می‌شود (نرم‌شدگی طبیعی). به‌علاوه سدیم به‌صورت محلول از نفوذ آب شور دریای خزر و آبخوان‌های شور که در زیر آبخوان شیرین‌بالایی قرار دارند، وارد آب زیرزمینی می‌شوند. علل این جابه‌جایی و افزایش بسیار کم آن در حداقل نسبت به حداکثر، به‌دلیل

کاهش بارش‌ها و به‌دنبال آن کاهش میزان نفوذ، برداشت‌های بی‌رویه از آبخوان و تبخیر از سطح ایستابی (افت سطح ایستابی) و تبادل یونی است که باعث تغییر در مقدار یون‌های سدیم و کلراید می‌شود. در مؤلفه‌های اول هر دو دوره هدایت الکتریکی، آنیون و کاتیون‌ها که بار عاملی زیادی دارند ($0/8$ تا $0/9$) بیش‌تر ناشی از یون‌های سدیم و کلراید و سپس سولفات و پتاسیم است. منشأ سولفات با توجه به این‌که در محدوده بررسی شده رسوبات ژیبسی وجود ندارد (شکل ۲) از استفاده بیش از حد کودهای سولفات پتاس در زمین‌های کشاورزی همراه با پساب صناعی از قبیل باتری‌سازی، صنایع فلزی، خودروسازی ناشی می‌شود و در نتیجه منشأ انسانی دارد. به‌طور کلی مؤلفه‌های اول ناشی از اثرات برداشت‌های بی‌رویه، تبادل یونی و تبخیر از سطح ایستابی در محدوده تخلیه است و این مؤلفه را می‌توان مؤلفه سدیم کلرایدی نامید. در مؤلفه‌های دوم مقادیر بار عاملی حداکثر سطح ایستابی بیش‌تر از حداقل است و جابه‌جایی پارامترها نسبت به هم قابل توجه است. بارهای عاملی بالای $0/9$ شامل قلیائیت و بی‌کربنات و بین $0/8$ تا $0/9$ شامل سختی، کلسیم و منیزیم است (حداکثر سطح ایستابی). درحالی‌که در حداقل سطح ایستابی با کاهش بار عاملی به‌ترتیب؛ سختی، کلسیم، بی‌کربنات و قلیائیت و سپس منیزیم با بار عاملی $0/56$ و نیترات با بار عاملی $0/54$ به‌ترتیب تأثیرگذاری کم‌تری را در این مؤلفه نشان می‌دهند. وجود نیترات بیان‌گر اثر فرایندهای انسانی همانند استفاده از کودهای ازته است. زیرا در فصل کشاورزی هم‌زمان با افزایش تدریجی سطح ایستابی این ماده با توجه به بارش‌ها و بالا بودن سطح آب زیرزمینی در بخش‌های میانی تا تخلیه معمولاً به‌طور مستقیم و در محدوده تغذیه به‌طور غیرمستقیم وارد آب زیرزمینی می‌شوند. هم‌چنین با اختلاط فاضلاب‌های شهری و روستایی نیز به آب زیرزمینی وارد شده و باعث افزایش آن می‌شود. قلیائیت توسط گونه‌های محلول کربن دی‌اکسید، بی‌کربنات و کربنات ایجاد می‌شوند. با توجه به شرایط زمین‌شناسی محدوده بررسی شده، انحلال کربنات‌ها (رسوبات آهکی، دولومیتی و مارنی ارتفاعات مشرف به دشت قائم‌شهر) بر اثر افزایش بارش‌ها و ورود دی‌اکسید کربن آتمسفر به آن، باعث محلول شدن بی‌کربنات، کربنات، کلسیم و منیزیم می‌شود. در مسیر جریان آب زیرزمینی به‌دلیل وجود کارخانه‌های لبنی و انواع کارخانه‌هایی که از منیزیم استفاده می‌کنند از پساب‌های آن‌ها مقادیر زیادی کلسیم و منیزیم وارد آب زیرزمینی می‌شود. در حداقل سطح ایستابی با کاهش بارش‌ها و جریان آب زیرزمینی این واکنش‌ها کاهش یافته در نتیجه بارهای عاملی آن‌ها نیز کاهش می‌یابد. به‌طور کلی مؤلفه‌های دوم ناشی از واکنش‌های صورت گرفته در محدوده تغذیه ناشی از نفوذ بارش و آب‌های سطحی است و می‌توان آن را به نام مؤلفه کربناته (یا تغذیه باران) و تا حدودی به‌دلیل وجود نیترات به نام مؤلفه‌ی ناشی از فعالیت‌های انسانی نیز نام‌گذاری کرد. در مؤلفه سوم pH با بار عاملی $0/87$ در حداکثر سطح ایستابی به‌دلیل درصد واریانس کم، تأثیرات کمی در واکنش‌های شیمیایی دارد. در حداقل سطح ایستابی، مؤلفه سوم شامل نیترات و pH است. تأثیر نیترات در حداکثر سطح ایستابی به‌طور واضح بیش‌تر از حداقل سطح ایستابی است، زیرا در مؤلفه دوم قرار دارد. بار منفی pH در حداقل می‌تواند بیان‌گر افزایش انحلال‌پذیری عناصر به‌ویژه کاتیون‌ها با کاهش pH باشد. به‌طور کلی مؤلفه سوم با داشتن کم‌ترین درصد واریانس کم‌اثرترین پارامترها محسوب شده و می‌توان آن را به‌عنوان مؤلفه فعالیت انسانی نام برد.

تحلیل خوشه‌ای

در این پژوهش از روش سلسله مراتبی برای گروه‌بندی نمونه‌های آب زیرزمینی دشت قائم‌شهر برای حداقل و

حداکثر سطح ایستابی استفاده شده است. نمودار درختی براساس مکان چاه‌ها در شکل ۳ ترسیم شد. همه پارامترهای استفاده شده در این روش برحسب میلی گرم بر لیتر است. روش سلسله مراتبی با توجه به نحوه قرارگیری و پراکندگی و تراکم آن‌ها، چاه‌های محدوده بررسی شده را به دو شاخه اصلی تقسیم کرده است (جدول ۵).



شکل ۳. نمودار خوشه‌ای مکانی حاصل از خوشه‌بندی سلسله مراتبی در محدوده دشت قائمشهر

تعیین تعداد خوشه‌ها و زیر خوشه‌ها قراردادی است و با توجه به مقیاس تحقیقات می‌توان با جابه‌جا کردن خط تقسیم تعداد خوشه‌ها و زیر خوشه‌ها را کم و یا زیاد کرد. چنان‌که در شکل ۳ دیده می‌شود، زیر خط تقسیم ده همه خوشه‌های اصلی را نشان می‌دهد و اگر با درصد واریانس تجمعی که از تحلیل عاملی به دست آمده تلفیق شود خط تقسیم، وضعیت زیر خوشه‌ها را نیز مشخص می‌کند (در حداقل ۸۳/۶٪ و در حداکثر ۸۰/۱٪). این طبقه‌بندی براساس فاصله و اندازه پارامترهای مکانی انجام گرفته است. یعنی پارامترهایی که فاصله و اندازه کم‌تری دارند شباهت بیش‌تری نیز خواهند داشت و بدین ترتیب با تغییر اندازه و فاصله، زیر خوشه‌های دیگر تشکیل و طبقه‌بندی شده‌اند. بر این اساس در محدوده بررسی شده با توجه به شکل ۳ و جدول ۵، در حداقل و حداکثر سطح ایستابی دو شاخه اصلی وجود دارد. در حداقل سطوح ایستابی شش و حداکثر سطح ایستابی پنج زیرشاخه مشاهده می‌شود. در جدول ۶ میانگین غلظت عناصر و مواد موجود در هر یک از زیر شاخه‌ها و نوع آب ارائه شده است. در حداقل سطح ایستابی تمامی چاه‌های خوشه‌های ۱-۱ و ۲-۱ (به جز چاه-۲۶) در نوار غربی-شرقی دامنه ارتفاعات تا ابتدای محدوده میانی قرار گرفته‌اند و از لحاظ کیفی مناسب‌ترین چاه‌ها هستند. خوشه ۱-۳ از انتهای محدوده میانی و در جهت جریان آب زیرزمینی در راستای نوار غربی به سمت محدوده تخلیه جای گرفته‌اند. خوشه ۱-۴ نیز از جنوب به شمال و کاملاً در جهت جریان آب زیرزمینی از دامنه ارتفاعات تا ساحل دریا و کمی متمایل به نوار شرقی جای گرفته‌اند. در حداکثر سطح ایستابی چاه‌های خوشه‌های ۱-۱ و ۲-۱ با کمی جابه‌جایی با همان روند شبیه به خوشه‌های ۱-۱ و ۲-۱ حداقل سطح ایستابی هستند. خوشه ۱-۳ فقط شامل چاه-۴ است که در وسط دشت در محدوده میانی قرار گرفته که به نظر ارتباطی با چاه‌های هم‌جوار نداشته و از لحاظ کیفی بسیار متفاوت با چاه‌های دیگر است و احتمالاً تحت تأثیر نشت و نفوذ آب شور از آبخوان‌های زیرین قرار گرفته و در نتیجه به تنهایی یک خوشه را تشکیل داده است. خوشه‌های ۱-۲ و ۲-۲ نیز

تقریباً شبیه به خوشه‌های حداقل سطح ایستابی است. این خوشه‌بندی نشان می‌دهد؛ خوشه‌های ۱-۱ و ۲-۱ در هر دو دوره از لحاظ کیفی مناسب و بقیه خوشه‌ها به ترتیب از نظر کیفی کاهش می‌یابند.

جدول ۵. شاخه‌ها و زیر شاخه‌های خوشه‌بندی چاه‌ها در حداقل و حداکثر سطح ایستابی (۹۴-۱۳۹۰)

خوشه-۱ (حداقل)	چاه‌ها	خوشه-۱ (حداکثر)	چاه‌ها
1-1	W17, W20, W7, W23, W2, W6, W26	1-1	W9, W16, W12, W22, W21, W23, W26, W25, W2, W7
1-2	W25, W12	1-2	W1, W15, W5, W17, W20, W19
1-3	W3, W5, W21, W22, W19, W16	1-3	W4
1-4	W15, W9, W4, W24		
خوشه-۲ (حداقل)	چاه‌ها	خوشه-۲ (حداکثر)	چاه‌ها
2-1	W14, W13, W11	2-1	W10, W8, W11, W18, W24
2-2	W1, W8, W10, W18	2-2	W14, W13, W3, W6

مسئله قابل توجه در جدول ۶، مقایسه pH با دیگر پارامترها است. چنان‌که در حداکثر سطح ایستابی دیده می‌شود با کاهش pH مقدار عناصر و مواد آب زیرزمینی افزایش و با افزایش آن کاهش می‌یابد که این مسئله در ضرایب منفی هم‌بستگی نیز قابل مشاهده است. درحالی‌که در حداقل رابطه مستقیم است و در ضرایب هم‌بستگی نیز دیده می‌شود. با توجه به خوشه‌بندی صورت گرفته (شکل ۴) و جدول ۶، نمودارهای گیبس، پایپر و تبادل یونی جهت تشخیص فرایندهای هیدروژئو شیمیایی منابع آب زیرزمینی محدوده بررسی شده ترسیم شده است.

نمودار گیبس

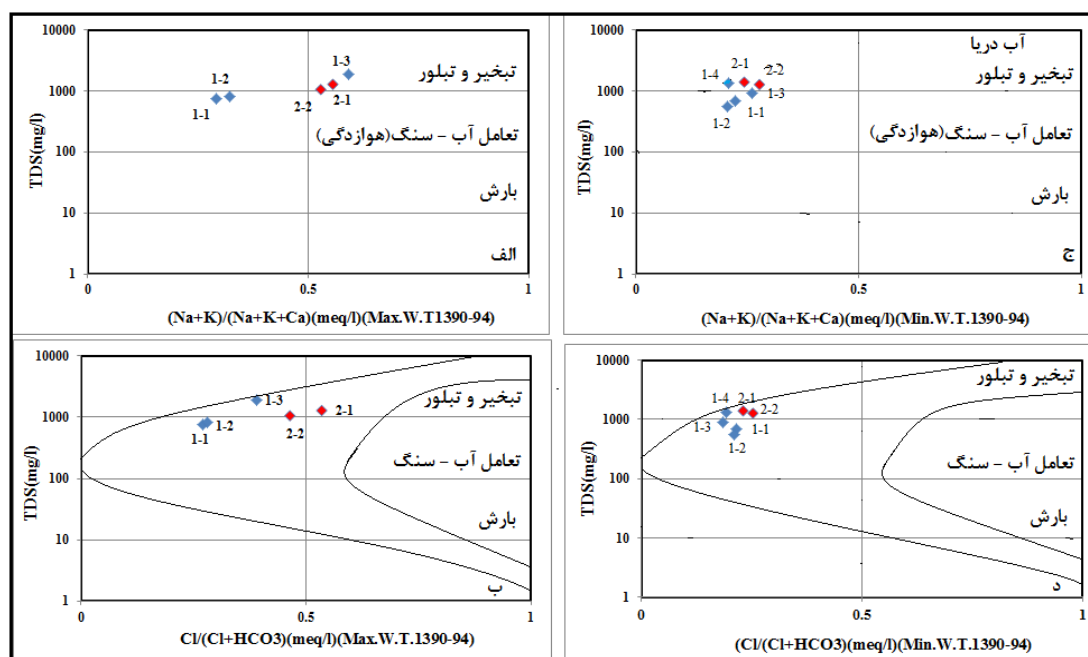
در شکل ۵ نمودار کاتیونی و آنیونی گیبس براساس شاخه‌بندی ترسیم شده است. چنان‌که دیده می‌شود تحت تأثیر دو فرایند واکنش آب-سنگ که متأثر از فرسایش و هوازدگی تشکیلات زمین‌شناسی است و دیگری تبخیر و تبلور است که ناشی از تبخیر از سطح ایستابی در محدوده خروجی دشت و نفوذ آب شور از دریا و آبخوان‌های شور زیرین در محدوده‌های میانی به سمت خروجی دشت است. خوشه‌ها در نمودار آنیونی و کاتیونی (حداقل سطح ایستابی ج و د) در محدوده کمتر از ۰/۵ تجمع یافته و خوشه‌های ۱-۱ تا ۳-۱ در محدوده هوازدگی و بقیه در محدوده تبخیر و تبلور هستند.

جدول ۶. مقایسه میانگین غلظت عناصر و مواد موجود در خوشه‌بندی‌های حداقل و حداکثر سطح ایستابی (۹۴-۱۳۹۰)

(عناصر بر حسب meq/l , $\text{TH}(\text{mg/lCaCO}_3)$, $\text{TDS}(\text{mg/l})$, $\text{EC}(\mu\text{S/cm})$, قلیائیت

$(\text{Alk., mg/kgCaCO}_3)$ ، کلروآلکان (CA1)

خوشه-۱ (حداقل)	EC	TDS	pH	Na	K	Mg	Ca	NO3	SO4	Cl	HCO3	TH	Alk.	نوع آب
1-1	1039.1	676.3	7.34	2.04	0.09	1.89	6.46	0.32	0.89	2.05	7.17	416.9	358.7	IV(1)
2-1	837.7	547	7.47	1.41	0.08	1.5	5.51	0.20	0.61	1.71	5.93	349.6	296.7	IV(1)
3-1	1390.8	905.3	7.32	4.46	0.11	2.08	7.56	0.22	1.35	3.85	8.74	479.2	437.4	IV(1)
4-1	1905.3	1314.5	7.31	6.9	0.11	3.05	10.06	0.45	2.18	5.95	11.54	653.5	577.2	IV(1)
خوشه 1-2	2132	1400	7.43	11.17	0.11	2.9	7.46	0.3	2.49	10.25	8.59	513.3	429.7	II(2)
2-2	1934.8	1276.25	7.56	9.22	0.1	1.96	7.16	0.24	2.24	8.17	7.8	455.1	395.6	II(2)
خوشه-۱ (حداکثر)	EC	TDS	pH	Na	K	Mg	Ca	NO3	SO4	Cl	HCO3	TH	Alk.	نوع آب
1-1	1133.4	750/1	7.42	2.66	0.09	2.11	6.7	0.28	1.2	2.76	7.39	441.6	369.9	IV(1)
2-1	1226	808/8	7.43	3.4	0.1	1.91	7.39	0.42	1.36	3.07	7.9	463.4	395.2	IV(1)
3-1 (W4)	2219.2	1869	7.7	15.3	0.12	3.57	10.7	0.6	2.67	10.3	16.15	711.67	807.8	3
خوشه 1-2	1993	1285/3	7.43	10.2	0.11	2.25	8.28	0.32	2.41	9.65	8.39	524.3	419.6	4
2-2	159501	1056/3	7.29	7.02	0.1	2.65	6.36	0.23	2.35	6.21	7.16	447.5	358.5	4
استاندارد WHO	500-1000	1000-1500	6.5-8.5	8.69	0.3	2.5	12.5	0.8	5.2	7.04	8.19	500	600	

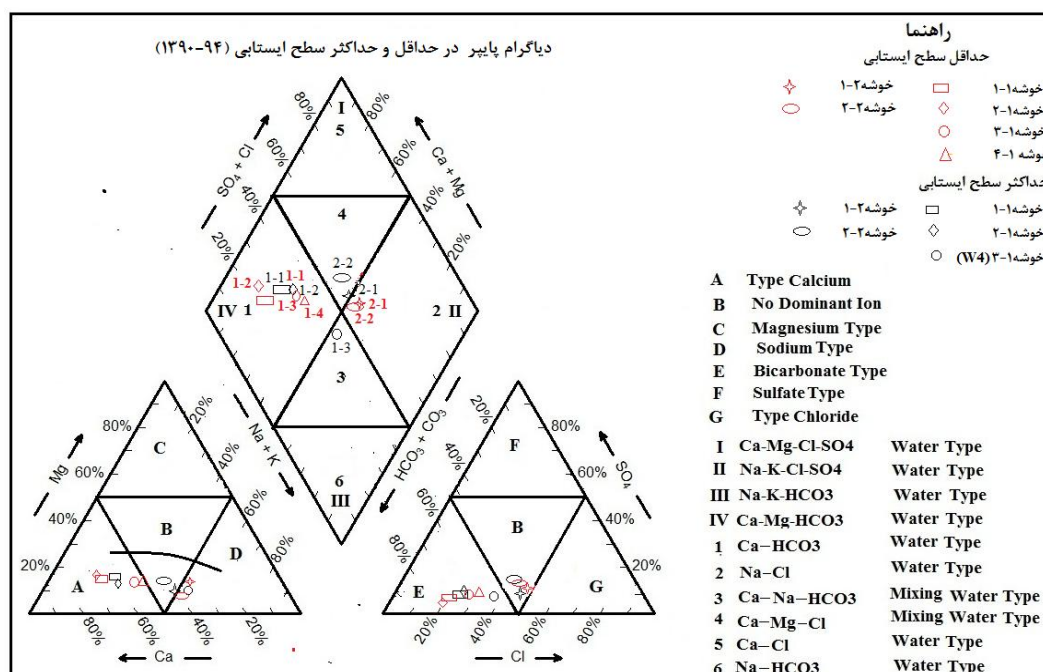


شکل ۴. نمودار گیبس برای خوشه‌بندی کیفیت شیمیایی دشت قائمشهر - جویبار در حداکثر و حداقل سطح ایستابی ۱۳۹۰-۹۴

درحالی‌که خوشه‌ها در حداکثر سطح ایستابی (شکل ۴ الف و ب) پخش شده‌اند که این می‌تواند ناشی از افزایش حجم آب ورودی به آبخوان (تغذیه از بارندگی)، افزایش واکنش‌های شیمیایی و همین‌طور تبادل یونی باشد. به‌همین علت خوشه‌های ۱-۱، ۲-۱ و ۲-۲ در هوازدگی و بقیه در محدوده تبخیر و تبلور قرار دارند. البته با توجه به شکل ۵ خوشه‌های تبخیر و تبلور به محدوده تعامل آب-سنگ یا هوازدگی بسیار نزدیک قرار دارند که نشان می‌دهد با کمی تغییرات در واکنش‌های شیمیایی و تعویض یونی و یا عکس آن، این خوشه‌ها می‌توانند تغییر مکان بدهند. این مدل نشان می‌دهد وضعیت منابع آب زیرزمینی دشت قائمشهر تا چه حدی حساس و جدی است زیرا با افزایش تغذیه و کاهش بهره‌برداری نوع تعامل قابل تغییر و به‌سمت مناسب حرکت خواهد کرد. بدین ترتیب از این طریق می‌توان از پیش‌روی آب شور دریا جلوگیری کرد و نشأت از آبخوان‌های شور به داخل آبخوان را کاهش داد.

نمودار پایپر

در شکل ۶ نمودار پایپر [۱۴] محدوده بررسی شده ترسیم شده است. چنان‌که در نمودار پایپر (شکل ۵) دیده می‌شود زیرخوشه‌های حداقل به‌رنگ قرمز و حداکثر سطح ایستابی با رنگ مشکی مشخص شده است. بیش‌تر زیرخوشه‌ها در حداقل و حداکثر سطح ایستابی در مثلث کاتیونی و آنیونی در محدوده کلسیم و بی‌کربنات قرار گرفته‌اند.



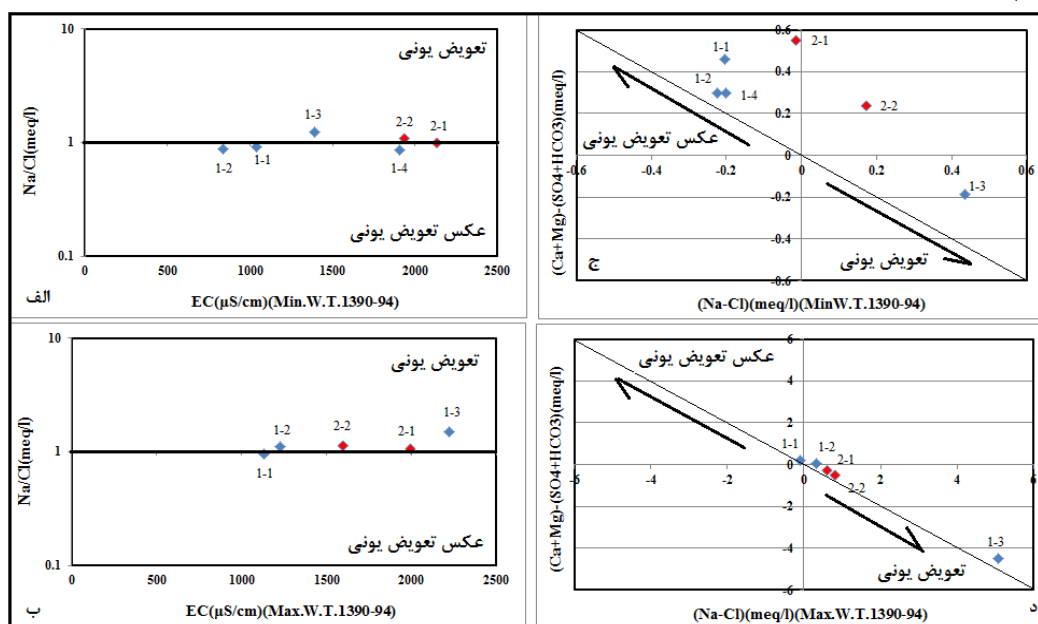
شکل ۵. نمودار پایپر برای خوشه‌بندی کیفیت دشت قائم‌شهر - جویبار در حداکثر - حداقل سطح ایستابی ۱۳۹۰-۹۴

تعدادی از زیرخوشه‌ها در محدوده غالب نبودن هیچ‌کدام از یون‌ها و بقیه در محدوده سدیم قرار دارند. در لوزی نمودار پایپر، اکثر زیرخوشه‌ها در محدوده ۱ (IV) قرار دارند (۱-۱، ۱-۲ از حداکثر و ۱-۱ تا ۴-۱ از حداقل سطح ایستابی) که بیان‌گر تغذیه از آب باران با زمان ماندگاری کم و عبور از سازندهای کربناته (سازندهای آهکی، دولومیتی و مارنی ارتفاعات مشرف به دشت) است. نوع آب این زیرخوشه‌ها Ca-HCO_3 (Ca-Mg-HCO_3) است. زیرخوشه‌های ۱-۲ و ۲-۲ (حداکثر سطح ایستابی) در قسمت ۴ دیاگرام قرار دارند که بیان‌گر اختلاط و اثرگذاری نفوذ آب شور دریا و نشت از آبخوان‌های شور با محلول غنی از کلسیم و منیزیم که از ارتفاعات در مسیر جریان آب زیرزمینی در بخش میانی دشت مخلوط شده و نوع آب اختلاطی Ca-Mg-Cl را تشکیل می‌دهد. در محدوده ۲ (II) زیرخوشه‌های ۱-۲ و ۲-۲ (حداقل سطح ایستابی) قرار گرفته که بیان‌گر اثرگذاری آب شور دریا و نشت از آبخوان‌های شور است و نوع آب در این محدوده Na-Cl ($\text{SO}_4\text{-Cl-Na-K}$) یا سدیم-کلرایدی (شور) است. در این میان زیرخوشه ۳-۱ (حداکثر سطح ایستابی) در محدوده ۳ قرار گرفته است. چاه‌های این زیرخوشه در غرب محدوده میانی و در نوار شمالی-جنوبی دشت قائم‌شهر جای گرفته‌اند. در نتیجه تحت تأثیر واکنش‌های شیمیایی محلول‌های غنی از کلسیم و منیزیم (ارتفاعات جنوبی دشت)، رسوبات رسی غنی از سدیم (مونت‌موریونیت سدیم‌دار)، محلول‌های نمکی (سدیم-کلراید) همراه با نفوذ آب با کیفیت کم از آبخوان‌های هم‌جوار غربی (به‌دلیل بالا بودن سطح ایستابی و احتمالاً ارتباط هیدرولیکی) سبب آزاد شدن مقادیر زیادی سدیم شده که در نتیجه نوع آب با مشخصات Ca-Na-HCO_3 را به‌وجود می‌آورد. با توجه به پراکندگی زیرخوشه‌ها، اکثر چاه‌هایی که در خوشه‌های ۱-۱ تا ۴-۱ (حداقل) و ۱-۱ و ۲-۱ (حداکثر) و در محدوده ۱ قرار دارند، مربوط به بخش کوهپایه‌ای تا بخش میانی دشت است. چاه‌های ۲-۲، ۲-۱ و ۳-۱ مربوط به نوار شرقی-غربی از بخش انتهایی میانی به سمت خروجی دشت است. چاه‌های ۲-۲ و ۱-۲ (حداقل) مربوط به بخش تخلیه و خروجی

دشت است که تحت تأثیر یرداشت‌های بی‌رویه، تبخیر از سطح ایستابی، نفوذ از آب شور دریای خزر و نشت از آبخوان‌های شور زیرین است.

تبادل یونی

برای نمایش فرایندهای تبادل یونی و عکس آن در آبخوان دشت قائمشهر از دو نمودار ترکیبی استفاده شده است (شکل ۵).



شکل ۵. نمودار تعویض و عکس تعویض یونی خوشه‌بندی دشت قائمشهر - جویبار در حداقل - حداکثر سطح ایستابی ۹۴-۱۳۹۰

در شکل ۵ الف و ب، نمودار EC-Na/Cl برای نمونه‌های دشت ترسیم و آن‌هایی که بالای خط $Na/Cl=1$ واقع شده‌اند دارای منشأ دوگانه هستند. یعنی علاوه بر نفوذ آب شور دریا و آبخوان‌های شور می‌توانند تحت تأثیر تبادل کاتیونی قرار بگیرند. از این رو، با توجه به شکل ۵ الف و ب در حداقل سطح ایستابی خوشه‌های ۱-۳ و ۲-۲ و در حداکثر سطح ایستابی خوشه‌های ۱-۲، ۲-۲ و ۳-۱ پدیده تبادل کاتیونی و در بقیه عکس تعویض یونی مشاهده می‌شود. در این نمودار نمونه‌ها (حداقل ۱-۲، ۲-۲، ۱-۱ حداکثر ۱-۲، ۲-۱، ۱-۱) به حدی به خط ۱:۱ نزدیک هستند که می‌توانند تحت تأثیر شرایط شیمیایی تغییر وضعیت دهند. در شکل ۵ ج و د نمودار Na-Cl در مقابل $(Ca+Mg)-(SO_4+HCO_3)$ نشان داده شده 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 و دولومیت به‌طور سازگار روی دهد و تبادل یونی صورت نگیرد، در آن صورت مقدار $(Ca+Mg)-(SO_4+HCO_3)$ نیز نزدیک به صفر خواهد شد. نمونه‌هایی که تحت تأثیر تبادل یونی قرار گرفته‌اند در طول خط شیب منفی یک قرار می‌گیرند. در این نمودار در حداقل خوشه‌های ۱-۳ و ۲-۲ تبادل یونی و بقیه تحت تأثیر عکس تعویض یونی قرار دارند. در حداکثر سطح ایستابی خوشه‌های ۱-۲، ۲-۱، ۳-۱ و ۲-۲ تحت تأثیر تبادل یونی هستند.

نتایج

در ارزیابی منابع آب دشت قائم‌شهر با روش‌های تحلیل عاملی و خوشه‌بندی سلسله‌مراتبی، سه عامل در تغییرات کیفی آب زیرزمینی در حداکثر و حداقل سطح ایستابی تأثیرگذار هستند (با توجه به جابه‌جایی عوامل در هر دو دوره) که شامل؛ یون‌های سدیم، کلراید و EC (عامل شوری نام دارد) سپس با جابه‌جایی در این عامل در حداکثر و حداقل سطح ایستابی قلیائیت، بی‌کربنات، سختی، کلسیم و منیزیم (عامل تغذیه از باران و انحلال نام دارد) و نیترات قرار دارد. عامل سوم اسیدیته است که رابطه معکوسی دارد. در نتیجه با توجه به مقادیر واریانس و واریانس تجمعی آن از نظر تحلیل عاملی تأثیر عوامل طبیعی تا حدودی بیش‌تر از فعالیت‌های انسانی است. در نتیجه با توجه به شرایط محدوده بررسی شده بخشی از کلسیم و منیزیم از رسوبات کربناتی (طبیعی) و بخشی دیگر از فعالیت‌های انسانی (کاخانجات صنعتی) وارد آب زیرزمینی شوند. از طرف دیگر سولفات تنها از طریق فعالیت‌های انسانی مانند کودهای سولفات پتاس و بخشی نیز از نفوذ آب دریا وارد آب زیرزمینی می‌شوند. البته تفکیک عوامل انسانی از طبیعی از نظر میزان یون‌های محلول در آب زیرزمینی بسیار سخت است. در حالت ایده‌آل درصد تجمعی می‌تواند تا ۱۰۰ درصد نیز برسد. ولی به‌دلایلی مانند کمبود آمارها، پراکندگی نامناسب چاه‌ها، نامشخص بودن وضعیت آبخوان در هر چاه، نبود نتایج تجزیه بعضی از متغیرها، کاهش مقادیر ۱۶/۳۴ درصد (۸۳/۷٪) در حداقل و ۱۹/۸۳ درصد (۸۰/۱۷٪) در حداکثر، نسبت به کل درصد تجمعی مربوط به دلایلی است که به آن‌ها اشاره شده است. محدوده بررسی شده از دو خوشه اصلی و تعدادی زیرخوشه تشکیل شده است. بعضی از این خوشه‌ها که به محدوده تخلیه نزدیک هستند از لحاظ کیفی بیش از حد استاندارد هستند که برای جلوگیری از کاهش کیفیت باید میزان تغذیه افزایش و برداشت از آبخوان کاسته شود، استفاده بی‌رویه از انواع کودها (ازته، سولفات پتاس و فسفات) پرهیز شود. از زیر خوشه‌ها در ترسیم نمودارهای تبادل یونی، گیبس و پایپر استفاده شد. در حداکثر سطح ایستابی عکس تعویض یونی و در حداقل تعویض یونی واکنش‌های هیدروژن‌شیمیایی محدوده بررسی شده را کنترل می‌کند. طبق نمودار گیبس دو فرایند هوازدگی و تبخیر و تبلور نقش اساسی در انحلال و تبادل یونی دارند. از نظر پایپر با توجه به خوشه‌بندی در حداقل سطح ایستابی زیرخوشه‌ها در مناطق ۱ و ۲ قرار گرفته که بدون گذر از محدوده اختلاط آب‌ها شور شده‌اند. در حداکثر سطح ایستابی زیرخوشه‌ها در مناطق ۱، ۳ و ۴ قرار گرفته‌اند. در این دوره با توجه به افزایش بارش‌ها و دبی رواناب‌ها آب‌ها از کلسیم بی‌کربنات به اختلاط و سپس کلسیم، منیزیم بی‌کربنات تبدیل می‌شوند و قبل از این که به محدوده تخلیه برسند، برداشت ویا وارد واکنش شیمیایی شده و تغییر وضعیت می‌دهد، زیرا در حداقل نوع آب مرتبط با محدوده ۴ پایپر دیده نمی‌شود. به‌طور کلی در محدوده بررسی شده، سه عامل اصلی در کنترل کیفیت و هیدروژن‌شیمیایی نقش ایفا می‌کنند: ۱. عوامل طبیعی، ۲. عوامل انسانی و سوم ترکیبی از این دو عامل. عوامل طبیعی شامل، انحلال رسوبات کربناته و نفوذ آب شور دریای خزر و نشأت از آبخوان‌های شور است. عامل انسانی شامل؛ ورود فاضلاب‌های شهری و روستایی (نیترات، نیتريت، آمونیاک و نظایر آن) و استفاده بی‌رویه از انواع کودهای ازته، سولفات پتاس و فسفات (سبب ورود نیترات، سولفات و فسفات می‌شود) هستند. عامل سوم از مجموع این دو عامل ناشی می‌شود زیرا به‌دلیل برداشت‌های بی‌رویه که عامل انسانی است باعث افت در سطح ایستابی می‌شود. افت سطح ایستابی باعث پیش‌روی آب شور دریا و افزایش میزان نشأت از آبخوان‌های شور خواهد شد. از طرف دیگر جای‌گزینی آب شور به‌جای آب شیرین و تبخیر آن شوری را افزایش

خواهد داد. در محدوده بررسی شده رسوبات هالیدی و ژئوسپی وجود ندارد به همین علت بخشی از سولفات از طریق پساب کارخانه‌ها و بخشی دیگر از نفوذ آب دریا ناشی می‌شود. نتایج این تحقیق نشان داد، سازندهای زمین‌شناسی، نفوذ آب شور و عوامل انسانی بیش‌ترین تأثیر را در هیدروژئوشیمی محدوده دارند.

منابع

۱. استاندارد ملی ایران، "مشخصات فیزیکوشیمیایی آب مصرفی"، (استاندارد شماره ۱۰۵۳) چاپ پنجم (۱۳۸۸) ۱-۱۸.
۲. بشری ل، محمودی قرائی، م. ح.، موسوی حرمی ر.، علیزاده لاهیجانی ح.، "مطالعه هیدروژئوشیمی و عوامل مؤثر بر شیمی آب خلیج گرگان"، مجله اقیانوس‌شناسی، سال پنجم، شماره ۲۰ (زمستان ۱۳۹۳).
۳. رضایی م.، "عوامل کنترل شوری در آبخوان دشت‌مند منطقه بوشهر-ایران"، مجله اکولوژی، شماره ۳۷ (۱۳۹۰).
۴. رضایی م.، امیری و.، "ارزیابی تغییرات کیفی آب زیرزمینی دشت لنجان با استفاده از تحلیل عاملی ترکیب شده با نظریه انتروپی اطلاعات"، مجله محیط‌شناسی، شماره دوم، ۳۳-۴۴ (۱۳۹۲).
۵. زارع چاهوکی م.، آ.، "روش‌های تجزیه و تحلیل چند متغیره در نرم‌افزار SPSS"، چاپ دانشگاه تهران (۱۳۸۹).
۶. سازمان آب منطقه‌ای مازندران، "آمار اندازه‌گیری سطح آب چاه‌های مشاهده‌ای"، آنالیز شیمیایی و سایر اطلاعات و گزارشات موجود در سازمان (۱۳۹۵).
۷. صداقت م.، "بررسی مسئله پیشرفت و نفوذ آب دریا در دشت‌های ساحلی دریای مازندران"، پایان‌نامه دوره فوق‌لیسانس، دانشکده فنی، دانشگاه تهران (۱۳۵۴).
۸. خسروی ح.، مرادی ا.، دارابی ح.، "شناسایی مناطق همگن از نظر کیفیت آب زیرزمینی با استفاده از تحلیل عاملی و خوشه‌ای؛ مطالعه موردی دشت قیر استان فارس"، فصلنامه علمی و پژوهشی مهندسی آبیاری و آب، سال ششم، شماره بیست و یکم، ۱۱۹-۱۳۳ (پائیز ۱۳۹۴).
۹. قره محمودلو م.، رقیمی م.، طهماسبی ا.، "استفاده از مطالعات هیدروژئوشیمی برای تشخیص نفوذ آب شور در چاه‌های آب (مطالعه موردی شهر ساری)"، مجله علوم کشاورزی و منابع طبیعی، ۱۵ (۴) (۱۳۸۶).
۱۰. کلانتری ن.، رحیمی م. ح.، چرچی ع.، "استفاده از نمودارهای ترکیبی، تحلیل عاملی و نمایه‌های اشباع در ارزیابی کیفی آب زیرزمینی دشت‌های زویرچری و خران"، مجله زمین‌شناسی مهندسی تربیت معلم تهران (بهار و تابستان ۱۳۸۶) جلد اول (۱۳۸۶).
۱۱. محمدی س.، زارع م.، شریف‌زاد ب.، "استفاده از آنالیز آماری چندمتغیره در مدیریت آب زیرزمینی آبخوان ساحلی"، هشتمین همایش بین‌المللی مهندسی شهرسازی، شیراز- ایران (۱۳۸۸).
۱۲. محمودی م.، ندیری ع.، اصغری مقدم ا.، پوراکبر م.، مرادین هره‌دشت ع.، "بررسی منابع آب دشت شیرامین با استفاده از روش‌های آماری چند متغیره"، نشریه پژوهش‌های حفاظت آب و خاک، جلد بیست و سوم (۱۳۹۵).
۱۳. مومنی م.، "تجزیه و تحلیل آماری با کمک نرم‌افزار SPSS"، چاپ کتاب جدید، (۱۳۸۶) تهران.

14. Adepelumi A. A., Ako B., Ajayi T., Afolabi O., Omotoso E., "Delineation of saltwater intrusion into the freshwater aquifer of Lekki Peninsula", Lagos, Nigeria, *Environmental Geology*. 56, 5 (2009) 927-933.
15. Andre L., Franceschi M., Pouchan P., Atteia O., "Using geochemical data and modelling to enhance the understanding of groundwater flow in a regional deep aquifer", Aquitaine Basin, south-west of France, *J. Hydrol*, 305: 1(2005) 40-62.
16. Gibbs R. J., "Mechanism controlling world water chemistry", *Science* 17 (1970) 1088-1090.
17. Güler C., Thyne G.D., McCray J. E., Turner K. A. "Evaluation of graphical and multi-variate statistical methods for classification of water chemistry data", *Hydrogeol.*, J.10: 4. (2002) 455-474.
18. Hounslow A. W., "Water Quality Data, Analysis and Interpretation", CRC Lewis Publisher, New York (1995) 397.
19. Kaiser H. F., "The varimax criterion for analytic rotation in factor analysis", *Psychometrika*, 23, 3. 187-200, 310, 1 (1958) 181-200.
20. McNeil V. H., Cox M. E., Preda M., "Assessment of chemical water types and their spatial variation using multi-stage cluster analysis", Queensland, Australia, *J. Hydrol* (2005).
21. Mohapatra P., "Determination of processes affecting groundwater quality in coastal aquifer of Puri City using multivariate statistical analysis", XXXVIII IAH Congress, Groundwater Quality Sustainability Krakow, 12-17 (Sept. 2010) 563-569.
22. Oudouris K., Panagopoulos A., Koumantakis J., "Multivariate statistical analysis in the assessment of hydrochemistry of the Northern Korinthia prefecture alluvial aquifer system (Peloponnese, Greece)", *Natural Resources Research*. 9, 2 (2000) 135-146.
23. Piper A. M., "A graphical procedure in the geochemical interpretation of water analyses", *American Geophysics* 25 (1944) 914-923.
24. Suk H., Lee K., "Characterization of Groundwater Hydrochemical System through Multivariate Analysis: Clustering into Groundwater Zones", *Ground Water*, and Vol. 37, No. 3 (1999) 358-366.
25. Tabachnick B. G., Fidell L., "Using Multivariate Statistics (5th Ed.)", Allyn & Bacon, NY (2000).
26. WHO, "Guidelines for drinking water quality", vol. 1(2006), 2nd edition, Recommendations, WHO, Geneva (2008) 0.