دانشگاه آزاد اسلامی واحد اهر
فصلنامه‌ی علمی-پژوهشی فضای جغرافیایی

سال هفدهم، شماره‌ی ۵۸
تابستان ۱۳۹۶، صفحات ۱۲۹-۱۱۱

*حمیدرضا پورخباز[۱]
حسین اقدر[۲]
فاطمه محمدیاری[۳]

پهنه‌بندی کیفیت آب زیرزمینی از لحاظ کشاورزی بر اساس طبقه بندی ویلکوکس (مطالعه موردی: دشت قزوین)

تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۰۸/۱۷ تاریخ پذیرش: ۱۳۹٤/۰۲/۱۷

چکیده

روش‌های ارزیابی کیفیت منابع آب زیرزمینی و تشخیص موقعیت‌های مناسب برای شرب و استفاده کشاورزی، از مسائل مهم در برنامه‌ریزی منابع آبی است. در تحقیق حاضر، با بهره‌گیری از روش‌های زمین‌آمار، خصوصیات شیمیایی آب‌های زیرزمینی دشت قزوین جهت کاربری کشاورزی مورد تجزیه‌وتحلیل قرار گرفته است. بدین منظور ۳٦٤ نمونه آب زیرزمینی برداشت و از لحاظ دو پارامتر هدایت الکتریکی آب (EC) و نسبت جذب سدیم (SAR) مورد آنالیز شیمیایی قرار گرفتند. نیم تغییرنمای تجربی هر یک از پارامترها با استفاده از نرم‌افزار GS^+ محاسبه و مدل‌های مختلف برازش داده شد. این نرم‌افزار به‌منظور تهیه نقشه‌های پهنه‌بندی با استفاده از داده‌های زمین مرجع کاربرد گسترده‌ای پیدا کرده است. سپس به کمک نرم‌افزار GIS میانیابی به روش‌های کریجینگ و عکس فاصله (IDW) صورت گرفت. نتایج حاصل از روش کریجینگ و IDW به کمک معیار RMSE نشان داد که روش کریجینگ نسبت به روش دیگر برتری دارد و درونیابی با این روش صورت گرفت. در نهایت با استفاده از منطق

*۱- گروه محیط زیست، دانشگاه صنعتی خاتم الانبیاء بهبهان (نویسنده مسئول). E-mail: Pourkhabbaz@bkatu.ac.ir
۲- دانش آموخته کارشناسی‌ارشد سنجش از دور و GIS، دانشکدهٔ علوم دانشگاه شهید چمران اهواز.
۳- دانش آموخته کارشناسی‌ارشد ارزیابی و آمایش سرزمین، دانشگاه صنعتی خاتم الانبیاء بهبهان.

[Downloaded from geographical-space.iau-ahar.ac.ir on 2026-11-06]

فازی و نمودار ویلکوکس نقشه پهنه‌بندی منطقه مورد مطالعه جهت کشاورزی تهیه گردید. با توجه به نقشه نهایی ۳٤ درصد از منطقه برای کشاورزی مناسب، ۵۱ درصد نسبتاً مناسب و ۱۵ درصد نامناسب می‌باشد، پس می‌توان گفت که کیفیت آب منطقه مورد مطالعه برای کشاورزی مطلوب است.

کلید واژه‌ها: آب زیرزمینی، شاخص ویلکوکس، روش کریجینگ، نسبت جذب سدیم، کاربری کشاورزی.

مقدمه

آب به‌عنوان یک منبع تجدیدشونده، همواره رکن اصلی توسعه بوده است. با ازدیاد جمعیت و به‌تبع آن افزایش نیاز آب در بخش‌های مختلف کشاورزی، شرب، بهداشت و صنعت و نهایتاً افزایش تولید و ایجاد پتانسیل‌های آلودگی، فشار زیادی به منابع آبی وارد شده است. از آنجا که منابع تجدید شونده آب در هر اقلیم ارقام نسبتاً ثابتی می‌باشند، از این‌رو بایستی سیاست‌ها و روش‌های اتخاذ شده در جهت حفظ و مصرف بهینه از این منابع ساماندهی گردد (وجدانی، ۱۳۸۱: ١٤ و ابراهیمی، ۱۳۸۰: ٤٨) در اغلب نقاط جهان، منابع آب زیرزمینی از جمله مهم‌ترین منابع تأمین آب شرب و کشاورزی است. با توجه به محدود بودن منابع آب زیرزمینی و افزایش نیاز آبی جوامع بشری، ذخیره این آب‌ها رو به کاهش می‌باشد. از این‌رو نگهداری این منابع ضروری بوده و جلوگیری از آلودگی آن‌ها دارای اهمیت زیادی است (رهنما و همکاران، ۱۳۷۹: ۱۱). فعالیت‌های متمرکز در بخش‌های مختلف و به‌تبع آن انتقال پساب‌های شهری، صنعتی و کشاورزی به آب‌های زیرزمینی از مهم‌ترین منابع آلودگی آب‌های زیرزمینی بوده که در بسیاری از کشورها مشکل جدی به شمار می‌رود (استیتس[4] و کرافت[5]، ۲۰۰۱: ۱۵۱۰)؛ بنابراین پایش کیفیت آب‌های زیرزمینی و جلوگیری از آلودگی این منابع بسیار ارزشمند و حیاتی، ضروری به نظر می‌رسد (پورمقدس، ۱۳۸۱: ۳۲). افت سطح آب زیرزمینی، تبخیر و تعرق آب و نفوذ پساب‌های کشاورزی به زمین از مهم‌ترین مشکلات موجود در نواحی کشاورزی است که با زوال کیفیت آب و تأثیر بر کیفیت و کمیت محصولات کشاورزی می‌تواند باعث متروکه شدن مزارع شود (هیلل[6]، ۱۹۸۰: ٤۱۳). از جمله روش‌های بسیار ساده که می‌تواند شرایط کیفی آب را بازگو کند استفاده از شاخص‌های کیفی آب می‌باشد که نتایج را با ترکیب داده‌های عددی پارامترهای کیفی آب، به‌صورت سریع و قابل فهم ارائه می‌نماید. در ایران به دلیل عدم وجود استانداردهای ملی در خصوص کاربری آب زیرزمینی جهت کشاورزی، از شاخص‌ها و برخی استانداردهای معتبر بین‌المللی مانند FAO برای تفسیر کیفیت آب خام مورد استفاده در کشاورزی استفاده می‌شود که یکی از شاخص‌های مهم در این زمینه، شاخص ویلکوکس می‌باشد. این شاخص امروزه روش بسیار متداولی در طبقه‌بندی آب‌ها به لحاظ کشاورزی محسوب می‌گردد که در این طبقه‌بندی

4- Stites
5- Kraft
6- Hillel

[Downloaded from geographical-space.iau-ahar.ac.ir on 2026-11-06]

دو عامل هدایت الکتریکی (EC)[۷] و نسبت جذب سدیم (SAR)[۸] لحاظ شده است (حسین‌زاده و همکاران، ۱۳۹۲: ۷۸). کلسیم، منیزیم و سدیم، کاتیون‌های مهم در آب مورد استفاده در کشاورزی هستند و اغلب از یون‌های دیگر در تعیین خطر از هم پاشیدگی خاک صرف‌نظر می‌شود. نسبت جذب سدیم برای پیش‌بینی مشکلات نفوذپذیری آب در خاک استفاده می‌شود. در هر صورت، پهنه‌بندی کیفیت آب‌های زیرزمینی بر اساس شاخص ویلکوکس و با کمک سیستم اطلاعات جغرافیایی، مناطق مناسب برای مصارف کشاورزی را مشخص می‌کند (ویلکوکس[۹]، ۱۹۵۵: ۳٤). در این زمینه تحقیقات متعددی صورت گرفته است. سهرابی و همکاران (۱۳۸۸) در ارزیابی کیفی رودخانه کشکان برای مصارف آبیاری اراضی کشاورزی، پس از تعیین مقادیر کمی شاخص‌های کیفی موردنظر، به پهنه‌بندی آن در محیط GIS پرداخته و نتیجه گرفتند که مشکل عمده‌ای از نظر کیفیت آب آبیاری در طول دوره مورد بررسی مشاهده نمی‌شود، اما وابستگی زمانی و مکانی رودخانه کشکان و کیفیت آب آبیاری به اثبات رسید. رضایی و همکاران (۱۳۸۹) تغییرات مکانی برخی از شاخص‌های کیفی آب زیرزمینی استان گیلان را با استفاده از زمین‌آمار بررسی کردند. حسین‌زاده و همکاران (۱۳۹۲) به بررسی و پهنه‌بندی کیفیت رودخانه ساروق تکاب بر اساس شاخص ویلکوکس پرداختند که پراکنش نقاط در این دیاگرام نشان دهنده کلاس خیلی خوب و خوب برای انواع خاک‌ها و محصولات کشاورزی بود. ساقی و همکاران (۱۳۹۲) پهنه‌بندی آب رودخانه سیلوار از نظر کیفیت آب کشاورزی بر اساس شاخص ویلکوکس را بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند که با توجه به پراکنش نقاط در منحنی ویلکوکس می‌توان قضاوت نمود که وضعیت کیفی آب جهت کشاورزی در کلاس خوب و متوسط قرار دارد، اما افزایش تدریجی آلاینده‌ها و کاهش کیفیت آب رودخانه در منطقه پایین‌دست و میانی قابل توجه می‌باشد. شنگ[۱۰] و همکاران (۲۰۰٦) ارزیابی کیفی آب زیرزمینی دشت پینگ‌تانگ در تایوان را با تعیین شاخص‌های کیفی و با استفاده از روش کریجینگ در محیط GIS انجام دادند. سوندارای[۱۱] و همکاران (۲۰۰۹) در تحقیقی بر روی کیفیت رودخانه ماهانادی در هند برای مصارف کشاورزی، از روابط ریاضی و دیاگرام ویلکوکس استفاده نمودند که بر این اساس تمامی نمونه‌های نواحی مختلف در دسته‌بندی عالی تا خوب قرار داشت که برای تمام خاک‌ها و نیز محصولات حساس به شوری مناسب بود. همچنین سودارسینی[۱۲] و همکاران (۲۰۱۲) به بررسی کیفیت آب آبخوان دشت چوناکام سریلانکا برای کاربری کشاورزی با استفاده از دیاگرام شوری پرداختند که ۱٦ درصد نمونه‌ها با شوری متوسط و خطر قلیایی شدن کم جهت کشاورزی مناسب شناخته شدند. از دیگر مطالعات در این زمینه می‌توان به شعبانی (۱۳۸۸)، استواری (۱۳۹۰)، حشمتی و بیگی هرچگانی (۱۳۹۱)، دمیر[۱۳] و همکاران (۲۰۰۹)، تانی و همکاران (۲۰۰۹)

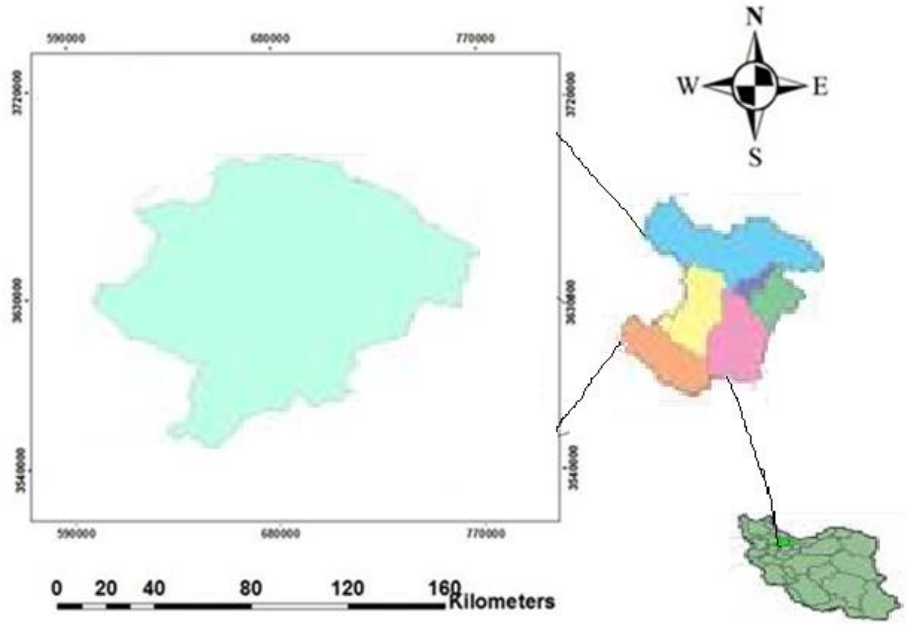
7- Electrical Conductivity
8- Sodium Adsorption Rate
9- Wilcox
10- Sheng
11- Sundaray
12- Sutharsiny
13- Demir

[Downloaded from geographical-space.iau-ahar.ac.ir on 2026-11-06]

اشاره کرد. در هر صورت، با توجه به این‌که استان قزوین یکی از قطب‌های کشاورزی کشور است و عمده آب مورد استفاده در این بخش (حدود ۷۲٪) از منابع آب زیرزمینی تأمین می‌گردد و این منابع به دلیل رشد بی‌رویه شهرها و صنایع استان مرتباً در خطر آلودگی قرار دارد، ضروری است که این منابع آبی از لحاظ کیفیت برای امر کشاورزی پهنه‌بندی گردد. نوآوری صورت گرفته در این پژوهش اجرای عملیات فازی کوچک بر روی لایه‌ها و استفاده از آنالیز نقاط داغ جهت نشان دادن مناطق نامناسب برای کشاورزی می‌باشد.

منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه در دشت قزوین در طول جغرافیایی ٤٩ درجه و ٩ دقیقه تا ٥٠ درجه و ٤٠ دقیقه شرقی و عرض جغرافیایی ٣٥ درجه و ٥٥ دقیقه تا ٣٦ درجه و ٧ دقیقه شمالی قرار دارد و مساحت آن ٩٥٠٠ کیلومتر مربع می‌باشد (شکل ١). میزان بارندگی دشت قزوین از ٥٥٠ میلی‌متر در ارتفاعات شمال استان تا ٢٠٠ میلی‌متر در جنوب شرقی با پراکنش ناهمگن همراه است. منابع آبی استان قزوین از دو بخش آب‌های سطحی و آب‌های زیرزمینی تشکیل شده که حدود ۷۲٪ از مصارف لازم در بخش کشاورزی از منابع آب زیرزمینی استان تأمین می‌گردد.

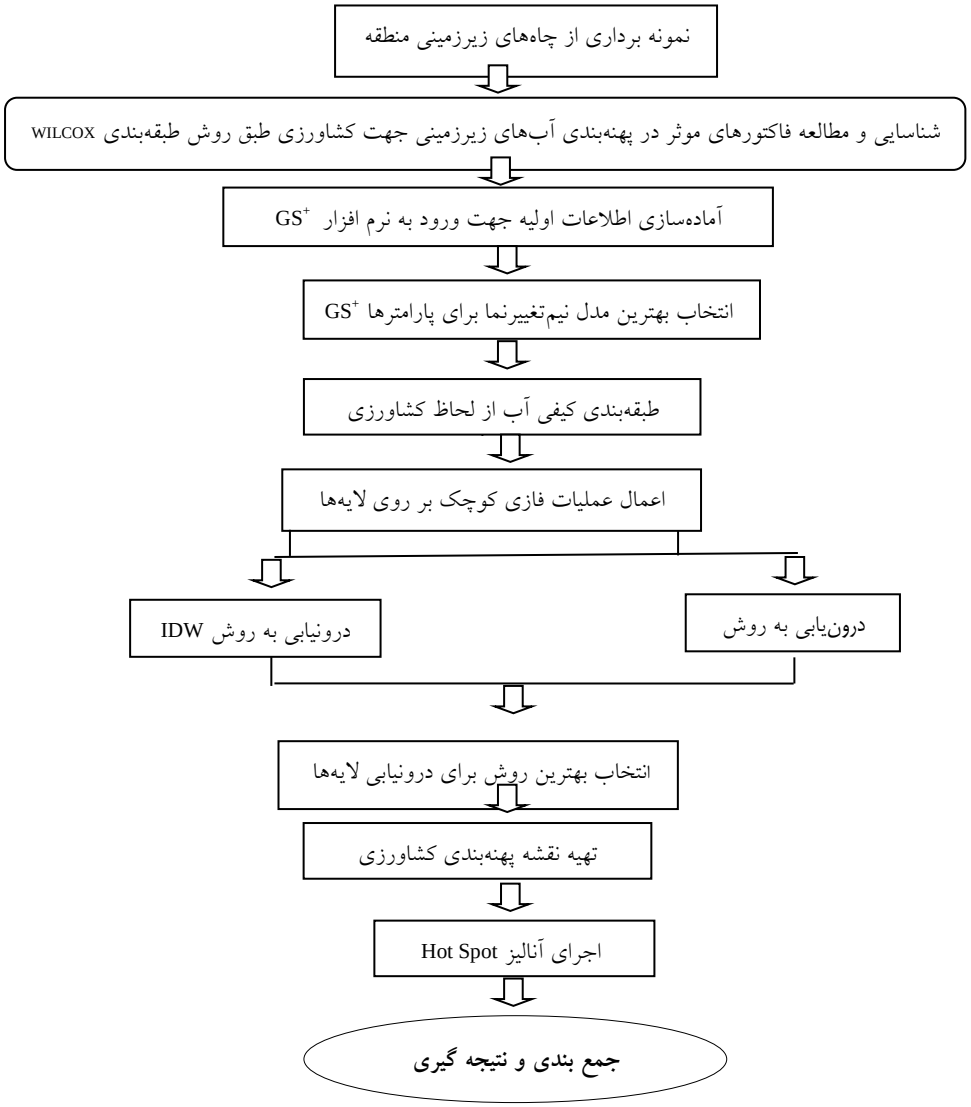


شکل ۱: موقعیت منطقه مطالعاتی

مواد و روش‌ها

این تحقیق از نوع کاربردی و روش جمع‌آوری اطلاعات به دو شکل کتابخانه‌ای و میدانی انجام گرفته است، همچنین از نرم‌افزارهای Arc GIS 10, GS^{+} 9, SPSS17 و Excel 2014 جهت انجام تحقیق استفاده شده است. روند اجرای تحقیق در (شکل ۲) آورده شده است.

[Downloaded from geographical-space.iau-ahar.ac.ir on 2026-11-06]



شکل ۲: فرآیند اجرای تحقیق

– نمونه‌برداری و آنالیز آزمایشگاهی

به‌منظور ارزیابی کیفی آب دشت قزوین در مرحله نخست از ۳۵ حلقه چاه عمیق در فاصله زمانی پاییز ۱۳۹۰ و بهار ۱۳۹۱، ۳٦٤ نمونه به‌طور تصادفی و با پراکنش مناسب برداشت گردید. نمونه‌ها در بطری‌های ۵۰۰ میلی‌لیتر پلی‌اتیلنی تیره‌رنگ که از قبل با اسید استیک و سپس با آب مقطر شستشو شده بود، جمع‌آوری شد. بطری‌های محتوی نمونه، داخل یخدان زیر یخ به آزمایشگاه منتقل و در دو دسته آزمایش‌های دستگاهی و آزمایش‌های تیتریمتری بر اساس مرجع استاندارد روش APHA (1998) تجزیه گردیدند و از لحاظ SAR (نسبت جذب سدیم) و EC (هدایت الکتریکی) مورد آنالیز شیمیایی قرار گرفتند. بدین منظور، هدایت ویژه آب با دستگاه پرتابل ساخت

[Downloaded from geographical-space.iau-ahar.ac.ir on 2026-11-06]

شرکت HACH در محل اندازه‌گیری شد. برای تعیین فلزات سنگین از جمله سدیم از دستگاه جذب اتمی شعله مدل Thermo Model 97 GFS) و جهت اندازه‌گیری کلسیم و منیزیم از روش تیتراسیون با EDTA استفاده گردید. نسبت جذب سدیم به کمک رابطه (۱) محاسبه گردید.

$$SAR = \frac{Na^{+}}{\sqrt{\frac{Ca^{2+}+Mg^{2+}}{2}}}$$ رابطه (۱)

که در آن تمام غلظت‌ها برحسب میلی‌اکی والان در لیتر است.

- طبقه‌بندی کیفی آب از لحاظ کشاورزی

برای تعیین کیفیت آب کشاورزی از طبقه‌بندی ویلکوکس که یکی از مهم‌ترین طبقه‌بندی‌ها در این زمینه می‌باشد، استفاده شده است. در این طبقه‌بندی آب کشاورزی بر اساس میزان هدایت الکتریکی (EC) و نسبت جذب سدیم (SAR) به چهار گروه با کیفیت عالی، خوب، متوسط و نامناسب (جدول ۱) و ۱۶ رده تقسیم‌بندی گردید (جدول ۲).

جدول ۱- معیارهای طبقه‌بندی آب از لحاظ کشاورزی

کیفیت آب	EC (ds/m)	رده	SAR (mgr/li)	رده
عالی	<۲۵۰	C_1	<۱۰	S_1
خوب	۲۵۰-۷۵۰	C_2	۱۰-۱۸	S_2
متوسط	۷۵۰-۲۲۵۰	C_3	۱۸-۲۶	S_3
نامناسب	>۲۲۵۰	C_4	>۲۶	S_4

منبع: (ویلکوکس، ۱۹۹۵)

جدول ۲- رده‌های مختلف آب و نوع کیفیت بر اساس طبقه‌بندی ویلکوکس

ردیف	نوع کیفیت آب برای کشاورزی	رده آب
۱	شیرین- برای کشاورزی کاملاً بی‌ضرر	C_1S_1
۲	کمی شور- برای کشاورزی تقریباً مناسب	C_2S_1,C_2S_2,C_1S_2
۳	شور- برای کشاورزی با اعمال تمهیدات لازم	$C_3S_3,C_3S_2,C_3S_1,C_2S_3,C_1S_3$
٤	خیلی شور- مضر برای کشاوزی	$C_4S_1,C_4S_2,C_4S_3,C_4S_4,C_3S_4,C_2S_4,C_1S_4$

منبع: (ویلکوکس، ۱۹۹۵)

سپس نیم‌تغییر نمای تجربی داده‌های کیفی در نرم‌افزار GS^{+} محاسبه و بهترین مدل برای هر کدام از پارامترها انتخاب گردید. سپس به کمک نرم‌افزار GIS میان‌یابی به روش‌های کریجینگ و عکس فاصله (IDW) صورت گرفت. جهت

[Downloaded from geographical-space.iau-ahar.ac.ir on 2026-11-06]

نرمال‌سازی پارامترهای EC و SAR از آزمون آماری کولموگروف–اسمیرنوف و همبستگی بین این پارامترهای به روش پیرسون در محیط نرم‌افزار SPSS16 تعیین گردید.

نرم‌افزار Geo Statistical Analyst (GS$^+$) اولین برنامه آنالیز زمین‌آماری است که در سال ۱۹۸۸ توسط سازمان خاک‌شناسی ایالات‌متحده ارائه شد. این نرم‌افزار به‌منظور تهیه نقشه‌های پهنه‌بندی با استفاده از داده‌های زمین مرجع کاربرد گسترده‌ای پیدا کرده است، همچنین می‌توان برای مدل‌سازی‌های مکانی از آن بهره برد. این نرم‌افزار در قالب شش مرحله اصلی به کار گرفته می‌شود: ۱- ورود داده‌ها در محیط GS$^+$، ۲- خصوصیات آماری داده‌های ورودی[۱۴]، ۳- استخراج نیم تغییرنما و آنالیز نیم تغییرنما[۱۵]، ٤- درون یابی و انتخاب روش تحلیل مکانی[۱٦]، ۵- ارزیابی روش‌ها و پارامترها[۱۷]، ٦- ترسیم نقشه[۱۸]. در این نرم‌افزار دو نوع روش تحلیل مکانی کریجینگ و عکس وزنی فاصله قابل اجرا است.

- فازی‌سازی داده‌های ورودی

به‌منظور قابل مقایسه شدن مقیاس‌های مختلف اندازه‌گیری (به ازای شاخص‌های گوناگون) باید از بی‌مقیاس کردن یا همان استانداردسازی استفاده نمود که بدین طریق عناصر شاخص‌های تبدیل شده بدون بعد اندازه‌گیری می‌شوند (اصغرپور، ۱۳۸۵: ٦۵). عملیات فازی‌سازی، ورودی‌ها را گرفته و توسط توابع عضویت مربوطه، یک درجه مناسب به هر یک نسبت می‌دهد (غضنفری و رضایی، ۱۳۸۵: ۳٤). متغیرهای ورودی، هر یک باید در محدوده رقمی تعریف شده خود باشند و خروجی‌ها، درجه عضویت فازی از مجموعه‌های تعیین‌کننده زبانی (بین صفر و یک) خواهند بود.

- فازی کوچک

تابع تبدیل فازی کوچک زمانی مورد استفاده قرار می‌گیرد که مقادیر ورودی کوچک‌تر برای عضویت مجموعه مناسب‌تر هستند. این تابع برای حالات خطی کاهنده به‌کار می‌رود یعنی مقادیر ورودی کوچک‌تر مقدار عضویت نزدیک به یک را دارند. تابع توسط نقطه میانی تعیین شده توسط کاربر (مقدار عضویت ۰/۵) و مقدار پراکندگی که بین ۱ تا ۱۰ تغییر می‌کند، مشخص می‌شود (شکل ۳). هرچه مقدار پراکندگی بیش‌تر باشد، شیب منحنی تابع عضویت، بیش‌تر می‌شود. معادله تابع عضویت فازی کوچک به‌صورت زیر است:

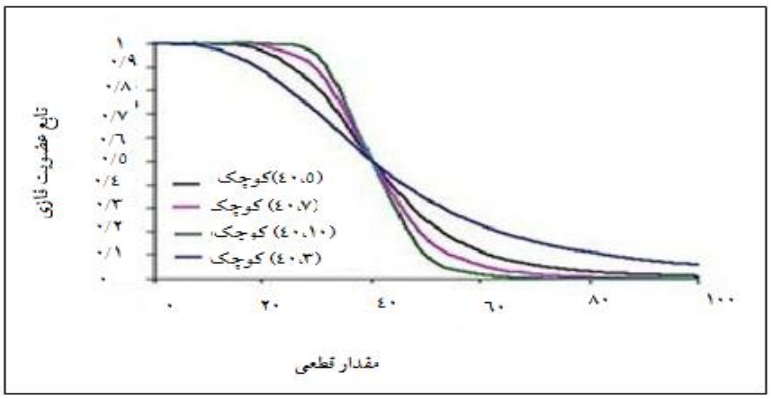
رابطه (۲)

$$\mu(x)=\frac{1}{1+\left(\frac{x}{f2}\right)^{f1}}$$

14- Summarize Data
15- Semivariance Analysis
16- Interpolation
17- Cross Validation
18- Mapping

[Downloaded from geographical-space.iau-ahar.ac.ir on 2026-11-06]

که f_1 مقدار پراکندگی و f_2 مقدار نقطه میانی (عددی که مقدار تابع عضویت آن ۰/۵ است) می‌باشد.



شکل ۳: تابع عضویت فازی کوچک

- نیم تغییر نما

اساس زمین‌آمار بر تعریف نیم تغییرنما استوار است. در تعریف نیم تغییرنما می‌توان از تعریف واریانس استفاده نمود. واریانس، وابستگی متقابل مقادیر دو نقطه به فاصله h را نشان می‌دهد. در زمین‌آمار واریانس توزیع اختلاف‌ها وقتی نقاط وابستگی زیادی با یکدیگر دارند، اندک است. در اصل این واریانس بیانگر تاثیر نمونه‌ها در محیط پیرامون خود در یک ناحیه مثل حوزه آبخیز می‌باشد، این واریانس تغییرنما نامیده می‌شود. به دلیل آن‌که آن‌را به‌صورت نمودار واریانس برحسب فاصله h ترسیم می‌کنند، در ریاضی آن‌ها به‌صورت $2\gamma h$ نشان می‌دهند. مقدار γh را نیم تغییر نما می‌گویند (مدنی، ۱۳۷۷: ۳۷). ویژگی مهم نیم تغییرنما در این است که در جهات مختلف می‌توان آن‌ها را رسم نمود و روندها را شناسایی نمود. برای استفاده از آن، لازم است ابتدا مدل تئوریکی به داده‌ها برازش داده شود و سپس از مدل نیم تغییرنمای به‌دست آمده، در فرآیند تخمین استفاده گردد. با استفاده از معادله (۳) می‌توان مقدار نیم تغییرنمای تجربی را محاسبه نمود (حسنی پاک، ۱۳۸٤: ٦۳).

رابطه (۳) $$\gamma(h)=\frac{1}{2N(h)}=\sum_{i=1}^{N(h)}[z(x+h)-z(x)]$$

که در آن $\gamma(h)$ نیم تغییرنمای تجربی، $N(h)$ تعداد جفت نقاطی است که در فاصله h از یکدیگر قرار دارند. $z(x)$ و $z(x+h)$ به‌ترتیب مقادیر مشاهده شده متغیر z در نقاط x و x+1 می‌باشند. پس از محاسبه نیم تغییر نمای تجربی، بهترین مدل نظری باید به آن برازش داده شود.

- روش درون‌یابی کریجینگ

پس از برازش مدل، مشخصات نیم تغییرنما در سیستم معادلات کریجینگ برای میانیابی متغیر مورد نظر وارد می‌گردد. شیوه‌های مختلفی برای درون‌یابی وجود دارد که روش کریجینگ مهم‌ترین و گسترده‌ترین روش می‌باشد. کریجینگ

[Downloaded from geographical-space.iau-ahar.ac.ir on 2026-11-06]

روش درون‌یابی پیشرفته‌ای است که برای داده‌هایی که دارای روند موضعی تعریف شده‌ای باشند، مناسب است. این روش با کم‌ترین واریانس تخمین، درون‌یابی می‌کند و میزان خطای آن تابع مشخصات تغییرنما می‌باشد. اگر مطالعات مربوط به تشخیص مدل تغییرنما با دقت کافی انجام شود، درون‌یابی با روش کریجینگ از دقت بالایی برخوردار خواهد بود. تخمین‌گر کریجینگ معمولی که به آن بهترین تخمین‌گر خطی نااریب (BLUE) نیز گفته می‌شود، به‌صورت زیر تعریف می‌شود (ژورنل[19] و هوبرگتس[20]، ۱۹۸۷: ۶۰۰).

رابطه (٤) $Z^*(x_0) = \sum_{i1}^{N} \lambda i\, z(x)$ $\sum_{i=1}^{N} \lambda i = 1$

که در آن $Z^*(x_0)$ مقدار تخمین زده شده متغیر در نقطه x_0، $z(x)$ مقدار مشاهده شده متغیر در نقطه x_0 و λ_i وزن آماری است که به متغیر در نقطه x نسبت داده می‌شود، این پارامتر نشان دهنده مقدار اهمیت و تأثیر نقطه iام بر مقدار تخمین زده شده متغیر در نقطه x_0 است و از حل معادلات زیر به‌دست می‌آید:

رابطه (٥)
$$\begin{cases} z(x) = \sum_{i=1}^{n} \lambda\gamma(xi\ xj) - \mu = \gamma(xi\ xj) \\ \sum_{i=1}^{n} \lambda i = 1 \end{cases}$$

– روش درون‌یابی فاصله وزنی معکوس[21]

روش میانیابی IDW یکی از معمول‌ترین روش‌های میانیابی نقاط پراکنده در فضا است که اساس آن بر مبنای این فرضیه است که در یک سطح میانیابی، اثر یک پارامتر بر نقاط اطراف یکسان نبوده و نقاط نزدیک بیش‌تر و نقاط دور کم‌تر تحت تأثیر هستند و هر چه فاصله از مبدأ افزایش یابد اثر پارامتر کمتر می‌شود (انصاری و داوری، ۱۳۸٦: ٦٧).

– آنالیز Hot Spot

این آنالیز نشان می‌دهد که در چه مناطقی خوشه‌بندی مکانی رخ داده است، به عبارتی ابزاری برای بصری‌سازی وسعت و مدل خوشه‌بندی‌ها است. در مواقعی که به‌دنبال دلایل اصلی تشکیل خوشه‌بندی هستیم توجه به مکان آن-ها خیلی مهم است. با استفاده از آمار عمومی G می‌توان نقاط داغ و سرد کل منطقه مطالعه را تفکیک کرد، نقاط داغ و سرد به تمرکزهای مکانی معروف هستند. این آنالیز بیان می‌کند که در چه موقعیتی عوارض با ارزش خوشه‌بندی مکانی بالا یا پایین وجود دارند. یک عارضه با ارزش بالا جالب توجه است، اما ممکن است از نظر آماری معنادار نباشد، به این دلیل که یک نقطه داغ معنادار از لحاظ آماری باید علاوه بر داشتن ارزش بالا، توسط دیگر عوارض با ارزش بالا احاطه شده باشد، این امر توسط p-value و z-score بیان می‌شود که به‌ترتیب میزان احتمال تصادفی بودن

19- Journel
20- Huijbregts
21- Inverse Distance Weighted

[Downloaded from geographical-space.iau-ahar.ac.ir on 2026-11-06]

و انحراف معیار را نشان می‌دهند (شکل٤). میزان بالا و یا پایین z-score نشان‌دهندهٔ وجود الگو در داده‌های ورودی است (شکل ۳). آمار عمومی G از رابطه زیر به‌دست می‌آید:

رابطه (٦)
$$G_i^* = \frac{\sum_{j=1}^{n} w_{ij}x_j - \bar{X}\sum_{j=1}^{n} w_{ij}}{S\sqrt{\frac{\left[n\sum_{j=1}^{n} w_{ij}^2 - \left(\sum_{j=1}^{n} w_{ij}\right)^2\right]}{n-1}}}$$

در این رابطه x_j ارزش عارضه j می‌باشد، w_{ij} وزن مکانی بین عارضه i و j و n تعداد کل عوارض است، میزان Z-score برابر با میزان G_i^* می‌باشد.

رابطه (۷)
$$\bar{X} = \frac{\sum_{j=1}^{n} x_j}{n}$$

رابطه (۸)
$$S = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^{n} x_j^2}{n} - (\bar{X})^2}$$



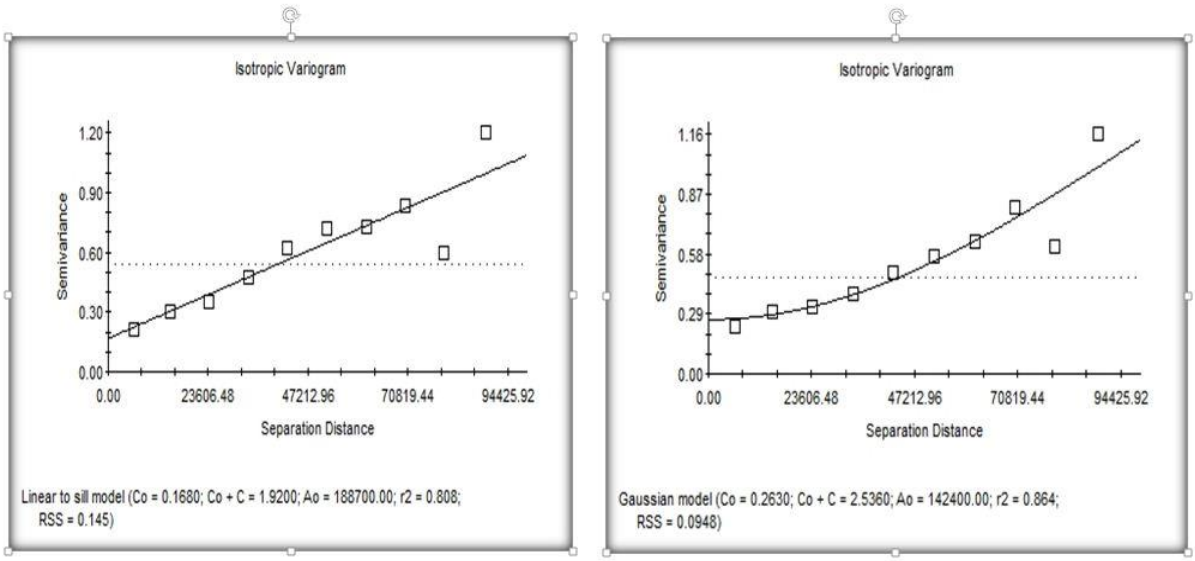
شکل٤: آنالیز Hot Spot

یافته‌ها و بحث

متغیرهای کیفی آب زیرزمینی منطقه، اطلاعات کافی در مورد چگونگی توزیع و تغییرات مکانی متغیرها در سطح دشت قزوین ارائه نمی‌کند. از این‌رو، برای رسیدن به این امر، به بررسی زمین‌آماری متغیرها پرداخته شد. ابتدا پارامترهای کیفی آب زیرزمینی منطقه مطالعاتی تعیین گردید که بر این اساس میانگین SAR ٥/١٧٤ به‌دست آمد که با توجه به معیار کیفیت آب در رده S_1 و کیفیت عالی قرار گرفت و EC با میانگین ۱۵۷۳، در رده C_3 و دارای کیفیت متوسط بود. خطر شوری و خطر سدیم در آب زیرزمینی منطقه با استفاده از نمودار ویلکوکس به‌دست آمد. بر اساس نمودار ویلکوکس، ٣٤ درصد نمونه‌ها در کلاس C_2S_1، ٥١ درصد در کلاس C_3S_1 و ۱۵ درصد در کلاس C_4S_1 قرار گرفتند؛ بنابراین آب زیرزمینی دشت قزوین از لحاظ خطر سدیم هیچ‌گونه مشکلی برای خاک ندارد ولی از نظر شوری (EC) اندکی برای خاک مشکل‌زا می‌باشد که با اعمال تمهیدات لازم از جمله با استفاده از اعمال آبشویی و روش‌های زراعی مناسب قابل حل است (حشمتی و بیگی هرچگانی، ۱۳۹۱: ٤٩).

سپس نیم‌تغییرنمای تجربی داده‌ها (واریوگرام) به کمک نرم‌افزار GS^+ محاسبه شد و بهترین مدل نیم تغییرنما به هر کدام از پارامترها برازش داده شد (شکل ٥).

[Downloaded from geographical-space.iau-ahar.ac.ir on 2026-11-06]



شکل ۵: نیم تغییر نمای تجربی و مدل برازش داده شده به پارامترهای کیفی آب زیرزمینی

نتایج مربوط به تحلیل این واریوگرام‌ها در (جدول ۳) ارائه شده است. مناسب‌ترین مدل با توجه به کم‌ترین RSS و R^2 تعیین گردید. بر این اساس، نسبت بخش ساختاری واریانس به کل واریانس داده‌ها را که با C/(C+CO) نشان می‌دهند، هر اندازه به یک نزدیک‌تر باشد، بهتر بوده و نشان‌دهنده همبستگی قوی‌تری می‌باشد. این نسبت برای دو شاخص کیفی آب زیرزمینی دشت قزوین نزدیک یک به‌دست آمد که وجود وابستگی مکانی قوی را نشان می‌دهد.

جدول ۳- پارامترهای نیم تغییر نمای تجربی برای هر شاخص کیفی آب زیرزمینی دشت قزوین

پارامترها	نوع مدل	CO	CO+C	AO	C/(CO+C)	R^2	RSS
EC	Linear	۰/۱٦۸۰	۱/۹۲۰	۱۸۸۷۰۰	۰/۹۱۳	۰/۸۰۸	۰/۱٤٥
SAR	Gaussian	۰/۲٦۳۰	۲/٥۳٦	٤٦٦٤	۰/۸۹٦	۰/۸٦٤	۰/۰۹٤

مدل‌های برازش داده شده به واریوگرام SAR و EC به‌ترتیب گوسی و خطی است. عدم همسانی مدل‌های این دو شاخص را شاید بتوان به وجود عدم همبستگی معنی‌دار بین این شاخص‌ها نسبت داد (جدول ٤) که احتمالاً به دلایلی همچون تفاوت در مناطق جغرافیایی، تفاوت در زمین‌شناسی، نمک‌زار بودن مناطق جنوبی، تاثیر آب‌های سطحی نواحی شمالی منطقه، نوع پمپاژ و غیره است.

[Downloaded from geographical-space.iau-ahar.ac.ir on 2026-11-06]

جدول ٤- ضریب همبستگی پیرسون بین مولفه‌های کیفی آب

پارامترها	EC	SAR
EC	۱	
SAR	۰/۷۲۷	۱

حشمتی و بیگی هرچگانی (۱۳۹۱) و تقی‌زاده مهرجردی و همکاران (۲۰۰۸) برخلاف تحقیق حاضر بهترین مدل واریوگرام برای SAR را مدل کروی تشخیص داده‌اند و مدل برازش داده شده برای EC در تحقیق رضایی و همکاران (۱۳۸۹) کروی، استواری (۱۳۹۰) گوسی، بیگی هرچگانی و حشمتی (۱۳۹۱) گوسی و تقی‌زاده مهرجردی و همکاران (۲۰۰۸) کروی ارائه گردیده است. می‌توان نتیجه گرفت الگوی تغییرات مکانی شاخص‌ها در یک دشت به دشت دیگر به علت تفاوت در مناطق جغرافیایی و موارد ذکر شده در بالا متفاوت است. در مرحله بعد به کمک نرم افزار GIS میانیابی به روش‌های کریجینگ و عکس فاصله (IDW) صورت گرفت که برای انتخاب مدل مناسب جهت برازش بر روی واریوگرام تجربی از مقدار RMSE کم‌تر و استحکام ساختار فضایی قوی‌تر استفاده شد. نتایج حاصل از روش کریجینگ و IDW به کمک معیار RMSE که میزان دقت را نشان می‌دهد، مورد ارزیابی قرار گرفت (جدول ۵). نتایج نشان‌دهنده RMSE کم‌تر برای روش کریجینگ است، بنابراین این روش نسبت به روش دیگر برتری دارد و در نتیجه درون‌یابی با این روش صورت گرفت که با نتایج شعبانی (۱۳۸۸)، قمیشیان (۱۳۸۹)، رضایی و همکاران (۱۳۸۹)، استواری (۱۳۹۰)، محمدی و همکاران (۱۳۹۰)، تقی‌زاده مهرجردی و همکاران (۲۰۰۸)، کرسیک[22] (۱۹۹۷)، ویجی[23] و رمادوی[24] (۲۰۰٦) مبنی بر برتری روش کریجینگ مطابقت دارد.

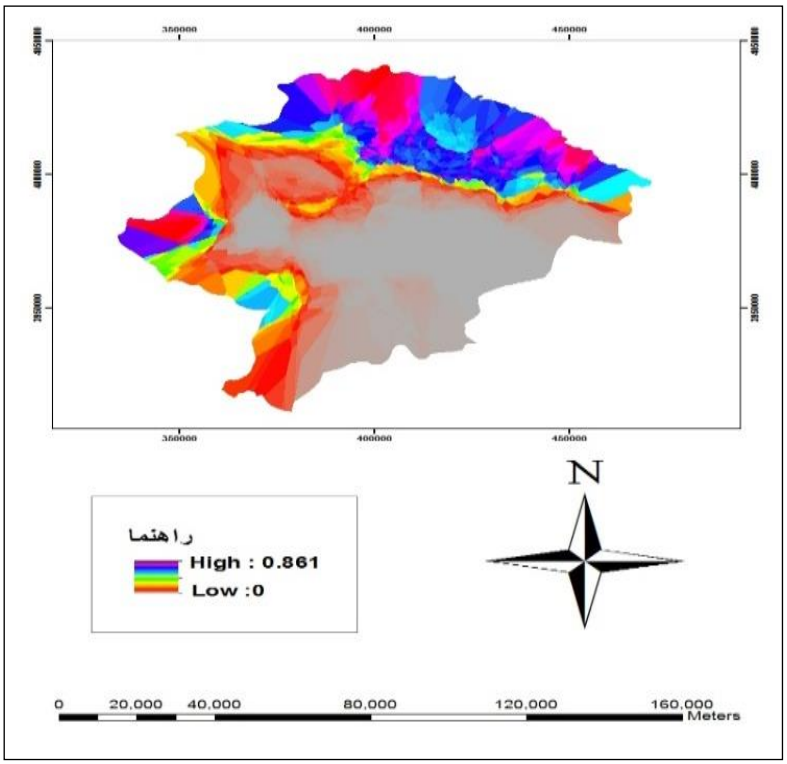
جدول ۵- نتایج RMSE برای برآورد کیفیت آب زیرزمینی

پارامترها	کریجینگ	عکس فاصله
EC	۰/۹۱	۱/۹٦
SAR	۰/٦٦	۱/۵۸

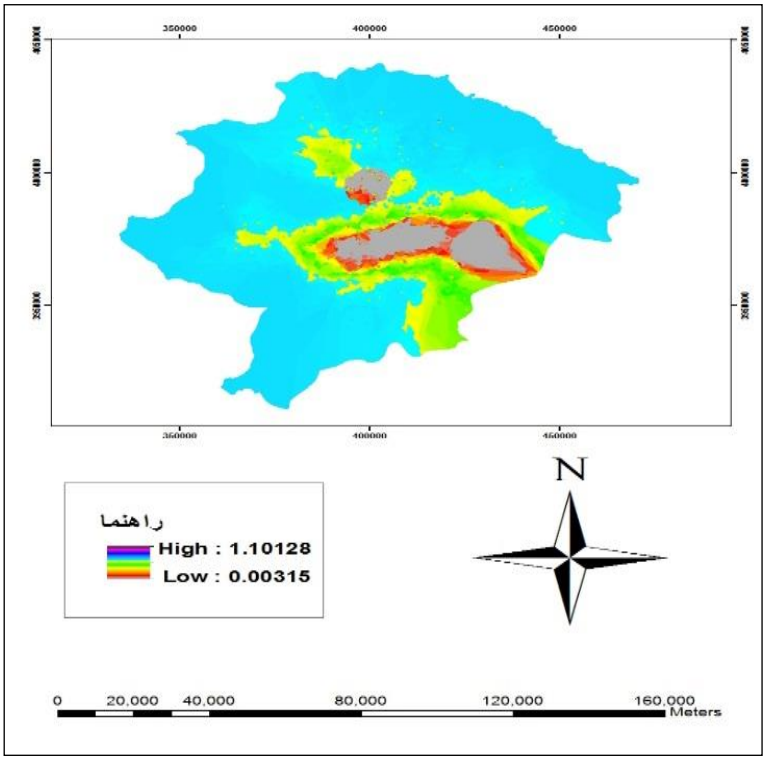
سپس با داشتن بهترین مدل‌ها، در محیط نرم‌افزار Arc GIS10 هر کدام از پارامترها به روش کریجینگ درون‌یابی شده و با استفاده از روش فازی، استانداردسازی گردیدند (شکل‌های ٦ و ۷).

22- Kresic
23- Vijay
24- Remadevi

[Downloaded from geographical-space.iau-ahar.ac.ir on 2026-11-06]



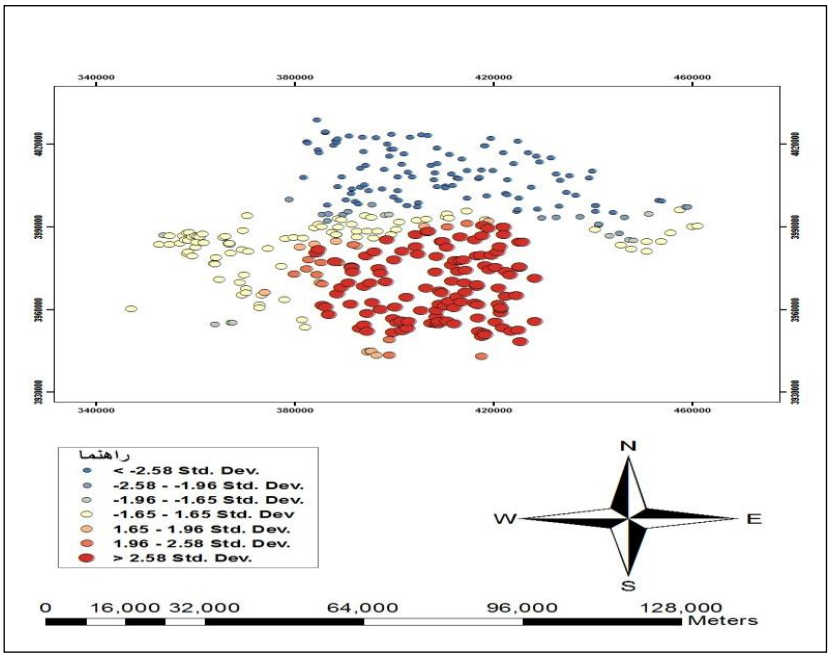
شکل ٦: نقشه فازی شده EC



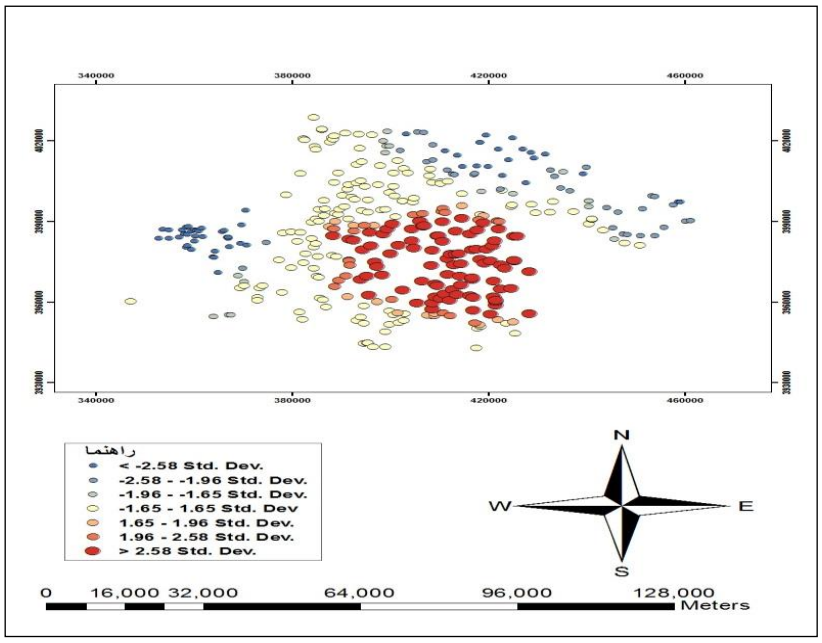
شکل ۷: نقشه فازی شده SAR

[Downloaded from geographical-space.iau-ahar.ac.ir on 2026-11-06]

در مرحله بعد الگوی فضایی و خوشه‌بندی مکانی شاخص‌ها بر اساس میزان انحراف استاندارد (Z-score) جهت تلفیق با نقشه پهنه‌بندی آب زیرزمینی تهیه گردید (شکل‌های ۸ و ۹). همان‌طور که مشاهده می‌شود الگوی ارائه شده نشان‌دهنده الگوی خوشه‌ای در منطقه می‌باشد.



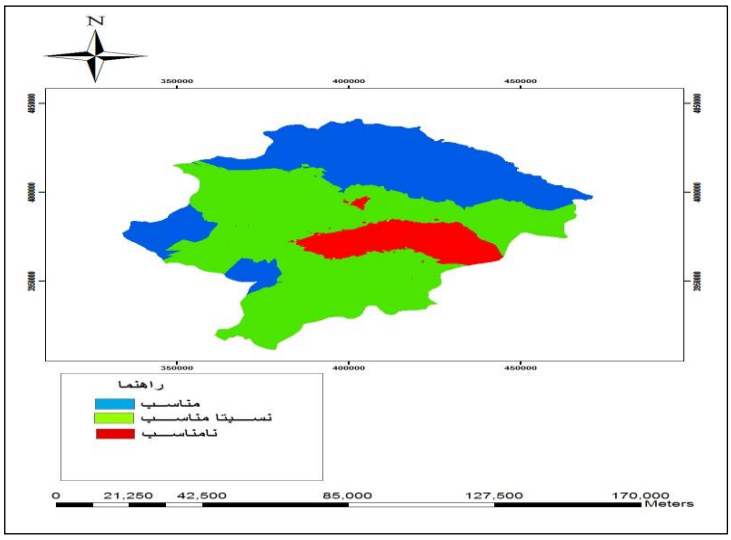
شکل ۸: نتایج آنالیز Hot spot بالا: EC؛ پایین: SAR



شکل ۹: نتایج آنالیز Hot spot بالا: EC؛ پایین: SAR

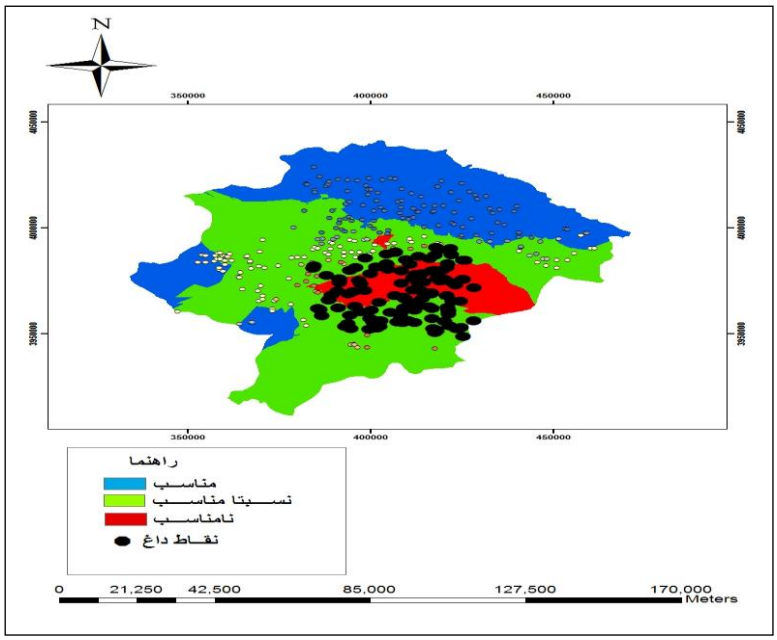
در نهایت نقشه پهنه‌بندی کیفیت آب زیرزمینی از لحاظ کشاورزی طبق روش ویلکوکس تهیه شد (شکل ۱۰).

[Downloaded from geographical-space.iau-ahar.ac.ir on 2026-11-06]



شکل ۱۰: نقشه پهنه‌بندی کیفیت آب زیرزمینی

همان‌طور که مشاهده می‌شود پهنه‌های مناسب کیفیت آب‌های زیرزمینی برای کشاورزی اکثراً در مناطق شمالی منطقه قرار داشته و بخش کوچکی از منطقه به‌صورت نوار باریکی از شرق به سمت مرکز امتداد یافته است. سرانجام از روی هم‌گذاری نقشه پهنه‌بندی و نقشه حاصل از آنالیز Hot spot مشاهده شد که تمام نقاط داغ منطقه که نشان‌دهنده تجمع عناصر با غلظت زیاد می‌باشد در کنار هم و روی طبقه سوم نقشه پهنه‌بندی که برای کشاورزی نامناسب هستند، قرار گرفته‌اند (شکل ۱۱).



شکل ۱۱: روی هم‌گذاری نقشه پهنه‌بندی و نقشه آنالیز Hot spot

[Downloaded from geographical-space.iau-ahar.ac.ir on 2026-11-06]

نتیجه‌گیری

EC یکی از مهم‌ترین پارامترها در تعیین کیفیت مناسب آب برای کشاورزی است و آبیاری با EC بالا می‌تواند غلظت نمک خاک را افزایش دهد و به خاطر خاصیت تجمعی آن در خاک، به زمین‌های زراعی و محصولات آسیب می‌زند که در مطالعه حاضر آب زیرزمینی در سه کلاس C_2، C_3 و C_4 قرار دارد و نشان می‌دهد که شوری خاک در حد نسبتاً کم، متوسط و زیاد است. از طرف دیگر سدیم زیاد در آب، به علت تغییر خواص خاک، ضمن کاهش نفوذپذیری آب در خاک، بر اراضی کشاورزی و محصولات حساس مانند درختان میوه اثرات نامطلوبی وارد می‌کند. در دشت قزوین میانگین مقادیر SAR کم‌تر از ۱۰ و در کلاس S_1 بوده که نشان می‌دهد خطر سدیم آب در منطقه کم است. نوآوری صورت گرفته در این تحقیق انجام عملیات فازی کوچک بر روی لایه‌ها برای بالا بردن دقت کار قبل از روی‌هم‌گذاری لایه‌ها جهت تهیه نقشه پهنه‌بندی و در نهایت روی‌هم‌گذاری نقشه حاصل از آنالیز Hot spot و نقشه پهنه‌بندی بود که در مطالعات مشابه چنین کاری صورت نگرفته است. هم‌خوانی نقشه‌های پهنه‌بندی کیفیت آب‌های زیرزمینی و آنالیز Hot spot حاکی از دقت خوب مدل‌های واریوگرام و تخمین‌گر کریجینگ در میان‌یابی و پهنه‌بندی شاخص‌های کیفی آب زیرزمینی دشت قزوین می‌باشد. با توجه به نقشه نهایی پهنه‌بندی ۳٤ درصد از منطقه برای کشاورزی مناسب، ۵۱ درصد نسبتا مناسب و ۱۵ درصد نامناسب می‌باشد (جدول ۵)، پس می‌توان گفت که کیفیت آب منطقه مورد مطالعه برای کشاورزی مطلوب است.

جدول ۵- مساحت کلاس‌های منطقه از نظر کیفیت آب زیرزمینی

کلاس‌ها	مساحت (کیلومترمربع)	مساحت (درصد)
منطقه مناسب	۳۲۲۳/۱۸	٪۳٤
منطقه نسبتا مناسب	٤۸۸۱/۳۱	٪۵۱
منطقه نامناسب	۱۳۹٦/۳۳	٪۱۵
جمع	۹۵۰۰/۰۸	۱۰۰

براساس نقشه پهنه‌بندی، دلیل بالا بودن EC در نواحی شرقی دشت احتمالاً انحلال بالای کانی‌های سازندهای آهکی و مارن، نشت فاضلاب‌های شهری و کشاورزی و همچنین جهت جریان شمال به جنوب آب زیرزمینی باشد که این افزایش EC می‌تواند باعث افزایش فشار اسمزی شده و جذب آب توسط گیاه کاهش می‌یابد. در بیش‌تر منطقه که میزان EC نسبتاً کم و در کلاس نسبتاً مناسب کیفیت قرار دارد با اعمال روش‌های مناسب زراعی و جلوگیری از ورود پساب‌ها می‌توان کاربری کشاورزی را اجرا نمود.

[Downloaded from geographical-space.iau-ahar.ac.ir on 2026-11-06]

منابع

- ابراهیمی، پ (۱۳۸۰)، «بررسی و ارزیابی مدیریت عرضه و تقاضای آب شرب در شرایط خشکسالی اصفهان»، ***مجله آب و محیط‌زیست***، شماره ۹۸، صص ٤۹-٤۸.

- استواری، ی (۱۳۹۰)، «ارزیابی کیفیت آب آبخوان‌های منطقه لردگان و تأثیر سازندهای زمین‌شناسی بر کیفیت این آبخوان‌ها»، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد.

- اصغرپور، م (۱۳۸۵)، «***تصمیم‌گیری‌های چند معیاره***»، تهران، انتشارات دانشگاه تهران.

- انصاری، ح؛ داوری، ک (۱۳۸٦)، «پهنه‌بندی دوره‌های خشک با استفاده از شاخص بارندگی استاندارد شده در محیط GIS استان خراسان»، ***مجله پژوهش‌های جغرافیایی***، شماره ۱۰۸، صص ۹۷-٦۰.

- حشمتی، س؛ بیگی هرچگانی، ح ا (۱۳۹۱)، «پهنه‌بندی شاخص‌های کیفی آب زیرزمینی شهرکرد به‌منظور استفاده در طراحی سامانه‌های آبیاری»، ***مجله پژوهش آب در کشاورزی***، شماره ۱، صص ۵۹-٤۳.

- پورمقدس، ح (۱۳۸۱)، «بررسی کیفیت آب‌های زیرزمینی منطقه لنجانات اصفهان»، ***مجله دانشکده بهداشت و انستیتو تحقیقات بهداشتی***، شماره ٤ (۱)، صص ٤۵-۳۲.

- حسنی پاک، ع (۱۳۸٤)، «***زمین آمار (ژئواستاتیستیک)***»، تهران، مؤسسه انتشارات و چاپ دانشگاه تهران.

- حسین‌زاده، ا؛ رحیمی، ن؛ رحمانی، ع. ر؛ عزتی، ل (۱۳۹۲)، «بررسی کیفیت شاخه راست رودخانه ساروق تکاب بر اساس شاخص ویلکوکس و پهنه‌بندی آن توسط سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS) در سال ۱۳۹۰»، ***مجله دانشگاه علوم پزشکی مازندران***، شماره ۱۰۳، صص ۸۷- ۷۷.

- رضایی، م؛ دواتگر، ن؛ تاجداری، خ؛ ابول‌پور، ب (۱۳۸۹)، «بررسی تغییرات مکانی برخی شاخص‌های کیفی آب‌های زیرزمینی استان گیلان با استفاده از زمین‌آمار»، ***نشریه آب‌وخاک***، شماره ۲٤ (۵)، صص ۹٤۱-۹۳۲.

- رهنما، م. ب؛ بارانی، ج. م؛ مرادی، م (۱۳۷۹)، «پیش‌بینی پراکنش آلاینده‌ها در سفره‌های آب زیرزمینی»، سومین همایش ملی بهداشت محیط‌زیست، صص ۱۲-۱۰.

- ساقی، م. ح؛ صمدی، م. ت؛ رحمانی، ع؛ محسنی بندپی، ا (۱۳۹۲)، «پهنه‌بندی آب رودخانه سیلوار از نظر کیفیت بهداشت آب کشاورزی بر اساس شاخص WILCOX استفاده از سامانه اطلاعات جغرافیایی»، شانزدهمین همایش ملی بهداشت محیط ایران دانشگاه علوم پزشکی و خدمات بهداشتی درمانی تبریز، ۹ الی ۱۱ مهر ماه ۱۳۹۲، دانشگاه علوم پزشکی و خدمات بهداشتی درمانی تبریز.

- سهرابی، ن؛ چیت‌سازان، م؛ بهنیا، ع؛ حق یابی، ا ح؛ رستمی، س (۱۳۸۸)، «ارزیابی کیفی رودخانه کشکان برای مصارف آبیاری اراضی کشاورزی با کمک GIS»، هشتمین سمینار بین‌المللی مهندسی رودخانه، ٦ تا ۸ بهمن ۱۳۸۸، دانشگاه شهید چمران اهواز.

[Downloaded from geographical-space.iau-ahar.ac.ir on 2026-11-06]

- شعبانی، م (۱۳۸۸)، «بررسی تغییرات کیفی آب‌های زیرزمینی دشت ارسنجان»، ***فصلنامه جغرافیای طبیعی***، شماره ۳، صص ۸۲-۷۱.

- غضنفری، م؛ رضایی، م (۱۳۸۵)، «***مقدمه‌ای بر نظریه مجموعه‌های فازی***»، تهران، انتشارات دانشگاه علم و صنعت ایران.

- قمشیان، م (۱۳۸۹)، «پیش‌بینی فضایی کمیت و کیفیت منابع آب زیرزمینی در دشت سمنان-سرخه با استفاده از تکنیک زمین‌آمار»، پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد، دانشکده علوم، دانشگاه سمنان.

- مدنی، ح (۱۳۷۷)، «***مبانی زمین‌آمار***»، تهران، انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر.

- محمدی، م؛ محمدی قلعه‌نی، م؛ ابراهیمی، ک (۱۳۹۰)، «تغییرات زمانی و مکانی کیفیت آب زیرزمینی دشت قزوین»، ***مجله پژوهش آب ایران***، شماره ۸، صص ۵۲-۴۱.

- وجدانی، ح. ر (۱۳۸۱)، «چالش عمده پیشروی ناپایداری آب (مطالعه موردی استان همدان)»، ***مجله آب و محیط‌زیست***، شماره ۵۳، صص ۱۶-۱۲.

- Demir, Y., Erşahin, S., Güler, M., Cemek, B., Günal, H., Arslan, H., (2009), "Spatial variability of depth and salinity of groundwater under irrigated ustifluvents in the Middle Black Sea Region of Turkey", ***Environ. Monit. Assess.***, 158 (1-4): 279-94.
- Journel, A.G., Huijbregts, C.J., (1987), "***Mining Geostatistics***", academic press: New York.
- Hillel, D., (1980), "***Fundamentals of Soil Physics***", Academic Press: New York.
- Kresic, N., (1997), "***Hydrogeology and groundwater modeling***", Lewis Publishers: New York.
- Sheng, Y., Lin, Y. P., Cheng, L., (2006), "Designing an optimal multivariate geostatistical groundwater quality monitoring network using factorial Kriging and Genetic Algorithms", ***Environmental Geology***, 50: 101-121.
- Stites, W., Kraft, G. J., (2001), "Groundwater quality beneath irrigated vegetable fields in a north- central U. S. sand plain", ***Journal of Environmental Quality***, 29: 1509-1517.
- Sundaray, S. K., Nayak, B. B., Bhatta, D., (2009), "Environmental studies on river water quality with reference to suitability for agricultural purposes: Mahanadi river estuarine system, India– a case study", ***Environ. Monit. Assess.***, 155 (1-4): 227-243.
- Sutharsiny, A., Pathmarajah, S., Thushyanthy, M., Meththinka, V., (2012), "Characterization of Irrigation water quality of Chunnakam aquifer in Jaffna Peninsula", ***Tropical Agricultural Research***, 23 (3): 237-248.
- Taany, R. A., Tahboub, A. B., Saffarini, G. A., (2009), "Geostatistical analysis of spatiotemporal variability of groundwater level fluctuations in Amman–Zarqa basin Jordan: a case study", ***Environ. Geol.***, 57: 525–535.
- Taghizade Mehrjardi, R. M., Zareian Mahmodi, S. H., Heidari, A., (2008), "Spatial distribution of groundwater quality with geostatistics (case study: Yazd-Ardakan plain)", ***World Applied Science Journal***, 4 (1): 9-17.
- Vijay, K., Remadevi, J., (2006), "Kriging of groundwater levels (a case study)", ***Journal of Spatial Hydrology***, 1: 81-92.
Wilcox, L. V., (1955), "***Classification and Use of Irrigation Waters***", US DA, Circular 969, Washington.

[Downloaded from geographical-space.iau-ahar.ac.ir on 2026-11-06]