



## خوشه‌بندی چاه‌های مشاهداتی آبخوان دشت خوی از نظر کیفیت آب با استفاده از

### روش K-Means

یعقوب دین‌پژوه\*

۱- دانشیار، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

\* نویسنده مسئول: [dinpashoh@yahoo.com](mailto:dinpashoh@yahoo.com)

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۰۳/۱۶

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۹/۰۷/۱۱

#### چکیده

هدف این مطالعه، پهنه‌بندی چاه‌های مشاهداتی موجود در آبخوان دشت خوی با استفاده از روش K-Means است. داده‌های مورد استفاده از چهارده پارامتر کیفی آب زیرزمینی شامل مجموع کاتیون‌ها، مجموع آنیون‌ها، هدایت الکتریکی (EC)، (pH)، مقدار کل مواد جامد حل شده (TDS)، نسبت جذب سدیم (SAR)، سختی کل (TH)، درصد سدیم (Na)، منیزیم ( $Mg^{2+}$ )، کلسیم ( $Ca^{2+}$ )، سدیم ( $Na^+$ )، سولفات ( $SO_4^{2-}$ )، کلر ( $Cl^-$ ) و بی‌کربنات ( $HCO_3^-$ ) تشکیل شده‌اند. نمونه‌های آب از ۲۶ چاه مشاهداتی برداشت و تحلیل شده است. بهینه تعداد خوشه‌ها با روش خوشه‌بندی K-Means با نرم‌افزار Excelstat مشخص گردید. تعیین تعداد بهینه خوشه‌ها بین دو و پنج مورد آزمون قرار گرفت و جهت تعیین کیفیت آب زیرزمینی از نمودار ویلکوکس استفاده شد. نتایج نشان داد که تعداد بهینه خوشه‌ها چهار بوده و بنابراین، آبخوان دشت خوی را از نظر کیفیت آب می‌توان به چهار ناحیه متمایز تقسیم نمود. وسعت ناحیه اول معادل ۲۱۴/۳ کیلومترمربع (۵۱/۱۴ درصد مساحت کل دشت) می‌باشد که دارای آب بسیار مطلوب برای کشاورزی و شرب است. ناحیه دوم ۵۰/۱ کیلومترمربع (۱۱/۹۵ درصد) و ناحیه سوم ۵۲/۷ کیلومترمربع (۱۲/۵۷ درصد) از دشت را شامل می‌شوند که به ترتیب، دارای آب با کیفیت متوسط و بسیار نامطلوب هستند. ناحیه چهارم دارای آب با کیفیت ضعیف می‌باشد که مساحت این ناحیه معادل ۱۰۱/۹ کیلومترمربع (۲۴/۳۱ درصد) است. بالا بودن مقدار EC و SAR در خوشه سوم علت نامطلوب بودن آب این خوشه می‌باشد. در حالت کلی، می‌توان نتیجه گرفت که بیش از پنجاه درصد آبخوان دشت خوی دارای آب زیرزمینی با کیفیت شیمیایی مطلوب می‌باشد. محافظت از آب زیرزمینی دشت خوی از خطر آلودگی آب و بهره‌برداری منطقی از آب دشت برای دوام کشاورزی پایدار در این منطقه از اهمیت زیادی برخوردار بوده و قویاً توصیه می‌شود.

**واژه‌های کلیدی:** آب زیرزمینی، تحلیل خوشه‌ای، دیاگرام ویلکوکس، کیفیت آب.

#### مقدمه

می‌روند. در این میان، آب‌های زیرزمینی موجود در نواحی خشک و نیمه‌خشک کشور از منابع بسیار ارزشمند و حیاتی برای مردم محسوب می‌شود. حفر قنات متعدد در شهرهای کویری مانند یزد که طول کوره اصلی آنها بیش از صد کیلومتر است، دلیل بارز این اهمیت برای مردم سخت‌کوش ایران است. با ورود فناوری حفر چاه‌های عمیق و نیمه‌عمیق و استفاده از

حیات بشر و همه موجودات زنده به آب وابسته است. آب-ها کلاً در دو دسته قابل مطالعه هستند. این دودسته شامل آب‌های موجود (و جاری) در سطح زمین و آب‌های زیرزمینی هستند. آب‌های زیرزمینی از منابع ارزشمند تهیه آب شرب، کشاورزی و صنعت در مناطق خشک و نیمه‌خشک به‌شمار

برای تحلیل کیفیت آب استانداردهای ثابت و یکسان در جهان وجود ندارد، بنابراین، از روش‌های چندمتغیره مانند تجزیه خوشه‌ای (کلاهدوزان و همکاران، ۱۳۹۴، Ay and Kisi, 2011; Everitt et al., 2014; Celestino et al., 2018) و تجزیه به عامل‌ها (جلالی و اصغری مقدم، ۱۳۹۲؛ اصغری مقدم و جلالی، ۱۳۹۳؛ Liu et al., 2003) استفاده می‌شود. بنا به نظر Celestino et al. (2018) این روش‌ها قادرند که ایستگاه‌های مشاهداتی با کیفیت آب مشابه را با توجه به نمونه‌های آن‌ها و چند پارامتر (از دو تا بیشتر از ۱۰۰۰) در گروه‌های مختلف دسته‌بندی کنند. از جمله این مطالعات می‌توان به کار علمی Naranjo-Fernandez et al. (2020) اشاره کرد که به منظور خوشه‌بندی چاه‌های مشاهداتی دشت آلمونته- ماریسماس در اسپانیا از تحلیل خوشه‌ای استفاده کردند. ایشان برای این منظور از اطلاعات تراز آب ۱۶۰ ایستگاه پیزومتریک در دوره آماری ۲۰۱۶-۱۹۷۵ بهره گرفتند. نتایج ایشان حاکی از وجود شش خوشه متمایز در دشت مذکور بود. آن‌ها نشان دادند که تراز آب دشت در دوره ۱۹۹۵ تا ۲۰۱۶ به مراتب بیشتر از تراز آب در دوره ۱۹۷۵ تا ۱۹۹۵ افت کرده که به افزایش تعداد چاه‌های بهره‌برداری نسبت داده شد. به طور مشابه Wu et al. (2021) در ناحیه‌ای بنام هانگ- جینگی<sup>۱</sup> واقع در شمال غرب شهر اردوس<sup>۲</sup> در مغولستان، از تحلیل خوشه‌ای به منظور دسته‌بندی پارامترهای کیفی آب استفاده نموده و از دیگرام‌های پایپر<sup>۳</sup>، گیبز<sup>۴</sup> و شاخص اشباع<sup>۵</sup> برای نشان دادن تفاوت‌های ترکیب شیمیایی آب زیرزمینی در دوره‌های بارانی و خشک کمک گرفتند. نتایج مطالعه آن‌ها حاکی از وجود شش خوشه متمایز بود. ضمناً ایشان گزارش دادند که کیفیت آب زیرزمینی در این منطقه در دوره خشک بهتر از دوره بارانی بود. یکی از روش‌های علمی دسته‌بندی ایستگاه‌ها از نظر کیفیت آب زیرزمینی استفاده از تحلیل خوشه‌ای است که در سال‌های اخیر در زمینه منابع آب زیرزمینی استفاده شده است. تحلیل خوشه‌ای قادر است که ایستگاه‌هایی که آب آن‌ها از نظر کیفیت مشابه هم هستند، در طبقات مجزا کلاس‌بندی کند. به عبارت

پمپ برای بالاکشیدن آب چاه در ابتدا موهبتی برای کشاورزان در تسهیل استخراج آب محسوب می‌شد ولی به تدریج با حفر چاه‌های پی‌درپی در دشت‌ها، این موهبت بزرگ الهی به یک چالش جدی برای کشاورزان و دولت تبدیل شد؛ زیرا روزبه‌روز سطح ایستابی در آبخوان‌ها کاهش یافته و در نتیجه موجبات نابودی سفره‌های آب زیرزمینی کشور فراهم شد. طوری که در برخی دشت‌ها نشست خاک روی داده که این نشست، یکی از نشانه‌های واضح نابودی آبخوان محسوب می‌شود (دین‌پژوه و همکاران، ۱۳۹۴). افزون بر این، قنوات با ارزش این مرزوبوم که از هزاران سال پیش مورد استفاده مردم ایران واقع می‌شد، به تدریج دچار کاهش آبدی شده و بسیاری نیز کاملاً خشک شده‌اند. در سال‌های خشک که بارندگی کفاف نیازهای شرب، صنعت و کشاورزی را برآورده نمی‌کند، آب زیرزمینی اهمیت مضاعف پیدا می‌کند و می‌تواند مورد بهره‌برداری واقع شود. برای بهره‌برداری منطقی از آب زیرزمینی باید برخی اصول علمی مانند تخمین دقیق کمیت آب قابل بهره‌برداری در طول سال و حفاظت آبخوان از خطر آلودگی آب (کیفیت آب) دشت به‌طور مستمر مدنظر قرار گیرد. بی‌تردید پایش کیفیت آب زیرزمینی با توجه به تغییرات آن در طی زمان (که ممکن است در اثر فعالیت‌های انسان و توسعه فعالیت‌های صنعتی صورت گیرد) در استفاده پایدار از منابع آب بسیار ضروری است. بخشی از کیفیت آب زیرزمینی مربوط به مواد متشکله سازند لایه آبدار است، نفوذ فاضلاب‌های شهری، زهاب کشاورزی و پساب کارخانه‌ها به داخل خاک می‌تواند موجبات تخریب کیفیت آب زیرزمینی را فراهم آورد (Todd and Mays, 2015). نمونه‌برداری و تجزیه شیمیایی آب زیرزمینی در فواصل زمانی منظم از نقاط مختلف آبخوان می‌تواند ما را در درک منشأ آلاینده‌های آب زیرزمینی کمک کند. از جمله تشخیص نواحی مختلف یک آبخوان از نظر کیفیت آب استفاده از روش‌های آماری چندمتغیره است (Celestino et al., 2018). این روش‌ها توسط محققین مختلف جهان برای تحلیل زمانی و مکانی کیفیت آب زیرزمینی به کار گرفته شده است (مانند Srivastava and Ramanathan, 2008; Kim et al., 2004; Chapagain et al., 2010; Bu et al., 2010). با توجه به اینکه

<sup>4</sup>-Gibbs

<sup>5</sup>-Saturation index

<sup>1</sup>-Hangjinqi

<sup>2</sup>-Ordos

<sup>3</sup>-Piper

دشت مهران و دهلران واکنش بین آب و سازندهای زمین-شناسی به خصوص سازند گچساران می‌باشد. سامانی و همکاران (۱۳۹۰) کیفیت آب زیرزمینی دشت اوان را با روش آماری تحلیل خوشه‌ای انجام دادند و با استفاده از اطلاعات ۱۸ نمونه آب زیرزمینی و ۳ نمونه آب سطحی و با منطقه‌بندی کیفی آبخوان از روش آماری تحلیل خوشه‌ای به این نتیجه رسیدند که عوامل مؤثر بر کیفیت آب زیرزمینی در این منطقه واکنش بین آب و سازندهای زمین‌شناسی و تبادل یونی معکوس می‌باشند.

با رواج استفاده از رایانه‌ها در علوم مختلف از جمله هیدروژئولوژی، مطالعات زیادی در مورد آب‌های زیرزمینی انجام گرفته است (مانند دانشور و ثوقی و همکاران، ۱۳۹۰؛ دانشور و ثوقی و دین‌پژوه، ۱۳۹۱؛ ندیری و صدقی، ۱۳۹۸؛ نگهبان‌خواجه و دین‌پژوه، ۱۳۹۸). یکی از روش‌های چندمتغیره، خوشه‌بندی داده‌ها است که خود انواع مختلفی دارد (Everitt et al., 2011). روش K-Means از روش‌های خوشه‌بندی است که در علم آب زیرزمینی مورداستفاده قرار گرفته است (Ay and Kisi, 2014; Carvalho et al., 2016). در ایران، کاربرد این روش در علم مذکور، نسبت به خارج محدود است. یکی از مطالعات مذکور کار محقق ایرانی بنام جانی (۱۳۹۸) است که در مطالعه خود از روش خوشه‌بندی استفاده نموده است. در مطالعه جوادی و همکاران (۱۳۹۷) از روش K-Means در پهنه‌بندی آب زیرزمینی در دشت قزوین بهره گرفته شده ولیکن مطالعه ایشان محدود به سه پارامتر نیترات، آرسنیک و کل مواد جامد محلول بوده است. مطالعه حاضر که برای دشت خوی انجام شده، با توجه به تعداد پارامترهای هیدروژئوشیمیایی (۱۵ پارامتر در مطالعه حاضر) متفاوت با کار جوادی و همکاران (۱۳۹۷) که از سه پارامتر هیدروژئوشیمیایی استفاده کرده‌اند، می‌باشد. نظر به کاهش بارش‌ها در شمال غرب ایران، استفاده پایدار از منابع آب زیرزمینی در شمال غرب کشور از جمله دشت خوی منوط به فهم عمیق از کمیت و کیفیت آب زیرزمینی موجود در نقاط مختلف آبخوان می‌باشد. کاربرد روش K-means در کلاس-بندی چاه‌های مشاهداتی موضوع نسبتاً جدید است که برای آبخوان دشت خوی در نظر گرفته شده و با توجه به نوع مشخصه‌های هیدروژئوشیمیایی آب زیرزمینی که در مطالعه

بهرتر، در فرایند خوشه‌بندی سعی می‌شود تا ایستگاه‌ها (چاه-های مشاهداتی) به خوشه‌هایی متمایز طوری تقسیم شوند که کیفیت آب ایستگاه‌های واقع در درون هر خوشه دارای حداکثر شباهت بوده و درعین حال، تفاوت میانگین غلظت املاح مختلف چاه‌هایی که در داخل یک کلاس (یا خوشه) قرار دارند با میانگین نظیر خوشه‌های دیگر به حداکثر می‌رسد. مطالعات زیادی روی کیفیت آب زیرزمینی انجام شده است. به‌عنوان مثال، Liu et al. (2003) کیفیت آب زیرزمینی را در تایوان، Kim et al. (2004) در کره جنوبی، Srivastava and Ramanathan (2008) در هند، Chapagain et al. (2010) دره کاتماندو نپال، Bu et al. (2010) در رودخانه جین‌شوای (چین) و Spanos and Eye (2015) در شمال یونان ارزیابی کردند. در ایران نیز در سال‌های اخیر مطالعات متعددی در رابطه با کاربرد تجزیه خوشه‌ای در علوم مختلف زمین‌شناسی، هیدرولوژی و اقلیم‌شناسی انجام شده است. در این زمینه، می‌توان به مطالعه کامجو و همکاران (۱۳۸۹) در زمینه استفاده از روش تجزیه خوشه‌ای به منظور بررسی کیفیت آب زیرزمینی، فخری و همکاران (۱۳۹۲) در دشت مرنند و پژوهش اقدر و محمدیاری (۱۳۹۳) در زمینه کیفیت آب زیرزمینی در دشت مهران و دهلران اشاره کرد. عبادتی (۱۳۹۴) به بررسی روند تغییرات کیفی منابع آب زیرزمینی دشت ایوانکی پرداخت. نتایج نشان داد که بهترین کیفیت آب در مناطق غربی و بدترین آن‌ها در مناطق شرقی و جنوبی که به توده‌های تبخیری نزدیک هستند، قرار دارد. در بررسی نمودار ویلکوکس مشخص شد نواحی شرقی و جنوبی در نامطلوب‌ترین کلاس ویلکوکس قرار گرفته‌اند و از نظر مصارف کشاورزی، مناسب نیستند. آب نواحی مرکزی دشت شوری و هدایت الکتریکی کمتری دارند که برای کشاورزی مناسب‌تر می‌باشد. اقدر و محمدیاری (۱۳۹۳) با استفاده از روش آماری تحلیل خوشه‌ای به ارزیابی تغییرات کیفی آب زیرزمینی دشت مهران و دهلران پرداختند. نتایج نشان داد با استفاده از روش تحلیل خوشه‌ای، چاه‌های دشت بر اساس میزان شباهت در مشخصه‌های کیفی آب آن‌ها به سه خوشه تقسیم شدند. بررسی کیفی انجام شده نشان داد که نمونه‌های آب واقع در گروه دوم دارای بهترین کیفیت و نمونه‌های واقع در گروه اول بدترین کیفیت را دارا هستند. مهم‌ترین عوامل مؤثر بر کیفیت آب زیرزمینی در

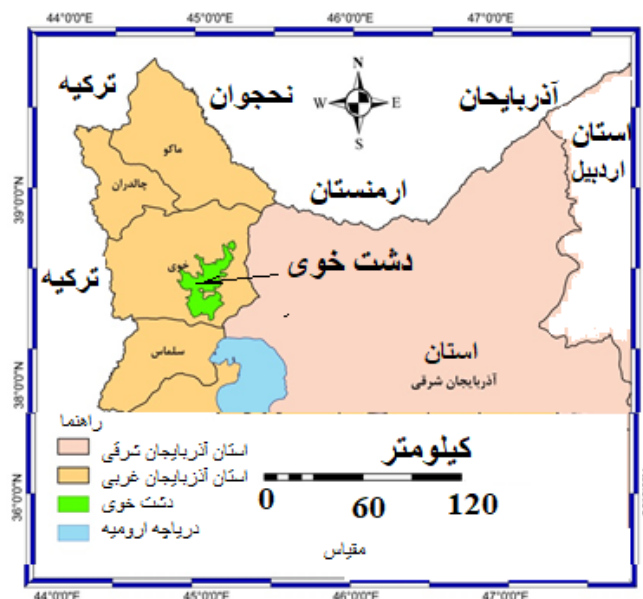
۳۵ ساله ایستگاه سینوپتیک خوی حداقل درجه حرارت مطلق هوا در این ایستگاه ۲۷- درجه سانتی‌گراد بوده که در نوزدهم دی سال ۱۳۵۲ مشاهده شده است و حداکثر درجه حرارت مطلق هوا در این ایستگاه معادل ۴۰/۴ درجه سانتی‌گراد است که در روز دوازدهم مرداد ۱۳۸۲ به ثبت رسیده است. متوسط تعداد روزهای یخبندان در خوی ۱۱۳ روز در سال هست. با توجه به بررسی‌های ژئوهیدرولوژیکی، آبخوان دشت خوی از نوع آزاد بوده و حداکثر عمق برخورد به آب در شمال روستای فیروق معادل ۹۰ متر و کمترین آن در حاشیه رودخانه‌های الند و قطور می‌باشد که گاه به کمتر از ۱ متر می‌رسد. این دشت در حوضه آبریز دریای خزر واقع است. از نظر زمین‌شناسی، معلوم شده است که رسوبات آبرفتی جدید بوده و مربوط به دوران چهارم است (جلالی و اصغری‌مقدم، ۱۳۹۲). حداقل و حداکثر مقدار ضخامت آبرفت به ترتیب، ۵۰ و ۲۰۰ متر بوده و مارن و کنگلومرا سنگ کف این دشت را تشکیل داده است. نقشه زمین‌شناسی این دشت با جزئیات آن توسط جلالی و اصغری‌مقدم (۱۳۹۲) نشان داده شده است. شکل ۱ موقعیت دشت را در شمال غرب ایران نشان می‌دهد. شهر خوی در مرکز این دشت قرار دارد. کشت گیاهانی مانند غلات، آفتابگردان، کلزا و چغندر قند در کنار باغداری در این دشت رایج است.

حاضر از آن‌ها در خوشه‌بندی آب‌چاه‌های مشاهداتی مختلف استفاده شده در نوع خود یک مطالعه جدید در علم هیدروژئولوژی کشور محسوب می‌شود. هدف از این مطالعه، پهنه‌بندی چاه‌های مشاهداتی واقع در آبخوان دشت خوی از نظر برخی از مشخصه‌های شیمیایی آب زیرزمینی با استفاده از روش تحلیل خوشه‌ای K-Means می‌باشد.

## مواد و روش‌ها

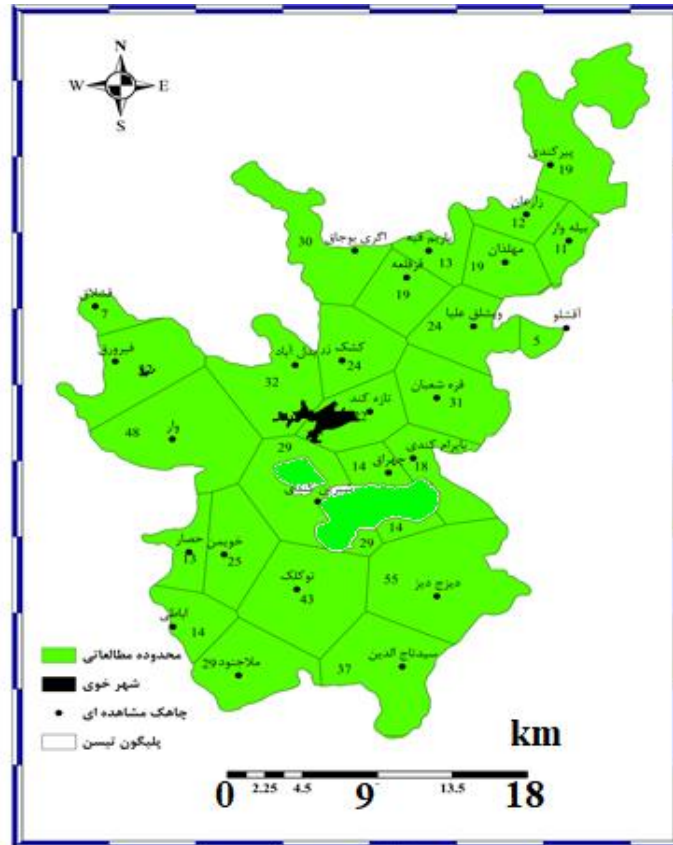
### منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه دشت خوی می‌باشد. این دشت با وسعت ۳۸۰۲ کیلومترمربع در شمال غرب ایران و در شمال شهرستان سلماس و غرب مرند و در محدوده طول‌های جغرافیایی ۴۴ درجه و ۱۵ دقیقه تا ۴۵ درجه و ۱۵ دقیقه شرقی و عرض‌های جغرافیایی ۳۸ درجه و ۲۸ دقیقه تا ۳۸ درجه و ۵۰ دقیقه شمالی قرار دارد. مهم‌ترین رودخانه‌های موجود در این دشت شامل رودخانه‌های الند، قطور، هندوان و غازان‌چای است که به ترتیب، از ارتفاعات ایت‌اوهان، چلیکان، اورین‌بزرگ و اورین‌کوچک سرچشمه می‌گیرند. متوسط بارندگی سالانه در این دشت ۲۷۹/۶ میلی‌متر و اقلیم آن نیمه-خشک و سرد می‌باشد. متوسط ارتفاع دشت ۱۲۳۳ متر از سطح دریاهای آزاد است و میانگین سالانه دمای هوا در دشت مذکور ۱۱/۸ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. میانگین رطوبت نسبی هوا در ایستگاه خوی حدود ۶۰ درصد می‌باشد. با توجه به آمار



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی دشت خوی در شمال غرب ایران.

در شکل ۲ موقعیت چاه‌های مشاهداتی منتخب که در دشت خوی حفر شده‌اند، نشان داده شده است. به منظور تخمین مساحت زیرناحیه‌های مختلف که با خوشه‌بندی حاصل می‌شوند، از پلیگون تیسسن<sup>۶</sup> استفاده شد. نواحی نظیر هر چاه مشاهداتی با این پلیگون در شکل مذکور دیده می‌شوند. مساحت هر کدام از نواحی با استفاده از نرم‌افزار ArcGIS به دست آمد.



شکل ۲- موقعیت چاه‌های مشاهداتی مورد مطالعه و پلیگون تیسسن در دشت خوی.

واقع شد. برای این کار، سری زمانی هر پارامتر برای تک تک ایستگاه‌ها رسم شد و نقاط پرت به طور چشمی تشخیص داده شدند. در صورت وجود داده پرت، میانگین درازمدت همان پارامتر به جای داده پرت در ایستگاه مذکور جایگزین گردید. اندازه‌گیری و تجزیه و تحلیل کیفیت آب توسط شرکت آب منطقه‌ای برای هر ایستگاه، دو بار در سال (و در برخی موارد سه بار) انجام شده است. در مطالعه حاضر، برای هر ایستگاه، در هر سال، تنها یک اندازه‌گیری (در فصل تابستان) برای کلیه پارامترها مورد استفاده واقع شد. با توجه به داده‌های مذکور، خوشه‌بندی بعد از استاندارد کردن داده‌ها با نرم‌افزار Xlstat انجام گردید. روند استانداردسازی داده‌ها این گونه بود که از

#### داده‌های مورد استفاده

داده‌های استفاده شده در این تحقیق مربوط به ۱۵ پارامتر کیفیت آب زیرزمینی شامل مجموع کاتیون‌ها و مجموع آنیون‌ها، هدایت الکتریکی (EC)، (pH)، مقدار کل مواد جامد حل شده (TDS)، نسبت جذب سدیم (SAR)، سختی کل (TH)، درصد سدیم (Na)، منیزیم ( $Mg^{2+}$ )، کلسیم ( $Ca^{2+}$ )، سدیم ( $Na^{+}$ )، یون سولفات ( $SO_4^{2-}$ )، یون کلر ( $Cl^{-}$ ) و یون بی-کربنات ( $HCO_3^{-}$ ) برای چاه‌های مشاهداتی دشت خوی می‌باشد که با مراجعه به شرکت آب منطقه‌ای استان آذربایجان غربی اخذ شد. کلیه ایستگاه‌هایی که در دوره آماری ۱۳۸۰ تا ۱۳۹۲ دارای داده کامل بودند انتخاب و کیفیت داده‌ها مورد بررسی

<sup>6</sup>-Thiessen

$$X_j^t = \frac{1}{p} \sum_{i=1}^p X_{ij}^t \quad (2)$$

ضمناً با کمینه کردن تابع هدف  $F$ ، فاصله بردارهای کیفی هر ایستگاه از مرکز خوشه‌ای که به آن تعلق دارد به دست آمده و مجموع فواصل مذکور کمینه می‌شود. طرح‌واره استفاده از روش K-Means به شرح زیر بود (Guldemir and Sengur, 2006):

در گام اول،  $K$  مرکز خوشه (که با  $Z_1, Z_2, \dots, Z_k$  نشان داده می‌شوند) از بین  $n$  ایستگاه واقع در مجموعه  $X_1, X_2, X_3, \dots, X_n$  به‌طور تصادفی انتخاب شد.  $K$  تعداد خوشه‌ها به‌طور سلیقه‌ای بین دو تا پنج در نظر گرفته شد. ابتدا  $K$  معادل دو فرض شد و هسته مرکزی هر خوشه به‌طور تصادفی مشخص شد. لازم به ذکر است که همه متغیرهای منتخب در ایستگاه‌ها قبلاً با توجه به میانگین و انحراف معیار آن‌ها استاندارد شدند. در گام دوم، بهاران هر  $i \neq p$  که در آن  $i = 1, 2, \dots, n$  و  $p = 1, 2, \dots, K$  است مقدار فاصله اقلیدسی  $X_i$  تا  $Z_j$  حساب شد. در صورتی که  $\|X_i - Z_j\|$  کمتر از  $\|X_i - Z_p\|$  می‌شد، نقطه (ایستگاه)  $X_i$  به خوشه  $C_j$  (که در آن  $j \in \{1, 2, \dots, k\}$  است) ملحق می‌شد. این کار برای یکایک  $X_i$  ها (در اینجا ایستگاه‌ها) تکرار شد. به عبارت دیگر، هر ایستگاه (با توجه به بردار داده‌های کیفیت آب) به خوشه‌ای ملحق می‌شد که مرکز خوشه با ایستگاه مذکور کمترین فاصله اقلیدسی را در مقایسه با سایر ایستگاه‌ها دارا بود. در گام سوم، پس از الحاق هر ایستگاه به خوشه‌ای معین، بار دیگر، مراکز خوشه جدید (به تعداد  $K$ ) به شرح زیر محاسبه شدند:

$$Z_i^{\text{new}} = \frac{1}{n_i} \sum_{x_j \in C_i} X_j \quad i=1,2 \quad (3)$$

که در آن  $n_i$  تعداد درایه‌های واقع در خوشه  $C_i$  است. به عبارتی، پس از تعلق هر ایستگاه به یکی از خوشه‌ها، برای آن خوشه یک مرکز جدید از رابطه ۳ محاسبه گردید. در گام چهارم، به ازای هر  $i$  (که در آن  $i$  متعلق به مجموعه  $\{1, 2, \dots, k\}$  است) مقدار فاصله اقلیدسی  $Z_i^{\text{new}}$  از  $Z_i$  محاسبه شد. اگر شرط  $\varepsilon$   $\|Z_i^{\text{new}} - Z_i\| <$  ارضا می‌شد، محاسبات خاتمه می‌یافت، در غیر این صورت، محاسبات از گام دوم ادامه می‌یافت. به عبارت دیگر، مراحل ۲ و ۳ تا جایی تکرار می‌شدند که دیگر هیچ تغییری در مراکز خوشه حاصل نمی‌شد. لازم به ذکر است که

داده‌های هر پارامتر در طی دوره آماری میانگین گرفته شد. به‌طور مشابه انحراف معیار هر کدام محاسبه شد و در نهایت میانگین هر پارامتر از مقدار داده هر سال کسر و حاصل به انحراف معیار تقسیم شد. این روال برای سایر پارامترهای همان ایستگاه تکرار شد و ضمناً در سایر ایستگاه‌ها نیز روال مشابه برای استانداردسازی داده‌ها به کار گرفته شد. جهت تشخیص تفاوت کیفیت آب در بین خوشه‌ها، میانگین پارامترهای منیزیم، کلسیم، EC و SAR برای هر خوشه محاسبه و در نمودار ستونی ارائه گردید.

### خوشه‌بندی K-Means

در این مطالعه، از روش خوشه‌بندی K-Means برای کلاس‌بندی کیفیت آب زیرزمینی دشت خوی استفاده شد. این روش از کاربردی‌ترین روش‌های خوشه‌بندی داده‌ها شناخته شده است که اولین بار توسط مک‌کویین ارائه شد. تعداد خوشه‌ها در این روش ثابت و از پیش تعیین شده است. روش خوشه‌بندی K-Means یکی از روش‌های سعی و خطا (تکراری) است که در آن تابع خطا که با  $F$  نشان داده می‌شود، برای هر گزینه دلخواه برای تعداد خوشه محاسبه شده و کمینه مقدار آن نشان‌دهنده گزینه بهینه است. برای تعیین مشابهت ایستگاه‌ها از مربع فاصله اقلیدسی استفاده شد. تابع خطای مذکور پس از اختصاص دادن  $m$  ایستگاه به  $K$  خوشه (تعداد خوشه‌ها در این روش دلخواه و کمتر از تعداد کل ایستگاه‌ها (یا  $m$ ) بوده که برای آن هر کدام از اعداد از دو تا پنج آزمایش شد) از رابطه زیر محاسبه شد (Guldemir and Sengur, 2006; Everitt et al., 2011):

$$F = \sum_{t=1}^k \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^p \|(X_{ij}^t - X_j^t)\| \quad (1)$$

که در آن نماد  $\|$  به معنی مربع فاصله اقلیدسی می‌باشد که در این مطالعه از آن برای تعیین مشابهت کیفیت آب چاه‌ها استفاده شد،  $p$  تعداد متغیرهای کیفی مورد استفاده در این مطالعه،  $m$  تعداد ایستگاه‌های موجود در خوشه  $t$  ام،  $K$  تعداد خوشه‌ها (در مطالعه حاضر از قبل عددی بین دو تا پنج انتخاب در نظر گرفته شد) و  $X_j^t$  میانگین  $p$  متغیر (استاندارد شده) برای خوشه  $t$  ام است که از رابطه زیر به دست آمد (Guldemir and Sengur, 2006; Everitt et al., 2011):

تعداد دو خوشه) تا ۴/۰۵ (برای پنج خوشه) تغییر می‌کند. همچنین مقدار واریانس بین خوشه‌ها از ۶/۷۲ (برای تعداد دو خوشه) تا ۹/۱۹ (برای تعداد پنج خوشه) تغییر می‌کند. در هر خوشه مجموع واریانس درون خوشه‌ای و بین خوشه‌ای ثابت و معادل ۱۳/۲۴ می‌باشد. به طوری که از جدول ۱ می‌توان استنباط کرد، با افزایش تعداد خوشه‌ها از یک تا چهار واریانس بین خوشه‌ای افزایش و درعین حال واریانس درون گروهی کاهش می‌یابد. این روند با تغییر تعداد خوشه از چهار به پنج معکوس می‌گردد. شکل ۳ نمودار تغییرات واریانس درون خوشه‌ای را به ازای تعداد خوشه‌ها (که حاصل از تجزیه خوشه-ای چاه‌های مشاهداتی منتخب در دشت خوی می‌باشد) نشان می‌دهد. به طوری که از این شکل می‌توان دریافت، در نظر گرفتن تعداد خوشه‌ها معادل با چهار، منجر به کاهش واریانس درون خوشه‌ای و درعین حال افزایش واریانس بین خوشه‌ای می‌شود. در نتیجه، در مطالعه حاضر بهینه تعداد خوشه‌ها در دشت خوی معادل چهار می‌باشد.

جدول ۲ نتیجه تجزیه واریانس را برای کلاس‌بندی بهینه (در این مطالعه تعداد کلاس‌ها معادل چهار) نشان می‌دهد. به طوری که از جدول مذکور می‌توان فهمید به ازای تعداد بهینه خوشه که معادل چهار بود، از صد در صد واریانس، حدود ۷۰/۴۵ درصد آن توسط واریانس بین خوشه‌ای و بقیه آن یعنی ۲۹/۵۵ درصد، توسط واریانس درون خوشه‌ای توجیه می‌شود. بدیهی است که هر چه واریانس درون خوشه‌ای کمتر باشد، نشان‌دهنده مناسب بودن خوشه‌بندی می‌باشد. در این حالت، واریانس بین خوشه‌ای نیز بیشتر خواهد بود.

در صورتی که فرایند مذکور در گام چهارم به پایان نمی‌رسید از شرط تعداد تکرار (اینجا معادل ۱۰۰) برای خاتمه فرایند استفاده می‌شد. پس از تخصیص همه ایستگاه‌ها در دو خوشه، مقدار تابع خطا محاسبه شد. مراحل فوق برای K معادل سه، چهار و پنج نیز تکرار شد.

نسبت جذب سدیم یا SAR، یک شاخص مهم برای نشان دادن قابلیت آبیاری آب در کشاورزی می‌باشد که از فرمول زیر به دست آمد (علیزاده، ۱۳۸۸).

$$SAR = \frac{Na^+}{\sqrt{\frac{1}{2}(Ca^{2+} + Mg^{2+})}} \quad (4)$$

هر چه مقدار کمیت SAR در آب بیشتر باشد، قابلیت آبیاری آن کمتر است. در این مطالعه، از این شاخص برای مشخص کردن موقعیت ایستگاه‌ها از نظر کیفیت آب در دیاگرام ویلکوکس استفاده شد. دیاگرام ویلکوکس بر اساس دو معیار خطر شوری (EC) و خطر قلیائیت (SAR) دارای ۱۶ رده متمایز بوده که هر کلاس آن با دو پارامتر S و C مشخص می‌گردد. آب‌های کلاس C1S1 بهترین و آب‌های کلاس C4S4 بدترین آب‌ها برای مصارف کشاورزی می‌باشد. محققین دیگر نیز برای تعیین کیفیت آب از نظر کشاورزی به طور گسترده از دیاگرام ویلکوکس استفاده کرده‌اند (دین‌پژوه و همکاران، ۱۳۹۴؛ عبادتی، ۱۳۹۴؛ صادقی و همکاران، ۱۳۹۵).

## نتایج و بحث

جدول ۱ نتایج تجزیه واریانس را برای تعداد خوشه‌های مختلف (دو تا پنج) نشان می‌دهد. به طوری که از جدول ۱ می‌توان دریافت، مقدار واریانس درون خوشه‌ای بین ۶/۵۱ (برای

جدول ۱- تجزیه واریانس حاصل از خوشه‌بندی ایستگاه‌های منتخب واقع در دشت خوی.

تعداد خوشه‌ها	۲	۳	۴	۵
واریانس درون خوشه‌ای	۶/۵۱۸۴	۴/۲۸۸۲	۳/۹۱۴۳	۴/۰۵۳۸
واریانس بین خوشه‌ای	۶/۷۲۹۸	۸/۹۶۰۰	۹/۳۳۳۹	۹/۱۹۴۴
واریانس کل	۱۳/۲۴۸۲	۱۳/۲۴۸۲	۱۳/۲۴۸۲	۱۳/۲۴۸۲

جدول ۲ - مقدار واریانس درون و بین خوشه‌ای برای بهینه تعداد خوشه‌ها (در این مطالعه چهار خوشه) در دشت خوی.

نوع واریانس	مقدار واریانس	درصد واریانس
درون خوشه‌ای	۳/۹۱۴۳	۲۹/۵۵
بین خوشه‌ای	۹/۳۳۳۹	۷۰/۴۵
کل	۱۳/۲۴۸۲	۱۰۰/۰۰

مقداری مثبت برای هسته مرکزی خوشه است، سایر پارامترها به طور تصادفی دارای عدد منفی هستند. لازم به اشاره است که چون داده‌ها استاندارد شده‌اند، اعداد منفی به منزله داشتن مقدار پارامتر کمتر از میانگین کل ایستگاه‌ها بوده و عدد مثبت نشان‌دهنده بیشتر بودن مقدار آن نسبت به میانگین کل ایستگاه‌ها است. در خوشه چهار نیز به جز pH آب که دارای مقداری مثبت برای هسته مرکزی است، سایر پارامترها به طور تصادفی دارای مقدار منفی هستند. پس از انجام عملیات تکراری سعی و خطا جابجایی ایستگاه‌ها بین خوشه‌ها به طور مکرر انجام شد. بنابراین، در حالت بهینه این مقادیر تغییر کرده و نتیجه نهایی برای میانگین هر خوشه در جدول ۴ ارائه شده است.

جدول ۳ مقدار عددی هسته مرکزی اولیه هر کلاس را برای یکایک متغیرهای کیفیت آب نشان می‌دهد. ارقام مندرج در جدول مذکور در واقع میانگین هر پارامتر کیفی واقع در خوشه معین است که در ابتدای فرایند تکراری روش K-Means با توجه به ایستگاه‌های اختصاص‌یافته به آن به دست آمده است. طبیعی است که در هر تکرار با توجه به تغییر مکان ایستگاه‌ها (ها) از یک خوشه به خوشه دیگر این ارقام نیز تغییر می‌کنند. به طوری که از جدول ۳ مشاهده می‌شود، مقادیر عددی هسته مرکزی خوشه یک دارای مقادیر مثبت برای پارامترهای pH، SAR، EC،  $HCO_3^-$ ،  $Cl^-$ ،  $SO_4^{2-}$ ،  $Mg^{2+}$ ،  $Na^+$ ، %Na، و TH بود. همچنین مقادیرهای هسته اولیه برای خوشه دو همه پارامترها (به جز کلسیم) منفی (کمتر از میانگین خوشه) هستند. در خوشه سه نیز به جز کربنات که دارای

جدول ۳- مقدار عددی هسته مرکزی اولیه برای متغیرهای مورد بررسی در هر یک از خوشه‌های چهارگانه در دشت خوی.

خوشه	TDS	TH	SAR	EC	$HCO_3^-$	$Cl^-$	$SO_4^{2-}$	$Mg^{2+}$	$Ca^{2+}$	$Na^+$	%Na	pH
۱	۰/۸۰۸	۰/۲۴۹	۰/۹۲۶	۰/۸۷۰	۰/۳۵۱	۰/۸۹۰	۰/۵۹۹	۰/۴۹۹	-۰/۴۰۳	۰/۹۴۴	۰/۷۴۹	۰/۶۹۴
۲	-۰/۴۳۶	-۰/۲۸۹	-۰/۲۸۰	-۰/۳۳۶	-۰/۰۷۹	-۰/۳۳۹	-۰/۴۱۳	-۰/۴۰۸	۰/۱۲۸	-۰/۳۰۴	-۰/۰۸۳	-۰/۶۶۳
۳	-۰/۳۶۵	-۰/۰۶۶	-۰/۳۸۸	-۰/۲۶۶	۰/۰۵۰	-۰/۳۸۴	-۰/۴۰۳	-۰/۰۵۰	-۰/۰۶۷	-۰/۴۰۲	-۰/۳۶۵	-۰/۱۱۱
۴	-۰/۰۹۷	-۰/۲۷۸	-۰/۰۳۱	-۰/۲۵۷	-۰/۲۵۰	-۰/۰۲۵	-۰/۱۵۹	-۰/۲۶۸	-۰/۱۲۵	-۰/۰۵۴	-۰/۰۴۷	۰/۰۴۲

جدول ۴ نیز مقدار عددی هسته مرکزی نهایی هر کلاس را در حالت استاندارد شده به همراه مجموع وزن‌ها و واریانس درون خوشه‌ای نشان می‌دهد. همان‌گونه که اشاره شد، اعداد مذکور استاندارد شده‌اند. بیشترین تعداد ایستگاه، در خوشه یک برابر ۱۴ بود. با این حال، واریانس مقادیر استاندارد شده ایستگاه‌های واقع در خوشه اول، برابر با ۱/۷۷ بوده که از مقدار نظیر سایر خوشه‌ها کمتر است. خوشه‌های دو و سه هر کدام دارای سه ایستگاه با واریانس‌های مختلف بودند. واریانس خوشه‌های شماره دو و سه به ترتیب، برابر با ۴/۳ و ۸/۷ بود. در خوشه شماره چهار تعداد شش ایستگاه قرار گرفته که واریانس مقادیر آنها برابر با ۷/۴ است. از نظر شوری خوشه چهار با دارا بودن عدد مثبت برابر با ۰/۱۰۲۲ در خصوص میانگین هسته از سایر خوشه‌ها شورتر است. برعکس خوشه یک که در بین خوشه‌ها،

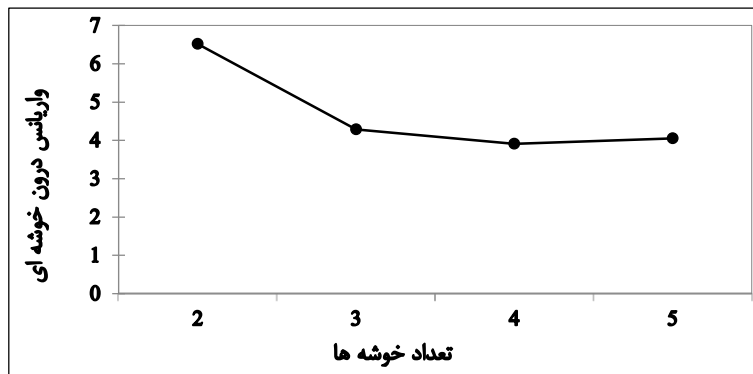
دارای حداکثر تعداد ایستگاه برابر با ۱۴ بود کمترین مقدار هدایت الکتریکی استاندارد شده معادل ۰/۶۱ را برای هسته مرکزی خود اختصاص داده است و بنابراین از نظر شوری کیفیت خوبی نسبت به سایر خوشه‌ها دارد. خوشه چهار در بین سایر خوشه‌ها از نظر EC نامطلوب‌تر تشخیص داده شد. ضمناً خوشه دو از نظر بی‌کربنات و سختی آب در وضعیت نامطلوب نسبت به سایر خوشه‌ها قرار دارد. از نظر نسبت جذب سدیمی خوشه سه با دارا بودن رقم ۲/۷۴ دارای آب نامطلوب می‌باشد. از نظر pH خوشه چهار دارای بیشترین pH، برابر ۱/۹۸، در مقایسه با دیگر خوشه‌ها بوده و در نتیجه قابلیت خوردگی بیشتر دارد که برای استفاده در صنعت توصیه نمی‌شود.



جدول ۴- مقدار عددی هسته مرکزی نهایی استاندارد شده برای متغیرهای مورد بررسی در هر یک از خوشه‌های چهارگانه در دشت خوی.

خوشه	TDS	TH	SAR	EC	$HCO_3^-$	$Cl^-$	$SO_4^{2-}$	$Mg^{2+}$	$Ca^{2+}$	$Na^+$	%Na	pH
۱	-۰/۷۱۷	-۰/۶۲۹	-۰/۴۰۵	-۰/۶۱۱	-۰/۵۲۸	-۰/۴۵۰	-۰/۴۷۳	-۰/۵۶۳	-۰/۳۷۶	-۰/۴۵۳	-۰/۳۵۶	۰/۰۳۰
۲	-۰/۰۸۵	۰/۹۰۷	-۰/۴۳۴	۰/۰۰۷	۱/۳۳۲	-۰/۵۳۵	-۰/۳۹۶	۰/۵۱۶	۱/۱۴۳	-۰/۴۱۷	-۰/۶۶۶	-۱/۹۸۲
۳	۲/۱۶۵	-۰/۲۹۵	۲/۷۴۰	-۰/۲۰۶	-۰/۱۱۱	۲/۵۳۵	۱/۶۵۰	-۰/۲۴۲	-۰/۲۲۶	۲/۶۹۷	۲/۳۵۱	۱/۱۵۱
۴	۰/۴۴۲	-۰/۶۷۳	-۰/۱۴۳	۰/۱۰۲	۰/۵۲۴	۰/۰۷۰	-۰/۰۳۲	۰/۸۷۶	-۰/۱۵۱	-۰/۰۷۳	۰/۰۰۶	۰/۵۱۴

شکل ۳ نیز نمودار تغییرات واریانس درون خوشه‌ای مقادیر متغیرهای ایستگاه‌ها را تابعی از تعداد خوشه‌ها نشان می‌دهد. به طوری که از شکل مشاهده می‌شود، با افزایش تعداد خوشه‌ها از دو به چهار، مقدار واریانس کاهش می‌یابد. با این حال، به ازای تعداد خوشه پنج، این افزایش نامحسوس و کم است؛ بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که به ازای تفکیک کل ایستگاه‌ها به چهار خوشه، مقدار واریانس کمینه بوده و در نتیجه برای آبخوان مورد مطالعه مناسب‌ترین مقدار تشخیص داده می‌شود.



شکل ۳ - تغییرات واریانس درون خوشه‌ای تابعی از تعداد خوشه‌ها، حاصل از تجزیه خوشه‌ای چاه‌های مشاهداتی دشت خوی.

جدول ۵ ماتریس فاصله اقلیدسی بین هسته مرکزی هر خوشه را از هسته‌های مرکزی خوشه‌های دیگر نشان می‌دهد. به طوری که از این جدول می‌توان دریافت، درایه‌های قطر اصلی ماتریس، یعنی فاصله هر خوشه از خودش، صفر می‌باشد. حداکثر فاصله معادل ۸/۸۳ بوده که مابین مرکز خوشه دو تا مرکز خوشه سه می‌باشد. مفهوم آن این است که بیشترین عدم تشابه در بین خوشه‌ها مربوط به دو خوشه مذکور بوده، هر چند در داخل هر خوشه، ایستگاه‌ها با همدیگر مشابهت نسبی بیشتر دارند. با توجه به جدول ۵ سایر فواصل از رقم ۸/۸۳ کوچک-ترند.

جدول ۵ - ماتریس فاصله اقلیدسی بین هسته مرکزی هر خوشه با مقدار نظیر خوشه‌های دیگر در دشت خوی.

شماره خوشه	۱	۲	۳	۴
۱	۰	۳/۸۹۸۲	۱/۶۹۰۴	۳/۰۷۵۴
۲	۳/۸۹۸۲	۰	۸/۸۳۵۱	۳/۲۰۴۵
۳	۱/۶۹۰۴	۸/۸۳۵۱	۰	۶/۹۹۳۳
۴	۳/۰۷۵۴	۳/۲۰۴۵	۶/۹۹۳۳	۰

جدول ۶ نتایج کلاس‌بندی ایستگاه‌ها از نظر کیفیت آب زیرزمینی را برای چهار خوشه متمایز در دشت خوی نشان می‌دهد. به طوری که از این جدول می‌توان دریافت، کلاس اول

گرفت که ایستگاه‌های واقع در خوشه سوم در مقایسه با ایستگاه‌های خوشه اول از مشابهت بیشتری برخوردار هستند. همچنین کمترین فاصله از مرکز خوشه از حداقل ۰/۴۶ (برای خوشه اول) تا حداکثر ۱/۴۴ (برای خوشه سوم) به دست آمده است. افزون بر این، میانگین فاصله ایستگاه‌های واقع در یک خوشه تا هسته همان خوشه از حداقل ۱/۲۲ (برای خوشه اول) تا حداکثر ۲/۳۰ (برای خوشه سوم) می‌باشد. به طور مشابه، بیشترین فاصله ایستگاه‌های واقع در یک خوشه تا مرکز همان خوشه از ۱/۹۶ (برای خوشه اول) تا ۴/۲۰ (برای خوشه چهارم) به دست آمد.

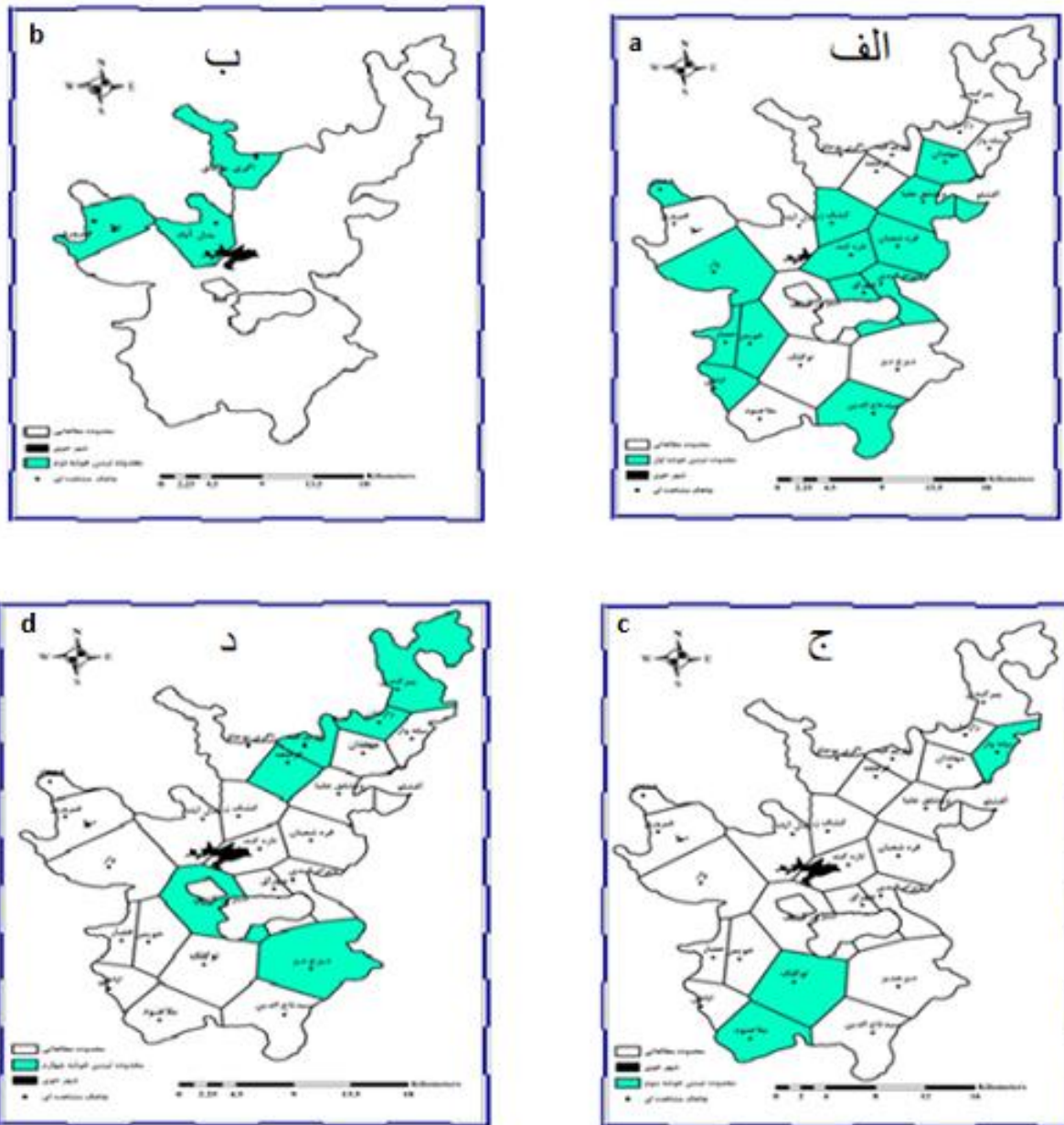
قره‌شعبان، قشلاق، کشک زر، مهلذان، وار، ویشلق‌علیا) می‌باشد. کلاس دوم شامل سه ایستگاه (اگری بوجاق، بدل آباد، فیروزق) می‌باشد. این ایستگاه‌ها در بخش شمال غرب دشت واقع هستند. کلاس سوم شامل سه ایستگاه (بیله وار، توکلک، ملاجنود) بوده که در قسمت شمال شرق و جنوب دشت خوی قرار دارند. کلاس چهارم نیز شامل شش ایستگاه (پیرکندی، دیزجدیز، زارعان، شیرین‌کندی، قزقلعه، یاریم‌قیه) می‌باشد. این ایستگاه‌ها در قسمت شمال شرق و شرق دشت خوی قرار دارند. به طوری که از جدول ۶ می‌توان استنباط کرد، واریانس درون خوشه‌ای از حداقل ۱/۷۶ برای خوشه اول تا حداکثر ۸/۶۶ برای خوشه سوم تغییر می‌کند؛ بنابراین، می‌توان نتیجه

جدول ۶- نتایج کلاس‌بندی برای چهار خوشه متمایز از نظر کیفیت آب زیرزمینی در دشت خوی.

شماره خوشه	۱	۲	۳	۴
تعداد ایستگاه‌ها	۱۴	۳	۳	۶
مجموع وزن‌ها	۱۴	۳	۳	۶
واریانس درون کلاسی	۱/۷۶۸۲	۴/۳۰۲۸	۸/۶۶۳۷	۷/۴۳۹۱
کمترین فاصله از مرکز	۰/۴۶۶۱	۱/۱۴۵۱	۱/۴۴۲۳	۱/۲۴۷۲
میانگین فاصله از مرکز	۱/۲۲۳۷	۱/۶۳۲۲	۲/۲۹۹۲	۲/۲۹۸۶
بیشترین فاصله از مرکز	۱/۹۶۹۱	۲/۲۳۴۷	۳/۱۵۶۲	۴/۲۰۲۸

بیشتر از خوشه یک است. به طوری که میانگین پارامتر TDS چاه‌های واقع در خوشه دو برابر با ۹۳۶ میلی‌گرم بر لیتر است و مقدار میانگین EC آب زیرزمینی چاه‌های واقع در این خوشه برابر با ۱۴۴۰ میکروموس بر سانتیمتر است. به طور مشابه، شکل‌های ۴-ج و ۴-د نقشه‌های موقعیت ایستگاه‌های مربوط به خوشه‌های سوم و چهارم را نشان می‌دهد. خوشه سوم در بخش کوچکی از شمال شرق و جنوب غرب دشت واقع است. خوشه چهارم در مرکز و جنوب شرق دشت جای گرفته است. بعد از خوشه‌های یک و دو خوشه چهارم از نظر غلظت کل مواد محلول جامد و EC در رتبه سوم قرار دارد در حالی که، خوشه سه در رتبه چهارم قرار می‌گیرد. در خوشه چهارم بیشترین مقدار میانگین پارامتر TDS (۱۲۴۱ میلی‌گرم بر لیتر) و EC (۱۵۲۷ میکروموس بر سانتیمتر) مشاهده شد. در حالی که، در خوشه سه این ارقام به ترتیب، برابر با ۲۲۳۶ میلی‌گرم بر لیتر و ۳۴۴۰ میکروموس بر سانتیمتر می‌باشد.

شکل‌های ۴ و ۵ نقشه‌های موقعیت ایستگاه‌های مربوط به خوشه‌های اول و دوم را که به روش K-Means در دشت خوی به دست آمده، نشان می‌دهد. همان‌گونه که از شکل ۴-الف برمی‌آید، بخش‌های شرقی و غربی دشت بعلاوه بخش کوچکی از جنوب دشت خوی در خوشه یک قرار دارند. مساحت این خوشه از سایر خوشه‌ها بیشتر است. در خوشه یک مقدار میانگین TDS و EC آب زیرزمینی چاه‌ها نسبت به سایر خوشه‌ها کمتر است. به طور اخص میانگین TDS چاه‌های واقع در خوشه یک برابر با ۸۷۹ میلی‌گرم بر لیتر است و مقدار میانگین EC آب زیرزمینی چاه‌های واقع در این خوشه برابر با ۵۷۱ میکروموس بر سانتیمتر است. با توجه به شکل ۴-ب بخش‌های شمال غربی دشت خوی در خوشه دوم قرار دارند. در این خوشه سه ایستگاه وجود دارند و مجموع مساحت این خوشه در مقایسه با مقدار نظیر خوشه یک کمتر است. مقدار میانگین TDS و EC آب زیرزمینی چاه‌های خوشه دو کمی



شکل ۴- موقعیت ایستگاه‌های حاصل از خوشه‌بندی به روش K-Means (الف خوشه یک، ب خوشه دو، ج خوشه سه، د خوشه چهار).

و معادل با ۱۲۳ است این نشان می‌دهد که اختلاف میانگین مقادیر SAR در بین خوشه‌ها بیشتر از سایر مقدار نظیر برای سایر پارامترهای هیدروژئوشیمیایی است. بعد از SAR بیشترین مقدار F متعلق به  $Na^+$  و TDS است که مقادیر F نظیر آن‌ها به ترتیب برابر با ۱۰۹ و ۵۰ بود.

جدول ۷ نتیجه تجزیه واریانس مقادیر متغیرها را در خصوص خوشه‌بندی ایستگاه‌ها با روش K-Means نشان می‌دهد. به طوری که از این جدول می‌توان استنباط کرد، همه خوشه‌ها با همدیگر از نظر هر یک از متغیرهای کیفی دارای p-value کمتر از ۰/۰۱ هستند. بیشترین آماره F متعلق به متغیر SAR

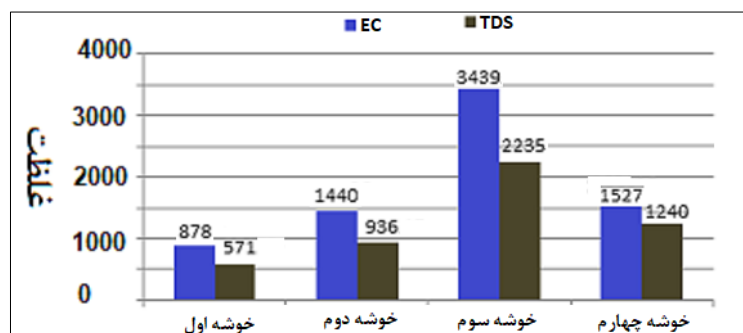
جدول ۷- نتیجه واریانس در خصوص میانگین متغیرهای کیفی آب زیرزمینی خوشه‌های حاصل از روش K-Means در دشت خوی.

Pr>F	F آماره‌ی	میانگین مربعات خطا	درجه آزادی خطا	میانگین مربعات مدل	درجه آزادی	مشاهدات
<۰/۰۰۰۱	۵۰/۴۷۸۵	۰/۱۴۷۹	۲۲	۷/۴۶۷۹	۳	TDS
۰/۰۰۰۳	۹/۵۰۱۸	۰/۳۷۳۸	۲۲	۳/۵۵۱۶	۳	TH
<۰/۰۰۰۱	۱۳۲/۶۳۸۱	۰/۰۶۴۱	۲۲	۸/۵۰۲۶	۳	SAR
<۰/۰۰۰۱	۲۵/۷۰۸۹	۰/۲۵۷۱	۲۲	۶/۶۰۸۹	۳	EC
۰/۰۰۷۴	۵/۱۶۹۰	۰/۷۰۲۴	۲۲	۳/۶۳۰۶	۳	HCO <sup>3-</sup>
<۰/۰۰۰۱	۴۲/۱۷۱۱	۰/۱۸۱۷	۲۲	۷/۶۶۴۲	۳	Cl <sup>-</sup>
<۰/۰۰۰۱	۱۲/۶۱۱۲	۰/۳۰۱۶	۲۲	۳/۸۰۳۸	۳	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>
۰/۰۰۹۴	۴/۸۸۷۹	۰/۶۷۳۹	۲۲	۳/۲۹۳۹	۳	Mg <sup>2+</sup>
۰/۰۰۱۶	۷/۱۱۸۶	۰/۲۶۸۸	۲۲	۱/۹۱۳۳	۳	Ca <sup>2+</sup>
<۰/۰۰۰۱	۱۰۹/۰۶۲۱	۰/۰۷۷۲	۲۲	۸/۴۱۴۶	۳	Na <sup>+</sup>
<۰/۰۰۰۱	۱۹/۷۷۶۸	۰/۳۳۱۷	۲۲	۶/۵۶۰۹	۳	%Na
<۰/۰۰۰۱	۴۵/۷۱۴۹	۰/۱۵۷۳	۲۲	۷/۱۹۱۸	۳	مجموع آنیون‌ها
<۰/۰۰۰۱	۴۹/۵۳۴۱	۰/۴۷۸	۲۲	۷/۳۲۰۲	۳	مجموع کاتیون‌ها
<۰/۰۰۰۱	۲۵/۲۰۷۶	۰/۲۲۹۰	۲۲	۵/۷۷۲۶	۳	pH

توجه: نماد DF به‌منزله درجه آزادی است.

میزان کل مواد جامد محلول در آب که گاهی به آن باقیمانده خشک نیز اطلاق می‌شود، به میزان املاح باقیمانده، به جز رسوبات معلق، کلوئیدها و گازهای محلول، در نمونه بعد از تبخیر کامل آب بستگی دارد. وجود املاح و افزایش آن در آب به میزان باقیمانده خشک می‌افزاید. با توجه به شکل، بیشترین میزان TDS در خوشه سوم، میانگین معادل ۲۲۳۶ و کمترین آن در خوشه اول، معادل ۵۷۱ می‌باشد. نتایج این مطالعه با یافته‌های جلالی و اصغری مقدم (۱۳۹۲) همخوانی دارد. با توجه به گزارش جلالی و اصغری مقدم (۱۳۹۲) بخش‌های غربی دشت دارای شوری کم، حدود ۷۰۰ هستند و بخش‌های شمال شرقی از شوری بسیار زیاد، حدود ۵۰۰۰ برخوردار است. نقشه هم‌رقوم برای شوری آب زیرزمینی در شکل ۶ گزارش مذکور نشان داده شده است.

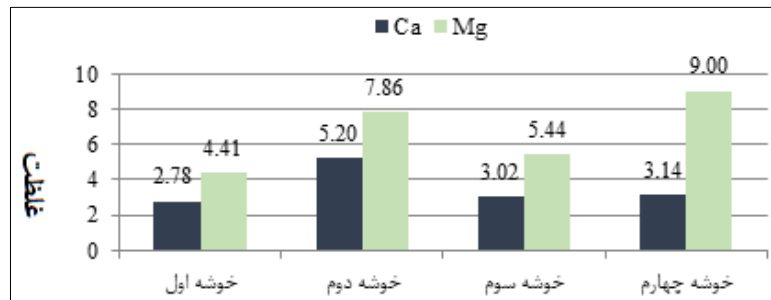
شکل ۵ هیستوگرام مربوط به پارامترهای EC و TDS موجود در آب زیرزمینی آبخوان دشت خوی را به تفکیک چهار خوشه متمایز نشان می‌دهد. کاملاً واضح است که آب زیرزمینی (و سطحی) به‌طور طبیعی کم‌بیش حاوی مقداری املاح می‌باشد. هرچه مقدار کاتیون‌ها و آنیون‌های موجود در آب بیشتر باشد، میزان هدایت الکتریکی آن بیشتر و به‌تبع آن کیفیت آب نامطلوب‌تر می‌گردد. بر اساس شکل ۸ حداقل میزان هدایت الکتریکی در خوشه اول معادل ۸۷۹ بود این خوشه شامل چاه‌های مشاهداتی اباطی، آقشلو، بایرام‌کندی، تازه‌کند، چهراق، حصار، خویمن، سیدتاج‌الدین، قره‌شعبان، قشلاق، کشک‌زر، مهلذان، وار و ویشلق علیا است. برعکس، حداکثر میزان آن در خوشه سوم معادل ۳۴۴۰ بود که شامل سه ایستگاه بیل‌هوار، توکلک و ملاجنود می‌باشد. بر طبق شکل مذکور، میانگین TDS مشابه با EC از خوشه‌ای به خوشه دیگر متفاوت است.



شکل ۵ - میانگین پارامترهای EC و TDS آب زیرزمینی ایستگاه‌ها در چهار خوشه متمایز واقع در دشت خوی.

شکل ۶ میانگین مقادیر عناصر کلسیم و منیزیم را در هر یک از خوشه‌های چهارگانه در دشت خوی نشان می‌دهد. با توجه به شکل می‌توان نتیجه گرفت که حداکثر مقدار میانگین غلظت کلسیم در بین خوشه‌ها متعلق به خوشه دوم، معادل ۴/۴۱ است که شامل سه ایستگاه اگری بوجاق، بدل آباد و فیرورق است و برعکس، حداقل آن در خوشه اول، معادل ۲/۷۸ می‌باشد (شامل ایستگاه‌های اباطی، آقشلو، بایرام‌کندی، تازه-کند، چهراق، حصار، خویمن، سیدتاج‌الدین، قره‌شعبان، قشلاق،

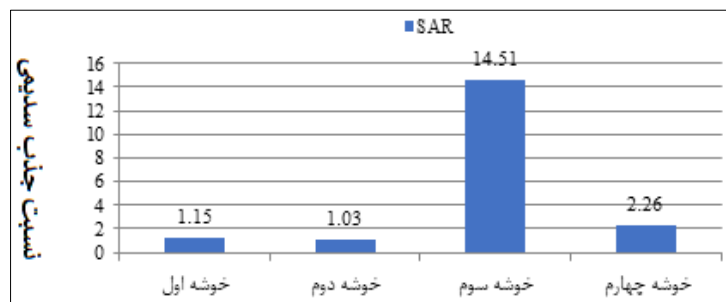
کشکزر، مهلذان، وار و ویشلق‌علیا). منیزیم به مقدار قابل‌ملاحظه‌ای در اکثر آب‌ها وجود داشته و رفتار آن در آب یا خاک مشابه کلسیم است بیشترین مقدار منیزیم با توجه به شکل، معادل ۹ در خوشه چهارم (پیرکندی، دیزجدیز، زارعان، شیرین‌کندی، قزقلعه و یاریم‌قیه) بوده و کمترین آن در خوشه اول معادل ۲/۷۸ است.



شکل ۶- هیستوگرام مربوط به غلظت یون‌های Ca و Mg در چهار خوشه متمایز واقع در دشت خوی.

و بیله‌وار دارای کیفیت آب بسیار نامطلوب بوده، زیرا هم EC و هم SAR آن در مقایسه با سایر خوشه‌ها بسیار زیاد است. برعکس، خوشه اول شامل چهارده ایستگاه (تازه‌کند، سیدتاج-الدین، خویمن، بایرام‌کندی، ویشلق‌علیا، اباطی، چهراق، حصار، کشکزر، آقشلو، مهلذان، قشلاق، وار و قره‌شعبان) دارای آب زیرزمینی با کیفیت مطلوب است زیرا هم EC کمتری دارد و هم SAR آن نسبت به سه خوشه دیگر در حد پایین‌تری قرار دارد.

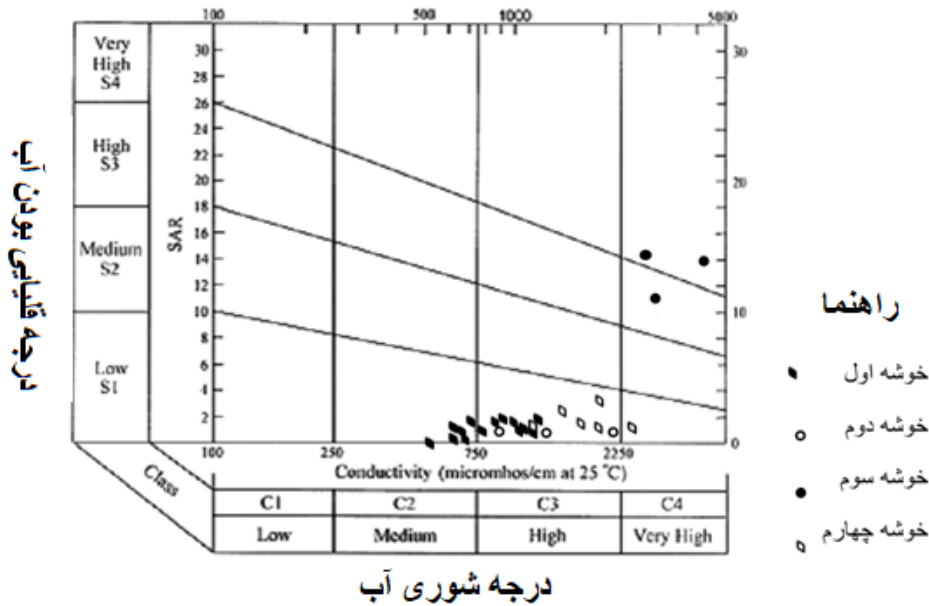
شکل ۷ میانگین مقادیر SAR را در هر یک از خوشه‌های چهارگانه دشت خوی نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۱۰ مقدار SAR در خوشه سوم (بیله‌وار، توکلک و ملاجنود) حداکثر و در خوشه دوم (اگری بوجاق، بدل آباد و فیرورق) حداقل می‌باشد. طوری که مقدار SAR در سه خوشه اول، دوم و چهارم تقریباً مشابه بوده ولی در خوشه سوم مقدار آن به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای بیشتر از سه خوشه دیگر است. در حالت کلی، می‌توان نتیجه‌گیری کرد که خوشه سوم شامل سه ایستگاه ملاجنود، توکلک



شکل ۷- هیستوگرام مربوط به SAR در چهار خوشه متمایز در دشت خوی.

شکل ۸ نمودار ویلکوکس و موقعیت ایستگاه‌های منتخب را نشان می‌دهد. در این شکل ۲۴ نقطه دیده می‌شود که با چهار علامت نشان داده شده‌اند و هر علامت نشان‌دهنده یکی از خوشه‌ها است. می‌توان دید که کیفیت آب بیشتر ایستگاه‌ها در

رده‌های C2-S1 و C3-S1 قرار دارد که در محدوده خطر شوری متوسط ولی با خطر قلیائیت پایین می‌باشد و از نظر مصارف کشاورزی مناسب می‌باشد.



شکل ۸- موقعیت ایستگاه‌های منتخب از نظر نمونه آب‌های زیرزمینی در دیاگرام ویلکوکس (سال ۱۳۹۲).

بوده است. در این تحقیق، از پانزده پارامتر کیفی آب زیرزمینی برای ۲۴ ایستگاه در دوره آماری ۱۳۸۰ تا ۱۳۹۲ در دشت خوی استفاده شد. برای خوشه‌بندی ایستگاه‌ها و ارزیابی کیفی آب زیرزمینی آن‌ها از روش K-Means استفاده شده است. از نرم‌افزار Arc-GIS برای پلیگون‌بندی تیسین ایستگاه‌ها و اندازه‌گیری مساحت پلیگون‌ها بهره گرفته شد. نتایج جاکمی از آن است که چهار نوع آب با کیفیت‌های متفاوت در چاه‌های دشت وجود دارد. بیش از نیمی از چاه‌های دشت از کیفیت مطلوبی برخوردار است؛ زیرا بیشترین تعداد ایستگاه‌ها در خوشه اول- که وسعت این ناحیه معادل ۲۱۴/۳ کیلومترمربع (۵۱/۱۴ درصد مساحت کل دشت) بود- قرار داشتند. با توجه به پایین بودن نسبی مقدار پارامترهای EC، SAR و TDS در این خوشه از یک سو و با توجه به نمودار ویلکوکس از طرف دیگر، مطلوب بودن کیفیت آب زیرزمینی را در خوشه اول نشان داد؛ بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که در حال حاضر، بیش از نیمی از دشت خوی دارای آب زیرزمینی با کیفیت مطلوب است که هم برای کشاورزی و هم برای شرب مناسب است. بخش‌های غربی و شرقی و چند نقطه پراکنده دارای آب با کیفیت مطلوب تشخیص داده شد (شکل ۴-الف). مقادیر EC، TDS، غلظت یون‌های Ca و Mg در خوشه یک از همه خوشه‌های دیگر کمتر بود. از سویی، مقادیر EC، TDS، در خوشه سوم که حاوی سه ایستگاه واقع در بخش‌های شمال شرق و جنوب دشت هستند،

درحالی‌که بیش از ۵۰ درصد مساحت آبخوان دشت خوی دارای کیفیت آب مطلوب برای کشاورزی می‌باشد این رقم برای دشت شبستر- صوفیان حدود ۳۷ درصد گزارش شده است (دین‌پژوه و همکاران، ۱۳۹۴)؛ بنابراین، وضعیت فعلی آب زیرزمینی دشت خوی از نظر کیفیت آب مطلوب است. با این حال معلوم شده است که از نظر کمی سطح آب زیرزمینی در این دشت بسیار پایین رفته و حتی برخی چاه‌های بهره‌برداری به‌طور کامل خشک شده‌اند (حاجی‌حسینلو، ۱۳۹۷). متوسط افت تراز آب چاه‌های دشت خوی در هر سال حدود ۴۲ سانتیمتر گزارش شده، طوری‌که شواهد میدانی حاکی از نشست خاک در فرم‌های فروچاله و شکاف در بخش‌های مختلف دشت خوی است (حاجی‌حسینلو، ۱۳۹۷).

### نتیجه‌گیری

بررسی کیفیت آب زیرزمینی در نقاط مختلف دشت خوی، از نظر غلظت ۱۵ پارامتر کیفی، موضوع مورد بحث این مطالعه بود. هدف مطالعه تفکیک چاه‌های مطالعاتی دشت خوی به خوشه‌های متمایز از نظر کیفیت آب بود. از اطلاعات ثبت شده برای تعداد ۲۴ ایستگاه چاه مشاهداتی واقع در نقاط مختلف دشت استفاده شد. نتایج معلوم نمود که کیفیت آب دشت در نقاط مختلف آن یکسان نیست. افزون بر این، در هر نقطه کیفیت آب در طول سال‌های گذشته دستخوش تغییراتی

قدر، ح، محمدیاری، ف، ۱۳۹۳. استفاده از روش آماری تحلیل خوشه‌ای جهت ارزیابی کیفی آب زیرزمینی دشت مهران و دهلران. اولین کنفرانس بین‌المللی یافته‌های نوین در علوم کشاورزی، منابع طبیعی و محیط‌زیست. ۲۵ اسفند، تهران.

حاجی حسینلو، ح، ۱۳۹۷. بررسی افت سطح آب‌های زیرزمینی با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی (مطالعه موردی: دشت خوی). جغرافیا و مخاطرات محیطی، ۷۳: ۲۶-۵۳.

جانی، ر، ۱۳۹۸. مدل‌سازی خوشه‌ای تراز آب زیرزمینی دشت تبریز با استفاده از مدل آریمما. نشریه هیدروژئولوژی، ۴(۲): ۷۴-۹۱.

جلالی، ل، اصغری مقدم، ا، ۱۳۹۲. تشخیص وضعیت هیدروژئوشیمیایی و روند شوری در سفره آب زیرزمینی دشت خوی به روش‌های آماری و هیدروشیمیایی. محیط‌شناسی، ۳۹(۲): ۱۱۳-۱۲۲.

جوادی، س، هاشمی، م، و سوخته‌زاری، م، ۱۳۹۷. تحلیل چند پارامتری آلودگی آبخوان قزوین بر مبنای نقشه کاربری اراضی و با استفاده از تکنیک خوشه‌بندی K-means. اکوهیدرولوژی، ۵(۲): ۳۰۵-۲۹۳.

دانشور وثوقی، ف، دین‌پژوه، ی، ۱۳۹۱. بررسی روند تغییرات کیفیت آب زیرزمینی دشت اردبیل با استفاده از روش اسپیرمن. محیط‌شناسی، ۳۸(۴): ۱۷-۲۸.

دانشور وثوقی، ف، دین‌پژوه، ی، علمی، م، ت، ۱۳۹۰. تأثیر خشکسالی بر تراز آب زیرزمینی در دو دهه اخیر (مطالعه موردی: دشت اردبیل). دانش آب‌و خاک، ۲۱(۴): ۱۷۹-۱۶۵.

دین‌پژوه، ی، فاخری-فرد، ا، حسنپور اقدم، م، ع، بهشتی-وایقان، و، ۱۳۹۴. تحلیل روند تغییرات کیفیت آب زیرزمینی در دشت شبستر- صوفیان. علوم و مهندسی آبیاری، ۳۸(۱): ۵۵-۶۹.

سامانی، س، کلاتتری، ن، رحیمی، م، ۱۳۹۰. استفاده از روش آماری تحلیل خوشه‌ای جهت ارزیابی کیفی آب

نسبت به سایر خوشه‌ها از وضعیت بدتری برخوردار بودند. ضمن اینکه مقدار پارامتر SAR این نواحی کمتر از خوشه‌های دیگر بوده است. از نظر SAR، نیز خوشه سوم با داشتن سه ایستگاه واقع در شمال شرق و جنوب دشت خوی، نسبت به سایر خوشه‌ها نامطلوب تشخیص داده شد. برای اینکه شرایط فعلی آب زیرزمینی، از نظر کیفیت آب، پابرجا بماند، لازم است نسبت به تصفیه و دفع اصولی فاضلاب شهری خوی که در مرکز دشت واقع شده، اقدام گردد. به‌ویژه دفع صحیح فاضلاب بیمارستان‌ها، درمانگاه‌ها و آزمایشگاه‌ها که میکروب‌های خطرناک فراوانی با خود همراه دارند، ضروری است که در این مورد باید اهتمام جدی و سریع به‌عمل آید، زیرا هرگونه اهمال-کاری در این امر، می‌تواند آبخوان دشت را به‌شدت آلوده کرده و سلامتی مردم منطقه و به‌ویژه کشاورزان و روستاییان را به خطر اندازد. از طرفی، نفوذ زه آب کشاورزی که هم حاوی سموم حشره‌کش بوده و هم حاوی کودهای شیمیایی محلول در آب است، می‌تواند منشأ خطر جدی دیگر برای آلودگی آب دشت محسوب شود. توصیه می‌شود در شورای شهر خوی همواره یک نفر متخصص آب و آشنا با قضیه حضور داشته باشند. هرگونه توسعه کارخانه‌ها در منطقه بدون لحاظ کردن جنبه‌های زیست‌محیطی پرهیز شود. قوانین مربوط به مدیریت آب دشت لازم است به‌طور مستمر با توجه به شرایط جمعیتی و محیطی توسط متخصصین منابع آب منطقه و نظر کشاورزان به‌نگام شود. مشارکت دادن کشاورزان، روستائیان و مردم محلی در این امر مهم ضروری به‌نظر می‌رسد.

## سپاسگزاری

بدین‌وسیله از شرکت آب منطقه‌ای استان آذربایجان غربی که داده‌های موردنیاز این مطالعه را در اختیار قرار دادند، قدردانی می‌شود. از مدیر مجله و داوران محترم که با صرف وقت ارزشمند خود و ارائه نکات سازنده در ارتقای کیفی این مقاله نقش ایفا نمودند، صمیمانه سپاسگزاری می‌شود. از همکاری خانم فاطمه چنپا تشکر می‌شود.

## منابع

اصغری مقدم، ا، جلالی، ل، ۱۳۹۳. بررسی آنومالی آرسنیک و منشأ احتمالی آن در آب زیرزمینی دشت خوی. زمین-شناسی مهندسی و محیط‌زیست، ۲۴(۹۴): ۱۴۷-۱۵۴.

- clustering techniques. *Journal of Hydrology*, 511: 279-289.
- Bu, H., Tan, X., Li, S., Zhang, Q., 2010. Water quality assessment of the Jinshui River (China) using multivariate statistical techniques. *Environmental Earth Sciences*, 60: 1631-1639.
- Carvalho, M.J., Melo-Goncalves, P., Teixeira, J.C., Rocha, A., 2016. Regionalization of Europe based on a K-Means Cluster Analysis of the climate change of temperatures and precipitation. *Physics and Chemistry of the Earth*, 94: 22-28.
- Celestino, A.E., Cruz, D.A., Sanchez, E.M., Reyes, F.G., Soto, D.V., 2018. Groundwater Quality Assessment: An Improved Approach to K-Means Clustering, Principal Component Analysis and Spatial Analysis: A Case Study. *Water*, 10(4): 437-457.
- Chapagain, S.K., Pandey, V.P., Shrestha, S., Nakamura, T. Kazama, F., 2010. Assessment of deep groundwater quality in Kathmandu valley using multivariate statistical techniques. *Water, Air, and Soil Pollution*, 210(1-4): 277-288.
- Everitt, B.S., Landau, S., Leese, M., Stahl, D., 2011. *Cluster Analysis*. Fifth Edition, John Wiley and Sons, 348 p.
- Guldemir, H., Sengur, A., 2006. Comparison of clustering algorithm for analog modulation classification. *Department of Electronic and Computer Science, Education Faculty, Firat University*, 30: 642-649.
- Kim, J.H., Kim, R.H., Lee, J., Cheong, T.J., Yum, B.W., Chang, H.W., 2004. Multivariate statistical analysis to identify the major factors governing groundwater quality in the coastal area of Kimje, South Korea. *Hydrological Processes*, 19(6): 1261-1276.
- Liu, C.W., Lin, K.H., Kuo, Y.M., 2003. Application of factor analysis in the assessment of groundwater quality in a Blackfoot disease area in Taiwan. *Science of the Total Environment*, 313 (1-3): 77-89.
- Naranjo-Fernandez, N., Guardiola-Albert, C., Aguilera, H., Serrano-Hidalgo, C., Montero-Gonzalez, E., 2020. Clustering groundwater level time series of the exploited Almonte-Marismas aquifer in southwest Spain. *Water (MDPI)*, 12:1-20.
- Spanos, T., Eye, A., 2015. Assessment of groundwater quality and hydrogeological profile of Kavala area, Northern Greece. *Romanian Journal of Physics*, 60(7-8): 1139-1150.
- Srivastava, S.K., Ramanathan, A.L., 2008. Geochemical assessment of groundwater quality in vicinity of Bhalswa landfill, Delhi, India, using graphical and multivariate statistical methods. *Environmental Geology*, 53(7): 1509-1528.
- زیرزمینی دشت اوان. فصلنامه مهندسی منابع آب، سال چهارم، ۱۱: ۷۵-۸۰.
- صادقی، ه.، آلبوعلی، ع.، قضاوی، ر.، ۱۳۹۵. بررسی روند زمانی و مکانی تغییر پارامترهای کیفی آب دشت کاشان با استفاده از روش‌های زمین‌آمار. نشریه علوم آب‌و‌خاک (علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی)، سال ۲۰، ۷۶: ۷۳-۸۳.
- عبادتی، ن.، ۱۳۹۴. بررسی روند تغییرات کیفی منابع آب زیرزمینی دشت ایوانکی. *مجله اکوهیدرولوژی*، ۴(۲): ۳۸۳-۳۹۴.
- علیزاده، ا.، ۱۳۸۸. اصول هیدرولوژی کاربردی، انتشارات دانشگاه آستان قدس رضوی.
- فخری، س.، اصغری مقدم، ا.، شکری، س. و نجیب، م.، ۱۳۹۲. ارزیابی عوامل مؤثر بر کیفیت آب زیرزمینی در دشت مرند. اولین همایش زمین‌شناسی کاربردی ایران. ۵ شهریور. دانشگاه دامغان، دامغان.
- کامجو، ح.، ریاضی، م.، خدایی، م.، مداد، ا.، ۱۳۸۹. آنالیز آماری چندمتغیره پارامترهای هیدروشیمیایی آبخوان دشت سمنان. همایش ملی آب با رویکرد آب پاک. ۱۱ اسفند، دانشگاه صنعت آب و برق (شهید عباسپور). تهران.
- کلاهدوزان، ع.، دین‌پژوه، ی.، عباسپور، د.، قربانیان، م.، ۱۳۹۴. بررسی روند تغییرات کیفیت آب زیرزمینی دشت میان‌دوآب با استفاده از روش مان-کندال. دانش آب‌و‌خاک، ۲۵(۲): ۲۳۵-۲۲۱.
- ندیری، ع.، صدقی، ز.، ۱۳۹۸. ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان‌های چندگانه با استفاده از روش‌های DRASTIC، SINTACS. نشریه هیدروژئولوژی، ۴(۲): ۱۷۱-۱۸۶.
- نگهبان‌خواجه، ف.، دین‌پژوه، ی.، ۱۳۹۸. تحلیل روند تغییرات تراز آب زیرزمینی با استفاده از روش ناپارامتری من-کندال (مطالعه موردی: دشت تبریز). *علوم آب‌و‌خاک*، ۲۳(۲): ۳۴۸-۳۳۵.
- Ay, M., Kisi, O., 2014. Modelling of chemical oxygen demand by using ANNs, ANFIS and k-means



- Todd, D.K., Mays, L.W., 2015. Groundwater Hydrology. Third edition. John Wiley Publication.
- Wu, C., Feng, C., Wu, X., Zhu, G., Zhang, Y., 2021. Hydrogeochemical characterization and quality assessment of groundwater using self-organizing maps in the Hangjinqi gasfield area, Ordos Basin, NW China. *Geoscience Frontiers*, 12(2): 781-790.