

Incorporation of fuzzy and geostatistical approaches in soil pH zoning in parts of East and West Azerbaijan provinces

Laleh Parviz* , Mohamad Salamat Aghbash and Saba Nazarzadeh

Associate Professor, Faculty of Agriculture, Azarbaijan Shahid Madani University

E-mail: laleh_parviz@yahoo.com

B.Sc. student, Faculty of Agriculture, Azarbaijan Shahid Madani University

E-mail: msalamat@yahoo.com

B.Sc. student, Faculty of Agriculture, Azarbaijan Shahid Madani University

E-mail: nazarzadeh.saba36@gmail.com

«Research Article»

Received: October 22, 2024 and Accepted: June 28, 2025

Abstract

Soil quality information plays an important role in land use planning and resource management, and knowledge about the spatial distribution of this information is needed in sustainable land management and agricultural production. In this research, a soil pH map was prepared using the information of 53 points in the provinces of East and West Azerbaijan. The zoning map was prepared with three geostatistical approaches (kriging with sensitivity analysis of semivariogram), regression (linear and fuzzy) and a combination of two approaches, fuzzy and kriging. In the regression approach, input layers including soil texture, digital elevation map, slope and aspect were considered. In the prepared maps, the northern areas of the study area have low pH values, and the more you move to the southwest, the pH values increase. The comparison of the approaches showed that the accuracy of the linear regression performance is low, so that the increase of the Theil's inequality coefficient from kriging and fuzzy regression to linear regression is equal to 55.55 and 27.27%, respectively. The values of the Coefficient of Residual Mass in the two methods of kriging and fuzzy regression are very close to each other, but the value of the Coefficient of Residual Mass in the combined method has decreased compared to the two methods (about 57.57%). The significance level of the LSD test at the level of one percent of the combined approach to kriging and fuzzy has decreased by 63.24% and 67%, respectively, that is, the combined approach is closer to the observational data and this shows the accuracy of the combined method. The slope of the trend line on the graph of pH and height was positive in 73 randomly extracted points, which indicates an increase in pH in high areas. Preparation of soil pH zoning map can serve as a guide in determining the right place for cultivation or choosing the right plant for cultivation based on soil pH in the region.

Keywords: Digital elevation map, Linear regression, Sensitivity analysis, Kriging, Semivariogram

*- Corresponding author's email: laleh_parviz@yahoo.com



ادغام رویکرد فازی و زمین‌آمار در پهنه‌بندی pH خاک در بخش‌هایی از استان‌های آذربایجان شرقی و غربی

لاله پرویز *، محمد سلامت اقباش و صبا نظرزاده

دانشیار دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید مدنی آذربایجان، تبریز، ایران. laleh_parviz@yahoo.com

دانشجوی کارشناسی دانشکده کشاورزی دانشگاه شهید مدنی آذربایجان، تبریز، ایران. msalamat@yahoo.com.com

دانشجوی کارشناسی دانشکده کشاورزی دانشگاه شهید مدنی آذربایجان، تبریز، ایران. nazarzadeh.saba36@gmail.com

«مقاله پژوهشی»

دریافت: ۱۴۰۳/۸/۱ و پذیرش: ۱۴۰۴/۴/۷

چکیده

اطلاعات کیفیت خاک نقش مهمی در برنامه‌ریزی کاربری اراضی و مدیریت منابع دارد و آگاهی در مورد توزیع مکانی این اطلاعات در مدیریت پایدار زمین و تولید کشاورزی مورد نیاز است. در این تحقیق با استفاده از اطلاعات ۵۳ نقطه در استان‌های آذربایجان-شرقی و غربی نقشه pH خاک تهیه شد. تهیه نقشه پهنه‌بندی با سه رویکرد زمین‌آمار (کریجینگ با تحلیل حساسیت نیم تغییرنا)، رگرسیون (خطی و فازی) و ترکیب دو رویکرد فازی و کریجینگ انجام گرفت. در رویکرد رگرسیون لایه‌های ورودی شامل لایه بافت خاک، مدل رقومی ارتفاع، شیب و جهت شیب در نظر گرفته شدند. در نقشه‌های تهیه شده مناطق شمالی محدوده مطالعاتی دارای مقادیر pH پایینی هستند و هر چه قدر به طرف جنوب غربی حرکت شود، مقادیر pH افزایش می‌یابد. مقایسه رویکردها نشان داد که دقت عملکرد رگرسیون خطی پایین است، به طوری که میزان افزایش ضریب نابرابری Theil از کریجینگ و رگرسیون فازی به رگرسیون خطی به ترتیب برابر با ۵۵/۵۵ و ۲۷/۲۷ درصد است. مقادیر ضریب جرم باقی مانده در دو روش کریجینگ و رگرسیون فازی خیلی نزدیک بهم هستند، ولی مقدار ضریب جرم باقی مانده در روش ترکیبی نسبت به دو روش کاهش داشته است (حدود ۵۷/۵۷ درصد). سطح معنی‌داری آزمون LSD در سطح یک درصد از رویکرد ترکیبی به کریجینگ و فازی به ترتیب ۶۳/۲۴ و ۶۷ درصد کاهش داشته است، یعنی رویکرد ترکیبی به داده‌های مشاهداتی نزدیکتر هستند و این مساله دقت روش ترکیبی را نشان می‌دهد. شیب خط برازشی بر نمودار pH و ارتفاع در ۷۳ نقطه که به طور تصادفی استخراج شدند، مثبت بود که حاکی از افزایش pH در مناطق مرتفع است. تهیه نقشه پهنه‌بندی pH خاک می‌تواند در تعیین مکان مناسب برای کشت و یا انتخاب گیاه مناسب برای کشت براساس pH خاک در منطقه به عنوان راهنما عمل کند.

واژه‌های کلیدی: مدل رقومی ارتفاع، رگرسیون خطی، تحلیل حساسیت، کریجینگ، نیم تغییرنا

* - آدرس ایمیل نویسنده مسئول: laleh_parviz@yahoo.com

مطالعه شد. در بازه زمانی ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۹ مقالات مربوط به نقشه‌برداری رقومی خاک ۴۰ بود. نقشه‌برداری رقومی خاک تکنیک قدرتمند است که قادر به تولید اطلاعات قابل اعتماد در مناطق با تعداد داده کم بود. این مطالعات بیشتر در مناطق خشک و نیمه‌خشک در مقیاس‌های محلی و منطقه‌ای انجام شد (زراعت پیشه و همکاران ۲۰۲۰).

غلظت نیترات، فسفات، قابلیت هدایت الکتریکی، کربن آلی و pH با استفاده از اطلاعات ۸۳ موقعیت در منطقه شهر ری در جنوب پالایشگاه نفت تهران اندازه‌گیری و با روش وزن دهی عکس فاصله نقشه تهیه شد. pH خاک در کل منطقه در هر دو عمق کاهش نشان داد. نقشه پهنه‌بندی نشان داد که در هر دو عمق شمال منطقه pH قلیایی‌تری نسبت به جنوب منطقه دارد. همچنین در عمق یک تقریباً ۸۰ درصد سطح منطقه pH بیشتر از هشت دارد که تولید محصول توسط گیاهان زراعی در این منطقه را می‌تواند تحت تأثیر قرار دهد (بیات و همکاران، ۱۳۹۵). از روش کوکریجینگ در تهیه نقشه خصوصیات فیزیکی و شیمیایی در منطقه‌ای در سیستان استفاده شد. مدل نیم تغییرنما^۱ کروی برای محتوای سیلت، نمایی برای قابلیت هدایت الکتریکی، رطوبت اشباع، شن و pH استفاده شد. محدوده‌های pH خاک بین محدوده خشتی ۶/۹ و قلیایی ۹ بود. یکی از دلایل بالا بودن pH در این خاک‌ها مربوط به محتوای کربنات کلسیم بالا است. قلیائیت بالا نه تنها رشد گیاهان را محدود می‌کند بلکه باعث کاهش نفوذپذیری و از بین رفتن ساختمان خاک می‌شود (هاشمی و همکاران، ۱۳۹۵). با استفاده از تکنیک زمین‌آمار (کریجینگ) برخی ویژگی‌های سطحی و عمقی پروفیل خاک در برخی از اراضی دشت قزوین آماده شدند. بهترین مدل برای pH خاک در هر دو عمق نمایی معرفی شد. نقشه‌های حاصل از کریجینگ نشان داد که دامنه پراکندگی مقادیر ویژگی‌های خاک در منطقه زیاد است که دلیل آن می‌تواند مربوط به وسعت زیاد منطقه، واحدهای فیزیوگرافی مختلف و شرایط مدیریتی باشد (طاعتی و همکاران، ۱۳۹۹). با استفاده از ۴۸

pH خاک که معیاری از اسیدی و بازی بودن خاک است، به دلیل تأثیر عمیق آن بر واکنش‌های شیمیایی بی‌شمار شامل مواد مغذی ضروری گیاه، یکی از متغیرهای اصلی شیمی خاک در نظر گرفته می‌شود (بارو و هارتمینک، ۲۰۲۳). pH خاک تأثیر زیادی بر رشد گیاهان و همچنین جذب و انتقال آلاینده‌ها در خاک دارد. pH خاک در برابر تغییر کاربری اراضی بسیار آسیب‌پذیر است. بنابراین درک توزیع مکانی و زمانی pH خاک برای برنامه‌ریزی و مدیریت کاربری پایدار مهم است (اودیامبو و همکاران، ۲۰۲۰).

pH خاک در حال تبدیل شدن به نگرانی اصلی با توجه به اسیدی شدن خاک در سطح جهانی است، زیرا به نظر می‌رسد با کاهش باروری مشاهده‌شده در طول زمان مرتبط است (فورناسیر و همکاران، ۲۰۱۸). در بیشتر خاک‌های ایران به علت وجود مقدار کربنات کلسیم و pH بالا، فرم قابل‌استفاده برخی از عناصر غذایی کمتر از میزان مناسب برای رشد گیاه است (نوروزی و همکاران ۱۳۹۷). از سوی دیگر تنوع اقلیمی، اختلاف در عوامل خاکسازي و توپوگرافی در نقاط مختلف ایران منجر به تشکیل خاک‌های مختلف شده است (کشتکار و همکاران ۱۳۹۷) که ضرورت مطالعه تغییرات pH را در کشور آشکار می‌سازد. در برخی از مناطق تغییرات مقادیر pH خاک زیاد است و نیاز به اندازه‌گیری دقیق از pH خاک است که به تعداد بسیار زیادی اندازه‌گیری نیاز است. این اندازه‌گیری‌ها را می‌توان با کمک روش‌های درون‌یابی کاهش داد. نقشه‌های پارامترهای خاک منابع ضروری برای استفاده از زمین‌های کشاورزی است، بخصوص نقشه‌برداری ویژگی‌های خاک به‌ویژه در مناطقی با شرایط توپوگرافی پیچیده پرهزینه و زمان‌بر است (گیافام و همکاران، ۲۰۱۹).

نیاز به اطلاعات دقیق خاک برای کاربردهای مختلف در حال افزایش است. در تحقیقی کاربردهای نقشه‌برداری رقومی خاک و روش‌های معمول نقشه‌برداری در ایران

^۱ Semivariogram

نمونه خاک از اراضی دانشگاه زنجان برخی از ویژگی‌های مختلف خاک از جمله درصد شن، رس، سیلت، کربن آلی اندازه‌گیری و سپس نقشه پهنه‌بندی آن‌ها استخراج شد. نتایج نشان دادند که با توجه به جوان بودن خاک‌ها بیشتر ویژگی‌های فیزیکی خاک تحت تأثیر بافت خاک قرار دارد (شعبانی و همکاران، ۱۳۹۸). از طبقه‌بندی فازی برای پروفیل‌های pH خاک در شرق استرالیا استفاده شد که شامل ۵ گروه فازی (کلاس) همراه با عضویت در گروه فازی برای هر پروفیل pH بود. توزیع عضویت گروه فازی به‌طور کلی تغییرات عوامل خاک مانند زهکشی داخلی، وضعیت کربنات، موقعیت چشم‌انداز و رژیم آبیاری را منعکس می‌کند. طبقه‌بندی فازی به‌طور مفید روابط بین پروفیل‌ها را نشان داد و یک روش بالقوه ارزشمند برای بررسی تغییرپذیری در مناطق پیچیده است (پوول و همکاران، ۱۹۹۱). در تحقیقی از روش‌های درون‌یابی جهت نقشه‌برداری توزیع مکانی pH خاک، شوری و پوشش گیاهی در استان هرمزگان استفاده شد. نتایج نشان دادند که روش‌های کریجینگ و کوکریجینگ نسبت به روش وزن‌دهی معکوس فاصله در پیش‌بینی توزیع مکانی ویژگی‌های خاک بهتر عمل می‌کند (زارع مهرجردی و همکاران، ۲۰۱۰). در مطالعه‌ای از یک رویکرد مبتنی بر رگرسیون-کریجینگ وزن‌دار جغرافیایی برای پیش‌بینی تغییرات مداوم خاک تا عمق ۱۵ سانتیمتری استفاده شد. این رویکرد با رگرسیون-کریجینگ خطی چندگانه با اطلاعات ۲۲۰ داده مشاهداتی و ۲۸ داده کمکی از جمله داده‌های اقلیمی، توپوگرافی و داده‌های سنجش از دور مقایسه شدند. نتایج نشان دادند که مواد آلی، ماسه، سیلت، دما و باند ۷ لندست می‌توانند تغییرپذیری مکانی pH خاک را به‌خوبی توصیف کنند. همچنین نتایج نشان دادند که همبستگی بین pH خاک و متغیرهای کمکی محیطی در مکان ثابت نیست. مناطق جنگلی تمایل به اسیدی بسیار شدید تا متوسط دارند درحالی‌که زمین‌های زراعی کمی اسید تا خنثی هستند (اودیامبو و همکاران، ۲۰۲۰). ارزیابی بهترین متغیرهای محیطی برای pH خاک با کریجینگ رگرسیونی در منطقه

تپه‌ای ویتنام مرکزی انجام گرفت. متغیرهای محیطی شامل نوع کاربری زمین، شاخص رطوبت توپوگرافی، شاخص پوشش گیاهی تعدیل شده بودند. در تعیین pH خاک نوع کاربری زمین دارای اهمیت بالایی بود (گیا فام و همکاران، ۲۰۱۹). از تکنیک‌های زمین‌آماري (درون‌یابی مکانی کریجینگ) در دو دوره ۲۰۰۸-۲۰۱۰ و ۲۰۱۹-۲۰۲۱ برای تجزیه و تحلیل تغییرات زمانی و مکانی در pH خاک و بررسی رابطه بین عوامل مؤثر مرتبط با pH خاک در منطقه-ای در چین استفاده شد. نتایج نشان دادند که توزیع زمانی و مکانی pH خاک در زمین‌های کشاورزی یکنواخت نیست. همچنین pH خاک به‌طور قابل‌توجهی از ۸/۱۱ به ۸/۱۳ افزایش یافت. عواملی مانند توپوگرافی، مواد مغذی، روش‌های آبیاری همه تأثیرات خاصی بر توزیع مکانی pH خاک دارند، درحالی‌که تغییرات در عوامل آب و هوایی و سطوح کوددهی ممکن است بر تغییرات زمانی طولانی مدت تأثیر بگذارد (زنگ و همکاران، ۲۰۲۴).

در تحقیقات انجام‌گرفته کارایی روش پهنه‌بندی در آگاهی از اطلاعات pH خاک اثبات شد. در این راستا نیاز به روشی دقیق جهت پهنه‌بندی با دقت بالا کاملاً احساس می‌شود. هدف این تحقیق پهنه‌بندی pH خاک است که از رویکرد کریجینگ و رگرسیونی (خطی و فازی) استفاده شده است. جهت پهنه‌بندی با استفاده از رگرسیون فازی از لایه‌های مؤثر بر pH خاک شامل شیب، جهت شیب، مدل رقومی ارتفاع (DEM) و بافت خاک استفاده شد. همچنین جهت افزایش دقت پهنه‌بندی از ترکیب دو نقشه با دقت بالا استفاده شد.

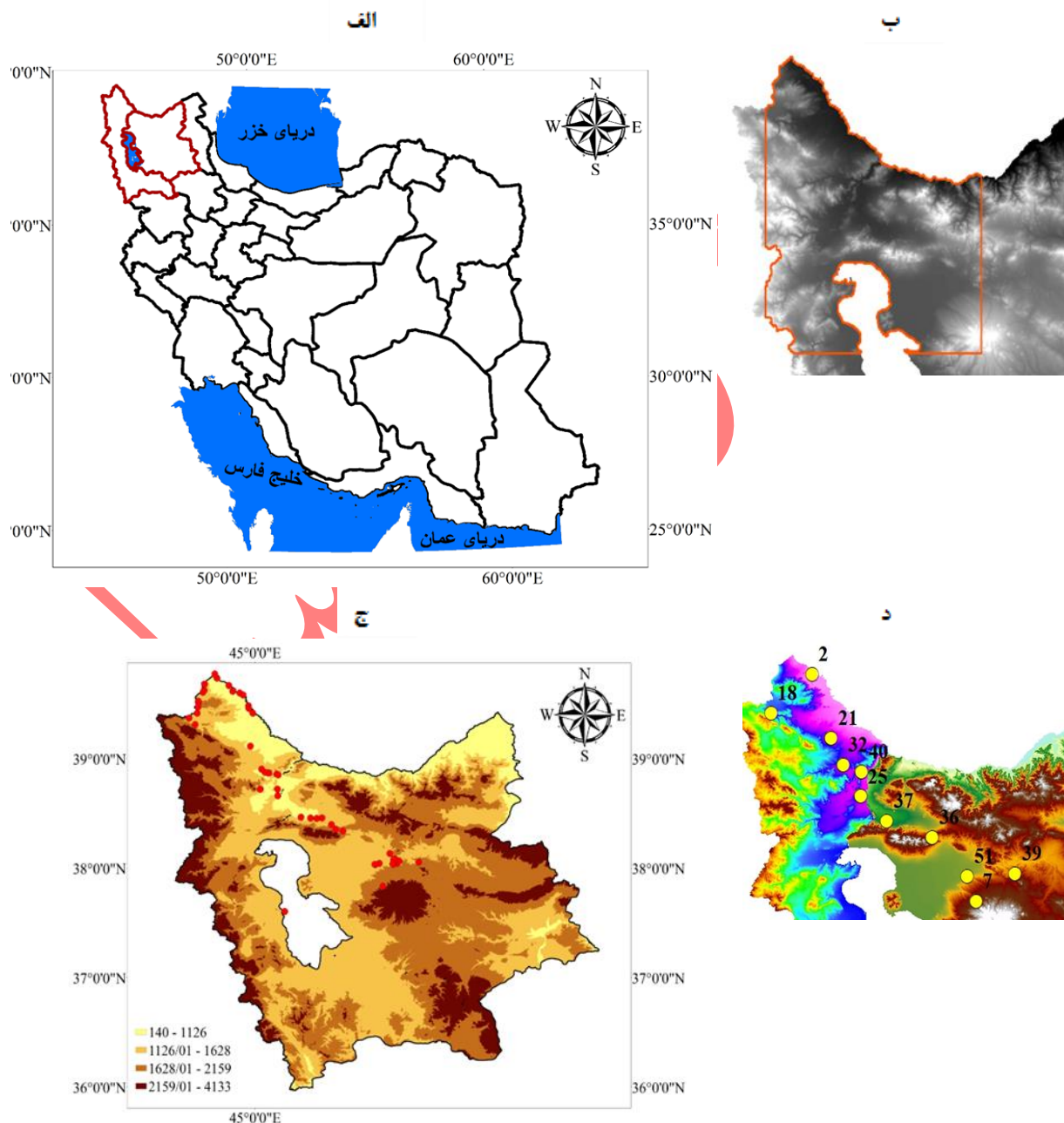
مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

مناطق نمونه‌برداری مربوط به بخش‌هایی از استان های آذربایجان شرقی و غربی است که محدوده نمونه-برداری و موقعیت نقاط نمونه‌برداری در شکل ۱ نشان داده شده است. دلیل انتخاب این دو استان به علت تغییرات اقلیمی سال‌های اخیر و خشک‌سالی دریاچه ارومیه می‌باشد

که پایش خاک‌های این دو استان را کاملاً ضروری ساخته است. نمونه‌ها به صورت تصادفی و از عمق سطحی (۰-۳۰ سانتیمتری) استخراج شدند. تعداد کل نقاط نمونه‌برداری شده ۵۳ نقطه است که به نسبت ۸۰ به ۲۰ تقسیم و به ترتیب ۴۲ و ۱۱ نقطه برای واسنجی و صحت‌سنجی انتخاب شدند. بعد از جمع‌آوری نمونه‌ها و انتقال آن‌ها به آزمایشگاه و اعمال عملیات آماده‌سازی خاک (هوا خشک کردن نمونه‌ها

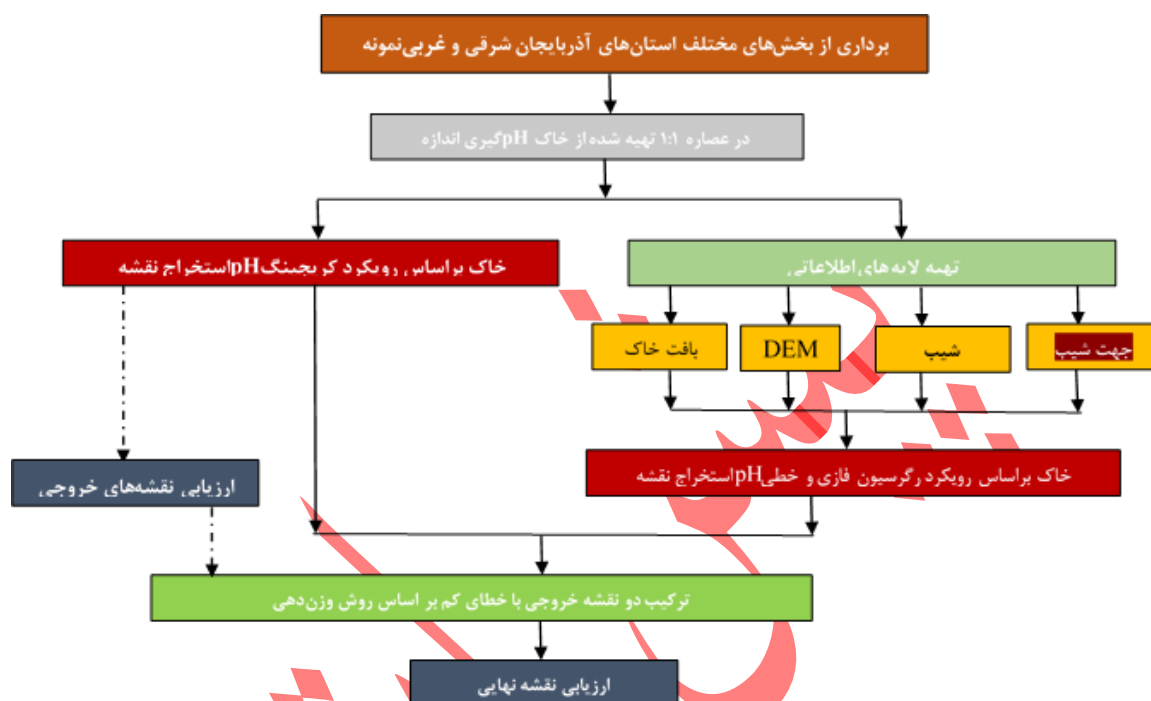
و عبور از الک ۲ میلی‌متری) اقدام به استخراج عصاره‌های خاک (به صورت نسبت‌های مساوی ۱:۱ از مقادیر خاک و آب (وزنی - حجمی) بر اساس روش پیشنهادی کارتر و گرگوریچ (۲۰۰۷)) با استفاده از دستگاه pH متر (مدل PT-370) شد. اقلیم هر دو استان بر اساس طبقه‌بندی دومارتن با استفاده از داده‌های هواشناسی، نیمه‌خشک تعیین شد.



شکل ۱- موقعیت استان‌های مطالعاتی در کشور (الف)، محدوده منطقه نمونه‌برداری با مرز قرمز رنگ در نقشه زوم شده کشور در قسمت شمال غرب (ب)، موقعیت مکانی نقاط نمونه‌برداری (ج)، موقعیت مکانی نقاط صحت‌سنجی با شماره (د)

آورده شده است و روندنمای تحقیق در شکل ۲ نمایش داده شده است

در این تحقیق روند پهنه‌بندی بر اساس رویکرد زمین‌آمار و رگرسیون فازی انجام گرفت که توضیحات روش‌ها در ادامه



شکل ۲- روندنمای تحقیق برای پهنه‌بندی pH خاک با رویکردهای مختلف

پیش‌بینی را با سطحی از عدم قطعیت ارائه کند. دو شرط اساسی برای کریجینگ برای بدست آوردن بهترین پیش‌بینی، ایستایی (میانگین و واریانس ثابت) و ایزوتروپی (یکنواختی در همه جهات) است (هیلال و همکاران، ۲۰۲۴). کریجینگ یک مدل خطی است که از وزن‌های خطی استفاده می‌کند که نه تنها به فاصله بین نقاط بلکه به جهت نقاط محلی نیز بستگی دارد. کریجینگ اطلاعات ثانویه‌ای را برای همبستگی مکانی متغیرهای اولیه و ثانویه می‌گیرد. (معادله ۱) معادله پایه کریجینگ است.

(۱)

$$\hat{Z}(x_0) = \sum \lambda_i \times Z(x_i)$$

که λ_i وزن یا اهمیت کمیت موردنظر در نمونه λ_m ، $Z(x_i)$ مقدار متغیر موردبررسی در نقطه x_i ، $\hat{Z}(x_0)$ مقدار تخمینی متغیر در نقطه x_0 می‌باشند.

کریجینگ

کریجینگ یک روش درونیابی زمین‌آمار برای تخمین یک متغیر تصادفی مانند متغیرهای خاک در یک نقطه نامعلوم بر اساس مشاهدات همان متغیر در مکان‌های مجاور می‌باشد. کریجینگ از چند مرحله تشکیل شده است. کریجینگ با تجزیه و تحلیل آماری اکتشافی داده‌ها شروع می‌شود. سپس به مدل‌سازی نیم تغییرنا، ساخت و تحلیل واریانس می‌پردازد. فرضیه اصلی آماری کریجینگ ثابت بودن است که نشان می‌دهد ویژگی‌های آماری مانند میانگین و واریانس مستقل از مکان‌های مکانی دقیق هستند، بنابراین میانگین و واریانس یک متغیر در یک مکان مشابه با میانگین و واریانس متغیر در موقعیت دیگر است. کریجینگ از خودهمبستگی یا همبستگی آماری بین نقاط مشاهداتی برای پیش‌بینی مقادیر مکانی برخلاف مدل‌های قطعی استفاده می‌کند. کریجینگ ممکن است سطوح

سمی واریوگرام (نیم تغییرنما) یک مفهوم اساسی در زمین آمار است که معادله آن در (رابطه ۲) آورده شده است (زارع مهرجردی و همکاران، ۲۰۱۰).

(۲)

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i + h) - Z(x_i)]^2$$

که $\gamma(h)$ مقدار نیم تغییرنما، $N(h)$ تعداد جفت مشاهداتی که با فاصله مکانی h از هم جدا شده‌اند، $Z(x_i + h)$ مقدار متغیر Z در موقعیت مکانی $x_i + h$ می‌باشند. از انواع کریجینگ شامل کریجینگ معمولی (با استفاده از نیم‌تغییرنماهای کروی، دایره‌ای، نمایی، گوسی، خطی) و جهانی (روند خطی) در این پژوهش استفاده شد. نوع نیم تغییرنما می‌تواند عملکرد کریجینگ را تحت تأثیر قرار دهد که انواع نیم تغییرنما در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفتند. روش کریجینگ مبتنی بر مدل‌های آماری شامل خودهمبستگی می‌باشد. در روش کریجینگ مقدار وزن‌های داده‌شده به نقاط هم بر اساس فاصله بین هر نقطه نمونه برداری می‌باشد، هم به نوع چیدمان و نظم کلی پراکنش داده‌های نمونه‌برداری وابسته است. با توجه به قابلیت‌های روش، برای کاهش خطای‌های ناشی از نمونه‌برداری با تعداد کم و نظم حاکم بر داده‌ها از الحاق با سایر روش‌ها سعی در افزایش دقت روش است.

رگرسیون فازی

منطق فازی ابزاری توانمند جهت حل مسائل مربوط به سیستم‌های پیچیده‌ای که درک آن‌ها مشکل و یا مسائلی که وابسته به استدلال، تصمیم‌گیری و استنباط بشری می‌باشد، بشمار می‌آید. به همین دلیل بهترین وسیله

برای مدل‌سازی سیستم‌هایی است که دارای پیچیدگی زیاد بوده و داده‌های کافی از آن‌ها موجود نیست و یا اطلاعات آن‌ها مبهم و غیرصریح می‌باشد. استفاده از این ابزار در رگرسیون فازی سبب ارتقاء این مدل از یک مدل آماری محض به سمت مدلی با قابلیت و کارایی بیشتری با تأکید بر در نظر گرفتن عدم قطعیت حاکم بر مسئله شده است. هدف اصلی در مدل رگرسیون پیدا کردن مدل ریاضی مناسب و تعیین ضرایب مدل با هدف بهترین برازش نتایج مدل رگرسیون با مقادیر مشاهداتی می‌باشد. اختلاف بین مقادیر مشاهداتی و تخمینی ناشی از خطای مشاهداتی است ولی این تفاوت در رگرسیون فازی ناشی از ابهام در ساختار سیستم می‌باشد. مدل‌سازی خطی فازی که به صورت (معادله ۳) نشان داده می‌شود مبین وابستگی متغیرهای ورودی و خروجی می‌باشد (کوره‌پزان دزفولی، ۱۳۸۴).

(۳)

$$\tilde{Y} = \tilde{A}_0 + \tilde{A}_1 x_1 + \dots + \tilde{A}_n x_n$$

$$\tilde{A} = (\tilde{A}_0, \tilde{A}_1, \dots, \tilde{A}_n)$$

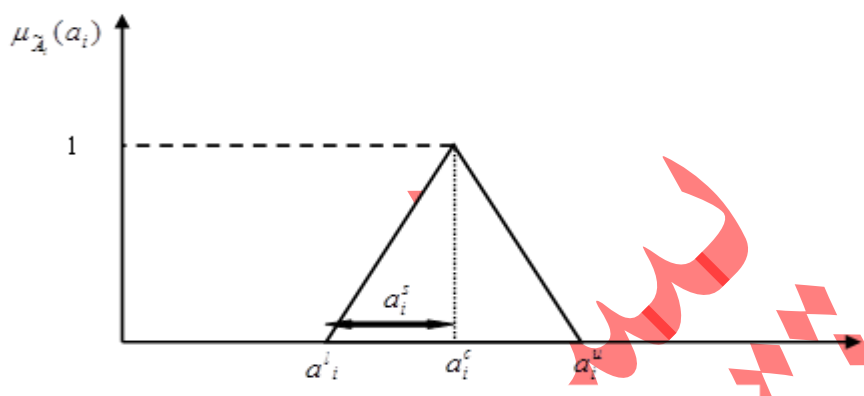
که $\tilde{A}$ و $\tilde{Y}$ به ترتیب ضرایب و خروجی فازی، x مقادیر مشاهداتی می‌باشند.

هدف این است که بر اساس یک مجموعه از داده های مشاهداتی ضرایب فازی معادله به گونه‌ای به دست آورده شود که معادله مزبور بهترین برازش بر روی مقادیر مشاهداتی را داشته باشد. در این تحقیق، اثر تابع عضویت مثلثی در دو حالت متقارن و نامتقارن به منظور در نظر گرفتن ضرایب فازی رگرسیون بررسی شده است. در حالت توابع عضویت در حالت متقارن، متغیر فازی خروجی به صورت (معادله ۴) تعریف می‌شود (کوره‌پزان، ۱۳۸۴).

(۴)

$$\mu_{\tilde{Y}}(y) = \begin{cases} \max [\min \mu_{\tilde{A}_i}(x_i)] & \text{if } f^{-1}(y, x) \neq \emptyset \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

بهترین معادله رگرسیون را با کمینه کردن میزان فازی بودن به دست می‌آورند. این کار را با کمینه کردن مجموع کل پهنای توابع عضویت ضرایب فازی معادله رگرسیون انجام می‌دهند. بنابراین برای دستیابی به بهترین برازش باید یک مدل بهینه سازی تهیه شود. (شکل ۳) تابع عضویت مثلثی متقارن یک عدد فازی را نشان می‌دهد.



شکل ۳- تابع عضویت مثلثی متقارن ضرایب فازی

که $\mu_{\tilde{y}}$ تابع عضویت متغیر خروجی و h پارامتر سطح اعتماد می‌باشند. در نهایت مدل برنامه‌ریزی خطی در حالت تابع عضویت متقارن به صورت (رابطه ۶) می‌باشد.

(۶)

$$\text{Objective function} \quad a_0^s + \sum_{i=1}^n a_i^s \sum_{j=1}^m |x_{ij}|$$

Subject to

$$a_0^c + \sum_{i=1}^n a_i^c x_{ij} - (1-h) \left[a_0^s + \sum_{i=1}^n a_i^s x_{ij} \right] \leq y_j$$

$$a_0^c + \sum_{i=1}^n a_i^c x_{ij} + (1-h) \left[a_0^s + \sum_{i=1}^n a_i^s x_{ij} \right] \geq y_j$$

ضرایب فازی با در نظر گرفتن توابع عضویت مثلثی متقارن به دو صورت $\tilde{A}_i = \{a_i^c, a_i^s\}$ و $\tilde{A}_i = \{a_i^u, a_i^l\}$ تعریف می‌شوند که ضرایب همراه با اندیس l, u, s, c به ترتیب مرکز و پهنای تابع عضویت و حدود بالا و پایین را نشان می‌دهند. مدل رگرسیون، امکان

در صورتی که از توابع عضویت مثلثی برای نمایش اعداد فازی این مدل‌ها استفاده شود رگرسیون فازی را می‌توان در قالب یک مسئله برنامه‌ریزی خطی فرموله و حل نمود. هدف مدل رگرسیون تعیین مقادیر بهینه ضرایب می‌باشد به گونه‌ای که درجه عضویت متغیر خروجی فازی برای تمام داده‌ها از یک مقدار معین مانند h بزرگتر باشد (کوره‌پزان دزفولی، ۱۳۸۴).

(۵)

$$\mu_{\tilde{y}}(y_i) \geq h \quad j = 1, \dots, m$$

که y متغیر وابسته، x متغیر مستقل، h پارامتر سطح اعتماد، a_i^s پهنای تابع عضویت و a_i^c مرکز تابع عضویت می‌باشند.

با حل مدل برنامه‌ریزی خطی فوق، ضرایب رگرسیون فازی به دست می‌آیند. با قرار دادن مقادیر به‌دست‌آمده برای ضرایب در معادله رگرسیون، مقدار متغیر خروجی به‌صورت فازی تعیین می‌شود. روش‌های مختلفی برای غیرفازی‌سازی متغیر فازی و تبدیل آن به حالت قطعی وجود دارد که می‌توان به روش میانه ماکزیمم، روش مرکز مجموع‌ها و روش مرکز سطح اشاره کرد (کوره‌پزان دزفولی، ۱۳۸۴).

در این تحقیق از رگرسیون خطی چندگانه فازی با لایه‌های ورودی شامل لایه‌های بافت خاک، مدل رقومی ارتفاع، شیب و جهت شیب استفاده شد.

آماره‌های ارزیابی

از روش‌های مورد استفاده برای مقایسه روش‌های درونیابی می‌توان به اعتبارسنجی متقابل و اعتبارسنجی با

مجموعه داده‌های مستقل اشاره کرد (رحیم‌پور و علی عباسپور، ۱۳۹۳). در این تحقیق از اعتبارسنجی با داده‌های مستقل استفاده شد، به‌طوری‌که نسبت ۲۰:۸۰ برای تقسیم بندی داده‌ها به دو قسمت واسنجی و صحت‌سنجی بکار برده شد. از نقاط مربوط به واسنجی برای تعیین وزن و پارامترهای روش‌های مورد استفاده شامل کریجینگ و رگرسیون فازی استفاده شد. بعد از ساخته شدن مدل‌ها، برای بررسی عملکرد آن‌ها در نقاط صحت‌سنجی (نقاط صحت‌سنجی در این تحقیق طوری انتخاب شدند که پراکنش مکانی مناسبی داشته باشند و عملکرد مدل ساخته‌شده در نقاط مختلف ارزیابی شود و صحت آن با اعتبار بالایی تایید شود) از آماره‌های ارزیابی استفاده شد که معادلات آن‌ها در (جدول ۱) آورده شده است. حالت بهینه آماره‌ها مربوط به کمینه $RMSE$ ، $nRMSE$ ، TIC و بیشینه RPD می‌باشد. مقادیر مثبت و منفی CRM به ترتیب حاکی از بیش برآورد و کم‌برآورد است (زراعت پیشه و همکاران ۲۰۲۰).

جدول ۱- آماره‌های ارزیابی برای بررسی عملکرد رویکردهای بهینه‌بندی

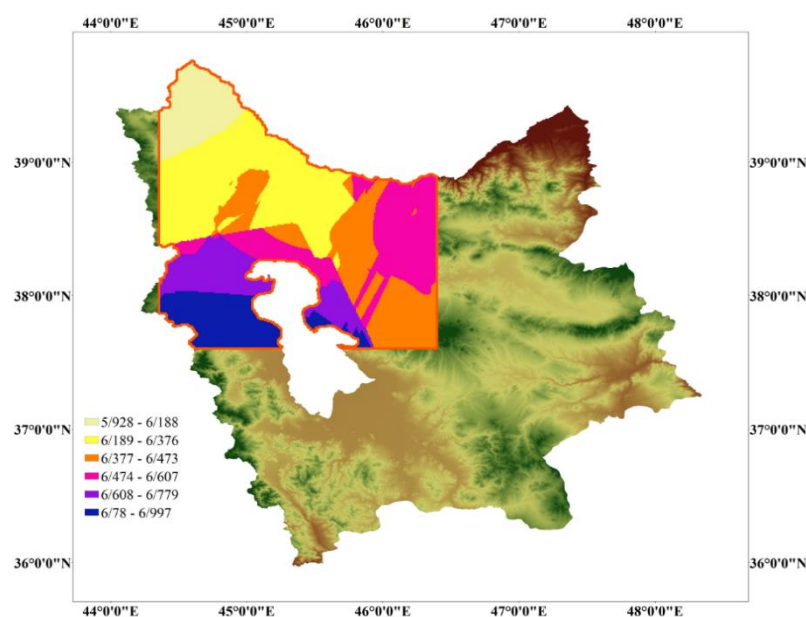
نام معیار	معادله معیار	نام معیار	معادله معیار
	$nRMSE = RMSE \times \frac{100}{\bar{O}}$	جزر میانگین مربعات خطای نرمال شده	
	$TIC = \frac{RMSE}{\sqrt{\frac{1}{N} \sum P_i^2 + \frac{1}{N} \sum O_i^2}}$	ضریب نابرابری Theil	$RMSE = \sqrt{\frac{\sum (P_i - O_i)^2}{N}}$
	$RPD = \frac{SD}{RMSE}$	انحراف پیش‌بینی باقی‌مانده	
	$CRM = \frac{\sum P_i}{\sum O_i} - 1$	ضریب جرم باقی‌مانده	

P : مقادیر شبیه‌سازی شده، O : مقادیر مشاهداتی، N : تعداد داده، $\bar{O}$: متوسط مقادیر مشاهداتی

نتایج

تعداد کل نقاط نمونه‌برداری شده برابر با ۵۳ نقطه از استان‌های آذربایجان شرقی و غربی در نظر گرفته شدند. ضریب تغییرات لایه‌های ورودی شامل جهت شیب، شیب، بافت خاک، توپوگرافی و pH به ترتیب برابر با ۵۴، ۹۸،

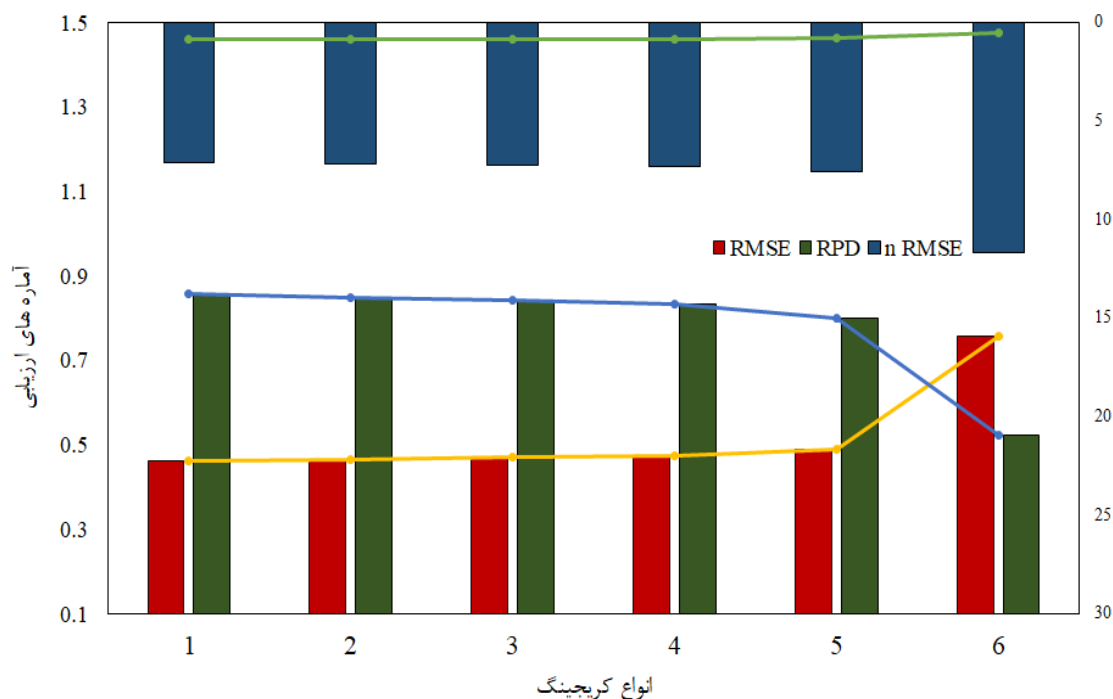
۳۰، ۲۳ و ۶ درصد در نقاط واسنجی محاسبه شدند. ضریب تغییرات داده‌های نمونه‌برداری شده پایین‌تر از ۱۰ است که مقدار کمی می‌باشد. بازه pH اندازه‌گیری شده در محدوده اسیدی تا بازی ($pH < 8$) است. در ابتدا از روش کریجینگ برای درون‌یابی مقادیر pH در کل منطقه استفاده شد که (شکل ۴) نشان‌دهنده نقشه خروجی است.



شکل ۴- نقشه حاصل از درون‌یابی pH با روش معمولی در محدود مطالعاتی

براساس نقشه خروجی (شکل ۴) مناطق شمالی محدوده مطالعاتی دارای مقادیر pH پایینی هستند و هر چه قدر به طرف جنوب غربی حرکت شود مقادیر pH افزایش می‌یابد (افزایش حدود ۱۳/۷۲ درصدی). براساس راهنمای نقشه منطقه در بازه اسیدی قرار دارد که پهنه وسیعی در محدوده ۵/۹۲۸ و ۶/۴۷۴ می‌باشد. در این تحقیق از دو نوع

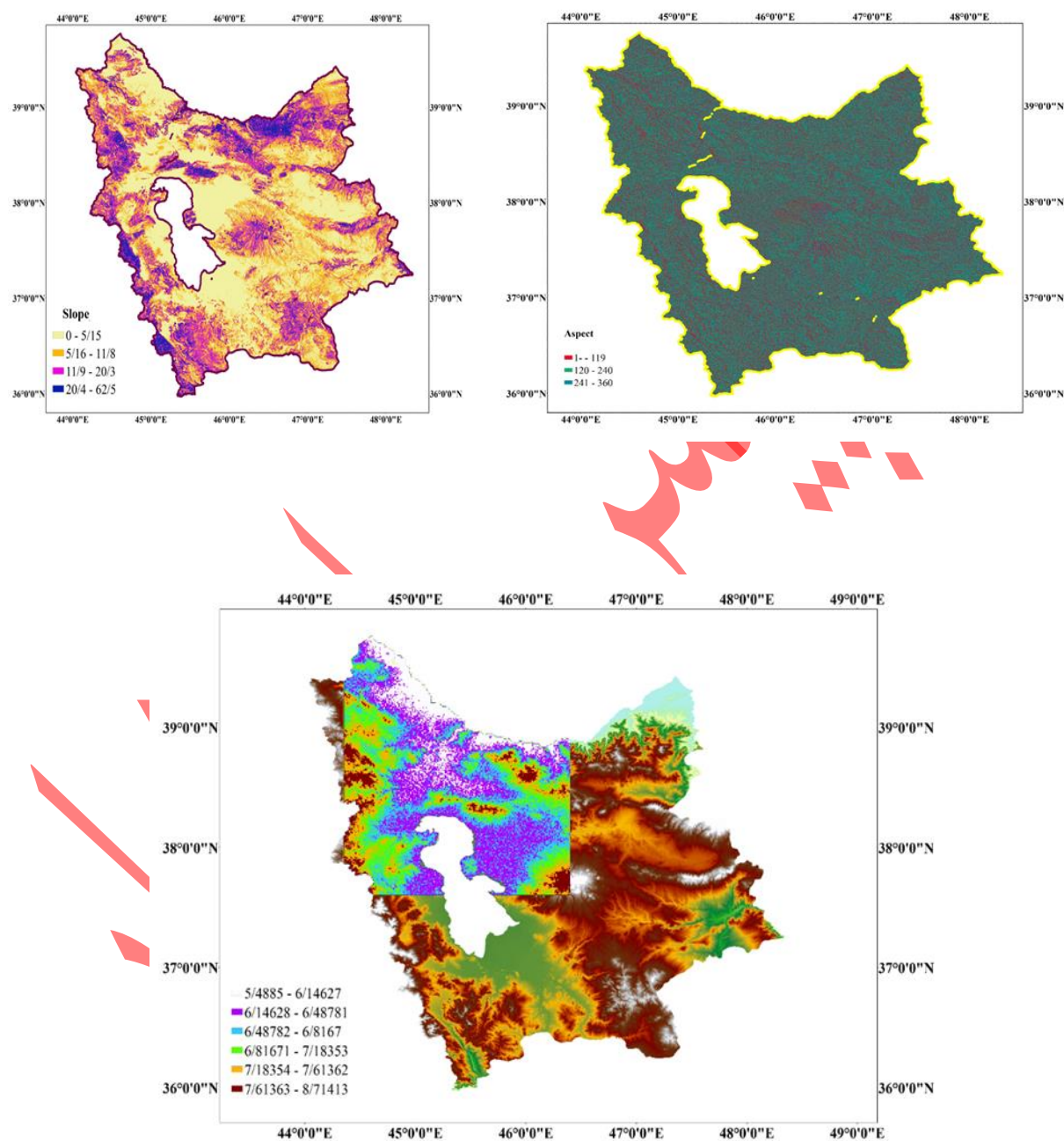
کریجینگ استفاده شد (کریجینگ معمولی و جهانی). از جمله مواردی که روش کریجینگ را تحت تاثیر قرار می‌دهد نوع نیم تغییرنا است. به همین دلیل انواع نیم تغییرنا مورد بررسی قرار گرفتند و عملکرد آنها در نقاط صحت-سنجی مقایسه شدند که در شکل ۵ نشان داده شده است.



شکل ۵- آماره‌های ارزیابی مربوط به بررسی عملکرد انواع نیم تغییرنا (۱، ۲، ۳، ۴، ۵ و ۶ به ترتیب نمایانگر کریجینگ معمولی با نیم تغییرناهای کروی، دایره‌ای، نمایی، گوسی، خطی و کریجینگ جهانی یا کریجینگ روند خطی می‌باشند).

بودند. در صورت بررسی دقیق‌تر شکل ۵ مدل کروی تطابق بهتری در تعیین روند پهنه‌بندی دارد. در رویکرد دیگر از رگرسیون فازی برای پهنه‌بندی pH خاک استفاده شد که در این حالت نیاز به یکسری لایه‌های ورودی است که لایه‌های مدنظر در این تحقیق شامل لایه‌های بافت خاک، شیب، مدل رقومی ارتفاع و جهت شیب است که دو لایه آخر براساس نقشه‌های موجود استخراج شدند (شکل ۶) و در نهایت نقشه نهایی pH براساس لایه‌های اطلاعاتی و رگرسیون فازی تهیه شدند (شکل ۶).

براساس (شکل ۵) مقادیر آماره‌های ارزیابی کریجینگ معمولی با مدل‌های کروی، دایره‌ای و نمایی در حالت بهینه هستند و کریجینگ جهانی (روند خطی) دارای بیشترین خطا می‌باشد. نیم تغییرنا تاثیر چشمگیری در روند پهنه‌بندی دارند. در پژوهش هاشمی و همکاران (۱۳۹۵) مدل نمایی برای متغیرهای کربنات کلسیم، قابلیت هدایت الکتریکی، pH خاک، درصد شن، رطوبت اشباع در منطقه میانکنگی سیستان و در پژوهش فتوحی فیروزآباد و افخمی اردکانی (۱۴۰۱) مدل گوسی در تعیین توزیع مکانی بارش در استان چهارمحال و بختیاری دارای عملکرد بهتری



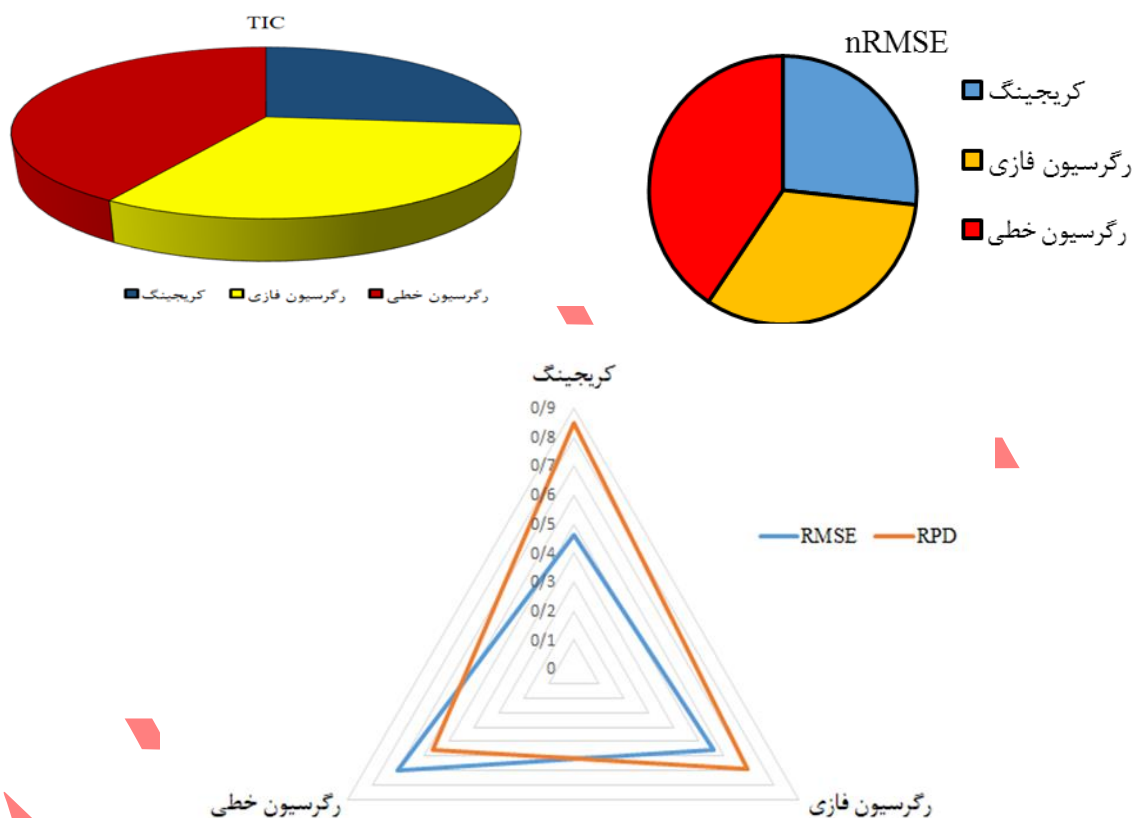
شکل ۶- نقشه شیب و جهت شیب در دو استان مطالعاتی و نقشه پهنه‌بندی pH خاک براساس روش رگرسیون فازی

غربی هستند (افزایش ۳۸/۷۱ درصد). نقشه پهنه‌بندی با روش رگرسیون فازی دارای محدوده‌های متفاوتی از pH است (اسیدی و بازی). در این نقشه نیز مشابه نقشه حاصل از کریجینگ پهنه‌هایی از شمال و قسمت‌های میانی دارای pH اسیدی هستند، به عبارت دیگر بخش‌های زیادی از

براساس نقشه شیب در محدوده مطالعاتی مقادیر شیب در مناطق شمالی و شمال‌شرقی کمتر از مناطق جنوب و جنوب‌غربی هستند. نقشه جهت شیب در محدوده مطالعاتی در بیشتر مناطق دارای مقادیر بالای جهت شیب است. مناطق شمالی دارای مقادیر پایینی از pH نسبت به بخش

محدوده مطالعاتی دارای pH اسیدی می‌باشد. براساس راهنمای دو نقشه پهنه‌بندی کمینه مقدار نقشه رگرسیون فازی نسبت به کریجینگ ۷/۴۱ درصد کاهش داشته است. شکل ۷ مقایسه‌ای از عملکرد رویکردهای مورد استفاده در

نقاط صحت‌سنجی را نشان می‌دهد. برای بررسی بیشتر از ترکیب لایه‌های ورودی (لایه‌های بافت خاک، مدل رقومی ارتفاع، شیب و جهت شیب) با رگرسیون خطی معمولی هم استفاده شد.



شکل ۷- عملکرد رویکردهای مورد استفاده (رگرسیون خطی، فازی و کریجینگ معمولی) برای پهنه‌بندی pH خاک در محدوده مطالعاتی

براساس آماره‌های ارزیابی، رگرسیون خطی دارای عملکرد ضعیفی است، به طوری که مقادیر افزایش RMSE از کریجینگ و رگرسیون فازی به خطی به ترتیب برابر با ۵۱/۸۴ و ۲۵ درصد و میزان افزایش nRMSE به ترتیب برابر با ۵۱/۷۵ و ۲۴/۳۶ درصد و میزان افزایش TIC به ترتیب برابر با ۵۵/۵۵ و ۲۷/۲۷ و میزان کاهش RPD از کریجینگ و رگرسیون فازی به رگرسیون خطی به ترتیب ۳۴/۵۷ و ۲۰ درصد است. اگر مقایسه‌ای بین عملکرد روش رگرسیون فازی و کریجینگ انجام شود، عملکرد کریجینگ دارای دقت بالایی است، به طوری که مقادیر افزایش RMSE از کریجینگ به رگرسیون فازی برابر با ۲۱/۴۷ درصد و میزان افزایش nRMSE برابر با ۲۲/۰۱ درصد و میزان افزایش TIC به ترتیب برابر با ۲۲/۲۲ و میزان کاهش

RPD از کریجینگ به رگرسیون فازی ۱۸/۸۲ درصد است. در تحقیق فتوحی فیروزآباد و افخمی اردکانی (۱۴۰۱) مقایسه رگرسیون خطی و کریجینگ حاکی از عملکرد بهتر کریجینگ بود. در حالت دیگر برای مقایسه عملکرد رگرسیون فازی و کریجینگ قدرمطلق اختلاف مقادیر واقعی و شبیه‌سازی به صورت تک به تک در نقاط صحت-سنجی (۲-۱۸-۲۱-۳۲-۴۰-۲۵-۳۷-۳۶-۵۱-۷-۳۹) که در شکل ۱-د نشان داده شده، محاسبه شدند، کمینه این اختلاف در نقاط ۲-۱۸-۳۲-۷-۳۹ مربوط به روش کریجینگ و در نقاط ۲۱-۴۰-۲۵-۳۷-۳۶-۵۱ مربوط به روش رگرسیون فازی می‌باشد. تعداد نقاط با کمینه خطا در رویکرد کریجینگ و رگرسیون فازی به ترتیب ۵ و ۶ است که اختلاف دو روش کم است، ولی رویکرد رگرسیون فازی

رگرسیون فازی کمینه خطا به ترتیب در دسته سوم، دوم و اول می‌باشد. در مورد دسته سوم یعنی قسمت شرق هر سه رویکرد دارای وجه مشترک هستند، ولی از نظر دسته‌های اول و دوم با هم متفاوت هستند. در حالت دیگر از جدول تجزیه واریانس (جدول ۲) و آزمون LSD (جدول ۳) جهت مقایسه عملکرد سه رویکرد استفاده شد.

دارای تعداد زیادی نقاط با کمینه خطا است. حال اگر این نقاط صحت‌سنجی براساس جهت گروه‌بندی شوند، نقاط ۲ و ۱۸ در جهت شمال و شمال غربی، نقاط ۲۱-۳۲-۴۰-۲۵-۳۷-۳۶ در مرکز و نقاط ۵۱-۷-۳۹ در شرق می‌باشند. در این حال متوسط مقادیر خطا در هر دسته محاسبه شد که در رویکرد کریجینگ کمینه خطا به ترتیب مربوط به دسته سوم، دسته اول و دوم و در رویکرد

جدول ۲- جدول تجزیه واریانس مقایسه رگرسیون فازی، خطی، کریجینگ معمولی با نیم تغییرنا کروی با داده‌های برداشت شده در سطح یک درصد در تعیین pH خاک

مجموع مربعات	درجه آزادی	میانگین مربعات	F	Sig
بین گروه	3	0.58	5.14	0.004
داخل گروه	40	0.11		
کل	43			

جدول ۳- آزمون LSD برای مقایسه نتایج سه رویکرد با داده‌های برداشت شده در سطح یک درصد در تعیین pH خاک

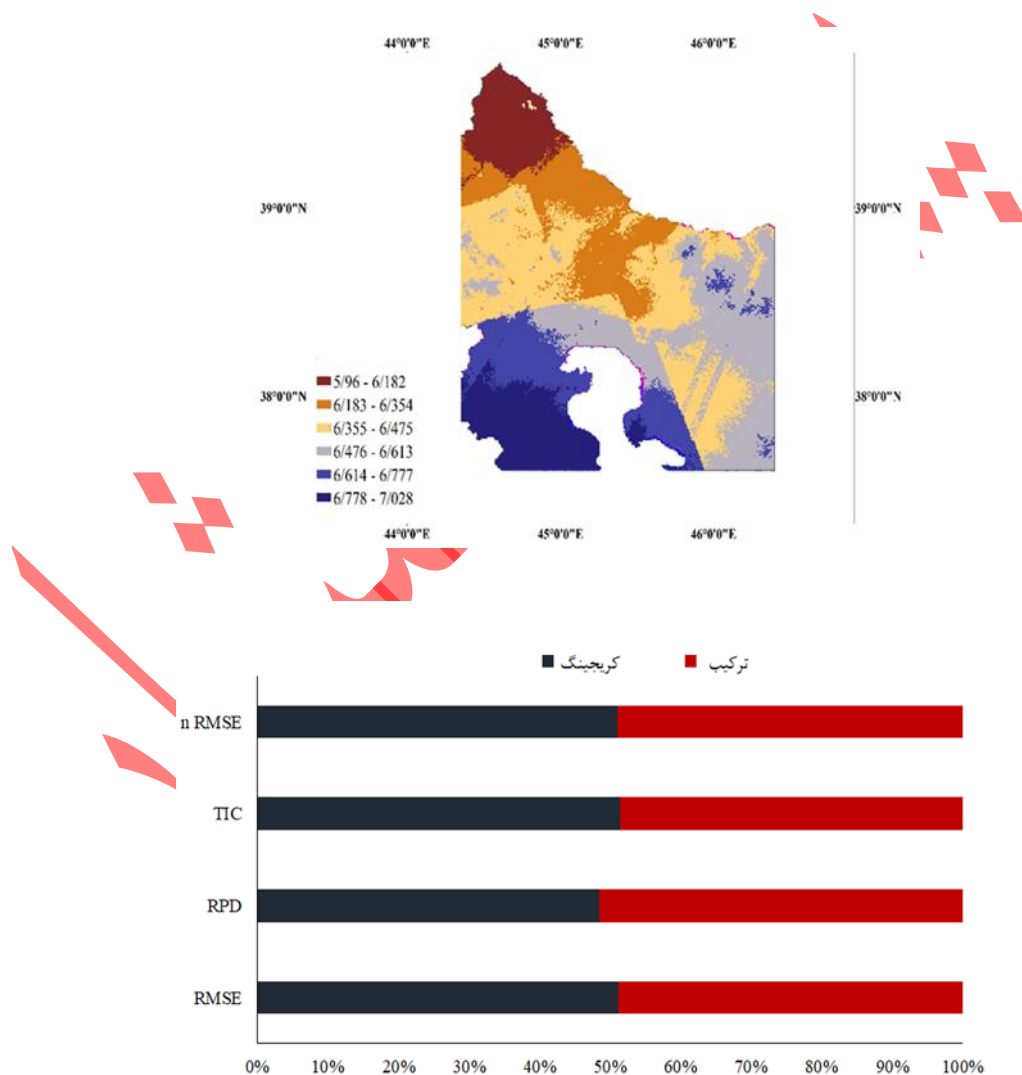
رویکردهای مدنظر	تفاوت میانگین	سطح معنی داری	حد پایین سطح اطمینان	حد بالای سطح اطمینان
داده‌های برداشت شده	کریجینگ معمولی (نیم تغییر نما کروی)	0.208	-0.17	0.59
	خطی	0.55*	0.16	0.94
	فازی	0.21	-0.17	0.6
کریجینگ	خطی	0.34	-0.04	0.73
	فازی	0.008	-0.37	0.39
خطی	فازی	-0.338	-0.72	0.049

رگرسیون خطی استفاده شد که در حالت اول لایه جهت شیب حذف در حالت دوم لایه شیب حذف و در حالت سوم لایه بافت خاک حذف شد. میزان افزایش RMSE از حالتی که تمام لایه‌ها استفاده شد به حالت اول، دوم و سوم به ترتیب برابر با ۱/۴۲، ۲/۲۵ و ۳۱/۴۲ درصد، میزان افزایش nRMSE به ترتیب برابر با ۱/۸۴، ۲/۲۱، ۳۲/۵۳ درصد و میزان افزایش TIC به ترتیب برابر با ۱/۷۸، ۳/۲۱، ۳۵/۷۱ درصد و میزان کاهش RPD به ترتیب برابر با ۱/۷۸، ۱/۴۲، ۲۵ درصد می‌باشد. جهت بررسی رابطه بین pH و ارتفاع ابتدا ۷۳ نقطه به صورت تصادفی انتخاب شدند و مقادیر pH در نقشه کریجینگ و نقشه DEM در این نقاط استخراج شدند. ضریب تغییرات لایه های ورودی و pH

سطح معنی داری (جدول ۲) کمتر از ۰/۰۱ است و حاکی از آن است که بین گروه‌های مورد بررسی اختلاف وجود دارد. حال جهت دانستن دقیق این که بین کدام رویکرد اختلاف معنی داری وجود دارد از آزمون LSD در جدول ۳ استفاده شد. سطح معنی داری بین رویکردهای برداشت شده- کریجینگ و برداشت شده -فازی بزرگتر از ۰/۰۱ است که نشان می‌دهد اختلاف بین رویکردهای داده-های مشاهداتی با کریجینگ و رگرسیون فازی معنی دار نیست. سطح معنی داری داده‌های برداشت شده و رگرسیون خطی کوچکتر از ۰/۰۱ است که حاکی وجود اختلاف معنی دار داده‌های مشاهداتی با رگرسیون خطی است. جهت بررسی تاثیر لایه‌های مورد استفاده در نقشه نهایی از

خاک در نقاط صحت‌سنجی محاسبه شدند که میزان کاهش ضریب تغییرات از جهت شیب، شیب، بافت خاک و مدل رقومی ارتفاع به pH به ترتیب برابر با ۴۷/۹، ۹۶، ۲۲/۹۲، ۱۴/۹۲ درصد است. کمترین و بیشترین ضریب تغییرات به ترتیب مربوط به لایه شیب و pH است. سپس این مقادیر در یک دستگاه محور مختصات ترسیم شدند و شیب خط روند محاسبه شد که مثبت و برابر با ۶/۸۸ بود. براساس اطلاعات نقاط صحت‌سنجی رویکرد کریجینگ و رگرسیون

فازی دارای عملکرد قابل قبولی بودند. دو عامل پیشنهادی می‌تواند دقت رویکرد رگرسیون فازی را افزایش دهد که می‌توان به استفاده از رگرسیون فازی نامتقارن و استفاده از اطلاعات طول و عرض جغرافیایی به عنوان داده‌های ورودی اشاره کرد. در ادامه جهت افزایش دقت پهنه‌بندی از ترکیب دو نقشه حاصل از کریجینگ و رگرسیون فازی استفاده شد که ارزیابی عملکرد روش ترکیبی در نقاط صحت‌سنجی در شکل ۸ آورده شده است.



شکل ۸- نقشه پهنه‌بندی pH خاک با روش ترکیبی و آماره‌های مربوط به مقایسه دو رویکرد ترکیبی و کریجینگ

وضعیت آماره‌ها در حالت ترکیبی بهبود پیدا کرده است، به طوری که میزان کاهش RMSE، TIC، nRMSE از کریجینگ به حالت ترکیبی به ترتیب برابر با

۴/۵۵، ۵/۵۵ و ۴/۳۴ و میزان افزایش RPD برابر با ۵/۸۸ بود. در این حالت نیز پهنه‌های وسیعی از نقشه پهنه‌بندی در محدوده اسیدی است. کمینه مقدار راهنمای نقشه در

نزدیک بهم هستند، ولی مقدار CRM در روش ترکیبی نسبت به دو روش کاهش داشته است (حدود ۵۷/۵۷ درصد).

نتیجه گیری

pH خاک برای کیفیت زمین کشاورزی و رشد محصول بسیار مهم است. در این میان آگاهی در مورد توزیع مکانی pH خاک بخصوص در مناطق بزرگ دارای اهمیت قابل توجهی است. بنابراین در این تحقیق در ابتدا کارایی رویکردهای رگرسیون (فازی و خطی)، کریجینگ مورد بررسی قرار گرفت. براساس اطلاعات نقاط صحت-سنجی رویکرد کریجینگ و رگرسیون فازی دارای عملکرد قابل قبولی بودند. در ادامه جهت افزایش دقت پهنه‌بندی از ترکیب دو نقشه کریجینگ معمولی و رگرسیون فازی استفاده شد که رویکرد ترکیبی منجر به افزایش دقت پهنه‌بندی شد، زیرا که در این حالت اطلاعات از دو نقشه استخراج می‌شود. روش درون یابی براساس مفاهیم خودهمبستگی و فازی براساس مدل‌سازی سیستم‌هایی با پیچیدگی‌های زیاد با در نظر گرفتن عدم قطعیت حاکم بر مسئله است که در حالت ترکیبی از این دو قابلیت در نمایش دقیق پراکندگی مکانی متغیرها استفاده می‌شود. سطح معنی‌داری رویکرد ترکیبی بزرگتر از رویکردهای رگرسیون فازی و کریجینگ معمولی است که منجر به نزدیکی به داده‌های مشاهداتی می‌شود و این مساله دقت روش ترکیبی را نشان می‌دهد. شیب خط برازشی مثبت بود که حاکی از افزایش pH در مناطق مرتفع است. لایه‌های ورودی در رویکرد رگرسیونی اهمیت بالایی در استخراج نقشه خروجی دارند، به طوری که حذف برخی لایه‌ها می‌تواند خطای پهنه‌بندی را به شدت افزایش دهد که در این تحقیق لایه بافت خاک دارای اهمیت بالایی بود. بافت خاک بر میزان نفوذپذیری تاثیر دارد. آبی که از خاک عبور می‌کند مواد مغذی مانند کلسیم و منیزیم را از خاک بیرون می‌برد و آنها را با عناصر اسیدی مانند آلومینیم و آهن جایگزین می‌کند. به همین دلیل خاک‌هایی که در شرایط بارندگی زیاد تشکیل می‌شوند،

حالت ترکیبی نسبت به حالت دو نقشه قبلی افزایش داشته است. اگر نقشه حالت ترکیبی با کریجینگ مقایسه شود، مشاهده می‌شود که حالت گسستگی که در نقشه کریجینگ وجود داشت از بین رفته و حالت پیوستگی در نقشه ترکیبی کاملاً قابل مشاهده است. در نقشه کریجینگ پهنه وسیعی به رنگ زرد است که در محدوده ۶/۱۸۹ تا ۶/۳۷۶ است ولی در نقشه ترکیبی این پهنه دارای حالت‌های مختلفی از pH (۶/۱۸۳) تا ۶/۳۵۴ و ۶/۳۵۵ تا ۶/۴۷۵ و ۶/۴۷۶ تا ۶/۶۱۳) است و در واقع توانسته مقادیر pH را دقیق‌تر پیدا کند. سطح معنی‌داری آزمون LSD در سطح ۱ درصد روش ترکیبی و داده‌های مشاهداتی در نقاط صحت سنجی برابر با ۰/۴۱۹ بود که چون از ۰/۰۱ بزرگتر است حاکی از عدم وجود اختلاف معنی‌داری بین روش ترکیبی و داده‌های مشاهداتی است. اگر مقایسه‌ای بین سطح معنی‌داری رویکرد رگرسیون فازی و کریجینگ (جدول ۳ با داده‌های مشاهداتی) با سطح معنی‌داری رویکرد ترکیبی انجام شود مشاهده می‌شود که سطح معنی‌داری از رویکرد ترکیبی به کریجینگ و فازی به ترتیب ۶۳/۲۴ و ۶۷ درصد کاهش داشته است، یعنی سطح معنی‌داری رویکرد ترکیبی بزرگتر از رویکردهای دیگر است و به داده‌های مشاهداتی نزدیکتر هستند و این مساله دقت روش ترکیبی را نشان می‌دهد. در حالت دیگر جهت مقایسه روش‌های پهنه‌بندی، کمینه و بیشینه اعداد در سمت چپ در راهنمای هر نقشه در نظر گرفته می‌شود و سپس قدر مطلق اختلاف این دو عدد در هر نقشه محاسبه می‌شود که بیشترین مربوط به رگرسیون فازی بود، به طوری که میزان کاهش این آماره از رویکرد رگرسیون فازی به کریجینگ و ترکیبی به ترتیب برابر با ۵۹/۹ و ۶۱/۵ درصد می‌باشد.

در حالت دیگر برای مقایسه روش‌های مورد استفاده از آماره CRM استفاده شد که به ترتیب برای روش‌های کریجینگ، رگرسیون فازی و ترکیبی به ترتیب برابر با ۰/۰۳۲، ۰/۰۳۳ - و ۰/۰۱۴ - است. علامت منفی نشان دهنده کم برآورد در هر سه روش می‌باشد. مقادیر CRM در دو روش کریجینگ و رگرسیون فازی خیلی

اسیدی تر هستند. نقشه پهنه‌بندی pH خاک همراه با اطلاعات مکانی از pH خاک می‌تواند در مکان‌یابی کشت گیاهان در مناطق مختلف کمک شایانی داشته باشد.

فهرست منابع

۱. بیات، جواد، هاشمی، سید حسین، خوشبخت، کورس، و دیهیم فرد، رضا، ۱۳۹۵. پهنه‌بندی عناصر غذایی (نیترات و فسفات)، کربن آلی، هدایت الکتریکی و pH خاک در اراضی جنوب شهر تهران. فصلنامه علوم محیطی، ۱۴(۲)، صص. ۱-۱۲.
۲. رحیم‌پور، فاطمه، علی عباس پور، رحیم، ۱۳۹۳. پهنه‌بندی آلودگی فلزات سنگین خاک با استفاده از روش-های کریجینگ و توابع پایه شعاعی (مطالعه موردی: شهرستان هریس). فصلنامه علمی-پژوهشی اطلاعات جغرافیایی، ۲۳(۹۱)، صص. ۵۵-۶۷.
۳. شعبانی، حدیثه، دلاور، محمد امیر، صفری، یاسر، علمداری، پریسا، ۱۳۹۸. پهنه بندی و تحلیل مکانی برخی خصوصیات خاک در اراضی دانشگاه زنجان. تحقیقات کاربردی خاک، ۷(۴)، صص ۱۶۴-۱۸۷.
۴. طاعتی، عباس، سرمدیان، فریدون، متقیان، حمید رضا، و موسوی، سید روح الله، ۱۳۹۹. پهنه‌بندی برخی ویژگی‌های سطحی و عمقی پروفیل خاک با استفاده از تکنیک زمین آمار در بخشی از اراضی دشت قزوین. فصلنامه انسان و محیط زیست، ۵۲، صص ۶۷-۸۱.
۵. عباسی، طاهره و شمس‌نیا سید امیر، ۱۳۹۳. ارزیابی مقایسه‌ای سیستم استنتاج فازی-عصبی (ANFIS) و روش‌های متداول درون‌یابی در تخمین بارش در استان فارس. نشریه آبیاری و زهکشی ایران، ۳(۱۱)، صص ۴۴۸-۴۶۰.
۶. فتوحی فیروز آباد، فرزانه و افخمی اردکانی، حمیده، ۱۴۰۱. ارزیابی و مقایسه روش‌های درون‌یابی و رگرسیون خطی جهت تعیین توزیع مکانی بارش در استان چهارمحال و بختیاری. نشریه محیط زیست و مهندسی آب، ۸(۱)، صص ۲۲۱-۲۳۲.
۷. کشتکار، سمیرا، جعفری، اعظم و فرپور، محمد هادی، ۱۳۹۷. تاثیر عوامل محیطی و خاکساز بر تنوع خاک های مناطق کرمان و لاله زار. نشریه مدیریت خاک و تولید پایدار، ۸(۱)، صص ۸۹-۱۰۶.
۸. کوره‌پزان دزفولی، امین، ۱۳۸۴. اصول تئوری مجموعه های فازی و کاربردهای آن در مدل‌سازی مسایل مهندسی منابع آب، چاپ اول. انتشارات جهاد دانشگاهی واحد صنعتی امیرکبیر، صص ۱۳۷-۱۵۳.
۹. نوروزی، سارا، سهرابی، اکبر، خاوازی، کاظم، متین فر، حمیدرضا، ۱۳۹۷. تاثیر مصرف گوگرد بر روند تغییرات pH و قابلیت جذب فسفر خاک در گندم (*Triticum aestivum* L.)، زیست شناسی خاک، ۶(۱)، صص ۲۹-۴۱.
۱۰. هاشمی، مسعود، غلامعلی‌زاده آهنگر، احمد، بامری، ابوالفضل، سارانی، فریدون، و حجازی زاده، ابوالفضل، ۱۳۹۵. شناسایی و پهنه‌بندی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک با استفاده از روش‌های زمین‌آماري در GIS (مورد مطالعاتی: منطقه میانکنگی سیستان). نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)، ۳۰(۲)، صص ۴۴۳-۴۵۸.

11. Barrow, N.J. and Hartemink, A.E., 2023. The effects of pH on nutrient availability depend on both soils and plants. *Plant and Soil*, 487(1), pp.21-37.

12. Carter, M.R. and Gregorich, E.G., 2007. Soil sampling and methods of analysis. CRC press.
13. Fornasier, E., Fornasier, F. and Di Marco, V., 2018. Spectrophotometric methods for the measurement of soil pH: A reappraisal. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 204, pp.113-118.
14. Hilal, A., Bangroo, S.A., Kirmani, N.A., Wani, J.A., Biswas, A., Bhat, M.I., Farooq, K., Bashir, O. and Shah, T.I., 2024. Geostatistical modeling—a tool for predictive soil mapping. In *Remote Sensing in Precision Agriculture*, pp. 389-418. Academic Press.
15. Gia PHam, T., Kappas, M., Van Huynh, C. and Hoang Khanh Nguyen, L., 2019. Application of ordinary kriging and regression kriging method for soil properties mapping in hilly region of Central Vietnam. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 8(3), pp.147.
16. Odhiambo, B.O., Kenduiywo, B.K. and Were, K., 2020. Spatial prediction and mapping of soil pH across a tropical afro-montane landscape. *Applied Geography*, 114, pp.102129.
17. Powell, B., McBratney, A.B. and MacLeod, D.A., 1991. The application of fuzzy classification to soil pH profiles in the Lockyer Valley, Queensland, Australia. *Catena*, 18(3-4), pp.409-420.
18. Yang, H., Zhu, Z., Li, C. and Li, R., 2020. A novel combined forecasting system for air pollutants concentration based on fuzzy theory and optimization of aggregation weight. *Applied Soft Computing*, 87, pp.105972.
19. Zeraatpisheh, M., Bakhshandeh, E., Emadi, M., Li, T. and Xu, M., 2020. Integration of PCA and fuzzy clustering for delineation of soil management zones and cost-efficiency analysis in a citrus plantation. *Sustainability*, 12(14), pp.5809.
20. Zhang, Y., Ye, H., Liu, R., Tang, M., Nie, C., Han, X., Zhao, X., Wei, P. and Wen, F., 2024. Spatial and Temporal Variations of Soil pH in Farmland in Xinjiang, China over the Past Decade. *Agriculture*, 14(7), pp.1048.
21. Zare Mehrjardi, M., Taghizadeh-Mehrjardi, R. and Akbarzadeh, A., 2010. Evaluation of geostatistical techniques for mapping spatial distribution of soil pH, salinity and plant cover affected by environmental factors in Southern Iran. *Notulae Scientia Biologicae*, 2(4), pp.92-103.