

ارزیابی کیفی آب‌های زیرزمینی استان مازندران با استفاده شاخص WQI و خوشه‌بندی فازی

بهاره نظری^۱، ام‌البنی محمدرضاپور^{۲*}، پرویز حقیقت‌جو^۳، محمدجواد زینلی^۴

۱- فارغ‌التحصیل کارشناسی ارشد، رشته مهندسی طراحی سازه‌های آبی، گروه مهندسی آب، دانشکده آب و خاک، دانشگاه زابل، زابل، ایران.

۲- دانشیار، گروه مهندسی آب، دانشکده آب و خاک، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران.

۳- دانشیار، گروه مهندسی آب، دانشکده آب و خاک، دانشگاه زابل، زابل، ایران.

۴- استادیار، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، تربیت مدرس، ایران.

*نویسنده مسئول: Mohammadrezapour@gu.ac.ir

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۵/۰۳/۲۰

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۱/۰۲/۳۰

چکیده

به دلیل کمبود بارندگی در مناطق خشک و نیمه‌خشک همچون کشور ایران و در نتیجه محدود بودن منابع آب‌های سطحی در این مناطق، مصرف آب در بخش کشاورزی، صنعت و شرب بشدت به آب زیرزمینی متکی است. لذا مدیریت و ارزیابی کیفیت این منابع بیش از پیش اهمیت پیدا می‌کند. هدف از این تحقیق بررسی قابلیت مدل‌های FCM بر روی شاخص‌های کیفی جهت خوشه‌بندی و شناسایی مناطق همگن از لحاظ کیفیت آب زیرزمینی استان مازندران است. در این تحقیق از داده‌های اندازه‌گیری شده ۱۴ پارامتر کیفی آب با نمونه‌گیری از چاه‌های عمیق و نیمه عمیق در سال‌های ۱۳۹۰ و ۱۳۹۵ در دو دوره کم‌آبی و دوره پرآبی استفاده شده است. بنابراین ماتریسی که شامل تعداد چاه‌ها و پارامترهای کیفیت مورد ارزیابی می‌باشد به‌عنوان ورودی به الگوریتم تحلیل خوشه‌ای FCM معرفی می‌شود. همچنین برای بهینه‌سازی تعداد خوشه‌ها از الگوریتم چند جهانی MVO استفاده می‌شود. در نهایت برای ارزیابی کیفیت آب مناطق همگن‌بندی شده از لحاظ شرب از شاخص WQI و برای کشاورزی از نمودار ویلکاکس استفاده می‌شود. نتایج حاصل از الگوریتم FCM نشان می‌دهد که تعداد بهینه خوشه‌ها در دو دوره سال ۱۳۹۰-۱۳۹۱ به ترتیب ۱۲ و ۲ و همچنین ۶۴ درصد خوشه‌ها در دوره پرآبی و ۸۹ درصد در دوره کم‌آبی در محدوده عالی بوده است و در دو دوره پرآبی و کم‌آبی سال ۱۳۹۵-۱۳۹۶ به ترتیب ۲ و ۲ و همچنین صد درصد خوشه‌ها در دوره پرآبی در محدوده عالی و در دوره کم‌آبی ۲۱ درصد در محدوده عالی قرار دارد. همچنین مناطق نوشهر، نکا و بهشهر، بندرگز از نظر شرب در محدوده خیلی ضعیف بوده است. همچنین با توجه به پهنه‌بندی مناطق براساس دوره‌های کم‌آبی و پرآبی می‌توان نتیجه گرفت که کیفیت آب از نظر شرب در هر دو دوره سال ۱۳۹۵-۱۳۹۶ نسبت به ۱۳۹۰-۱۳۹۱ مناسب‌تر بوده است.

کلمات کلیدی: کیفیت آب زیرزمینی، خوشه‌بندی فازی، استان مازندران، الگوریتم C-means، الگوریتم MVO.

مقدمه

جمعیت و توسعه صنایع در جوامع بشری، انسان را نسبت به تأمین منابع آبی مورد نیاز سوق داده و تعیین مکان‌های مناسب استحصال آب نیز همواره یکی از مهم‌ترین چالش‌های مورد بحث در این امور بوده است (خاشعی سیوکی و همکاران، ۱۳۹۰). مطالعات بسیاری در خصوص ارزیابی، پیش‌بینی و پهنه‌بندی کیفیت آب‌های زیرزمینی صورت گرفته است. سرائی تبریزی و همکاران (۱۴۰۳) در تحقیقی با استفاده از روش فازی کیفیت آب زیرزمینی آبخوان هشتگرد را ارزیابی نمودند. سراوانی و همکاران (۱۴۰۲) در تحقیقی به پیش‌بینی

امروزه کاهش منابع آب شیرین به یک مسئله مهم در دنیا مبدل شده است (WHO, 2012). همین امر سبب اهمیت آب‌های زیرزمینی به‌ویژه برای مصارف مختلف چون خانگی، کشاورزی و صنعت در مناطق بیابانی و نیمه بیابانی شده است. تأمین امنیت آب از نظر کمی و کیفی برای رفع نیازهای انسان و اکوسیستم، یکی از مسائل مورد بحث در قرن ۲۱ است (Amangabara et al., 2012) و به‌طور بالقوه تحت تأثیر بسیاری از عوامل طبیعی و انسانی قرار می‌گیرد. افزایش

نداشت، براساس همین ایده‌دان در سال ۱۹۷۴ نسخه فازی الگوریتم را ارائه نمود. الگوریتم بارها مورد بازبینی قرار گرفتند تا در نهایت ارائه نهایی الگوریتم و نیز معرفی m به عنوان fuzzifier توسط بزدک صورت گرفت. مطالعاتی در این زمینه صورت گرفته است از قبیل نخعی و همکاران (۱۳۹۵) و Kang et al. (2015).

استان مازندران که در شمال کشور ایران می‌باشد با داشتن دشت‌های مستعد و وسیع و منابع آبی مناسب مانند رود تجن، رود چالوس و غیره یکی از مناطق اصلی کشاورزی کشور محسوب می‌گردد. بنابراین استفاده از کودها و سموم شیمیایی در این منطقه یک امر اجتناب ناپذیر می‌باشد. از آن‌جا که این کودها و سموم شیمیایی و همچنین فاضلاب‌های خانگی و صنعتی به آبخوان‌های زیرزمینی نفوذ می‌کنند در نتیجه کیفیت این آب‌ها در طول زمان و مکان دچار تغییرات می‌گردد. لذا بررسی و مطالعه کیفیت آب‌های زیرزمینی و شناسایی مناطق بحرانی به منظور حفظ و اصلاح کیفیت آن‌ها امری ضروری است. هدف از انجام این تحقیق شناسایی مناطق همگن از نظر کیفیت آب زیرزمینی استان مازندران با استفاده از روش الگوریتم خوشه‌بندی فازی و الگوریتم چندجهانی می‌باشد.

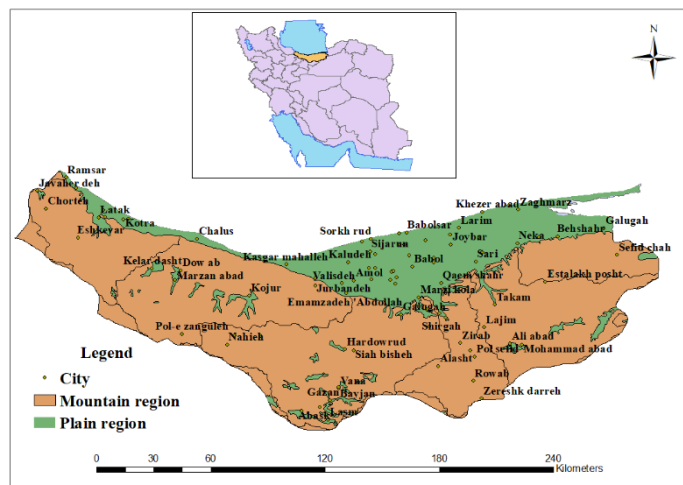
مواد و روش

منطقه مورد مطالعه

استان مازندران با مساحت ۲۳۷۵۶ کیلومترمربع بین طول شرقی ۵۰ درجه و ۳۱ دقیقه و ۵۴ درجه و ۸ دقیقه و عرض شمالی ۳۵ درجه و ۴۶ دقیقه و ۳۶ درجه و ۵۸ دقیقه در شمال ایران واقع شده است. حوضه‌ی مورد مطالعه دشت و جلگه‌ی استان مازندران است که از شمال به دریای خزر و از جنوب به رشته کوه البرز منتهی می‌گردد. موقعیت استان مازندران و شهرهای این استان در شکل ۱ نشان داده شده است (میرعمادی و همکاران، ۱۳۹۴). این چاه‌ها در محدوده شهرهای ساری، بابل، نکا، بهشهر، چالوس، رامسر، قائم شهر، جویبار، بندرگز، نوشهر، نور و آمل می‌باشند. مساحت تحت پوشش چاه‌های نمونه برداری در حدود ۶۰۰۰ کیلومترمربع می‌باشد (میرعمادی و همکاران، ۱۳۹۴). در این پژوهش ۱۴ پارامتر کیفی آب زیرزمینی محدوده‌ی مطالعاتی، شامل Ca، SAR، PH، Anion، HCO₃، Cl، TDS، EC، SO₄، TH، K، Mg، Cation، CO₃، NO₃ و Na در سال‌های آبی ۱۳۹۰ و ۱۳۹۵ در

پارامترهای کیفی آب‌های زیرزمینی استان گلستان با استفاده از مدل‌های هوش مصنوعی پرداختند. علیمردی و همکاران (۱۴۰۱) در تحقیقی با استفاده از روش‌های یادگیری ماشین و سیستم اطلاعات جغرافیایی به پیش‌بینی و پهنه‌بندی کیفیت آب زیرزمینی دشت زاهدان پرداختند. در این بین مطالعات زیادی در مورد شاخص کیفیت آب‌های زیرزمینی و طبقه‌بندی آن‌ها برای مصارف شرب و کشاورزی انجام شده است که می‌توان به مطالعات شمعیان و همکاران (۱۳۸۴)، جهان‌شاهی و همکاران (۱۳۹۲)، صمدی و همکاران (۱۳۹۳)، اصغری مقدم و همکاران (۱۳۹۴)، صالحی و حق‌ی زاده (۱۳۹۴) اشاره کرد. حسنی و همکاران (۱۳۹۰)، نصرآبادی و عباسی (۱۳۹۲)، مسعودی و همکاران (۱۳۹۴)، عسگری و همکاران (۱۳۹۴)، (parham et al., 2007) و (Alobaidy et al., 2010) اشاره کرد. امروزه با توجه به محدودیت آب‌های قابل مصرف برای آشامیدن و نیاز روز افزون بشر به منابع آبی، تجزیه و تحلیل کیفیت آب بسیار مهم است، شاخص کیفیت آب یکی از مؤثرترین ابزارها برای خلاصه کردن داده‌های فراوان کیفی آب به صورت یک شاخص و به تبع آن تعیین کیفیت آب‌های زیرزمینی و مناسب بودن آن برای اهداف آشامیدن است. اساس تئوری فازی برای نخستین بار توسط Zadeh (1965) معرفی شده است. این تئوری قادر به صورت‌بندی ریاضی بسیاری از مفاهیم و متغیرهای دقیق و مبهم هست و می‌تواند زمینه را برای تصمیم‌گیری در شرایط عدم اطمینان فراهم آورد. مدل‌های فازی عموماً در مسائلی که با عدم قطعیت ذاتی همراه هستند، مناسب می‌باشند (Nadiri et al. (2014). تحقیقاتی متعددی در مورد استفاده از مدل فازی در بررسی کیفیت آب‌های زیرزمینی صورت گرفته است که می‌توان به مواردی از قبیل کرد و همکاران (۱۳۹۳)، سامانی و همکاران (۱۳۹۰)، اعلمی و همکاران (۱۳۹۵)، خسروی و همکاران (۱۳۹۴)، Tutmez et al. (2005)، Guler et al. (2012)، Oorkavalan et al. (2016)، Sivasankar et al. (2013)، Caniani et al. (2015)، Poirjabbar et al. (2014) اشاره کرد. برای اولین بار نسخه الگوریتم Fuzzy C Means در سال ۱۹۷۳ توسط دودا و هارت ارائه شد که یک خوشه‌بندی دقیق انجام می‌داد. از آنجایی که برخی داده‌ها به خوشه‌های متعدد وابستگی داشتند، امکان قرار دادن آن‌ها در یک خوشه وجود

دو دوره‌ی کم‌آبی و دوره‌ی پربابی انتخاب و مورد بررسی قرار گرفتند.



شکل ۱- موقعیت استان مازندران و شهرهای این استان.

Figure 1- Location of observation wells in Mazandaran Province.

الگوریتم خوشه‌بندی فازی

الگوریتم خوشه‌بندی فازی^۱ (FCM) توسط دان و بزدک در سال ۱۹۷۴ مطرح گردیده و برای تحلیل فراوانی ناحیه‌ای به‌طور وسیع استفاده شده است. روش خوشه‌بندی فازی (FCM) نوع تغییر یافته‌ای از روش (K-Means) است که براساس منطق فازی شکل گرفته و در آن بحث تابع عضویت و تعلق یک نمونه به چند خوشه مطرح است. از معایب FCM می‌توان به ناتوانی در برخورد با داده‌ای که مقدار تعلقش به دو خوشه یکسان باشد، اشاره نمود. همچنین باید در ابتدا تعداد خوشه‌ها و مراکز خوشه‌ها توسط کاربر مشخص شوند. همچنین کیفیت این روش به تعداد اولیه خوشه‌ها و مکان اولیه مراکز خوشه‌ها وابسته است و اگر مسئله یک مقدار کمینه داشته باشد، در این صورت FCM خوب عمل می‌کند، ولی اگر چندین کمینه محلی داشته باشد، بسته به مراکز اولیه که تعیین می‌شود، به نزدیکترین کمینه همگرا شده و امکان گیرکردن در کمینه‌های محلی وجود دارد. بنابراین اگر جواب اولیه نزدیک کمینه سراسری باشد، به جواب مورد نظر همگرا خواهد شد (Bezdek, 1984). در این تحقیق از ترکیب الگوریتم چندجهانی و FCM به صورت تابع دو هدفه برای حل این مشکل استفاده شده است.

از مهم‌ترین فرضیاتی که در این روش وجود دارد این است که مجموع درجه عضویت هر نمونه در کل خوشه‌ها باید برابر یک باشد.

$$\sum_{i=1}^c u_{ik} = 1 \quad \forall k = 1, 2, \dots, n \quad (1)$$

که در آن (c) تعداد خوشه‌ها و (u_{ik}) درجه عضویت نمونه در خوشه k ام است.

با فرض برداشت (n) نمونه و اندازه‌گیری (m) عنصر برای آن‌ها، برای تقسیم نمونه‌ها به (c) خوشه با مرکز معلوم باید الگوریتم زیر رعایت شود (Bezdek et al., 1984):

۱- ابتدا برای هر نمونه نسبت به هر خوشه یک درجه عضویت تصادفی انتخاب شود.

۲- با استفاده از درجه عضویت اولیه و مختصات مرکز خوشه‌ها، لازم است مختصات مرکز جدید خوشه‌ها از رابطه ۲ محاسبه شود:

$$v_{ij} = \frac{\sum_{k=1}^n u_{ik}^q x_{kj}}{\sum_{k=1}^n u_{ik}^q} \quad (2)$$

که در آن، v_{ij} مقدار متغیر k ام از مرکز خوشه i ام، u_{ik} درجه عضویت نمونه k ام به خوشه i ام، x_{kj} مقدار متغیر j ام در نمونه k ام است. q معرف مقدار فازی‌شدگی متغیر j ام در نمونه k ام است که ضریب فازی شدن^۲ نامیده می‌شود. در مورد مقدار q

²Fuzziness Coefficient

¹Fuzzy Clusters means (Fuzzy c-means)

جست‌وجو کمک می‌کنند. در الگوریتم MVO، فرایند بهینه‌سازی با ایجاد مجموعه‌ای از جهان‌های تصادفی آغاز می‌شود. در هر تکرار، اجسام در جهان‌های با نرخ تورم بالا تمایل به حرکت به سمت جهان‌های با نرخ تورم پایین دارند. این انتقال از جهان به جهانی دیگر از طریق سیاه چاله یا سفید چاله صورت می‌گیرد. در عین حال، هر جهان اشیاء خود را از طریق کرم چاله‌ها و به صورت تصادفی به سوی بهترین جهان می‌فرستد. این روند تا زمانی که شرایط خاتمه (حداکثر تعداد تکرار از پیش تعیین شده) محقق نشود ادامه پیدا می‌کند. به‌منظور مدل‌سازی ریاضی تونل‌های سفید یا سیاه و مبادله اشیاء بین جهان‌ها، از مکانیزم انتخاب چرخ گردان^۳ استفاده می‌گردد (Mirjalili et al., 2016).

شاخص کیفی آب

محاسبه شاخص کیفی آب^۴ WQI شامل سه مرحله زیر است (Tiwari and Mishra, 1985).

۱- در مرحله اول، به هریک از پارامترها با توجه به اهمیت نسبی آن‌ها در کیفیت آب زیرزمینی از نظر شرب، وزنی (W_i) اختصاص داده و سپس، وزن نسبی (w_i) را با استفاده از رابطه ۶ محاسبه می‌شود:

$$w_i = \frac{W_i}{\sum_{i=1}^n W_i} \quad (6)$$

که در آن (n) تعداد پارامترها است.

۲- محاسبه نرخ کیفی (q_i) برای هر پارامتر به‌صورت نسبی از غلظت آن به مقدار استاندارد براساس سازمان بهداشت جهانی (2009) با استفاده از رابطه ۷ محاسبه می‌گردد.

$$q_i = \left(\frac{c_i}{s_i} \right) \times 100 \quad (7)$$

به‌طوری که (c_i) غلظت هر پارامتر شیمیایی در هر نمونه آب برحسب میلی گرم بر لیتر و (s_i) مقدار استاندارد آن در آب شرب براساس استاندارد سازمان بهداشت جهانی است.

۳- محاسبه شاخص کیفی آب با استفاده از فرمول ۸ امکان‌پذیر است.

$$WQI = \sum_{i=1}^n W_i q_i \quad (8)$$

هیچ تئوری مشخصی وجود ندارد اما بر حسب اختیار مقداری میان $1/3$ تا 3 در نظر گرفته می‌شود (حسنی پاک، ۱۳۸۰).

۳- پس از محاسبه مراکز جدید خوشه‌ها لازم است درجه عضویت هر نمونه به مرکز هر خوشه بر مبنای یکی از روش‌های اندازه‌گیری فاصله با توجه به رابطه ۳ محاسبه شود. در اینجا از فاصله اقلیدسی^۱ استفاده شده است.

$$u_{ik} = \frac{(d_{ik}^2)^{-1/q-1}}{\sum_{k=1}^c (d_{ik}^2)^{-1/q-1}} \quad (3)$$

که در آن، d_{ik} فاصله نمونه k ام از مرکز خوشه i ام است.

۴- محاسبه تابع هدف: تابع هدف متغیر J در محیطی که ضریب فازی‌شدگی q باشد از رابطه ۴ بدست می‌آید:

$$J = \sum_{i=1}^c \sum_{k=1}^n u_{ik}^q d_{ik}^2 = \sum_{i=1}^c \sum_{k=1}^n u_{ik}^q \|x_k - v_i\|^2 \quad (4)$$

۵- تکرار محاسبات تا زمانی که فاصله میان توابع هدف محاسبه شده در دو مرحله متوالی از یک مقدار بحرانی از پیش تعیین شده که میان 10^{-5} تا 10^{-3} است، کمتر باشد (Bezdek et al., 1984).

اولین تابع هدف که فشردگی درون کلاسی را نشان می‌دهد از رابطه ۴ استفاده می‌گردد و تابع هدف دیگری که پراکندگی بین خوشه‌ای را بهینه می‌نماید در رابطه ۵ نشان داده شد.

$$S = \frac{1}{M} \sum_{k=1}^M \frac{O(U_k(X_k), C)}{\max_{i=1, \dots, c} U_{ik}} \quad (5)$$

که در آن M تعداد کل نمونه‌ها، c تعداد خوشه‌ها، U_{ik} درجه عضویت نمونه k ام در خوشه i ام، $\max_{i=1, \dots, c} U_{ik}$ بیشترین درجه عضویت نمونه k ام، $U_k(X_k)$ بردار عضویت نمونه k ام، C مجموعه مراکز خوشه‌ها و $O(\dots)$ تابع همپوشانی یا اپراتور فازی است. به‌منظور ارزیابی تعداد بهینه خوشه‌ها برای مجموعه‌ای از داده‌ها از شاخص دیویس-بولدین و متوسط عرض سیلهوت استفاده می‌شود.

الگوریتم چند جهانی

الگوریتم چندجهانی^۲ (MVO) یک الگوریتم مبتنی بر جمعیت فرایند جست‌وجو را در دو مرحله اکتشاف و بهره‌برداری انجام می‌دهد. در این الگوریتم از مفاهیم سفید چاله و سیاه چاله برای اکتشاف فضای جست‌وجو استفاده می‌شود. در مقابل، کرم چاله‌ها در بهره‌برداری از فضاهای

³Roulette Wheel Selection

⁴Water Quality Index

¹Euclidean Distance

²Multi-verse Optimizer

در نهایت مقدار WQI در پنج دسته آب با کیفیت عالی تا نامناسب برای آشامیدن دسته‌بندی می‌شود (جدول ۱) (Ramakrishnaiah et al., 2009).

جدول ۱- طبقه‌بندی براساس شاخص WQI.

Table 1- Classification based on WQI index.

Number	Index	Water Quality
1	<50	Excellent
2	50-100	Good
3	100-200	Poor
4	200-300	Very Poor
5	300<	Unsuitable

نتایج و بحث

تحلیل نتایج الگوریتم خوشه‌بندی فازی

در این تحقیق برای به دست آوردن تعداد بهینه خوشه‌ها از الگوریتم چند جهانی به صورت تابع دوهدفه استفاده شده است.

تعداد خوشه‌ها به همراه تعداد چاه‌های موجود در هر خوشه در دوره از سال‌های ۱۳۹۰ و ۱۳۹۵ در جدول ۲ نشان داده شده است.

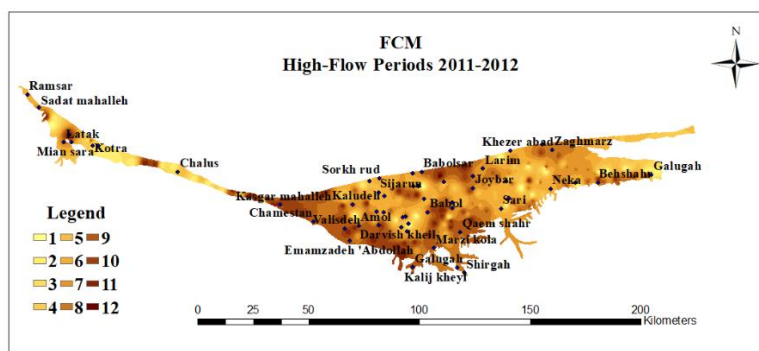
همچنین نقشه‌های پهنه‌بندی خوشه‌ها برای دوره‌های کم‌آبی و پربابی سال‌های ۱۳۹۰-۹۱ و ۱۳۹۵-۹۶ در شکل ۲ نمایش داده شده است.

جهت طبقه‌بندی کیفیت آب زیرزمینی دشت از FCM در نرم‌افزار متلب استفاده گردید. جهت تعیین تعداد بهینه خوشه‌ها، تابع دو هدفه برای خوشه‌بندی FCM با ترکیب با الگوریتم چند جهانی در نظر گرفته شد. در نهایت نتایج حاصل از خوشه‌بندی جهت مناطق همگن بررسی و در محیط 10.2

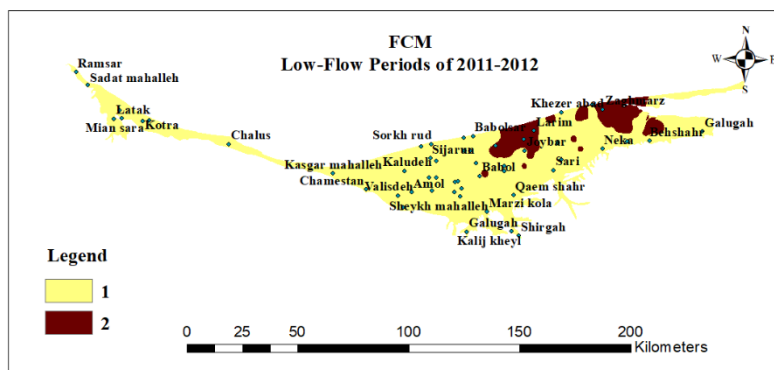
جدول ۲- تعداد نمونه‌ها در هر خوشه در الگوریتم FCM.

Table 2 - Number of samples per cluster in the FCM algorithm.

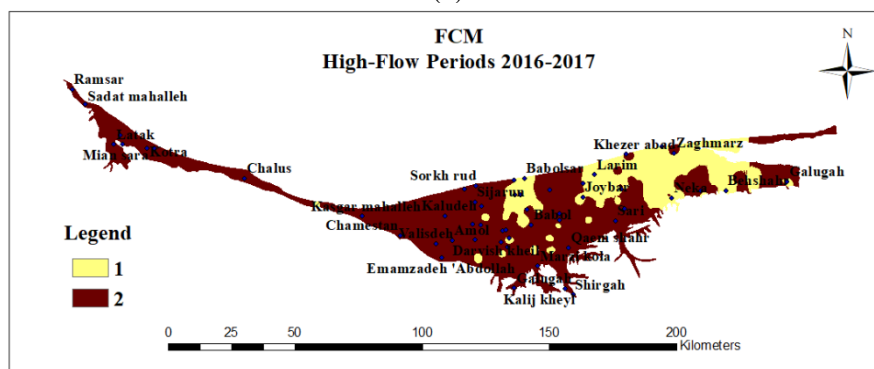
Number of samples per period	Cluster 1	Cluster 2	Cluster 3	Cluster 4	Cluster 5	Cluster 6
	Cluster 7	Cluster 8	Cluster 9	Cluster 10	Cluster 11	Cluster 12
The 2011-12 high Flow period	1	26	16	2	9	39
	32	16	45	12	43	32
The 2011-12 low Flow period	254	33	33	-	-	-
The 2016-17 high Flow period	72	252	252	-	-	-
The 2016-17 low Flow period	66	245	245	-	-	-



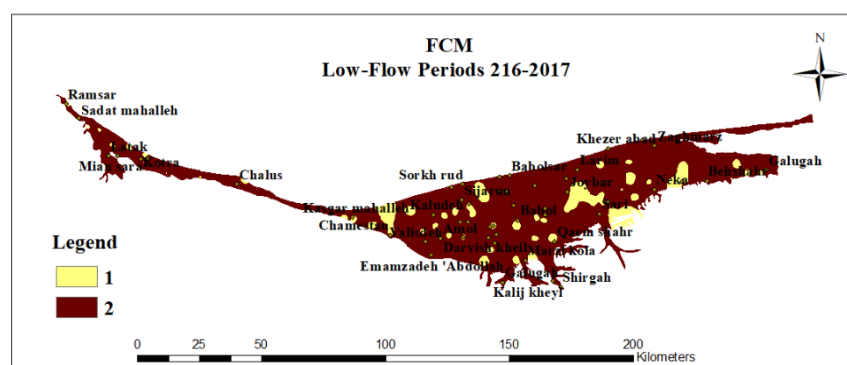
(a)



(b)



(c)



(d)

شکل ۲- پهنه‌بندی پارامترهای کیفی در دوره کم‌آبی و پرآبی سال ۱۳۹۰-۱۳۹۱ و ۱۳۹۵-۱۳۹۶ با استفاده از خوشه‌بندی FCM.

Figure 2 – Mapping of water quality parameters during the low-flow and high-flow periods of 2011–2012 and 2016–2017 using FCM clustering.

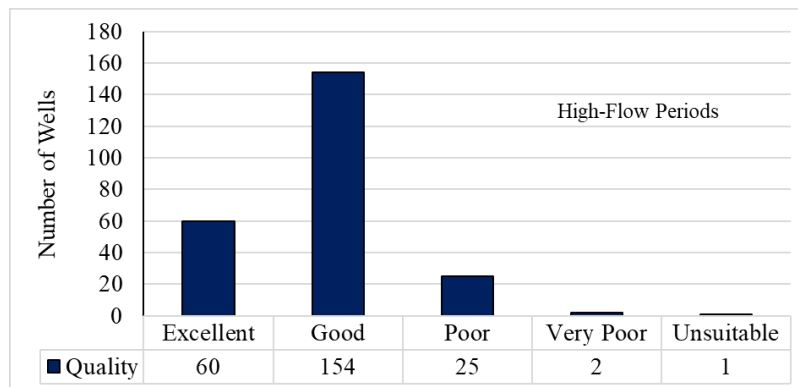
با توجه به نتایج به‌دست آمده از خوشه‌بندی فازی FCM در دوره پرآبی سال ۱۳۹۰-۱۳۹۱، می‌توان دریافت که ۱۵۴ چاه از چاه‌ها در محدوده خوب و ۶۰ چاه آن در محدوده عالی قرار دارد. اندرود در محل نوشهر-نور و شمال تیرتاش در محل بهشهر-بندرگز در محدوده ضعیف از نظر شرب قرار گرفته‌اند. همچنین در دوره کم‌آبی سال ۱۳۹۰-۱۳۹۱، می‌توان دریافت که ۲۵۴ عدد از چاه‌ها در خوشه اول و ۳۳ عدد از چاه‌ها در خوشه دوم در محدوده‌ی خوب قرار دارند. همچنین با توجه به نتایج بررسی‌ها در سال ۱۳۹۵-۱۳۹۶ در دوره پرآبی تمامی

همان‌طور که شکل ۲ مشاهده می‌شود می‌توان دریافت که تعداد خوشه‌ها در سال‌های مختلف متفاوت است. دوره پرآبی سال ۱۳۹۰-۱۳۹۱ دارای ۱۲ خوشه بوده و در بقیه دوره‌های تعداد خوشه‌ها ۲ بوده است.

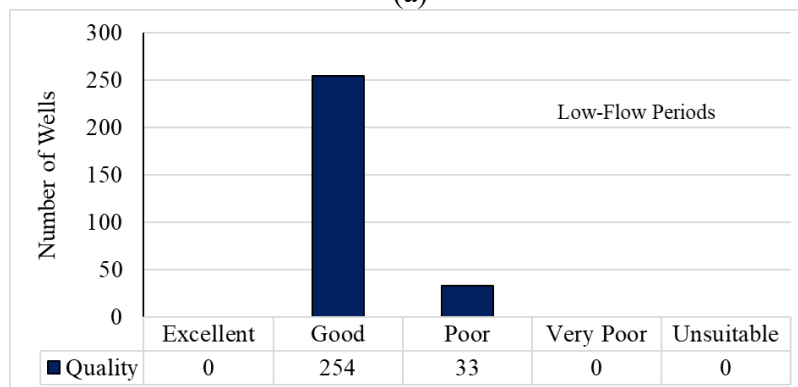
بررسی نتایج خوشه‌ها از نظر مصارف شرب

برای بررسی نتایج خوشه‌بندی‌ها از نظر شرب در این تحقیق از معیار WQI استفاده شده است. در شکل ۳ و شکل ۴ تعداد چاه‌ها در محدوده مورد مطالعه که با استفاده از شاخص WQI تقسیم‌بندی شده‌اند نشان داده شده است.

چاه‌ها در محدوده خوب قرار دارند که این نشان از همگنی منطقه مورد مطالعه است و همچنین در دوره کم‌آبی این سال ۲۴۵ عدد چاه در محدوده خوب و ۶۶ چاه در محدوده عالی قرار دارند. همچنین پهنه‌بندی کیفی پارامترهای شیمیایی با استفاده از معیار WQI برای دوره‌های پرآبی و کم‌آبی در سال‌های مورد مطالعه در شکل ۵ و شکل ۶ نشان داده شده است.



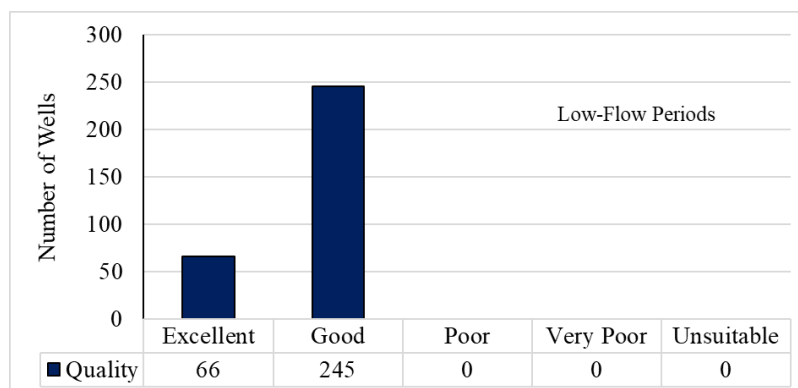
(a)



(b)

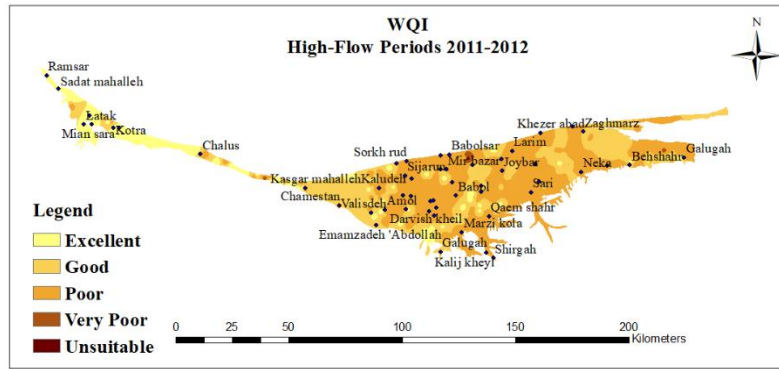
شکل ۳- نمودار کیفیت آب زیرزمینی با استفاده از شاخص WQI در سال ۱۳۹۰-۱۳۹۱.

Figure 3. Groundwater quality map based on the WQI during 20110-2012.

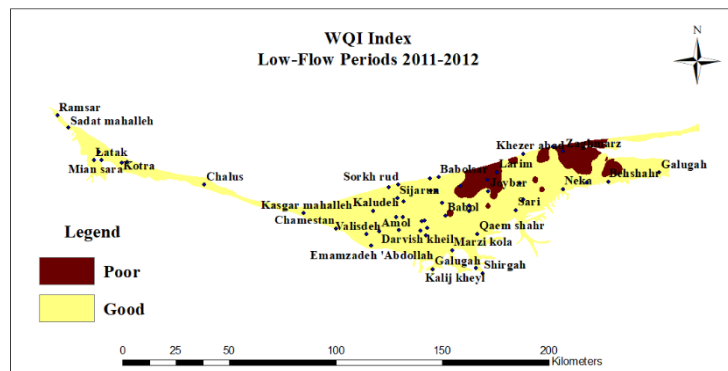


شکل ۴- نمودار کیفیت آب زیرزمینی با استفاده از شاخص WQI در دوره کم‌آبی سال ۱۳۹۵-۱۳۹۶.

Figure 4- Groundwater quality map based on the WQI during the low flow period of 2016-2017.



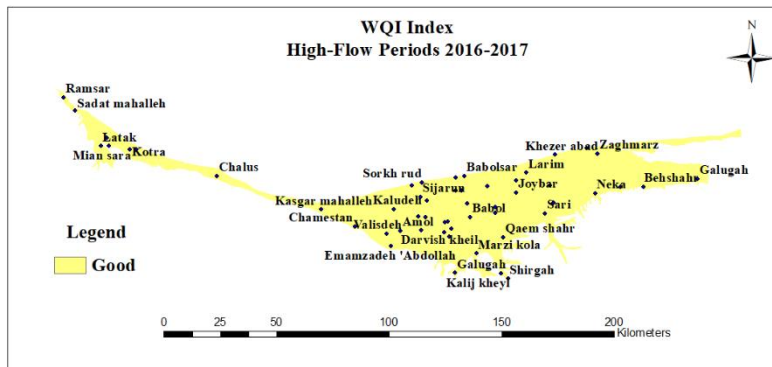
(a)



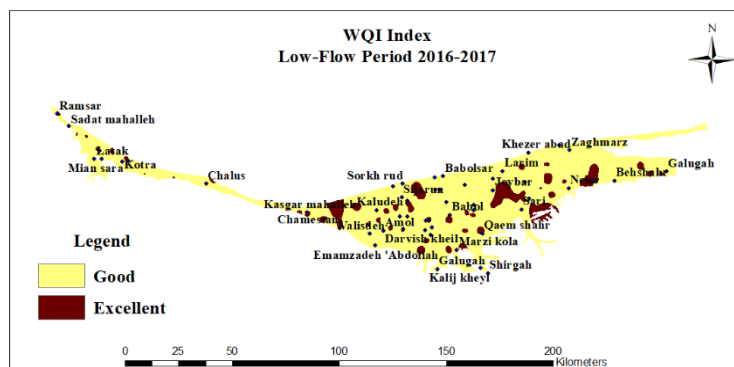
(b)

شکل ۵- پهنه‌بندی کیفی پارامترهای شیمیایی آب با معیار WQI در سال ۱۳۹۰-۱۳۹۱.

Figure 5- Zoning of groundwater chemical parameters quality based on the WQI in 2011–2012.



(a)



(b)

شکل ۶- پهنه‌بندی کیفی پارامترهای شیمیایی آب با معیار WQI در سال ۱۳۹۵-۱۳۹۶.

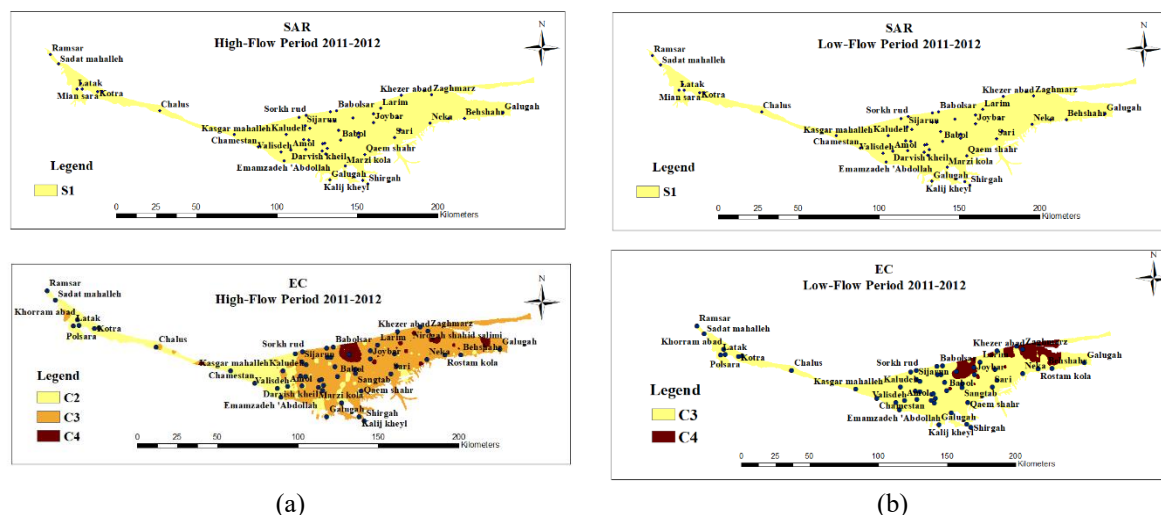
Zoning of groundwater chemical parameters quality based on the WQI in 2016–2017.–Figure 6

دادن هریک از داده‌ها در فرمول‌های این شاخص و به دست آوردن نتایج کار، این‌طور می‌توان نتیجه گرفت که هر دو خوشه در محدوده کیفی خوب از نظر شرب قرار گرفته‌اند. همچنین دوره کم آب این سال نیز این‌طور می‌توان نتیجه گرفت که خوشه‌ی یک در محدوده خوب و خوشه‌ی دو در محدوده عالی از نظر شرب قرار گرفته‌اند.

بررسی نتایج خوشه‌ها از نظر مصارف کشاورزی

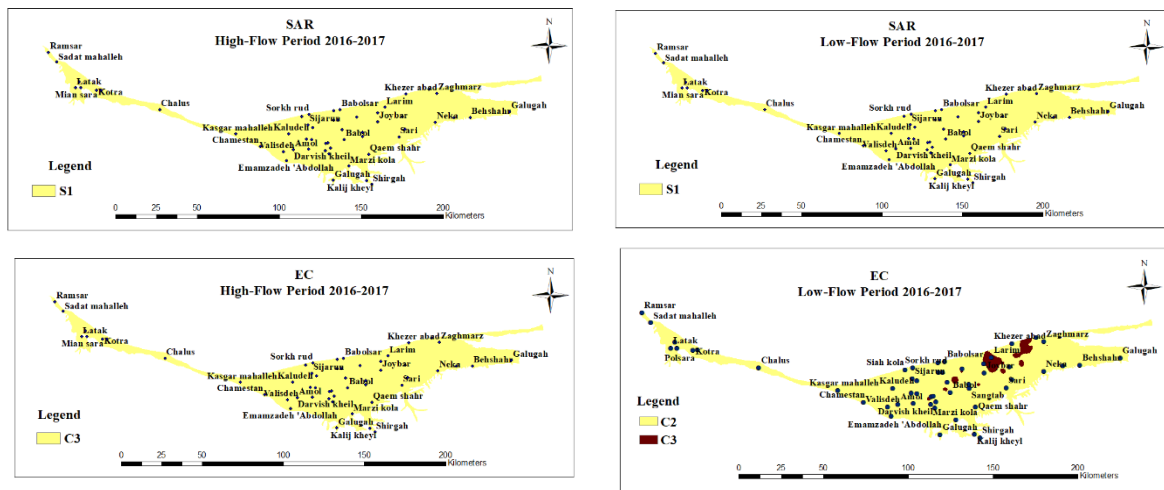
به‌منظور بررسی خوشه‌ها از نظر کیفیت مصارف کشاورزی در این تحقیق از نمودار ویلکاکس استفاده شده است. در شکل ۷ و شکل ۸ پهنه بندی پارامترهای SAR و EC که در نمودار ویلکاکس استفاده می‌شوند نشان داده شده است.

با توجه به شکل ۵ و شکل ۶ در دوره پرآبی سال ۱۳۹۰–۱۳۹۱ با استفاده از ۱۲ خوشه‌ی دسته‌بندی شده، توسط الگوریتم FCM و استفاده از شاخص کیفی آب (WQI) و قرار دادن هر یک از داده‌ها در فرمول‌های این شاخص و به‌دست آوردن نتایج این‌طور می‌توان نتیجه گرفت که خوشه‌ی ۱۲ در محدوده نامناسب، خوشه ۴ در محدوده‌ی خیلی ضعیف و خوشه‌های یک، پنج و هشت در محدوده ضعیف از نظر شرب قرار گرفته‌اند. همچنین در دوره کم‌آبی ۱۳۹۰–۱۳۹۱ نیز می‌توان نتیجه گرفت که خوشه‌ی ۱ در محدوده خوب و خوشه‌ی ۲ در محدوده ضعیف از نظر شرب قرار گرفته‌اند. دوره پرآبی ۱۳۹۵–۱۳۹۶ نیز با استفاده از ۲ خوشه‌ی دسته‌بندی شده، توسط الگوریتم FCM و استفاده از شاخص کیفی آب (WQI) و قرار



شکل ۷- پهنه بندی کیفی مقادیر SAR و EC مورد استفاده در نمودار ویلکاکس در دوره های کم آبی و پر آبی سال ۱۳۹۰-۱۳۹۱.

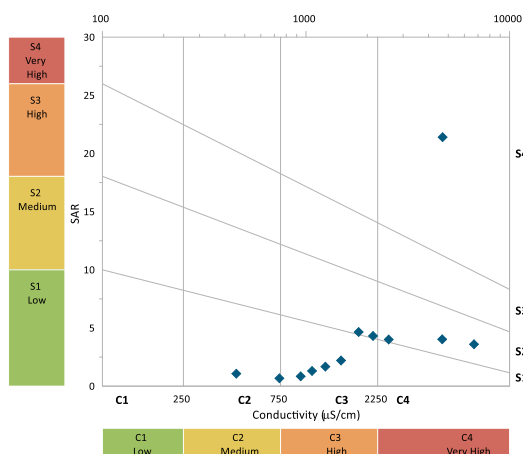
Figure 7- Quality zoning of SAR and EC values used in the Wilcox diagram during the dry and wet periods of 2011–2012.



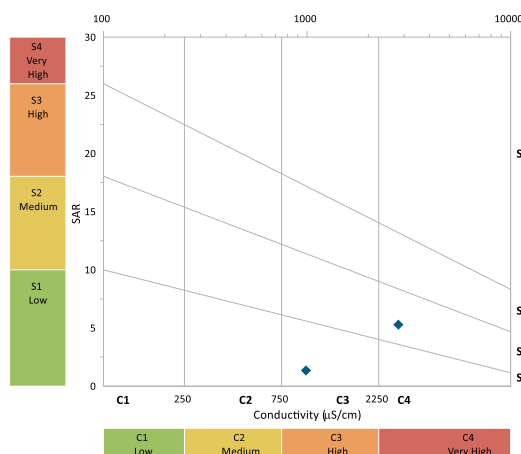
شکل ۸- پهنه بندی کیفی مقادیر SAR و EC مورد استفاده در نمودار ویلکاکس در دوره های کم آبی و پر آبی سال ۱۳۹۵-۱۳۹۶.

Figure 8- Quality zoning of SAR and EC values used in the Wilcox diagram during the dry and wet periods of 2016-2017.

همان طور که از شکل ۷ می توان دید در هر دو دوره کم آبی و پر آبی مقادیر SAR در محدوده S1 قرار گرفته اند ولی مقادیر EC در هر دو دوره در برخی از مناطق در محدوده C4 نیز قرار گرفته اند که محدوده این مناطق در دوره های کم آبی از وسعت بیشتری برخوردار است. با توجه به شکل ۸ و بررسی نتایج در سال ۱۳۹۵-۱۳۹۶ نشان می دهد که مقادیر SAR در هر دو دوره در محدوده S1 قرار گرفته است و مقادیر EC در دوره های کم آبی و پر آبی متفاوت است. در دوره کم آبی برخی از مناطق در محدوده C2 و بقیه مناطق در محدوده C3 قرار دارند در



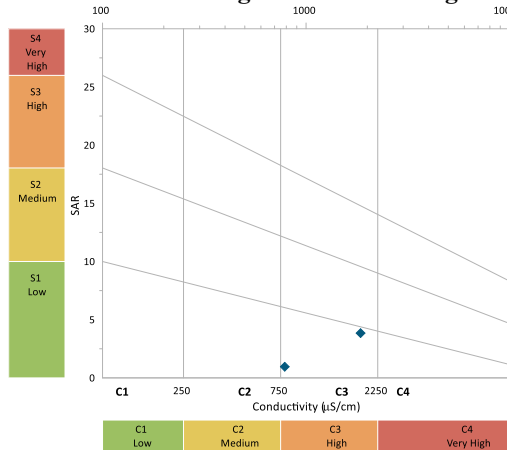
(a) High-Flow Period 2011-2012



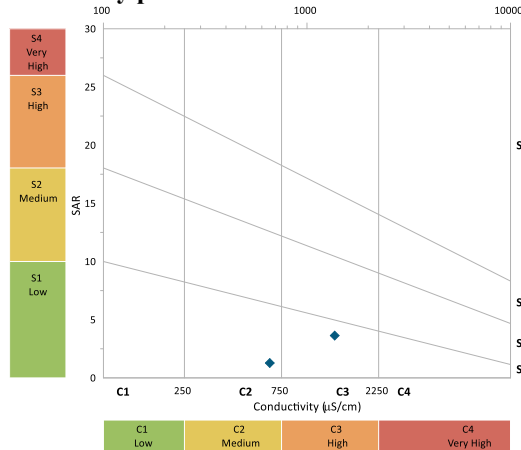
(b) Low-Flow Period 2011-2012

شکل ۹- نمودار ویلکاکس برای دوره پر آبی و کم آبی سال ۱۳۹۰-۱۳۹۱.

Figure 9. Wilcox diagram for the wet and dry periods of 2011-2012.



(a) High-Flow Period 2016-2017



(b) Low-Flow Period 2016-2017

شکل ۱۰- نمودار ویلکاکس برای دوره پر آبی و کم آبی سال ۱۳۹۵-۱۳۹۶.

Figure 10. Wilcox diagram for the wet and dry periods of 2016-2017.

وضعیت کیفی آب چاه‌ها از لحاظ مصارف کشاورزی نشان داد که در دوره پرآبی سال ۱۳۹۰-۱۳۹۱ کیفیت آب از نظر کشاورزی با توجه به دیاگرام ویلکاکس تنها می‌توان خوشه یک را در محدوده‌ی S3 دانست و سایر خوشه‌ها را در محدوده‌ی S1 و همچنین خوشه‌ها را از نظر EC در محدوده‌ی C2-C3-C4 قرار می‌گیرند. همچنین در دوره کم‌آبی سال ۱۳۹۰-۱۳۹۱ با مقایسه پارامترها با دیاگرام ویلکاکس، بررسی کیفی پارامترها انجام گرفته است. نتایج این‌طور نشان می‌دهد که کیفیت آب از نظر کشاورزی با توجه به شاخص ویلکاکس در محدوده‌ی S1 برای SAR و در محدوده‌ی C3-C4 برای ECها می‌باشد. همچنین در دوره پرآبی سال ۱۳۹۵-۱۳۹۶ با مقایسه پارامترها با دیاگرام ویلکاکس، نتایج این‌طور نشان می‌دهد که کیفیت آب از نظر کشاورزی در محدوده C3S1 قرار گرفته‌اند. همچنین در دوره کم‌آبی سال ۱۳۹۵-۱۳۹۶ کیفیت آب از نظر در محدوده S1 برای SAR و C3-C2 برای EC قرار گرفته‌اند. بر پایه یافته‌های این پژوهش، مدل خوشه‌بندی فازی FCM قابلیت مناسبی برای تحلیل فضایی-زمانی کیفیت آب زیرزمینی و پشتیبانی از تصمیم‌گیری‌های مدیریتی در منطقه مورد مطالعه دارد. شناسایی نواحی با افت کیفیت آب در برخی دوره‌ها، ضرورت پایش مداوم و مدیریت هدفمند بهره‌برداری را برجسته می‌سازد. افزون بر این، نتایج ارزیابی کیفی آب از منظر کشاورزی نشان می‌دهد که در مناطق دارای مقادیر بالاتر EC انتخاب الگوی کشت متناسب و بهینه‌سازی روش‌های آبیاری می‌تواند به کاهش محدودیت‌های بهره‌برداری و افزایش پایداری منابع آب کمک نماید.

منابع

اصغری مقدم، ا.، جوانمرد، ز.، ودیعتی، م.، نجیب، م.، ۱۳۹۴. ارزیابی کیفیت منابع آب زیرزمینی دشت مهربان با استفاده از روش‌های GQI و FGQI. مجله هیدروژئومورفولوژی، ۲۱(۲): ۷۹-۹۸.

اعلمی، م.، نورانی، و.، دانشور وثوقی، ف.، ۱۳۹۵. استفاده از خوشه‌بندی مکانی برای پیش‌بینی پارامترهای کیفی آب زیرزمینی با مدل انفیس. مجله آب و فاضلاب، ۵: ۱۳-۲۹.

جهانشاهی، ا.، روحی مقدم، ع.، ا.، دهواری، ع.، ۱۳۹۲. ارزیابی پارامترهای کیفی آب زیرزمینی با استفاده از GIS و زمین آمار (مطالعه موردی: آبخوان دشت شهر بابک). نشریه آب و خاک. ۳: ۱۸۳-۱۹۷.

با توجه به نتایج به‌دست آمده از خوشه‌بندی فازی FCM در دوره پرآبی سال ۱۳۹۰-۱۳۹۱ و مقایسه پارامترها با دیاگرام ویلکاکس، بررسی کیفی پارامترها انجام گرفته است. نتایج این‌طور نشان می‌دهد که کیفیت آب از نظر کشاورزی با توجه به دیاگرام ویلکاکس تنها می‌توان خوشه ۱ را در محدوده‌ی S3 دانست و سایر خوشه‌ها را در محدوده‌ی S1 و همچنین خوشه‌ها را از نظر EC در محدوده‌ی C2-C3-C4 قرار می‌گیرند. همچنین در دوره کم‌آبی سال ۱۳۹۰-۱۳۹۱ با مقایسه پارامترها با دیاگرام ویلکاکس، بررسی کیفی پارامترها انجام گرفته است. نتایج این‌طور نشان می‌دهد که کیفیت آب از نظر کشاورزی با توجه به شاخص ویلکاکس در محدوده‌ی S1 برای SAR و در محدوده‌ی C3-C4 برای ECها می‌باشد. همچنین در دوره پرآبی سال ۱۳۹۵-۱۳۹۶ با مقایسه پارامترها با دیاگرام ویلکاکس، نتایج این‌طور نشان می‌دهد که کیفیت آب از نظر کشاورزی با توجه به دیاگرام ویلکاکس کیفیت آب در محدوده C3S1 قرار گرفته‌اند. همچنین در دوره کم‌آبی سال ۱۳۹۵-۱۳۹۶ کیفیت آب از نظر کشاورزی با توجه به دیاگرام ویلکاکس در محدوده S1 برای SAR و C3-C2 برای EC قرار گرفته‌اند.

نتیجه‌گیری

هدف از این تحقیق بررسی قابلیت مدل‌های FCM بر روی شاخص‌های کیفی جهت خوشه‌بندی و شناسایی مناطق همگن از لحاظ کیفیت آب زیرزمینی استان مازندران است. در این تحقیق از داده‌های اندازه‌گیری شده ۱۴ پارامتر کیفی آب با نمونه‌گیری از چاه‌های عمیق و نیمه عمیق در سال‌های ۱۳۹۰-۱۳۹۱ و ۱۳۹۵-۱۳۹۶ در دو دوره کم‌آبی و دوره پرآبی استفاده شده است. با توجه به نتایج به‌دست آمده از خوشه‌بندی فازی در دوره پرآبی سال ۱۳۹۰-۱۳۹۱ می‌توان دریافت که اندرود در محل نوشهر-نور و شمال تیرتاش در محل بهشهر-بندرگز در محدوده ضعیف از نظر شرب قرار گرفته‌اند. همچنین در دوره کم‌آبی سال ۱۳۹۰-۱۳۹۱، می‌توان دریافت که ۲۵۴ عدد از چاه‌ها در خوشه اول در وضعیت خوب و ۳۳ عدد از چاه‌ها در خوشه دوم در محدوده‌ی ضعیف قرار دارند. همچنین با توجه به نتایج بررسی‌ها در سال ۱۳۹۵-۱۳۹۶ در دوره پرآبی تمامی چاه‌ها در محدوده خوب قرار دارند که این نشان از همگنی منطقه مورد مطالعه است و همچنین در دوره کم‌آبی این سال ۲۴۵ عدد چاه در محدوده خوب و ۶۶ چاه در محدوده عالی قرار دارند همچنین بررسی

- حسینی پاک، ع. ا. ۱۳۸۰. تحلیل داده‌های اکتشافی، انتشارات دانشگاه تهران. ۲۵۳۶.
- حسینی، ق.، محوی، ا. ح.، ناصری، س.، عربعلی بیک، ح.، یونسین، م.، قریبی، ح. ۱۳۹۰. طراحی شاخص کیفی آب‌های زیرزمینی با استفاده از منطق فازی. مجله سلامت و بهداشت اردبیل. ۳۱-۱۸: (۱)۳.
- خاشعی سیوکی، ع.، قهرمان، ب. کوچک‌زاده، م. ۱۳۹۰. ارزیابی پتانسیل استحصال آب از آبخوان با روش فرآیند تحلیل سلسله مراتبی فازی (مطالعه موردی: دشت نیشابور). مجله پژوهش آب ایران. ۱۸۰-۱۷۱: (۹)۵.
- خسروی، ح.، مرادی، ا.، دارابی، ح. ۱۳۹۴. شناسایی مناطق همگن از نظر کیفیت آب زیرزمینی با استفاده از تحلیل عاملی و خوشه‌ای. (مطالعه موردی: دشت قیر استان فارس). فصلنامه علمی پژوهشی مهندسی آبیاری و آب. ۲۱-۷: ۱۸.
- سامانی، س.، کلانتری، ن.، رحیمی، م. ۱۳۹۰. استفاده از روش آماری تحلیل خوشه‌ای جهت ارزیابی کیفی آب زیرزمینی دشت اوان. مجله مهندسی منابع آب. ۴: ۸۷-۷۵.
- سراوانی، ز.، محمدرضاپور، ا.، سیاسر، ه. ۱۴۰۲. پیش‌بینی پارامترهای کیفی آب‌های زیرزمینی استان گلستان با مدل‌های هوش مصنوعی. هیدروژئولوژی. ۲۸-۱۵: (۲)۸.
- سرائی تبریزی، م.، جمعدار، م.، یوسفی، ح. ۱۴۰۳. ارزیابی کیفیت آب زیرزمینی آبخوان هشتگرد با استفاده از روش فازی. هیدروژئولوژی. ۲۷-۱۶: (۱)۹.
- شمعانان، غ.، رقیمی، م.، یخکشی، ا.، احمدی، م. ۱۳۸۴. هیدروشیمی مابع آب زیرزمینی در حوزه آبریز گرگانرود-قره سو استان گلستان. نهمین همایش انجمن زمین شناسی ایران. ۵ مهر ۱۳۹۵، تهران.
- صالحی، ح.، حق زاده، ع. ۱۳۹۴. ارزیابی و پهنه‌بندی کیفیت آب‌های زیرزمینی با استفاده از تلفیق مدل AqQA و سیستم اطلاعات جغرافیایی (مطالعه موردی: دشت کامیاران). نشریه علمی-ترویجی مهندسی نقشه‌برداری و اطلاعات مکانی. ۶۵-۷۶: ۷.
- صمدی، ر.، بهمنش، ج.، رضایی، ح. ۱۳۹۳. ارزیابی پتانسی کیفی منابع آب زیرزمینی جهت مصارف آب شرب با استفاده از مدل تحلیل سلسله مراتبی و تکنیک سیستم اطلاعات جغرافیایی (مطالعه موردی: دشت ارومیه). علوم ومهندسی آبیاری (مجله علمی کشاورزی). ۱۲۸-۱۱۷: ۳.
- سگری، ق.، رماوندی، ب.، طرلانی آذر، م.، فدایی نوبندگان، ا.، بریزی، ز. ۱۳۹۴. بررسی کیفیت شیمیایی و
- شاخص‌های خورندگی و رسوب‌گذاری شبکه آب آشامیدنی شهر بوشهر. مجله طب جنوب. ۳۶۱-۳۵۳: (۲)۱۸.
- علیمرادی، ه.، روحی مقدم، ع. ا.، خالقی، م.، بامری، ا. ۱۴۰۱. پیش‌بینی و پهنه‌بندی کیفیت آب زیرزمینی با استفاده از مدل‌های سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) و روش‌های یادگیری ماشین (مطالعه موردی: دشت زاهدان). هیدروژئولوژی. ۶۰-۴۳: (۲)۷.
- کرد، م.، اصغری مقدم، ا.، نخعی، م. ۱۳۹۳. مدل‌سازی کمی توزیع نترات در آبخوان دشت اردبیل با استفاده از منطق فازی. محیط شناسی. ۷۹-۶۷: ۱۰.
- مسعودی، ر.، زهتابیان، غ.، احمدی، ح.، ملکیان، ا. ۱۳۹۴. ارزیابی روند تغییرات کمی و کیفی آب زیرزمینی دشت کاشان. مجله مدیریت بیابان، ۸۰-۶۸: (۵)۳.
- میرعمادی، ر.، شیرگاهی، ح.، رحمتی، م. ۱۳۹۴. ارزیابی تغییرات سطح آب زیرزمینی در یک فصل زراعی در استان مازندران با استفاده از ArcGIS سومین همایش سراسری کشاورزی و منابع طبیعی پایدار. ۲۶ خرداد ۱۳۹۴، تهران.
- نخعی، م.، تلخابی، م.، ودیعی، م. ۱۳۹۵. برتری روش خوشه‌بندی C-میانگین فازی در بیان توزیع رخساره‌های هیدروشیمی آب زیرزمینی دشت ورامین. فصلنامه زمین شناسی ایران. ۸۲-۷۱: ۳۸.
- نصرآبادی، ت.، عباسی، م.، پویان، ح. ۱۳۹۲. بررسی کیفیت آب زیرزمینی شهر تهران با استفاده از شاخص کیفی سازمان بهداشت جهانی. مجله انسان و محیط زیست. ۱۱۱: (۳)۱-۱۲.

Reference

- Abdul Hameed M Jawad, A., Haider S, A. and Bahram K, M., 2010. Application of water quality index for assessment of Dokan lake ecosystem, Kurdistan region, Iraq. Journal of Water Resource and protection, 2010.
- A'lam, M., Norani, V. and Daneshvar Vosoughi, F., 2016. Application of spatial clustering for predicting groundwater quality parameters using the ANFIS model. Journal of Water and Wastewater, 5:13-29. [In Persian]
- Alimoradi, H., Ruhi Moghaddam, A.E., Khaleghi, M. and Bamri, A., 2022. Prediction and zoning of groundwater quality using Geographic Information System (GIS) models and machine learning methods (Case study: Zahedan Plain). Hydrogeology, 7(2):43-60. [In Persian]
- Amangabara, G.T. and Ejenma, E., 2012. Groundwater quality assessment of Yenagoa and environs Bayelsa State, Nigeria between 2010 and 2011. Resources and environment, 2(2):20-29.

movement and evolution in the Xinli deposit of the Sanshandao gold mine using FCM and PCA methods. *Environmental Earth Sciences*, 73(12):7873-7888.

Mirjalili, S., Mirjalili, S.M. and Hatamlou, A., 2016. Multi-verse optimizer: a nature-inspired algorithm for global optimization. *Neural computing and applications*, 27(2):495-513.

Nadiri, A.A., Chitsazan, N., Tsai, F.T.C. and Moghaddam, A.A., 2014. Bayesian artificial intelligence model averaging for hydraulic conductivity estimation. *Journal of Hydrologic Engineering*, 19(3):520-532.

Oorkavalan, G., Chidambaram, S.M., Mariappan, V., Kandaswamy, G. and Natarajan, S., 2016. RETRACTED: Cluster analysis to assess groundwater quality in Erode District, Tamil Nadu, India. *Circuits and Systems*, 7(6):877-890.

Parham, H., Jafarzadeh, N., Dehghan, S. And Kian, E.F., 2007. Changing In Nitrogen and Phosphorous Concentration and Some Physicochemical Parameters to Budget Determination of Karkheh Reservoir. *Shahid Chamran University Journal of Science, new series*. 117-25.

Pourjabbar, A., Sârbu, C., Kostarelos, K., Einax, J.W. and Büchel, G., 2014. Fuzzy hierarchical cross-clustering of data from abandoned mine site contaminated with heavy metals. *Computers & Geosciences*. 72:122-133.

Ramakrishnaiah, C.R., Sadashivaiah, C. and Ranganna, G., 2009. Assessment of water quality index for the groundwater in Tumkur Taluk, Karnataka State, India. *Journal of Chemistry*, 6(2):523-530.

Salehi, H. and Haghighzadeh, A., 2015. Evaluation and zoning of groundwater quality using integration of AqQA model and Geographic Information System (Case study: Kamyaran Plain). *Scientific-Promotional Journal of Surveying Engineering and Spatial Information*, 7:65-76. [In Persian]

Samadi, R., Bahmanesh, J. and Rezaei, H., 2014. Quality potential assessment of groundwater resources for drinking water using analytic hierarchy process model and GIS technique (Case study: Urmia Plain). *Irrigation Sciences and Engineering (Scientific Journal of Agriculture)*, 3:117-128. [In Persian]

Samani, S., Kalantari, N. and Rahimi, M., 2011. Using cluster analysis statistical method for qualitative assessment of groundwater in Avan Plain. *Journal of Water Resources Engineering*, 4:75-87. [In Persian]

Saravani, Z., Mohammadrezapour, O. and Siasar, H., 2023. Prediction of groundwater quality parameters in Golestan Province using artificial intelligence models. *Hydrogeology*, 8(2):15-28. [In Persian]

Asgari, Gh., Ramavandi, B., Tarlani Azar, M., Fadaei Nobandegani, A. and Birizi, Z., 2015. Investigation of chemical quality and corrosion and scaling indices of drinking water network in Bushehr city. *South Medical Journal*, 18(2):353-361. [In Persian]

Asghari Moghaddam, A., Javanmard, Z., Vadi'ati, M. and Najib, M., 2015. Evaluation of groundwater quality in Mehran Plain using GQI and FGQI methods. *Journal of Hydrogeomorphology*, 1(2):79-98. [In Persian]

Bezdek, J.C., Ehrlich, R. and Full, W., 1984. FCM: The fuzzy c-means clustering algorithm. *Computers & geosciences*, 10(2-3):191-203.

Caniani, D., Lioi, D.S., Mancini, I.M. and Masi, S., 2015. Hierarchical classification of groundwater pollution risk of contaminated sites using fuzzy logic: a case study in the Basilicata Region (Italy). *Water*, 7(5):2013-2036.

Güler, C., Kurt, M.A., Alpaslan, M. and Akbulut, C., 2012. Assessment of the impact of anthropogenic activities on the groundwater hydrology and chemistry in Tarsus coastal plain (Mersin, SE Turkey) using fuzzy clustering, multivariate statistics and GIS techniques. *Journal of Hydrology*, 414:435-451.

Hassani Pak, A.E., 2001. *Exploratory Data Analysis*. University of Tehran Press. 2536. [In Persian]

Hassani, Gh., Mahvi, A.H., Naseri, S., Arabalibeik, H., Younesian, M. and Ghoreibi, H., 2011. Design of groundwater quality index using fuzzy logic. *Journal of Health and Hygiene Ardabil*, 3(1):18-31. [In Persian]

Jahanshahi, A., Ruhi Moghaddam, A.E. and Dehwari, A., 2013. Assessment of groundwater quality parameters using GIS and geostatistics (Case study: Shahrehabak Plain aquifer). *Journal of Water and Soil*, 3:183-197. [In Persian]

Khashei Siuki, A., Ghahreman, B. and Kouchakzadeh, M., 2011. Evaluation of water extraction potential from aquifer using fuzzy analytic hierarchy process (Case study: Neyshabur Plain). *Iranian Journal of Water Research*, 5(9):171-180. [In Persian]

Khosravi, H., Moradi, A. and Darabi, H., 2015. Identification of homogeneous zones in terms of groundwater quality using factor analysis and cluster analysis (Case study: Qir Plain, Fars Province). *Scientific-Research Quarterly of Irrigation and Water Engineering*, 7:18-21. [In Persian]

Kord, M., Asghari Moghaddam, A. and Nakhaei, M., 2014. Quantitative modeling of nitrate distribution in Ardabil Plain aquifer using fuzzy logic. *Environmental Sciences*, 10:67-79. [In Persian]

Peng, K., Li, X. and Wang, Z., 2015. Hydrochemical characteristics of groundwater

Shamanan, Gh., Roghimi, M., Yakhkeshi, A. and Ahmadi, M., 2005. Hydrochemistry of groundwater resources in Gorganrud-Gharehsou catchment area, Golestan Province. 9th Symposium of the Iranian Geological Society, October 27, 2016, Tehran. [In Persian]

Siraei Tabrizi, M., Jamadar, M. and Yousefi, H., 2024. Evaluation of groundwater quality in Hashtgerd aquifer using fuzzy method. *Hydrogeology*, 9(1):16-27. [In Persian]

Sivasankar, V., Kameswari, M., Msagati, T.A.M., Venkarapathy, M. and Senthil Kumar, M., 2013. Fuzzy set approach—a tool to cluster Holy samples of groundwater quality parameters at Rameswaram South India. *Journal of Water Resources and Ocean Science*, 2(3):33-39.

Masoudi, R., Zehtabian, Gh., Ahmadi, H. and Malekian, A., 2015. Evaluation of quantitative and qualitative changes trend of groundwater in Kashan Plain. *Desert Management Journal*, 3(5):68-80. [In Persian]

Miramadi, R., Shirgahi, H. and Rahmati, M., 2015. Evaluation of groundwater level changes in a cropping season in Mazandaran Province using ArcGIS. 3rd National Conference on Sustainable Agriculture and Natural Resources, June 16, 2015, Tehran. [In Persian]

Nakhaei, M., Talkhabi, M. and Vadi'ati, M., 2016. Superiority of fuzzy C-means clustering method in expressing distribution of hydrochemical facies of groundwater in Varamin Plain. *Quarterly Journal of Iran Geology*, 38:71-82. [In Persian]

Nasrabadi, T., Abbasi, M. and Pouyan, H., 2013. Investigation of groundwater quality in Tehran city using WHO quality index. *Journal of Human and Environment*, 11(3):1-12. [In Persian]

Tiwari, T.N. and Mishra, M.A., 1985. A preliminary assignment of water quality index of major Indian rivers. *Indian J Environ Prot*, 5(4):276-279.

Tutmez, B., Hatipoglu, Z. and Kaymak, U., 2006. Modelling electrical conductivity of groundwater using an adaptive neuro-fuzzy inference system. *Computers & geosciences*, 32(4):421-433.

Zadeh, L.A., 1965. Fuzzy sets. *Information and control*, 8(3):338-353.