

استفاده از نگاشت خودسازمانده (SOM) به منظور خوشه‌بندی کیفیت آب زیرزمینی استان کرمان و ارزیابی تناسب آن برای اهداف شرب و آبیاری

فاطمه سروش* و اکرم سیفی^۱

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۷/۹؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۹/۲۸)

چکیده

ارزیابی خصوصیات هیدروشیمیایی آب‌های زیرزمینی به منظور برنامه‌ریزی و مدیریت منابع آب به لحاظ کیفیت ضروری است. در تحقیق حاضر، از روش خوشه‌بندی نگاشت خودسازمانده (SOM) برای یافتن خوشه‌های همگن پارامترهای هیدروشیمیایی در منابع آب‌های (چاه، چشمه و قنات) استان کرمان استفاده و طبقه‌بندی کیفی مصارف شرب و آبیاری بر اساس خوشه‌های SOM انجام شد. الگوهای پارامترهای کیفی آب با صفحات SOM مصور گردید و الگوهای مشابهی برای آن پارامترها مشاهده شد که با یکدیگر هم‌بسته بودند و یک منبع مشابه را نشان می‌دادند. طبق نتایج SOM، تعداد ۷۲۹ نمونه آب مورد بررسی، در چهار خوشه طبقه‌بندی شدند و خوشه‌های ۱، ۲، ۳ و ۴ به ترتیب شامل ۷۳، ۶/۲، ۶/۷ و ۱۴/۱ درصد از نمونه‌های آب زیرزمینی بودند. روند افزایش هدایت الکتریکی در خوشه‌های مورد بررسی به ترتیب به صورت خوشه ۱، ۴، ۳ و ۲ بود. شاخص کیفیت آب مبتنی بر وزن‌دهی آنیونی (EWQI) نشان داد که همه منابع آب دارای کیفیت عالی و خوب به لحاظ شرب (۳۶/۳ درصد)، در خوشه ۱ قرار گرفته‌اند. بر طبق دیاگرام ویلکاکس، تعداد ۴۳۵ نمونه آب (۸۱/۷ درصد) موجود در خوشه ۱ دارای شرایط مناسب برای آبیاری بودند و ۲۸۵ مورد دیگر که در هر چهار خوشه پراکنده بودند، کیفیت نامناسبی به لحاظ آبیاری نشان دادند. بر اساس دیاگرام پایپر، Na-Cl رخساره غالب در خوشه‌های ۲، ۳ و ۴ بود و رخساره‌های غالب خوشه ۱ به صورت Ca-HCO_3 ، Ca-Mg-Cl و Na-Cl بودند. این مطالعه نشان داد که روش SOM می‌تواند به طور موفقیت‌آمیزی برای طبقه‌بندی و توصیف آب زیرزمینی از نظر هیدروشیمی و کیفیت آب برای اهداف شرب و کشاورزی در مقیاس استانی استفاده شود.

واژه‌های کلیدی: خوردگی، دیاگرام دورو، شاخص کیفیت آب، نمودار پایپر، وزن‌دهی آنیونی، ویلکاکس، هیدروشیمیایی

۱. گروه علوم مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ولی‌عصر (عج) رفسنجان، ایران

*: مسئول مکاتبات: پست الکترونیکی: f.soroush@vru.ac.ir

مقدمه

کربنات کلسیم برای طبقه‌بندی و ارزیابی آب آبیاری استفاده می‌شود.

از آنجایی که کنترل، ارزیابی و بررسی داده‌های کیفیت آب زیرزمینی برای اهداف مختلف از جمله شرب و کشاورزی در سطح ملی و منطقه‌ای به دلیل ابعاد زیاد آنها، امری وقت‌گیر و پیچیده است، کاهش ابعاد داده‌ها به فضای ابعادی کوچک‌تر، با حداقل کاهش اطلاعات مفید آنها ضروری به نظر می‌رسد. کاهش ابعاد داده‌ها می‌تواند موجب شناخته شدن الگوها یا ساختارهای ناشناخته در داده‌های هیدروشیمیایی پیچیده شود (۴). روش نگاشت خودسازمانده (SOM) نوعی شبکه عصبی نظارت نشده است که برای تولید داده‌هایی با بعد کم آموزش داده می‌شود. روش SOM در سال ۱۹۸۲ توسط کوهنن و با مطالعه روی روش خوشه‌بندی k-means معرفی شد (۲۰). روش SOM قابلیت‌های تصویرسازی بسیار عالی دارد و با استفاده از بردارهای مرجع، تجسمی کامل از داده‌ها ارائه می‌دهد (۱۱). این روش قادر به کاهش پیچیدگی داده‌های غیرخطی، نامنظم، نویزی و با پراکندگی زیاد است و این داده‌ها را برای بررسی‌های تحلیلی مطلوب می‌سازد (۱۶ و ۴۸). بررسی‌ها نشان داد که تاکنون در ایران از روش خوشه‌بندی SOM به‌منظور تحلیل، طبقه‌بندی و کاهش داده‌های کیفی آب‌های زیرزمینی استفاده نشده است. در این رابطه در سایر نقاط دنیا نیز پژوهش‌های اندکی صورت گرفته است. پژوهشگران از روش SOM برای بررسی خصوصیات هیدروشیمیایی ۲۹۹ نمونه آب زیرزمینی در کشور کره جنوبی (۴) و بررسی خصوصیات هیدروشیمیایی مکانی و فصلی دلتای رودخانه قرمز ویتنام (۲۸) استفاده کردند. همچنین در مطالعه‌ای دیگر، بالخیری و همکاران (۳) از روش خوشه‌بندی SOM برای ارزیابی کیفیت آب زیرزمینی دشت El Mila استفاده کردند. بر اساس نتایج، ۳۵ نمونه آب زیرزمینی در سه خوشه طبقه‌بندی شدند. نتایج این تحقیقات نشان دادند که می‌توان روش SOM را به‌طور موفقیت‌آمیزی برای طبقه‌بندی و بررسی خصوصیات کیفی آب‌های زیرزمینی در مقیاس منطقه‌ای استفاده کرد. همچنین

با توجه به تغییرات زیاد زمانی، مکانی و مقدار بارش در ایران، بخش کشاورزی و شرب به شدت متکی بر منابع آب زیرزمینی است. در حال حاضر ایران از بزرگ‌ترین مصرف‌کنندگان منابع آب زیرزمینی در جهان است (۶). استفاده بی‌رویه و بدون برنامه‌ریزی از آب‌های زیرزمینی برای فعالیت‌های کشاورزی و شهری (۱۴) و خشکسالی‌های پی‌درپی در ایران، کیفیت و کمیت آبخوان‌های بخش مرکزی ایران (استان کرمان) را در وضعیت بحرانی قرار داده است (۱۰). کاربرد بیش از اندازه کودهای شیمیایی در کشاورزی نیز موجب آلودگی آب‌های زیرزمینی شده است. کیفیت آب، سلامت انسان‌ها و ساختار فیزیکی و شیمیایی خاک را تحت تأثیر قرار می‌دهد و همچنین تأثیر معنی‌داری بر تولید محصول دارد (۴۱). از این‌رو درک ویژگی‌های هیدروشیمیایی آب زیرزمینی و ارزیابی کیفیت و مطلوبیت آب زیرزمینی برای مصارف مختلف از جمله شرب و کشاورزی، اهمیت ویژه‌ای در مدیریت بهینه آنها دارد.

معمولاً برای تعیین مطلوبیت آب زیرزمینی برای اهداف شرب از روش شناخته شده شاخص کیفیت آب (WQI) استفاده می‌شود. روش WQI روشی جامع در ترکیب پارامترهای کیفی و ارائه عددی بدون بعد است که کیفیت آب در یک محل و زمان خاص را نمایش می‌دهد (۳۹). اهمیت نسبی پارامترهای کیفی آب در نمره نهایی کیفیت آب، بر اساس وزن آنها تعیین می‌شود. وزندهی پارامترهای کیفی اثر مستقیمی بر پیش‌بینی WQI دارد. در تحقیق حاضر از روش وزندهی آنتروپی شانون به‌منظور تعیین وزن پارامترهای کیفی مورد استفاده در ارزیابی شرب و سپس محاسبه شاخص کیفیت آب مبتنی بر وزن‌های آنتروپی (EWQI) استفاده شده است. وزن‌های آنتروپی به‌طور گسترده و به‌طور موفقیت‌آمیزی در ارزیابی کیفیت آب زیرزمینی استفاده شده است (۲۳ و ۲۶). استفاده از نمودارهای پایپر، دورو و ویلکاکس از جمله روش‌های کاربردی بررسی وضعیت هیدروشیمیایی آب زیرزمینی و رخساره‌های آب است. از نمودار ویلکاکس و شاخص‌های نسبت منیزیم و باقیمانده

سانتی‌گراد است. نواحی مختلف استان بر اساس طبقه‌بندی دومارتن در زیرکلاس‌های مختلف اقلیم خشک و نیمه‌خشک قرار می‌گیرند (۲). استان در نواحی دشت، پوشش آبرفتی دارد که به سمت مرکز دشت، دانه‌ها ریزتر می‌شود و در قسمت کوهستانی آن اغلب ارتفاعات لخت و صخره‌ای به چشم می‌خورد (۴۰). در این تحقیق از پارامترهای کیفی (سولفات، کلر، بی‌کربنات، اسیدیت، کل جامدات محلول، سدیم، منیزیم و کلسیم) ۷۲۹ نمونه آب از منابع آب مختلف (چشمه، چاه و قنات) در سال ۱۳۹۰ که توسط آب منطقه‌ای برداشت شده بود، استفاده شد. خلاصه آماری پارامترهای فیزیکی و شیمیایی نمونه‌های آب زیرزمینی استان کرمان و همچنین مقدار مجاز آنها بر اساس استاندارد سازمان بهداشت جهانی (۴۶) در جدول (۱) آمده است.

خوشه‌بندی نگاشت خودسازمانده (SOM)

شبکه SOM حالت خاصی از شبکه عصبی بدون ناظر است که در خوشه‌بندی و تحلیل فضاهای پیچیده داده‌ها و تصاویر مورد استفاده قرار می‌گیرد. اساس کار SOM، تبدیل فضای ورودی با بعد دلخواه به فضایی با بعد کمتر با هدف کاهش محاسبات و پیچیدگی‌های موجود در زمینه تجزیه و تحلیل داده‌ها است (۱۸ و ۲۹). شبکه SOM دارای دو لایه ورودی و خروجی است (شکل ۱) که داده‌های ورودی توسط لایه ورودی به لایه خروجی شبکه منتقل می‌شوند. تعداد نرون‌های لایه ورودی با بعد بردارها در فضای ورودی برابر است. لایه خروجی شامل مجموعه‌ای از نرون‌ها با ساختار 7×7 است که در صفحه‌ای مسطح کنار یکدیگر چیده شده‌اند (۳۷). تعداد نرون‌های موجود در لایه خروجی به مسأله مورد بررسی بستگی داشته و توسط کاربر تعیین می‌شود. وسانتو و الهن می (۴۵) تعداد تقریبی بهینه نرون‌ها را $5 \times \sqrt{n}$ (n تعداد نمونه‌های مورد بررسی) پیشنهاد دادند. همچنین هر نرون دارای بردار وزنی است و نرون‌های ورودی به کمک این بردارهای وزنی به نرون‌های لایه خروجی متصل می‌شوند.

SOM ابزاری مؤثر برای درک بهتر الگوها و فرایندهای حاکم بر کیفیت آب‌ها است.

بررسی‌ها نشان داد که تاکنون در ایران از روش خوشه‌بندی SOM به منظور تحلیل، طبقه‌بندی و کاهش داده‌های کیفی آب‌های زیرزمینی استفاده نشده است. علاوه بر این، مطالعه جامعی در زمینه خصوصیات هیدروشمیایی آبخوان‌های چندمنظوره شرب، کشاورزی و صنعتی در کل استان کرمان انجام نشده است. از این رو در این تحقیق، از شبکه SOM که از دقیق‌ترین روش‌های حال حاضر در تحلیل و شناخت فضاهای چندبعدی غیرخطی است، به منظور کاهش پیچیدگی تعداد متغیرهای ورودی و تعداد داده‌ها در تحلیل و فهم بهتر خصوصیات هیدروشمیایی کیفیت آب‌های زیرزمینی استان کرمان، بررسی الگوهای مکانی متغیرهای کیفیت آب و ارتباط بین آنها، بررسی طبقات کیفیت آب به لحاظ شرب و کشاورزی و همچنین ارزیابی اهمیت نسبی متغیرها در خوشه‌بندی داده‌ها استفاده شد. در روش مورد استفاده، متغیرهای ورودی با استفاده از روش k-means خوشه‌بندی می‌شوند. علاوه بر این مطلوبیت منابع آب قرار گرفته در هر خوشه، به منظور شرب و کشاورزی به کمک شاخص نوین ترکیبی کیفیت آب وزن‌دهی شده با آنتروپی (EWQI) و نسبت خوردگی و نمودارهای گرافیکی پایپر، ویلکاکس و دورو مورد ارزیابی قرار گرفت.

مواد و روش‌ها

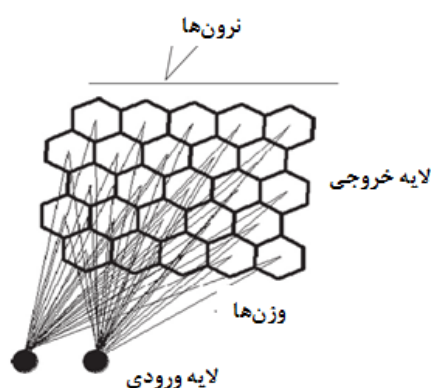
مشخصات منطقه مورد مطالعه و نمونه‌های آب

استان کرمان در جنوب شرقی ایران واقع شده و از نظر موقعیت جغرافیایی، بین طول جغرافیایی $54^{\circ}21'$ تا $59^{\circ}34'$ شرقی و عرض جغرافیایی $26^{\circ}29'$ تا $31^{\circ}58'$ شمالی قرار گرفته و مساحت آن بیش از ۱۸۱,۷۱۴ کیلومتر مربع است. میانگین بارش سالانه استان کرمان ۱۳۸ میلی‌متر است که ۵۵ درصد متوسط بارش سالیانه کشور است (۴۴). حدود ۷۵ درصد بارش سالیانه استان به علت تبخیر شدید بلافاصله از دسترس خارج می‌شود (۴۰). متوسط دمای سالانه استان ۱۷ درجه

جدول ۱. خلاصه آماری خصوصیات فیزیکی و شیمیایی نمونه‌های آب زیرزمینی.

SPUSL ^{††}	SNUSL [†]	WHO (2011)	انحراف معیار	حداکثر	حداقل	میانگین	پارامترهای کیفی آب
۹۶	۷	۵/۵ - ۶/۸	۰/۳۵	۸/۶۰	۶/۴۰	۷/۶۴	pH
۵۳	۳۸۷	۱۵۰۰	۳۵۴۰	۲۴۶۴۰	۱۷۰	۲۹۴۰	EC (μScm^{-1})
۹۷/۵	۷۱۱	۸۰	۸۱۳	۶۹۰۰	۴۵	۶۴۴	TH ($\text{mg CaCO}_3 \text{L}^{-1}$)
۲۹/۸	۲۱۷	۵۰۰	۱۴۶/۸	۱۴۶۴/۵	۵۴/۹	۲۴۸/۴	HCO ₃ ⁻ (mg L^{-1})
۴۶/۸	۳۴۱	۲۵۰	۱۳۲۹/۲	۱۱۸۱۶/۷	۵/۹	۷۳۱/۶	Cl ⁻ (mg L^{-1})
۳۷/۴	۲۷۳	۴۰۰	۴۸۲/۸	۳۸۵۰/۴	۴/۸	۴۳۱/۹	SO ₄ ²⁻ (mg L^{-1})
۳۸/۱	۲۷۸	۱۰۰	۱۷۲/۰	۱۲۴۷/۵	۹/۲	۱۳۹/۷	Ca ²⁺ (mg L^{-1})
۳۸	۲۷۷	۵۰	۹۹/۶	۹۴۷/۷	۳/۹	۷۱/۸	Mg ²⁺ (mg L^{-1})
۵۵	۴۰۱	۲۰۰	۷۲۷/۷	۷۰۱۱/۹	۳/۱	۴۷۸/۳	Na ⁺ (mg L^{-1})

WHO[†]: تعداد نمونه‌های دارای مقدار کیفی بیشتر از حد مجاز WHO، SPUSL^{††}: درصد نمونه‌های دارای مقدار کیفی بیشتر از حد مجاز WHO



شکل ۱. معماری شبکه دو بعدی و ۵ × ۵ شبکه SOM (۱۹)

می‌شود (۱۲):

$$d_{jk}^p = \sqrt{\sum_i (X_i^p - w_{jk,i})^2} \quad (1)$$

که در این معادله، X_i^p بیانگر مؤلفه i ام از p مین بردار ورودی است و $w_{jk,i}$ نشان‌دهنده بردار وزنی بین X_i^p و نرون واقع در مکان (j,k) از بردار خروجی است.

مرحله چهارم، شناسایی نرون‌هایی است که با نرون برنده همسایه هستند. در این مرحله شعاع همسایگی تعریف می‌شود

که در ابتدا گستره زیادی دارد ($\frac{1}{4}$ تا $\frac{4}{5}$ اندازه شبکه

$$w_{(jk,i)}(t+1) = w_{(jk,i)}(t) + \alpha(t)N(t,r) [X_i^p(t) - w_{(jk,i)}(t)] \quad (2)$$

که در این معادله، t بیانگر زمان، $\alpha(t)$ بیانگر تابع کاهشی زمان

عملکرد شبکه SOM بر اساس الگوریتم آموزشی کوهنن و شامل شش مرحله است (۲۱، ۲۴ و ۳۷). در مرحله اول، وزن‌های اولیه ($w_j = 1, 2, \dots$) هر نرون لایه خروجی به صورت تصادفی انتخاب می‌شود و اندازه شبکه و نرخ یادگیری اولیه در این مرحله وارد می‌شود. در گام دوم، هر یک از داده‌های ورودی ($X^p, p = 1, 2, \dots$) به صورت تک به تک به شبکه اعمال می‌شود. شباهت بین ورودی‌ها با توجه به فاصله نمایش داده می‌شود و توسط ماتریس فاصله یکپارچه (U -matrix) تفکیک می‌شود و در مرحله سوم، نرونی که کمترین فاصله و بیشترین شباهت را با داده ورودی داشته باشد به عنوان نرون برنده انتخاب می‌شود. فاصله اقلیدسی بین هر بردار ورودی و هر بردار وزنی به صورت معادله (۱) محاسبه

تحقیق حاضر، از شاخص EWQI برای ارزیابی شرب آب‌های زیرزمینی مورد بررسی استفاده می‌شود. برای محاسبه WQI از پارامترهای کیفی EC، PH، SO_4 ، Ca ، Na ، Cl ، HC_3O_3 ، Mg استفاده شد. وزن‌های مبتنی بر آنتروپی و EWQI طی چندین مرحله محاسبه می‌شود (الف) ماتریس تصمیم اولیه برای داده‌های کیفیت آب زیرزمینی شامل m نمونه (ردیف) و n متغیر (ستون) تشکیل می‌شود. (ب) از آنجایی که پارامترهای کیفیت آب زیرزمینی واحدهای مختلفی دارند، برای حذف اثر واحد و اندازه داده‌ها، ماتریس داده‌های اولیه با رابطه (۳) نرمال می‌شود. (ج) نسبت مقدار پارامتر m در نمونه j ام به مجموع مقدار آن پارامتر در m نمونه با رابطه (۴) محاسبه می‌شود. (د) در مرحله بعد آنتروپی اطلاعات با رابطه (۵) محاسبه می‌شود. مقدار آنتروپی کمتر یک پارامتر نشان‌دهنده اثربخشی بیشتر آن پارامتر است. (ه) در نهایت وزن پارامتر، j ام از رابطه (۶) محاسبه می‌شود.

$$y_{ij} = 0.1 \times \frac{x_{ij} - (x_{ij})_{\min}}{(x_{ij})_{\max} - (x_{ij})_{\min}} + 0.1 \quad (3)$$

$$P_{ij} = y_{ij} / \sum_{i=1}^m y_{ij} \quad (4)$$

$$e_j = -\frac{1}{\ln m} \sum_{i=1}^m P_{ij} \ln P_{ij} \quad (5)$$

$$\omega_j = \frac{1 - e_j}{\sum_{j=1}^n (1 - e_j)} \quad (6)$$

پس از محاسبه وزن پارامترها، برای محاسبه EWQI مقیاس رتبه‌بندی کیفی هر پارامتر از رابطه (۷) تعیین می‌شود:

$$q_j = \frac{C_j}{S_j} \times 100 \quad (7)$$

که در آن C_j و S_j به ترتیب غلظت پارامتر شیمیایی در نمونه و غلظت مجاز پارامتر در استاندارد WHO است. در نهایت شاخص کیفیت آب با وزن‌های مبتنی بر آنتروپی به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$EWQI = \sum_{j=1}^n \omega_j q_j \quad (8)$$

به طور یکنواخت است که از مقدار کوچکی (به عنوان مثال از ۰/۰۵ تا ۰/۱) شروع می‌شود. $N(t, \tau)$ تابع همسایگی نرون برنده است که معمولاً مدل گوسین است (۱۶).

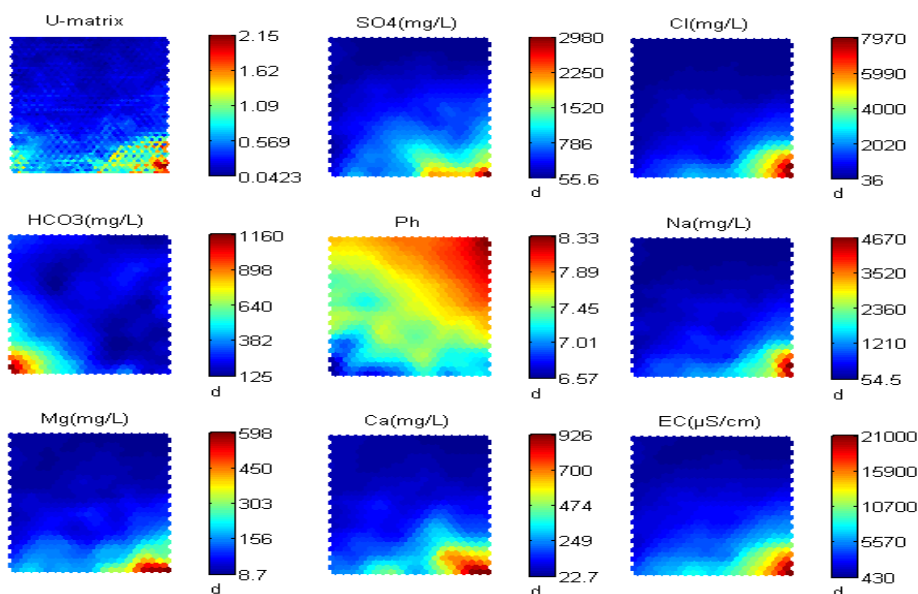
در مرحله نهایی، زمانی که $\alpha(t)$ به مقدار کوچک از پیش تعیین شده، کاهش یافت، آموزش متوقف می‌شود و داده بعدی وارد شبکه می‌شود و این روند تا تکرار مشخصی برای تمامی داده‌ها و یا رسیدن به نقطه‌ای ثابت ادامه پیدا می‌کند. در مطالعه حاضر، داده‌های هیدروشیمیایی آب زیرزمینی تا هشت خوشه ارزیابی شدند و در نهایت با شاخص Davies-Bouldin، تعداد خوشه بهینه انتخاب شد. مقدار حداقل این شاخص نشان‌دهنده تعداد خوشه بهینه در مسأله مورد بررسی است (۵).

ارزیابی کیفیت آب از منظر شرب

مقدار غلظت یون‌ها در آب‌های زیرزمینی با حد توصیه شده توسط سازمان بهداشت جهانی مقایسه شد (۴۶). همچنین به منظور ارائه نتایج به صورت قابل فهم و آسان برای مصرف‌کنندگان و تصمیم‌گیران بخش آب از شاخص کیفیت آب (WQI) مبتنی بر وزن‌دهی تئوری آنتروپی (EWQI) استفاده شد. علاوه بر این، شاخص‌های سختی کل (TH)، نسبت خوردگی (CR) و نسبت جرمی کلراید به سولفات (CSMR) برای بررسی مطلوبیت آب زیرزمینی به منظور شرب در منطقه مورد مطالعه بررسی شدند.

شاخص کیفیت آب در ترکیب با روش وزن‌دهی آنتروپی (EWQI)

مقدار WQI با محاسبه زیرشاخص‌های مربوطه و وزن‌دهی پارامترهای کیفیت آب محاسبه می‌شود. وزن هر پارامتر، اهمیت نسبی هر پارامتر کیفی را در ارزیابی نهایی کیفیت آب نشان می‌دهد. از این رو، تعیین وزن پارامترهای کیفی آب گام مهمی در فرایند ارزیابی است. روش‌های زیادی برای تعیین وزن هر پارامتر وجود دارد که یکی از آنها تئوری آنتروپی است. در



شکل ۲. شبکه مؤلفه‌ها و U-matrix نمونه‌ها و متغیرهای هیدروشیمیایی در SOM.

(IDW) با توان‌های یک، دو و سه با نرم‌افزار GS^+ بررسی و بر اساس مقایسه مقادیر خطا، بهترین روش برای رسم نقشه‌ها در محیط GIS استفاده شد.

نتایج و بحث

تحلیل هیدروشیمیایی آب با شبکه SOM

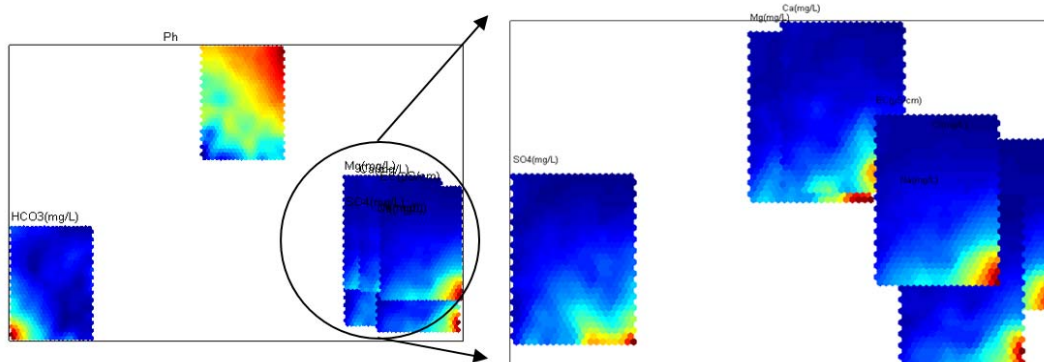
برای به دست آوردن تعداد بهینه نرون‌ها، اندازه‌های مختلف شبکه بررسی و تلاش شد شبکه‌ای انتخاب شود که بتواند پاسخگوی حجم زیاد داده‌های مورد مطالعه باشد، ضمن اینکه تعداد زیاد نرون‌های خالی در خروجی ایجاد نشود. در این صورت ابعاد 30×20 مناسب‌ترین اندازه شبکه را ایجاد کرد. در شکل (۲) صفحه مؤلفه تمامی متغیرهای هیدروشیمیایی و تغییرات نرون‌ها روی نقشه SOM آورده شده است. از شکل‌ها واضح است که گرادیان رنگ صفحه مؤلفه همه متغیرهای هیدروشیمیایی مورد بررسی به جز دو متغیر اسیدیته و بی‌کربنات روند مشابهی دارند. بیشترین مقادیر این متغیرها در نرون‌های پایین سمت راست مشاهده شد که با پیشروی به سمت بالا مقادیر آنها کاهش یافته است. بیشترین مقادیر

ارزیابی کیفیت آب برای اهداف کشاورزی

در این مطالعه از نمودار ویلکاکس (۴۷) به منظور طبقه‌بندی آب آبیاری و ارزیابی وضعیت منابع آب زیرزمینی از نظر آبیاری استفاده می‌شود. از طرفی مطلوبیت آب زیرزمینی برای آبیاری توسط هدایت الکتریکی (EC)، نسبت منیزیم و باقیمانده کربنات سدیم مورد ارزیابی قرار گرفت.

تحلیل آماری و هیدروشیمیایی داده‌ها

تحلیل آماری با استفاده از نرم‌افزارهای ۱۶ EXCEL انجام شد. در این مطالعه، شبکه SOM با استفاده از نرم‌افزار متلب آموزش داده شد. توله‌بکس مربوط به SOM، به صورت دسترسی آزاد در لینک <http://www.cis.hut.fi/projects/somtoolbox> قابل دانلود است. علاوه بر این، نمودارهای پایپر و دورو با استفاده از نرم‌افزار RockWare AqQA ترسیم شدند. در این مطالعه، نقشه‌های توزیع مکانی شاخص کیفیت آب و پارامترهای هیدروشیمیایی با استفاده از نرم‌افزار ArcGIS ۱۰/۳ تهیه شدند. برای تبدیل داده‌های نقطه‌ای به داده‌های ناحیه‌ای، روش‌های زمین‌آماری کریجینگ و وزن‌دهی عکس فاصله



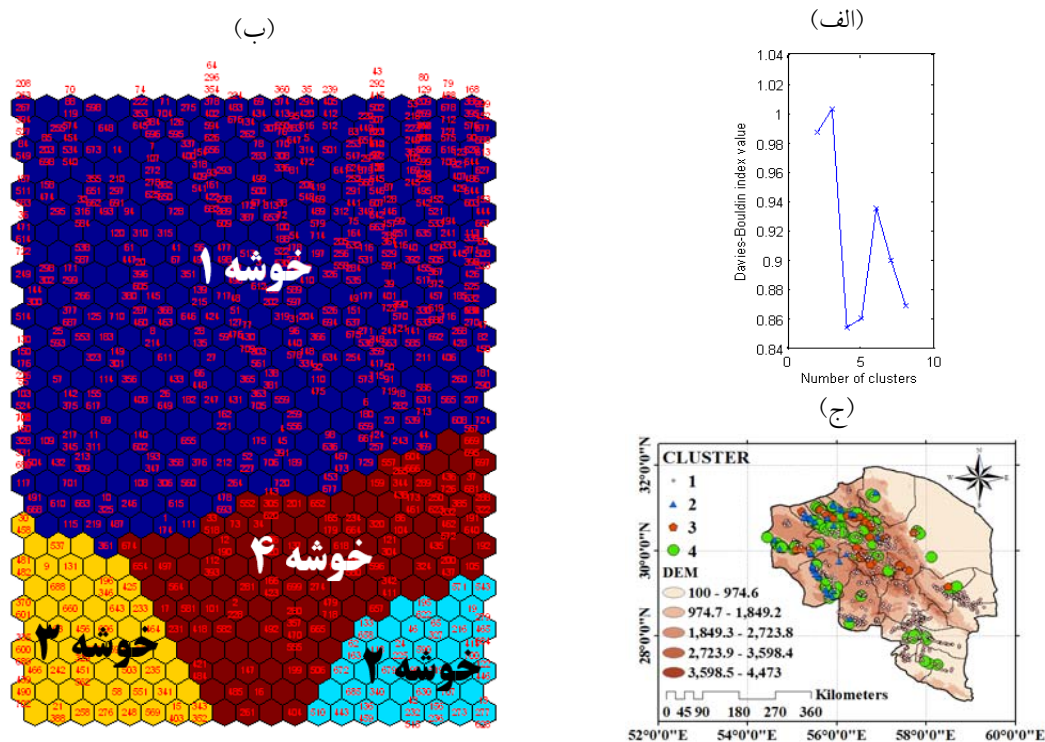
شکل ۳. همبستگی صفحات مؤلفه متغیرهای هیدروشیمیایی بر اساس تحلیل مؤلفه‌های اصلی در شبکه‌بندی SOM

گرادیان رنگ آنها در نرون‌های بالای صفحه یکسان است و در دو گوشه متضاد قرار دارند، همبستگی ندارد. همچنین صفحات مذکور با صفحه مؤلفه اسیدیته همبستگی منفی دارند. بین صفحه مؤلفه اسیدیته و بی‌کربنات هم که گرادیان رنگ معکوسی دارند، همبستگی منفی وجود دارد.

در شکل ۴- الف مقایسه تعداد خوشه‌ها بر اساس شاخص Davies-Bouldin آورده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، هشت حالت خوشه‌بندی با الگوریتم k-means مورد بررسی قرار گرفت که با توجه به شاخص Davies-Bouldin، تعداد چهار خوشه به‌عنوان بهترین حالت مورد پذیرش قرار گرفت. همچنین در شکل ۴- ب، نقشه خوشه‌بندی نرون‌های خروجی بر اساس U-matrix آورده شده است. در این شکل، اعداد نوشته شده در نرون‌های خروجی، بیانگر شماره نمونه مورد ارزیابی است. هر نمونه در نزدیک‌ترین نرون به نرون خروجی بهینه، در هر بار آموزش SOM قرار می‌گیرد. همان‌طور که نقشه U-matrix در شکل (۲) نشان داد، وفور خوشه‌ها در قسمت پایین شبکه ملاحظه شد که فاصله جبری نرون‌ها از یکدیگر زیاد بودند. نیمه بالایی شبکه که فاصله جبری نرون‌ها کم بود، در یک خوشه قرار گرفت. با بررسی نقشه‌های مؤلفه‌های شکل (۳) نیز واضح است که نمونه‌های دارای مقادیر زیاد متغیرهای سولفات، کلر، سدیم، کلسیم، منیزیم و هدایت الکتریکی در خوشه‌های ۲ و ۴ قرار گرفته‌اند. بر همین اساس، خوشه ۳ دارای مقادیر زیاد بی‌کربنات و خوشه ۱ دارای

بی‌کربنات در نرون‌های پایین سمت چپ تمرکز یافتند. روند تغییرات مقادیر اسیدیته در نرون‌های SOM کاملاً متفاوت با سایر عناصر بود به‌طوری که تمرکز بیشترین مقادیر در بالا سمت راست شبکه بود و با پیشروی به سمت گوشه پایین سمت چپ کاهش می‌یافتند. البته باید یادآور شد که مقادیر اسیدیته تقریباً در حد مجاز شرب قرار داشتند. همچنین نقشه دسته‌بندی (U-matrix) نشان می‌دهد که در نواحی پایین، گوشه‌های سمت راست و چپ، فاصله جبری نرون‌های همسایه از یکدیگر زیاد است و مشخصات این قسمت‌ها با بالای نقشه متفاوت است. بنابراین انتظار می‌رود که نرون‌های این قسمت‌ها در خوشه‌های متفاوتی قرار گیرند. برعکس در قسمت‌های بالای شبکه‌بندی SOM، رنگ مشابه بیانگر فاصله جبری کم بردارهای وزنی، فضای تحلیلی مشابه و در نتیجه خوشه واحد است.

مقایسه صفحات مؤلفه‌ها کار آسانی نیست و قضاوت فقط بر اساس نگاه بصری به نقشه‌ها و رنگ‌ها انجام می‌شود. بنابراین در تحقیق حاضر، از ترسیم نقشه تحلیل مؤلفه‌های اصلی متغیرها کمک گرفته شد (شکل ۳). صفحات مؤلفه‌هایی که در یک گروه قرار می‌گیرند، همبستگی مثبت دارند و صفحات مؤلفه‌هایی که در دو گوشه متضاد قرار گیرند همبستگی ندارند. بر این اساس، بین صفحات مؤلفه متغیرهای کلسیم، منیزیم، کلر، سدیم، سولفات و شوری همبستگی زیاد وجود دارد اما این صفحات با صفحه مؤلفه بی‌کربنات که



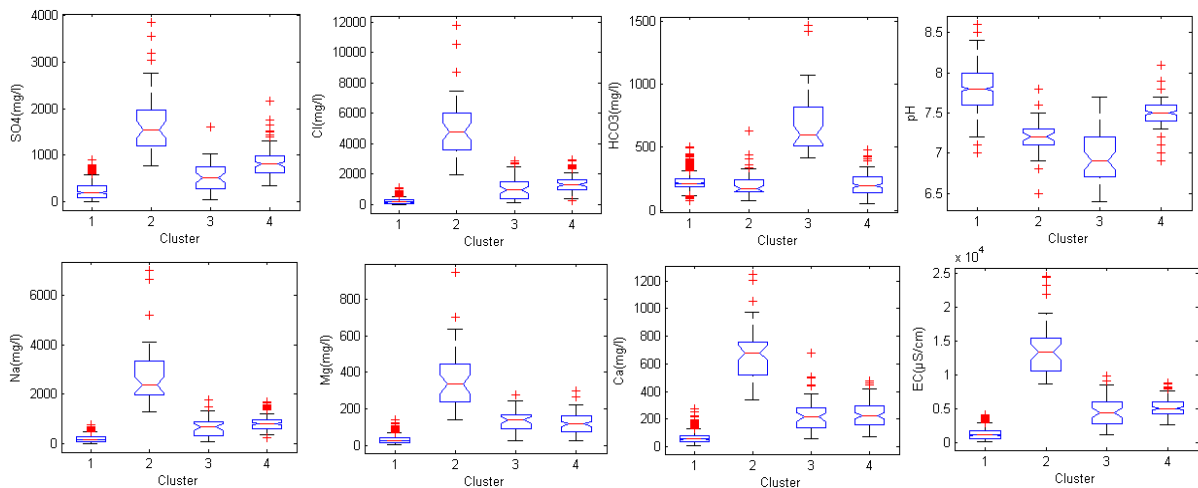
شکل ۴. الف) نمودار شاخص Davies-Bouldin، ب) الگوی خوشه‌بندی SOM نمونه‌ها و ج) توزیع مکانی خوشه‌های SOM

استان قرار گرفته‌اند. تجمع نمونه‌های قرار گرفته در خوشه ۴، در قسمت‌های شمالی و غرب استان است و چند مورد نیز در نواحی شرق و جنوبی ملاحظه می‌شود.

در شکل (۵) نمودار جعبه‌ای خصوصیات متغیرهای هیدروشیمیایی در خوشه‌های مختلف آورده شده است. ملاحظه می‌شود که خوشه‌های ۳ و ۴ دارای بیشترین مشابهت به لحاظ برخی خصوصیات کیفی آب شامل پارامترهای سدیم، کلسیم و منیزیم هستند، خوشه ۳ به‌علت سطح بالای بیکربنات از خوشه چهار متمایز می‌شود. خوشه شماره ۱ دارای کمترین مقادیر متغیرهای سولفات، کلر، سدیم، کلسیم، منیزیم و شوری است. درحالی‌که نمونه‌های با بیشترین مقادیر متغیرهای سولفات، کلر، سدیم، کلسیم، منیزیم و شوری در خوشه شماره ۲ تجمع یافته‌اند. همچنین برای بررسی وضعیت اختلاف خصوصیات هیدروشیمیایی بین خوشه‌ها، آزمون اختلاف یک‌طرفه توکی انجام شد که نتایج آن در جدول (۲) ارائه شده است. نتایج

بیشترین مقادیر اسیدیته و کمترین مقادیر سایر متغیرهای هیدروشیمیایی است. تعداد ۵۳۲ (۷۳ درصد)، ۴۵ (۶/۲ درصد)، ۴۹ (۶/۷ درصد) و ۱۰۳ (۱۴/۱ درصد) نمونه به‌ترتیب در خوشه‌های شماره ۱ تا ۴ قرار گرفتند.

شکل ۴- ج نقشه پراکنندگی نمونه‌های موجود در خوشه‌های مختلف و روی ارتفاعات مختلف استان کرمان را نشان می‌دهد. نمونه‌های واقع در خوشه ۱، تقریباً در تمامی استان پراکنده‌اند اما تجمع آنها بیشتر در قسمت‌های جنوبی و مرکزی استان (دشت‌ها و نقاط پست) است. نمونه‌های واقع در خوشه ۲، در قسمت‌های شمالی و غربی استان واقع هستند که عموماً دارای ارتفاعات زیاد و معادن زیادی هستند. بنابراین احتمال می‌رود که یکی از علل کیفیت نامناسب آب‌های زیرزمینی و مقادیر زیاد پارامترهای هیدروشیمیایی، وجود معادن مس و آهن و همچنین کویر نمک در این مناطق باشد. نمونه‌های موجود در خوشه ۳، در نواحی شمالی و مرکزی



شکل ۵. نمودار جعبه‌ای متغیرهای هیدروشیمیایی با توجه به خوشه SOM آنها

جدول ۲. نتایج مقایسه میانگین خصوصیات هیدروشیمیایی خوشه‌های مختلف SOM

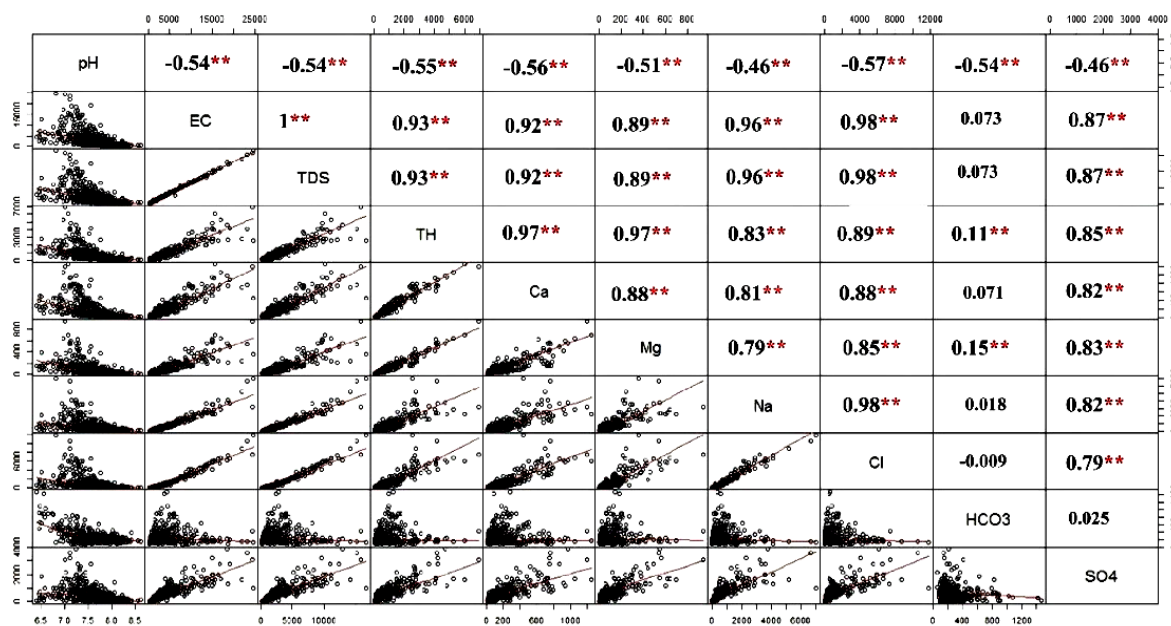
متغیر	SO ₄ (mg/L)	Cl (mg/L)	HCO ₃ (mg/L)	pH	Na (mg/L)	Mg (mg/L)	Ca (mg/L)	EC (μS/cm)
خوشه ۱	۲۳۲/۴ ^d	۲۱۷ ^d	۲۲۰/۵ ^b	۷/۸ ^a	۱۹۸/۵ ^d	۳۱/۶ ^c	۶۶/۴ ^c	۱۳۹۱/۱ ^d
خوشه ۲	۱۷۱۹/۸ ^a	۵۰۸۰/۲ ^a	۲۰۸/۲ ^b	۷/۲ ^c	۲۷۳۹/۴ ^a	۳۶۷ ^a	۶۷۱/۸ ^a	۱۴۰۶۹/۶ ^a
خوشه ۳	۵۲۹/۵ ^c	۱۰۳۱/۴ ^c	۶۷۶/۳ ^a	۶/۹ ^d	۶۵۶/۳ ^c	۱۳۴/۶ ^b	۲۳۵/۶ ^b	۴۶۰۱/۱ ^c
خوشه ۴	۸۵۲/۹ ^b	۱۳۴۶/۹ ^b	۲۰۶/۵ ^b	۷/۵ ^b	۸۵۱ ^b	۱۲۰/۵ ^b	۲۴۰ ^b	۵۳۰۴/۶ ^b

میانگین‌های دارای حروف مشترک، بدون تفاوت معنی‌دار در سطح آماري پنج درصد هستند.

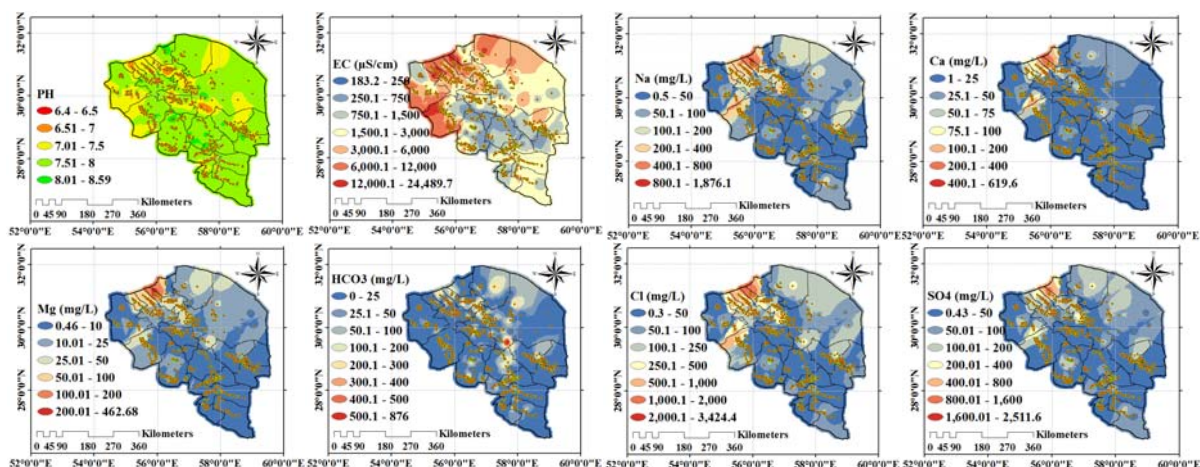
و کاتیون‌ها به‌جز بی‌کربنات بستگی دارد. به‌عبارت دیگر شوری از نوع غیرکربناته است. سختی کل با Ca، Mg، Na و SO₄ همبستگی مثبت چشمگیری داشت. مقادیر Na و Cl بیشترین همبستگی را با یکدیگر داشتند.

ارزیابی خوشه‌های SOM کیفیت آب برای مصارف شرب بررسی داده‌های کیفیت آب زیرزمینی نشان داد که غلظت کاتیون‌ها در منابع آب زیرزمینی استان کرمان پیرو الگوی $Mg^{2+} > Ca^{2+} > Na^+$ است. درحالی‌که متوسط غلظت آنیون‌ها در نمونه‌های مورد مطالعه به‌صورت $HCO_3^- > SO_4^{2-} > Cl^-$ مرتب می‌شوند. بنابراین سدیم و کلر به‌ترتیب کاتیون و آنیون غالب در آب‌های زیرزمینی استان کرمان بودند. در شکل (۷) نقشه‌های پهنه‌بندی تغییرات غلظت

مقایسه خوشه‌ها نشان داد که متغیرهای سولفات، کلر، اسیدیت، سدیم و هدایت الکتریکی دارای اختلاف معنادار ($p < 0/05$) بین تمام خوشه‌ها هستند. اختلاف بین خوشه‌های ۱، ۲ و ۴ به لحاظ متغیر بی‌کربنات معنادار نبود اما با خوشه ۳ اختلاف معناداری دارند. هیچ اختلاف معناداری بین خوشه‌های ۳ و ۴ به لحاظ متغیرهای منیزیم و کلسیم مشاهده نشد. ماتریس همبستگی متغیرهای مورد تحلیل (شکل ۶) نیز نشان می‌دهد که هیچ رابطه معنی‌داری بین pH با EC یا دیگر متغیرها وجود ندارد. بنابراین pH نقش مهمی در کنترل شیمی آب زیرزمینی ندارد. رابطه همبستگی بالایی بین EC-Ca، EC-TH، EC-TDS، EC-Mg، EC-Na، EC-Cl و EC-SO₄ وجود داشت، اما ارتباط معنی‌داری بین EC-HCO₃ وجود ندارد، بنابراین هدایت الکتریکی آب‌های زیرزمینی مورد مطالعه به غلظت همه آنیون‌ها



شکل ۶. ماتریس همبستگی پارامترهای فیزیکی - شیمیایی و یون‌های اصلی آب زیرزمینی منطقه مورد مطالعه



شکل ۷. پهنه‌بندی تغییرات غلظت متغیرهای کیفی آب آبخوان‌های استان کرمان از منظر شرب

تغییرات زیاد در EC نمونه‌های آب ممکن است مربوط به فرایندهای ژئوشیمیایی (تبادل یونی، تبخیر و فعل و انفعالات سنگ و آب)، تشکیلات زمین‌شناسی و فعالیت‌های انسانی مربوط باشد (۳۲). در میان نمونه‌های مورد مطالعه ۳۸۷ نمونه، دارای EC بیش از حد مجاز برای آب شرب بودند که مناسب آشامیدن نیستند. تقریباً در بیشتر نقاط استان (شهرهای سیرجان، شهرابک، انار، رفسنجان، زرنده، راور، کرمان، قلعه گنج، رودبار

عناصر مورد بررسی از منظر شرب آورده شده است. اگر چه اسیدیته هیچ تأثیر مستقیمی بر سلامت مصرف‌کنندگان (انسان‌ها) ندارد، اما مقادیر بالای pH سبب تشکیل رسوب در لوله‌های آب و کاهش پتانسیل گندزدایی کلراید می‌شود (۱۴). در این مطالعه مقدار pH تقریباً در تمام نمونه‌های آب در حد مجاز توصیه شده WHO قرار داشت (جدول ۱). تغییرات EC نمونه‌های آب در دامنه ۱۷۰-۲۴۶۴۰ µS/cm قرار داشتند.

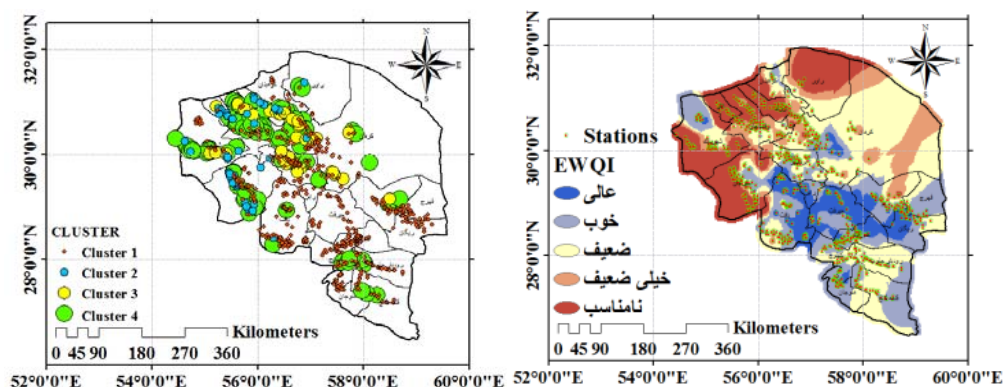
جنوب و کهنوج) غلظت بیش از حد آستانه و در قسمت‌های مرکزی و جنوب غربی استان، غلظت کمتر از حد مجاز است. متوسط غلظت Na در نمونه‌های آب ۴۸۷/۳ mg/l بود که مقدار آن در ۴۰۱ نمونه بیش از مقدار مجاز آن برای آب شرب و شامل آبخوان‌های شهرهای انار، زرنند، شمال رفسنجان، غرب کوهبنان و مرز شهرهای سیرجان و شهر بابک می‌شود. جذب بالای سدیم توسط انسان علاوه بر مشکل طعم، موجب افزایش فشار خون و تصلب شرایین می‌شود (۳۶). عناصر کلسیم و منیزیم عمدتاً به صورت ترکیب با بی‌کربنات و کمتر به شکل ترکیب با سولفات در آب‌ها یافت می‌شوند. با توجه به آستانه قابل قبول کلسیم در آب شرب از نظر طعم، غلظت کلسیم در ۳۸/۱ درصد نمونه‌ها و غلظت منیزیم در ۳۸ درصد آنها فراتر از حد مجاز بودند. نقشه پهنه‌بندی غلظت‌های دو عنصر کلسیم و منیزیم نیز مشابه یکدیگر بودند و نشان می‌دهند که مشکل غلظت زیاد این دو عنصر در قسمت‌هایی از شمال استان و در مرز دو شهرستان سیرجان و شهر بابک وجود دارد. غلظت کربنات در آب‌های طبیعی تابعی از حلالیت دی‌اکسید کربن، دما، کاتیون‌ها و دیگر نمک‌های محلول است (۲۲). متوسط بی‌کربنات در نمونه‌های آب مورد مطالعه ۲۴۸/۴ میلی‌گرم برلیتر (جدول ۱) بود و ۲۸/۹ درصد نمونه‌ها (در قسمت جنوب غربی استان کرمان) بی‌کربنات بیشتر از حد مجاز داشتند. غلظت سولفات کمتر از دیگر آنیون‌ها در آب‌های مورد مطالعه بود. یون کلر، آنیون غالب در آب‌های زیرزمینی استان کرمان بود. با توجه به حد مطلوب کلر در آب شرب، ۴۶/۸ درصد نمونه‌ها کلر بیش از مقدار مجاز داشتند. کمترین غلظت کلر در قسمت‌های مرکزی آبخوان‌های استان کرمان و بیشترین مقدار آن در قسمت‌های شمالی و غربی وجود داشت. غلظت زیاد کلر در نواحی ذکر شده، در اثر وجود اثرات حاشیه‌ای کویر نمک، انحلال نمک‌ها و همچنین ممکن است در اثر انتقال و انتشار بیش از حد فاضلاب‌های خانگی و صنعتی (تعداد معادن) و هوازدگی سنگ‌های رسوبی در اطراف نمونه‌های مورد بررسی ایجاد شده باشد. در آب‌های طبیعی غلظت کلر همبستگی قوی

با سدیم و رسانی دارد. وجود سولفات در آب آشامیدنی اثر قابل توجهی بر طعم آب دارد و سطوح بالای آن، اثر ملین بر مصرف کنندگان دارد. اختلافات طعم به کاتیون‌های مرتبط با سولفات بستگی دارد (۴۶). وجود سولفات در آب شرب در غلظت‌های بالای ۲۵۰ میلی‌گرم برلیتر ممکن است موجب طعم تلخ در آب شود. در نمونه‌های مورد مطالعه غلظت سولفات بین ۴/۸ تا ۳۸۵۰ میلی‌گرم برلیتر قرار داشتند که ۳۷/۴ درصد نمونه‌ها سولفات بیش از حد مجاز داشتند (جدول ۱). از غلظت سولفات و pH برای ارزیابی کمی اثرات زیست محیطی معادن استفاده می‌شود. غلظت‌های بالای سولفات با افزایش هدایت الکتریکی و مجموع غلظت کلسیم و منیزیم همراه است (۱۸). با توجه به وجود معادن بزرگ در استان کرمان ممکن است غلظت‌های بالای سولفات مربوط به وجود معادن باشد. نقشه پهنه‌بندی غلظت سولفات نیز همانند نقشه‌های عناصر سدیم، منیزیم، کلسیم و کلر بیانگر غلظت زیاد آن در قسمت شمالی شهرهای زرنند و کوهبنان است. بنابراین بر اساس نقشه‌های پهنه‌بندی به نظر می‌رسد که امکان استفاده شرب از آب‌های زیرزمینی استان کرمان در تمامی نواحی به جز در قسمت‌های شمالی و غرب وجود دارد اما در همین قسمت‌ها نیز غلظت برخی پارامترها از جمله شوری بیشتر از حد مجاز استاندارد شرب است که بایستی اصلاح شوند. جدول (۳) تعداد و درصد نمونه‌های حاوی مقادیر مطلوب پارامترهای هیدروشیمیایی در خوشه‌های مختلف آورده شده است. ملاحظه می‌شود که در خوشه ۱، از تعداد ۵۳۲ نمونه، بیشتر نمونه‌ها دارای حد مطلوب پارامترهای هیدروشیمیایی بودند. اما حدود نصف نمونه‌ها، مقادیر سدیم و هدایت الکتریکی مناسبی نداشتند. برعکس خوشه ۱، در خوشه ۲ وضعیت نمونه‌ها از نظر بیشتر پارامترهای هیدروشیمیایی به جز بی‌کربنات و اسیدیت مناسب نبود که نقشه مؤلفه‌ها نیز همین وضعیت را نشان می‌داد. از تعداد ۴۵ نمونه موجود در این خوشه، همگی دارای حد مطلوب اسیدیت و ۴۴ مورد دارای وضعیت مناسب بی‌کربنات بودند. در خوشه ۳، فقط وضعیت پارامتر اسیدیت در نمونه‌های

جدول ۳. تعداد (درصد^{*}) نمونه‌های دارای مقادیر متغیرهای هیدروشیمیایی در حد مطلوب استاندارد (۲۰۱۱) WHO در هر خوشه SOM

متغیر	SO ₄ (mg/L)	Cl (mg/L)	HCO ₃ ⁻ (mg/L)	pH	Na (mg/L)	Mg (mg/L)	Ca (mg/L)	EC (μS/cm)
خوشه ۱	۴۳۶ (۸۲)	۳۸۰ (۷۱/۴)	۵۳۱ (۹۹/۸)	۵۳۰ (۹۹/۶)	۳۲۲ (۶۰/۵)	۴۴۲ (۸۳/۱)	۴۴۳ (۸۳/۳)	۳۴۰ (۶۳/۹)
خوشه ۲	۰	۰	۴۴ (۹۷/۸)	۴۵ (۱۰۰)	۰	۰	۰	۰
خوشه ۳	۱۸ (۳۶/۷)	۸ (۱۶/۳)	۱۱ (۲۲/۴)	۴۴ (۸۹/۸)	۶ (۱۲/۲)	۵ (۱۰/۲)	۵ (۱۰/۲)	۲ (۴/۱)
خوشه ۴	۲ (۱/۹)	۰	۱۰۳ (۱۰۰)	۱۰۳ (۱۰۰)	۰	۵ (۴/۹)	۳ (۲/۹)	۰

* درصد نسبت به تعداد کل نمونه‌های موجود در هر خوشه (۵۳۲ نمونه در خوشه ۱، ۴۵ نمونه در خوشه ۲، ۴۹ نمونه در خوشه ۳ و ۱۰۳ نمونه در خوشه ۴) حساب شده است



شکل ۸. پهنه‌بندی تغییرات EWQI و خوشه‌های کیفی آب آبخوارهای استان کرمان از منظر شرب ارزیابی شاخص‌های

خوردگی و سختی خوشه‌های SOM از منظر شرب.

وضعیت عالی از نظر کیفیت آب شرب هستند. این نمونه‌ها تماماً در خوشه ۱ قرار گرفته‌اند. وضعیت EWQI در تعدادی از نمونه‌های قسمت‌های جنوب شرقی، جنوبی، مرکزی و تعداد اندکی در غرب استان، در حد کیفی خوب است. از کل نمونه‌های دارای وضعیت خوب EWQI، تعداد ۱۹۸ نمونه در خوشه ۱ و ۷ نمونه در خوشه ۳ قرار گرفته‌اند. بر اساس EWQI، فقط ۳۳/۶ درصد از مساحت استان، شامل منابع آب زیرزمینی در وضعیت عالی و خوب به لحاظ شرب است. اما در همین پهنه کیفی خوب نیز بایستی اصلاحاتی از نظر سختی کل روی آب‌ها انجام شود تا استفاده از این آب‌ها، عوارض سلامتی ایجاد نکند. مقادیر EWQI برای ۱۴۷ نمونه در دسته‌بندی ضعیف و در دامنه ۱۰۰-۱۹۹/۹۹ قرار داشت. همچنین، تعداد نمونه‌های قرار گرفته در دسته‌های بسیار ضعیف و نامناسب

موجود در خوشه (۴۹ مورد) مناسب بودند و بیشتر نمونه‌ها دارای حد مطلوب برای بقیه پارامترهای مورد بررسی نبودند. وضعیت خوشه ۴ نیز مانند خوشه ۲ بود. بنابراین ملاحظه می‌شود که خوشه‌بندی نمونه‌ها از نظر پارامترهای هیدروشیمیایی، می‌تواند اطلاعات مفیدی را در اختیار قرار دهد و از پیچیدگی تفسیر نتایج نیز کاسته می‌شود. بر اساس اطلاعات به‌دست آمده، فقط آب‌های زیرزمینی تعدادی از نمونه‌های موجود در خوشه ۱ و در نواحی مرکزی، جنوبی و جنوب شرقی استان کرمان مناسب شرب است.

ارزیابی شاخص EWQI آب برای خوشه‌های SOM

در شکل (۸) نقشه پهنه‌بندی EWQI برای اهداف شرب نشان می‌دهد که تعداد ۱۹۳ نمونه در قسمت مرکزی استان دارای

تغییرات آنها را نشان می‌دهد. از جدول ملاحظه می‌شود که وضعیت خوردگی در بیشتر نمونه‌ها (۸۸/۶ درصد) در حد نامطلوب است که پتانسیل خوردگی لوله‌ها و ورود سرب به آب را دارا هستند. علاوه بر این CR در ۷۷/۹ درصد نمونه‌ها بیش از حد مجاز بود. بنابراین انتقال آب زیرزمینی استان به وسیله لوله‌های فلزی نامطمئن بوده و باید برای انتقال آب از لوله‌های ضدخوردگی استفاده شود (۴۳). نقشه پهنه‌بندی سختی کل (شکل ۹) نیز بیانگر وضعیت سخت و بسیار سخت آب در بیشتر قسمت‌های منابع آب زیرزمینی استان کرمان است به طوری که برای استفاده شرب این آب‌ها بایستی اصلاحات لازم صورت گیرد. بر اساس TH، فقط چهار درصد از مساحت استان، شامل منابع آب زیرزمینی در وضعیت نرم و نسبتاً سخت (تعداد ۹۳ نمونه) به لحاظ شرب و در نواحی جنوبی استان است که در این نواحی، ۷۴ نمونه در خوشه ۱ قرار می‌گیرند.

ارزیابی کیفیت آب مصارف کشاورزی بر اساس خوشه‌های SOM
 مطلوبیت آب زیرزمینی برای آبیاری بر اساس شاخص‌های هدایت الکتریکی (EC)، شوری پتانسیل (PS)، نسبت جذب سدیم (SAR)، باقیمانده کربنات سدیم (RSC) و نسبت منیزیم (MR) ارزیابی و برای طبقه‌بندی آب زیرزمینی از دیاگرام ویلکاکس استفاده شد.

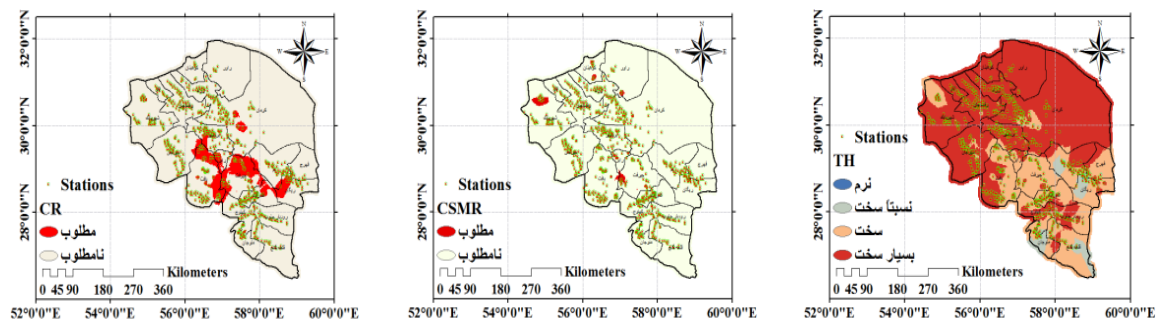
بررسی نمونه‌های آب در استان کرمان نشان داد که ۴۷۳ نمونه، شوری از حد عالی تا مجاز دارند و برای آبیاری قابل استفاده هستند. این نمونه‌ها بیشتر در خوشه ۱ قرار دارند (جدول ۵). استفاده از این آب‌ها تنها برای گیاهان متحمل به شوری، با زهکشی عالی، آبشویی مکرر و مدیریت قوی مجاز است. در شکل (۱۰)، نقشه پهنه‌بندی خطر شوری نشان می‌دهد که نواحی مرکزی، جنوب، جنوب شرقی و جنوب غربی دارای منابع آب حاوی شوری تا حد مجاز است. خطر شوری در نواحی شمالی و غربی استان (خوشه‌های ۲، ۳ و ۴) بسیار زیاد است. دانین (۷) دریافت که مطلوبیت آب برای آبیاری وابسته

به ترتیب برابر با ۶۵ و ۷۴ مورد بود. نواحی شرقی، شمالی و غربی و قسمتی از مناطق جنوبی در شهرستان قلعه گنج، وضعیت EWQI ضعیف تا نامناسب دارند. ملاحظه می‌شود علیرغم اینکه مقادیر برخی پارامترها مانند سدیم، کلسیم، منیزیم، بی‌کربنات، کلر و سولفات در این نواحی در حد مطلوب است اما به دلیل مقادیر زیاد هدایت الکتریکی و حتی سختی کل نمونه‌ها، مناطق مذکور در دسته‌ها ضعیف تا نامناسب قرار گرفته‌اند. نمونه‌های دارای وضعیت‌های خیلی ضعیف و نامناسب EWQI در خوشه‌های ۲، ۳ و ۴ قرار داشتند و هیچ نمونه‌ایی در خوشه ۱، وضعیت نامناسب را اختیار نکرده است.

خوردگی در سیستم‌های انتقال و توزیع آب بسیار هزینه‌بر است و با توجه به اینکه خوردگی لوله‌ها سبب بروز سرب و مس در آب شیر در منزل می‌شود، کنترل خوردگی مهم است. مقدار بالای کلر تمایل آب به افزایش خوردگی لوله‌ها در سیستم توزیع آب را افزایش می‌دهد. دو شاخص CR و CSMR برای بیان اثر کلراید بر پتانسیل خوردگی آب به کار می‌روند. شاخص CSMR به خوردگی گالوانیک سرب مربوط می‌شود در حالی که CR مربوط به خوردگی آب در لوله‌های استیل و آهن است (۴۲). چنانچه مقدار شاخص CSMR بزرگ‌تر از ۵/۰ شود، پتانسیل خوردگی گالوانیک اتصالات سربی در سیستم توزیع آب افزایش می‌یابد (۲۷). سختی آب عموماً ناشی از عناصر قلیایی خاکی مانند کلسیم و منیزیم است. بسته به تعامل عوامل دیگر مانند pH و قلیائیت، آب با سختی بالای ۲۰۰ mg/l می‌تواند باعث ته‌نشست رسوبات در سیستم‌های توزیع آب، لوله‌ها و تانک‌های خانگی شود. همچنین سختی بالای آب موجب مصرف بالای صابون می‌شود. آب‌های سخت در زمان گرمایش تشکیل رسوب کربنات کلسیم می‌دهند. آب با سختی کمتر از ۱۰۰ میلی‌گرم بر لیتر (آب نرم) ظرفیت بافوری کمی دارد و بنابراین برای لوله‌های آب خورنده است (۴۶). جدول (۴) طبقه‌بندی آب‌های زیرزمینی استان کرمان را بر اساس شاخص‌های خوردگی و پارامتر سختی کل و شکل (۹) نقشه پهنه‌بندی

جدول ۴. طبقه‌بندی نمونه‌های موجود در خوشه‌های SOM بر اساس نسبت خوردندگی، نسبت کلر به سولفات و سختی کل از منظر شرب

پارامتر کیفی	معادله	دامنه تغییرات	طبقه کیفی	تعداد نمونه‌ها
سختی کل (۳۸)		<۷۵	نرم	خوشه ۱: ۹-خوشه ۲: ۰-خوشه ۳: ۲، خوشه ۴: ۴
کاتیون‌ها برحسب (meq/L)	$TH = (Ca^{2+} + Mg^{2+}) \times 50$	۱۵۰-۷۵	نسبتاً سخت	خوشه ۱: ۶۵-خوشه ۲: ۵-خوشه ۳: ۵، خوشه ۴: ۳
		۳۰۰-۱۵۰	سخت	خوشه ۱: ۱۶۸-خوشه ۲: ۱۴-خوشه ۳: ۱۷، خوشه ۴: ۳۴
		>۳۰۰	بسیار سخت	خوشه ۱: ۲۹۰-خوشه ۲: ۲۶-خوشه ۳: ۲۵، خوشه ۴: ۶۲
نسبت خوردندگی (۳۵) آنیون‌ها برحسب (mg/L)	$CR = \frac{Cl^- + 2\left(\frac{SO_4^{2-}}{96}\right)}{2\left(\frac{HCO_3^- + CO_3^{2-}}{100}\right)}$	<۱	مطلوب	خوشه ۱: ۱۱۰-خوشه ۲: ۱۵-خوشه ۳: ۱۶، خوشه ۴: ۲۰
		>۱	نامطلوب	خوشه ۱: ۴۲۲-خوشه ۲: ۳۰-خوشه ۳: ۳۳، خوشه ۴: ۸۳
نسبت جرمی کلراید به سولفات (۲۷) آنیون‌ها برحسب (mg/L)	$CSMR = \frac{Cl^-}{SO_4^{2-}}$	<۰/۵	مطلوب	خوشه ۱: ۵۴-خوشه ۲: ۹-خوشه ۳: ۱۰، خوشه ۴: ۱۰
		>۰/۵	نامطلوب	خوشه ۱: ۴۷۸-خوشه ۲: ۳۶-خوشه ۳: ۳۹، خوشه ۴: ۹۳



شکل ۹. پهنه‌بندی تغییرات سختی کل شاخص‌های خوردندگی آبخوان‌های استان کرمان.

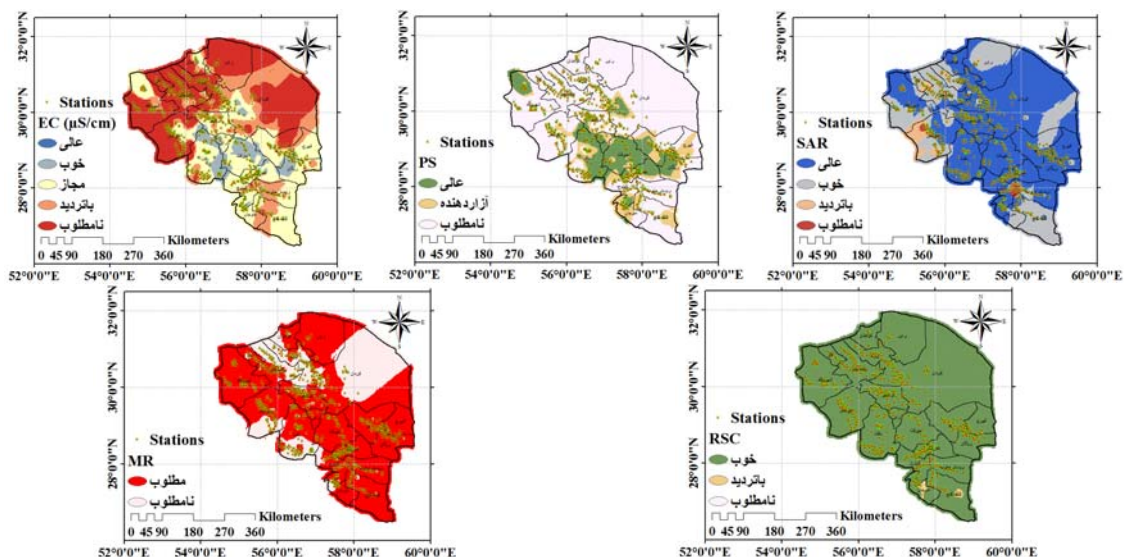
خطر سدیمی یا قلیایی شدن خاک با شاخص SAR بیان می‌شود. استفاده از آب آبیاری با غلظت سدیم بالا ممکن است منجر به افزایش محتوای سدیم خاک و در نتیجه کاهش نفوذپذیری شود. علاوه بر این ساختمان خاک تحت تأثیر قرار گرفته و خاک سخت شده و برای ظهور جوانه نامناسب می‌شود (۱۷). با توجه به گستردگی محل‌های نمونه‌برداری، انحراف معیار SAR بالا بود و تغییرات بالایی در قلیابیت آب دیده شد. بر اساس طبقه‌بندی SAR (جدول ۵)، قلیابیت ۹۵ درصد نمونه‌ها در حد عالی خوب بود و فقط ۵ درصد نمونه‌ها باترید باید استفاده شوند و یا در کل برای آبیاری نامطلوب هستند.

به‌غلظت نمک‌های محلول نیست. او بر این عقیده بود که نمک‌های با حلالیت کم در خاک ترسیب کرده و در آبیاری‌های متوالی در خاک تجمع می‌یابند، درحالی‌که غلظت نمک‌های با حلالیت بالا، شوری خاک را افزایش می‌دهد. در استان کرمان، ۳۰/۹ درصد نمونه‌ها پتانسیل شور کردن خاک کمی دارند و در رده کیفی عالی تا خوب قرار می‌گیرند. بنابراین بیش از نیمی از نمونه‌های آب زیرزمینی در سال مورد مطالعه، پتانسیل بالای شور کردن خاک را داشتند که این نمونه‌ها در خوشه‌های ۲، ۳ و ۴ (جدول ۵) و در نواحی شرقی، شمالی و غربی استان (شکل ۱۰) قرار دارند.

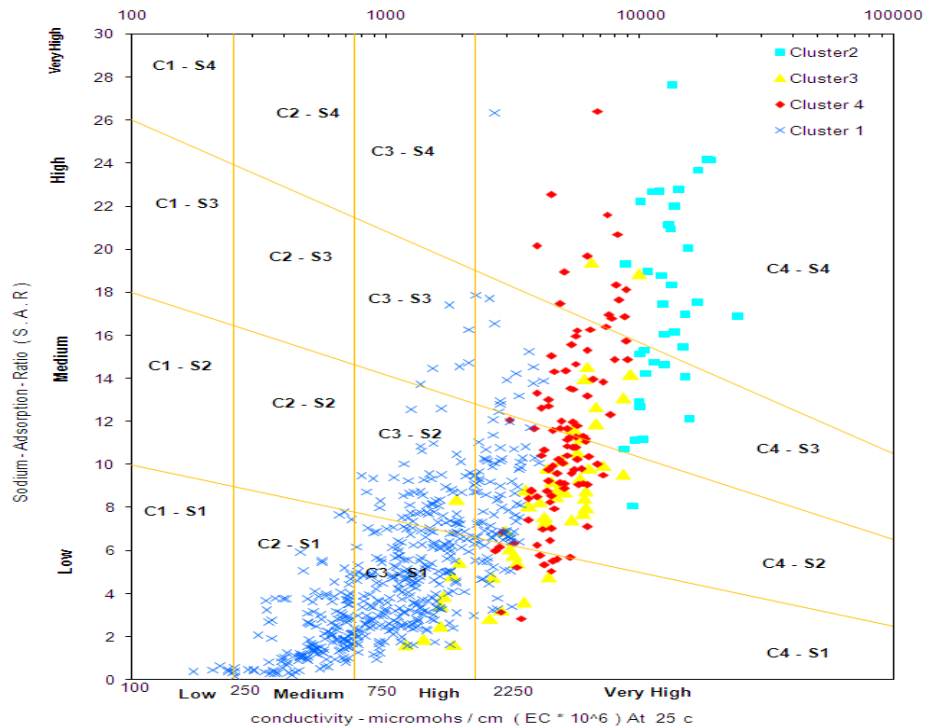
جدول ۵. طبقه‌بندی طبقه‌بندی نمونه‌های موجود در خوشه‌های SOM برای اهداف آبیاری

پارامتر	معادله	دامنه تغییرات	طبقه کیفی	تعداد نمونه‌ها
خطر شوری	EC, dS/cm	< ۰/۲۵	عالی	خوشه ۱: ۵
		۰/۲۵-۰/۷۵	خوب	خوشه ۱: ۱۵۰
		۰/۷۵-۲	مجاز	خوشه ۱: ۲۶۴-خوشه ۳: ۹
		۲-۳	با تردید	خوشه ۱: ۷۹-خوشه ۳: ۴، خوشه ۴: ۴
شوری پتانسیل (۷)	$PS = Cl^- + \frac{1}{2}SO_4^{2-}$	< ۵	عالی تا خوب	خوشه ۱: ۲۲۳-خوشه ۳: ۲
		۵-۱۰	آزار دهنده	خوشه ۱: ۱۴۷-خوشه ۳: ۷
		> ۱۰	نامطلوب	خوشه ۱: ۱۶۲-خوشه ۲: ۴۵-خوشه ۳: ۴۰-خوشه ۴: ۱۰۳
خطر قلیایی شدن (۳۴)	$SAR = \frac{Na^+}{\sqrt{(Ca^{2+} + Mg^{2+})/2}}$	< ۱۰	عالی	خوشه ۱: ۴۸۵-خوشه ۲: ۱-خوشه ۳: ۳۷-خوشه ۴: ۴۱
		۱۰-۱۸	خوب	خوشه ۱: ۴۶-خوشه ۲: ۱۹-خوشه ۳: ۱۰-خوشه ۴: ۵۳
		۱۸-۲۶	با تردید	خوشه ۲: ۱۵-خوشه ۳: ۲-خوشه ۴: ۸
		> ۲۶	نامطلوب	خوشه ۱: ۱-خوشه ۲: ۱۰-خوشه ۴: ۱
نسبت منیزیم (۳۱)	$MR = \frac{Mg^{2+}}{Ca^{2+} + Mg^{2+}} \times 100$	< ۵۰٪	مطلوب	خوشه ۱: ۳۸۹-خوشه ۲: ۲۹-خوشه ۳: ۲۲-خوشه ۴: ۶۳
		> ۵۰٪	نامطلوب	خوشه ۱: ۱۴۳-خوشه ۲: ۱۶-خوشه ۳: ۲۷-خوشه ۴: ۴۰
باقیمانده کربنات کلسیم (۹)	$RSC = \left(HCO_3^- + CO_3^{2-} \right) - \left(Ca^{2+} + Mg^{2+} \right)$	< ۱/۲۵	خوب	خوشه ۱: ۴۹۲-خوشه ۲: ۴۵-خوشه ۳: ۴۵-خوشه ۴: ۱۰۳
		۱/۲۵-۲/۵	با تردید	خوشه ۱: ۳۴-خوشه ۳: ۲
		> ۲/۵	نامطلوب	خوشه ۱: ۶-خوشه ۳: ۲

محاسبات بر اساس واحد meq/L کاتیون‌ها و آنیون‌ها انجام می‌شود.



شکل ۱۰. پهنه‌بندی تغییرات شاخص‌های ارزیابی آب زیرزمینی از منظر کشاورزی



شکل ۱۱. طبقه‌بندی آب آبیاری خوشه‌های SOM بر اساس دیاگرام ویلکاکس

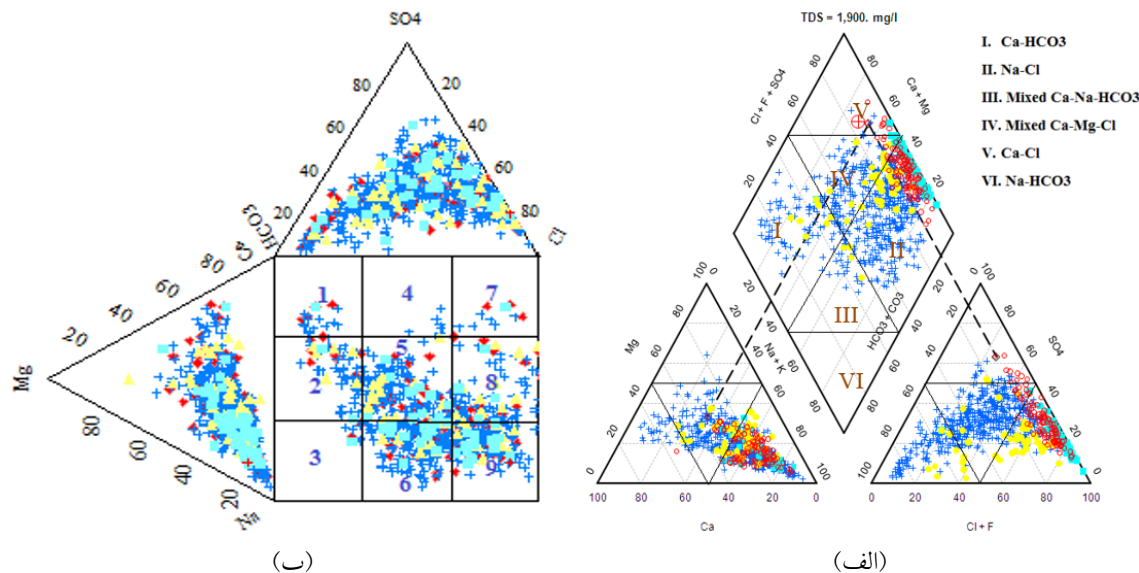
بی‌کربنات، زمانی که آب در خاک به شدت تغلیظ می‌شود، تمایل به رسوب کلسیم و منیزیم دارند (۳۳). بر اساس طبقه‌بندی جدول (۵)، ۹۳/۸ درصد نمونه‌ها از نظر RSC در رده کیفی خوب برای آبیاری هستند که در خوشه ۱ قرار گرفته‌اند.

علاوه بر طبقه‌بندی‌های ذکر شده، دیاگرام آزمایشگاه شوری خاک آمریکا برای بیان مطلوبیت آب‌های زیرزمینی در استان کرمان به کار گرفته شد (شکل ۱۱). تعداد ۱۵۵ نمونه موجود در خوشه ۱ در کلاس‌های C۱S۱ و C۲S۲ قرار داشتند که این کلاس‌ها دارای کیفیت خوب برای مصارف کشاورزی هستند و مشکلی به لحاظ شوری و قلیائیت ایجاد نمی‌کنند.

۲۸۰ نمونه خوشه ۱ در کلاس‌های C۳S۱ و C۳S۲ که برای استفاده کشاورزی از آنها، بایستی خاک‌های منطقه شرایط زهکشی مناسبی داشته باشند. ضمن اینکه پنج نمونه، کلاس C۳S۳ داشتند که نیازمند اصلاح با گچ یا استفاده از این آب در خاک‌های سبک هستند. نمونه‌های خوشه‌های ۲، ۳ و ۴ در وضعیت نامناسبی از نظر شوری و قلیایی قرار دارند به طوری که

نمونه‌های نامطلوب در خوشه‌های ۲، ۳ و ۴ و در شهرهای انار، سیرجان، کهنوج و رودبار جنوب قرار داشتند. بنابراین برای استفاده از این آب‌ها برای آبیاری در مناطق بیان شده، باید از گچ برای تبادل یون سدیم و کاهش اثرات مخرب سدیم استفاده شود.

به طور کلی کلسیم و منیزیم در بیشتر آب‌ها در وضعیت تعادل هستند. سطوح بالای منیزیم معمولاً به علت وجود سدیم قابل تبادل در خاک‌های آبیاری شده است. شاخص MR برای بررسی خطر منیزیم به کار می‌رود. در این مطالعه ۶۹ درصد نمونه‌های آب زیرزمینی در حد مطلوب قرار داشتند و ۳۱ درصد نمونه‌ها، MR بیشتر از ۵۰ درصد داشتند که خاک را قلیایی نموده و بر عملکرد محصول اثر می‌گذارند (جدول ۵). نمونه‌های دارای خطر منیزیم بالا تقریباً در تمامی خوشه‌ها پراکنده بودند. همچنین باقیمانده کربنات سدیم (RSC) برای تعیین اثر کربنات و بی‌کربنات بر کیفیت آب زیرزمینی به منظور آبیاری و کشاورزی محاسبه می‌شود. آب‌های با غلظت بالای



شکل ۱۲. توصیف خصوصیات هیدروشیمیایی خوشه‌های SOM با (الف) نمودار سه خطی پایپر و (ب) نمودار دورو

محدود به سدیم می‌شود. مثلث سمت راست (آنیون‌ها) نیز نشان می‌دهد که از نظر آنیونی، آب‌های زیرزمینی خوشه‌های ۱ و ۳ منطقه مورد بررسی عموماً رخساره $\text{Cl}^- - \text{HCO}_3^-$ دارند. نمونه‌های خوشه ۴ حاوی رخساره $\text{SO}_4^{2-} - \text{Cl}^-$ و خوشه ۲ کلریدی هستند. در آبخوان‌های مناطق خشک و نیمه‌خشک یون‌های Cl^- و Na^+ متداول‌ترین یون‌هایی هستند که در آب یافت می‌شوند (۱۳). بر اساس نمودار پایپر در منطقه مورد مطالعه رخساره‌های هیدروشیمیایی $\text{Na}^+ - \text{Cl}^-$ ، $\text{Ca}^{2+} - \text{Mg}^{2+} - \text{Cl}^-$ ترکیبی و $\text{Ca}^{2+} - \text{HCO}_3^-$ به ترتیب فراوانی بیشتری داشته و غالب بودند (شامل خوشه‌های ۱ و ۳). در بخش II نمودار پایپر که اغلب نمونه‌های آب زیرزمینی منطقه در آن قرار گرفتند، قلیابیت غیر کربناته بیش از ۵۰ درصد بوده و اسیدهای قوی و قلیا غالب است. نمونه‌های شورآبه و آب دریا معمولاً در ناحیه II قرار می‌گیرند. در قسمت IV هیچ آنیون و کاتیونی غالب نیست و حالت اختلاط آب‌ها وجود دارد. نمونه‌های قرار گرفته در بخش I سختی بی‌کربناته (سختی موقت) داشته و خصوصیت شیمیایی قلیایی خاکی و اسیدهای ضعیف دارند (۳۰). اغلب نمونه‌های خوشه‌های ۲ و ۴ رخساره‌های هیدروشیمیایی $\text{Na}^+ - \text{Cl}^-$ غالب است. شکل ۱۲ (ب) موقعیت نمونه‌های آب زیرزمینی منطقه

بیشتر کلاس‌های CaSO_4 ، CaSO_3 ، CaSO_2 ، CaSO_1 را به خود اختصاص می‌دهند. فقط ۹ نمونه خوشه ۳ واقع در کلاس‌های CaSO_2 و CaSO_1 با اعمال شرایط زهکشی قابلیت استفاده دارند. بنابراین بر اساس طبقه‌بندی ویلکاس از آب نمونه‌های این خوشه‌ها برای کشاورزی و آبیاری خاک‌هایی با نفوذپذیری پایین نمی‌توان استفاده کرد. در غیر این صورت خطرات نابودی خاک‌ها را در پی دارد. بنابراین در صورت اجبار استفاده از این آب‌ها بایستی برای خاک‌های سبک و شنی با نفوذپذیری بالا و گیاهان مقاوم به شوری مصرف شود.

خصوصیات هیدروشیمیایی آب خوشه‌های SOM

در این مطالعه هیدروژئوشیمیایی، آب‌های زیرزمینی استان کرمان با رسم مقدار کاتیون‌ها (Ca^{2+} و Mg^{2+} ، Na^+) و آنیون‌های اصلی (HCO_3^- ، SO_4^{2-} ، Cl^-) همه نمونه‌های آب زیرزمینی در دوره مورد مطالعه روی دیاگرام مثلثی پایپر (۳۰) و نمودار دورو (۸) ارزیابی شد (شکل ۱۲). این نمودارها برای نمایش ترکیب شیمیایی آب زیرزمینی بسیار مفید هستند. مثلث سمت چپ در شکل ۱۲ نشان می‌دهد که تیپ $\text{Na}^+ - \text{Ca}^{2+} -$ در نمونه‌های آب زیرزمینی در خوشه ۱ غالب است که در مورد نمونه‌های خوشه‌های ۲، ۳ و ۴

اختلاط مهم‌ترین فرایند در تغییر ترکیب (نواحی ۵، ۶ و ۹) آب زیر زمینی بوده و پس از آن تبادل یونی معکوس (ناحیه ۸) و تبادل یونی (ناحیه ۲) قرار می‌گیرند. بررسی نمودار دورو بر اساس خوشه‌های SOM نشان داد که نمونه‌های خوشه ۱ به ترتیب در نواحی ۶، ۵ و ۹ قرار گرفتند که نشان‌دهنده غالبیت فرایند انحلال و اختلاط در خوشه ۱ است. نمونه‌های خوشه ۲ و ۴ اغلب در ناحیه ۹ قرار گرفتند که نشان می‌دهد آب‌های این دو خوشه در حال اختلاط با پساب‌های کشاورزی بوده و شوری بالایی دارند. نمونه‌های خوشه ۳ در نواحی ۵، ۹ و ۸ قرار گرفتند که بدان معناست که علاوه بر اختلاط و انحلال، تبادل یونی معکوس فرایند غالب بر این خوشه است.

نتیجه‌گیری

در این مطالعه الگوریتم نگاشت خودسازمانده (SOM) برای خوشه‌بندی داده‌های هیدروشیمیایی شامل یون‌های اصلی، اسیدیته و هدایت الکتریکی ۷۲۹ نمونه آب زیرزمینی، به منظور بررسی مطلوبیت منابع آب زیرزمینی استان کرمان برای اهداف شرب و کشاورزی مورد استفاده قرار گرفت. علاوه بر این خصوصیات هیدروژئوشیمیایی آب‌های زیرزمینی منطقه مورد مطالعه با نظر به خوشه‌بندی تعیین شده و نمودارهای پایپر و دورو توضیح داده شد. مطلوبیت آب برای اهداف شرب با استاندارد WHO، شاخص خوردگی، سختی کل و شاخص کیفیت آب مبتنی بر وزن‌های آنتروپی (EWQI) ارزیابی شد. نمودار ویلکاکس و شاخص‌های SAR، PS، EC، KR و MR برای بررسی تناسب منابع آب برای آبیاری مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این مطالعه نشان داد که نمونه‌های مورد مطالعه در چهار خوشه قرار گرفتند. خوشه‌های ۱، ۲، ۳ و ۴ به ترتیب مشکل از ۷۳، ۶/۲، ۶/۷ و ۱۴/۱ درصد نمونه‌های آب زیرزمینی بودند. نتایج نشان داد که نمونه‌های خوشه ۱ دارای کمترین سطح از نظر آنیون‌ها، کاتیون‌ها و شوری بودند. بررسی مطلوبیت این خوشه برای شرب نشان داد که شوری و سدیم در نیمی از نمونه‌های این خوشه بیش از مقدار مجاز در استاندارد WHO

مطالعاتی در نمودار دورو را نشان می‌دهد. نمودار دورو با شناسایی فرایندهایی که در آبخوان اتفاق می‌افتد و طبقه‌بندی آب زیرزمینی، بینش بیشتری از رخساره‌های هیدروشیمیایی به دست می‌دهد. کیفیت آب با توجه به دیاگرام دورو به ۹ قسمت در مستطیل مرکزی تقسیم می‌شود (۲۵). منابع آب منطقه مورد مطالعه در هر ۹ ناحیه دیاگرام دورو واقع شدند که رتبه هر بخش با توجه به ترتیب فراوانی نمونه‌های آب و اهمیت آنها به ترتیب ۵، ۶، ۹، ۸، ۲، ۱، ۷، ۳ و ۴ بود. تعداد نمونه‌های آب در کلاس‌های ۱، ۷، ۳ و ۴ نسبت به تعداد منابع آب دارای سایر تیپ‌ها ناچیز بوده و قابل صرف نظر کردن است. بیشتر منابع آب استان در بخش‌های ۵ و ۶ قرار گرفتند. تیپ ۵ آب‌هایی هستند که در آنها هیچ آنیون و کاتیونی غالب نیست و نشان‌دهنده انحلال ساده یا اختلاط آب زیرزمینی به عنوان واکنش شیمیایی غالب در این مناطق است. انحلال پیش‌رونده مواد معدنی با حرکت آب زیرزمینی به سمت پایین دست منبع تغذیه سبب افزایش TDS می‌شود. به علاوه این ناحیه می‌تواند نشانگر اختلاط دو تیپ مختلف آب باشد. در زیربخش ۶، SO_4^{2-} آنیون غالب و Na^+ کاتیون غالب است و آب‌هایی که در این کلاس قرار می‌گیرند احتمالاً تحت واکنش‌های اختلاط قرار دارند. ناحیه ۹، سومین تیپ از نظر فراوانی در آب‌های استان بود که با یون‌های غالب Cl^- و Na^+ مشخص می‌شود و مربوط به کلاس آب‌هایی است که مسافت زیادی را طی کرده و از منبع تغذیه دور شده و در منطقه انتهایی دشت (منطقه تخلیه و زهکش‌ها) قرار گرفته‌اند.

ناحیه ۸ در درجه چهارم از نظر اهمیت قرار داشت، در این تیپ Cl^- آنیون غالب است و هیچ کاتیونی غالب نیست، آب‌های این ناحیه در وضعیت تبادل یونی معکوس NaCl هستند که اغلب این وضعیت در اثر نفوذ آب بسیار شور به وجود می‌آید. زیربخش ۲، از نظر اهمیت در رتبه بعدی قرار دارد، در این ناحیه، HCO_3^- آنیون و Mg^{+2} کاتیون غالب است و تبادل یونی در این ناحیه مفروض است و آب‌های این ناحیه وضعیت افزایش Na^+ را نشان می‌دهند. بنابراین انحلال و

شمال استان قرار گرفته و همچنین مجاورت با کویر، برداشت بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی به منظور کشاورزی و همین‌طور اثرات اختلاط پساب شهری با آب زیرزمینی موجب کاهش کیفیت آب در این مناطق شده است به طوری که شهرهای راور، زرنند، رفسنجان و شهر بابک (معادن مس) دارای پایین‌ترین کیفیت آب هستند. کیفیت آب در این مناطق حتی برای کشاورزی هم بسیار پایین و در کلاس‌های $C4S1$ ، $C4S2$ ، $C4S3$ و $C4S4$ قرار گرفتند. کیفیت پایین آب در این مناطق به همراه افت سطح آب زیرزمینی موجب خشک شدن بسیاری از باغات پسته شده است، لذا آبشویی، استفاده از گچ کشاورزی برای تبادل یونی، کاربرد اسید برای اصلاح اسیدیته و استفاده از گوگرد برای اصلاح وضعیت خاک آبیاری شده با آب با کیفیت نامناسب توصیه می‌شود. نمودار پایپر نشان داد که $Ca-Mg-Cl$ ، $Na-Cl$ مخلوط شده و $Ca-HCO_3$ رخساره‌های هیدروشیمیایی غالب در منطقه مورد مطالعه هستند. دو فرایند ژئوشیمیایی در آب‌های زیرزمینی شامل: انحلال ساده و اختلاط بین آب‌ها و تبادل یونی شناسایی شد. این مطالعه نشان داد که روش SOM می‌تواند با موفقیت در طبقه‌بندی و توصیف آب زیرزمینی از نظر آب شیمی و کیفیت در مقیاس استانی استفاده شود.

است. به هر حال محاسبه EWQI نشان داد که تمام نمونه‌های آب دارای کیفیت عالی ($36/3$ درصد نمونه‌ها در خوشه ۱) از نظر شرب در این خوشه و بیشتر در قسمت جنوب و مرکز استان قرار داشتند. البته با توجه به سختی آب بایستی در صورت نیاز به استفاده از این آب برای اهداف شرب اصلاحاتی برای کاهش سختی با تصفیه آب صورت گیرد. علاوه بر این با توجه به اینکه شاخص CSMR و CR به ترتیب در $88/6$ درصد و $77/9$ درصد نمونه‌ها در حد نامطلوب و نشان‌دهنده پتانسیل ورود سرب و آهن و مس است، انتقال آب زیرزمینی استان به وسیله لوله‌های فلزی نامطمئن بوده و باید برای انتقال آب از لوله‌های ضد خوردگی استفاده شود. بر طبق دیاگرام ویلکاکس، تعداد 435 نمونه آب ($81/7$ درصد نمونه‌ها) موجود در خوشه ۱ دارای شرایط مناسب برای آبیاری (کلاس‌های $C1S1$ ، $C2S1$ ، $C3S1$ و $C3S2$) بودند. لازم به ذکر است که کشاورزی غالب استان باغ‌های پسته و گیاهان مقاوم به شوری است که خوشه ۱ برای آبیاری آنها بسیار عالی است، به هر حال آبشویی دوره‌ای و استفاده از گچ به بهبود شرایط خاک این مناطق کمک خواهد کرد. نمونه‌های موجود در خوشه‌ای ۲، ۳ و ۴ اکثراً در نیمه شمالی استان قرار داشتند و در رده ضعیف و بسیار نامناسب برای شرب و دارای سختی بسیار بالا بودند. اغلب معادن استان در

منابع مورد استفاده

1. Amiri, V., M. Rezaei and N. Sohrabi. 2014. Groundwater quality assessment using entropy weighted water quality index (EWQI) in Lenjanat, Iran. *Environmental Earth Sciences* 72(9): 3479-3490.
2. Bakhtiari, B., A. Bakhtiari. 2013. Determination of tourism climate index in Kerman province *Desert* 18(2): 113-126.
3. Belkhiri, L., L. Mouni, A. Tiri and T. S. Narany. 2017. Evaluation of groundwater quality and its suitability for drinking and agricultural purposes using Self-Organizing Maps. *International Journal of Environmental, Chemical, Ecological, Geological and Geophysical Engineering* 11(8): 685-689.
4. Choi, B. Y., S. T. Yun, K. H. Kim, J. W. Kim, H. M. Kim and Y. K. Koh. 2014. Hydrogeochemical interpretation of South Korean groundwater monitoring data using self-organizing maps. *Journal of Geochemical Exploration* 137: 73-84.
5. Davies, D. L. and D. W. Bouldin. 1979. A cluster separation measure. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* 2: 224-227.
6. Döll, P., H. Müller Schmied, C. Schuh, F. T. Portmann and A. Eicker. 2014. Global scale assessment of groundwater depletion and related groundwater abstractions: Combining hydrological modeling with information from well observations and GRACE satellites. *Water Resoure Research* 50(7): 5698-5720.
7. Doneen, L. D. 1962. The influence of crop and soil on percolating water. In: *Proceeding of the 11961 Biennial Conference on Groundwater Recharge, California*. pp 156-163.

8. Durov, S. A. 1948. Natural waters and graphical representation of their composition. *Doklady Akademii Nauk SSSR* 59(1):87-90.
9. Eaton, E. M. 1950. Significance of carbonates in irrigation waters. *Soil Science* 69: 123–133.
10. Forootan, E., R. Rietbroek, J. Kusche, M. A. Sharifi, J. L. Awange, M. Schmidt, P. Omondi and J. Famiglietti. 2014. Separation of large scale water storage patterns over Iran using GRACE, altimetry and hydrological data. *Remote Sensing of Environment* 140: 580–595.
11. Hong, Y. S. T., M. R. Rosen and R. Bhamidimarri. 2003. Analysis of a municipal wastewater treatment plant using a neural network-based pattern analysis. *Water Research* 37(7): 1608-1618.
12. Hsu, K. C. and S. T. Li. 2010. Clustering spatial–temporal precipitation data using wavelet transform and self-organizing map neural network. *Advances in Water Resources* 33(2): 190-200.
13. Jalali, M. 2009. Geochemistry characterization of groundwater in an agricultural area of Razan, Hamadan, Iran. *Environmental Geology* 56:1479–1488.
14. Jamshidzadeh, Z. and S. Mirbagheri. 2011. Evaluation of groundwater quantity and quality in the Kashan Basin, Central Iran. *Desalination* 270: 23–30
15. Kalteh, A. M. and R. Berndtsson. 2007. Interpolating monthly precipitation by self-organizing map (SOM) and multilayer perceptron (MLP). *Hydrological Sciences Journal* 52(2): 305-317.
16. Kalteh, A. M., P. Hjorth and R. Berndtsson. 2008. Review of the self-organizing map (SOM) approach in water resources: Analysis, modelling and application. *Environmental Modelling & Software* 23(7): 835-845.
17. Keesari, T., K. L. Ramakumar, S. Chidambaram, S. Pethperumal. 2016. Understanding the hydrochemical behaviour of groundwater and its suitability for drinking and agricultural purposes in Pondicherry area, South India—a step towards sustainable development. *Groundwater for Sustainable Development* 2–3: 143–153.
18. Khashei, M., M. Bijari and F. Mokhtab Rafiei. 2014. Feature selection in multi-layer perceptrons (MLP) for forecasting using self-organization maps (SOM). *Journal of Computational Methods in Sciences and Engineering* 33(1): 125-139.
19. Kim, D. M., S. T. Yun, Y. Cho, J. H. Hong, B. Batsaikhan and J. Oh. 2017. Hydrochemical assessment of environmental status of surface and ground water in mine areas in South Korea: Emphasis on geochemical behaviors of metals and sulfate in ground water. *Journal of Geochemical Exploration* 183: 33-45.
20. Kohonen, T. 1982. Self-organized formation of topologically correct feature maps. *Biological Cybernetics* 43(1): 59-69.
21. Kohonen, T. and S. O. Maps. 1995. Self-Organizing Maps, Springer, Berlin.
22. Krishna kumar, S., A. Logeshkumaran, N. S. Magesh, P. S. Godson and N. Chandrasekar. 2015. Hydro-geochemistry and application of water quality index (WQI) for groundwater quality assessment, Anna Nagar, part of Chennai City, Tamil Nadu, India. *Applied Water Science* 5(4): 335-343.
23. Li, P. Y., H. Qian, J. H. Wu. 2010. Groundwater quality assessment based on improved water quality index in Pengyang County, Ningxia, Northwest China. *E-Journal of Chemistry* 7(S1): S209–S216.
24. Li, T., G. Sun, C. Yang, K. Liang, S. Ma and L. Huang. 2018. Using self-organizing map for coastal water quality classification: Towards a better understanding of patterns and processes. *Science of the Total Environment* 628: 1446-1459.
25. Lloyd, J. A. and J. A. Heathcote. 1985. Natural Inorganic Hydrochemistry in Relation to Groundwater: An Introduction. Oxford University Press. New York.
26. Men, B. H., Q. Fu and X. M. Zhao. 2004. Study on entropy weight coefficient method and application for water quality evaluation. *Journal of Northeast Agricultural University* 11(1): 66–68.
27. Nguyen, C. K., B. N. Clark, K. R. Stone and M. A. Edwards. 2011. Role of chloride, sulfate, and alkalinity on galvanic lead corrosion. *Corrosion* 67.6.
28. Nguyen, T. T., A. Kawamura, T. N. Tong, N. Nakagawa, H. Amaguchi and R. Gilbuena Jr, R. 2015. Clustering spatio–seasonal hydrogeochemical data using self-organizing maps for groundwater quality assessment in the Red River Delta, Vietnam. *Journal of Hydrology* 522: 661-673.
29. Penn, B. S. 2005. Using self-organizing maps to visualize high-dimensional data. *Computational Geosciences* 31(5): 531-544.
30. Piper, A. M. 1944. A graphic procedure in the geochemical interpretation of water analyses. *Transactions of the American Geophysical Union* 25: 914–928.
31. Raghunath, H. M. 1987. Ground Water. New Age International, New Delhi.
32. Ramesh, K. and L. Elango. 2012. Groundwater quality and its suitability for domestic and agricultural use in Tondiar river basin, Tamil Nadu, India. *Environmental Monitoring and Assessment* 184(6): 3887–3899.
33. Ravikumar, P., R. Somashekar and M. Angami. 2011. Hydrochemistry and evaluation of groundwater suitability for irrigation and drinking purposes in the Markandeya River basin, Belgaum District, Karnataka State, India. *Environmental Monitoring and Assessment* 173(1): 459–487.

34. Richards, L. A. 1954. Diagnosis and Improvement of Saline and Alkali Soils. Agricultural Handbook No. 60. United States Department of Agriculture. Washington DC.
35. Ryznes, J. W. 1944. A new index for determining amount of calcium carbonate scale formed by water. *Journal American Water Works Association* 36: 472-486.
36. Sarath Prasanth, S. V., N. S. Magesh, K. V. Jitheshlal, N. Chandrasekar and K. Gangadhar. 2012. Evaluation of groundwater quality and its suitability for drinking and agricultural use in the coastal stretch of Alappuzha District, Kerala, India. *Applied Water Science* 2(3): 165-175.
37. Sardar, A. R. and R. Havangi. 2017. Performance improvement of automatic clustering algorithm of colored images through preprocessing using Self-Organizing Maps (SOM) neural network. *Tabriz Journal of Electrical Engineering* 47(3): 1073-1082.
38. Sawyer, N. N., P. L. Mc Carty and G. F. Parkin. 2003. Chemistry for environmental engineering and science, 5th edn. McGraw-Hill, New York.
39. Şener, S., E. Şener and A. Davraz. 2017. Evaluation of water quality using water quality index (WQI) method and GIS in Aksu River (SW-Turkey). *Science of the Total Environment* 584-585: 131-144.
40. Shahidasht, A. R. and A. Abasnejd. 2011. Survey of groundwater resources in Kerman province plains. *Journal of Geotechnical Geology (Applied Geology)* 7(2): 131-146.
41. Simsek, C. and O. Gunduz. 2007. IWQ index: A GIS-integrated technique to assess irrigation water quality. *Environmental Monitoring and Assessment* 128(1): 277-300.
42. Stets, E. G., C. J. Lee, D. A. Lytle and M. R. Schock. 2017. Increasing chloride in rivers of the conterminous U.S. and linkages to potential corrosivity and lead action level exceedances in drinking water. *Science of the Total Environment* 613-614: 1498-1509.
43. Tripathi, A. K., U. K. Mishra, A. Mishra, S. Tiwari and P. Dubey. 2012. Studies of hydrogeochemical in groundwater quality around Chakghat Area, Rewa District, and Madhya Pradesh, India. *International Journal of Modern Engineering Research* 2: 4051-4059.
44. Veicy, H. 2016. Water demand and consequences of water crisis in Kerman province. *Geography* 50: 283-307.
45. Vesanto, J. and E. Alhoniemi. 2000. Clustering of the self-organizing map. *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems* 11(3): 586-600.
46. WHO (World Health Organization). 2011. Guidelines for Drinking-water Quality, 4th ed. WHO, Geneva. pp. 311-312.
47. Wilcox, L. V. 1955. Classification and Use of Irrigation Waters. US Department of Agriculture Circular 969, Washington, DC.
48. Żelazny, M., A. Astel, A. Wolanin and S. Małek. 2011. Spatiotemporal dynamics of spring and stream water chemistry in a high-mountain area. *Environmental Pollution* 159(5): 1048-1057.

Application of a Self-Organizing Map for Clustering the Groundwater Quality in Kerman Province and Assessment its Suitability for Drinking and Irrigation Purposes

F. Soroush* and A. Seifi¹

(Received: October 1-2018 ; Accepted: December 19-2018)

Abstract

Evaluation of groundwater hydro chemical characteristics is necessary for planning and water resources management in terms of quality. In the present study, a self-organizing map (SOM) clustering technique was used to recognize the homogeneous clusters of hydro chemical parameters in water resources (including well, spring and qanat) of Kerman province; then, the quality classification of groundwater samples was investigated for drinking and irrigation uses by employing SOM clusters. Patterns of water quality parameters were visualized by SOM planes, and similar patterns were observed for those parameters that were correlated with each other, indicating a same source. Based on the SOM results, the 729-groundwater samples in the study area were grouped into 4 clusters, such that the clusters 1, 2, 3, and 4 contained 73%, 6.2%, 6.7%, and 14.1% of groundwater samples, respectively. The increase order of electrical conductivity parameter in the clusters was as 1, 4, 3 and 2. The results of water quality index based on the entropy weighting (EWQI) showed that all of the samples with excellent and good quality (36.3% of samples) for drinking belonged to the cluster 1. According to the Wilcox diagram, 435-groundwater samples (81.7%) in the cluster 1 had the permitted quality for irrigation activities, and the other 285-groundwater samples were placed in all four clusters, indicating the unsuitable quality for irrigation. The Piper diagram also revealed that the dominant hydro chemical faces of cluster 1 were Na-Cl, Mixed Ca-Mg-Cl and Ca-HCO₃, whereas the clusters 2, 3, and 4 had the Na-Cl face. This study, therefore, shows that the SOM approach can be successfully used to classify and characterize the groundwater in terms of hydrochemistry and water quality for drinking and irrigation purposes on a provincial scale.

Keywords: Corrosivity, Durov diagram, Water quality index, Piper plot, Entropy weighting, Wilcox, Hydrochemical

1. Department of Water Engineering, College of Agriculture, Vali-e-Asr University of Rafsanjan, Rafsanjan, Iran.

*: Corresponding Author, Email: f.soroush@vru.ac.ir