

Prediction of Spatial Distribution Pattern of Groundwater Quality Indices in Golestan Province for Agricultural Use by Geostatistics and GIS

Masoomeh Delbari¹, Amin Amini Rakan², Mojtaba Sadeghi Marasht³

Abstract

Nowadays one of the key factors controlling development of sustainable agriculture is unsuitable quality of irrigation water. The aim of this study is to predict spatial distribution pattern of groundwater quality indices for agricultural purpose in Golestan province. The spatial variability of EC, TDS, SAR, pH, Na^+ , Cl^- , SO_4^{2-} , Ca^{2+} , HCO_3^- , $\text{Na}\%$, ES and PS of water samples obtained from 207 observation wells was investigated. The experimental semivariogram of all parameters was calculated and the best theoretical model was fitted. Ordinary kriging was then used to interpolate the values of investigated parameters at unsampled locations and their spatial distributions were mapped through GIS. The probability maps of exceeding a given critical threshold were produced for some parameters and indices using indicator kriging. The results showed that all water quality parameters have good spatial autocorrelation with spherical structure. Based on US soil salinity laboratory, 95% of the study area has a moderate water quality (C3S1 and C3S2). Based on FAO limit, 89% of the study area has good and moderate water quality. The area with appropriate water quality is about 2592 km² mostly contains eastern, southeastern and northwestern parts of the study area. Moreover based on the probability maps of ES and PS, there is a higher probability of salinity risk in the central regions as well as some parts in the west. The generated maps can help decision-makers and planners to make proper decisions for appropriate use of soil and water resources and development of a sustainable agriculture in the region.

Keywords: ArcGIS, kriging, probability map, spatial variability, water resources quality.

Received: 2016/01/01
Accepted: 2016/06/06

پیش‌بینی الگوی پراکنش مکانی شاخص‌های کیفی آب زیرزمینی استان گلستان برای مصارف کشاورزی با استفاده از زمین‌آمار و GIS

معصومه دلبری^{۱*}، امین امینی رکان^۲، مجتبی صادقی مرشت^۳

چکیده

امروزه یکی از موانع توسعه و گسترش کشاورزی پایدار، کیفیت نامناسب آب آبیاری است. این تحقیق، به منظور پیش‌بینی الگوی پراکنش مکانی شاخص‌های کیفی آب زیرزمینی استان گلستان برای مصرف کشاورزی انجام گرفت. بدین منظور تغییرات مکانی پارامترهای EC، TDS، SAR، pH، Na^+ ، Cl^- ، SO_4^{2-} ، Ca^{2+} ، HCO_3^- ، $\text{Na}\%$ ، ES (شوری موثر) و PS (شوری بالقوه) مورد بررسی قرار گرفت. ابتدا نیم‌تغییرنمای تجربی پارامترها محاسبه و بهترین مدل تئوری بر آن‌ها برازش شد. میان‌یابی پارامترهای مورد بررسی با استفاده از روش کریجینگ صورت گرفت و نقشه‌های پهنه‌بندی شده در محیط GIS تهیه گردید. برای ارزیابی ریسک شوری و سمیت آب، نقشه‌های احتمال عبور از حد آستانه معین برای برخی پارامترها و شاخص‌های کیفی با استفاده از روش کریجینگ شاخص ترسیم شد. نتایج نشان داد تمامی پارامترهای کیفی آب از همبستگی مکانی خوب با ساختار کروی برخوردارند. براساس استاندارد آزمایشگاه شوری خاک آمریکا حدود ۹۵٪ منطقه دارای آبی با کیفیت متوسط از نظر شوری و سدیمی (C3S1 و C3S2) می‌باشد. از طرفی بر اساس دستورالعمل FAO ۸۹٪ منطقه از آبی با کیفیت خوب و متوسط برخوردار است. آب با کیفیت خوب بیشتر شامل نواحی شرقی، جنوب شرقی و شمال غربی منطقه با مساحت حدود ۲۵۹۲ کیلومتر مربع می‌باشد. بر اساس نقشه‌های احتمال ES و PS، احتمال بروز مشکل شوری در نواحی مرکزی و بخش‌هایی از غرب منطقه بیشتر است. نتایج این تحقیق می‌تواند کمک موثری به برنامه‌ریزان و مدیران ذیربط در اتخاذ تصمیمات مدیریتی صحیح برای بهره‌گیری مناسب از منابع آب و خاک در راستای نیل به کشاورزی پایدار در منطقه بنماید.

واژه‌های کلیدی: تغییرات مکانی، کریجینگ، کیفیت منابع آب، نقشه احتمال، ArcGIS.

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۴/۱۰/۱۱
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۵/۰۳/۱۷

1- Associate Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Soil and Water, University of Zabol. Email: mas_delbari@yahoo.com.
2- Former M.Sc. students of water resource, Department of Water Engineering, Faculty of Soil and Water, University of Zabol.
3- Former M.Sc. students of water resource, Department of Water Engineering, Faculty of Soil and Water, University of Zabol.

*- Corresponding Author

۱- دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده آب و خاک، دانشگاه زابل.
۲- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد مهندسی منابع آب و خاک، دانشگاه زابل.
۳- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد مهندسی منابع آب و خاک، دانشگاه زابل.
*- نویسنده مسئول

مقدمه

مکانی موجود بین مقادیر پارامترها صورت می‌گیرد (گوارتس، ۱۹۹۷). از طرفی با توجه به افزایش حجم داده‌ها، ماهیت رقومی آن‌ها و توسعه‌ی کاربردها و تحلیل‌های مورد نیاز، روش‌های سنتی تحلیل داده‌های مکانی مانند روش‌های آماری نمی‌توانند به تنهایی و با اطمینان بالا مورد استفاده قرار گیرند. در این میان، استفاده از سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی (GIS) با بهره‌گیری هم‌زمان از روش‌های میان‌یابی زمین آماری راه حل مناسبی برای تحلیل و استخراج اطلاعات مفید از داده‌های مکانی می‌باشد که این اطلاعات می‌توانند در تصمیم‌گیری‌های آتی بسیار مؤثر واقع گردند (ویوکس، ۱۹۹۱؛ پانیچونی و همکاران، ۱۹۹۹).

تاکنون در ارتباط با استفاده از روش‌های زمین‌آماري و GIS برای بررسی تغییرات مکانی و پهنه‌بندی ویژگی‌های شیمیایی آب زیرزمینی مطالعات مختلفی صورت گرفته است. شعبانی (۱۳۸۷) تغییرات مکانی خصوصیات کیفی آب‌های زیرزمینی (شامل pH و TDS) دشت ارسنجان را با استفاده از روش‌های زمین آماری و روش‌های معین مورد بررسی قرار داد. نتایج نشان داد که روش کریجینگ معمولی با دارا بودن مقدار ضریب تبیین (R^2) بالاتر و خطای (RMSE) پایین‌تر از دقت بالاتری نسبت به روش‌های معین در تهیه نقشه تغییرات ویژگی‌های کیفی آب‌های زیرزمینی برخوردار است. رضایی و همکاران (۱۳۸۹) در مطالعه‌ای تغییرات مکانی مشخصه‌های مهم کیفیت آب زیرزمینی شامل EC، Na^+ و SAR را در سطح استان گیلان با استفاده از روش‌های زمین آماری بررسی کردند. نتایج نشان داد این خواص از ساختار مکانی خوبی برخوردار هستند و در مجموع روش‌های کریجینگ و معکوس فاصله با توان یک دارای دقت بیشتری نسبت به سایر روش‌های مورد استفاده بودند. زهتابیان و همکاران (۱۳۸۹) در مطالعه‌ای به بررسی تغییرات مکانی پارامترهای کاتیون، آنیون، یون سولفات و یون بی‌کربنات اندازه‌گیری شده در تعداد ۴۷ حلقه چاه و قنات و مقایسه روش‌های زمین آماری و روش‌های معین در پهنه‌بندی کیفیت آب زیرزمینی دشت گرمسار پرداختند و روش زمین آماری کوکریجینگ را به‌عنوان مناسب‌ترین مدل برگزیدند. حاجی‌هاشمی‌جری و همکاران (۲۰۱۰) از روش‌های کریجینگ و کوکریجینگ برای برآورد پارامترهای SAR، Na،

رشد روزافزون جمعیت و به طبع آن افزایش تقاضا برای تأمین غذا سبب توسعه و گسترش کشاورزی در نقاط مختلف جهان شده است. اما در مسیر این توسعه عوامل محدودکننده‌ای وجود دارد که از جمله مهم‌ترین آن‌ها محدودیت کمی و کیفی منابع آب می‌باشد. بنابراین شناخت تغییرپذیری مکانی کیفیت و کمیت آب‌های زیرزمینی برای مدیریت صحیح منابع تأمین آب در راستای نیل به کشاورزی پایدار ضروری به نظر می‌رسد (دلگادو و همکاران، ۲۰۱۰). مناسب بودن آب برای آبیاری بستگی به مقدار و یا نوع مواد محلول در آن دارد. در اثر آبیاری با آب نامناسب، ممکن است مسائل مختلفی در خاک (شوری و کاهش نفوذپذیری) و گیاه (مسمومیت) پیش آید. از طرف دیگر، کیفیت آب یکی از عوامل محدود کننده در توسعه‌ی سیستم‌های نوین آبیاری در یک منطقه می‌باشد. کیفیت نامناسب آب سبب گرفتگی گسیلنده‌ها در آبیاری قطره‌ای و یا وارد آمدن صدماتی به گیاه در آبیاری بارانی می‌شود. هدایت الکتریکی (EC) آب در یک منطقه همواره شاخص مناسبی از مقدار شوری آب آن منطقه می‌باشد. استفاده از آب با EC بالا باعث کاهش عملکرد گیاه می‌گردد. همچنین استفاده از آب سدیمی باعث از بین رفتن ساختمان خاک و در نتیجه کاهش نفوذپذیری خاک می‌گردد. میزان سدیم آب با شاخص نسبت جذب سدیم (SAR) که بیانگر فراوانی کاتیون سدیم (Na^+) به مجموع کاتیون‌های کلسیم (Ca^{2+}) و منیزیم (Mg^{2+}) است، نشان داده می‌شود. از طرفی وجود ترکیبات سمی سدیم، کلراید (Cl^-)، بر (B)، بی‌کربنات (HCO_3^-) و نیترات (NO_3^-) در آب آبیاری می‌تواند باعث کاهش عملکرد و گاهی از بین رفتن گیاه شود. pH آب نیز از لحاظ ایجاد مشکلات تغذیه‌ای و یا مسمومیت مهم می‌باشد (آیرز و وسکات، ۱۹۸۵).

پهنه‌بندی پارامترهای کیفی آب‌های زیرزمینی برای اولویت‌بندی مناطق مناسب به لحاظ آبیاری لازم است. عموماً نمونه‌برداری از تمام نقاط محدوده مطالعاتی مقدور نیست، لذا از روش‌های میان‌یابی برای تخمین داده‌ها در نقاط فاقد آمار استفاده می‌گردد. متداول‌ترین روش‌ها، روش‌های میان‌یابی زمین آماری (انواع کریجینگ) هستند که در آن‌ها برخلاف روش‌های مبتنی بر آمار کلاسیک، میان‌یابی بر اساس ارتباط

شد. تغییرات مکانی خصوصیات کیفی آب زیرزمینی شامل Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , HCO_3^- , SO_4^{2-} , NO_3^- و Cl^- و EC در منطقه‌ای در هند نیز مورد بررسی قرار گرفت و از روش‌های کریجینگ معمولی و کریجینگ شاخص برای پهنه‌بندی و تهیه نقشه‌های احتمال آلودگی آب زیرزمینی استفاده گردید (ادهیکاری و همکاران، ۲۰۱۰). دلبری و همکاران (۲۰۱۴) تغییرات مکانی پارامترهای کیفی آب زیرزمینی شامل EC، SAR، Na^+ ، HCO_3^- و Cl^- و pH را در منطقه فسا مورد بررسی قرار دادند و مناطق مناسب برای آبیاری با سامانه‌های تحت فشار را تعیین کردند. آن‌ها روش کریجینگ معمولی را برای میان‌یابی pH و HCO_3^- و روش کریجینگ شاخص را برای ارزیابی احتمال عبور مقادیر EC، SAR، Na^+ و Cl^- از حداکثر مجاز آن‌ها در آبیاری بارانی، به‌کار بردند. روش کریجینگ شاخص برخلاف روش مرسوم کریجینگ معمولی، امکان ارزیابی عدم قطعیت^۱ تخمین از طریق محاسبه واریانس شرطی تخمین و احتمال تجاوز یا عدم تجاوز یک خصوصیت کیفی آب را از حدود آستانه مشخص فراهم می‌کند و بنابراین در مطالعات مرتبط با تحلیل کیفی آب زیرزمینی بسیار موثر است (دلبری و افراسیاب، ۱۳۹۳).

منابع آب زیرزمینی در استان گلستان از منابع مهم تأمین آب کشاورزی محسوب می‌شوند و لذا بررسی کیفیت آب زیرزمینی و شناخت تغییرات مکانی آن برای مدیریت و برنامه‌ریزی صحیح منابع آب و نیل به یک کشاورزی پایدار در منطقه مهم و ضروری می‌باشد. از طرفی بررسی نتایج تحقیقات انجام شده در مورد بررسی تغییرات مکانی و پهنه‌بندی ویژگی‌های کیفی آب زیرزمینی در داخل و خارج کشور تا به امروز نشان می‌دهد که روش‌های زمین آماری از توانایی خوبی برای پیش‌بینی شکل الگوی پراکنش مکانی این متغیرها به‌ویژه در صورت وجود خود همبستگی مکانی قوی بین مشاهدات، برخوردار هستند. بنابراین در این پژوهش در نظر است که ابتدا به بررسی تغییرات مکانی ویژگی‌های کیفی آب زیرزمینی با استفاده از تحلیل خود همبستگی مکانی و سپس به میان‌یابی و پهنه‌بندی متغیرها و در خاتمه به اولویت‌بندی مناطق مطلوب از نظر آب آبیاری بر اساس استانداردهای موجود با بهره‌گیری از روش‌های زمین آماری و GIS پرداخته شود. همچنین نقشه‌های ریسک

Ca، TH، TDS و EC آب زیرزمینی در دشت گلپایگان استفاده کردند. نتایج آن‌ها بیانگر عملکرد مشابه دو روش مذکور بود. دلبری و همکاران (۱۳۸۹) به مقایسه روش‌های کریجینگ معمولی، لوگ کریجینگ، کوکریجینگ و وزن‌دهی معکوس فاصله (IDW) با توان‌های یک تا چهار برای بررسی تغییرات مکانی-زمانی عمق و شوری آب زیرزمینی دشت مازندران پرداختند. محمدی قلعه‌خانی و همکاران (۱۳۹۰) در تحقیقی با استفاده از GIS به بررسی تغییرات زمانی و مکانی تراز و کیفیت آب زیرزمینی در آبخوان‌های دشت اراک و ساوه پرداختند. آن‌ها آب زیرزمینی این دو آبخوان را بر اساس روش ویلکوکس جهت مصارف کشاورزی تقسیم بندی کردند. در مطالعه‌ای روش‌های کریجینگ معمولی و لوگ کریجینگ برای پیش‌بینی پراکنش مکانی EC، SAR و pH آب زیرزمینی در دشت کرمان مورد مقایسه قرار گرفت که در مجموع روش کریجینگ معمولی روش مناسب‌تری تشخیص داده شد (دلبری و همکاران، ۱۳۹۲). سلاجقه و همکاران (۱۳۹۲) از روش‌های زمین آماری و روش IDW برای میان‌یابی مشخصه‌های کیفی آب زیرزمینی در دشت کرج استفاده کردند. نتایج، برتری روش کریجینگ با لحاظ متغیر کمکی را نسبت به روش IDW نشان داد. جعفری و بخشنده مهر (۱۳۹۳) به پیش‌بینی الگوی پراکنش مکانی شوری و قلیائیت در استان اصفهان با استفاده از روش‌های کریجینگ، وزن‌دهی عکس فاصله و توابع پایه شعاعی پرداختند. نتایج حاکی از برتری روش زمین آماری کریجینگ بود. جهان‌شاهی و همکاران (۱۳۹۳) نیز با بهره‌گیری از روش‌های زمین آماری و GIS به اولویت‌بندی آب زیرزمینی دشت شهر بابک از نظر مصارف شرب و کشاورزی پرداختند. در خارج کشور نیز دمیر و همکاران (۲۰۰۹) از روش کریجینگ برای بررسی تغییرات مکانی عمق و شوری آب زیرزمینی مناطق کشاورزی در شمال ترکیه استفاده کردند. نتایج تحقیق آنان حاکی از این بود که قسمت شرقی محدوده مورد مطالعه که دارای زهکشی ضعیفی است، دارای بیشترین خطر برای شوری است. دلگادو و همکاران (۲۰۱۰) از روش کریجینگ برای پهنه‌بندی عناصر کیفی آب زیرزمینی شامل Ca^{2+} ، Mg^{2+} ، Na^+ ، K^+ ، HCO_3^- ، SO_4^{2-} و NO_3^- و EC در منطقه یوکاتان مکزیک استفاده کردند. بر اساس نقشه‌های حاصله منطقه مورد مطالعه از نظر کیفیت آب برای کشاورزی به نواحی مختلف تقسیم‌بندی

1- Uncertainty

هکتار را مرتع و در مجموع حدود ۷۰٪ از سطح استان را منابع طبیعی تشکیل می‌دهد. این استان دارای تنوع آب و هوایی خشک و نیمه خشک، معتدل و کوهستانی می‌باشد و میانگین بارندگی سالانه استان حدود ۴۵۰ میلی‌متر است که این میزان در نواحی شمالی آن به حدود ۲۰۰ میلی‌متر و در نواحی جنوبی به حدود ۷۰۰ میلی‌متر می‌رسد. بیشترین بارندگی در فصول سرد سال و کم‌ترین آن در تابستان صورت می‌گیرد. از طرفی ۶۰ درصد بارندگی استان در فصول غیر زراعی (مهر تا فروردین) به‌وقوع می‌پیوندد.

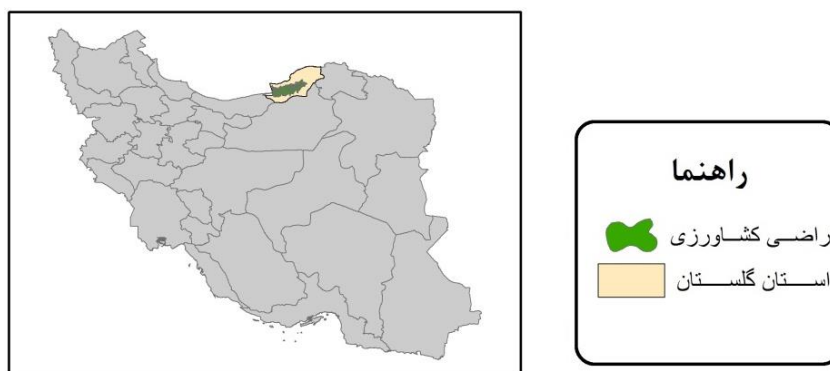
آلوده‌کننده‌های مهم آب زیرزمینی با استفاده از روش کریجینگ شاخص تهیه می‌گردد.

مواد و روش‌ها

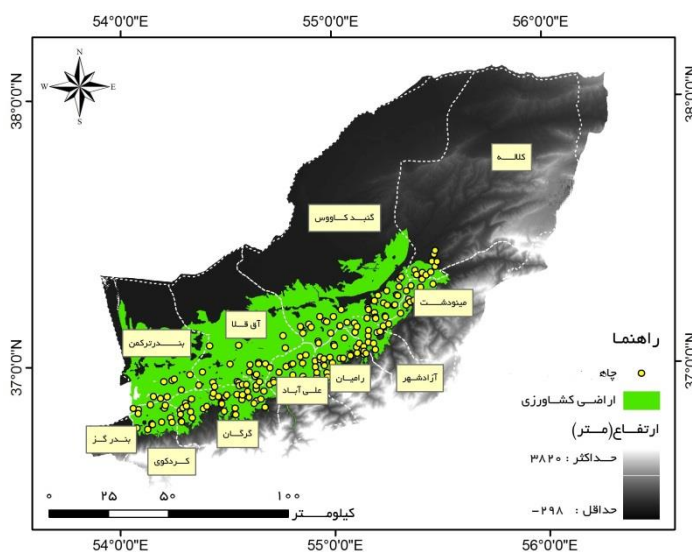
منطقه مورد مطالعه و داده‌های مورد استفاده

منطقه مورد مطالعه شامل اراضی کشاورزی استان گلستان می‌باشد (شکل ۱). مساحت استان گلستان بالغ بر ۲۲ هزار کیلومتر مربع است که حدود ۱/۳ درصد از مساحت کل کشور را شامل می‌گردد. از این سطح، حدود ۶۳۰ هزار هکتار را زمین‌های زراعی، نزدیک ۴۳۰۰۰۰ هکتار را جنگل، ۱۱۲۶۰۰۰

(الف)



(ب)



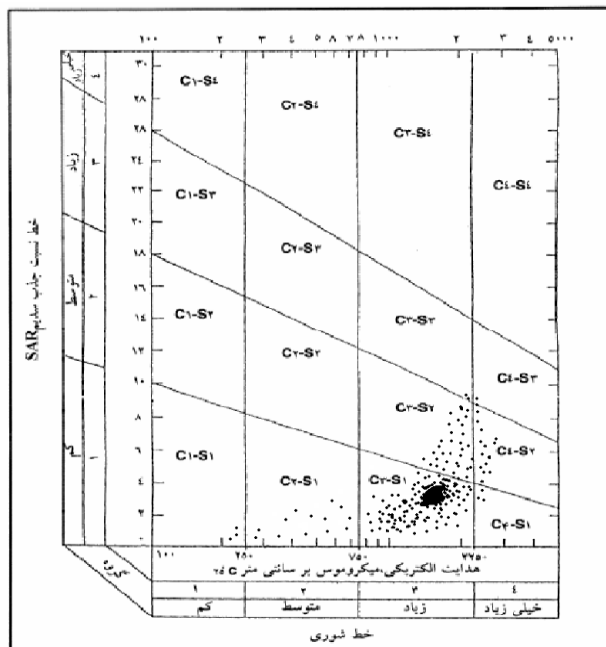
شکل ۱- نقشه موقعیت منطقه مورد مطالعه (الف) و چاه‌های کشاورزی (ب)

در این تحقیق از داده‌های کیفی چاه‌های برداشت آب بهار سال ۱۳۹۰ به‌دست آمده است، استفاده گردید. تعداد چاه- کشاورزی که توسط سازمان آب منطقه‌ای استان گلستان در ها در حوضه‌ی مورد مطالعه ۲۰۷ عدد بوده (شکل ۱) و

توصیف کیفیت آب برای آبیاری در EC های بیش از ۲۵۰ میکروموس بر سانتی‌متر مورد استفاده قرار می‌گیرند (دلگادو و همکاران، ۲۰۱۰). همانطوری‌که دونن (۱۹۵۴) بیان کرد مناسب بودن آب برای آبیاری فقط بستگی به غلظت نمک‌های محلول آن ندارد، زیرا نمک‌های با قابلیت حل پایین در خاک رسوب کرده و با هر نوبت آبیاری بر مقدار آن‌ها در خاک افزوده می‌شود، این در حالی است که افزایش غلظت نمک‌های با قابلیت حل بالا باعث افزایش شوری خاک می‌گردد. PS خطر افزایش شوری در اثر افزایش Cl^- و SO_4^{2-} را تخمین می‌زند. افزایش یون‌های مزبور می‌تواند باعث افزایش پتانسیل اسمزی محلول خاک زمانی که رطوبت قابل استفاده در خاک کمتر از ۵۰٪ باشد، گردد. شاخص PS از رابطه زیر محاسبه می‌گردد (دلگادو و همکاران، ۲۰۱۰):

$$PS = Cl^- + \frac{1}{2} SO_4^{2-} \quad [1]$$

بر اساس این پارامتر، کیفیت آب می‌تواند به سه طبقه خوب ($PS < 3 \text{ meq/lit}$)، متوسط ($3 - 15 \text{ meq/lit}$) و بد ($PS > 15 \text{ meq/lit}$) تقسیم‌بندی شود (دونن، ۱۹۵۴).



شکل ۲- طبقه‌بندی کیفیت آب زیرزمینی بر اساس نمودار آزمایشگاه شوری خاک آمریکا (USSL)

متغیرهای کیفی مورد مطالعه شامل هدایت الکتریکی (EC)، نسبت جذب سدیم (SAR)، مقدار کل مواد جامد (TDS)، اسیدیته (pH)، سدیم (Na^+)، کلراید (Cl^-)، سولفات (SO_4^{2-})، کلسیم (Ca^{2+})، بی‌کربنات (HCO_3^-)، درصد سدیم ($Na\%$) و پتاسیم (K^+) با استفاده از روش‌های استاندارد اندازه‌گیری شده‌اند (APHA، ۲۰۰۵).

کیفیت آب زیرزمینی از نظر کشاورزی

تاکنون روش‌های مختلف طبقه‌بندی کیفیت آب برای مصارف کشاورزی پیشنهاد شده است (ریچاردز، ۱۹۵۴؛ شینبرگ و استر، ۱۹۷۸؛ آیرز و وسکات، ۱۹۸۵). روش طبقه‌بندی آزمایشگاه شوری خاک آمریکا (USSL) پرکاربردترین روش طبقه‌بندی آب برای مصارف کشاورزی بر اساس EC و SAR است. بر اساس مقادیر EC، آب برای کشاورزی به گروه‌های با شوری کم (C_1)، شوری متوسط (C_2)، شوری بالا (C_3) و شوری بسیار بالا (C_4) تقسیم می‌گردد. همچنین کیفیت آب بر اساس SAR می‌تواند به چهار گروه کم (S_1)، متوسط (S_2)، بالا (S_3) و خیلی بالا (S_4) تقسیم گردد (شکل ۲). بدین ترتیب اگر آبی دارای EC کم (کمتر از ۲۵۰ میکروموس بر سانتی‌متر) و SAR (کمتر از ۱۰) باشد دارای کیفیت خیلی خوب بوده و در گروه C_1S_1 قرار می‌گیرند. آب‌های با کیفیت خوب (EC کمتر از ۷۵۰ میکروموس بر سانتی‌متر) و SAR بین ۱۰ تا ۱۸ در گروه‌های C_1S_2 ، C_2S_1 و C_2S_2 و آب‌های با کیفیت متوسط (EC کمتر از ۲۲۵۰ میکروموس بر سانتی‌متر) و SAR کمتر از ۲۶ در گروه‌های C_3S_2 ، C_1S_3 ، C_3S_3 و C_3S_1 قرار گرفته و بقیه‌ی آب‌ها دارای کیفیت نامناسب هستند (ریچاردز، ۱۹۵۴). همچنین سازمان خوار و بار کشاورزی ملل متحد (FAO^۱) نیز جداولی برای طبقه‌بندی آب آبیاری بر اساس حدود بحرانی خصوصیات مختلف آب از جمله EC و SAR پیشنهاد نموده است که به‌عنوان استاندارد کیفیت آب مورد قبول قرار گرفته است (آیرز و وسکات، ۱۹۸۵). در جدول ۱، حدود مجاز پارامترهای کیفی آب مورد مطالعه در این تحقیق که توسط FAO تعیین شده است، ارائه شده است.

علاوه بر شاخص‌های کیفی EC و SAR، دو شاخص شوری بالقوه (PS^2) و شوری موثر (ES^3) نیز معمولاً برای

1- Food and agriculture organization of the united nations
2- Potential salinity
3- Effective salinity

برای استفاده از آب زیرزمینی در کشاورزی تعیین شد. خلاصه-ای از تئوری تحلیل‌های زمین‌آماري در ذیل ارائه شده است.

نیم‌تغییرنما

اولین قدم از یک تحلیل زمین‌آماري، محاسبه نیم-تغییرنمای تجربی و مدل کردن آن است. نیم‌تغییرنمای تجربی داده‌های کیفی آب زیرزمینی از رابطه زیر محاسبه گردید (آیزاک و سریواستوا، ۱۹۸۹):

$$\gamma^*(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} \{wqv(u_i) - wqv(u_i + h)\}^2 \quad [6]$$

که در آن $wqv(u_i)$ و $wqv(u_i + h)$ به ترتیب مقادیر اندازه‌گیری شده متغیر کیفی آب^۲ در نقاط u_i و $u_i + h$ بوده و $N(h)$ تعداد جفت مشاهداتی است که به فاصله h از یکدیگر قرار گرفته‌اند. پس از محاسبه نیم‌تغییرنما، بهترین مدل تئوری بر آن برازش می‌شود. در این تحقیق، مدل کروی بهترین برازش را به نیم‌تغییرنمای تجربی داده‌های کیفی آب زیرزمینی داشت. برای مطالعه مدل‌های نیم‌تغییرنما خواننده می‌تواند به منابع مختلفی از جمله آیزاک و سریواستوا (۱۹۸۹) و گوارتس (۱۹۹۷) مراجعه کند.

کریجینگ معمولی

کریجینگ معمولی (OK) یک روش تخمین زمین-آماري بر منطق "میانگین متحرک وزن‌دار" است که با استفاده از مقادیر معلوم و پارامترهای مدل نیم‌تغییرنما، مقادیر مجهول را برآورد می‌کند. رابطه کلی تخمین‌گر کریجینگ معمولی به شرح زیر است (گوارتس، ۱۹۹۷):

$$wqv^*(u_0) = \sum_{i=1}^{n(u_0)} \lambda_i wqv(u_i) \quad \text{with} \quad \sum_{i=1}^{n(u_0)} \lambda_i = 1 \quad [7]$$

که در آن $wqv^*(u_0)$ مقدار تخمین زده شده متغیر کیفی آب در نقطه u_0 مقدار مشاهده شده متغیر در نقطه u_i ، λ_i وزن نسبت داده شده به مقدار متغیر در نقطه u_i و $n(u_0)$ تعداد مشاهدات در همسایگی نقطه u_0 می‌باشد. اوزان کریجینگ با استفاده از مشخصات مدل نیم‌تغییرنمای متغیر مورد مطالعه محاسبه می‌گردد. جمع وزن‌های اختصاص داده

ES برآورد دقیق‌تری از خطر افزایش فشار اسمزی محلول خاک بر اثر افزایش یون‌های کربنات و بی‌کربنات در خاک فراهم می‌کند. تحت چنین شرایطی کربنات کلسیم و منیزیم و سولفات کلسیم در خاک رسوب کرده و بنابراین افزایش فشار اسمزی محلول خاک متوقف می‌گردد. مقدار ES از رابطه زیر محاسبه می‌گردد (دلگادو و همکاران، ۲۰۱۰):

$$\text{If } Ca^{2+} > (CO_3^{2-} + HCO_3^- + SO_4^{2-}), \quad ES = (\sum cations \text{ or } \sum anions) - (CO_3^{2-} + HCO_3^- + SO_4^{2-}) \quad [2]$$

$$\text{If } Ca^{2+} < (CO_3^{2-} + HCO_3^- + SO_4^{2-}) \text{ but } Ca^{2+} > (CO_3^{2-} + HCO_3^-), \quad ES = (\sum cations \text{ or } \sum anions) - (Ca^{2+}) \quad [3]$$

$$\text{If } Ca^{2+} < (CO_3^{2-} + HCO_3^-), \quad \text{but } (Ca^{2+} + Mg^{2+}) > (CO_3^{2-} + HCO_3^-), \quad ES = (\sum cations \text{ or } \sum anions) - (CO_3^{2-} + HCO_3^-) \quad [4]$$

$$\text{If } (Ca^{2+} + Mg^{2+}) < (CO_3^{2-} + HCO_3^-), \quad ES = (\sum cations \text{ or } \sum anions) - (Ca^{2+} + Mg^{2+}) \quad [5]$$

در روابط فوق $(\sum cations \text{ or } \sum anions)$ به معنی استفاده از بیشترین مقدار کاتیون‌ها و آنیون‌ها می‌باشد. ES نیز مشابه PS کیفیت آب را به سه گروه خوب، متوسط و بد تقسیم می‌کند.

کاربرد زمین‌آمار و GIS

به منظور بررسی تغییرات مکانی پارامترها و شاخص‌های کیفی آب زیرزمینی، نیم‌تغییرنمای تجربی هر کدام در محیط نرم‌افزار GS+ (Robertson, 2000) ترسیم و بهترین مدل تئوری بر آن برازش شد. پس از استخراج مشخصات مربوط به مدل‌های تئوری نیم‌تغییرنماهای صفات مورد نظر، داده‌ها برای میان‌یابی و تهیه لایه‌های رستری وارد نرم افزار ArcGIS (اسری، ۲۰۰۴) شد. از تخمین‌گر کریجینگ معمولی^۱ برای تهیه لایه‌های رستری استفاده گردید. این لایه‌ها با استفاده از ابزارهای مربوطه در نرم افزار ArcGIS طبقه‌بندی و تلفیق شد و لایه راهنمای کیفیت آب برای کشاورزی بر اساس روش آزمایشگاه شوری خاک آمریکا (USSL) در منطقه به-دست آمد. همچنین نقشه تمامی پارامترها بر اساس محدودیت‌های FAO مورد ارزیابی قرار گرفت و مناطق مطلوب

2- Water quality variable

1- Ordinary kriging

روش ارزیابی

در این تحقیق برای ارزیابی مدل‌های تئوری نیم-تغییرنا و برآوردهای کریجینگ از روش اعتبار سنجی متقابل^۱ (آیزاک و سریواستوا، ۱۹۸۹)، استفاده شد. معیارهای مقایسه شامل جذر میانگین مربعات خطا (RMSE^۲)، میانگین انحراف خطا (MBE^۳) و جذر میانگین مربعات خطای نرمال شده (NRMSE^۴) بودند:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (wqv^*(u_i) - wqv(u_i))^2} \quad [9]$$

$$MBE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (wqv^*(u_i) - wqv(u_i)) \quad [10]$$

$$NRMSE = \frac{RMSE}{u_{max} - u_{min}} \quad [11]$$

که در آن، $wqv^*(u_i)$ و $wqv(u_i)$ به ترتیب مقدار تخمین زده شده و مقدار مشاهده شده متغیر کیفی آب در نقطه u_i ، u_{min} و u_{max} به ترتیب حداکثر و حداقل مقادیر مشاهده شده متغیر و N تعداد کل مشاهدات می‌باشد.

نتایج و یافته‌ها

تحلیل آماری

در جدول ۱ آماره‌های اصلی (میانگین، حداقل، حداکثر، انحراف معیار و ضریب تغییرات) و مقدار حداکثر مجاز پارامترهای کیفی مورد مطالعه ارائه شده‌اند. بررسی آماری داده‌ها نشان داد که بجز $\text{Na\%}$ ، HCO_3^- و pH که دارای درصد ضریب تغییرات کمتر از ۱۰۰ هستند، بقیه یون‌ها و شاخص‌ها دارای ضریب تغییرات بالای ۱۰۰ درصد می‌باشند. بیشترین ضریب تغییرات را یون SO_4^{2-} داراست. از طرفی مقایسه محدوده تغییرات متغیرهای مورد مطالعه با حداکثر مجاز آن‌ها برای آبیاری نشان داد که به جز SAR، پارامترهای EC، TDS، Cl^- ، SO_4^{2-} ، ES و PS به ترتیب در ۹، ۸، ۷، ۱۳، ۱۳ و ۱۰ درصد از نمونه‌های آب، بیشتر از حد مجاز هستند.

شده به مقادیر معلوم (λ_i ها)، بایستی برابر واحد گردد. همچنین محاسبه اوزان بایستی به نحوی باشد که حداقل واریانس کریجینگ فراهم گردد (گوارتس، ۱۹۹۷):

$$\begin{cases} \sum_{j=1}^{n(u_0)} \lambda_j \gamma(u_i, u_j) + \mu = \gamma(u_i, u_0), i=1, \dots, n(u_0) \\ \sum_{j=1}^{n(u_0)} \lambda_j = 1 \end{cases} \quad [8]$$

که در آن $\gamma(u_i, u_j)$ مقدار نیم‌تغییرنا بین تمام جفت مقادیر اندازه‌گیری شده در نقاط u_i و u_j ، μ ضریب لاگرانژین برای به حداقل رساندن واریانس کریجینگ و $\gamma(u_i, u_0)$ مقدار نیم‌تغییرنا بین موقعیت مورد تخمین (u_0) و i امین نقطه نمونه‌برداری شده می‌باشد.

روش OK بهترین تخمین را در صورت نرمال بودن توزیع داده‌ها ارائه می‌دهد (گوارتس، ۱۹۹۷). بنابراین از آنجا که داده‌های کیفی آب زیرزمینی به‌طور عمده دارای توزیع غیرنرمال می‌باشند، ابتدا به کمک تبدیلی توزیع داده‌ها نرمال شده، سپس روش OK روی داده‌های تبدیل یافته اعمال می‌شود.

نقشه احتمال عبور از یک حد آستانه معین

در بسیاری از تصمیم‌گیری‌ها از جمله مشخص کردن مناطق نامناسب برای کشاورزی از نظر کیفیت آب، نیاز به داشتن آگاهی از احتمال عبور متغیرها یا شاخص‌های کیفی آب آبیاری از یک حد آستانه مشخص است. از آنجا که روش OK قادر به تولید نقشه احتمال نیست، در این تحقیق از روش کریجینگ شاخص (IK) برای تهیه نقشه احتمال عبور EC، SAR، PS و ES به ترتیب از حد آستانه $3000 \mu\text{mho/cm}$ ، 15 meq/lit و 15 meq/lit استفاده گردید. نقشه‌های احتمال معیاری از عدم قطعیت تخمین متغیرها در منطقه مورد مطالعه فراهم می‌کنند (دلبری و افراسیاب، ۱۳۹۳). جزئیات روش IK در منابع مختلف از جمله گوارتس (۱۹۹۷ و ۲۰۰۹) آمده است.

1- Cross validation

2- Root Mean Square Error

3- Mean Bias Error

4- Normalized Root Mean Squared Error

جدول ۱- مقادیر حداکثر مجاز* و شاخص‌های آماری پارامترهای کیفی آب زیرزمینی

پارامتر	واحد	مقدار مجاز	کمینه	بیشینه	میانگین	انحراف معیار	ضریب تغییرات (%)
SAR	-	۲۶	۰/۰۴	۱۷/۲۱	۲/۳۱	۲/۵۵	۱۱۰/۴
EC	μmho/cm	۳۰۰۰	۳۴۷	۱۰۲۶۰	۱۵۰۰	۱۶۱۴	۱۰۷/۶
Na%	Percent	۸۰	۲/۱۷	۸۶/۸۵	۳۱/۰۷	۱۸/۷۱	۶۰/۲۲
Na ⁺	meq/lit	۹	۰/۰۵	۷۵	۵/۶۴	۸/۸۶	۱۵۷/۱
Cl ⁻	meq/lit	۱۰	۰/۳	۳۴	۴/۱۷	۶/۳۲	۱۵۱/۵۶
TDS	mg/lit	۲۰۰۰	۲۲۴	۶۱۵۴	۹۳۶/۳۵	۹۶۸/۵۵	۱۰۳/۴۴
SO ₄ ²⁻	meq/lit	۷	۰/۰۸	۸۲	۵/۴۷	۱۱/۷۵	۲۱۴/۸۱
Ca ²⁺	meq/lit	۵	۱	۲۸	۴/۵۲	۴/۵۸	۱۰۱/۳۳
HCO ₃ ⁻	meq/lit	۸/۵	۲/۸	۱۲/۲	۵/۴۰	۱/۷۴	۳۲/۲۲
pH	-	۸/۴-۶/۵	۷/۰۵	۸/۹	۷/۸	۰/۳۵	۴/۵
ES	meq/lit	۱۵	۰/۶۷	۱۰۶/۴۱	۹/۰۱	۱۳/۲۴	۱۴۶/۹۵
PS	meq/lit	۱۵	۰/۴۱	۷۰/۴۸	۶/۷۷	۱۰/۴۵	۱۵۴/۳۶

*مقادیر حداکثر مجاز از (1954) Doneen، (1956) Richards و (1985) Ayres and Westcott استخراج شده است.

تحلیل خودهمبستگی مکانی

برای بررسی تغییرات مکانی خصوصیات کیفی مورد مطالعه، نیم‌تغییرنمای تجربی لگاریتم داده‌ها (به‌جز Na⁺ و pH) که از داده‌های خام استفاده شد) محاسبه شده و سپس بهترین مدل تئوری بر آن‌ها برازش شد. مشخصات بهترین مدل تئوری نیم‌تغییرنما جدول ۲ ارائه شده است. لازم به ذکر است در جدول ۲ ستون‌های r² (ضریب تبیین) و RSS (مجموع مربعات باقی‌مانده) به‌ترتیب نشان‌دهنده‌ی همبستگی و خطای مربوط به برازش مدل بر نیم‌تغییرنمای تجربی پارامترها می‌باشد. مقادیر r² هر چه به ۱ نزدیک‌تر بوده و مقدار RSS هر چه کوچک‌تر باشد، نشان دهنده‌ی برازش بهتر مدل می‌باشد. بهترین مدل نیم‌تغییرنما بر اساس روش ارزیابی متقابل تعیین گردید. نتایج نشان داد که بهترین مدل نیم‌تغییرنما برای تمامی پارامترها مدل کروی با r² بین ۰/۹۰ تا ۰/۹۹ است. با توجه به جدول ۲ نسبت بخش تصادفی (C₀) به کل تغییرپذیری (C₀+C) نیم‌تغییرنماها کمتر از ۰/۵۰ می‌باشد که نشان‌دهنده همبستگی مکانی متوسط تا قوی برای اکثر پارامترهای مورد مطالعه می‌باشد. همچنین شعاع تأثیر EC، TDS، SAR، Na⁺، Na⁺، Cl⁻، Na⁺، PS و ES حدود ۱۸۰۰۰ تا ۲۱۰۰۰ متر، شعاع تأثیر SO₄²⁻ و Ca²⁺ به‌ترتیب حدود ۲۵۰۰۰ و ۲۶۳۰۰ متر به‌دست آمد. بیشترین شعاع تأثیر برای pH و HCO₃⁻ به‌ترتیب برابر با

۴۴۰۰۰ و ۱۰۳۰۰۰ متر تعیین گردید. به این ترتیب یون HCO₃⁻ دارای بیشترین همبستگی مکانی در سطح منطقه هستند.

میان‌یابی مکانی

نتایج مربوط به ارزیابی متقابل برآورد خصوصیات کیفی آب توسط روش لوگ-کریجینگ معمولی (Na⁺ و pH) و کریجینگ معمولی (سایر پارامترها) در جدول ۳ ارائه شده است. کمترین ضریب همبستگی (r) بین مقادیر واقعی و برآورد شده مربوط به Ca²⁺ (۰/۴۶) و بیشترین آن مربوط به pH (۰/۷۵) می‌باشد. مقایسه مقادیر MBE نشان می‌دهد روش کریجینگ مقادیر EC، TDS، Cl⁻، Ca²⁺، PS و ES را کمتر از مقادیر واقعی و مقادیر SAR، Na⁺، Na⁺ و HCO₃⁻ را بیشتر از مقادیر واقعی برآورد کرده است. این در حالی است که میزان انحراف خطا در مورد pH برابر صفر بود. از طرفی مقایسه مقادیر NRMSE در جدول ۳ نشان می‌دهد که خطای میان‌یابی کم و بنابراین تخمین‌های انجام شده قابل قبول می‌باشد. لازم به ذکر است برای میان‌یابی خصوصیات کیفی مورد نظر از روش وزن‌دهی عکس فاصله با توان‌های ۱ تا ۴ نیز استفاده گردید که در هیچ مورد برتری نسبت به روش کریجینگ و لوگ کریجینگ حاصل نشد، لذا از ذکر نتایج این روش در این تحقیق صرف‌نظر گردید.

جدول ۲- مشخصات بهترین مدل نیم تغییرنمای برازش شده به نیم تغییرنمای تجربی پارامترهای کیفی مورد مطالعه

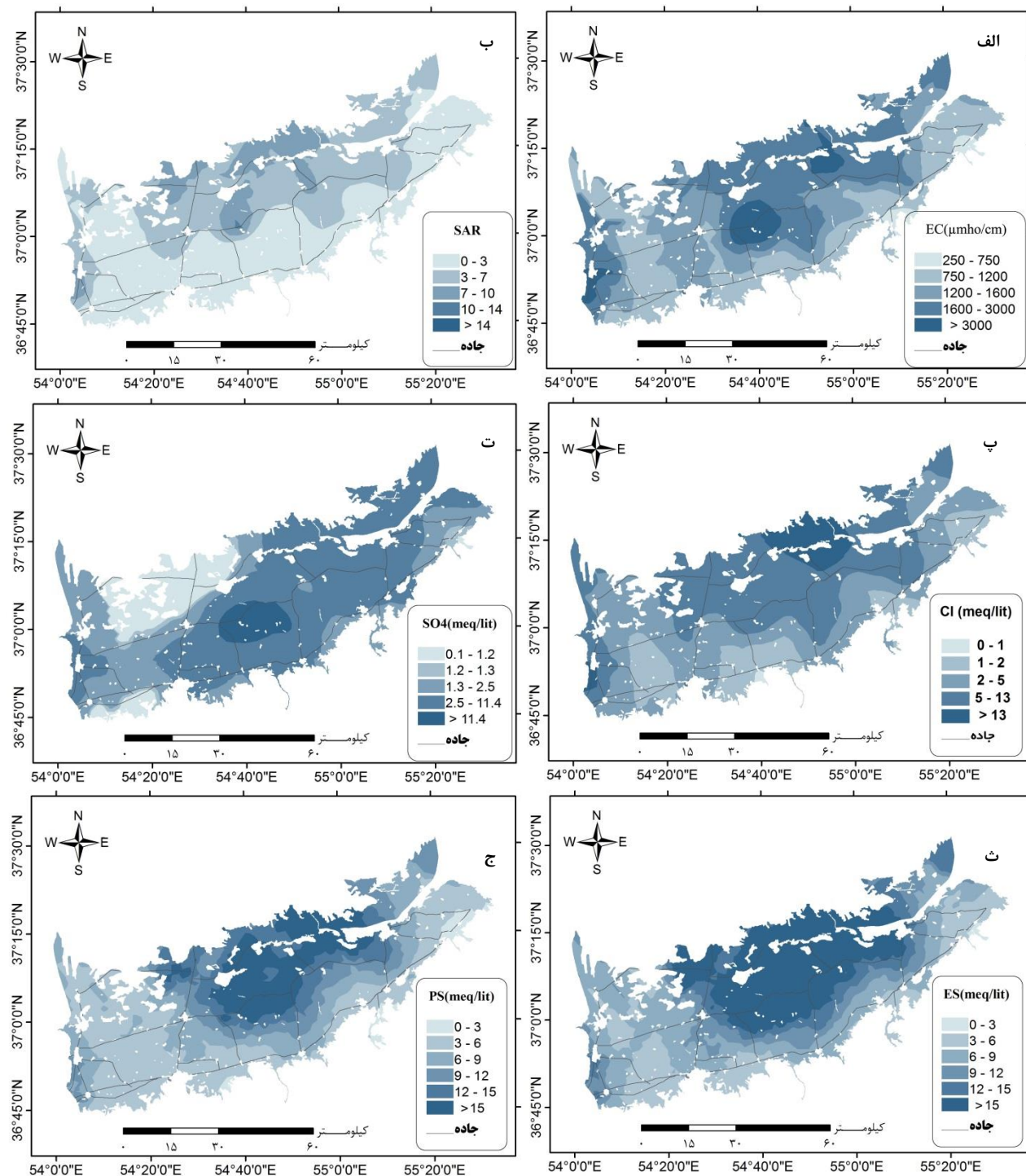
متغیر	واحد	بهترین مدل	اثر قطعه‌ای	آستانه	دامنه تأثیر (متر)	r^2	RSS
Ln EC	$\mu\text{mho/cm}$	کروی	۰/۱۷۲	۰/۴۳۴	۱۷۶۰۰	۰/۹۲	۰/۰۰۸
Ln TDS	mg/lit	کروی	۰/۱۶۶	۰/۴۱۶	۱۷۶۰۰	۰/۹۲	۰/۰۰۸
Ln SAR	-	کروی	۰/۲۲۹	۱/۱۸	۱۹۵۰۰	۰/۹۴	۰/۰۷۲
Ln Na ⁺	meq/lit	کروی	۰/۳۵۳	۱/۴۴۶	۱۸۲۰۰	۰/۹۴	۰/۰۹۹
Ln Cl ⁻	meq/lit	کروی	۰/۴۲	۱/۳۲۶	۱۸۶۰۰	۰/۹۵	۰/۰۵۸
pH	-	کروی	۰/۰۴۷	۰/۱۴۰	۴۴۰۰۰	۰/۹۹	۰/۰۰۰۱
Ln SO ₄ ²⁻	meq/lit	کروی	۰/۵۰	۱/۴۰۵	۲۵۰۰۰	۰/۹۵	۰/۰۶۹
Ln Ca ²⁺	meq/lit	کروی	۰/۱۴۷	۰/۳۸۸	۲۶۳۰۰	۰/۹۶	۰/۰۰۴
Na%	Percent	کروی	۴۰/۰۰	۳۶۷/۲	۲۱۰۰۰	۰/۹۷	۵۱۵۳
Ln HCO ₃ ⁻	meq/lit	کروی	۰/۰۵	۰/۱۰۷	۱۰۳۰۰۰	۰/۹۹	۰/۰۰۰۱
Ln PS	meq/lit	کروی	۰/۴۱	۱/۰۷۹	۱۸۴۰۰	۰/۹۲	۰/۰۴۹
Ln ES	meq/lit	کروی	۰/۳۷۵	۰/۸۹۸	۱۸۶۰۰	۰/۹۰	۰/۰۴۲

جدول ۳- نتایج ارزیابی متقابل بر آورد پارامترهای کیفی مورد مطالعه توسط روش (لوگ) کریجینگ معمولی

متغیر	واحد	RMSE	MBE	R	NRMSE
EC	$\mu\text{mho/cm}$	۱۳۷۱/۰۰	-۷۶/۱	۰/۵۴	۰/۱۴
TDS	mg/lit	۸۲۳/۲۲	-۴۱/۶۱	۰/۵۴	۰/۱۴
SAR	-	۱/۹	۰/۱۲	۰/۶۷	۰/۱۱
Na%	percent	۱۲/۱۱	۰/۶۸	۰/۷۳	۰/۱۴
Na ⁺	meq/lit	۷/۲۳	۰/۰۳	۰/۵۷	۰/۱۰
Cl ⁻	meq/lit	۵/۳۲	-۰/۱۷	۰/۴۷	۰/۱۶
pH	-	۰/۲۳	۰/۰۰	۰/۷۵	۰/۱۲
SO ₄ ²⁻	meq/lit	۸/۷۳	-۰/۸۸	۰/۶۷	۰/۱۱
Ca ²⁺	meq/lit	۴/۰۷	-۰/۲۲	۰/۴۶	۰/۱۵
HCO ₃ ⁻	meq/lit	۱/۴۵	۰/۰۷	۰/۵۵	۰/۱۵
PS	meq/lit	۸/۷۰	-۰/۴۶	۰/۵۵	۰/۱۲
ES	meq/lit	۱۰/۸۵	-۰/۵۳	۰/۵۷	۰/۱۰

شده و آب زیرزمینی در این مناطق برای مصارف کشاورزی مناسب نیست. مشابه نقشه EC، نقشه‌های SAR و Cl⁻ (شکل ۳) نیز روند کاهشی این پارامترها را با حرکت از سمت شمال به جنوب و غرب منطقه (به جز بخش کوچکی در غرب) نشان می‌دهند.

نقشه‌های پهنه‌بندی EC، SAR، Cl⁻، SO₄²⁻ و ES و PS تهیه شده توسط روش لوگ کریجینگ در شکل ۳ نشان داده شده است. همانطوری که از نقشه EC ملاحظه می‌شود، شوری آب زیرزمینی در مناطق شمالی و مرکزی و مناطقی از غرب اراضی کشاورزی استان گلستان بیشتر از سایر نقاط است. مناطق با EC بیشتر از ۳۰۰۰ میکروموس بر سانتی‌متر (مثلاً بخشی در مرکز منطقه مورد مطالعه) جزو مناطق شور محسوب



شکل ۳- نقشه پهنه‌بندی EC (الف)، SAR (ب)، Cl⁻ (پ)، SO₄²⁻ (ت)، ES (ث) و PS (ج) در اراضی کشاورزی استان گلستان

خواهد شد که با اتخاذ تصمیم‌های کنترلی استحصال منابع آب زیرزمینی می‌توان بروز این قبیل مشکلات را به تعویق انداخت. از طرفی نقشه سولفات آب زیرزمینی نشان می‌دهد که کمترین میزان SO₄ در نیمه غربی منطقه، به‌جز بخش کوچکی از

نتایج نشان داد که بجز در نواحی کوچکی از شرق، مرکز و غرب منطقه، مقادیر SAR کمتر از ۸ است و بنابراین پتانسیل بروز مشکل نفوذپذیری در خاک استان گلستان وجود ندارد. بخش‌های کوچکی از این استان احتمالاً در آینده دچار این مشکل

EC و SAR به ۴ طبقه بر اساس نمودار آزمایشگاه شوری خاک آمریکا، برای هر طبقه وزنی در نظر گرفته شد (جدول ۴). سپس با استفاده از ابزار Raster calculator لایه‌ها با هم تلفیق شدند و محدوده مربوط به هر طبقه استخراج گردید. در شکل ۴ نقشه‌ی پهنه‌بندی آب آبیاری بر اساس نمودار آزمایشگاه شوری خاک آمریکا رسم گردیده است. مساحت‌های هر طبقه در محیط GIS استخراج شد که در جدول ۵ ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد که حدود ۷۳٪ منطقه در گروه C3S1 و حدود ۲۳٪ منطقه در گروه C3S2 قرار دارند. بنابراین در مجموع حدود ۹۶٪ منطقه مورد مطالعه دارای آبی با کیفیت متوسط از نظر شوری و سدیمی می‌باشد. به عبارتی کمتر از ۵٪ منطقه (بخش‌هایی از نواحی مرکزی (واقع در گنبد کاووس و آق‌قلا) و بخش کوچکی از غرب منطقه (واقع در بندر ترکمن)) دارای کیفیت آب نامناسب برای کشاورزی است.

جدول ۴- وزن‌های تعیین شده برای نشانه‌های C و S نمودار آزمایشگاه شوری خاک آمریکا در لایه رستر

نشانه	EC ($\mu\text{mho/cm}$)	وزن در لایه رستر	نشانه	SAR	وزن در لایه رستر
C1	۲۵۰-۰	۱	S1	۱۰-۰	۱۰
C2	۷۵۰-۲۵۰	۲	S2	۱۸-۱۰	۲۰
C3	۲۲۵۰-۷۵۰	۳	S3	۲۶-۱۸	۳۰
C4	>۲۲۵۰	۴	S4	>۲۶	۴۰

غیرمجاز (۱) طبقه‌بندی شد. سپس این لایه‌ها با یکدیگر تلفیق گردید و نقشه‌ای با پنج ناحیه مشخص با شماره‌های ۱ تا ۵ که توضیح هر یک در زیر آمده است، تولید شد (شکل ۵). مساحت مربوط به هر ناحیه نیز محاسبه و در جدول ۶ ارائه شده است.

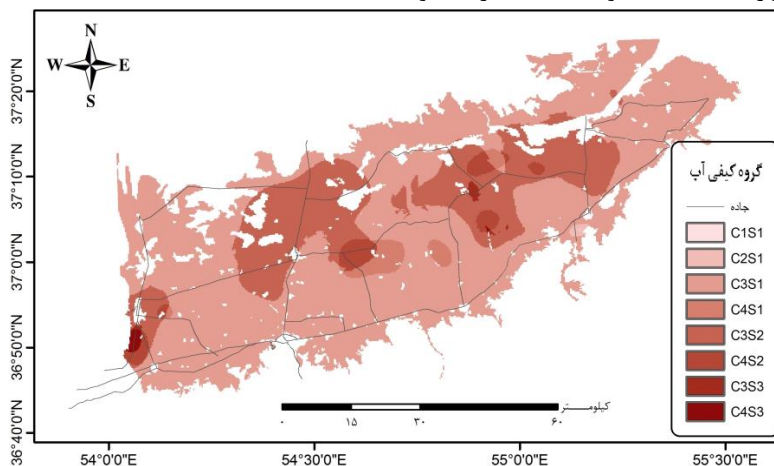
غرب، وجود دارد و بخش‌هایی از نواحی مرکزی دارای بیشترین میزان SO_4^{2-} هستند. نقشه پهنه‌بندی ES در شکل ۳ نشان می‌دهد که بیشترین شوری موثر آب زیرزمینی در نواحی شمالی و مرکزی و کمترین آن در شمال شرقی، نواحی جنوبی و غربی منطقه دیده می‌شود. از طرفی نقشه PS (شکل ۳) نیز به‌طور مشابه نشان‌دهنده بیشتر بودن میزان شوری پتانسیل آب زیرزمینی در نواحی شمالی و مرکزی منطقه مورد مطالعه می‌باشد.

طبقه‌بندی کیفیت آب بر اساس روش آزمایشگاه شوری خاک آمریکا (USSL)

همانطوری که در دیاگرام ارائه شده توسط آزمایشگاه شوری خاک آمریکا (شکل ۲) نشان داده شده است، مقادیر EC و SAR در سطح استان گلستان در ۴ ناحیه مختلف از نظر کیفیت آب قرار می‌گیرند. پس از طبقه‌بندی لایه‌های رستری

طبقه‌بندی کیفیت آب بر اساس دستورالعمل سازمان خوار و بار کشاورزی (FAO)

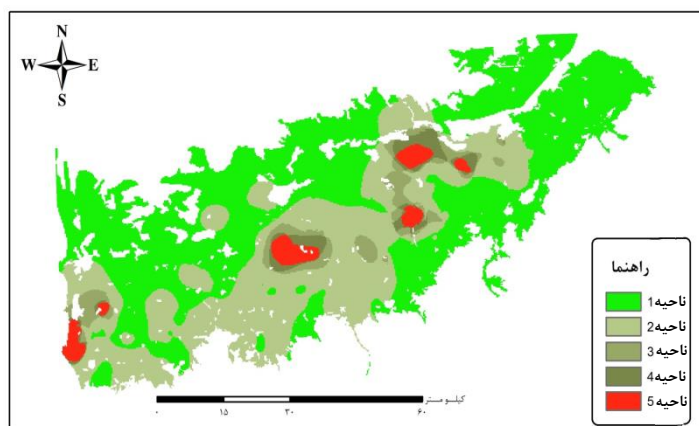
در این روش محدوده اعداد لایه‌های رستری تولید شده برای هر یک از متغیرها، براساس حدود مجاز ارائه شده در جدول ۱، در محیط نرم‌افزار ArcGIS به دو قسمت مجاز (۰) و



شکل ۴- نقشه پهنه‌بندی کیفی آب بر اساس نمودار آزمایشگاه شوری خاک آمریکا

جدول ۵- مساحت طبقات بدست آمده از تلفیق لایه‌های رستری با استفاده از GIS

طبقه کیفی آب	وزن گروه کیفی آب	مساحت (کیلومتر مربع)	مساحت (%)
C1S1	۱۱	۱	۰/۰۵
C2S1	۱۲	۸	۰/۱۷
C3S1	۱۳	۳۳۲۵	۷۲/۶۶
C4S1	۱۴	۹۳	۲/۰۳
C3S2	۲۳	۱۰۱۴	۲۲/۱۵
C4S2	۲۴	۱۱۲	۲/۴۴
C3S3	۳۳	۱۱	۰/۲۴
C4S3	۳۴	۱۲	۰/۲۶



شکل ۵- نقشه پهنه‌بندی کیفی آب زیرزمینی برای کشاورزی بر اساس دستورالعمل سازمان خوار و بار کشاورزی (FAO). نواحی ۱ تا ۵ به ترتیب دارای کیفیت بسیار خوب تا غیرقابل استفاده می‌باشند که جزئیات آن در داخل متن ارائه شده است

جدول ۶- مساحت‌های طبقات کیفی آب بر اساس دستورالعمل سازمان خوار و بار کشاورزی (FAO)

ناحیه	۱	۲	۳	۴	۵
مساحت (کیلومتر مربع)	۲۵۹۲	۱۵۴۴	۲۰۳	۱۰۵	۱۳۳
مساحت (%)	۵۶	۳۳	۴/۵	۳	۳/۵

نکرده است، به همین دلیل هیچ‌یک از مشکلات شوری، نفوذپذیری و سمیت آب آبیاری برای گیاهان وجود ندارد؛ لذا آب زیرزمینی این ناحیه برای کشاورزی مطلوب می‌باشد.

ناحیه ۱: در این ناحیه با مساحت ۲۵۹۲ کیلومتر مربع (نواحی شرقی، جنوب شرقی، شمالی و شمال غربی) که حدود ۵۶٪ کل اراضی کشاورزی استان گلستان را در بر گرفته است، هیچ‌یک از پارامترهای مورد بررسی از حد مجاز تجاوز

عبور از یک حد آستانه معین برای برخی پارامترها و شاخص-های کیفی آب با استفاده از روش IK ترسیم گردید. در شکل ۶ نقشه احتمال عبور از حد آستانه $3000 \mu\text{mho/cm}$ ، 3 meq/lit و 15 meq/lit به ترتیب برای EC، ES و PS ترسیم شده است. همانطوری که شکل ۶ (الف) نشان می‌دهد در بیشتر اراضی کشاورزی استان گلستان، احتمال عبور شوری از حد $3000 \mu\text{mho/cm}$ کمتر از ۴۰ درصد است. در بخش‌هایی از مرکز و شمال منطقه این احتمال بین ۴۰ تا ۶۰ درصد می‌باشد. از طرفی احتمال عبور شوری موثر از حد 15 meq/lit در بخش قابل توجهی از نواحی مرکزی و بخش کوچکی از شمال و غرب منطقه بین ۴۰ تا ۶۰ درصد می‌باشد. از طرفی احتمال عبور پتانسیل شوری از حد 15 meq/lit (شکل ۶ پ) در بیشتر اراضی کشاورزی استان کمتر از ۲۵ درصد می‌باشد. در بخش قابل توجهی از نواحی مرکزی، شمالی و غربی منطقه، این احتمال بین ۲۵ تا ۵۰ درصد و تنها در بخش بسیار کوچکی از شمال منطقه، این احتمال بیشتر از ۵۰ درصد می‌باشد. در شکل ۷ نقشه احتمال عبور از حد آستانه 10 meq/lit و 7 meq/lit به ترتیب برای Cl^- و SO_4^{2-} رسم شده است. همانطوری که در شکل ۷ (الف) مشاهده می‌شود احتمال عبور یون کلر آب زیرزمینی از 10 meq/lit در اکثر مناطق کمتر از ۴۰ درصد است، بنابراین احتمال بروز مشکل سمیت کلر تقریباً پایین است به جز بخش‌هایی از غرب منطقه که این احتمال بین ۴۰ تا ۶۰ درصد می‌باشد. از طرفی بر اساس نقشه احتمال SO_4^{2-} ، بخش‌هایی از نواحی مرکزی به احتمال ۴۰ تا ۸۰ درصد دارای سولفات بالای 7 meq/lit بوده که البته نواحی دارای احتمال بیش از ۶۰ درصد بسیار کوچک می‌باشد. این در حالی است که در سایر قسمت‌ها این احتمال زیر ۴۰ درصد است. در مجموع نتایج حاصل از نقشه‌های احتمال نیز حاکی از کیفیت خوب تا متوسط آب زیرزمینی در بیشتر اراضی منطقه مورد مطالعه است و احتمال بروز مشکل شوری یا سمیت تنها در بخش‌هایی از نواحی مرکزی و نوار غربی منطقه وجود دارد.

ناحیه ۲: در این ناحیه با مساحت ۱۵۴۴ کیلومتر مربع (۳۳٪ کل اراضی کشاورزی) که بیشتر شامل نیمه جنوبی اراضی کشاورزی استان می‌شود، آب زیرزمینی دارای مقادیر بیشتری (نسبت به ناحیه ۱) از نمک‌های محلول بوده ولی هنوز هم مشکلات شوری و نفوذپذیری وجود ندارد، بنابراین هرچند استفاده از آب این نواحی برای آبیاری بلامانع است ولی استفاده بیش از حد از این نوع آب‌ها برای گیاهان حساس به این عناصر ممکن است باعث کمتر شدن عملکرد آن‌ها گردد (آیزر و وسکات، ۱۹۸۵).

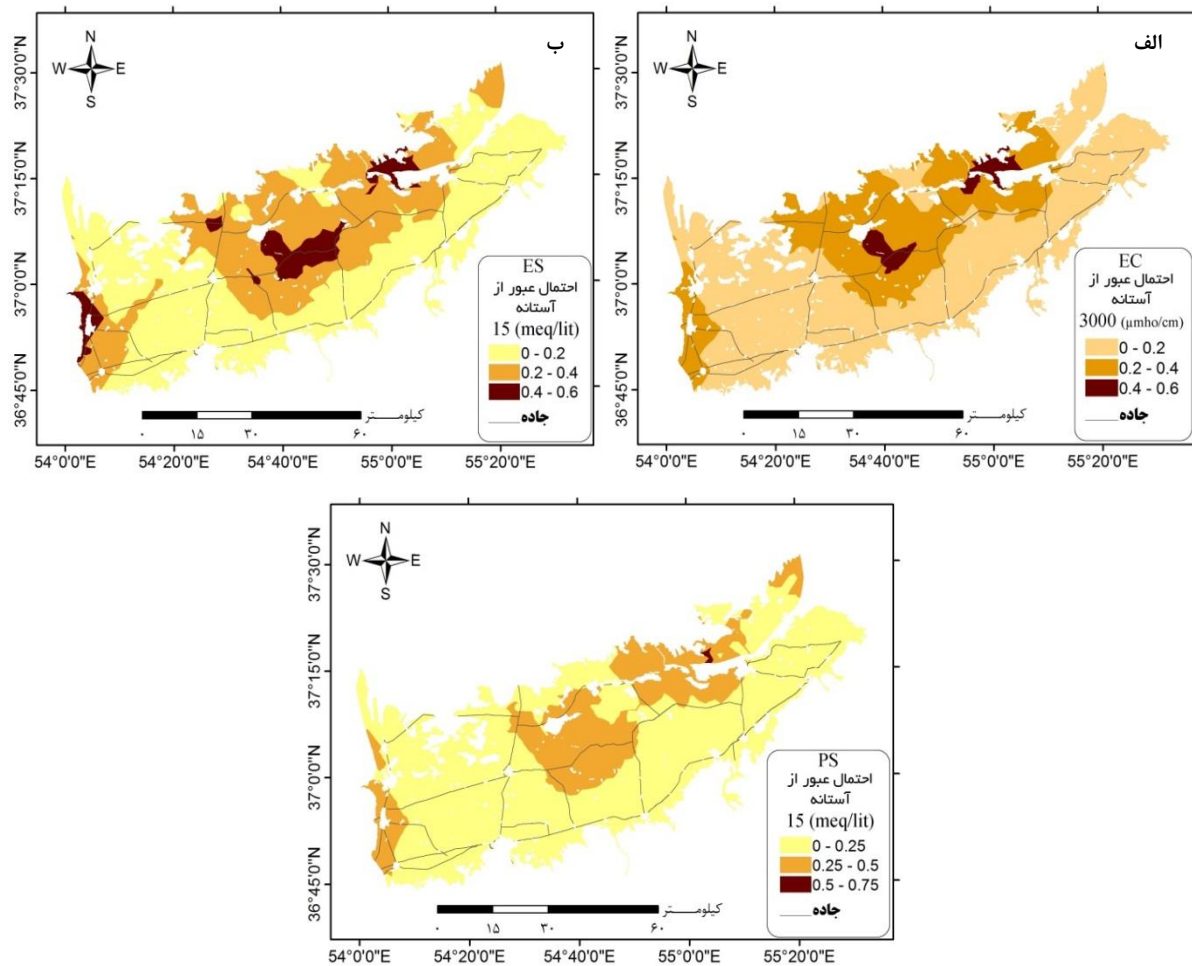
ناحیه ۳: در این ناحیه مقدار EC از حد مجاز آن (۳۰۰۰ میکروموس بر سانتی‌متر) تجاوز کرده است. علاوه بر این، در برخی مناطق میزان SO_4^{2-} و Cl^- نیز تاحدودی بالاست. به همین دلیل آب زیرزمینی این ناحیه برای کشاورزی مطلوب نمی‌باشد.

ناحیه ۴: در این ناحیه مقادیر EC، Cl^- و Na^+ از حد مجاز خود تجاوز کرده است. استفاده از آب این ناحیه مشکلات شوری و نفوذپذیری برای خاک و در نتیجه کاهش عملکرد گیاه را به دنبال خواهد داشت.

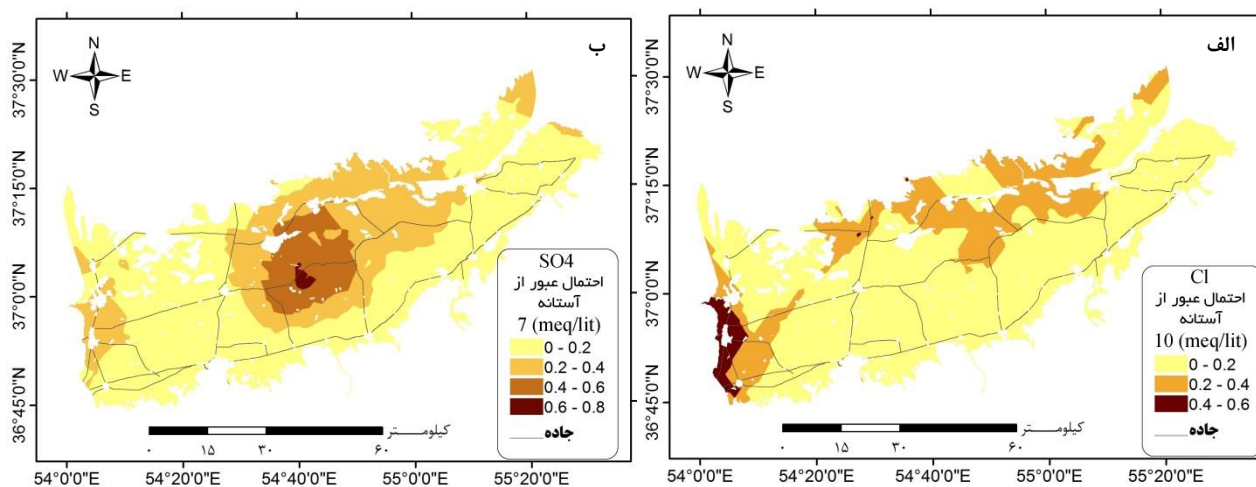
ناحیه ۵: استفاده از آب این ناحیه (شامل بخش‌هایی از گنبد کاووس، آق‌قلا و بندر ترکمن) برای آبیاری مشکلات شدیدی را به وجود خواهد آورد. در این ناحیه مقدار EC از حد مجاز خود تجاوز کرده است. مقدار سدیم و بی‌کربنات نیز از حد مجاز تجاوز کرده که این موضوع باعث ایجاد مشکل نفوذپذیری می‌شود. همچنین در این ناحیه به دلیل بالا بودن مقدار پارامترهای Cl^- ، SO_4^{2-} ، HCO_3^- و TDS و نیز تجاوز مقدار pH آب از حد مجاز مشکل مسمومیت برای گیاهان ایجاد خواهد شد.

نقشه احتمال عبور از حد آستانه

همان‌طوری که قبلاً ذکر گردید، تخمین‌های روش OK مانند هر تخمین‌گر دیگری همواره با مقداری عدم قطعیت همراه است. برای بررسی عدم قطعیت تخمین‌ها و طبقه‌بندی-های به دست آمده در مورد کیفیت آب منطقه، نقشه احتمال



شکل ۶- نقشه احتمال عبور EC از حد آستانه $3000 \mu\text{mho/cm}$ (الف)، ES از حد آستانه 15 meq/lit (ب) و PS از حد آستانه 15 meq/lit (پ)



شکل ۷- نقشه احتمال عبور Cl^- از حد آستانه 10 meq/lit (الف) و SO_4^{2-} از حد آستانه 7 meq/lit (ب)

بحث و نتیجه گیری

در این تحقیق به منظور طبقه بندی و اولویت بندی آب زیرزمینی برای استفاده در کشاورزی در اراضی استان گلستان، تغییرات مکانی برخی از پارامترها و شاخص های مهم کیفی آب شامل EC، TDS، SAR، pH، Na^+ ، Cl^- ، SO_4^{2-} ، Ca^{2+} ، HCO_3^- ، $Na\%$ ، PS و ES مورد بررسی قرار گرفت. بررسی توزیع فراوانی داده های متغیرهای کیفی آب زیرزمینی (شکل هیستوگرام و ضریب چولگی) نشان داد که توزیع فراوانی تمامی متغیرها بجز Na^+ و pH غیر نرمال می باشد؛ لذا به کمک تبدیل لگاریتمی طبیعی، توزیع داده های مورد نظر نرمال شد. در مطالعه ادهیکاری و همکاران (۲۰۱۰)، توزیع فراوانی Na^+ ، Cl^- ، Ca^{2+} ، Mg^{2+} و SO_4^{2-} EC و EC لوگ نرمال و توزیع فراوانی EC نرمال تشخیص داده شد. در تحقیق دلگادو و همکاران (۲۰۱۰) توزیع فراوانی Na^+ ، Cl^- ، Mg^{2+} ، NO_3^- و K^+ و SO_4^{2-} لوگ نرمال گزارش شد. دلبری و همکاران (۱۳۸۹) توزیع فراوانی EC آب زیرزمینی را لوگ نرمال تشخیص دادند. جهانشاهی و همکاران (۱۳۹۳) نیز توزیع فراوانی متغیرهای کیفی آب زیرزمینی از قبیل شوری و سدیمی را لوگ نرمال گزارش کردند. در تحقیق دلبری و همکاران (۲۰۱۴) توزیع فراوانی EC، SAR، Na^+ و Cl^- لوگ نرمال و توزیع فراوانی pH و HCO_3^- نرمال به دست آمد. توزیع فراوانی EC و SAR در مطالعات دیگری نیز لوگ-نرمال تشخیص داده شد (حاجی هاشمی جزی و همکاران، ۱۳۸۹؛ دلبری و همکاران، ۱۳۹۱؛ جعفری و بخشنده مهر، ۱۳۹۳).

بررسی همبستگی مکانی متغیرهای مورد نظر با رسم نیم تغییرنمای تجربی در محیط نرم افزار GS+ انجام شد. نتایج نشان داد که تمامی متغیرهای کیفی آب از همبستگی مکانی خوب با ساختار کروی برخوردار هستند. رضایی و همکاران (۱۳۸۹) بهترین مدل ساختار مکانی را برای Na^+ ، SAR و EC، مدل کروی گزارش دادند. در تحقیقی دیگر، بهترین مدل نیم-تغییرنما برای SAR، Ca^{2+} و TDS و EC مدل کروی و برای Na^+ مدل گوسی گزارش گردید (حاجی هاشمی جزی و همکاران، ۱۳۸۹). سلاجقه و همکاران (۱۳۹۲) برای EC، TDS و Cl^- مدل نمایی و برای SAR و SO_4^{2-} مدل کروی را بهترین مدل ساختار مکانی معرفی کردند. دلگادو و همکاران (۲۰۱۰) مدل کروی را به عنوان بهترین مدل ساختار مکانی خصوصیات کیفی

آب زیرزمینی از جمله شاخص های ES و PS برگزیدند. ادهیکاری و همکاران (۲۰۱۰) نیز برای تمامی خصوصیات شیمیایی آب به جز کلسیم و نیترات، مدل کروی را بهترین مدل نیم تغییرنما تعیین کردند. در تحقیق دلبری و همکاران (۲۰۱۴) ساختار مکانی pH و HCO_3^- نمایی و ساختار مکانی داخل کلاس EC، SAR، Na^+ و Cl^- به طور عمده، کروی گزارش شد.

نتایج بررسی مناسب بودن کیفیت آب زیرزمینی برای استفاده در کشاورزی بر اساس آزمایشگاه شوری خاک امریکا نشان داد که در حدود ۹۶٪ منطقه، کیفیت آب متوسط می-باشد. در نواحی دارای کیفیت متوسط که مقادیر EC و SAR کمی بالاست، ملاحظات در خصوص برداشت آب و یا کشت گیاهان بایستی صورت گیرد. مثلاً در صورت امکان گیاهانی مانند گندم، جو و چغندر قند که به نسبت مقاوم ترند، کشت کردند (مس، ۱۹۹۰).

از طرفی بر اساس استاندارد FAO به ترتیب ۵۶٪ و ۳۳٪ منطقه از آبی با کیفیت خوب و متوسط برای آبیاری برخوردارند. در نواحی با کیفیت متوسط مشکلات شوری و نفوذپذیری وجود ندارد ولی استفاده بیش از حد از این نوع آب-ها برای گیاهان حساس به این عناصر ممکن است باعث کمتر شدن عملکرد آن ها گردد (آیز و وسکات، ۱۹۸۵). بر اساس استاندارد FAO مطلوب ترین آب زیرزمینی از نظر تمامی خصوصیات مورد بررسی برای کشاورزی در نواحی شرقی، جنوب شرقی و شمال غربی و بخش هایی از شمال منطقه با مساحت حدود ۲۵۹۲ کیلومتر مربع وجود دارد. از طرفی با توجه به کشت مرکبات در استان و حساس بودن درختان مرکبات به سمیت یون های خاص از جمله یون Cl^- ، استفاده از آب زیرزمینی برای آبیاری در نواحی ۳، ۴ و ۵ (حدود ۱۱٪ کل اراضی کشاورزی) که بیشتر شهرهای گنبد کاووس، آق قلا، بندر ترکمن و کردکوی را شامل می گردد، ممکن است باعث مسمومیت، کاهش عملکرد و در صورت تداوم آبیاری از بین رفتن درختان می شود.

نقشه های احتمال رسم شده برای ES و PS نیز نشان داد که بیشترین احتمال بروز مشکل شوری و سمیت در بخش هایی از مرکز (آق قلا)، غرب (بندر ترکمن) و شمال (گنبد کاووس) می-باشد. بنابراین، در این اراضی محدودیت های استفاده از آب

دلبری، م.، افراسیاب، پ.، ۱۳۹۳. کاربرد کریجینگ شاخص و معمولی در مدل کردن کلر آب زیرزمینی. مجله محیط‌شناسی. جلد ۴۰، شماره ۳، ۷۶۴-۷۵۱.

دلبری، م.، افراسیاب، پ.، سالاری، م.، ۱۳۹۲. پهنه‌بندی فراسنج‌های کیفی (شوری و سدیمی) آب با استفاده از روش‌های زمین آماری (مطالعه موردی: دشت کرمان). مهندسی منابع آب، جلد ۶، شماره ۱۶، ۱۱-۲۴.

رضایی، م.، دواتگر، ن.، تاجداری، خ.، ابول‌پور، ب.، ۱۳۸۹. بررسی تغییرات مکانی برخی شاخص‌های کیفی آب-های زیرزمینی استان گیلان با استفاده از زمین‌آمار. آب و خاک، جلد ۲۴، شماره ۵، ۹۴۱-۹۳۲.

زهتابیان، غ.، جان‌فزا، ع.، محمدعسگری، ح.، نعمت‌الهی، م.ج.، ۱۳۸۹. مدلسازی توزیع مکانی برخی از خصوصیات شیمیایی آب‌های زیرزمینی (مطالعه موردی در حوضه آبخیز گرمسار). تحقیقات مرتع و بیابان ایران، جلد ۱۷، شماره ۱، ۷۳-۶۱.

سلاجقه، س.، خراسانی، ن.، میرسید حسینی، ح.، زاهدی امیری، ق.، ۱۳۹۲. توزیع مکانی کیفیت آب زیرزمینی با استفاده از روش‌های زمین‌آمار (مطالعه موردی شهر کرج). پژوهش‌های آبخیزداری، شماره ۱۰۰، ۵۶-۶۷.

شعبانی، م.، ۱۳۸۷. تعیین مناسبترین روش زمین‌آمار در تهیه نقشه تغییرات pH و TDS آب‌های زیرزمینی (مطالعه موردی: دشت ارسنجان). مجله مهندسی آب، جلد ۱، شماره ۱، ۴۶-۵۷.

محمدی قلعه‌نی، م.، ابراهیمی، ک.، عراقی نژاد، ش.، ۱۳۹۰. ارزیابی کمی و کیفی منابع آب زیرزمینی (مطالعه موردی: آبخیزهای طاوله و اراک). دانش آب و خاک، جلد ۲۱، شماره ۲، ۱۰۸-۹۳.

Adhikary, P.P., Chandrasekharan, H., Chakraborty, D., Kamble, K., 2010. Assessment of groundwater pollution in West Delhi, India using geostatistical approach. Environmental Monitoring and Assessment, 167, 599-615.

APHA. AWWA. WPCF., 2005. Standard Methods for Examination of Water and Wastewater, 21st Ed, Washington, DC: American Public Health Association, 1496 PP.

زیرزمینی برای حصول عملکرد بهتر بایستی مورد توجه کشاورزان و متولیان امر قرار گیرد. چرا که شوری آب آبیاری باعث کمتر شدن عملکرد محصولات زراعی می‌شود. در صورت بالا بودن EC آب آبیاری، املاح موجود در آب با گذشت زمان در منطقه توسعه ریشه ذخیره شده، جذب آب توسط ریشه کمتر می‌شود و در نتیجه عملکرد گیاه را تحت تأثیر قرار می‌دهد. آبیاری طولانی با آب شور علاوه بر صدمه زدن به گیاه، پراکندگی ذرات خاک را نیز به همراه خواهد داشت. خطر تخریب ساختمان و کاهش نفوذپذیری خاک بویژه در مقادیر SAR بالای ۲۴ قابل توجه می‌باشد (آیز و وسکات، ۱۹۸۵). از طرفی برداشت بی‌رویه آب زیرزمینی برای آبشویی منطقه ریشه، به تدریج باعث افت آب زیرزمینی خواهد شد. از جمله راه‌کارهای مدیریتی برای استفاده هرچه بهتر از منابع آب و خاک استان و بدست آوردن بیشترین عملکرد در مناطقی که مشکل شوری دارند، کشت محصولات و وارپته‌های مقاوم‌تر به شوری (مس، ۱۹۹۰) و یا جایگزین کردن روش‌های سنتی آبیاری با روش‌های مدرن می‌باشد.

منابع

جعفری، ر.، بخشنده‌مهر، ل.، ۱۳۹۳. بررسی تغییرات مکانی شوری و قلیائیت آب‌های زیرزمینی استان اصفهان با استفاده از زمین‌آمار. علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی، جلد ۱۸، شماره ۶۸، ۱۹۴-۱۸۳.

جهانشاهی، ا.، روحی مقدم، ع.، دهواری، ع.، ۱۳۹۳. ارزیابی پارامترهای کیفی آب زیرزمینی با استفاده از GIS و زمین‌آمار (مطالعه موردی: آبخیز دشت شهر بابک). دانش آب و خاک، جلد ۲۴، شماره ۲، ۱۹۷-۱۸۳.

حاجی هاشمی جزی، م.ر.، آتشگاهی، م.، حمیدیان، ا.ح.، ۱۳۸۹. برآورد مکانی مولفه‌های کیفی آب‌های زیرزمینی با استفاده از روش‌های زمین‌آمار (مطالعه موردی: دشت گلپایگان). محیط زیست طبیعی، جلد ۶۳، شماره ۴، ۳۵۷-۳۴۷.

دلبری، م.، افراسیاب، پ.، میرعمادی، س.ر.، ۱۳۸۹. تجزیه و تحلیل تغییرات مکانی-زمانی شوری و عمق آب زیرزمینی. آبیاری و زهکشی ایران. جلد ۴، شماره ۳، ۳۷۴-۳۵۹.

- Goovaerts, P., 2009. AUTO-IK: a 2D indicator kriging program for the automated non-parametric modeling of local uncertainty in earth sciences. *Computers and Geosciences*, 35, 1255-1270.
- Isaaks, E., Srivastava, R.M., 1989. *An Introduction to Applied Geostatistics*. Oxford University Press, New York, 561 PP.
- Mass, E.V., 1990. *Crop Salt Tolerance. Agricultural Salinity Assessment and Management Manual*. Tanji, K.K. (ed.). ASCE, New York. pp 262-304.
- Paniconi, C., Kleinfeldt, S., Deckmyn, J., Giacomelli, A., 1999. Integrating GIS and data visualization tools for distributed hydrologic modeling. *Transactions in GIS*, 3, 97-118.
- Richards, L.A., 1954. *Diagnosis and Improvement of Saline and Alkali Soils. Handbook, USDA 60*. Washington DC, USA.
- Shainberg, I., Oster, J.D., 1978. *Quality of irrigation water. IIIC Publication No. 2*, Volcani Center, P.O.Box 49, Bet Dagan, Israel, 65 p.
- Vieux, B.E., 1991. Geographic information systems and non-point source water quality and quantity modeling. *Hydrological Processes*, 5, 101-113.
- Ayres, R.S., Westcott, D.W., 1985. *Water quality for agriculture. F.A.O. Irrigation and Drainage Paper No. 29*, F.A.O. Rome.
- Delbari, M., Amiri, M., Bahraini Motlagh, M., 2014. Assessing groundwater quality for irrigation using indicator kriging method. *Applied Water Science*. DOI 10.1007/s13201-014-0230-6.
- Delgado, C., Pacheco, J., Cabrera, A., Batllori, E., Orellana, R., Bautista, F., 2010. Quality of groundwater for irrigation in tropical karst environment: The case of Yucatan, Mexico. *Agricultural Water Management*, 97, 1423-1433.
- Demir, Y., Sahin, S., Guler, M., Cemek, B., Gunal, H., Arslan, H., 2009. Spatial variability of depth and salinity of groundwater under irrigated ustifluents in the Middle Black Sea Region of Turkey. *Environmental Monitoring and Assessment*, 158, 279-294.
- Doneen, L.D., 1954. Salination of soil by salts in the irrigation water. *American Geophysical Union Transactions* 35, 943-950.
- ESRI (Environmental Systems Research Institute Inc). 2004. *ArcGIS 9. Getting Started with ArcGIS*. ESRI, Redlands.
- Goovaerts, P., 1997. *Geostatistics for Natural Resources Evaluation*. Oxford University Press, New York, 496 PP.