

تغییرات مکانی هدایت هیدرولیکی اشباع و مقاومت فروری خاک در اراضی متأثر از نمک اطراف دریاچه ارومیه

شکراله اصغری^{۱*} - محمود شهابی^۲

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۶/۰۵

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۹/۲۹

چکیده

هدف از این پژوهش مطالعه تغییرات مکانی هدایت هیدرولیکی اشباع (Ks) و مقاومت فروری (PR) در خاک‌های متأثر از نمک اطراف دریاچه ارومیه بود. نمونه‌های خاک از دو کاربری کشاورزی (۴۹ نمونه) و بایر (۵۱ نمونه) به هم چسبیده (۸۰ ha) برای تعیین برخی متغیرهای فیزیکی و شیمیایی به صورت شبکه‌های منظم ۱۰۰×۱۰۰ m در بخش شندآباد منطقه شبستر برداشته شدند. متغیر Ks به روش بار ثابت یا افتان در آزمایشگاه و PR به صورت درجا در صحرا اندازه‌گیری شد. از روش‌های درون‌یابی کریجینگ معمولی (OK) و وزن‌دهی عکس فاصله (IDW) برای تحلیل تغییرات مکانی متغیرهای خاک استفاده گردید. ضریب همبستگی منفی و معنی‌دار بین Ks با رس، جرم مخصوص ظاهری (BD)، SAR و EC و مثبت و معنی‌دار بین Ks با شن، پایداری خاکدانه و کربن آلی یافت شد. این ضریب بین PR با BD مثبت و با رطوبت خاک مزرعه، منفی به‌دست آمد. متغیر Ks دارای بالاترین ضریب تغییرات (۱۵۵/۶ درصد) در کاربری بایر و PR دارای کمترین دامنه تأثیر (۳۳۵ m) در بین متغیرهای خاک بود. مدل نیم-تغییرنمای کروی و نمایی با وابستگی مکانی قوی به‌ترتیب برای Ks و PR به‌دست آمد. براساس آماره‌های ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) و ضریب تطابق (CCC)، بین دو روش درون‌یابی در برآورد Ks تفاوتی مشاهده نشد ولی در تخمین PR، روش OK به‌علت داشتن RMSE کمتر و CCC بیشتر در مقایسه با روش IDW (توان ۱ و ۲) دارای دقت بالاتری بود. نقشه تغییرات مکانی نشان داد از کاربری کشاورزی به سمت کاربری بایر بر میزان BD و PR افزوده و از میزان Ks کاسته شد.

واژه‌های کلیدی: خاک‌های شور و سدیمی، دشت شبستر، زمین‌آمار، ویژگی‌های فیزیکی

مقدمه

و شیمیایی، هیدرولیکی و مکانیکی خاک در اراضی متأثر از نمک به علت غلظت بالای املاح به‌ویژه سدیم از وضعیت مطلوبی برخوردار نیست. به‌طور مثال، تأثیر منفی سدیم بر پایداری ساختمان خاک توسط تاجیک (۲۹) و یزدانی و همکاران (۳۲) در مناطق مختلف اقلیمی ایران گزارش گردیده است.

توزیع مکانی ویژگی‌های فیزیکی، هیدرولیکی و مکانیکی خاک بر رفتارهای هیدرودینامیکی و انتقال آب و املاح در خاک مؤثر است. تغییرات مکانی ویژگی‌های خاک متأثر از عوامل ذاتی مانند زمین-شناسی و شکل‌های اراضی و نیز عوامل غیرذاتی مانند عبور و مرور انسان، دام و ماشین، مدیریت کشت و کار و کاربری زمین می‌باشد که چگونگی تأثیر این عوامل بر خصوصیات مذکور از پهنه‌ای به پهنه مطالعاتی دیگر متفاوت است (۱ و ۲۴). براین اساس بررسی تغییرات مکانی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی، هیدرولیکی و مکانیکی خاک به‌ویژه در اراضی شور و سدیمی ضرورت دارد.

شوری خاک یکی از مشکلات بسیار جدی در زمینه تولید محصولات آبی از جنبه کشاورزی پایدار در مناطق خشک و نیمه-خشک جهان محسوب می‌شود. در حدود ۱۰۸ × ۹/۵۵ هکتار از خاک‌های جهان متأثر از شوری اولیه بوده در حالی که شوری ثانویه تقریباً ۱۰۷ × ۷/۷ هکتار از خاک‌های جهان را تحت تأثیر قرار می‌دهد که ۵۸ درصد آن در نواحی کشت آبی قرار دارد (۲۸). کیفیت فیزیکی

۱- دانشیار گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی

* نویسنده مسئول: (Email: shokrollah.asghari@gmail.com)

۲- دانش‌آموخته دکتری گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز

مکانی متوسط را برای PR در منطقه مورد مطالعه گزارش کردند. اراضی حاصلخیز بخش شندآباد منطقه شیبستر در معرض تهدید نمک‌های بستر خشکیده دریاچه ارومیه قرار دارند. با عنایت به این که، غلظت بالای سدیم موجب تخریب ساختمان خاک گردیده و تأثیر منفی بر هدایت هیدرولیکی و مقاومت فروری خاک می‌گذارد، اطلاع از وضعیت تغییرات مکانی این ویژگی‌ها در اراضی بایر و کشاورزی متأثر از نمک دریاچه ارومیه، از نظر مدیریت پایدار منابع آب و خاک در منطقه مورد مطالعه حائز اهمیت فراوان است. اهداف اصلی این پژوهش عبارت بودند از: (۱) تهیه نقشه توزیع مکانی Ks و PR در کاربری‌های بایر و کشاورزی به هم چسبیده اراضی متأثر از نمک اطراف دریاچه ارومیه. (۲) بررسی همبستگی بین Ks و PR با سایر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک در منطقه مورد مطالعه. (۳) تعیین پارامترهای نیم‌تغییرنا مثل مدل نیم‌تغییرنا، کلاس همبستگی مکانی و دامنه تأثیر متغیرهای خاک. (۴) مقایسه دقت روش‌های کریجینگ و وزن‌دهی عکس فاصله در درون‌یابی متغیرهای خاک.

مواد و روش‌ها

این پژوهش در شمال غرب دریاچه ارومیه واقع در محدوده اراضی کشاورزی شهر شندآباد با فاصله حدود ۱۵ کیلومتر از شهرستان شیبستر و چسبیده به اراضی بایر حاشیه خشکیده بستر دریاچه ارومیه (مختصات جغرافیایی ۴۵ درجه و ۳۶ دقیقه و ۳۴ ثانیه تا ۴۵ درجه و ۳۶ دقیقه و ۳۸ ثانیه طول شرقی و ۲۸ درجه و ۶ دقیقه و ۳۷ ثانیه تا ۳۸ درجه و ۷ دقیقه و ۴۲ ثانیه عرض شمالی) انجام شد (شکل ۱). برای این منظور، دو کاربری چسبیده به هم به مساحت ۸۰ هکتار (۲۰۰×۴۰۰) شامل اراضی بایر و اراضی کشاورزی (غالباً زیر کشت صیفی‌جات و درختان هلو) انتخاب گردید سپس ۵۱ نمونه از کاربری بایر و ۴۹ نمونه از کاربری کشاورزی از عمق ۰ تا ۱۰ cm خاک در قالب شبکه منظم ۱۰×۱۰ m (شکل ۱) با ثبت مختصات جغرافیایی هر نقطه در فروردین (کاربری بایر) و آذر (کاربری کشاورزی) سال ۱۳۹۶ برداشته شد. نمونه‌برداری خاک در هر دو کاربری به صورت دست‌خورده با بیلچه و دست‌نخورده با استفاده از سیلندرهای استیل به قطر و ارتفاع ۵ cm انجام گرفت.

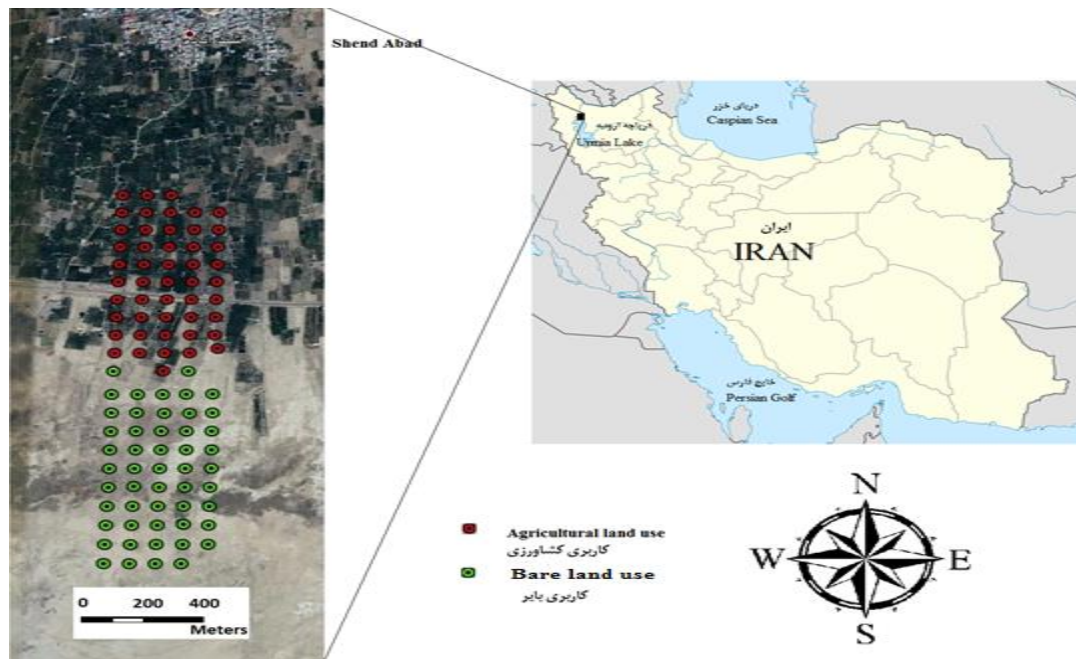
کربن آلی به روش اکسیداسیون تر (۲۶)، هدایت الکتریکی (EC) و نسبت جذب سدیم (SAR) در عصاره ۱ به ۲/۵ (۱۰ و ۱۵)، کلاس بافت خاک به روش هیدرومتری ۴ قرائته (۱۲)، میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها (MWD) در خاکدانه‌های کوچکتر از ۴/۷۵ mm به روش الک تر (۳۳) با الک‌های به قطر روزه ۲، ۱، ۰/۵، ۰/۲۵ و ۰/۱۰۶ (دامنه، شدت و مدت نوسان به ترتیب ۳۷ میلی‌متر، ۳۰ دور در دقیقه و ۵ دقیقه) اندازه‌گیری شد. جرم مخصوص ظاهری (BD) به روش نمونه دست‌نخورده (۵) و رطوبت مزرعه (FWC) به روش وزنی

اندازه‌گیری هدایت هیدرولیکی اشباع (Ks) کاری دشوار و پرهزینه می‌باشد. از سوی دیگر، این پارامتر بیشترین تغییرات آماری و زمین آماری را در بین ویژگی‌های فیزیکی و هیدرولیکی خاک دارد (۲۵). بنابراین برآورد مکانی چنین ویژگی‌هایی با دقت قابل قبول، از اهمیت خاصی برخوردار است. اقبال و همکاران (۱۸) بیشترین مقدار اثر قطعه‌ای را برای Ks و جرم مخصوص ظاهری (BD) در لایه سطحی خاک گزارش کردند؛ آن‌ها همچنین مقادیر دامنه‌تأثیر را برای Ks، BD، شن و رس به ترتیب ۹۴، ۱۰۶، ۲۱۸ و ۴۲۱ متر به دست آورده و نیم‌تغییرنمای متغیرهای مذکور را به مدل نمایی برازش دادند. نتایج مطالعه متقیان و همکاران (۲۴) بر روی ۱۱۱ نمونه خاک برداشته شده از حوزه آبخیز مرغملک واقع در استان چهارمحال بختیاری نشان داد که بیشترین ضریب تغییرات در بین متغیرهای فیزیکی خاک، برای سرعت نفوذ به میزان ۷۲ درصد و Ks به میزان ۶۷ درصد و کمترین ضریب تغییرات برای BD به میزان ۸ درصد به دست آمد. همچنین مقادیر ضریب همبستگی پیرسون بین Ks با BD و رس به ترتیب ۰/۴۰ و -۰/۳۱ - محاسبه گردید. کلیشادی و همکاران (۱۹) اثرات سیستم‌های مدیریتی کاربری اراضی بر ویژگی‌های هیدرولیکی و نفوذ غیراشباع خاک در مکش‌های ۲، ۵، ۱۰ و ۱۵ cm را در منطقه کوه‌رنگ زاگرس مرکزی مطالعه کردند. نتایج آن‌ها نشان داد مقادیر متوسط هدایت هیدرولیکی و شدت جریان غیراشباع خاک و نیز ضریب جذبی مدل نفوذ فیلپ (Sp) در کاربری مرتعی به دلیل داشتن ماده آلی کم و نیز فشردگی ناشی از چرای بی‌رویه دام به‌طور معنی‌دار کمتر از کاربری زراعی بود. افضل‌ی مقدم و همکاران (۱) نقشه توزیع مکانی Ks را به روش کریجینگ درون‌یابی نموده و مدل گوسی را به نیم‌تغییرنمای Ks در منطقه خضرآباد جیرفت برازش دادند.

مقاومت فروری (PR) یکی از ویژگی‌های مکانیکی پویای خاک محسوب می‌شود و اطلاع از وضعیت آن از نظر عملیات خاک‌ورزی، رشد گیاه و فعالیت میکروبی خاک حائز اهمیت است. اگر مقاومت مکانیکی خاک از ۲ مگاپاسکال فراتر رود به علت افت شدید تهویه خاک موجب توقف رشد ریشه گیاه خواهد شد (۳۰). کلیک و همکاران (۲۰) در یک پژوهش مزرعه‌ای بیان کردند تغییرات مکانی PR، تحت تأثیر رس، شن و BD در خاک لوم رسی و نیز رطوبت خاک مزرعه (FWC) و BD در خاک لوم قرار گرفت. باریک و همکاران (۴) گزارش کردند اثرات معنی‌دار پایداری خاکدانه (AS)، FWC، BD و تخلخل کل (TP) بر PR در عمق ۰ تا ۱۰ cm بسیار مشهودتر از اعماق ۱۰ تا ۲۰ و ۲۰ تا ۳۰ cm بود. همچنین تردد ادوات کشاورزی موجب افزایش BD (۸/۶ درصد)، PR (۴۳/۳ درصد) و FWC (۱۲/۷ درصد) و کاهش AS (۲۲/۶ درصد) و TP (۸/۹ درصد) گردید. اصغری و همکاران (۳) در ۱۰۵ نمونه خاک برداشته‌شده از دشت اردبیل بین FWC و PR، همبستگی خطی منفی و معنی‌دار ($r = -0.51^{**}$) به دست آورده و مدل نیم‌تغییرنمای گوسی و وابستگی

گردید (۲۳) و همزمان نمونه‌های خاک لازم برای سنجش رطوبت خاک (سیلندرها) برداشته شد. هدایت هیدرولیکی اشباع خاک (Ks) به روش بار ثابت (کاربری کشاورزی) و بار افتان (کاربری بایر) در نمونه‌های دست‌نخورده (سیلندرها) اندازه‌گیری شد (۲۱).

(۱۱) هر دو در سیلندره‌های استیل اشاره شده در بالا تعیین گردید. جرم مخصوص حقیقی (PD) به روش پیکنومتر (۶) و تخلخل کل از روی داده‌های BD و PD (۹) به دست آمد. مقاومت فروری خاک (عمق ۰ تا ۱۰ cm) به صورت درجا با استفاده از یک فروسنج مخروطی مدل عقربه‌ای ساخت شرکت اکجل کمپ هلند در سه تکرار در صحرا تعیین



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی و نقشه‌ی توزیع نقاط نمونه‌برداری در تصویر ماهواره‌ای منطقه مورد مطالعه.

Figure1- Geographic position and distribution map of sampled points in satellite image of the studied area.

معینی اضافه شده سپس به حد ثابتی می‌رسد که این فاصله را دامنه تأثیر و مقدار نیم تغییرنا که ثابت شده را حد آستانه گویند (۱۳). بهترین مدل برازش یافته به نیم‌تغییرنا (گوسی، کروی، نمایی و خطی) با در نظر گرفتن کمترین مجموع مربعات باقی‌مانده (RSS) و بیشترین ضریب تبیین (R2) انتخاب گردید. در این پژوهش از روش‌های درون‌یابی کریجینگ معمولی (OK) و وزن‌دهی عکس فاصله (IDW) با توان ۱ و ۲ جهت بررسی تغییرات مکانی متغیرها استفاده شد. نقشه تغییرات مکانی متغیرهای خاک با استفاده از نرم‌افزار Arc GIS 9.3 ترسیم شد.

برای ارزیابی و انتخاب بهترین روش درون‌یابی، از محک‌های آماری ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)، میانگین خطا (ME) و میانگین قدر مطلق خطا (MAE) استفاده شد (۱۷) همچنین ضریب تطابق ۱ (CCC) برای ارزیابی میزان مطابقت مقادیر اندازه‌گیری و برآورد شده Ks و PR با استفاده از معادله لین (۲۲) محاسبه گردید:

پس از اطمینان از نرمال بودن توزیع داده‌ها با آزمون کولموگوروف - اسمیرنوف، پارامترهای آمار کلاسیک و ضریب همبستگی پیرسون بین داده‌ها با نرم‌افزار SPSS 16 محاسبه گردید. تجزیه‌های نیم تغییرنا برای ارزیابی توزیع تغییرات مکانی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی مورد مطالعه، Ks و PR با استفاده از نرم افزار GS+ (۱۴) انجام گرفت. نیم‌تغییرنمای تجربی تابعی است که به صورت زیر محاسبه می‌شود (۱۳):

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

در معادله ۱، N(h) تعداد جفت نمونه‌های خاک در فاصله h از یکدیگر، Z(x_i) مقدار اندازه‌گیری شده و Z(x_i + h) مقدار اندازه‌گیری شده متغیر موردنظر که به فاصله h از Z(x_i) قرار دارد، است. هر نیم تغییرنا از سه پارامتر اثر قطعه‌ای، دامنه تأثیر و حد آستانه یا سقف تشکیل شده است. مقدار نیم‌تغییرنا به ازای فاصله صفر (h=0) را اثر قطعه‌ای می‌گویند که معمولاً ناشی از وجود مؤلفه‌های تصادفی در توزیع متغیر، خطاهای نمونه‌برداری، آماده‌سازی، آزمایشگاهی و آنالیز است. با افزایش h مقدار نیم تغییرنا تا فاصله

1- Concordance correlation coefficient

بنابراین مطابق جدول ۱، تغییرپذیری Ks، PR، کربن آلی، EC و SAR (هر دو کاربری)، رطوبت خاک مزرعه (کاربری کشاورزی) و MWD (کاربری بایر) در منطقه مورد مطالعه بالا بود. تغییرات بالای این متغیرها را می‌توان به روش‌های مدیریتی اعمال شده از قبیل استفاده از مالچ شن و سنگریزه، افزودن کود دامی و نیز نوع گیاه کشت شده در کاربری کشاورزی و نیز دوری و نزدیکی به املاح و رسوبات بستر خشکیده دریاچه ارومیه در کاربری بایر نسبت داد. مقادیر بالای CV برای Ks توسط محمدی و متقیان (۲۵) به میزان ۶۷ درصد در حوزه آبخیز مرغملک و توسط افضل‌ی مقدم و همکاران (۱) به میزان ۴۹۴ درصد در کاربری باغی و ۹۶ درصد در کاربری بایر اراضی منطقه خضرآباد جیرفت گزارش شده است. اصغری و همکاران (۳) نیز مقدار CV را برای PR در اراضی دشت اردبیل برابر با ۴۹/۹ درصد به دست آوردند.

ضرایب همبستگی پیرسون (r) بین متغیرهای خاک در جدول ۲ آورده شده است؛ مشاهده می‌شود همبستگی منفی و معنی‌دار بین Ks با سیلت، رس، EC، SAR، BD و PD یافت شد در حالی که همبستگی مثبت و معنی‌دار بین Ks با شن، کربن آلی، TP، MWD و FWC به دست آمد. افزایش شن و کاهش رس از طریق تغییر در توزیع اندازه منافذ خاک (افزایش سهم منافذ درشت در مقایسه با منافذ ریز و متوسط) موجب افزایش هدایت هیدرولیکی اشباع خاک می‌گردد (۱۶). علت همبستگی منفی Ks با EC را شاید بتوان به سهم بالای سدیم در مقایسه با سایر کاتیون‌ها مثل کلسیم و منیزیم و در نتیجه پراکنش ذرات خاک نسبت داد؛ بالا بودن میزان SAR نیز مؤید این موضوع است. با افزایش SAR به علت بالا رفتن نسبت غلظت سدیم به مجموع کلسیم و منیزیم در محلول خاک، پایداری خاکدانه‌ها کاهش و منافذ خاک مسدود شده و نهایتاً موجب تنزل Ks می‌گردد؛ همبستگی منفی و معنی‌دار بین SAR با MWD (r=-0.57**) نیز مؤید این موضوع می‌باشد (جدول ۲). همچنین مشاهده می‌شود با افزایش جرم مخصوص ظاهری و کاهش تخلخل کل به دلیل کاهش حجم کل منافذ خاک (۳۰)، از قابلیت مسیر برای هدایت آب و املاح (Ks) کاسته شده در حالی که با افزایش ماده آلی به دلیل افزایش MWD بر میزان Ks افزوده شده است؛ همبستگی مثبت MWD با OC (r=0.58**) نیز این موضوع را تأیید می‌کند (جدول ۲). در منطقه مورد مطالعه، با افزایش شن از کاربری بایر به سمت کشاورزی، کربن آلی نیز افزایش یافت لذا موجب کاهش BD و افزایش MWD گردید (۲)؛ همبستگی منفی شن با BD (جدول ۲) نیز در این راستا قابل توجیه است. به عبارت دیگر، نقش مثبت کربن آلی بر نقش منفی شن در فرایند خاکدانه‌سازی پیشی گرفته است. همچنین مشاهده می‌شود با افزایش هدایت الکتریکی، SAR نیز افزایش پیدا کرد لذا MWD به علت نقش منفی سدیم کاهش یافت (جدول ۲).

$$\rho_c = \frac{2\rho\sigma_x\sigma_y}{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + (\mu_x - \mu_y)^2} \quad (2)$$

که در آن ρ_c ضریب تطابق (CCC) برآورد شده، ρ ضریب همبستگی پیرسون بین مقادیر اندازه‌گیری و برآورد شده متغیر، σ_x و σ_y به ترتیب واریانس مقادیر اندازه‌گیری و برآورد شده متغیر، μ_x و μ_y به ترتیب میانگین مقادیر اندازه‌گیری و برآورد شده متغیر می‌باشد. آماره CCC میزان درجه‌ای را نشان می‌دهد که جفت مقادیر اندازه‌گیری و برآورد شده متغیر در اطراف خط ۴۵ درجه از مبدأ قرار می‌گیرند.

نتایج و بحث

آماره‌های توصیفی ویژگی‌های خاک

توصیف آماری متغیرهای اندازه‌گیری شده در خاک منطقه مورد مطالعه به تفکیک کاربری اراضی بایر و کشاورزی در جدول ۱ آورده شده است. با توجه به جدول ۱ مشاهده می‌شود میانگین EC و SAR (عصاره ۱ به ۵) به ترتیب از ۰/۹۳ dS m⁻¹ و ۰/۵ (meq l⁻¹) ۱/۱۵ در کاربری کشاورزی به ۲/۲۳ dS m⁻¹ و ۰/۵ (meq l⁻¹) ۱۴/۷۸ در کاربری بایر به دلیل نزدیکی به بستر خشکیده دریاچه ارومیه افزایش یافته است لذا براساس تقسیم‌بندی ریچارد (۲۷) خاک‌های منطقه مورد مطالعه (کاربری بایر) در گروه خاک‌های شور و سدیمی قرار می‌گیرند. میانگین کربن آلی در کاربری کشاورزی (۲/۰۸٪) بیشتر از کاربری بایر (۱/۵٪) می‌باشد که دلیل آن را می‌توان به استفاده کشاورزان از کودهای دامی و نیز کشت گیاهان مختلف زراعی و باغی در کاربری کشاورزی نسبت داد؛ این موضوع موجب گردیده است میانگین MWD در کاربری کشاورزی (۰/۹۰ mm) بزرگتر از کاربری بایر (۰/۵۱ mm) باشد (جدول ۱). براساس مثلث بافت آمریکایی، خاک‌های مورد مطالعه دارای کلاس بافت لوم سیلتی (n=۲۲)، لوم (n=۱۳)، لوم رسی سیلتی (n=۷)، رسی سیلتی (n=۷) و رسی (n=۲) در کاربری بایر و نیز لوم شنی (n=۳۹)، لوم (n=۷) و شن لومی (n=۳) در کاربری کشاورزی بودند (شکل ۲). بنابراین خاک‌های واقع در کاربری کشاورزی به علت قرارگیری در دشت دامنه‌ای مشرف به کوه میشو داغ و نیز کاربرد مالچ شن و سنگریزه توسط کشاورزان محلی به منظور سهولت جوانه‌زنی صیفی‌جات، عمدتاً درشت‌بافت بوده در حالی که خاک‌های کاربری بایر به دلیل متأثر شدن از رسوبات دریاچه ارومیه، عمدتاً متوسط تا ریزبافت هستند.

طبقه‌بندی ویلینگ و درس (۳۱) برای ارزیابی تغییرات ویژگی‌های خاک براساس ضریب تغییرات (CV) آن‌ها مورد استفاده قرار گرفت: ۱) اگر CV کوچکتر از ۱۵ درصد باشد متغیر تغییرپذیری کمی دارد، ۲) اگر CV بین ۱۵ و ۳۵ درصد باشد متغیر تغییرپذیری متوسط دارد، ۳) اگر CV بالای ۳۵ درصد باشد متغیر تغییرپذیری بالایی دارد.

جدول ۲- ضریب همبستگی پیرسون (r) بین متغیرهای مورد مطالعه (n=100).
Table 2- Pearson correlation coefficient (r) between studied variables (n=100).

متغیر Variable	Ks	PR	FWC	BD	PD	TP	MWD	Sand	Silt	Clay	OC	EC	SAR
Ks	1	0.19	0.26**	0.52**	0.53**	0.31**	0.59**	0.60**	0.60**	0.43**	0.36**	-0.22*	0.35**
PR		1	0.32**	0.21*	0.04	-0.21*	0.13	-0.18	0.20*	0.10	0.17	-0.17	0.05
FWC			1	0.37**	0.04	0.44**	0.08	-0.01	-0.08	0.10	0.12	0.13	0.14
BD				1	0.48**	0.88**	-0.25*	0.47**	0.40**	0.41**	0.33**	-0.13	0.18
PD					1	-0.02	0.54**	0.72**	0.62**	0.61**	0.51**	0.40**	0.51**
TP						1	-0.01	0.15	-0.12	-0.14	0.11	0.22*	0.06
MWD							1	0.60**	0.54**	0.48**	0.58**	0.56**	0.57**
Sand								1	0.86**	0.84**	0.43**	0.40**	0.60**
Silt									1	0.46**	0.40**	0.29**	0.41**
Clay										1	0.33**	0.40**	0.62**
OC											1	0.41**	0.38**
EC1:2.5												1	0.61**

* و **: به ترتیب معنی دار در سطح احتمال ۱ و ۵ درصد. توصیف علائم متغیرها در زیر جدول ۱ آورده شده است.

Variable symbols description is available under Table 1. *, **: Significant at $P < 0.05$ and $P < 0.01$, respectively.

متغیرهای خاک در جدول ۳ آورده شده است. براساس تقسیم‌بندی کمباردلا و همکاران (۷)، اگر نسبت اثر قطعه‌ای به سقف بین ۰/۲۵ و ۰/۷۵ باشد متغیر دارای وابستگی مکانی متوسط است؛ اگر این نسبت بزرگتر از ۰/۷۵ باشد متغیر دارای وابستگی مکانی ضعیف و اگر کوچکتر از ۰/۲۵ باشد متغیر دارای وابستگی مکانی قوی است. بر این اساس، نیم‌تغییرنماهای حاصل بیانگر وجود وابستگی مکانی متوسط تا قوی برای همه متغیرهای مورد مطالعه می‌باشند (جدول ۳). مدل کروی برای Ks و BD، مدل گوسی برای PD و FWC و مدل نمایی برای PR و TP در منطقه مورد مطالعه برآزش داده شد (جدول ۳). در شکل ۳، نیم‌تغییرنماهای برآزش یافته برای Ks و PR به عنوان نمونه نشان داده شده است. تعداد جفت نقاط لازم برای برآورد هر نقطه، حداقل ۱۰۰ و حداکثر ۳۰۰ تا براساس فاصله و نیز کل نقاط لازم برای رسم نیم‌تغییرنماها ۲۹۳۸ تا بود. در این پژوهش، PR، Ks، FWC و PD به علت داشتن نسبت اثر قطعه‌ای به سقف کوچکتر از ۰/۲۵ (جدول ۳)، براساس تقسیم‌بندی کمباردلا و همکاران (۷) دارای قوی‌ترین وابستگی مکانی بودند. این در حالی است که در مطالعه اقبال و همکاران (۱۸) و متقیان و همکاران (۲۴)، همبستگی مکانی متوسط برای Ks گزارش گردیده است. همچنین همبستگی مکانی متوسط توسط کلیک و همکاران (۲۰) و اصغری و همکاران (۳) برای PR یافت شد.

همبستگی منفی بین PR با رطوبت خاک مزرعه ($r = -0.32^{**}$) و تخلخل کل ($r = -0.21^{**}$) مشاهده شد، در حالی که همبستگی مثبت ($P < 0.01$) بین PR با سیلت و BD یافت شد (جدول ۲). نتایج پژوهش‌های قبلی نیز نشان داده است که با افزایش رطوبت خاک مزرعه و کاهش جرم مخصوص ظاهری، مقاومت فروروی خاک کاهش می‌یابد (۳، ۴ و ۲۰). اصغری و همکاران (۳) نیز در خاک‌های دشت اردبیل بین PR با رطوبت خاک مزرعه و تخلخل کل، همبستگی منفی ($P < 0.01$) و بین PR با سیلت و BD، همبستگی مثبت ($P < 0.01$) گزارش کردند. مقاومت فروروی و جرم مخصوص ظاهری، هر دو از شاخص‌های فشردگی خاک محسوب می‌شوند و ارتباط مستقیم با یکدیگر دارند (۳۰).

پیش‌بینی مکانی ویژگی‌های خاک

برای دست‌یابی به توزیع نرمال، تبدیل لگاریتمی بر روی داده‌های Ks قبل از آنالیز زمین‌آماري انجام گردید. متقیان و همکاران (۲۴) نیز در پژوهشی بر روی ۱۱۱ داده Ks، توزیع لوگ‌نرمال را در خاک سطحی گزارش کردند. بهترین مدل‌های برآزش یافته نیم‌تغییرنماها براساس کمترین مجموع مربعات باقی‌مانده (RSS) و بالاترین ضریب تبیین (R^2) و نیز پارامترهای هر مدل شامل اثر قطعه‌ای، نسبت اثر قطعه‌ای به سقف، دامنه تأثیر و کلاس وابستگی مکانی برای

جدول ۳- پارامترهای مدل‌های برازش شده به نیم تغییرنمای متغیرهای خاک
Table 3- Parameters of the models fitted to the semivariograms for soil variables.

متغیر Variable	وابستگی مکانی، مدل Spatial dependence, model	دامنه تأثیر (متر) Range (m)	اثر قطعه- ای Nugget	سقف Sill	سقف/اثر قطعه‌ای Nugget/sill	مجموع مربعات باقی- مانده RSS	ضریب تیین R ²
Log Ks	S، قوی S کروی	2443	0.02	0.13	0.154	0.00034	0.94
PR	S، قوی E نمایی	335	0.928	3.935	0.236	1.27	0.778
FWC	S، قوی G گوسی	558	6.34	33.24	0.191	231	0.57
BD	M، متوسط S کروی	1042	0.0083	0.02	0.415	0.00002	0.90
PD	S، قوی G گوسی	2844	0.0065	0.1	0.065	0.00002	0.98
TP	M، متوسط E نمایی	1383	0.0016	0.0033	0.485	0.0000007	0.14

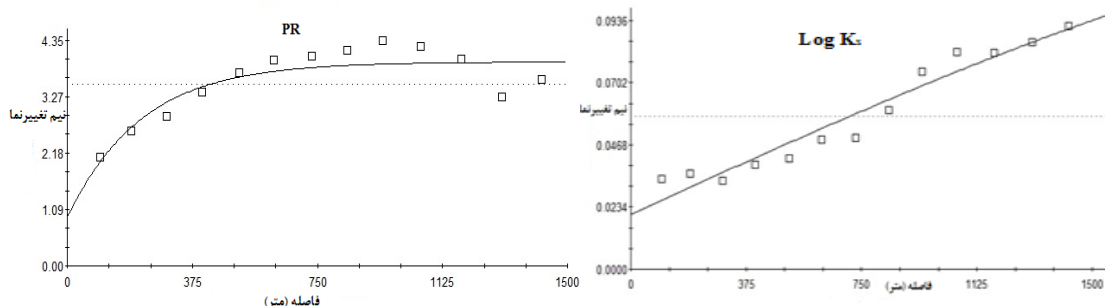
S: strong; M: moderate; Sph: Spherical; G: Gaussian; E: Exponential.

مطالعاتی، وسعت منطقه و فواصل نمونه برداری نسبت داد. در این پژوهش، دامنه تأثیر PR کوچکتر از دامنه تأثیر بقیه متغیرها بود (جدول ۳) بنابراین می‌توان استنباط نمود PR دارای ساختار مکانی محدودتری در مقایسه با سایر متغیرها در منطقه مورد مطالعه می‌باشد. بدیهی است که هرچه دامنه تأثیر بزرگتر باشد، ساختار مکانی گسترده‌تر است و محدوده‌ای که می‌توان از داده‌های آن برای تخمین مقادیر مجهول استفاده کرد، افزایش می‌یابد (۱۳).

ارزیابی صحت روش‌های درون‌یابی

در جدول ۴ معیارهای ارزیابی صحت برآورد روش‌های درون‌یابی OK و IDW (توان وزنی ۱ و ۲) برای Ks و PR آورده شده است. معیار میانگین خطا (ME) بیانگر متوسط خطای پیش‌بینی بوده و مقادیر مثبت آن، بیش‌برآوردی را برای PR و مقادیر منفی آن کم-برآوردی را برای Ks توسط هر دو روش درون‌یابی نشان می‌دهد. براساس آماره میانگین مطلق خطا (MAE)، در تخمین Ks، بین روش‌های درون‌یابی تفاوت چندانی مشهودی وجود ندارد.

بنابراین به نظر می‌رسد در پژوهش حاضر عمدتاً عوامل ذاتی خاک مانند شن، رس و غلظت املاح سدیم، کلسیم و منیزیم در وابستگی مکانی Ks و PR دخالت داشته‌اند؛ کمباردلا و همکاران (۷) بیان کردند که متغیرهای با وابستگی مکانی قوی‌تر توسط تغییرپذیری ذاتی خاک کنترل می‌شوند، در حالی که متغیرهای با وابستگی مکانی ضعیف‌تر توسط عوامل بیرونی مثل روش‌های مدیریتی و خاک‌ورزی کنترل می‌شوند. کمترین مقدار دامنه تأثیر برای PR (۳۳۵ m) و بیشترین مقدار دامنه تأثیر برای PD (۲۸۴۴ m) در منطقه مورد مطالعه (۲۰۰×۴۰۰ m) یافت شد همچنین دامنه تأثیر Ks برابر با ۲۴۴۳ متر تعیین گردید (جدول ۳). دامنه تأثیر Ks توسط متقیان و همکاران (۲۴) برابر با ۳۸۵۰ m در حوزه آبخیز زاینده رود (۹۷ km²) و نیز توسط اقبال و همکاران (۱۸) برابر با ۹۴ m در یک مزرعه ۱۶۲ هکتاری پنبه گزارش شده است. اصغری و همکاران (۳) نیز دامنه تأثیر PR را برابر با ۲۶۰۳۰ m در دشت اردبیل (42 × 24 km) به-دست آوردند. علت تفاوت مقادیر دامنه تأثیر به‌دست آمده در پژوهش حاضر برای Ks و PR در مقایسه با دامنه‌های گزارش شده توسط سایر محققان را می‌توان به تغییرات عوامل ذاتی خاک، مقیاس



شکل ۳- نیم تغییرنماها (نقاط) و مدل‌های برازش شده (خطوط) هدایت هیدرولیکی اشباع (Ks) و مقاومت فروری (PR) خاک.
Figure 3. Semivariograms (points) and fitted models (lines) of soil saturated hydraulic conductivity (Ks) and penetration resistance (PR)

بنابراین می‌توان گفت هر سه روش درون‌یابی از دقت نسبتاً یکسانی در برآورد Ks برخوردار بودند. بالاترین مقدار CCC برای PR در روش OK (۰/۳۹۲) و پایین‌ترین مقدار CCC (۰/۲۵۶) برای PR در روش IDW توان ۱ یافت شد (جدول ۴). این مقادیر CCC بیانگر آن است که در پهنه‌بندی PR روش OK در مقایسه با روش IDW توان ۱ و ۲ از مطابقت نسبتاً خوبی اطراف خط ۱:۱ (۲۲) مابین مقادیر اندازه‌گیری و برآورد شده متغیر مذکور برخوردار بوده است. پژوهش‌های اصغری و همکاران (۳) نیز نشان داد در تخمین مقاومت فروری خاک‌های دشت اردبیل، روش OK به علت داشتن CCC بالاتر (۰/۴۸) در مقایسه با روش IDW توان ۱ (۰/۲۴) و توان ۲ (۰/۲۹) از دقت و صحت بالاتری برخوردار بود. احتمالاً ضریب تغییرات بالای Ks موجب پایین آمدن دقت برآورد آن در مقایسه با PR در پژوهش حاضر گردیده است (شکل ۴ الف و ب).

همچنین روش OK در برآورد PR به علت داشتن MAE کوچکتر در مقایسه با سایر روش‌های درون‌یابی دارای صحت تخمین نسبتاً بالایی است. معیار مجذور میانگین مربعات خطا (RMSE) نیز گویای آن است که در برآورد PR، روش OK به علت داشتن RMSE کوچکتر دارای صحت تخمین نسبتاً بالایی است ولی بین RMSE سه روش درون‌یابی از نظر برآورد Ks، تفاوت قابل ملاحظه‌ای مشاهده نمی‌شود (جدول ۴). هرچه MAE و RMSE نزدیک به صفر باشند بیانگر آن است که تخمین متغیر با صحت بالاتری صورت گرفته است (۸).

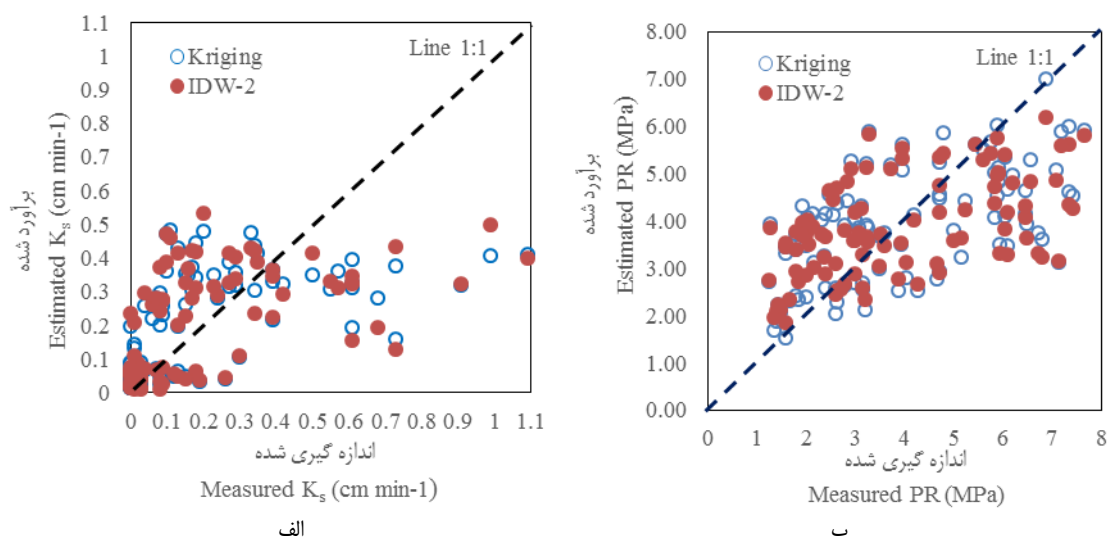
برای تحلیل بیشتر صحت و دقت درون‌یابی، مقادیر برآورد شده Ks و PR در مقابل مقادیر اندازه‌گیری شده آن‌ها برای همه نقاط نمونه‌برداری (n=100) ترسیم گردید (شکل ۴). جدول ۴ نشان می‌دهد همانند آماره‌های MAE و RMSE، بین مقادیر ضریب تطابق (CCC) نیز از نظر تخمین Ks اختلاف فاحشی مشاهده نمی‌شود.

جدول ۴- آماره‌های ارزیابی تخمین هدایت هیدرولیکی (Ks) و مقاومت فروری (PR) خاک با استفاده از روش‌های مختلف درون‌یابی.

Table 4. Assessment indices for estimating soil hydraulic conductivity (Ks) and penetration resistance (PR) using different interpolation methods

متغیر	روش	میانگین خطا	میانگین مطلق خطا	مجذور میانگین مربعات خطا	ضریب تطابق
Variable	Method	ME	MAE	RMSE	CCC
Ks (cm min ⁻¹)	OK	-0.0002	0.131	0.192	0.417
	IDW-1	-0.0005	0.133	0.195	0.411
	IDW-2	-0.0007	0.134	0.196	0.417
PR (MPa)	OK	0.028	1.256	1.516	0.392
	IDW-1	0.053	1.327	1.600	0.256
	IDW-2	0.053	1.294	1.564	0.305

ME: mean error; MAE: mean absolute error; RMSE: root mean square error; CCC: Concordance correlation coefficient; OK: Ordinary kriging; IDW: inverse distance weighting. Variable symbols description is available under Table 1.



شکل ۴- نمودار ۱:۱ مقادیر اندازه‌گیری و برآورد شده هدایت هیدرولیکی اشباع (الف) و مقاومت فروری (ب) خاک.

Figure 4. 1:1 Scatter plots of the measured and estimated values of soil saturated hydraulic conductivity (Ks) and penetration resistance (PR).

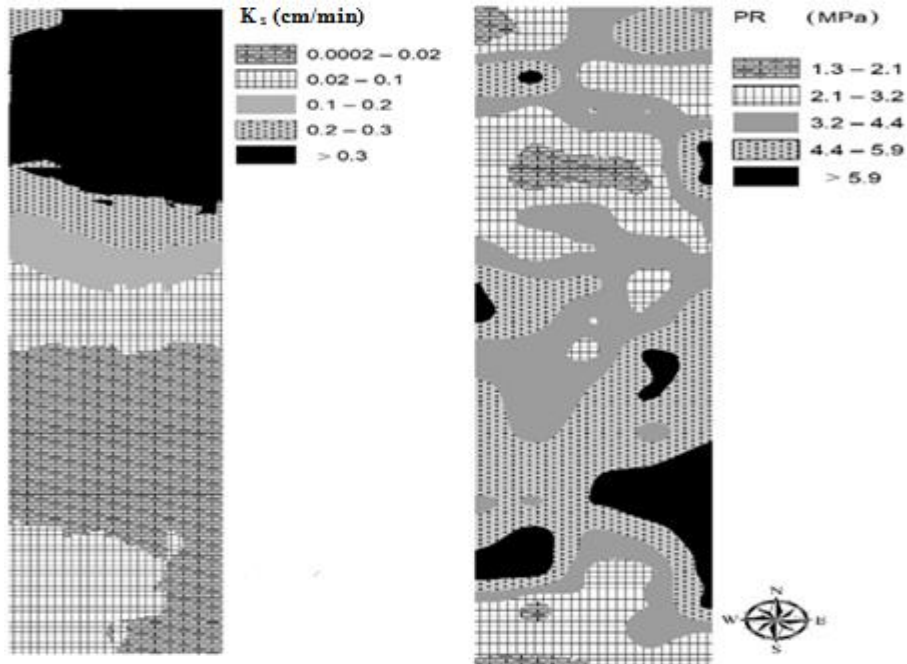
($>5/9$ MPa) عمدتاً مربوط به کاربری بایر در بخش‌های جنوب شرقی منطقه مورد مطالعه می‌باشد که در این نقاط مقادیر جرم مخصوص ظاهری بالا ($>1/35$ g cm⁻³) و تخلخل کل نسبتاً پایین ($<0/48$ cm³ cm⁻³) است (شکل ۶). همچنین مشاهده می‌شود الگوی پراکنش PR در خلاف جهت رطوبت خاک مزرعه (شکل ۶) می‌باشد. وجود همبستگی مثبت و معنی‌دار بین PR با BD ($r=0.21^*$) و همبستگی منفی و معنی‌دار بین PR با TP ($r=-0.21^*$) و FWC ($r=-0.32^{**}$) نیز مؤید نتایج فوق است (جدول ۲). در این پژوهش بر خلاف یافته‌های اصغری و همکاران (۳)، ارتباط معنی‌داری بین ماده آلی و شن با PR یافت نشد؛ دلیل این مسأله را شاید بتوان به همبستگی مثبت و معنی‌دار شن با کربن آلی ($r=0.43^{**}$) در منطقه مورد مطالعه نسبت داد. به نظر می‌رسد کاربرد مالچ شن و سنگریزه و نیز افزودن کودهای حیوانی توسط کشاورزان محلی در اراضی کشاورزی (عمدتاً زیر کشت صیفی‌جات مانند خیار، بادمجان و کدو و درختان هلو) موجب حصول چنین نتیجه‌ای شده است. مشابه نتایج پژوهش حاضر، ارتباط مثبت و معنی‌دار PR با جرم مخصوص ظاهری و ارتباط منفی آن با رطوبت خاک مزرعه توسط کلیک و همکاران (۲۰)، باریک و همکاران (۴) و اصغری و همکاران (۳) گزارش گردیده است.

نتیجه‌گیری

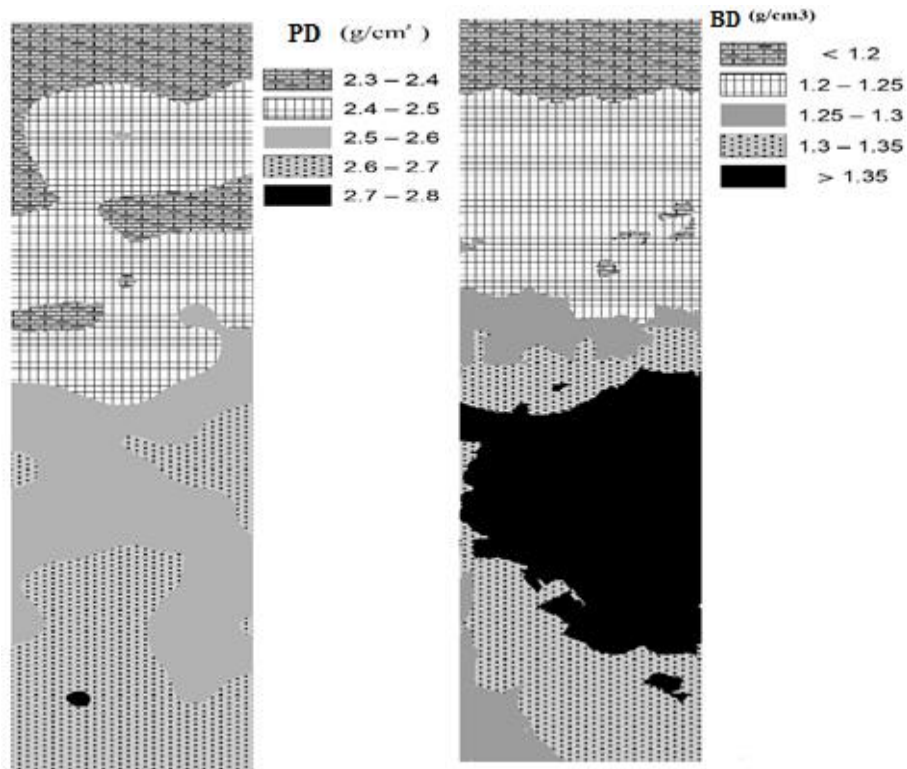
هدایت هیدرولیکی اشباع (Ks) دارای بالاتری ضریب تغییرات (۱۵۵/۶ درصد) و جرم مخصوص حقیقی دارای کمترین ضریب تغییرات (۳/۰۵ درصد) نسبت به سایر متغیرهای خاک در منطقه مورد مطالعه (کاربری بایر) بودند. روابط همبستگی بین Ks با سیلت، رس، BD، SAR و EC منفی و با شن، MWD، کربن آلی و TP مثبت بود. متغیر Ks دارای مدل نیم‌تغییرنمای کروی، وابستگی مکانی قوی و دامنه تأثیر بالا (۲۴۴۳ m)، در حالی‌که PR دارای مدل نیم‌تغییرنمای نمایی، وابستگی مکانی قوی و دامنه تأثیر پایین (۳۳۵ m) بود. در منطقه مورد مطالعه، از کاربری کشاورزی به سمت کاربری بایر با افزایش میزان رس و SAR به دلیل نزدیک شدن به رسوبات دریاچه ارومیه، روند افزایشی جرم مخصوص ظاهری و مقاومت فروری خاک و روند کاهشی تخلخل کل و Ks مشاهده گردید. کمترین دامنه تأثیر (۳۳۵ m) برای مقاومت فروری در میان متغیرهای مورد مطالعه به دست آمد لذا پیشنهاد می‌شود برای صرفه جویی در هزینه و زمان در مطالعات بعدی، فواصل نمونه‌برداری خاک به جای ۱۰۰ متر، ۳۳۵ متر در نظر گرفته شود.

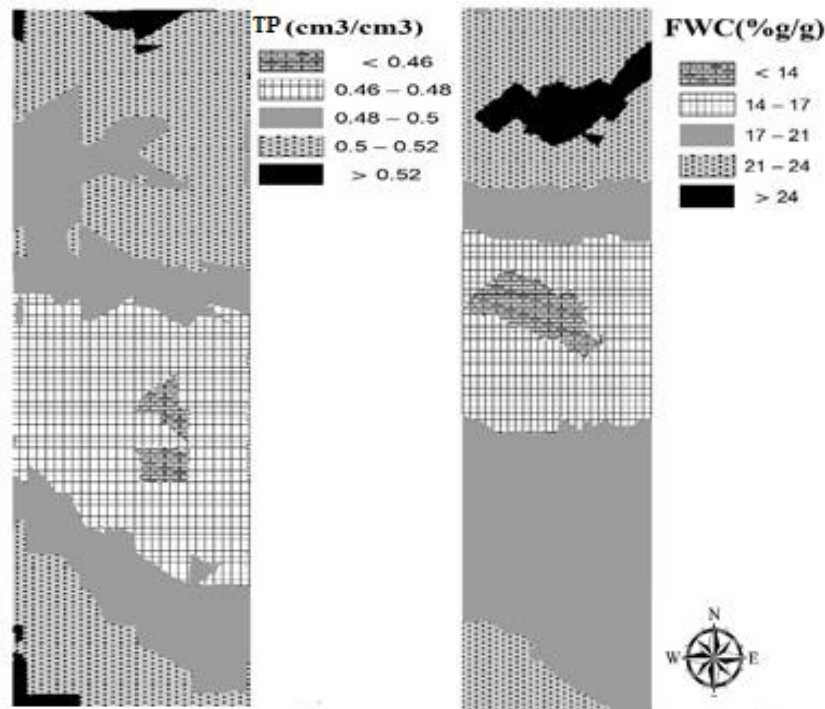
پهنه‌بندی متغیرهای خاک

نقشه‌های توزیع مکانی هدایت هیدرولیکی اشباع (Ks) و مقاومت فروری (PR) خاک (شکل ۵) و جرم مخصوص ظاهری (BD) و حقیقی (PD)، تخلخل کل (TP) و رطوبت خاک مزرعه (FWC) (شکل ۶) با استفاده از نرم‌افزار Arc GIS در ۵ کلاس طبقه‌بندی برای منطقه مورد مطالعه رسم گردید. شکل ۵ نشان می‌دهد که خاک‌های با Ks بالا ($>0/3$ cm min⁻¹) در بخش‌های شمالی منطقه مورد مطالعه (کاربری کشاورزی) واقع شده‌اند و به سمت کاربری بایر و با نزدیک شدن به رسوبات دریاچه در بخش جنوبی منطقه مورد مطالعه، از میزان Ks کاسته شده است، به طوری‌که بخش اعظم کاربری بایر دارای Ks کمتر از ۰/۰۲ cm min⁻¹ می‌باشد. یکی از دلایل این موضوع را می‌توان به درشت بافت بودن خاک کاربری کشاورزی در مقایسه با کلاس بافت نسبتاً ریز خاک کاربری بایر نسبت داد (شکل ۱)؛ همبستگی معنی‌دار و مثبت Ks با شن و همبستگی‌های معنی‌دار و منفی Ks با رس و سیلت در منطقه مورد مطالعه، در این راستا می‌باشد (جدول ۲). از سوی دیگر، می‌توان چنین گفت که میانگین SAR در کاربری بایر ۹۸/۵ برابر بیشتر از کاربری کشاورزی است که از طریق تضعیف ساختمان خاک (کاهش MWD) موجب کاهش میانگین Ks در کاربری بایر در مقایسه با کاربری کشاورزی به میزان حدود ۹ برابر گردیده است (جدول ۱). نقشه تغییرات مکانی BD، PD و TP در شکل ۶ نیز بیانگر آن است از کاربری کشاورزی به سمت کاربری بایر به دلیل کاهش میانگین کربن آلی (جدول ۱)، جرم مخصوص ظاهری و حقیقی روند افزایشی و تخلخل کل خاک روند کاهشی داشته و منجر به کاهش Ks گردیده است. همبستگی‌های معنی‌دار و منفی Ks با SAR، BD و PD و همبستگی‌های معنی‌دار و مثبت Ks با MWD و TP در منطقه مورد مطالعه، مؤید یافته‌های فوق‌الذکر می‌باشد (جدول ۲). افزایش سدیم خاک موجب تخریب خاکدانه‌ها و افزایش جرم مخصوص ظاهری خاک باعث فشردگی خاک گردیده و در نتیجه بخشی از منافذ خاک مسدود و نهایتاً از هدایت هیدرولیکی مسیر خاک (Ks) برای انتقال آب و املاح کاسته می‌شود (۱۶ و ۳۰). بررسی‌های زمین‌آماري متقیان و همکاران (۲۴) در منطقه شهرکرد نشان داد با افزایش رس و جرم مخصوص ظاهری خاک، Ks کاهش یافت. افضل‌ی مقدم و همکاران (۱) در منطقه خضرآباد جیرفت گزارش کردند الگوی پراکنش Ks با متغیر شن هم‌روند ولی با متغیر رس در خلاف جهت دیده‌شد. کلیشادی و همکاران (۱۹) نیز نتایج مشابهی را در خصوص ارتباط Ks با ماده آلی و متغیرهای فیزیکی خاک به دست آوردند. با توجه به نقشه توزیع مکانی PR (شکل ۵)، مشاهده می‌شود مقادیر زیاد PR



شکل ۵- نقشه‌های تغییرات مکانی هدایت هیدرولیکی (Ks) و مقاومت فروروی (PR) در منطقه مورد مطالعه.
 Figure 5- Spatial variability maps of hydraulic conductivity (Ks) and penetration resistance (PR) in the studied area.





شکل ۶- نقشه‌های تغییرات مکانی جرم مخصوص ظاهری (BD) و حقیقی (PD)، تخلخل کل (TP) و رطوبت خاک مزرعه (FWC) در منطقه مورد مطالعه

Figure 6- Spatial variability maps of bulk (BD) and particle density (PD), total porosity (TP) and field water content (FWC) in the studied area

منابع

- 1- Afzali Moghadam E., Boroomand N., Jalali V.R., and Sanjari S. 2017. Evaluation the effect of different land use and soil characteristics on saturated hydraulic conductivity. *Journal of Water and Soil* 31, (5): 1302-1312. (In Persian with English abstract)
- 2- Asghari Sh., and Shahabi M. 2018. Geostatistical assessment of aggregates stability and sodium adsorption ratio in salt-affected soils around Urmia Lake. *Journal of Water and Soil* 32, (4): 795-807. (In Persian with English abstract)
- 3- Asghari Sh., Sheykhzadeh G.R., and Shahabi M. 2017. Geostatistical analysis of soil mechanical properties in Ardabil plain of Iran. *Archives of Agronomy and Soil Science* 63, (12): 1631-1643.
- 4- Barik K., Aksakal E.L., Islam K.R., Sari S., and Angin I. 2014. Spatial variability of soil compaction properties associated with field traffic operations. *Catena* 120: 122-133.
- 5- Blake G.R., and Hartge K.H. 1986a. Bulk density. p. 363-375. In: Klute A (ed). *Methods of Soil Analysis Part 1, Physical and Mineralogical Methods*. 2nd ed. American Society of Agronomy, Madison, WI.
- 6- Blake G.R., and Hartge K.H. 1986b. Particle density. p. 377-381. In: Klute A (ed). *Methods of Soil Analysis Part 1, Physical and Mineralogical Methods*. 2nd ed. ASA and SSSA, Madison, WI.
- 7- Cambardella C., Moorman T., Novak J., Parkin T., Karlen D., Turco R., and Konopka A. 1994. Field-scale variability of soil properties in central Iowa soils. *Soil Science Society of America Journal* 58: 1501-1510.
- 8- Dai F., Zhou Q., Lv Z., Wang X., and Liu G. 2014. Spatial prediction of soil organic matter content integrating artificial neural network and ordinary kriging in Tibetan Plateau. *Ecological Indicator* 45:184-194.
- 9- Danielson R.E., and Sutherland P.L. 1986. Porosity. p. 443-461. In: Klute A (ed). *Methods of Soil Analysis. Part 1, 2nd ed. Agronomy Monograph. 9. ASA and SSSA, Madison, WI.*
- 10- Douaik A., Van Meirvenne M., and Toth T. 2005. Soil salinity mapping using spatio-temporal kriging and Bayesian Maximum Entropy with interval soft data. *Geoderma*, 128: 234-248.
- 11- Gardner W.H. 1986. Water content. p. 493-544. In: Klute A. (ed). *Methods of Soil Analysis. Part 1. 2nd ed. Agronomy. Monograph. 9. ASA, Madison, WI.*
- 12- Gee G.W., and Or D. 2002. Particle-size analysis. p. 255-293. In: Dane J. H., and Topp G. C. (eds.). *Methods of Soil Analysis. Part 4. SSSA Book Series No. 5. Soil Science Society of America, Madison, WI.*

- 13- Goovaerts P. 1997. *Geostatistics for Natural Resources Evaluation*. Oxford University Press. Oxford.
- 14- GS+5.1. 2001. *Gamma Design software*. Plainwell, MI, USA.
- 15- Hamzehpoura N., and Bogaert P. 2017. Improved spatiotemporal monitoring of soil salinity using filtered kriging with measurement errors: An application to the West Urmia Lake, Iran. *Geoderma* 295: 22–33.
- 16- Hillel D. 2004. *Environmental soil physics*. New York, USA: Academic Press.
- 17- Isaaks H.E., and Srivastava R.M. 1989. *An Introduction to Applied Geostatistics*. Oxford University Press, NY.
- 18- Iqbal J., Thomasson A., Jenkins JN., Owens PR., and Whisler FD. 2005. Spatial variability analysis of soil physical properties of alluvial soils. *Soil Science Society of America Journal* 69: 1338-1350.
- 19- Kelishadi H., Mossaddeghi M.R., Hajabbasi M.A., and Ayoubi S. 2014. Near-saturated soil hydraulic properties as influenced by land use management systems in Koohrang region of central Zagros, Iran. *Geoderma*, 213: 426-434.
- 20- Kilic K., Ozgoz E., and Akbas F. 2004. Assessment of spatial variability in penetration resistance as related to some soil physical properties of two fluvents in Turkey. *Soil and Tillage Research* 76:1–11.
- 21- Klute A., and Dirksen C. 1986. Hydraulic conductivity and diffusivity: Laboratory methods. p. 687-734. In: Klute A(ed). *Methods of Soil Analysis. Part 1, Physical and Mineralogical Methods*, 2nd ed. ASA and SSSA, Madison, WI.
- 22- Lin L.I. 1989. A concordance correlation coefficient to evaluate reproducibility. *Bio-metrics*, 45: 255–268.
- 23- Lowery B., and Morrison JE. 2002. Soil penetrometer and penetrability. In: Dane J.H., and Topp GC (eds.). *Methods of soil analysis, part 4. Physical methods*. Madison (WI): Soil Science Society of America; pp. 363–388.
- 24- Motaghian M.H., Karimi A., and Mohammadi J. 2008. Analysis of spatial variability of specific physical and hydraulic properties of soil on a catchment scale. *Journal of Water and Soil* 22, (2): 433-446. (In Persian with English abstract)
- 25- Mohammadi J., and Motaghian M.H. 2011. Spatial estimation of saturated hydraulic conductivity from terrain attributes using regression, kriging, and artificial neural networks. *Pedosphere*, 21(2): 170–175.
- 26- Nelson D.W., and Sommers L.E. 1982. Total carbon, organic carbon, and organic matter. p. 539–579. In A.L. Page et al. (ed.) *Methods of Soil Analysis. Part 2*. 2nd ed. Agron. Monogr. 9. ASA and SSSA, Madison, WI.
- 27- Richards L.A. 1954. *Diagnosis and improvement of saline and alkali soils*. Agricultural Handbook No. 60. U.S. Salinity Laboratory Riverside, California.
- 28- Sheng J., Maa L., Jiang P., Li B., Huang F., and Wu, H. 2010. Digital soil mapping to enable classification of the salt-affected soils in desert agro-ecological zones. *Agricultural Water Management* 97: 1944–1951.
- 29- Tajik F. 2004. Evaluation of aggregates stability in some regions of Iran. *Journal of Sciences and Technology of Agriculture and Natural Resources* 8(1): 107-122. (In Persian with English abstract)
- 30- Warrick AW. 2002. *Soil Physics Companion*. CRC Press. New York.
- 31- Wilding L.P, and Dress L.R. 1983. Spatial variability and pedology. p: 83-116. In: Wilding L.P, Smeckand N.E, and Hall GF, (EDs). *Pedogenesis and Soil Taxonomy. I. Concepts and Interactions*. Elsevier Science Pub.
- 32- Yazdani A., Mosaddeghi M.R., Khademi H., Ayoubi S., and Khayamim F. 2014. Relationship between surface aggregate stability and some soil and climate properties in Isfahan province. *Soil Management* 3(2): 23-31. (In Persian with English abstract)
- 33- Yoder R.E. 1936. A direct method of aggregate analysis of soils and a study of the physical nature of erosion losses. *Journal of American Society Agronomy* 28: 337-35.



Spatial Variability of Soil Saturated Hydraulic Conductivity and Penetration Resistance in Salt-Affected Lands around Lake Urmia

Sh. Asghari^{1*}- M. Shahabi²

Received: 26-08-2018

Accepted: 07-01-2019

Introduction: Over the last few years, due to the depletion of Lake Urmia located in the northwest of Iran, the proportion of surrounding saline agricultural lands increased at a fast pace. Digital mapping of regional soils affected by salt is essential when monitoring the dynamics of soil salts and planning land development and reclamation schemes. The soil hydraulic and mechanical parameters are very important factors that affect water and chemical transport in soil pores. In the salt-affected soils, saturated hydraulic conductivity (K_s) is very low due to the high contents of sodium and weak aggregate stability. Penetration resistance (PR) indicates soil mechanical strength to penetration of a cone or flat penetrometer; it is important in seedling, root growth and tillage operations. Generally, PR values exceed 2.5 MPa, while root elongation is significantly restricted. The analysis of spatial variability of K_s and PR is essential to implement a site-specific soil management especially in the salt-affected lands. The objective of this study was to evaluate the influence of two different bare and agricultural land uses on the spatial variability of K_s and PR in the salt-affected soils around Lake Urmia.

Materials and Methods: This study was conducted in the agricultural and bare lands of Shend Abad region located at the 15 km of Shabestar city, northwest of Iran ($45^{\circ} 36' 34''$ to $45^{\circ} 36' 38''$ E and $38^{\circ} 6' 37''$ to $38^{\circ} 7' 42''$ N). Totally, 100 geo-referenced samples were taken from 0-10 cm soil depth with 100×100 m intervals (80 ha) in agricultural ($n=49$) and bare ($n=51$) land uses. Sand, silt, clay, organic carbon (OC), mean weight diameter of aggregates (MWD), sodium adsorption ratio (SAR) and electrical conductivity (EC), were measured in the collected soil samples. The EC and SAR were measured in 1:2.5 (soil: distilled water) extract. K_s was measured using constant or falling head method. Bulk density (BD) and field water content (FWC) were measured in the undisturbed soil samples taken by steel cylinders with 5 cm diameter and height. Total porosity calculated from BD and particle density (PD). PR was directly measured at the field using a cone penetrometer. The best fit semivariograms model (Gaussian, spherical and exponential) was chosen by considering the minimum residual sum of square (RSS) and maximum coefficient of determination (R^2). Ordinary Kriging (OK) and inverse distance weighting (IDW) interpolation methods were used to analyze the spatial variability of K_s and PR. Spatial distribution maps of soil variables were provided by Arc GIS software. The accuracy of OK and IDW methods in estimating K_s and PR was evaluated by mean error (ME), mean absolute error (MAE), root mean square error (RMSE) and concordance correlation coefficient (CCC) criteria. The CCC indicates the degree to which pairs of the measured and estimated parameter value fall on the 45° line through the origin.

Results and Discussion: According to coefficient of variation (CV) from the study area, the most variable soil indicator was K_s ($CV=155.6\%$), whereas the least variable was PD ($CV= 3.05\%$) both in bare land use. The Lognormal distribution was found for K_s data in the studied region. The Pearson correlation coefficients (r values) indicated that there are significant correlations between K_s and OC ($r=0.36$), sand ($r=0.60$), SAR ($r=-0.35$), EC ($r=-0.22$), BD ($r=-0.52$), TP ($r= 0.31$), silt ($r=-0.60$), and clay ($r=-0.43$). Also, significant correlations were obtained between PR and FWC ($r=-0.32$), BD ($r=0.21$), and TP ($r=-0.21$). The spatial dependency classes of soil variables were determined according to the ratio of nugget variance to sill expressed in percentages: If the ratio was $>25\%$ and $<75\%$, the variable was considered moderately spatially dependent; if the ratio was $>75\%$, variable was considered weakly spatially dependent; and if the ratio was $<25\%$, the variable was considered strongly spatially dependent. The strong spatial dependences with the effective ranges of 2443m were found for K_s . The PR and PD variables had the least (335 m) and the highest (2844 m) effective range, respectively. The range of influence indicates the limit distance at which a sample point has influence over another points, that is, the maximum distance for correlation between two sampling point. The models of fitted semivariograms were

1- Associate Professor, Department of Soil Science and Engineering, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil

(*- Corresponding Author Email: shokrollah.asghari@gmail.com)

2- Graduated Ph.D Student, Department of Soil Science and Engineering, Faculty of Agriculture, University of Tabriz, Tabriz

spherical for K_s and exponential for PR. According to RMSE and CCC criteria, there was not found significant difference between K_s estimates by OK and IDW interpolation methods. The high CCC and low RMSE values for OK compared with IDW indicated the more precision and accuracy of OK in estimating PR in the studied area. Generally, the spatial maps showed that from agricultural to bare land use by nearing to Lake Urmia, the BD and PR increased and consequently TP and K_s decreased.

Conclusion: The results showed that K_s negatively related to the SAR, EC, BD, silt and clay and positively related to the OC, sand, MWD and TP in the study area. Also, PR negatively related to the FWC and TP and positively related to the BD and silt. The spatial dependency was found strong for K_s . The PR revealed the smallest effective range (335 m) among the studied variables. As a suggestion, for subsequent study, soil sampling distance could be taken as 335 m instead of 100 m in order to save time and minimize cost.

Keywords: Geostatistics, Physical properties, Saline and sodic soils, Shabestar plain