

Assessment of the quality of Salmas aquifer and mapping of areas with pollution potential

Maryam Sadat Jaafarzadeh^{1*}, Alireza Moghaddamnia^{2*}, Ataollah Joodavi³, Azadeh Ahmadi⁴

¹Postdoc researcher, Department of Reclamation of Arid and Mountainous Regions, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Tehran, Iran.

²Professor, Department of Reclamation of Arid and Mountainous Regions, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Tehran, Iran.

³Assistant Professor, Department of Water Engineering, Kashmar Education Institute, Kashmar, Iran.

⁴Associate Professor of Civil Engineering Department, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

Corresponding Author's E-mail: m.s.Jaafarzadeh@ut.ac.ir, a.moghaddamni@ut.ac.ir

Received: 31 Oct. 2024 Accepted: 16 Dec. 2024
Revised: 10 Dec. 2024 Published: 24 Apr. 2025



Homepage: ijwer.uoz.ac.ir

Abstract: Evaluation of water quality leads to facilitating and improving the management of water resources for various uses. In the present study, the qualitative condition of Salmas aquifer was studied by some qualitative indices (salinity hazard, SAR, MH, 1 ESR, 2 RSC, 3 Na%, KI, 4 PI, 5 as well as quality diagrams and WQI) were used. Finally, Shannon's entropy model was used to mapping vulnerable areas. According to the results, the trend of water level indicated a downward trend Water type estimated as Mg-HCO₃, with high salinity hazard and MH, along with a good quality in terms of other indices. According to WQI, the aquifer identified as good quality at 81.3%. Based on the sensitivity analysis, NDVI, plan curvature and distance from the river showed the greatest impact on vulnerability. Based on MaxENT model, 23.48% of the aquifers were estimated to have moderate to very high vulnerability potential. According to the AUROC, the accuracy of estimates was 80% ("very good" level).

Keywords: AUROC, Hydrogeochemical, MaxENT, Piper, Water Quality Index.

Introduction: Nowadays, the continuous reduction of GWQ⁶ is considered as one of the main challenges in the world. In developing countries - especially which located in arid and semi-arid regions - like Iran, the increase in emerging pollutants, rapid population growth and development activities, have led to increase in water demand. Due to the complexity of protecting GW resources for future generations, while meeting the needs of many economic activities, GWQ has become an important issue. Therefore, because the quality of consumed water is directly related to the quality of life, it is very important to study the quality of GW resources as the main source of water supply. Water quality assessment leads to facilitating and improving the management of water resources for various uses. In recent years, the Salmas aquifer has seen a significant increase in water demand due to the increase in agriculture and the development of orchards, the increase in the extraction of GW resources, climate changes and etc. In this study, an attempt was made to determine the quality of the Salmas aquifer and mapping the areas with pollution potential by using Shannon's entropy.

Methodology: To carry out the current research, the data was received from the regional water company of West Azerbaijan province (RWCWA). Then, some statistical checks were done. In next step, the trend of water level of Salmas aquifer (from 1975-76 to 2020-2021) were assessed. The hydrograph and quality indices of this aquifer (salinity hazard, SAR, magnesium hazard, Residual Sodium Carbonate, Na%, Kelly Index, permeability Index, as well as Piper, Schuler, Durov, Stiff diagrams and WQI) were also calculated (data from 2001 to 2021) by using

¹ Magnesium Hazard

² Exchangeable Sodium Ratio

³ Residual Sodium Carbonate

⁴ Kelly Index

⁵ Permeability Index

⁶ Groundwater Quality

Excel and AQQA. The environmental layers were also prepared by using ArcGIS 10.8. Finally, Shannon's entropy model was used in the MaxENT software to map the areas with pollution potential. The results of maximum entropy were evaluated by ROC curve.

Results and Discussion: According to the results, the general trend of water level changes in Salmas aquifer is decreasing and the annual average of these changes is 38 cm loss and the average change of aquifer volume is estimated to be 4.54 mcm¹ loss. The water type of this aquifer was estimated as Mg-HCO₃, with high salinity hazard and magnesium hazard, along with a good quality according to PI, KI, Na% ESR and RSC indices. According to the results of WQI, the groundwater quality of this area was identified as good quality at 81.3%. Based on the sensitivity analysis of the factors affecting the quality of the Salmas aquifer by using the MaxENT, NDVI, plan curvature and distance from the river showed the greatest impact and soil texture showed the least impact on vulnerability. Based on the results of the maximum entropy, 23.48% of the aquifers were estimated to have moderate to very high vulnerability potential, which includes rangelands, Agri farms, and orchards that are located on Q₁₂ and Q_f sediments and have a flat surfaces or low slope with clay and clay-loam texture. According to the ROC curve, the accuracy of this estimate was 80% and at the "very good" level.

Conclusion: It is recommended to prevent the creation or increase of pollutants (such as the development of industries, municipal waste disposal, sewage wells, etc.) in areas where the probability of vulnerability is high and very high. In order to increase the accuracy of the results, must be attention in determining the sampling places and environmental layers, because the model is trained from what is defined as input (occurrence/presence data) and determines the prediction algorithm and makes the prediction. It is recommended that this research be investigated using more detailed information such as nitrate and nitrite, and also with other models.

© 2023 University of Zabol, Zabol, Iran.



This is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0 license) (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

¹ Million Cubic Meters

ارزیابی کیفیت آب‌های زیرزمینی محدوده سلماس و پهنه‌بندی مناطق مستعد آلودگی

مریم سادات جعفرزاده^۱، علیرضا مقدم‌نیا^{۲*}، عطاءاله جودوی^۳، آزاده احمدی^۴

^۱ پژوهشگر پسادکتری، گروه احیای مناطق خشک و کوهستانی، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

^۲ استاد، گروه احیای مناطق خشک و کوهستانی، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

^۳ استادیار، گروه هیدروانفورماتیک، مرکز پژوهشی آب و محیط زیست شرق، کاشمر، ایران

^۴ استادیار، گروه مهندسی منابع آب، دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران ایران

پست الکترونیکی نگارنده مسئول: am.s.Jaafarzadeh@ut.ac.ir، a.moghaddamni@ut.ac.ir

وبگاه نشریه: ijwer.uoz.ac.ir



تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۸/۱۰ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۹/۲۶

تاریخ ویرایش: ۱۴۰۳/۰۹/۲۰ تاریخ چاپ: ۱۴۰۴/۰۲/۰۴

چکیده: در سال‌های اخیر، آبخوان سلماس شاهد افزایش قابل توجهی در تقاضای آب بوده است. در پژوهش حاضر، به منظور تعیین وضعیت کیفی آبخوان سلماس، از شاخص‌های کیفی (شاخص خطر شوری^۱، خطر منیزیم، باقیمانده کربنات سدیم، درصد سدیم، کلی، نفوذپذیری و نمودارهای پایپر، شولر، دوروف و شاخص WQI^۲) استفاده شد. لایه‌های اطلاعات محیطی منطقه با استفاده از ArcGIS 10.8 تهیه شد. در نهایت جهت مکان‌یابی مناطق مستعد آسیب‌پذیری، از مدل آنتروپی شانون در محیط نرم‌افزار MaxENT استفاده شد. با توجه به یافته‌های این مطالعه، روند کلی تغییرات سطح ایستابی در آبخوان سلماس کاهش یافته است و متوسط سالانه این تغییرات، با ۳۸ سانتی‌متر افت و متوسط تغییر حجم آبخوان نیز با ۴/۵۴ میلیون مترمکعب افت برآورد گردید. تیپ آب در این محدوده، Mg-HCO₃، با خطر شوری و خطر منیزیم بالا، همراه با وضعیت مناسب از نظر شاخص‌های KI، PI، ESR، Na% و RSC برآورد شد. از لحاظ شاخص WQI نیز، کیفیت آب زیرزمینی محدوده این آبخوان، در ۸۱/۳٪ با کیفیت خوب شناسایی گردید. بر اساس بررسی آنالیز حساسیت فاکتورهای موثر بر کیفیت آبخوان سلماس با استفاده از مدل مکسنت نیز، NDVI، انحنای سطح و فاصله از رودخانه بیشترین تاثیر و بافت خاک، کمترین اثرگذاری را بر آسیب‌پذیری نشان دادند. بر اساس نتایج مدل مکسنت، ۲۳/۴۸٪ آبخوان با پتانسیل آسیب‌پذیری متوسط تا بسیار زیاد برآورد گردید که شامل مراتع، اراضی کشاورزی و باغات می‌شود. دقت این برآورد طبق منحنی ROC، ۸۰٪ و در سطح "خیلی خوب" به دست آمد.

کلیدواژگان: پایپر، شاخص کیفی آب، مکسنت، منحنی ROC، هیدروژئوشیمیایی.

^۱ Sodium Adsorption Ratio (SAR)

^۲ Water Quality Index

۱- مقدمه

شهری داکا در بنگلادش پرداختند. نتایج نشان داد ۴۷/۰۵٪ نمونه‌ها عالی، ۷/۶۹٪ خوب، ۹/۹۶٪ ضعیف، ۱۷/۶۵٪ بسیار ضعیف و ۱۷/۶۵٪ نیز نامناسب برای شرب بودند. نصیری و همکاران (۱۴۰۱)، روند تغییرات کمی و کیفی آبخوان ساری-نکا را ارزیابی کردند. در این مطالعه در بخش کیفی Ca^{2+} ، K^{+} ، SO_4^{2-} ، Na^{+} ، Cl^{-} ، Mg^{2+} و TDS و در بخش کمی تغییرات تراز آب زیرزمینی مورد استفاده قرار گرفت. نتایج نشان داد به جز پارامتر Ca^{2+} که دارای روند معنی‌دار افزایشی است (در ۳ چاه مشاهده‌ای)، سایر پارامترهای کیفی از روند کاهشی یا عدم وجود روند تبعیت کردند.

سالاری و همکاران (۱۴۰۲) کیفیت آب زیرزمینی دشت شیراز را با استفاده از شاخص‌های کیفیت آب جهت مصارف شرب، کشاورزی و صنعت بررسی کردند به این منظور داده‌های ۱۰ پارامتر کیفی موثر در مصارف فوق، شامل EC، Ca^{2+} ، K^{+} ، PH، SO_4^{2-} ، Cl^{-} ، Na^{+} ، TH، Mg^{2+} و TDS مورد استفاده قرار گرفت. نتایج نشان داد طبق شاخص کیفی ویلکاکس و شولر آب‌های زیرزمینی برای مصارف کشاورزی در حد متوسط و از نظر شرب در حد قابل قبول قرار گرفت. از نظر ضریب اشباع لائزلیه منابع آبی موجود خورنده تا رسوب‌گذار گزارش گردید. از دیگر مطالعات انجام‌شده در این زمینه می‌توان به Khudair و همکاران، ۲۰۲۲؛ Eid و همکاران، ۲۰۲۳؛ Gaagai و همکاران، ۲۰۲۳؛ Gad و همکاران، ۲۰۲۴؛ Ali و همکاران، ۲۰۲۴؛ Omeka و همکاران، ۲۰۲۴؛ Hussein و همکاران، ۲۰۲۴ اشاره نمود.

مدل‌سازی چنین فرایندهایی به عنوان یک ابزار مدیریتی به‌منظور درک وضعیت سیستم‌های سفره‌های آبی تحت فشارهای مختلف هیدرولوژیکی، چه ناشی از فعالیت‌های طبیعی و چه از نوع انسانی، به طور گسترده‌ای استفاده می‌شوند.

آبخوان سلماس در سال‌های اخیر، به دلیل افزایش بهره‌وری کشاورزی و توسعه باغات، افزایش برداشت از منابع آب زیرزمینی، تغییرات اقلیمی (کاهش بارندگی‌ها و افزایش دما)، شاهد افزایش قابل توجهی در تقاضای آب بوده است. از این رو، در این پژوهش سعی بر آن شد ابتدا با بررسی

امروزه کاهش مداوم کیفیت آب‌های زیرزمینی، به‌عنوان یکی از چالش‌های جدی جهان مطرح است. در کشورهای در حال توسعه به‌ویژه کشورهای واقع در مناطق خشک و نیمه‌خشک، از جمله ایران، افزایش آلاینده‌های نوظهور، رشد سریع جمعیت مرتبط با فعالیت‌های توسعه‌ای سریع و فشرده، منجر به افزایش شدید تقاضای آب گردیده است. این امر بی‌نظمی و پیچیدگی آمار و داده‌های کیفیت آب را نیز افزایش می‌دهد. با توجه به پیچیدگی حفاظت از منابع آب زیرزمینی برای نسل‌های آینده و در عین حال پاسخگویی به نیازهای بسیاری از فعالیت‌های اقتصادی، به‌ویژه فعالیت‌های کشاورزی، کیفیت آب‌های زیرزمینی به یک موضوع مهم تبدیل شده است. بنابراین، به دلیل ارتباط مستقیم کیفیت آب مصرفی با کیفیت زندگی، مطالعه کیفیت منابع آب زیرزمینی، به‌عنوان اصلی‌ترین منابع تامین‌کننده آب به‌ویژه برای شرب، بسیار حائز اهمیت است.

مطالعات متعددی در رابطه با بررسی وضعیت کیفی منابع آب زیرزمینی در سطح کشور و جهان می‌توان نام برد که با استفاده از روش‌های مختلف انجام شده است. تعدد این مطالعات نشان‌دهنده اهمیت بسیار زیاد این منابع ارزشمند می‌باشند. بسیاری از محققان در کشور و نیز سراسر جهان، تلاش کرده‌اند آلودگی و آسیب‌پذیری آب‌های زیرزمینی را مدل‌سازی کنند.

Hosseininia و Hassanzadeh (۲۰۲۳)، کیفیت آب‌های زیرزمینی دشت رفسنجان را با استفاده از GIS، رخساره‌های هیدروشمیایی (نمودار شولر، پایپر و...) و شاخص‌های کیفی آب (WQI) مطالعه کردند. نتایج نشان داد غلظت یون‌های اصلی در آب‌های زیرزمینی به شدت تحت تاثیر جریان آب زیرزمینی و وضعیت زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه قرار گرفته است. همچنین، که اکثر نمونه‌ها از حد مجاز توصیه‌شده فراتر رفته‌اند و بیشتر اراضی آبی این منطقه تحت تاثیر سطوح مختلف خطرات شوری و سدیمی بوده که باعث کاهش رشد گیاه و بهره‌وری محصول می‌شود. Hossain و همکاران (۲۰۲۴) به ارزیابی کمی و کیفی منابع آب زیرزمینی، با استفاده از WQI در منطقه حومه

هیدرولوژیکی این محدوده را تشکیل می‌دهند.

۲-۲- روش پژوهش

برای انجام پژوهش حاضر، پس از دریافت آمار و داده‌های نمونه‌برداری شده از دفتر مطالعات پایه شرکت آب منطقه‌ای استان آذربایجان غربی و مورد تأیید وزارت نیرو ابتدا برخی بررسی‌های آماری انجام شد. سپس تغییرات سطح ایستابی آبخوان سلماس (از سال ۱۳۵۴ - ۱۳۵۵ تا ۱۳۹۹ - ۱۴۰۰)، محاسبه گردید. آبنمود معرف و همچنین شاخص‌های کیفی این آبخوان (در بازه زمانی دو دهه اخیر؛ از سال ۱۳۸۰ تا ۱۴۰۰) نیز در محیط اکسل و نرم‌افزار AQQA محاسبه شدند. شاخص‌های کیفی متعددی تعریف و در منابع مختلف استفاده شده است،

در این پژوهش برخی از این شاخص‌ها انتخاب و محاسبه گردید. شاخص‌های کیفی محاسبه‌شده در این مطالعه عبارتند از شاخص‌های خطر شوری، SAR، خطر منیزیم، باقیمانده کربنات سدیم، درصد سدیم، کلی، نفوذپذیری و همچنین نمودارهای پایپر، شولر، دوروف، سری‌های زمانی و GWQI. جهت پرهیز از تکرار برخی مطالب که در منابع مختلف موجود هستند، توضیحات مربوط به شاخص‌های

کیفی آبخوان با استفاده از شاخص‌ها و روش‌هایی، شناختی از وضعیت کلی آن حاصل گردد. سپس با به‌کارگیری مدل یادگیری ماشینی، به پهنه‌بندی مناطق دارای پتانسیل آلودگی و آسیب‌پذیری پرداخته شد. بنابراین هدف مطالعه حاضر، تعیین ویژگی‌های ژئوشیمیایی آب‌های زیرزمینی محدوده آبخوان سلماس با تجزیه و تحلیل پارامترهای فیزیکوشیمیایی، ارائه یک نمای کلی از کیفیت آب این آبخوان و برآورد مناسب بودن آن با استفاده از مدل یادگیری ماشینی بود.

۲- روش‌شناسی

۲-۱- محدوده مورد بررسی

آبخوان سلماس (شکل ۱) در محدوده حوزه آبخیز سلماس و در قسمت جنوبی شهرستان خوی واقع شده است. مساحت آبخوان سلماس ۳۹۸/۵ کیلومترمربع است و از شرق به بخشی از دریاچه ارومیه و از جنوب به شهرستان و حوزه آبخیز ارومیه و سرو-موانا منتهی می‌شود. زولا چای، رودخانه اصلی این حوزه آبخیز، از ارتفاعات ساری‌داش سرچشمه می‌گیرد. سرشاخه‌های این رودخانه همراه با رود روشننده به دریک‌چای متصل می‌شود. نهرهای اهروان، دیرعلی‌سو، رود سره‌لن و نهر خورخوره چای شبکه

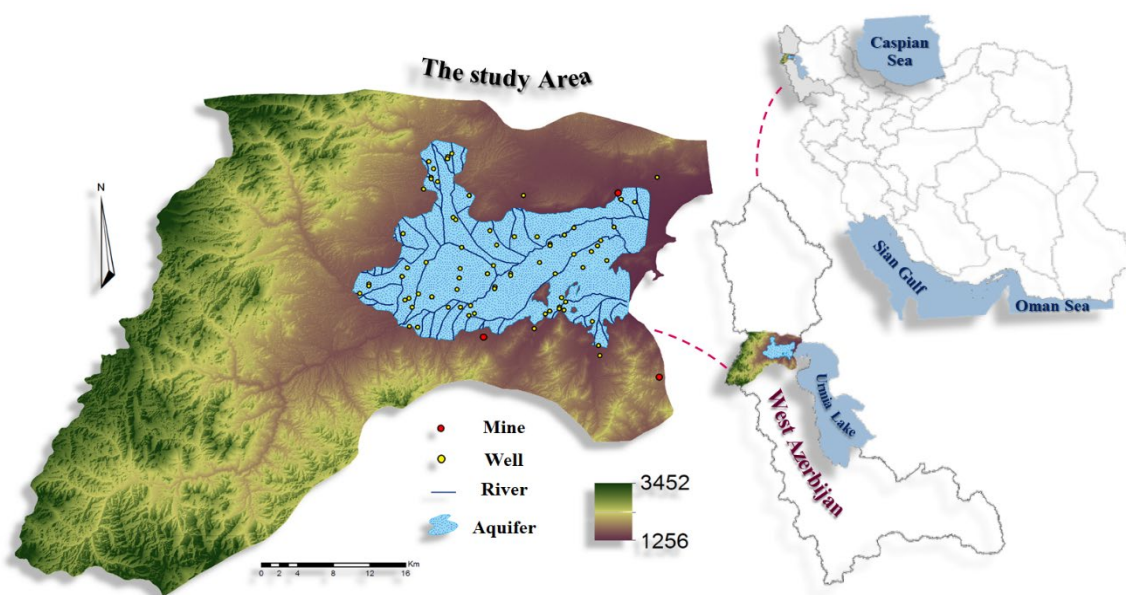


Fig. 1 Salmas aquifer and sampling well's location
شکل ۱ آبخوان سلماس و موقعیت چاه‌های نمونه‌برداری

$E(x)$ آنروپی سیستم
 $m(x)$ تابع چگالی احتمال

C ثابت مثبت است که به صورت فاکتور مقیاس تعریف می‌شود و به انتخاب واحد اندازه‌گیری وابسته است. مفهوم آنروپی را می‌توان برای جفت متغیرهای (x,y) از طریق آنروپی توام تعمیم داد که به صورت رابطه (۲) بیان می‌شود:

$$E(x) = -C \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} m(x,y) \log[m(x,y)] dx dy \quad (2)$$

$E(x,y)$ آنروپی توام سیستم
 $m(x,y)$ تابع چگالی احتمال توام x و y

آنروپی یک سیستم را می‌توان با استفاده از روش بهینه‌سازی کلاسیک برای استخراج تابع توزیع احتمال، بهینه کرد. اطلاعات مورد نیاز برای استخراج تابع توزیع اساساً برحسب محدودیت‌هایی است که بر اساس داده‌های مشاهداتی، تجربه، روابط ریاضی یا از هر منبع دیگر استخراج شده‌اند (Agrawal و همکاران، ۲۰۰۵؛ میرعباسی نجف‌آبادی و همکاران، ۱۳۹۰؛ جعفرزاده و همکاران، ۱۴۰۰). محدودیت‌های زیر (روابط (۳) تا (۶)) برای بهینه‌سازی آنروپی توام $E(x,y)$ در نظر گرفته می‌شوند:

$$\sum m(x,y) = 1 \quad (3)$$

$$\sum xm(x,y) = \bar{x} \quad (4)$$

$$\sum ym(x,y) = \bar{y} \quad (5)$$

$$\sum xym(x,y) = Txy + \bar{x}\bar{y} \quad (6)$$

$m(x,y)$ تابع چگالی احتمال توام x و y

\bar{x} و \bar{y} میانگین‌های مربوطه

Txy کوواریانس بین x و y

در نهایت برای بهینه‌سازی از تابع آنروپی توام دیفرانسیل گرفته و معادل صفر (رابطه (۷)) قرار داده می‌شود (میرعباسی نجف‌آبادی و همکاران، ۱۳۹۰؛ جعفرزاده و همکاران، ۱۴۰۰):

کیفی استفاده‌شده، در این مقاله ارائه نشد (جهت اطلاعات بیشتر به مطالعات جعفرزاده و همکاران، ۱۴۰۱؛ Somashekar و Ravikumar (۲۰۱۳ و ۲۰۱۷)؛ Sarkar و همکاران، ۲۰۲۲ و Krishnamoorthy و Lakshmanan، ۲۰۲۴ مراجعه شود).

در مرحله بعدی، اطلاعات محیطی محدوده مورد مطالعه با استفاده از ArcGIS 10.8 تهیه گردید. در این راستا نقشه مدل رقومی ارتفاع (DEM) تهیه و برخی لایه‌ها از جمله جهت و گرادیان شیب، انحنای دشت و انحنای پروفیل، TWI و شبکه هیدروگرافی از این لایه استخراج و محاسبه شد. فاصله از رودخانه و همچنین تراکم زهکشی نیز تهیه شد. لایه کاربری اراضی و NDVI نیز با استفاده از تصاویر لندست ۸ و نقشه بافت خاک، کربن آلی و ماده آلی نیز با استفاده از soilgrids تهیه شد. برای لایه سنگ‌شناسی از نقشه لیتولوژی تهیه‌شده توسط سازمان زمین‌شناسی کشور (در مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰) استفاده گردید. در نهایت جهت مکان‌یابی مناطق مستعد آسیب‌پذیری، از مدل آنروپی شانون در قالب نرم‌افزار MaxENT استفاده گردید.

مدل حداکثر آنروپی

الگوریتم حداکثر آنروپی نوعی مدل‌سازی مبتنی بر تکنیک یادگیری ماشینی و تنها به نقاط حضور وابسته است. این الگوریتم از اصل استفان بولتزمن (رابطه یک‌به‌یک بین درجه آشفستگی و آنروپی سیستم) بهره می‌برد و احتمال توزیع مقادیر ماکزیمم آنروپی متاثر از فاکتورهای محیطی موثر بر توزیع مکانی پدیده را ارزیابی می‌کند (جعفرزاده و همکاران، ۱۴۰۰). در این مقاله، مدل حداکثر آنروپی با استفاده از ۷۰٪ داده‌های مربوط به لایه نقاط نمونه‌برداری آموزش داده شد و ۳۰٪ آن‌ها برای بخش آزمون (تست) استفاده شد، کلر به‌منزله متغیر وابسته و سایر لایه‌ها به عنوان متغیرهای مستقل در نظر گرفته شد.

برای محاسبه حداکثر آنروپی، اگر x یک متغیر تصادفی با توزیعی پیوسته باشد، آنگاه آنروپی به صورت رابطه (۱) تعریف می‌شود:

$$E(x) = -C \int_{-\infty}^{+\infty} m(x) \log[m(x)] dx \quad (1)$$

در شهریور سال ۱۳۹۶ - ۱۳۹۷ مشاهده شد.

جدول ۱ مقادیر متوسط سالانه تغییرات سطح ایستابی در محدوده آبخوان سلماس

Table 1 Annual average of water level changes in Salmas aquifer

Row	Water Year	Average of Water Table Changes (m)	Average of Aquifer Volume Changes (mm ³)
1	54	-0.94	-11.27
2	55	-0.27	-3.2
3	56	0.42	4.98
4	57	-1.14	-13.65
5	58	-0.67	-8.07
6	59	-1.37	-16.38
7	60	0.44	5.22
8	61	-0.59	-7.12
9	62	-0.38	-4.51
10	63	0.53	6.29
11	64	-0.79	-9.49
12	65	0.46	5.46
13	66	0.2	2.37
14	67	1.54	18.39
15	68	-0.18	-2.14
16	69	-0.8	-9.61
17	70	-0.36	-4.27
18	71	0.94	11.27
19	72	0.66	7.95
20	73	0.18	2.14
21	74	-0.24	-2.85
22	75	-1.67	-19.94
23	76	-1.51	-18.04
24	77	-1.34	-16.02
25	78	-1.88	-22.55
26	79	-2.63	-31.45
27	80	-0.96	-11.51
28	81	0.27	-3.19
29	82	-1.46	-17.43
30	83	0.87	10.44
31	84	-0.66	-7.95
32	85	-0.74	-8.86
33	86	-0.13	-1.56
34	87	-1.21	-14.43
35	88	-0.14	-1.68
36	89	1.04	12.49
37	90	-0.45	-5.41
38	91	-1.09	-13
39	92	-0.04	-0.46
40	93	-0.65	-7.78
41	94	-0.96	-11.49
42	95	-0.52	-6.21
43	96	-1.07	-12.81
44	97	-0.8	-9.58
45	98	1.51	18.07
46	99	1.15	13.77

$$d(E(x)) = - \left(\sum_{xy} [1 + \ln m_{xy}] dm(xy) \right) \quad (7)$$

$$= 0$$

آزمون جک‌نایف

آزمون جک‌نایف، شاخص تعیین اهمیت عوامل موثر در وقوع پدیده مورد بررسی می‌باشد که نشان می‌دهد از متغیرهای مستقل ورودی، چه عواملی بیشترین و چه عواملی کمترین تاثیر را دارند. این منحنی شامل سه حالت مختلف است. در حالت اول (خطوط آبی کمرنگ) که نشانه تاثیر همه ورودی‌ها بر پدیده مورد مطالعه بدون وجود لایه مشخص شده است. حالت دوم (خطوط آبی پررنگ) که نشانه تاثیر آن فاکتور یا لایه بوده یا به عبارتی مربوط به زمانی است که مدل‌سازی تنها بر اساس یک متغیر انجام می‌شود و بر اساس آن میزان رخداد مورد بررسی برآورد می‌گردد. حالت آخر (خط قرمز رنگ) نشان‌دهنده تاثیر توأم همه پارامترها یا لایه‌ها می‌باشد (جعفرزاده و همکاران، ۱۴۰۰).

۳- نتایج

۳-۱- تغییرات سطح ایستابی در محدوده آبخوان سلماس

با توجه به آمار موجود از تغییرات سطح ایستابی در آبخوان سلماس (از سال ۱۳۵۴ تا ۱۳۹۹)، تغییر سطح ایستابی در این آبخوان در سال ۱۳۷۹، با مقدار ۲۶۳ سانتی‌متر، دارای بیشترین تغییرات بوده و کمترین مقدار تغییر سطح ایستابی را در سال ۱۳۹۲ با مقدار ۴ سانتی‌متر داشته است (جدول ۱).

۳-۲- آبنمود معرف و وضعیت سطح تراز در آبخوان سلماس

آبنمود آبخوان سلماس برای بررسی تغییرات سطح تراز آب زیرزمینی محدوده این آبخوان تهیه شد (شکل‌های ۲ و ۳). روند کلی این آبخوان نزولی بوده و بر اساس نتایج، بیشترین سطح آب زیرزمینی در محدوده این آبخوان، با مقدار ۱۳۴۳/۳۵ متر از سطح دریا در اسفندماه سال ۱۳۸۰ - ۱۳۷۹ و کمترین مقدار آن (۱۳۳۲/۶۱ متر از سطح دریا)

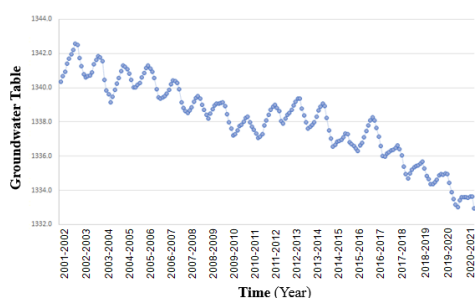


Fig. 3 The hydrograph of Salmas aquifer

شکل ۳ آبنمود آبخوان سلماس

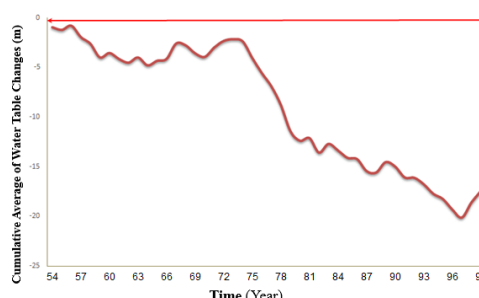


Fig. 2 Salmas aquifer and sampling well's location

شکل ۲ روند تغییرات افت تجمعی آبخوان سلماس

جدول ۲ همبستگی عناصر کیفی آبخوان سلماس

Table 2 Quality elements correlation of the Salmas aquifer

	TDS	pH	EC	TH	So4	Hco3	Na	Cl	K	Ca	Mg
TDS	1										
pH	0.0106	1									
EC	1	0.0106	1								
TH	0.7324	0.0505	0.7324	1							
So4	0.5702	0.0005	0.5702	0.2956	1						
Hco3	0.0017	0.1035	0.0017	0.0289	0.0333	1					
Na	0.8723	0.0003	0.8723	0.3995	0.695	0.0193	1				
Cl	0.9555	0.0038	0.9555	0.695	0.4655	0.0334	0.83	1			
K	0.2671	0.0202	0.2671	0.1966	0.2229	0.0125	0.2464	0.2233	1		
Ca	0.5689	0.0975	0.5689	0.8021	0.2571	0.0068	0.2875	0.552	0.1247	1	
Mg	0.6146	0.0091	0.6146	0.8141	0.2218	0.0489	0.3484	0.5711	0.196	0.3797	1

جدول ۳ شاخص‌های آماری عناصر کیفی آبخوان سلماس

Table 3 The statistical parameters in Salmas aquifer

	TDS	pH	EC	TH	So4	Hco3	Na	Cl	K	Ca	Mg
Max	6916	8.8	10640	2985	1153.92	1098.4	1255.8	3191.4	78.2	633.26	341.7
Min	208	6.7	320	85	14.4	12.2	4.6	3.5	0	8.02	1.2
Ave	776.9	7.7	1195.2	399.3	98.1	378.1	101.9	150.8	3.96	83.6	46.4
SD	660.2	0.4	1015.7	225.7	107.7	107.02	154.6	308.8	4.2	49.5	31.01
WHO Standard	900	8.5	500	500	400	500	200	200	75	50	10
National Standard of Iran	2000	9	500	500	400	500	200	600	200	50	12

۳ نیز مقادیر بالاتر از حد استاندارد (ملی و WHO) با رنگ قرمز مشخص شده است. در نهایت پس از بررسی آماری، هر یک از پارامترهای کیفی با استفاده از روش IDW در محیط ArcGIS 10.8 پهنه‌بندی شدند (شکل ۴).

۳-۳- لایه اطلاعات محیطی

اطلاعات محیطی محدوده مورد مطالعه نیز تهیه گردید. در این راستا نقشه مدل رقومی ارتفاع (DEM) تهیه و برخی لایه‌ها از جمله جهت و گرادیان شیب، انحنای دشت و

همبستگی عناصر کیفی از جمله آنیون‌ها و کاتیون‌های اصلی، TDS، pH، EC و TH بررسی شد (جدول ۲). پارامترهای آماری این عناصر نیز تهیه و با مقادیر مجاز استاندارد ملی و WHO (۲۰۱۷)، مورد مقایسه قرار گرفتند (جدول ۳). در جدول ۲، اعداد آبی‌رنگ نشان‌دهنده همبستگی زیاد (بین ۰/۷ تا ۰/۹۹) و اعداد سبز رنگ نشان‌دهنده همبستگی متوسط (بین ۰/۵ تا ۰/۶۹) می‌باشد. اعداد یک نیز نشان‌دهنده همبستگی کامل است. در جدول

۳-۴- کیفیت آب زیرزمینی در آبخوان سلماس بر اساس نمودار پایپر

تیپ یا رخساره هیدروشیمیایی آب آبخوان سلماس نیز با استفاده از نمودار پایپر مورد بررسی قرار گرفت و نتیجه این بررسی در شکل ۶ ارائه شده است. بر اساس این نمودار وضعیت کیفی آبخوان سلماس در محدوده قلیائی‌های خاکی و اسیده‌های قوی بوده و سختی کربناته آن‌ها متجاوز از ۵۰ درصد نمی‌باشد. این آبخوان در تیپ کلراید و منیزیم واقع شده است و سایر اطلاعات مربوط به آن نیز در جدول ۴ قابل بررسی می‌باشد.

انحنای پروفیل، TWI^1 ، شبکه هیدروگرافی از این لایه استخراج و محاسبه شد. فاصله از رودخانه و همچنین تراکم زهکشی نیز تهیه شد. لایه کاربری اراضی و NDVI نیز با استفاده از تصاویر لندست ۸ و نقشه بافت خاک، کربن آلی و ماده آلی نیز با استفاده از Soilgrids تهیه شدند. برای لایه سنگ‌شناسی نیز از نقشه لیتولوژی تهیه‌شده توسط سازمان زمین‌شناسی کشور (در مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰) استفاده گردید (شکل ۵).

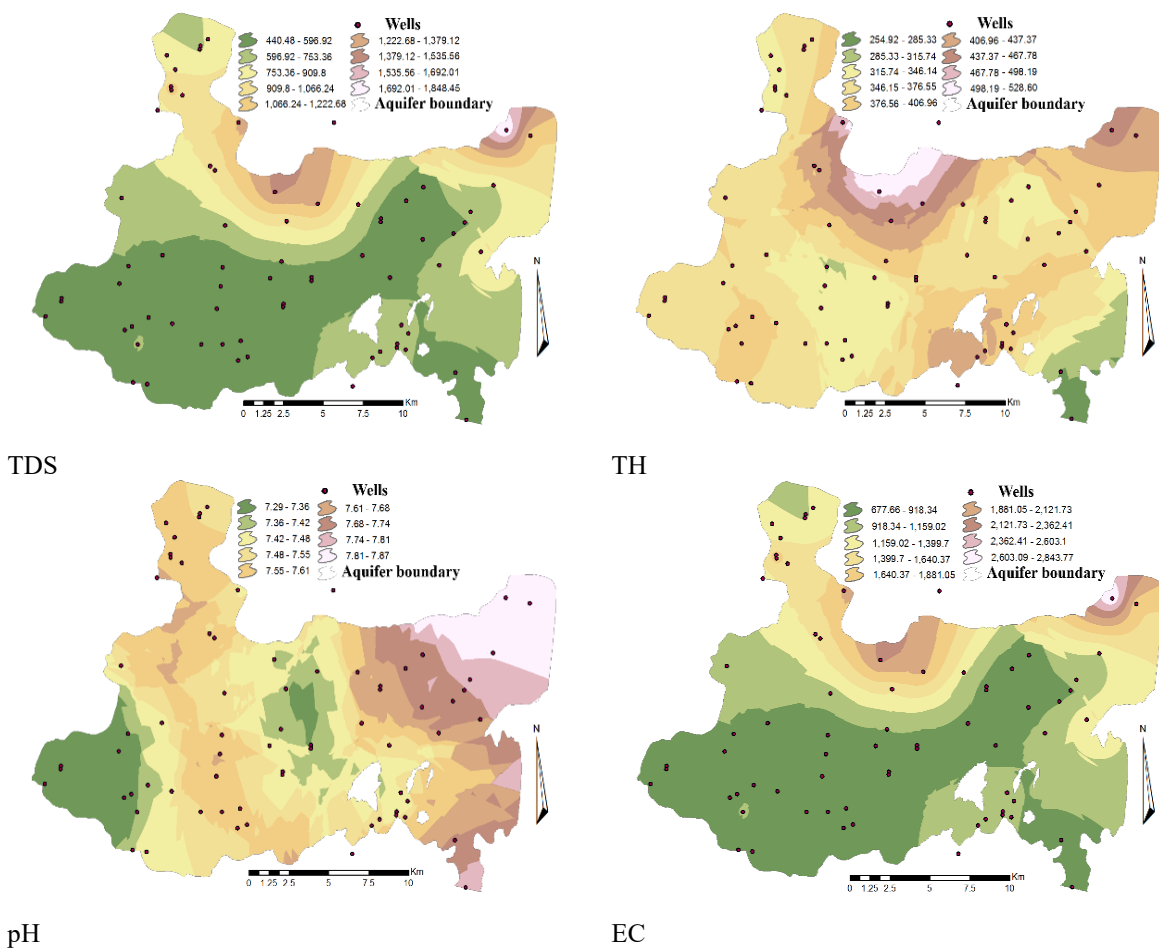


Fig. 4 Spatial distribution of the hydro-chemical parameters in Salmas aquifer (mg/l)

شکل ۴ پهنه‌بندی عناصر کیفی در آبخوان سلماس (واحدها به میلی‌گرم در لیتر)

¹ Topographic Water Index

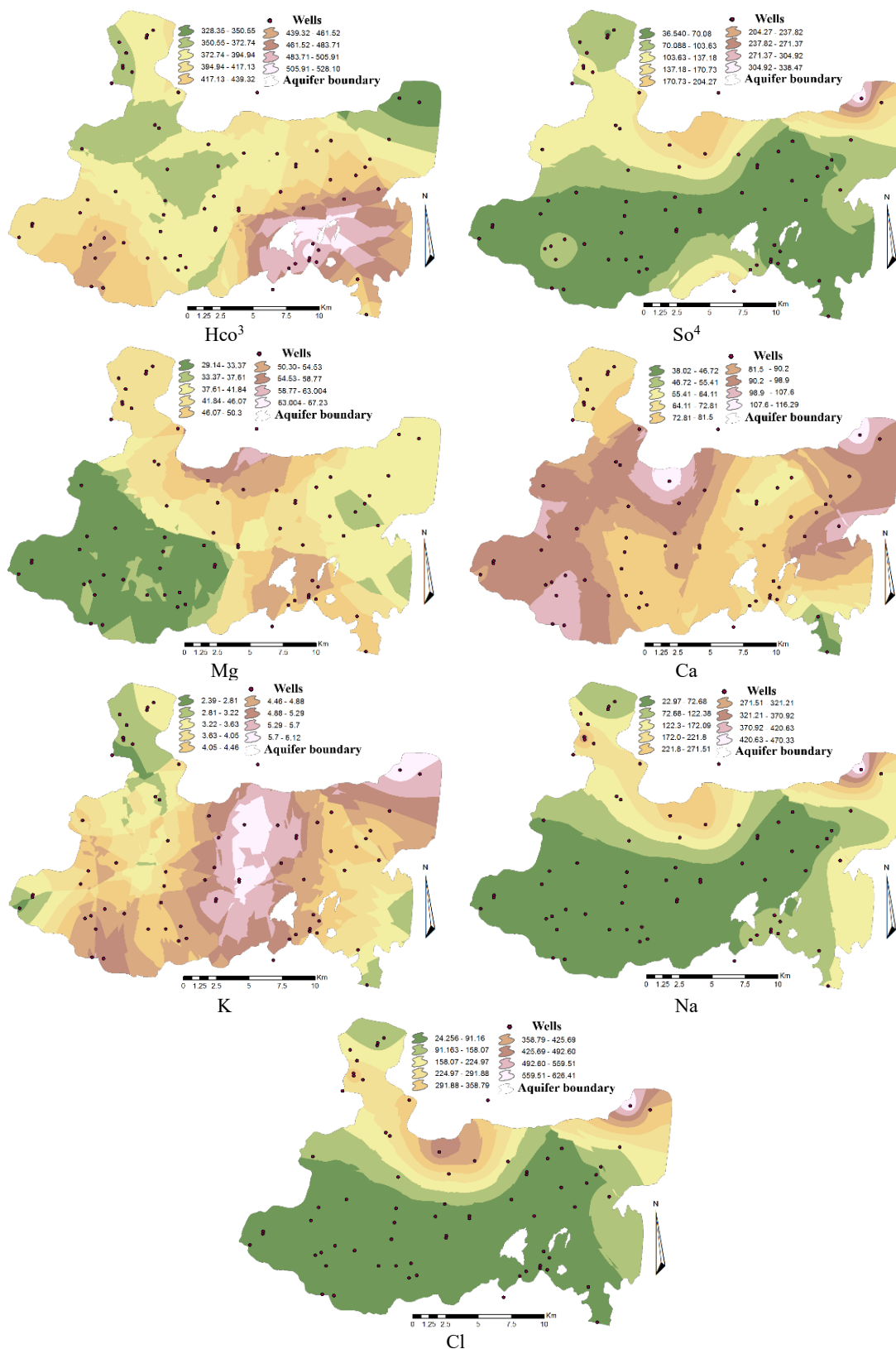


Fig 4 Continued, Spatial distribution of the hydro-chemical parameters in Salmas aquifer (mg/l)

شکل ۴ ادامه، پهنه‌بندی عناصر کیفی در آبخوان سلماس (واحدها به میلی گرم در لیتر)

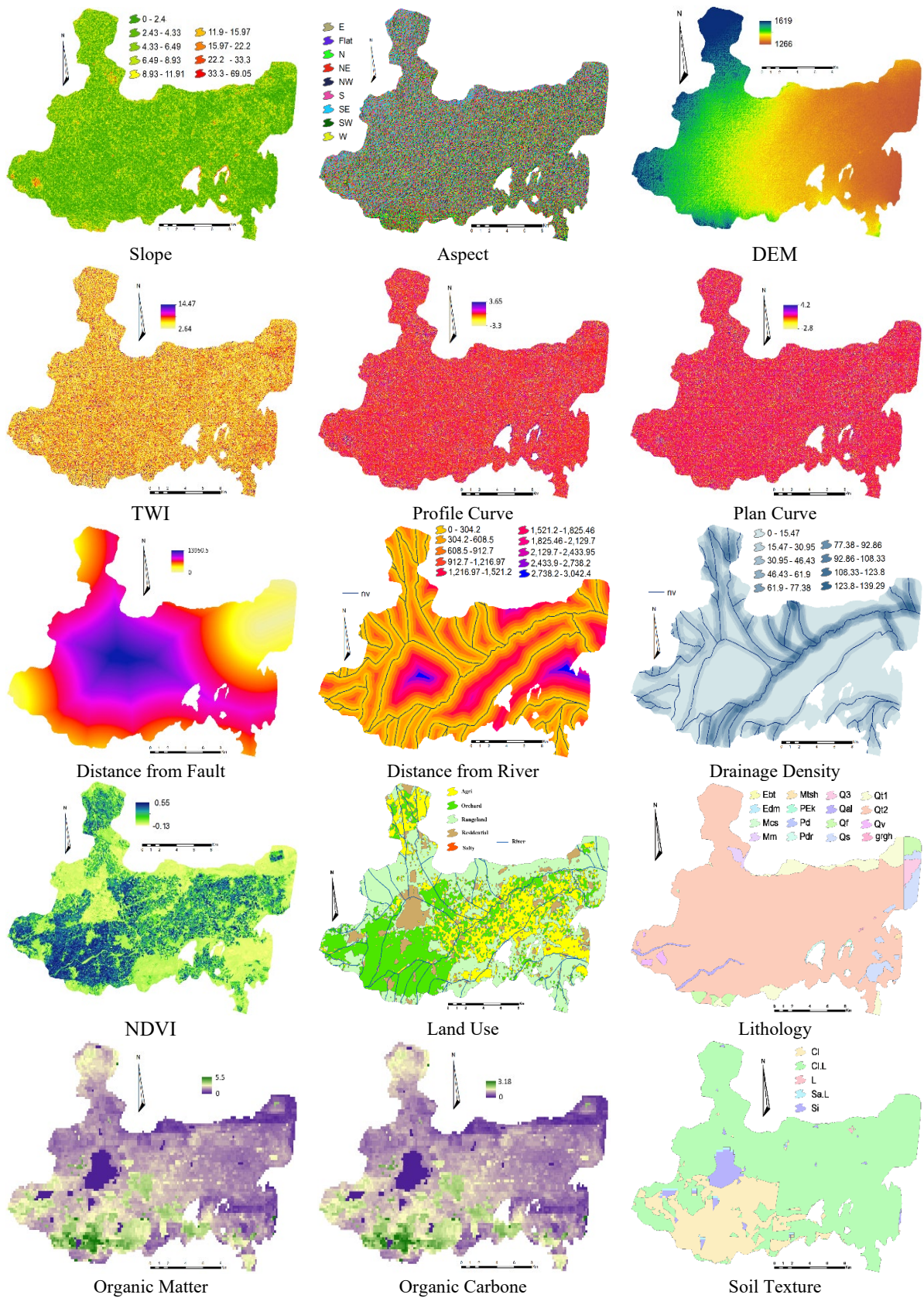


Fig. 5 Spatial distribution of environmental layers of Salmas aquifer

شکل ۵ نقشه لایه‌های محیطی محدوده آبخوان سلماس

منجر به تغییر کیفیت آبخوان از کلاس قابل قبول در دهه ۸۰ به کلاس متوسط (یا نامناسب برای شرب) در دهه ۹۰ و به‌ویژه در ۵ سال اخیر شده است. در این مدت‌زمان، افزایش مقادیر منیزیم و TDS دلایل احتمالی این وضعیت می‌باشند که این خود نیز می‌تواند ناشی از مصارف بیشتر کودهای زراعی و ... باشد. در این بازه زمانی در سایر عناصر دخیل در تعیین این وضعیت از جمله میزان کلسیم و سدیم و همچنین آنیون‌ها روند نزولی مشاهده شد.

۳-۶- کیفیت آب زیرزمینی در آبخوان سلماس بر اساس نمودارهای استیف

نمودارهای استیف برای آبخوان سلماس در دوره آماری ۲۰ ساله (۱۴۰۰ - ۱۳۸۰)، برای هر سال تهیه گردید که نتیجه آن در شکل ۸ ارائه شده است. با توجه به این نمودارها، آبخوان سلماس در سال ۱۳۸۰ تقریباً ترکیبی از ساختار ژپس و شیل را دارد. در سال ۱۳۸۱، میزان منیزیم، مجموع سدیم و پتاسیم و کلراید نسبت به سال قبل کاهش یافته ولی کلسیم و سولفات تغییرات افزایشی داشتند. در این سال در مقدار بی‌کربنات تغییراتی مشاهده نشد. در سال ۱۳۸۲،

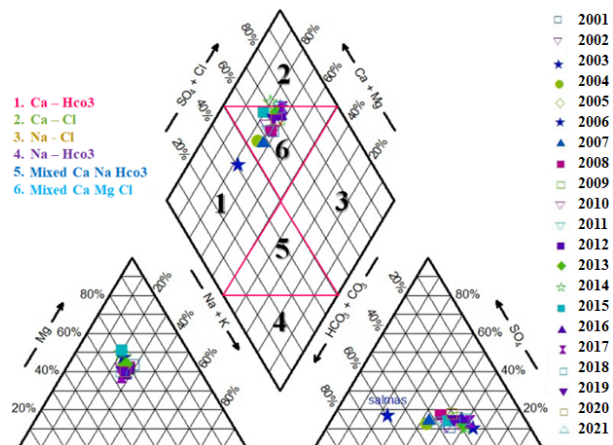


Fig. 6 Piper diagram of Salmas aquifer (2001 - 2021)

شکل ۶ نمودار پایپر آبخوان سلماس (بر اساس داده‌های ۱۴۰۰ - ۱۳۸۰)

جدول ۴ سایر شاخص‌های کیفی آبخوان سلماس

Table 4 The other quality indices in Salmas aquifer

Index	Index value
Water Type	Mg-Cl
Salinity Hazard	High
SAR	419×10^{-3}
ESR	0.404
MH	61.1
RSC	0
Na%	27.93
PI	53.3
KI	0.5

در آبخوان سلماس، با توجه به مقادیر جدول فوق، خطر شوری و خطر منیزیم، بالا بوده و از این نظر آبخوان وضعیت مناسبی ندارد. این در حالی است که آبخوان مورد بررسی، به لحاظ پارامتر ESR، RSC، در وضعیت مناسب قرار داشته و از نظر پارامتر Na% در کلاس خوب قرار گرفته است. با توجه به پارامترهای نفوذپذیری و کلی هم، وضعیت کیفی آب‌های زیرزمینی در محدوده آبخوان سلماس، مناسب ارزیابی شد.

۳-۵- کیفیت آب زیرزمینی در آبخوان سلماس بر اساس نمودار شولر

طبقه‌بندی آب آبخوان سلماس از نظر شرب با استفاده از نمودار شولر نشان‌دهنده سیر نزولی کیفیت آب این آبخوان خصوصاً در چند سال اخیر است (شکل ۷). این روند نزولی

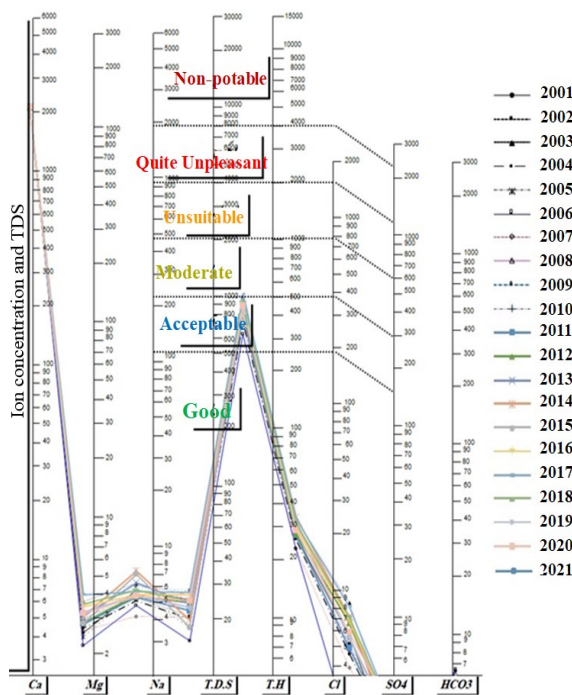


Fig. 7 Schuler diagram of Salmas aquifer (2001 - 2021)

شکل ۷ نمودار شولر آبخوان سلماس (بر اساس داده‌های ۱۴۰۰ - ۱۳۸۰)

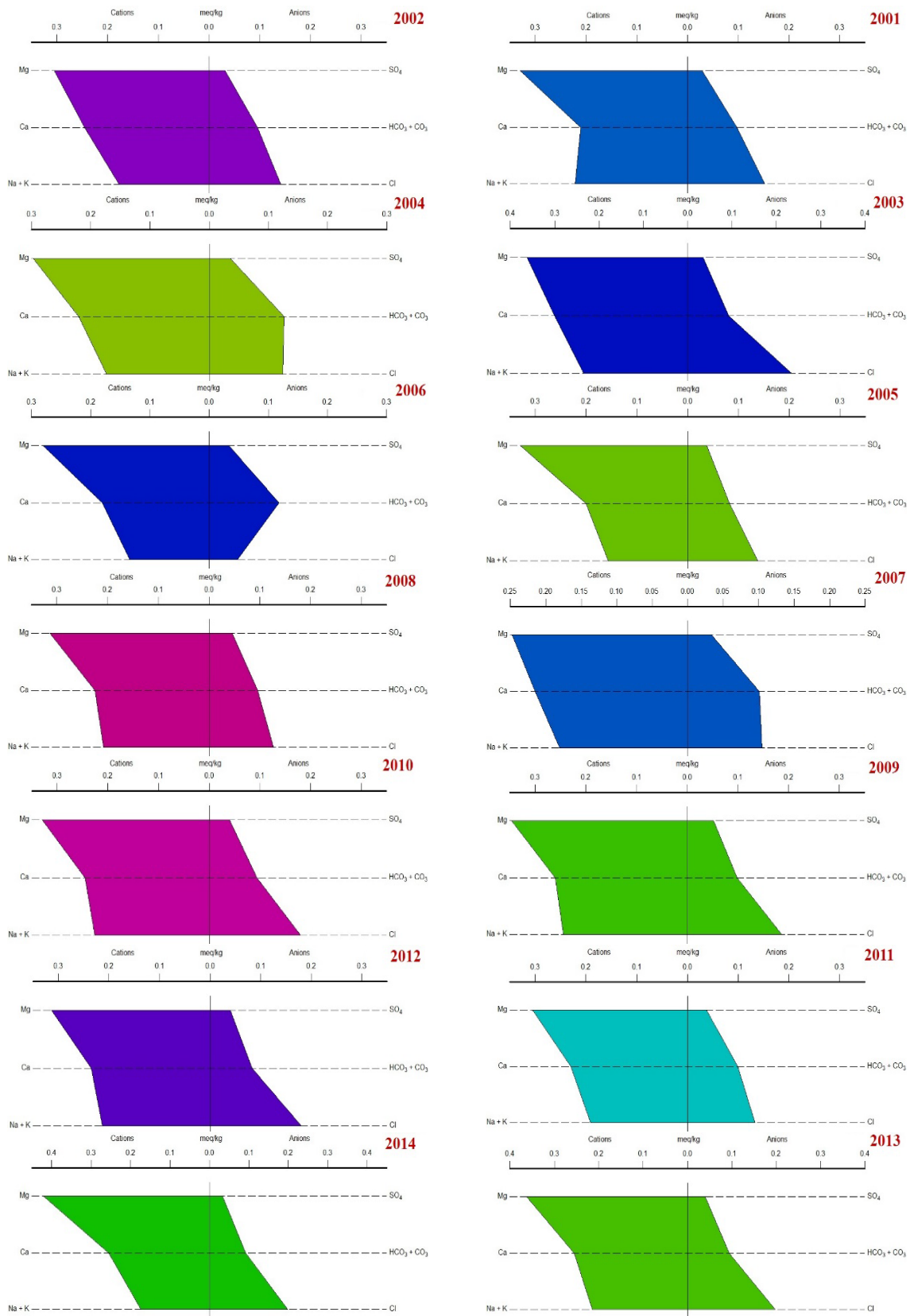


Fig. 8 Stiff diagrams of Salmas aquifer (2001 - 2021)

شکل ۸ نمودارهای استیف آبخوان سلماس (بر اساس داده‌های ۱۴۰۰ - ۱۳۸۰)

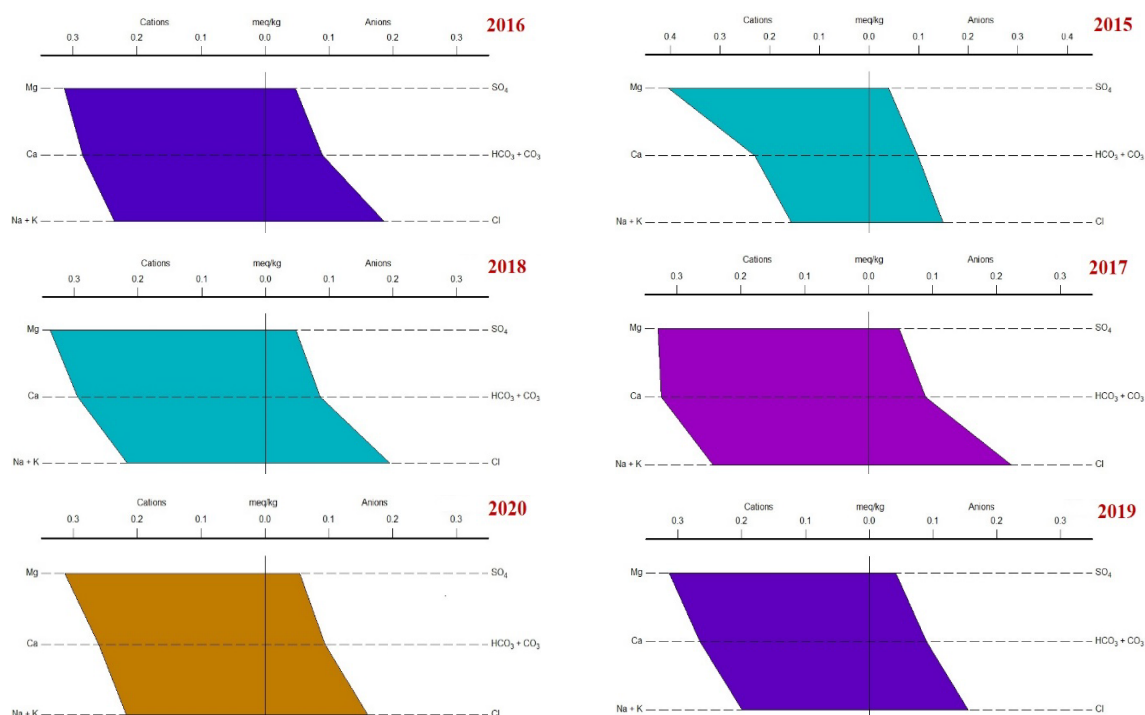


Fig. 8 Continued, Stiff diagrams of Salmas aquifer (2001 - 2021)

شکل ۸ ادامه، نمودارهای استیف آبخوان سلماس (بر اساس داده‌های ۱۴۰۰ - ۱۳۸۰)

۱۳۹۲ نیز همین روند را داشتند؛ با این تفاوت که در سال ۱۳۹۲ کالر و منیزیم کمی بیشتر شدند. در سال ۱۳۹۳ به‌جز کمی افزایش و کاهش به ترتیب در منیزیم و سدیم، هیچ تغییری در دیگر عناصر مشاهده نشد. تمام کاتیون‌ها و نیز کلراید در سال ۱۳۹۴ روند نزولی داشتند. در سال ۱۳۹۵ به‌جز منیزیم و بی‌کربنات که به ترتیب کاهش یافته و بدون تغییر بودند، سایر عناصر روند افزایشی داشتند. در سال بعدی در کلراید و نیز کاتیون‌ها روند صعودی مشاهده گردید و در سال ۱۳۹۷ هم کیفیت آبخوان سلماس مانند سال ۱۳۹۵ بود با این تفاوت که آنیون‌ها بدون تغییر بودند. در سال ۱۳۹۸ تمام کاتیون‌ها و آنیون‌ها کاهش یافته و در سال ۱۳۹۹ برعکس، تمام عناصر افزایش پیدا کردند؛ اما این افزایش بسیار ناچیز بود به طوری که در این دو سال وضعیت کیفی آبخوان تقریباً یکسان بود.

۷-۳- کیفیت آب زیرزمینی در آبخوان سلماس بر اساس نمودار دوروف

آبخوان سلماس با استفاده از نمودار دوروف مورد بررسی

در کاتیون‌ها و کلراید روند مثبت، در بی‌کربنات روند منفی مشاهده گردید اما در سولفات تغییری با سال قبل رخ نداده بود. وضعیت عناصر آبخوان در سال‌های ۱۳۸۳ و ۱۳۸۵ مشابه بوده و برخلاف سال ۱۳۸۲، در این دو سال کاتیون‌ها و کلراید روند کاهشی اما بی‌کربنات و سولفات روند افزایشی داشتند. البته سولفات در سال ۱۳۸۵ بدون تغییرات بود. این در حالی است که در سال ۱۳۸۴ تغییری در سولفات و کلراید روی نداد اما در منیزیم و سدیم روند مثبت و کلسیم و بی‌کربنات روند منفی داشتند. برعکس این فرایند در سال ۱۳۸۶ مشاهده شد؛ به طوری که منیزیم کاهش و کلسیم افزایش یافته و مقدار کلراید نیز تغییرات مثبت پیدا کرد؛ اما بی‌کربنات و سولفات هیچ روندی نداشتند.

در سال ۱۳۸۷، منیزیم، سدیم و کلراید بیشتر شدند اما در سایر عناصر تغییری مشاهده نشد. سال ۱۳۸۸ به‌جز بی‌کربنات، در سایر کاتیون‌ها و آنیون‌ها روند صعودی اتفاق افتاد. سال بعدی (۱۳۸۹) برعکس سال ۱۳۸۸، تمام پارامترها به‌جز کلراید کاهش یافتند. سال‌های ۱۳۹۰ و

۳-۱۰- نتایج پهنه‌بندی مناطق مستعد آلودگی

آزمون جک‌نایف، شاخص تعیین اهمیت عوامل موثر در وقوع پدیده مورد بررسی می‌باشد که نشان می‌دهد از متغیرهای مستقل ورودی، چه عواملی بیشترین و چه عواملی کمترین تاثیر را دارند. این منحنی شامل سه حالت مختلف است. در حالت اول (خطوط آبی کم‌رنگ) که نشانه تاثیر همه ورودی‌ها بر پدیده مورد مطالعه بدون وجود لایه مشخص شده است. حالت دوم (خطوط آبی پررنگ) که نشانه تاثیر آن فاکتور یا لایه بوده یا به عبارتی مربوط به زمانی است که مدل‌سازی تنها بر اساس یک متغیر انجام می‌شود و بر اساس آن میزان رخداد مورد بررسی برآورد می‌گردد. حالت آخر (خط قرمز رنگ) نشان‌دهنده تاثیر توأم همه پارامترها یا لایه‌ها می‌باشد (جعفرزاده و همکاران، ۱۴۰۰).

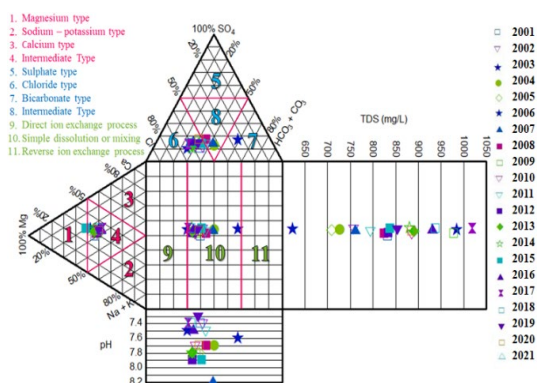


Fig. 9 Durov diagram of Salmas aquifer (2001 - 2021)

شکل ۹ نمودار دورو آبخوان سلماس (بر اساس داده‌های ۱۴۰۰ - ۱۳۸۰)

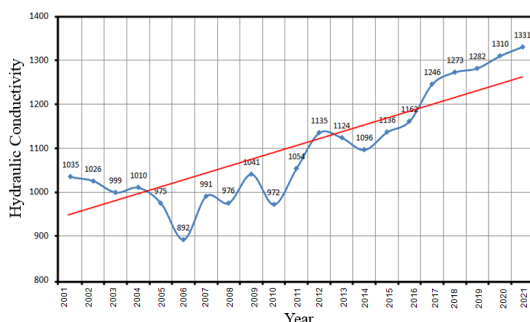


Fig. 10 Chemograph diagram of Salmas aquifer (2001 - 2021)

شکل ۱۰ نمودار کموگراف آبخوان سلماس (بر اساس داده‌های ۱۴۰۰ - ۱۳۸۰)

قرار گرفت (شکل ۹). نتایج این بررسی نشان داد که مقدار TDS در آبخوان سلماس در این بازه زمانی عمدتاً افزایشی است ولی از سال ۱۳۹۶ تا ۱۳۹۸ کمی کاهش یافته است. مقدار pH بین ۷/۴ تا ۸/۲ به تناوب افزایش و کاهش داشته است. از سال ۱۳۹۴ تا ۱۳۹۸ سیر این پارامتر نزولی بوده و از ۱۳۹۸ به بعد افزایش یافته است. در حالی که تغییرات سولفات و بی‌کربنات چندان محسوس و قابل توجه نبوده ولی در حالت کلی شیب افزایشی ملایمی در طی این ۲۰ سال داشتند. در کاتیون‌ها نیز از سال ۱۳۹۸ به بعد افزایش مشاهده شد.

۳-۸- وضعیت شوری آب زیرزمینی در آبخوان سلماس بر اساس نمودار کموگراف

شکل ۱۰ نمودار کموگراف آبخوان را بر اساس وضعیت شوری آن ارائه کرده است. روند کلی شوری در آبخوان سلماس افزایشی بوده و کمترین و بیشترین مقادیر آن در سال‌های ۱۳۸۵ و ۱۴۰۰ به ترتیب با مقادیر ۸۹۲ و ۱۳۳۱ میکروموس بر سانتی‌متر رخ داده است.

۳-۹- شاخص کیفیت آب آبخوان سلماس

شاخص کیفیت آب محدوده آبخوان سلماس که نتایج آن در جدول ۵ قابل مشاهده می‌باشد، نشان داد ۲/۵ درصد نمونه‌ها در گروه بسیار خوب، ۷۸/۵ درصد در گروه خوب، ۱۲/۷ درصد نمونه‌ها در گروه ضعیف و ۶/۳ درصد نیز در گروه نامناسب برای شرب قرار گرفته‌اند. پس از محاسبه متوسط هر نمونه و به دست آمدن مقادیر GWQI، نقشه نهایی با استفاده از روش IDW^۱ درون‌یابی و تهیه شد. در شکل ۱۱ نقشه شاخص کیفیت آب زیرزمینی محدوده آبخوان سلماس ارائه شده است. با توجه به این شکل، بخش عمده محدوده این آبخوان با کیفیت خوب ارزیابی شد (۸۱/۳٪ از سطح آبخوان). ۱۷/۶٪ نیز با کیفیت ضعیف و ۰/۶٪ با کیفیت بسیار ضعیف به دست آمد. ۰/۵٪ دیگر نیز با کیفیت نامناسب برای شرب مشاهده گردید.

^۱ Inverse Distance Weighting

جدول ۵ مقادیر شاخص کیفیت آب در محدوده آبخوان سلماس

Table 5 GWQI values in Salmas aquifer

Water quality	WQI	Sample number	Water quality	WQI	Sample number
Weak	179.55	41	Well	56.98	1
Well	69.71	42	Well	66.24	2
Well	72.64	43	Well	68	3
Well	61.98	44	Well	68.92	4
Weak	129.04	45	Well	87.99	5
Weak	159.1	46	Well	75.08	6
Well	83.8	47	Well	80.06	7
Weak	111.8	48	Well	74.4	8
Well	69.87	49	Well	73.15	9
Weak	109.7	50	Well	76.3	10
Well	72.1	51	Well	80.83	11
Well	69.95	52	Well	61.62	12
Well	66.93	53	Well	74.7	13
Very Well	43.77	54	Well	82.92	14
Well	79.42	55	Well	50.49	15
Well	62.28	56	Well	94.11	16
Well	56.98	57	Weak	169.55	17
Well	99.7	58	Weak	140.97	18
Well	78.65	59	Well	74.23	19
Well	62.5	60	Well	81.97	20
Well	83.54	61	Well	71.6	21
Well	81.5	62	Well	107.25	22
Well	72.17	63	Well	88.31	23
Well	75.01	64	Well	81.26	24
Well	72.33	65	Well	82.68	25
Well	79.95	66	Well	64.68	26
Well	74.52	67	Well	84.24	27
Well	66.3	68	Well	105.75	28
Well	84.58	69	Well	122.26	29
Well	67.47	70	Well	42.35	30
Well	51.78	71	Well	72.13	31
Well	65.63	72	Well	62.47	32
Unsuitable	434.65	73	Well	59.12	33
Very Well	49.15	74	Well	53.97	34
Unsuitable	312.54	75	Well	62.87	35
Unsuitable	422.5	76	Well	67.85	36
Unsuitable	407.17	77	Well	55.78	37
Weak	125.6	78	Weak	159.58	38
Unsuitable	614.8	79	Well	68.48	39
			Well	61.7	40

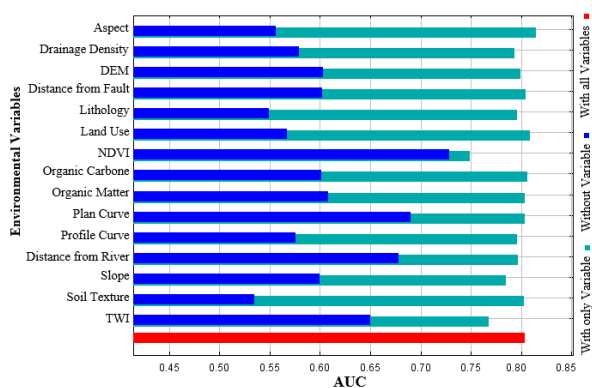


Fig. 12 Sensitivity analysis of environmental layers in Salmas aquifer

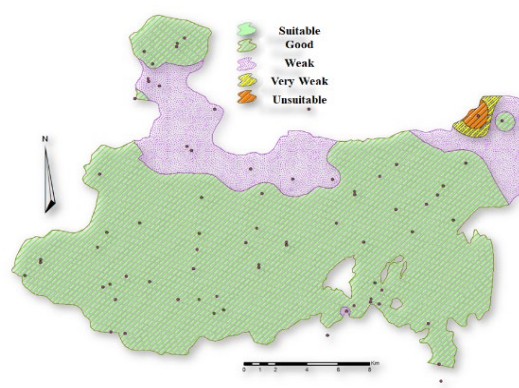


Fig. 11 Spatial distribution of GWQI in Salmas aquifer

شکل ۱۲ منحنی تحلیل حساسیت اطلاعات محیطی آبخوان سلماس

شکل ۱۱ پراکنش مکانی شاخص کیفیت آب زیرزمینی در محدوده آبخوان سلماس

عوامل زمین‌شناسی

سنگ‌شناسی منطقه مطالعاتی دارای ۱۶ واحد ژئومورفولوژیکی بود که سنگ‌شناسی دوره کواترنری Qf، بیشترین پتانسیل آسیب‌پذیری (۷۷ درصد) را نشان داد. در این مطالعه بیشترین احتمال آسیب‌پذیری (۵۴ درصد) در فاصله ۱۰ کیلومتری از گسل مشاهده گردید (شکل ۱۳).

عوامل اکولوژیکی

با توجه به نتایج به‌دست‌آمده، ۵ نوع کاربری در محدوده آبخوان سلماس شناسایی شد که عمدتاً اراضی زراعی، باغی، مرتعی و نمکزار می‌باشند. بیشترین مقدار آسیب‌پذیری با احتمال آسیب‌پذیری ۵۶ درصد، در مراتع مشاهده شد. در لایه NDVI، بیشترین احتمال پتانسیل آسیب‌پذیری (۶۷ درصد) در مقدار ۰/۲۳ تا ۰/۲۶ مشاهده شد. در آبخوان سلماس، ۵ کلاس بافت خاک شناسایی شد. بافت رسی، با احتمال ۵۶/۳ درصد، بیشترین احتمال آسیب‌پذیری را نشان دادند. بیشترین احتمال آسیب‌پذیری کربن آلی در آبخوان سلماس، در مقدار ۱/۸ $\mu\text{g/l}$ با احتمال ۶۰ درصد آشکار گردید. بیشترین احتمال آسیب‌پذیری ماده آلی در آبخوان سلماس نیز با احتمال ۶۰ درصد در مقدار ۳/۲ $\mu\text{g/l}$ به دست آمد (شکل ۱۳). محور قائم در تمام نمودارها، معرف احتمال وقوع آلودگی می‌باشد.

نقشه پیش‌بینی بخش‌های مستعد آسیب‌پذیری به آلودگی آب‌های زیرزمینی آبخوان سلماس بر اساس روش حداکثر آنتروپی در مدل مکسنت تهیه شد. در نهایت این نقشه، با استفاده از نرم‌افزار ArcGIS 10.8 به پنج کلاس، آسیب‌پذیری خیلی کم، آسیب‌پذیری کم، آسیب‌پذیری متوسط، آسیب‌پذیری زیاد و آسیب‌پذیری بسیار زیاد، طبقه‌بندی شد که در شکل ۱۴ قابل مشاهده می‌باشد.

مساحت مربوط به هر یک از کلاس‌های آسیب‌پذیری طبق شبیه‌سازی محاسبه شد (جدول ۶). نتایج نشان داد بیشترین سطح مربوط به کلاس آسیب‌پذیری کم و بسیار کم به ترتیب با مقدار ۱۰۵/۲۲ و ۲۰۰/۳۵ کیلومترمربع می‌باشد (جمعاً ۷۷/۵۲ درصد). این در حالی است که ۱۶/۷۷ درصد از این سطح نیز با آسیب‌پذیری متوسط

در بررسی آبخوان سلماس با استفاده از مدل مکسنت، با توجه به آنالیز حساسیت انجام‌گرفته، متغیرهای NDVI، انحنا سطح و فاصله از رودخانه، بیشترین تاثیر و بافت خاک کمترین تاثیر را بر آسیب‌پذیری به آلودگی آب‌های زیرزمینی نشان دادند (شکل ۱۲).

۱-۳- نمودارهای پاسخ حاشیه‌ای

عوامل توپوگرافی

با توجه به منحنی‌های پاسخ حاشیه‌ای برای هر یک از لایه‌های موثر بر فرایند مورد بررسی، محدوده ارتفاعی منطقه بین ۱۲۴۰ تا ۱۶۳۰ متری می‌باشد که بیشترین احتمال آسیب‌پذیری به آلودگی آب‌های زیرزمینی در ارتفاع ۱۳۱۰ متری، با احتمال ۵۳ درصد مشاهده شد. در محدوده مطالعاتی آبخوان سلماس، بیشترین احتمال (۵۷ درصد) آلودگی، در شیب ۲ تا ۳/۵ درصد مشاهده گردید. همچنین از میان جهات شیب نیز، بیشترین احتمال آسیب‌پذیری (۶۲ درصد) در جهات جنوب غربی رخ داده است. در این آبخوان، بیشترین مقدار انحنا سطح و انحنا پروفیل به ترتیب در ۱/۲ و ۰/۳۵- درجه بر متر با احتمال ۹۱ و ۶۱ درصد به‌عنوان مستعدترین مناطق برای آسیب‌پذیری به آلودگی آب‌های زیرزمینی برآورد گردیدند (شکل ۱۳).

عوامل هیدرولوژیکی

اثرات شاخص TWI نیز بر پتانسیل آسیب‌پذیری به آلودگی آب‌های زیرزمینی حوزه مورد مطالعه در شکل ۱۳ ارائه شده است. بر این اساس، مقدار ۵/۴ شاخص رطوبت توپوگرافی، بیشترین احتمال آسیب‌پذیری (۶۲ درصد) را دارند. در آبخوان سلماس، بیشترین احتمال آسیب‌پذیری در فاصله صفر کیلومتری از رودخانه با احتمال ۷۱ درصد مشاهده گردید. با نظر به محدوده به‌دست‌آمده برای فاکتور تراکم زهکشی حوزه که بین صفر تا ۱۴۳ متر می‌باشد، با انجام محاسبات و نتایج حاصل از مدل، بیشترین مکان‌های دارای پتانسیل آسیب‌پذیری به آلودگی آب‌های زیرزمینی با احتمال ۵۷ درصد در فاصله ۱۲۸ متری به دست آمدند (شکل ۱۳).

آلودگی بیشتر است این قسمت‌های دارای پتانسیل زیاد و بسیار زیاد به صورت مایل از جنوب غربی به سمت بخش‌های مرکزی آبخوان نیز به صورت پراکنده وجود دارند. این مناطق عمدتاً اراضی مرتعی و زراعی و بعضاً باغات هستند. در شکل ۱۵ چند بخش را که پتانسیل آلودگی در آن‌ها بیشتر بود، جهت رویت بهتر، بزرگ‌نمایی کرده و به صورت خط‌چین مشخص شده است.

شناخته شد. همچنین ۶/۷۱ درصد از محدوده این آبخوان با احتمال آسیب‌پذیری زیاد و بسیار زیاد برآورد گردید.

جهت دید بهتر از نتایج به‌دست‌آمده، نقشه نهایی مدل به صورت kml تبدیل و به گوگل ارث منتقل شد (شکل ۱۵). همان‌طور که از شکل نیز مشخص است در بخش شمالی، شمال شرقی و ضلع جنوبی آبخوان تمرکز مناطق مستعد

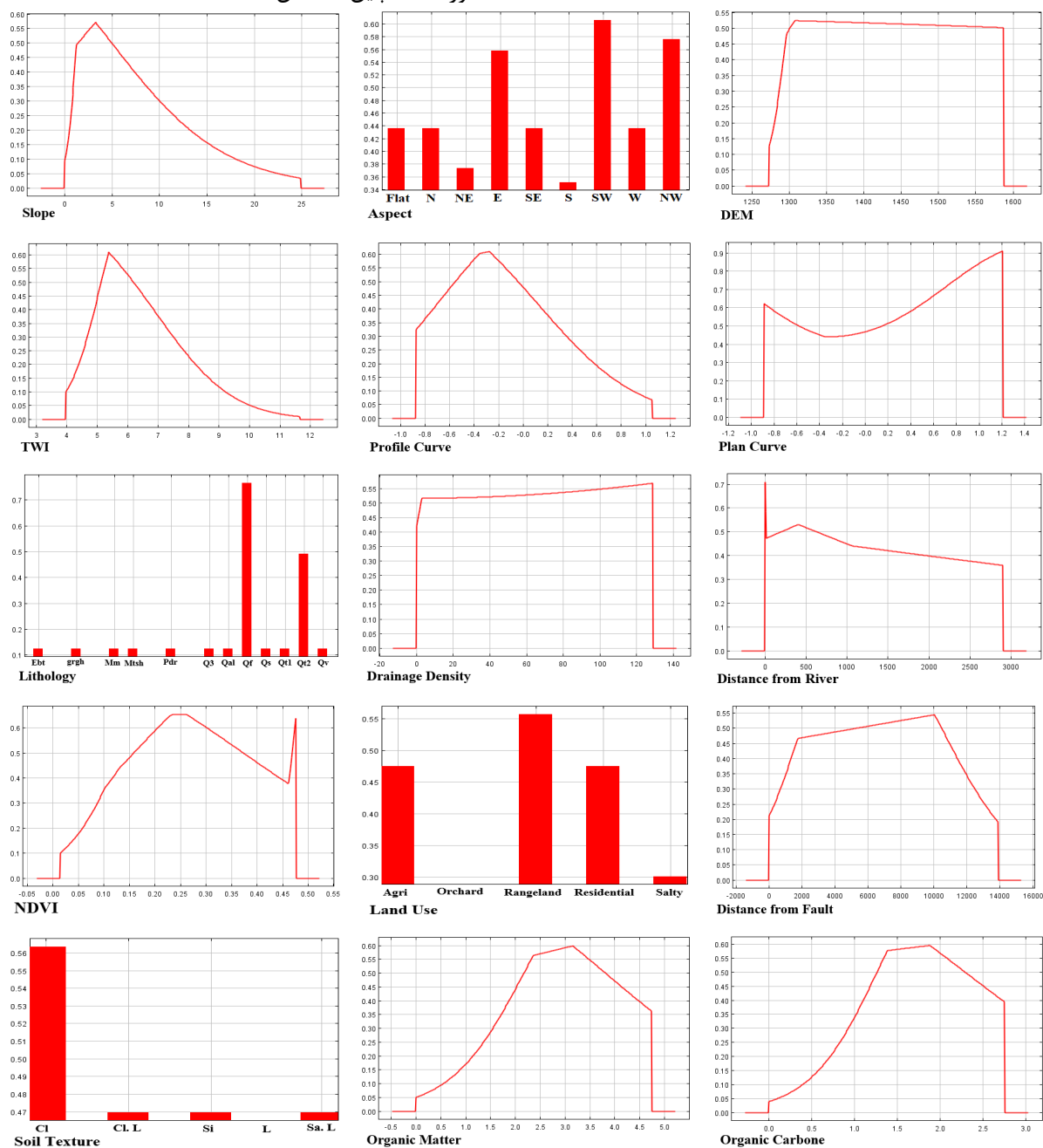


Fig. 13 MRC diagrams of Salmas aquifer

شکل ۱۳ منحنی‌های پاسخ حاشیه‌ای محدوده مورد بررسی

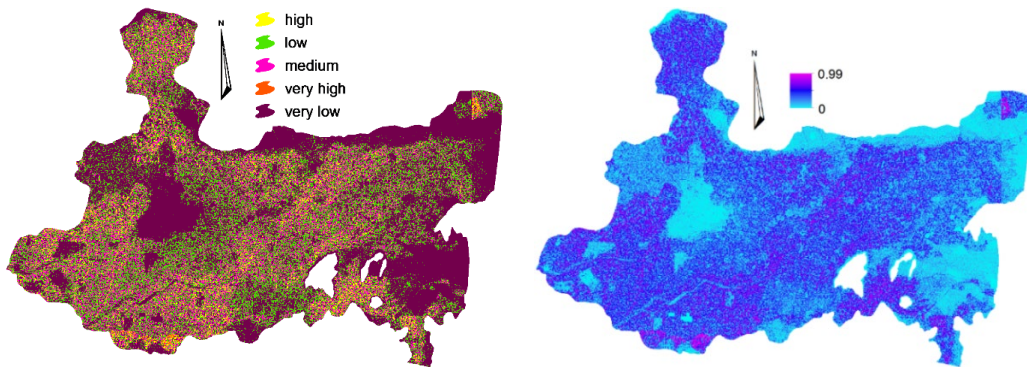


Fig. 14 Areas with pollution potential by maximum entropy (up: model prediction map; down: reclassified map) analysis of environmental layers in Salmas aquifer

شکل ۱۴ مناطق مستعد آسیب‌پذیری به آلودگی آب‌های زیرزمینی با استفاده از روش حداکثر آنتروپی (تصویر بالا، نقشه حاصل از مدل، تصویر پایین، نقشه طبقه‌بندی‌شده)

جدول ۶ مساحت کلاس‌های آسیب‌پذیری به آلودگی آب‌های زیرزمینی بر اساس روش حداکثر آنتروپی

Table 6 The area of vulnerability classes based on the maximum entropy method

مساحت (%)	مساحت (Km ²)	Vulnerability
50.83	200.35	Very Low
26.69	105.22	Low
16.77	66.12	Medium
5.37	21.15	High
0.34	1.35	Very High

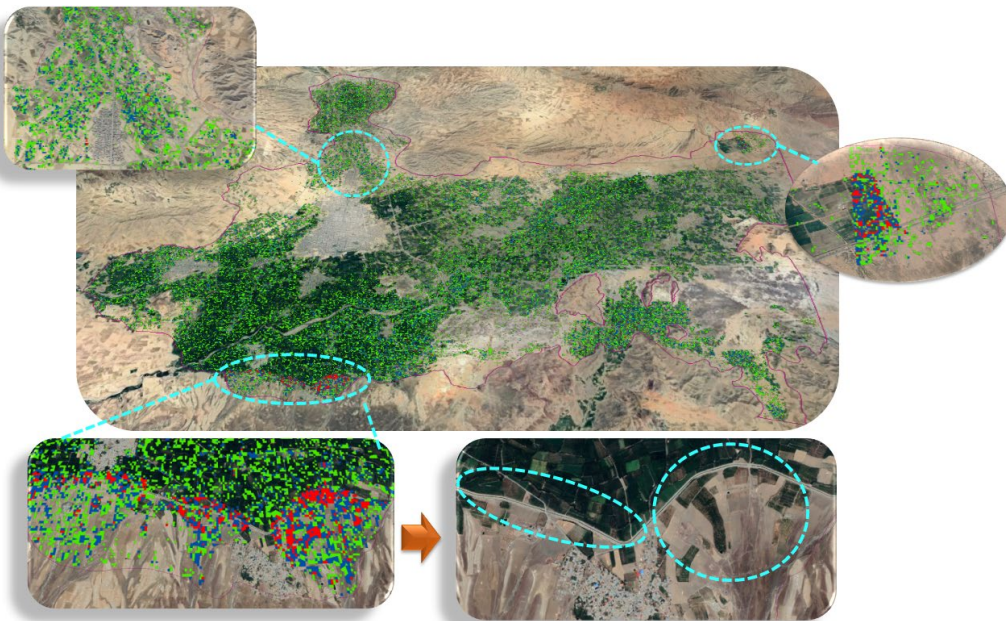
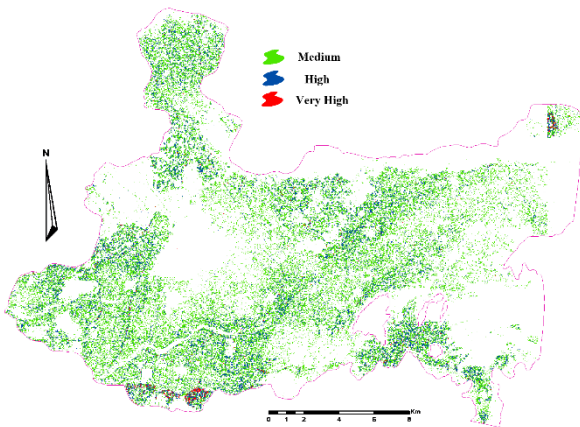


Fig. 15 The Spatial distribution of vulnerability in Salmas aquifer and Google Earth image for better visibility

شکل ۱۵ نقشه نهایی پیش‌بینی احتمال آسیب‌پذیری آبخوان سلماس و تصویر گوگل ارث جهت رویت بهتر

بوده که به لحاظ سنگ‌شناسی بر روی رسوبات Qf و Qt2 قرار گرفته‌اند و دارای شیب کم با بافت خاک رسی - لومی و رسی می‌باشند. با توجه به دقت خیلی خوب محاسبات طبق منحنی ROC (۸۰٪)، توصیه می‌شود در مناطقی با احتمال آسیب‌پذیری زیاد و بسیار زیاد، حدالمقدور از ایجاد یا افزایش آلاینده‌ها (مثل توسعه صنایع و کارخانه‌ها، دفع پسماندهای شهری، چاه‌های فاضلاب شهری و ...) جلوگیری شود. جهت افزایش دقت نتایج توصیه می‌شود در تعیین مناطق نمونه‌برداری دقت شود، زیرا مدل از آنچه برای آن به‌عنوان ورودی (نقطه شاهد یا حضور) تعریف می‌شود آموزش می‌بیند و بر این اساس الگوریتم پیش‌بینی را تعیین و نهایتاً از روی آن الگوریتم پیش‌بینی را انجام می‌دهد. این مورد شامل دقت در تهیه لایه اطلاعات محیطی نیز می‌باشد. به این صورت که هر چه این لایه‌ها با مقیاس و وضوح مناسب‌تری تهیه شوند، دقت نتایج نیز افزایش می‌یابد. به عنوان مثال، دقت نقشه DEM ۱۲ متری، بیش از DEM ۳۰ یا ۹۰ متری است، از این رو، دقت لایه‌های مستخرج از آن (مثل شیب، شاخص رطوبت توپوگرافی و ...) نیز افزایش می‌یابد. بنابراین در صورت امکان و دسترسی توصیه می‌شود این موارد رعایت گردد. همچنین جهت استفاده بهتر از خروجی و نتایج به‌دست‌آمده، توصیه می‌شود نتایج با واقعیت تطبیق داده شود. به عنوان مثال در این مطالعه بخش‌های با احتمال آلودگی زیاد و بسیار زیاد، علاوه بر مراتع، عمدتاً اراضی زراعی و در برخی موارد باغات بودند. می‌توان با بررسی این موارد، اطلاع از نوع کشت یا محصول، نوع و میزان کود و سموم استفاده‌شده، رسیدگی و برنامه‌ریزی مناسبی را انجام داد. جهت اطمینان از مطالعه حاضر توصیه می‌شود این پژوهش با استفاده از اطلاعات دقیق‌تر مثل نیترات و نیتريت و ... و همچنین با مدل‌های دیگر مورد بررسی قرار گیرد. با توجه به افزایش توسعه اجتماعی و اقتصادی ناشی از رشد سریع جمعیت و همچنین تغییرات اقلیمی و شرایط ناپایدار آب و هوایی در آینده، گسترش شهرنشینی و ... اینکه چگونه می‌توان به بهترین نحو با این چالش‌ها مقابله کرد، تحقیق در تمام جنبه‌های مدیریت آب به‌ویژه مباحث کیفی، همانند مطالعه حاضر بسیار ضروری است.

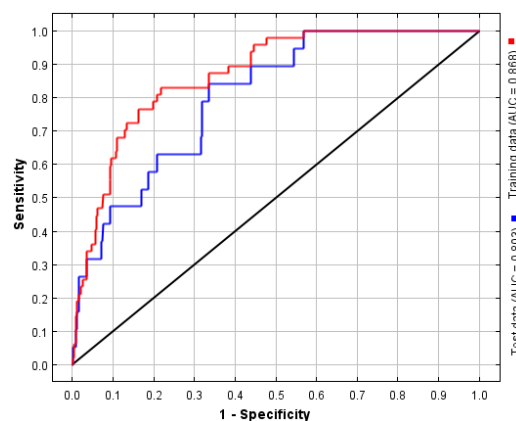


Fig. 16 The ROC curve of the predictions of vulnerable areas based on the maximum entropy method

شکل ۱۶ منحنی ROC نقشه پیش‌بینی مناطق مستعد آسیب‌پذیری بر اساس روش حداکثر آنتروپی

دقت پیش‌بینی نقشه نهایی حاصل از مدل با استفاده از شاخص صحت‌سنجی منحنی ROC ارزیابی شد. با توجه به منحنی ROC (شکل ۱۶) مقدار سطح زیر منحنی (AUROC) برای محدوده مطالعاتی، ۸۰ درصد محاسبه گردید که نشان‌دهنده قرار گرفتن پیش‌بینی انجام‌شده در سطح "خیلی خوب" می‌باشد (Marker و همکاران، ۲۰۱۲؛ Sekertekin و همکاران، ۲۰۱۷). مقدار AUROC برای داده‌های آموزش و صحت‌سنجی به ترتیب ۸۶ و ۸۰ درصد به دست آمدند.

۴- نتیجه‌گیری

در این مطالعه وضعیت کیفی آبخوان سلماس مورد بررسی قرار گرفته است و پتانسیل آسیب‌پذیری آن با استفاده از مدل مکسنت، برآورد گردید. به این منظور از شاخص‌ها و روش‌های مختلف ارزیابی کیفی استفاده شد. با توجه به یافته‌های این تحقیق، در مقادیر TDS و کاتیون‌ها طی بازه مورد بررسی افزایش مشاهده شد که نتایج این بخش با مطالعه مهدیخانی و همکاران (۱۴۰۰) مطابقت دارد. بر اساس نتایج کلی، شاخص‌های کیفی، به غیر از شاخص خطر شوری و خطر منیزیم، وضعیت مناسب این آبخوان را نشان دادند. بر اساس یافته‌های مدل مکسنت نیز ۲۳/۴۸ درصد آبخوان با پتانسیل آسیب‌پذیری متوسط تا بسیار زیاد محاسبه گردید. این مناطق عمدتاً اراضی مرتعی و کشاورزی

Acknowledgement

The authors are greatly thankful to West Azarbaijan Regional Water Authority for providing some data. We thank all reviewers and the editors for their kind reviews and comments that improved the clarity of the final manuscript.

Credit Authorship Contribution Statement

Conceptualization, M.S.J.; Methodology, M.S.J.; Software, M.S.J.; Writing Original draft preparation, M.S.J.; Investigation, A.M.; Supervision, A.J.; Reviewing, A.A. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding

The research was supported by West Azarbaijan Regional Water Authority.

Data Availability Statement

The data used to support the findings of this study were supplied by West Azarbaijan Regional Water Authority and so cannot be made freely available.

Conflict of interest

The authors have no conflict of interest in declaring that are relevant to the content of this article.

References

- Agrawal. D., Singh. J. K., Kumar. A., 2005, Maximum entropy-based conditional probability distribution runoff model, *Biosystem Engineering*, 90(1): 103–113. [Doi: [10.1016/j.biosystemseng.2004.08.003](https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2004.08.003)]
- Ali, S., Verma, S., Agarwal, M. B., Islam, R., Mehrotra, M., Deolia, R. K., ... & Fattahi, M. (2024). Groundwater quality assessment using water quality index and principal component analysis in the Achnera block, Agra district, Uttar Pradesh, Northern India. *Scientific Reports*, 14(1), 5381. Doi: [10.1038/s41598-024-56056-8](https://doi.org/10.1038/s41598-024-56056-8)
- Alimoradi, H., Ruhi Moghadam, A., Khaleghi, M. & Bamry, A. (2022). Groundwater quality prediction and mapping using geographic information system (GIS) models and machine learning methods (case study: Zahedan plain). *Hydrogeology*, 7(2), 43–60 (in Persian). Doi: [10.22034/hydro.2022.48571.1250](https://doi.org/10.22034/hydro.2022.48571.1250)
- Eid, M. H., Elbagory, M., Tamma, A. A., Gad, M., Elsayed, S., Hussein, H., ... & Péter, S. (2023). Evaluation of groundwater quality for irrigation in deep aquifers using multiple graphical and indexing approaches supported with machine learning models and GIS techniques, Souf Valley, Algeria. *Water*, 15(1), 182. Doi: [10.3390/w15010182](https://doi.org/10.3390/w15010182)

- Gaagai, A., Aouissi, H. A., Bencedira, S., Hinge, G., Athamena, A., Heddami, S., ... & Ibrahim, H. (2023). Application of water quality indices, machine learning approaches, and GIS to identify groundwater quality for irrigation purposes: A case study of Sahara Aquifer, Doucen Plain, Algeria. *Water*, 15(2), 289. Dpi: [10.3390/w15020289](https://doi.org/10.3390/w15020289)
- Gad, M., Gaagai, A., Agrama, A. A., El-Fiqy, W. F., Eid, M. H., Szűcs, P., ... & Ibrahim, H. (2024). Comprehensive evaluation and prediction of groundwater quality and risk indices using quantitative approaches, multivariate analysis, and machine learning models: An exploratory study. *Heliyon*, 10(17). [Doi: [10.1016/j.heliyon.2024.e36606](https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e36606)]
- Hossain, M. J., Rahman, M. Z., Kamal, A. M., Chowdhury, M. A., Hossain, M. S., Rahman, M. M., ... & Islam, A. R. M. T. (2024). Quantitative and qualitative assessment of groundwater resources for drinking water supply in the peri-urban area of Dhaka, Bangladesh. *Groundwater for Sustainable Development*, 25, 101146. [https://doi.org/10.1016/j.gsd.2024.101146]
- Hussein, E. E., Derdour, A., Zerouali, B., Almaliki, A., Wong, Y. J., Ballesta-de los Santos, M., ... & Elbeltagi, A. (2024). Groundwater Quality Assessment and Irrigation Water Quality Index Prediction Using Machine Learning Algorithms. *Water*, 16(2), 264. [https://doi.org/10.3390/w16020264]
- Hosseininia, M., & Hassanzadeh, R. (2023). Groundwater quality assessment for domestic and agricultural purposes using GIS, hydro-chemical facies and water quality indices: case study of Rafsanjan plain, Kerman province, Iran. *Applied Water Science*, 13(3), 84. [https://doi.org/10.1007/s13201-023-01891-9]
- Jaafarzadeh, M. S., Moghaddamia, A., Joodavi, A., & Ahmadi, A. (2022). Evaluation of the groundwater quality in Yazdekan Plain. *Extension and Development of Watershed Management*, 10 (38), 56-67 (in Persian).
- Jafarzadeh, M. S., Tahmasebipoor, N., Haghizadeh, A., Pourghasemi, H., & Rouhani, H. (2022). Prediction of susceptible areas for groundwater recharge based on maximum entropy model. *Advanced Applied Geology*, 11(4), 723-739 (in Persian). [https://doi.org/10.22055/aag.2020.29115.1967]
- Khudair, M. Y., Kamel, A. H., Sulaiman, S. O., & Al-Ansari, N. (2022). Groundwater Quality and Sustainability Evaluation for Irrigation Purposes: A Case Study in an Arid Region, Iraq. *International Journal of Sustainable Development and Planning*, 17(2), 413-419. [https://doi.org/10.18280/ijstdp.170206]

- Krishnamoorthy, L., & Lakshmanan, V. R. (2024). Evaluating hydro-geochemistry and heavy metal contamination of groundwater at Ranipet environs: employing multivariate statistics, agricultural indices, and health risk assessment. *Environmental Science and Pollution Research*, 31(19), 28253-28278. [<https://doi.org/10.1007/s11356-024-32928-4>]
- Marker, M., Pelacani, S., & Schroder, B. 2011, A functional entity approach to predict soil erosion processes in a small Plio -Pleistocene Mediterranean catchment in Northern Chianti, Italy, *Geomorphology*, Vol: 125, No: 4, p: 530-540. [<https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2010.10.022>]
- Mehdikhani, H., Abbas Novinpour, E., & Asadi Golmaz, O. (2022). Investigation of temporal and spatial changes in groundwater quality of Salmas plain aquifer. 24th symposium of geological society of Iran, Kharazmi university, Tehran, Iran (in Persian).
- Mir Abbasi Najafabadi, R., Din Pajhooh, Y., Fakheri Fard, A., 2011, Runoff modeling using the principle of maximum entropy (Case study: Kasilian basin). *Journal of Agricultural Science and Technology and Natural Resources, Soil and Water Sciences*, 15 (58), 39 – 51 (In Persian). [[20.1001.1.24763594.1390.15.58.14.8](https://doi.org/10.24763/594.1390.15.58.14.8)]
- Mirzaee Mahmoodabadi, R. & Azadijoo, O. (2023). Evaluation of hydro geochemistry and quality of alluvial aquifer in Gur plain of Bushehr province. *Quarterly journal of new findings of applied geology* (in Persian). [[10.22084/nfag.2023.28311.1579](https://doi.org/10.22084/nfag.2023.28311.1579)]
- Nasiri, M., Hamidi, M. & Kardan Moghadam, H. (2022). Evaluation of quantitative and qualitative changes in groundwater resources (case study: Sari-Neka aquifer). *Aquifer and Qanat Journal*, 3 (2), 109-122 (in Persian). [<https://doi.org/10.22077/jaaq.2019.1949.1012>]
- Omeka, M. E., Ezugwu, A. L., Agbasi, J. C., Egbueri, J. C., Abugu, H. O., Aralu, C. C., & Ucheana, I. A. (2024). A review of the status, challenges, trends, and prospects of groundwater quality assessment in Nigeria: an evidence-based meta-analysis approach. *Environmental Science and Pollution Research*, 31(15), 22284-22307. [<https://doi.org/10.1007/s11356-024-32552-2>]
- Ravikumar, P., & Somashekar, R. K. (2013). A geochemical assessment of coastal groundwater quality in the Varahi River basin, Udipi District, Karnataka State, India. *Arabian Journal of Geosciences*, 6, 1855-1870. [<https://doi.org/10.1007/s12517-011-0470-9>]
- Ravikumar, P., & Somashekar, R. K. (2017). Principal component analysis and hydro-chemical facies characterization to evaluate groundwater quality in Varahi River basin, Karnataka state, India. *Applied Water Science*, 7, 745-755. [<https://doi.org/10.1007/s13201-015-0287-x>]
- Salari, A., Heydarzadeh, M. and Qashgaizadeh, N. 2021. Quantitative and qualitative assessment of groundwater resources and factors influencing it (case study: villages in the central part of Bandar Lange). *Journal of Rural Development Strategies*, 8 (29), 123-140 (in Persian). [<https://doi.org/10.22048/rdsj.2021.258911.1890>]
- Sarkar, M., Pal, S. C., & Islam, A. R. M. T. (2022). Groundwater quality assessment for safe drinking water and irrigation purposes in Malda district, Eastern India. *Environmental Earth Sciences*, 81(2), 52. [<https://doi.org/10.1007/s12665-022-10188-0>]
- Sekertekin, A., Marangoz, A. M., & Akcin, H. (2017). Pixel-based classification analysis of land use land cover using Sentinel-2 and Landsat-8 data. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 42, 91-93. [<https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-4-W6-91-2017>].