

## ارزیابی آلودگی نیترات آب زیرزمینی بر اساس روش مؤلفه‌های اصلی و تحلیل عاملی (مطالعه موردی: آبخوان دشت کرج)

منوچهر چیت‌سازان<sup>۱\*</sup>، مهدی ایل‌بیگی<sup>۲</sup> محمود محمدرضاپور طبری<sup>۳</sup>

۱. استاد، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید چمران اهواز

۲. دانشجوی دکتری، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید چمران اهواز

۳. دانشیار، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهرکرد

(تاریخ دریافت ۱۳۹۷/۰۱/۳۰؛ تاریخ تصویب ۱۳۹۷/۰۴/۲۵)

### چکیده

نیترات از مهم‌ترین آلاینده‌هایی است که بیشتر آبخوان‌ها، از جمله آبخوان کرج، از آن آسیب می‌بینند. از آنجا که روش معمول برای بررسی فرایندهای هیدروژئوشیمیایی در آبخوان، به صورت گرافیکی است، به منظور ارزیابی آلودگی نیترات در داده‌های کیفی ۸۶ چاه در آبخوان کرج طی سال ۲۰۱۳، از روش‌های چندمتغیره آماری به عنوان یک روش تکمیلی برای درک عوامل مؤثر بر کیفیت آب‌های زیرزمینی، شناسایی آلودگی و طبقه‌بندی نمونه‌های مشابه استفاده شد. به این منظور، از نرم‌افزار XLSTAT برای مطالعه آلودگی نیترات و ارتباط آن با سایر پارامترهای شیمیایی آب و عوامل مؤثر بر آن بهره گرفته شد. تجزیه و تحلیل آماری نشان می‌دهد خوشه‌بندی سلسله‌مراتبی به استخراج سه خوشه منجر شده است. نمونه‌های دوم و سوم خوشه غلظت بیشتری از نیترات نسبت به گروه نخست دارد. نتایج به دست آمده از تحلیل عوامل اصلی (PCA) همچنین نشان می‌دهد پارامتر نیترات بیشترین همبستگی با کلر و کمترین همبستگی با سدیم و سولفات را دارد. از سوی دیگر، بر اساس چرخش واریماکس، عوامل اصلی کیفیت آبخوان به دو عامل خلاصه شدند. عامل ژئوژنیک (زمین‌زاد)، نخستین عاملی است که به علت اثر مواد تشکیل‌دهنده آبخوان به وجود می‌آید و دومین عامل، یک عامل انسان‌زاد است که به علت فعالیت‌های انسانی، به خصوص فاضلاب تشکیل می‌شود.

**کلیدواژه‌گان:** آب زیرزمینی، تحلیل عاملی، خوشه‌بندی، نیترات.

## مقدمه

آب‌های زیرزمینی به‌عنوان یکی از منابع مهم تأمین نیازها در بسیاری از مناطق ایران به‌ویژه مناطق خشک و نیمه‌خشک به شمار می‌آیند. در ایران این منبع با ارزش تأمین‌کننده بیش از ۵۹ درصد از مصارف است و این امر وابستگی شدید بخش‌های مختلف را به آب زیرزمینی نشان می‌دهد [۱]. افزایش و پیشرفت معیارهای تولید و مصرف، به استفاده روزافزون از مواد شیمیایی محلول و نیز گسترش و تنوع فاضلاب‌های خانگی و صنعتی و در نهایت نشت آن‌ها به داخل منابع آب منجر شده و کیفیت منابع آب در مناطق شهری را به شدت کاهش داده است. یکی از اقداماتی که در مدیریت منابع آب زیرزمینی اهمیت دارد، شناخت فرایندهای حاکم هیدروژئوشیمیایی بر سیستم آبخوان است [۲]. ترکیب شیمیایی آب‌های زیرزمینی توسط چندین فاکتور مانند ترکیب شیمیایی آب باران، فعالیت‌های بشری، ساختارهای زمین‌شناسی و کانی‌شناسی حوضه آبریز و آبخوان و فرایندهای زمین‌شناسی داخل محیط آبخوان کنترل می‌شوند [۳]. در نواحی شهری، آلودگی نترات در آب زیرزمینی که بیشتر ناشی از فعالیت‌های انسانی از جمله فاضلاب‌های خانگی، استفاده از کودهای شیمیایی نیترا ته و فضولات حیوانی در کشاورزی و نیز فعالیت‌های صنعتی است، به یک موضوع زیست‌محیطی در سراسر جهان تبدیل شده است [۴-۱۰]. مطابق استانداردهای اروپایی، سازمان جهانی حفاظت محیط زیست، سازمان بهداشت جهانی و استاندارد آب شرب ایران، در صورتی که میزان غلظت نترات در آب زیرزمینی به بیش از ۵۰ میلی‌گرم در لیتر افزایش یابد، آبخوان آلوده در نظر گرفته می‌شود [۱۱-۱۳].

نترات شکل اصلی نیتروژن موجود در آب‌های زیرزمینی است. در آب‌های اکسیژن‌دار، این یون می‌تواند بدون هیچ نوع تغییر و تبدیلی حرکت کند [۱۴]. نترات در آب محلول است و توسط خاک‌های غنی از رس جذب نمی‌شود [۱۵]. نترات پس از ورود به آب‌های زیرزمینی به‌صورت یک هاله به سمت اعماق بیشتر و در جهت جریان حرکت می‌کند، اما نفوذپذیری و دانه‌ریز بودن مواد متشکله آن می‌تواند در روند پخش آلودگی تأثیر داشته باشد. به‌طور معمول، غلظت نترات در بالای سطح ایستابی بیشتر است و با افزایش عمق و حرکت به سمت نواحی پایین‌دست جریان به دلیل فرایند

انتشار، اختلاط و رقیق شدن با آب‌های کم‌نترات، مقدار آن کاهش می‌یابد [۱۶-۱۸].

ندیری و همکاری‌های فرایندهای هیدروژئوشیمیایی آب زیرزمینی دشت تسوج را به کمک روش‌های گرافیکی و تکنیک‌های آماری چندمتغیره بررسی کردند. نتایج دیاگرام پایپر چهار تپ آب و نمودار استیف هشت منشأ مختلف از آب زیرزمینی را نشان می‌دهد. نمودار دورو نیز پنج فرایند اصلی هیدروژئوشیمیایی در آبخوان را مشخص کرده است. همچنین، تکنیک آنالیزهای خوشه‌ای سلسله‌مراتبی (HCA) پنج تپ آب در نمونه‌های آب زیرزمینی را تعیین کرده است. در نهایت، بر اساس آنالیزهای فاکتوری، سه فاکتور تعیین شده است. فاکتورهای ۱ و ۲ منعکس‌کننده فرایندهای هیدروژئوشیمیایی طبیعی و فاکتور ۳ اثر کودهای کشاورزی و فعالیت‌های انسانی در این دشت است [۱۹].

ندیری و همکاری‌های هیدروژئولوژی و فرایندهای هیدروژئوشیمیایی منابع آب زیرزمینی آبخوان دشت هرزندات را با کمک روش‌های گرافیکی و تکنیک‌های آماری چندمتغیره تجزیه و تحلیل کردند. نتایج دیاگرام پایپر دو تپ آب و دیاگرام استیف شش منشأ متفاوت برای نمونه‌های آب را نشان می‌دهند. دیاگرام دورو نیز نشان‌دهنده دو فرایند هیدروژئوشیمیایی اصلی در آبخوان است. در صورتی که روش آنالیز خوشه‌ای سلسله‌مراتبی نشان می‌دهد پنج تپ آبی در نمونه‌های آب زیرزمینی وجود دارد. بر اساس روش تحلیل عاملی، چهار عامل اصلی مؤثر بر هیدروژیومی آبخوان دشت هرزندات شناسایی شد. عوامل اول، دوم و سوم تأثیر سازندهای زمین‌شناسی و روند تکاملی جریان آب زیرزمینی را نشان می‌دهند و عامل چهارم متأثر از فعالیت‌های انسانی است [۲۰].

دردی محمودی و همکاری‌های با استفاده از روش تحلیل چندمتغیره آماری با تلفیق GIS و شاخص اشباع‌شدگی، چهار عامل در تحلیل مؤلفه‌های اصلی دشت شیرامین را استخراج کردند. مؤلفه نخست ناشی از تأثیر سازندهای کربناته، مؤلفه دوم ناشی از تغذیه آب باران، مؤلفه سوم ناشی از تأثیر سولفات و فلوراید و مؤلفه چهارم به‌علت بار عاملی زیاد برای نترات ناشی از فعالیت‌های بشری است [۲۱].

Qian و همکاری‌های با استفاده از تحلیل‌های آماری

اهداف تحقیق اطلاعات هیدروژئولوژیکی محدوده مطالعاتی به همراه داده‌های اندازه‌گیری شده غلظت نیترات و یون‌هایی مانند سدیم، منیزیم، کلسیم، کلسیم، کلر و سولفات و پارامترهای EC و pH با هم تلفیق شده و با استفاده از نرم‌افزار XLSTAT نسخه 2016 و روش‌های تحلیل آماری شامل تحلیل خوشه‌ای سلسله‌مراتبی (HCA) و تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA)، جدول همبستگی بررسی شده و چگونگی ارتباط نیترات با سایر پارامترها تعیین شده است. در این خصوص ابتدا داده‌ها استاندارد شده و سپس استفاده شده است.

### مواد و روش‌ها

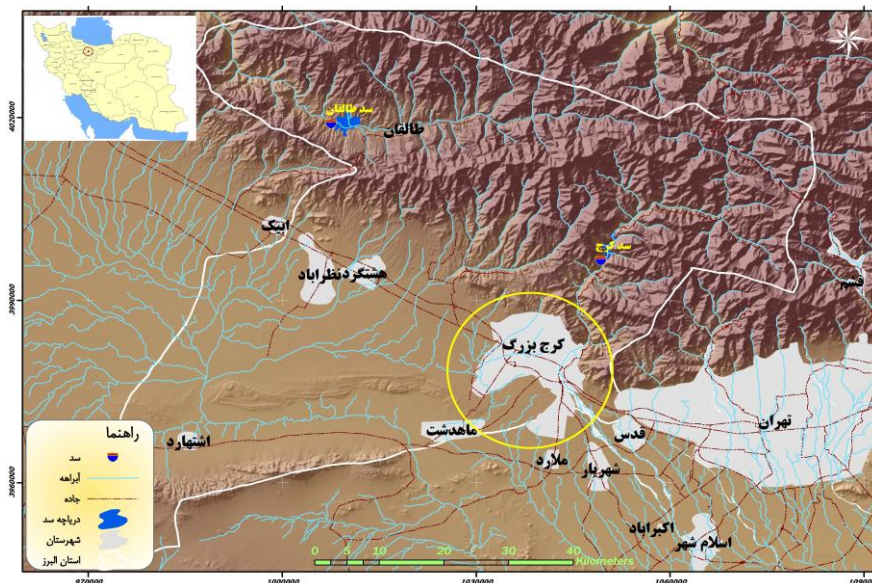
#### محدوده مطالعه شده

دشت کرج یکی از دشت‌های مهم و با پتانسیل زیاد در ایران محسوب می‌شود و با توجه به نزدیکی به پایتخت، جمعیت درخور توجهی را در خود جای داده است (۲/۵ درصد از جمعیت ایران). بیشتر آب شرب شهرهای واقع در این دشت از منابع آب‌های زیرزمینی تأمین می‌شود. با توجه به تزریق درخور توجه فاضلاب توسط چاه‌های جذبی طی سالیان گذشته به این دشت، میزان آلودگی نیترات در سطح دشت افزایش درخور توجهی یافته است. بنابراین، دشت کرج برای بررسی و تحلیل رفتار یون نیترات و عوامل آلاینده انتخاب شد (شکل ۱).

چندمتغیره، تغییرات زمانی و مکانی نیترات را در یک منطقه کشاورزی بررسی کردند. نتایج نشان داد غلظت نیترات در فصول بارانی کمتر از فصول غیر بارانی است و با توجه به افزایش فعالیت‌های انسانی در این منطقه، غلظت نیترات طی یک دوره پنج‌ساله روند افزایشی داشته است [۲۲].

یکی از راه‌های مناسب شناخت فرایندهای هیدروژئوشیمیایی حاکم بر محیط آب‌های زیرزمینی، استفاده از دیگرام‌های رایج مانند دیگرام پایپر، دوروی بسط داده شده، دیگرام استیف و پلات گیبس است [۲۳]. اگرچه روش‌های گرافیکی برای ارزیابی فرایندهای حاکم بر آب زیرزمینی به کار می‌روند، برای ارزیابی بعضی پارامترها مانند استفاده نکردن از برخی پارامترهای شیمیایی مانند نیترات، سیلیس، آرسنیک، فلئور و... و غیرشیمیایی مانند دما و ویسکوزیته با محدودیت مواجه‌اند [۲۴]. همچنین، روش‌های آنالیز آماری چندمتغیره مانند تحلیل عاملی (FA) و تحلیل سلسله‌مراتبی (HCA) از جمله روش‌هایی هستند که در تحلیل کیفیت آب‌های زیرزمینی می‌توانند کمک بسزایی داشته باشند. روش تحلیل مؤلفه‌های اصلی در عرصه‌های گوناگون مانند آب‌های سطحی و زیرزمینی [۲۵]، خاک‌ها [۲۶] و منابع آلودگی محیط‌زیست [۲۷] کاربرد دارند.

رویکرد پیشنهادی برای بررسی ارتباط نیترات با سایر پارامترهای شیمیایی آب در آبخوان برای دستیابی به



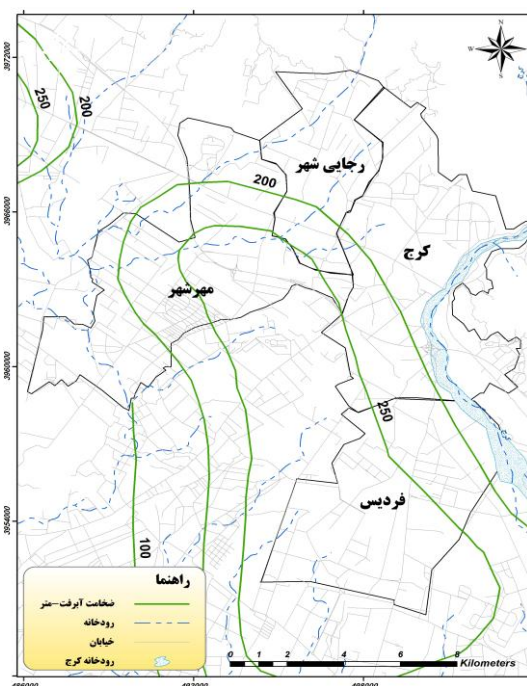
شکل ۱. موقعیت محدوده مطالعه شده

## زمین‌شناسی و هیدروژئولوژی

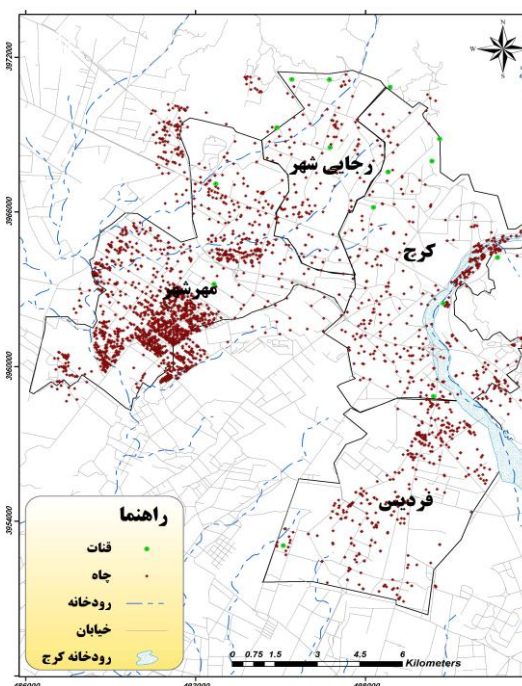
محدوده مطالعه شده جزئی از دشت تهران- کرج است که از شمال به ارتفاعات البرز محدود می‌شود. آب‌های سطحی بیشتر توسط رودخانه کرج زهکشی می‌شوند که عرض آن در کوهپایه کم است، ولی در ابتدای دشت زیاد می‌شود. آبرفت این دشت، آبخوان آزاد گسترده‌ای را تشکیل داده است که از بستر رودخانه‌ها، مسیل‌ها و نیز نفوذ آب باران و ذوب برف تغذیه می‌شود. رسوبات تشکیل‌دهنده آبخوان شامل نهشته‌های شن، ماسه، رس و مخلوطی از نسبت‌های متغیر آنهاست که این نسبت‌ها در پایین دست به دلیل کاهش قدرت حمل رسوب توسط رودخانه‌ها، در جهت افزایش میزان رس تغییر می‌کند. برداشت از آب‌های زیرزمینی با استفاده از چاه و تعدادی قنات انجام می‌شود. مطابق آمار ارائه شده توسط شرکت مدیریت منابع آب ایران در سال آبی ۱۳۹۱-۱۳۹۲، منابع آب زیرزمینی شامل ۲۷۳۰ حلقه چاه و ۲۸ رشته قنات است. حجم بهره‌برداری آب توسط قنات ۲/۳ و توسط چاه‌ها ۱۷۵/۲ میلیون مترمکعب گزارش شده است (شکل ۲). بررسی نتایج به دست آمده از مطالعات ژئوفیزیک منطقه نشان می‌دهد ضخامت آبرفت در نواحی شمالی حدود ۵۰ تا ۱۰۰ متر و در بخش‌های جنوبی و مرکزی کرج بزرگ به حدود ۲۵۰-۳۰۰ متر می‌رسد (شکل ۳). بر اساس نتایج

آزمایش‌های پمپاژ انجام شده [۲۸]، تغییرات قابلیت انتقال آب در دشت کرج بین ۲۵۰۰ در بخش‌های شمالی غربی تا حداقل ۵۰۰ مترمربع در روز حوالی شاهد شهر می‌رسد و در جنوب رباط کریم دوباره به صورت محلی افزایش می‌یابد و به حدود ۱۵۰۰ متر در روز می‌رسد.

جهت کلی جریان آب زیرزمینی از شمال به جنوب و در نواحی انتهایی متمایل به جنوب شرقی است. رودخانه کرج بیشترین تأثیر را در تغذیه آبخوان دارد. همچنین، مناطق اصلی تخلیه در حاشیه جنوبی دشت و حوالی سرآسیاب است. عمق برخورد به سطح آب زیرزمینی از شمال و غرب به سمت جنوب شرق افزایش می‌یابد. حداکثر این مقدار ۱۴۰ متر در جنوب شرق دشت حوالی شهرک ارم و فردیس و حداقل این مقدار حدود ۲۰ متر در غرب حوالی شهرابیه و کوی مهر گزارش شده است. بر اساس هیدروگراف معرف آبخوان، تراز سطح آب زیرزمینی به میزان ۲۴/۲ متر طی یک دوره ۲۲ ساله افت کرده است. بر این اساس، متوسط افت سالانه برابر با ۱/۱ متر است. این میزان افت به کسری مخزن معادل ۷۸۳/۹ میلیون مترمکعب منجر شده است و تأثیرات در خورتوجهی روی وضعیت کمی و کیفی دشت ایجاد کرده است.



شکل ۳. نقشه ضخامت آبرفت

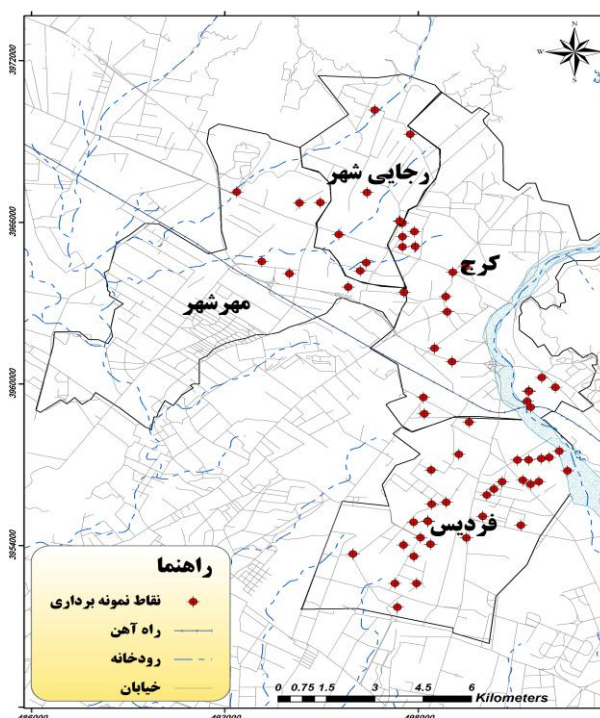


شکل ۲. موقعیت منابع آب زیرزمینی

#### شبکه نمونه‌برداری آب

مطابق آمار ارائه‌شده توسط شرکت آبفای استان البرز، در حال حاضر نیاز شرب شهرستان کرج ۱۶۵ میلیون مترمکعب در سال است. حدود ۹۰ میلیون مترمکعب از این حجم، توسط ۱۷۵ حلقه چاه که تمامی آنها در مناطق شهری حفاری و تجهیز شده است، بهره‌برداری می‌شود [۲۹]. در تحقیق حاضر برای حذف آثار برخی عوامل مؤثر بر تغییرات پارامترهای شیمیایی آب به‌خصوص نیترات؛ مانند بارندگی، میزان برداشت از چاه، میزان تغذیه از طریق چاه‌های جذبی و رواناب‌های سطحی، میزان کود

مصرفی در زمین‌های کشاورزی، میزان تبخیر از سطح آب زیرزمینی و تغییرات گرادیان هیدرولیکی، از نتایج مربوط به دو ماه مشخص که در تمامی چاه‌های مدنظر آمار دارد، استفاده شده است. بنابراین، در نهایت تعداد ۸۶ حلقه چاه شرب که پراکنش تقریباً مناسبی در سطح دشت داشتند، به‌عنوان شبکه نمونه‌برداری انتخاب شدند (شکل ۴). شایان یادآوری است با توجه به حساسیت زیاد چاه‌های شرب، آنالیز کیفی نمونه‌های برداشت‌شده دقت قابل قبولی دارند، بنابراین می‌تواند معرف بسیار مناسبی از کل آبخوان باشد.



شکل ۴. شبکه نمونه‌برداری منطقه مطالعه‌شده

#### تحلیل‌های آماری

یکی از مسائل مهم در مدیریت کیفی منابع آب، یافتن رابطه بین پارامترهای مختلف فیزیکی و شیمیایی تأثیرگذار بر کیفیت منابع آبی است که می‌تواند برای بررسی دقیق‌تر منابع آلاینده و ارائه راهکار برای کاهش آثار منفی آن مناسب باشد. روش‌های آنالیز آماری چندمتغیره برای پارامترهایی که همبستگی دارند، قابل استفاده است. از این‌رو، ابتدا جدول همبستگی پیرسون برای پارامترهای تحقیق حاضر تهیه شد [۳۰]. سپس، با انجام تحلیل سلسله‌مراتبی، داده‌ها خوشه‌بندی شدند.

روش دیگر، آنالیز چندمتغیره آماری اعمال‌شده نیز تحلیل عاملی با روش تجزیه به عوامل است که این روش نیز برای استخراج فرایندهای مؤثر اعمال شده است. روش تحلیل مؤلفه‌های اصلی از خانواده بردارهای ویژه است که بیشتر به‌عنوان یک روش ریاضی برای کاهش حجم داده‌ها به کار گرفته می‌شود. هدف از تحلیل مؤلفه‌های اصلی آن است که پراش موجود در داده‌های چندین متغیر را به مؤلفه‌هایی تبدیل می‌کند که اولین مؤلفه تا آنجا که ممکن است بیشترین پراش موجود در داده‌ها، دومین مؤلفه بیشترین پراش ممکن بعد از مؤلفه اول و تا آخر را توجیه

مسکونی است که بیشتر در نیمه شمالی آبخوان مستقر است. وضعیت کاربری اراضی کشاورزی نشان می‌دهد سطح اراضی کشاورزی از ۹۶۴۹ هکتار در سال ۱۳۸۳ به ۴۲۱۶ هکتار کاهش یافته است. این میزان نشان‌دهنده کاهش ۵۶/۳ درصد اراضی کشاورزی و تبدیل آن به سطوح مسکونی است (جدول ۱). روند افزایش سطح اراضی شهری طی دوره بررسی شده به افزایش تغذیه آبخوان با استفاده از چاه‌های جذبی و در نتیجه فراگیر شدن آلودگی نترات در کل محدوده مطالعه شده منجر شده است.

در تحقیق حاضر برای بررسی میزان آلودگی نترات و ارتباط آن با سایر پارامترهای شیمیایی، نتایج آنالیز شیمیایی آب در شبکه نمونه‌برداری مد نظر در ماه‌های خرداد و تیر ۱۳۹۲ به‌عنوان کامل‌ترین داده‌های موجود در آبخوان دشت کرج بررسی و تحلیل شده است. در این خصوص، داده‌های خام با استفاده از روش Grubbs test [۳۷] بررسی اولیه شده و داده‌های پرت و نامناسب حذف شد. در ادامه، داده‌های حذف‌شده با استفاده از روش mean imputation method [۳۸] بازسازی شدند و در نهایت برای کاهش تأثیر مقیاس در داده‌ها، داده‌های اصلاح‌شده به صفر و یک تغییر مقیاس داده و بی‌بعد (استاندارد) شدند. در ادامه، با استفاده از نرم‌افزار XLSTAT2016 تحلیل‌های آماری مد نظر انجام شده است.

#### تحلیل آماری چندمتغیره

در جدول ۲ خصوصیات آماری هیدروشیمیایی نمونه‌ها ارائه شده است. با توجه به جدول ۲، مقادیر ستون حداکثر برای بیشتر پارامترها مانند نترات، هدایت الکتریکی و کلر زیاد بوده که بیان‌کننده نامناسب بودن کیفیت آب، به‌خصوص برای مصرف شرب است. بنابراین، به نترات نیز به‌عنوان یکی از پارامترهای مضر در کیفیت آب باید توجه شود.

کند [۳۱]. یکی از محورهای اصلی، مؤلفه اصلی اول (PC1) نام دارد و اطلاعات بیشتری نسبت به سایر مؤلفه‌های دیگر به دست می‌دهد. مؤلفه اصلی دوم (PC2) عمود بر مؤلفه اصلی اول است. مؤلفه‌های سوم، چهارم و... شامل مقادیر یکنواخت واریانس کاهش‌یافته در دستگاه داده‌ها هستند. مؤلفه‌های اصلی در حقیقت همان مقادیر ویژه بردار ماتریس واریانس-کوواریانس و یا ماتریس ضرایب همبستگی‌اند [۳۲]. تحلیل عاملی (FA) یک روش آماری چندمتغیره است که برای توصیف تغییرپذیری بین متغیرهای مشاهده‌ای به تعدادی محدود از متغیر مشاهده‌نشده که عامل نامیده می‌شوند، استفاده شود [۳۳]. در تحقیق حاضر از نسخه ۲۰۱۶ نرم‌افزار XLSTAT برای نمایش نتیجه تحلیل عاملی، تحلیل خوشه‌ای سلسله‌مراتبی و همبستگی پیرسون برای داده‌های کیفی آب استفاده شده است. تحلیل عاملی دخالت متغیرها با اهمیت کمتر را به وسیله چرخش واریماکس ماتریکس بارهای عاملی کاهش می‌دهد [۳۴ و ۳۵]. تحلیل سلسله‌مراتبی یک تکنیک طبقه‌بندی داده و یکی از روش‌های پرکاربرد به‌کاررفته در علوم زمین است [۳۶].

#### نتایج

همان‌طور که قبلاً گفته شد، متأسفانه در حال حاضر بیشتر آبخوان‌هایی که در مناطق شهری قرار گرفته‌اند، آلوده به نترات هستند و آبخوان دشت کرج نیز از این امر جدا نیست. بیشتر تأمین آب شرب شهر کرج از طریق چاه‌های حفرشده در آبخوان است. حجم زیاد مصرف آب و نیز توسعه نیافتن شبکه جمع‌آوری فاضلاب سبب می‌شود که سالانه حجم درخور توجهی فاضلاب از طریق چاه‌های جاذب وارد آبخوان شود. از طرف دیگر، بررسی‌ها نشان می‌دهد کاربری اصلی زمین در منطقه مطالعه‌شده،

جدول ۱. سطح زیر کشت اراضی کشاورزی طی دوره مطالعه‌شده

سال	سطح اراضی کشاورزی (هکتار)	درصد از کل محدوده مطالعه‌شده	سال	سطح اراضی کشاورزی (هکتار)	درصد از کل محدوده مطالعه‌شده
۱۳۸۳	۹۶۴۹	۵۷ درصد	۱۳۸۸	۷۰۵۰	۴۱/۷ درصد
۱۳۸۴	۹۴۱۳	۵۵/۶ درصد	۱۳۸۹	۶۹۶۰	۴۱/۱ درصد
۱۳۸۵	۷۴۸۷	۴۴/۲ درصد	۱۳۹۰	۵۲۱۹	۳۰/۸ درصد
۱۳۸۶	۷۳۹۸	۴۳/۷ درصد	۱۳۹۱	۴۰۳۹	۲۳/۸ درصد
۱۳۸۷	۷۱۳۶	۴۲/۲ درصد	۱۳۹۲	۴۲۱۶	۲۴/۹ درصد

جدول ۲. خصوصیات آماری نتایج آنالیز نمونه‌ها

پارامتر	حداقل	حداکثر	میانگین	انحراف معیار	پارامتر	حداقل	حداکثر	میانگین	انحراف معیار
pH	۶/۹	۸	۷/۵	۰/۳	Ca (mg/l)	۴۲/۹	۱۴۴	۷۶/۹	۲۲/۹
EC (µmho/cm)	۳۶۰	۱۵۶۲	۷۷۴/۴	۳۶۰	HCO <sub>3</sub> (mg/l)	۶۴	۳۱۰	۱۴۷/۱	۶۵/۵
Cl(mg/l)	۱۳	۱۶۰	۶۷/۸	۴۲/۸	NO <sub>3</sub> (mg/l)	۷	۱۳۱/۷	۴۹/۵	۳۰/۵
SO <sub>4</sub> (mg/l)	۳۲/۶	۳۲۱/۴	۹۴/۵	۶۸/۴	Na (mg/l)	۹/۴	۲۴۶/۵	۶۲/۱	۷۰
Mg (mg/l)	۴/۹	۳۲/۶	۱۵	۷					

### همبستگی

همبستگی پارامترهای هیدروشیمیایی در جدول ۳ ارائه شده است. در خصوص نیترات، بیشترین همبستگی با کلر مشاهده می‌شود که حدود ۰/۹ است که دلیل آن ورود حجم درخور توجهی فاضلاب شهری به آبخوان است. کمترین همبستگی نیترات نیز با pH دیده می‌شود که حدود ۰/۵- است. مقادیر هدایت الکتریکی نیز با بیشتر پارامترها از جمله کلر، سولفات، سدیم و بی‌کربنات همبستگی زیادی دارد و این مطلب نشان می‌دهد هدایت الکتریکی و مواد جامد محلول بیشتر تحت تأثیر انحلال این مواد است. pH همبستگی کمی با همه پارامترها دارد.

### تحلیل عاملی (تحلیل مؤلفه‌های اصلی)

پارامترهای مختلفی بر کیفیت آب زیرزمینی اثر دارند، بعضی از آن‌ها انسان‌زاد (کشاورزی، دامپروری و فاضلاب‌ها)

و برخی دیگر زمین‌زاد (آتش‌فشان، سازندهای زمین‌شناسی، رودخانه‌ها و...) هستند. روش تحلیل عاملی توانایی تفکیک فرایندهای مختلف را دارد. اولین گام برای اعمال روش تحلیل عاملی، وجود همبستگی بین پارامترها است که در جدول ۳ نشان داده شد. همبستگی مثبت و یا منفی زیاد بین متغیرها و فاکتورها یا یک فاکتور بر اساس بار عاملی زیاد فاکتور (به‌طور نسبی نزدیک به ۱ یا -۱) است. همچنین، روش واریماکس [۳۹] برای متمایز کردن متغیرهایی با بارهای عاملی زیاد (بار عاملی نزدیک ۱ تا -۱) به متغیرها با بار عاملی کم (بار عاملی نزدیک به صفر) اعمال شد. جدول ۴ مقدار به‌دست‌آمده برای آزمون KMO و شایستگی اعمال روش تحلیل عاملی برای داده‌های پژوهش حاضر را نشان می‌دهد [۳۹ و ۴۰]. بر این اساس، شایستگی روش در رده بسیار خوب و عالی قرار می‌گیرد.

جدول ۳. مقادیر همبستگی بین پارامترها

Ca	Mg	Na	NO <sub>3</sub>	HCO <sub>3</sub>	SO <sub>4</sub>	Cl	EC	pH	
-۰/۴۰۷	-۰/۶۰۸	-۰/۶۱۵	-۰/۴۷۸	-۰/۵۵۸	-۰/۴۹۱	-۰/۶۰۲	-۰/۶۷۳	۱	pH
۰/۴۷۱	۰/۶۹۹	۰/۹۰۸	۰/۷۶۸	۰/۷۷۲	۰/۷۶۹	۰/۹۱۲	۱	-۰/۶۷۳	EC
۰/۵۳۱	۰/۶۸۰	۰/۷۶۷	۰/۸۹۸	۰/۵۱۳	۰/۶۱۲	۱	-۰/۹۱۲	-۰/۶۰۲	Cl
۰/۲۵۶	۰/۴۵۰	۰/۷۸۹	۰/۴۵۵	۰/۶۹۰	۱	۰/۶۱۲	۰/۷۶۹	-۰/۴۹۱	SO <sub>4</sub>
۰/۲۲۸	۰/۵۱۹	۰/۷۸۸	۰/۳۵۳	۱	۰/۶۹۰	۰/۵۱۳	۰/۷۷۲	-۰/۵۵۸	HCO <sub>3</sub>
۰/۵۱۶	۰/۶۲۸	۰/۵۸۸	۱	۰/۳۵۳	۰/۴۵۵	۰/۸۹۸	۰/۷۶۸	-۰/۴۷۸	NO <sub>3</sub>
۰/۲۰۴	۰/۵۰۷	۱	۰/۵۸۸	۰/۷۸۸	۰/۷۸۹	۰/۷۶۷	۰/۹۰۸	-۰/۶۱۵	Na
۰/۵۰۹	۱	۰/۵۰۷	۰/۶۲۸	۰/۵۱۹	۰/۴۵۰	۰/۶۸۰	۰/۶۹۹	-۰/۶۰۸	Mg

جدول ۴. مقادیر KMO در نمونه‌های منطقه مطالعه شده

pH	۰/۹۶۷	NO <sub>3</sub> (mg/l)	۰/۹۰۴
EC (µmho/cm)	۰/۷۹۷	Na (mg/l)	۰/۷۳۸
Cl (mg/l)	۰/۸۰۵	Mg (mg/l)	۰/۹۱۹
SO <sub>4</sub> (mg/l)	۰/۸۶۴	Ca (mg/l)	۰/۶۲۵
HCO <sub>3</sub> (mg/l)	۰/۷۸۰	KMO	۰/۸۱۶

مطابق با جدول یادشده، مربع کسینوس متغیرهای  $SO_4$ ،  $EC$ ،  $NaHCO_3$  که بیشترین تأثیر را بر کیفیت شیمیایی آب دشت کرج دارند (بیش از ۶۴ درصد) و مؤلفه اصلی حاکم بر کیفیت شیمیایی را تشکیل می‌دهند، به صورت اعداد پررنگ نشان داده شده است. متغیرهای  $Ca$ ،  $Mg$ ،  $NO_3$ ،  $Cl$  و  $pH$  بیش از ۱۳ درصد تغییرپذیری کیفیت شیمیایی دشت کرج و مؤلفه اصلی دوم را تشکیل می‌دهند. پارامترهای سدیم، بی‌کربنات و سولفات بیشترین تأثیر را در مؤلفه اول دارند. این مؤلفه بیان‌کننده انحلال کانی‌های با غالب بودن سدیم است و می‌توان آن را مؤلفه ناشی از فعالیت‌های زمین‌زاد نامید. این امر را می‌توان ناشی از فلدسپات‌های موجود در سنگ‌های آذرین سازند کرج و از محصولات عمل تجزیه آن کانی‌ها (رسی شدن) در نظر گرفت.

برای انتخاب تعداد مؤلفه‌های اصلی که توصیف خوبی از واریانس جامعه آماری داشته باشند، از جدول ۵ استفاده شده است. در این جدول پارامترهای کیفی به ۹ مؤلفه تقسیم شده‌اند که در هر ردیف مقدار ویژه آن‌ها همراه با میزان تغییرپذیری آن‌ها و تغییرپذیری تجمعی‌شان نشان داده شده است. مطابق با جدول ۵، دو مؤلفه ( $F1$  و  $F2$ ) که مقدار ویژه بیشتر از یک داشته و بیشترین تغییرپذیری را دارند (بیش از ۷۸ درصد) به عنوان عوامل اصلی مؤثر بر کیفیت شیمیایی آب آبخوار کرج انتخاب شدند. از طرف دیگر، برای استخراج پارامترهای اصلی کیفیت آب از درون این مؤلفه‌ها، از بار عاملی چرخانده شده با دوران Varimax استفاده شد. جدول ۶ مربع کسینوس متغیرهای کیفیت شیمیایی دشت کرج را در زمینه بارهای عاملی اول و دوم نشان می‌دهد، در این حالت بارهای یادشده با  $D1$  و  $D2$  نشان داده شده است.

جدول ۵. مقادیر ویژه مؤلفه‌های اصلی پارامترهای کیفی دشت کرج

	Eigenvalue	Variability (%)	Cumulative %
F1	۵/۸۲۶	۶۴/۷۲۸	۶۴/۷۲۸
F2	۱/۲۰۳	۱۳/۳۷۱	۷۸/۰۹۸
F3	۰/۶۵۰	۷/۲۱۸	۸۵/۳۱۷
F4	۰/۴۸۵	۵/۳۸۴	۹۰/۷۰۰
F5	۰/۳۷۷	۴/۱۸۵	۹۴/۸۸۵
F6	۰/۲۷۲	۳/۰۲۲	۹۷/۹۰۷
F7	۰/۱۱۸	۱/۳۱۵	۹۹/۲۲۲
F8	۰/۰۵۱	۰/۵۷۲	۹۹/۷۹۴
F9	۰/۰۱۹	۰/۲۰۶	۱۰۰/۰۰۰

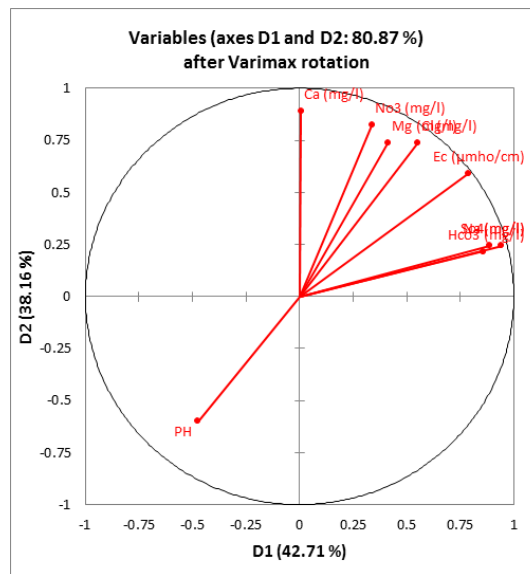
جدول ۶. مربع کسینوس متغیرهای کیفیت شیمیایی دشت کرج در ارتباط با بارهای عاملی اول و دوم

	D1	D2		D1	D2
pH	۰/۲۲۴	۰/۳۵۹	$NO_3$ (mg/l)	۰/۱۱۴	۰/۶۷۷
EC ( $\mu$ mho/cm)	۰/۶۲۵	۰/۳۵۰	Na (mg/l)	۰/۸۸۶	۰/۰۶۰
Cl (mg/l)	۰/۳۰۶	۰/۵۴۸	Mg (mg/l)	۰/۱۷۰	۰/۵۴۴
$SO_4$ (mg/l)	۰/۷۸۵	۰/۰۵۹	Ca (mg/l)	۰/۰۰۰	۰/۷۹۱
$HCO_3$ (mg/l)	۰/۷۳۴	۰/۰۴۷			



نامیده می‌شود. نقشه یادشده تصویر متغیرهای اولیه را در فضای فاکتورها نشان می‌دهد. هنگامی که دو متغیر دور از مرکز و نزدیک به یکدیگر باشند، همبستگی آن‌ها با یکدیگر به‌طور درخور توجهی مثبت (۲ نزدیک به ۱) است. اگر بردار متغیرها متعامد باشد، متغیرها بدون همبستگی با یکدیگرند (۲ نزدیک به صفر). به عکس اگر بردار متغیرها در طرف مقابل مرکز قرار داشته باشند، همبستگی آن‌ها با یکدیگر منفی (۲ نزدیک به -۱) است.

در مؤلفه دوم پارامترهای نیترات و کلر به دلیل بار عاملی بیشتر، تأثیر مهم‌تری نسبت به سدیم دارد که بیان‌کننده اثر فرایندهای انسان‌زاد همانند فاضلاب‌های شهری است و آن را می‌توان مؤلفه ناشی از فعالیت بشری دانست. همچنین، زیاد بودن بار عاملی کلسیم و منیزیم در مؤلفه دوم نسبت به مؤلفه اول، می‌تواند بیان‌کننده انحلال کانی‌های کلسیم و منیزیم‌دار منطقه باشد. نتایج آنالیز مؤلفه‌های اصلی (PCA) برای متغیرهای آب چاه‌ها در شکل ۵ نشان داده شده است. این نقشه، دایره همبستگی



شکل ۵. نتایج آنالیز PCA در نمونه‌های منطقه مطالعه شده پس از دو بار چرخش

فاضلاب‌های صنعتی از دیگر منشأهای اصلی سدیم هستند. بنابراین، با توجه به اینکه در محدوده مطالعه شده مراکز صنعتی درخور توجهی وجود ندارد، غلظت سدیم ناشی از عوامل انسان‌زاد نیست. به همین دلیل، بردار نیترات در فاصله زیادی از بردار سدیم قرار دارد به علت آنکه همبستگی مناسبی بین نیترات، که منشأ عمده آن فاضلاب شهری است، با سدیم دیده نمی‌شود. بردار پارامتر EC که تحت تأثیر هر دو عامل است در بین آن‌ها قرار دارد. همچنین، سولفور به وسیله هوازدگی کانی‌های حاوی این عنصر در محیط آزاد می‌شود. سنگ‌های حاوی پیریت به وسیله میکروارگانیزم‌های کاتالیست در محیط‌های اکسیدان می‌توانند اکسید شوند و سولفور آزاد کنند. دو متشکله عمده سولفوری در آب‌های زیرزمینی سولفات و سولفید هستند. سولفات بیشتر از کانی‌های تبخیری ژئوس

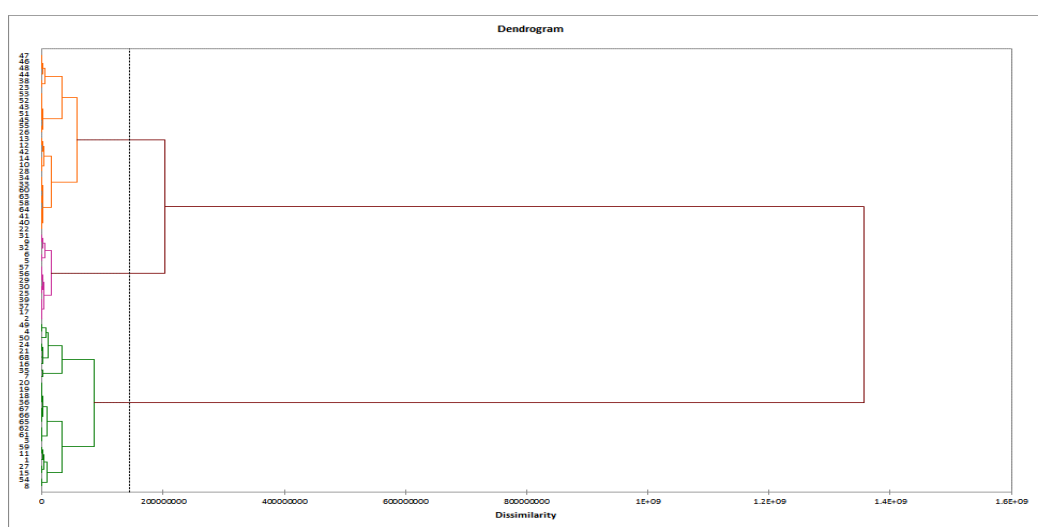
بر این اساس و همان‌طور که در شکل ۵ مشخص است، بردار پارامترهای نیترات، کلر، کلسیم و منیزیم به محور D2 نزدیک بوده و بیشترین تأثیر را بر عامل دوم، که عامل آلودگی است، دارد. دلیل اصلی این امر نفوذ فاضلاب‌های شهری به آب زیرزمینی و در نتیجه افزایش هم‌زمان نیترات و کلر است. بردار پارامترهای بی‌کربنات، سولفات و سدیم که تقریباً بر یکدیگر منطبق هستند، بیشترین تأثیر را بر عامل اول دارند که عامل درونی و زمین‌زاد است. سدیم بیشتر از فلدسپات‌های موجود در سنگ‌های آذرین و از محصولات عمل تجزیه آن کانی‌ها (رسی شدن) به دست می‌آید. آب فروشویی شده از لایه‌های فوقانی خاک و آغشتگی آب‌های زیرزمینی توسط آب‌های فسیل شور یا آب‌های دارای منشأ دریایی از منابع دیگر سدیم‌اند. کانی‌های رسی، تبخیری‌هایی مانند هالیت و

نسخه ۲۰۱۶ تهیه شده و در شکل ۶ نشان داده شده است. مطابق این خوشه‌بندی، چاه‌ها در سه دسته قرار می‌گیرند. با داده‌های موجود هیدروشیمیایی، روش وارد برای تشکیل خوشه‌ای که کمابیش همگن و از نظر ژئوشیمیایی از دیگر خوشه‌های تمیز داده‌شده باشد، در مقایسه با دیگر روش‌ها مانند weighted pair- group average است. گولر و همکارانش [۳۰] دریافتند که استفاده از فاصله اقلیدسی به‌عنوان سنجش فاصله‌ای و روش Ward به‌عنوان قانون اتصال واضح‌ترین گروه‌بندی را ارائه می‌دهد. طبقه‌بندی نمونه‌ها به دیاگرام درختی می‌انجامد که دندروگرام نامیده می‌شود.

و انیدریت به آب‌های زیرزمینی وارد می‌شود. در نواحی خشک فروشویی سولفات از لایه‌های فوقانی خاک درخور توجه است و سبب می‌شود که سولفات آنیون اصلی آب‌های زیرزمینی واقع در زیر آن نواحی باشد [۱۴]. در این مورد نیز غلظت سولفات در محدوده مطالعه‌شده، بیشتر زمین‌زاد است، بنابراین بین نیترات و سولفات همبستگی دیده نمی‌شود.

### تحلیل خوشه‌ای

نمودار درختی خروجی روش HCA برای داده‌های آب زیرزمینی منطقه مطالعه‌شده توسط نرم‌افزار XLSTAT



شکل ۶. نمودار درختی به‌دست آمده از خوشه‌بندی سلسله‌مراتبی

غربی فردیس واقع شده‌اند، بیشتر در محدوده مناطق مسکونی قرار گرفته‌اند.

دسته دوم (C2) با جمعیت ۲۱ درصد کل چاه‌ها در نیمه شرقی فردیس واقع شده است. متوسط غلظت نیترات در چاه‌های این دسته حدود ۶۰ میلی‌گرم در لیتر و حداکثر این مقدار برابر با ۱۰۵ میلی‌گرم در لیتر گزارش شده است. بررسی موقعیت چاه‌های این دسته نشان می‌دهد همه چاه‌های واقع در زیردسته C2-1 با متوسط غلظت نیترات ۵۷/۷ در محدوده زمین‌های زراعی واقع شده است. همچنین، چاه‌های واقع در زیردسته C2-2 با متوسط غلظت نیترات ۶۱/۴ بیشتر در مناطق مسکونی قرار گرفته‌اند.

دسته سوم (C3) با جمعیت ۳۸ درصد کل چاه‌ها در بخش شمالی آبخوان کرج واقع شده است. متوسط غلظت

پراکندگی مکانی نمونه‌ها در محدوده مطالعه‌شده در شکل ۷ نشان داده شده است. در این دسته‌بندی، چاه‌ها به سه دسته اصلی و هر دسته به دو زیردسته تقسیم شده است.

دسته نخست (C1) با جمعیت ۴۱ درصد کل چاه‌ها، بیشتر در محدوده غرب و شمال فردیس واقع شده است. متوسط غلظت نیترات در چاه‌های این دسته حدود ۳۹ میلی‌گرم در لیتر و حداکثر این مقدار برابر ۱۰۵ میلی‌گرم در لیتر ثبت شده است. چاه‌های این دسته در دو زیردسته C1-1 و C1-2 قرار می‌گیرند. بررسی موقعیت این چاه‌ها روی نقشه کاربری زمین (شکل ۷) نشان می‌دهد همه چاه‌های واقع در زیردسته C1-1 که در شمال فردیس واقع شده‌اند، در زمین‌های زراعی و باغی قرار گرفته‌اند. همچنین، چاه‌های واقع در زیردسته C1-2 که در نیمه

مقدار در چاه‌های دسته C1-2 اندازه‌گیری شده است. نکته درخور توجه اینکه بیشترین و کمترین مقدار متوسط نیترات نیز به ترتیب مربوط به چاه‌های C3-1 و C1-2 است. ورود فاضلاب‌های خانگی به‌خصوص در آبخوان شمالی می‌تواند دلیل اصلی همبستگی زیاد کلر و نیترات در این منطقه باشد.

در خصوص متوسط غلظت EC در چاه‌ها نیز وضع به همین روال است. به طوری که بیشترین میزان متوسط EC با ۱۰۵۴/۸ میکروموس بر سانتی‌متر در چاه‌های دسته C3-1 و کمترین این مقدار نیز در چاه‌های دسته C1-2 با ۶۰۱/۷ میکروموس بر سانتی‌متر اندازه‌گیری شده است.

با توجه به جهت جریان آب زیرزمینی، به طبع میزان EC در جهت جریان آب زیرزمینی باید افزایش یابد، اما این موضوع در منطقه مطالعه شده صحت ندارد. به این صورت که به رغم اینکه چاه‌های دسته C1-2 در قسمت پایین دست قرار گرفته‌اند، اما میزان EC آن‌ها کمتر از چاه‌های دسته C3-1 است که از نظر جریان آب‌های زیرزمینی در بالادست قرار دارند. دلیل این امر می‌تواند از یک‌طرف ورود حجم زیاد فاضلاب در بخش‌های شمالی آبخوان باشد و از طرفی، با توجه به قرارگیری چاه‌های دسته C1-2 در محدوده تحت تأثیر نفوذ رواناب‌های سطحی رودخانه کرج، اختلاط آب‌های با کیفیت خوب با آب‌های زیرزمینی این منطقه باشد.

در جدول ۷ مقادیر متوسط پارامترها در دسته‌های مختلف ارائه شده است. مقادیر حداکثری پارامترها با رنگ نارنجی و مقادیر حداقلی هر پارامتر با رنگ آبی نشان داده شده است. همان‌طور که مشخص است، مقادیر حداکثر میانگین تمامی پارامترها (به‌جز Ca) مربوط به دسته C3-1 است. همچنین، تقریباً مقادیر حداقلی میانگین تمامی پارامترها (به‌جز Ca و HCO<sub>3</sub>) مربوط به دسته C1-2 است.

نیترات در چاه‌های این دسته حدود ۶۱/۴ میلی‌گرم در لیتر و حداکثر این مقدار برابر با ۱۳۱/۷ میلی‌گرم در لیتر گزارش شده است. بررسی موقعیت چاه‌های این دسته نشان می‌دهد تمامی آنها در مناطق مسکونی واقع شده‌اند.

بررسی کلی نشان می‌دهد بیشترین مقدار متوسط نیترات با ۶۴/۱ میلی‌گرم در لیتر مربوط به چاه‌های C3-1 و کمترین این مقدار با ۳۸/۵ میلی‌گرم در لیتر مربوط به چاه‌های C1-2 است. بررسی نقشه موقعیت این چاه‌ها نشان می‌دهد چاه‌های زیردسته C1-2 در اطراف رودخانه کرج واقع شده‌اند. از آنجا که یکی از منابع تغذیه آبخوان رودخانه کرج است، تغذیه آب سطحی با کیفیت مناسب سبب کاهش غلظت نیترات در محدوده اطراف رودخانه کرج شده است. همچنین، قرارگیری این چاه‌ها در خارج از مناطق مسکونی می‌تواند دلیل دیگری بر کمبودن میزان نیترات باشد. در بین چاه‌ها، دسته‌های C2-1 و C1-1 در محدوده‌های زمین‌های زراعی واقع شده‌اند، اما میزان غلظت نیترات در دسته C1-2 کمتر از دسته C1-1 است. دلیل این امر، نزدیکی چاه‌های دسته C1-2 به رودخانه کرج است، بنابراین تحت تأثیر تغذیه آب رودخانه قرار می‌گیرند.

بیشترین مقدار حداکثری نیترات با ۱۳۱/۷ میلی‌گرم بر لیتر در چاه‌های دسته C3-1 اندازه‌گیری شده است. از آنجا که بیشتر تراکم جمعیتی کرج بزرگ در این منطقه واقع شده است، زیادبودن حجم فاضلاب ورودی به این بخش از آبخوان سبب افزایش میزان نیترات در آبخوان می‌شود. در مقابل، کمترین مقدار حداکثری نیترات با ۸۱/۴ میلی‌گرم در لیتر در چاه‌های دسته C2-1 مشاهده شده است.

متوسط غلظت کلر تمامی چاه‌ها حدود ۷۳/۴ میلی‌گرم در لیتر است. بیشترین میانگین غلظت کلر با ۱۰۰/۴ میلی‌گرم در لیتر مربوط به چاه‌های C3-1 و کمترین این

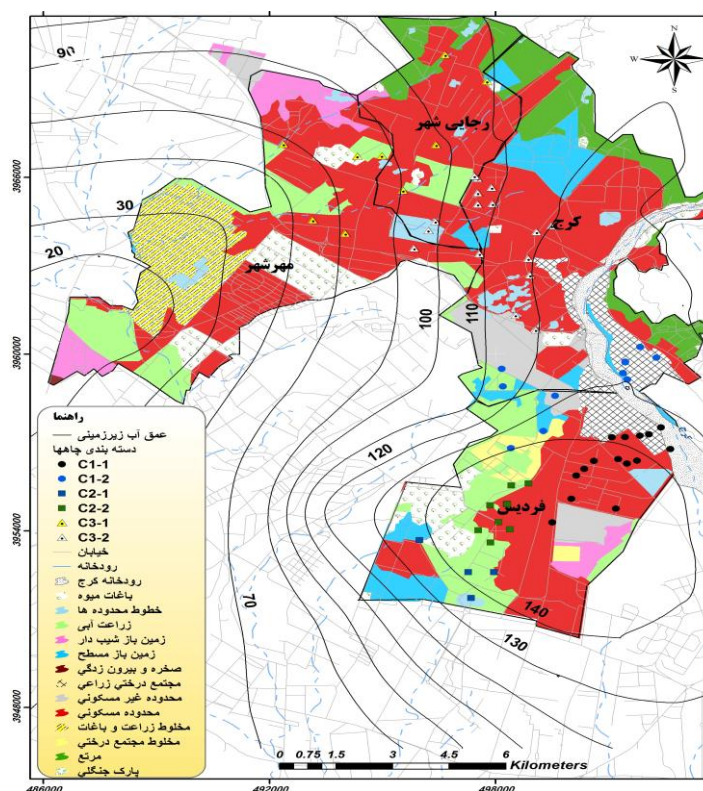
جدول ۷. مقادیر حداقل، متوسط و حداکثر پارامترها در دسته‌بندی‌های انجام‌شده

Averag (mg/l) دسته	EC	Cl	SO <sub>4</sub>	HCO <sub>3</sub>	NO <sub>3</sub>	Na	Mg	Ca
C1-1	۶۱۴/۵	۴۷/۰	۶۷/۳	۱۳۴/۲	۴۰/۱	۳۰/۱	۱۳/۰	۷۷/۷
C1-2	۶۰۱/۷	۵۴/۴	۶۶/۰	۱۳۲/۷	۳۸/۵	۲۹/۲	۱۲/۶	۷۶/۶
C2-1	۹۶۵/۰	۹۵/۱	۱۲۴/۰	۱۶۴/۵	۵۷/۷	۱۰۳/۱	۱۷/۷	۷۲/۲
C2-2	۷۲۷/۳	۷۱/۵	۷۵/۶	۱۱۸/۵	۶۱/۴	۴۰/۹	۱۵/۱	۸۳/۲
C3-1	۱۰۵۴/۸	۱۰۰/۴	۱۴۲/۰	۱۷۸/۹	۶۴/۱	۱۱۶/۶	۱۹/۵	۷۶/۵
C3-2	۸۴۰/۶	۸۱/۰	۹۷/۰	۱۴۷/۷	۵۸/۶	۷۰/۷	۱۶/۶	۷۸/۴

جنوب است به این صورت که به‌طور کلی آبرفت در بخش‌های شمالی دانه‌درشت است و به سمت جنوب از اندازه ذرات کاسته می‌شود. بنابراین، در بخش‌های شمالی نیترات ناشی از فاضلاب‌های خانگی می‌تواند راحت‌تر و با سرعت بیشتری به آبخوان برسد، اما در بخش‌های جنوبی به دلیل ماهیت ریزدانه‌بودن بخشی از نیترات می‌تواند جذب شود و در نتیجه نیترات با غلظت کمتری به آبخوان خواهد رسید.

در نهایت، می‌توان نتیجه گرفت که در منطقه مطالعه‌شده، تمرکز مناطق مسکونی و در نتیجه ورود فاضلاب‌های شهری، عمق سطح آب زیرزمینی و اندازه ذرات آبخوان کارکرد بسزایی در غلظت نیترات آب‌های زیرزمینی منطقه دارند.

بررسی نقشه عمق برخورد به سطح آب زیرزمینی نشان می‌دهد متوسط عمق سطح آب در آبخوان شمالی حدود ۱۰۰ متر و در بخش‌های جنوبی بیش از ۱۴۰ متر است. بنابراین، یکی از دیگر دلایل زیادبودن میزان نیترات در آبخوان شمالی (چاه‌های دسته C3-1) نسبت به آبخوان جنوبی (چاه‌های دسته C1-1 و C1-2) می‌تواند کمبود عمق آب زیرزمینی در بخش‌های شمالی نسبت به بخش‌های جنوبی باشد و این امر سبب می‌شود که نیترات ناشی از ورود فاضلاب‌های شهری در بخش‌های شمالی فرصت کمتری برای جذب و در نتیجه کاهش غلظت داشته باشد. بررسی نقشه توپوگرافی، زمین‌شناسی، لوگ چاه‌های اکتشافی، مطالعات ژئوفیزیک و نتایج آزمایش‌های پمپاژ نشان‌دهنده روند رسوب‌گذاری در آبرفت کرج از شمال به



شکل ۷. پراکندگی مکانی خوشه‌بندی نمونه‌ها در محدوده مطالعه‌شده

حلقه چاه شرب می‌شود، بی‌بعد شده است. سپس، داده‌های پرت حذف و داده‌های حذف‌شده بازسازی شده است. در نهایت، با کمک نرم‌افزار XLSTAT2016 آنالیزهای تحلیلی CA و PCA انجام شده است. جمع‌بندی نتایج بیان می‌کند که بر اساس روش خوشه‌بندی سلسله‌مراتبی، نمونه‌های آب در سه خوشه C1، C2 و C3

### نتیجه‌گیری

در مطالعه حاضر با توجه به آلودگی زیاد آبخوان دشت کرج به نیترات، وضعیت این پارامتر بر اساس رابطه آن با سایر پارامترهای شیمیایی با کمک آنالیزهای آماری تحلیلی بررسی شده است. به این منظور، ابتدا داده‌های به‌دست‌آمده از شبکه نمونه‌برداری انتخابی که شامل ۶۸

در نهایت، می‌توان گفت که روند کلی تغییرات غلظت نیترات، کاهش غلظت نیترات از شمال به سمت مرکزی است. دلیل این امر را می‌توان در تغذیه آب‌های زیرزمینی توسط رودخانه کرج، تمرکز کمتر مناطق مسکونی در مرکز نسبت به شمال و نیز شرایط هیدروژئولوژیکی دانست. اما در جهت جریان آب زیرزمینی در منطقه جنوب، دوباره میزان نیترات افزایش یافته است که با توجه به کاربری زمین، دلیل این امر را می‌توان در مصرف بیش از حد کودهای نیترا ته در بخش جنوبی آبخوان جست‌وجو کرد. در پایان، بر مبنای نتایج به دست آمده می‌توان دریافت که با توجه به پیچیدگی سیستم آب‌های زیرزمینی و تفسیر متغیرها و فرایندهای حاکم بر حرکت نیترات در آبخوان، رویکرد ارائه شده در تحقیق حاضر می‌تواند به عنوان ابزاری مفید برای شناخت منشأ آلودگی بر اساس رابطه بین پارامترهای شیمیایی آب و نیز نوع کاربری زمین و پارامترهای هیدروژئولوژیکی آبخوان استفاده شود.

#### منابع

- [1]. Iran Water Resources Management Co. Study of state of water resources of the country. 2016. [Persian].
- [2]. Adepelumi A, Ako B, Ajayi T, Afolabi O, Omotoso E. Zelineation of saltwater intrusion into the freshwater aquifer of Lekki Peninsula, Lagos, Nigeria. *Environmental Geology*. 2009; 56 (5):927-933.
- [3]. Anayah FM, Almasri M.N. Trends and occurrences of nitrate in the groundwater of the West Bank, Palestine. *Applied Geography*. 2009; 29 (4):588-601.
- [4]. Camargo J.A, Alonso A. Ecological and toxicological effects of inorganic nitrogen pollution in aquatic ecosystems: a global assessment. *Environ. Int*. 2006; 32:831-849.
- [5]. De Paz JM, Ramos C. Simulation of nitrate leaching for different nitrogen fertilization rates in a region of Valencia (Spain) using a GIS-GLEAMS system. *Agr Ecosyst Environ*. 2004; 103:1.59-73.
- [6]. González Vázquez JC, Grande JA, Barragan FJ, Ocaña JA, De La Torre ML. Nitrate accumulation and other components of the groundwater in relation to cropping system in an aquifer in southwestern Spain. *Water Resour Manag*. 2005; 19 (1):1-22.

قرار می‌گیرند. بیشترین مقدار متوسط نیترات مربوط به چاه‌های C3-1 و کمترین این مقدار مربوط به چاه‌های C1-2 است. از آنجا که چاه‌های زیردسته C1-2 در اطراف رودخانه کرج واقع شده‌اند و این رودخانه یکی از منابع تغذیه آبخوان است، بنابراین تغذیه آب سطحی با کیفیت مناسب سبب کاهش غلظت نیترات در محدوده اطراف رودخانه کرج شده است. همچنین، قرارگیری این چاه‌ها در خارج از مناطق مسکونی می‌تواند دلیل دیگری بر کم بودن میزان نیترات باشد. در بین چاه‌ها، دسته C2-1 و C1-1 در محدوده‌های زمین‌های زراعی واقع شده‌اند، اما میزان غلظت نیترات در دسته C1-2 کمتر از دسته C1-1 است. دلیل این امر نزدیکی چاه‌های دسته C1-2 به رودخانه کرج است. همچنین، بیشترین مقدار حداکثری نیترات در چاه‌های دسته C3-1 اندازه‌گیری شده است. از آنجا که بیشتر تراکم جمعیتی کرج بزرگ در این منطقه واقع شده است، زیاد بودن حجم فاضلاب ورودی به این بخش از آبخوان سبب افزایش میزان نیترات در آبخوان می‌شود. یکی از دیگر دلایل زیاد بودن میزان نیترات در آبخوان شمالی (چاه‌های دسته C3-1) نسبت به آبخوان جنوبی (چاه‌های دسته C1-1 و C1-2) می‌تواند کم بودن عمق آب زیرزمینی در بخش‌های شمالی نسبت به بخش‌های جنوبی باشد و این امر سبب می‌شود که نیترات ناشی از ورود فاضلاب‌های شهری در بخش‌های شمالی فرصت کمتری برای جذب و در نتیجه کاهش غلظت داشته باشد. از طرف دیگر، نفوذپذیری زیاد رسوبات در بخش‌های شمالی، زمان ماندگاری نیترات را در منطقه غیراشباع کاهش داده و نیترات موجود در خاک بدون اینکه فرصت استفاده کامل توسط گیاهان و نیترات‌زدایی توسط باکتری‌ها فراهم شود، توسط جریان‌ات عمودی آب در منطقه غیراشباع شسته شده و در مدت زمان کوتاهی به آب زیرزمینی منتقل می‌شود. بررسی همبستگی بین پارامترها نشان می‌دهد بیشترین میزان همبستگی نیترات با کلر دیده می‌شود که دلیل اصلی آن منشأ یکسان (فاضلاب‌های شهری) است. تحلیل عاملی به استخراج دو مؤلفه منجر شد. مؤلفه نخست ناشی از فرایندهای زمین‌زاد بوده و مؤلفه دوم با تأثیر نیترات که بیشتر ناشی از فاضلاب‌های شهری است، مؤلفه ناشی از فرایندهای انسان‌زاد نامیده شده است.

- [7]. Li JS, Li B, Rao MJ. Spatial and temporal distributions of nitrogen and crop yield as affected by nonuniformity of sprinkler fertigation. *Agr Water Manag.* 2005; 76(3):160–180.
- [8]. Goulding K. Nitrate leaching from arable and horticultural land. *Soil Use and Management.* 2000; 16: 145-151.
- [9]. Wakida F, Lerner DN. Non-agricultural sources of groundwater nitrate: a review and case study. *Water Research.* 2005; 39:3–16.
- [10]. Wassenaar L. Evaluation of the origin and fate of nitrate in the Abbotsford Aquifer using the isotopes of N and O in NO<sub>3</sub>. *Appl Geochem.* 1995; 10:391–405.
- [11]. EPA. Hydrogeological assessment (groundwater quality) guideline. EPA Victoria, Publication 888, ISBN 0730676587, Australia; 2006.
- [12]. Moratalla A, Gómez-Alday J. J, De las Heras J, Sanz, D, Castaño S. Nitrate in the Water-Supply Wells in the Mancha Oriental Hydrogeological System (SE Spain). *Water Resources Management.* 2009; 23:1621–1640.
- [13]. WHO. World Health Organization, Guidelines for drinking-water quality. second addendum. Vol. 1, Recommendations. 3th edition. ISBN 978 92 4 154760; 2008.
- [14]. Freeze R.A, Cherry J.A. *Ground Water.* Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ; 1979.
- [15]. Kenney D. R. The origin of groundwater nitrate; 1989.
- [16]. Clawges RM, Vowinkel EF. Variables indicating nitrate contamination in bedrock aquifers, Newark Basin, New Jersey. *Water Resour Bull.* 1996; 32 (5):1055–1066.
- [17]. Kehew AE, Straw WT, Steinmann WK, Barrese PG, Passarella G, Peng W. Groundwater quality and flow in a shallow glaciofluvial aquifer impacted by agricultural contamination. *Ground Water.* 1996; 34 (3):491–500.
- [18]. Pawar N. J, Shaikh I.j. Nitrate pollution of groundwater from shallow basaltic aquifer. Deccan Trap Hydrologic Province. India; 1995.
- [19]. Nadiri A, Asgharimoghadam A, Tsai FTC, Fijani E. Hydrogeochemical analysis for Tasuj plain aquifer, Iran. *Journal of earth system science.* 2013; 122(4): 1091-1105.
- [20]. Nadiri A, Ruzrakh J, Asgharimoghadam A. Hydrogeochemical and hydrogeological study of Harzandat plain aquifer using multivariate statistical methods and graphical methods. *Journal of Iran Water Research.* 2016; 23(10):111-122. [Persian].
- [21]. Mahmudi M, Nadiri A, Asgharimoghadam A, Pourakbar M, Moradiyan A. Investigation of Shiramin water resources Using Multivariate Statistical Methods. 2016; 23(3): 289-302. [Persian].
- [22]. Qian J, Wang L, Liu Y, Wu B, Wang X. Distribution of nitrate and its implication for the contaminant source in groundwater of Huaibei Plain, Anhui Province. 2014; *Geosciences Journal.* DOI 10.1007/s12303-014-0051-5
- [23]. Durov S. Natural waters and graphic representation of their composition. *Dokl Akad Nauk SSSR;* 1948.
- [24]. 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.* 2000; 9 (2)135-146.
- [25]. Chen K, Jiao J.J, Huang J, Huang R. Multivariate statistical evaluation of trace elements in groundwater in a coastal area in Shenzhen, China. *Environmental Pollution.* 2007; 147: 771-780.
- [26]. Zhang C. Using multivariate analyses and GIS to identify pollutants and their spatial patterns in urban soils in Galway, Ireland. *Environmental Pollution.* 2006; 142:501-511.
- [27]. Mudge S, Duce C. Identifying the source, transport path and sinks of sewage derived organic matter. *Environmental Pollution.* 2005; 136:209-220.
- [28]. Mahab Ghodss Consulting Engineers Co. Tehran-Karaj Water Resources Report; 2010. [Persian]
- [29]. RayAb Consulting Engineers Co. Karaj Water Supply Project (Groundwater Quality Report, Geological Report); 2015. [Persian]
- [30]. Guler C, Thyne G.D, McCray J.E, Turner K.A. Evaluation of graphical and multivariate statistical methods for classification of water chemistry data. *Hydrogeol. J.* 2002; 10 (4)455-474.
- [31]. Farshadfar A. Multivariate statistical principles and methods. Razi university of Kermanshah. 2005. [Persian]
- [32]. Davis J.C. *Statistics and Data Analysis in Geology.* John Wiley and Sons (WIE); 2002.
- [33]. Tabachnick B.G, Fidell L.S. *Using multivariate statistics;* 2001.

- [34]. Love D, Hallbauer D, Amos A, Hranova R. Factor analysis as a tool in groundwater quality management: two southern Africa case studies. *Physics and Chemistry of the Earth. Parts A/B/C*. 2004; 29(15):1135-1143.
- [35]. Vega M, Pardo R, Barrado E, Deban L. Assessment of seasonal and polluting effects on the quality of river water by exploratory data analysis. *Water research*. 1998;32 (12):3581-3592.
- [36]. Davis J.C. *Statistical and data analysis in geology*. J. Wiley; 1986.
- [37]. Eekhout I, R. M. de Boer, et al. Missing data: a systematic review of how they are reported and handled. *Epidemiology*. 2012; 23(5)729-732.
- [38]. Kaiser H.F. The varimax criterion for analytic rotation in factor analysis. *Psychometrika*. 1958; 23(3):187-200.
- [39]. McNeil V.H, Cox M.E, Preda, M. Assesment of chemical water types and their spatial variation using multi- stage cluster analysis, Queensland, Australia. *J. Hydrol*. 2005; 310 (1):181-200.