

## Spatial Variations of Soil Penetration Resistance and Shear Strength and the Effect of Land Use Type and Physiographic Unit on These Characteristics

PEGAH KHOSRAVANI<sup>1</sup>, ALI AKBAR MOOSAVI<sup>1\*</sup>, MAJID BAGHERNEJAD<sup>1</sup>

1. Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, Shiraz University, Shiraz, Iran.

(Received: Dec. 12, 2020- Revised: March. 2, 2021- Accepted: March. 6, 2021)

### ABSTRACT

Investigating spatial variability of penetration and shear strength properties is of particular importance for the management and improvement of agricultural soil fertility for sustainable production. The aim of this research was to investigate the effect of land use type and physiographic units on soil penetration and shear strength, and their spatial variability in Lapoui plain. The soil penetration and shear strength were measured using cone index penetrations and cutting blade at 130 observation points with three replication at the top layer (0-30 cm) in three physiographic units and two land uses in the area. The primary and secondary derivatives of the digital elevation model were also used as covariates. To evaluate the spatial variability of the proposed variables, three covariates including, co-kriging, ordinary kriging, and inverse distance weighting were used. The results of linear correlation showed an inverse relationship between shear strength and penetration resistance and DEM covariates. As a significant inverse relationship was observed between shear strength and penetration resistance in the physiographic units of piedmont plain, alluvial plain and hill. The same inverse and significant relationship was also found between the two characteristics in the irrigated and rainfed land use. The co-kriging method for shear and penetration strength based on the coefficient of determination ( $R^2$ ), with values of 0.55 and 0.38, indicated a good performance. Generally, geostatistical methods showed a moderate to poor accuracy in predicting penetration and shear strength. Further work is suggested to investigate the performance of other linear and nonlinear modeling approaches (pedotransfer functions, PTFs) in prediction of the abovementioned soil parameters.

**Keywords:** Co-Kriging Predictor, Inverse Distance Weighting Predictor, Kriging Predictor, Piedmont Plain, Plain.

## تغییرات مکانی مقاومت فروروی و برشی خاک و اثر نوع کاربری و واحد فیزیوگرافی بر آن‌ها

پگاه خسروانی<sup>۱</sup>، سید علی اکبر موسوی<sup>۱\*</sup> و مجید باقرنژاد<sup>۱</sup>

۱. گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران.

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۱۰/۱ - تاریخ بازنگری: ۱۳۹۹/۱۲/۱۲ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۹/۱۲/۱۶)

### چکیده

بررسی تغییرپذیری مکانی مقاومت‌های فروروی و برشی از اهمیت ویژه‌ای برای مدیریت و بهبود باروری خاک‌های کشاورزی در راستای تولید پایدار برخوردار است. این پژوهش با اهداف بررسی تأثیر نوع کاربری اراضی و واحدهای فیزیوگرافی بر مقاومت فروروی و برشی خاک و تغییرپذیری مکانی این ویژگی‌ها در خاک‌های دشت لیوی استان فارس انجام شد. اندازه‌گیری مقاومت فروروی و برشی با دستگاه‌های نفوذسنج دستی و برش‌پره‌ای در ۱۳۰ نقطه مشاهداتی از لایه سطحی (۰ تا ۳۰ سانتی‌متری) خاک در سه واحد فیزیوگرافی (تپه، دشت دامنه‌ای و دشت) و دو کاربری اراضی (کشت آبی و مرتع) موجود در منطقه انجام شد. برای بررسی تغییرپذیری ویژگی‌های مورد مطالعه از سه تخمینگر کوکریجینگ، کریجینگ-معمولی و وزن‌دهی معکوس فاصله استفاده شد. مشتقات اولیه و ثانویه مدل رقومی ارتفاع نیز به‌عنوان متغیرهای کمکی برای پیش‌بینی متغیر اصلی به‌وسیله تخمینگر کوکریجینگ استفاده شدند. نتایج همبستگی خطی رابطه معکوسی بین مقاومت برشی با مقاومت فروروی و پارامترهای مربوط به ارتفاع نشان داد. به‌نحوی که رابطه معکوس و معنی‌داری بین مقاومت برشی و مقاومت فروروی در واحدهای فیزیوگرافی دشت دامنه‌ای، دشت رسوبی و تپه مشاهده شد. رابطه مذکور بین دو ویژگی در کاربری زراعت آبی و مرتع نیز مشاهده شد. روش کوکریجینگ برای برآورد مقاومت برشی و فروروی بر اساس آماره ضریب تبیین ( $R^2$ ) با مقادیر ۰/۵۵ و ۰/۳۸ عملکرد مناسب‌تری داشت. به‌طور کلی روش‌های زمین‌آماري از دقت متوسطی در پیش‌بینی مقاومت فروروی و برشی خاک برخوردار بودند. بنابراین پیشنهاد می‌شود در مطالعات آبی به بررسی عملکرد سایر رویکردهای مدل‌سازی خطی و غیرخطی (توابع انتقالی) برای پیش‌بینی این دو ویژگی خاک پرداخته شود.

**واژه‌های کلیدی:** تخمینگر کریجینگ، تخمینگر کوکریجینگ، تخمینگر وزن دهی معکوس فاصله، دشت، دشت دامنه‌ای.

### مقدمه

بنابراین نیروی اعمال‌شده توسط ابزارهای خاک‌ورزی می‌توانند سبب برش، فشار و کشش در خاک شوند. همچنین در کشاورزی میزان مقاومت فروروی برای بررسی میزان نفوذ و حرکت ریشه گیاهان در فرآیند رشد بسیار حائز اهمیت است که می‌تواند تحت تأثیر بسیاری از عملیات خاک‌ورزی، ادوات کشاورزی و فرسایش خاک قرار گیرد.

مقاومت برشی خاک نیز از ویژگی‌هایی است که بر مقدار ظرفیت کشش وسایل‌مینیگیری و همچنین نیروی مقاوم در برابر عبور ابزار خاک‌ورز در خاک اثرگذار است. بنابراین اندازه‌گیری میزانمقاومت برشی بیشینه خاک نیز حائز اهمیت می‌باشد (Rezae and Tabatabai, 2019). برش مستقیم شرایط برش خاک را تحت عبور ادوات خاک‌ورزی نسبت به دو روش برش پره و فشاری تک‌محوری بهتر نشان می‌دهد و روشی ساده و قابل تکرار برای برآورد مقاومت برشی خاک بوده و در مدیریت پایدار خاک (از جنبه‌های ترددپذیری خاک و خاک‌ورزی) قابل استفاده است (Rezae and Tabatabai, 2019). مقاومت برشی لایه رویین

کاربری اراضی از مهم‌ترین روش‌های دخالت انسان در فرآیندهای طبیعی است که از طریق آن سببافزایش یا کاهش تخریب خاک می‌شود (Abdollahiet al., 2013). مدیریت خاک نیز نقش مهمی در کشاورزی پایدار و محیط‌زیست ایفا می‌کند. اعمال مدیریت زراعت شامل مدیریت خاک‌ورزی، کوددهی و روش‌های آبیاری اثرات متعددی بر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک دارد (Mozaffari et al., 2019). (Aghasi et al., 2017) بیان کردند کشت طولانی‌مدت و متراکم محصولات کشاورزی می‌تواند سبب کاهش کیفیت فیزیکی خاک، کاهش کارایی و سودبخشی تولید محصول، اثرات منفی بر محیط‌زیست و افزایش فرسایش آبی و بادی، آبشویی و ورود آفت‌کش‌ها و عناصر غذایی به منابع آب سطحی و زیرزمینی شود. در کشاورزی مکانیزه، تردد وسایل نقلیه هم‌زمان تنش‌های افقی و عمودی به خاک اعمال می‌کنند. همچنین در خاک‌ورزی که برای آماده کردن بستر بذور و ریشه در خاک انجام شود، در اثر اعمال نیرو، خاک گسیخته می‌شود؛

مورد بررسی قرار می‌گیرد. بنابراین مقدار یک کمیت در یک نمونه برداری هیچ‌گاه اطلاعاتی درباره تغییرات مقادیر آن کمیت در سایر مناطق نمونه برداری شده ارائه نمی‌کند (Aghasi *et al.*, 2017). در حالی که ویژگی‌های خاک در زمان و مکان و حتی در جهت‌های مختلف (عمق و سطح خاک) تغییر می‌کنند (Moradi Choghamarani *et al.*, 2012; Sepaskhah and Moosavi, 2016). همچنین ویژگی‌های خاک، دارای پیوستگی مکانی بوده و همبستگی متقابل بین آن‌ها وجود دارد که تحت تأثیر ویژگی‌های ذاتی (مواد مادری) و ویژگی‌های غیر ذاتی (عملیات مدیریتی خاک، کوددهی، تناوب زراعی و فرسایش) قرار دارند (Taati *et al.*, 2020). منظور از پیوستگی مکانی، آن است که دو نمونه‌ی نزدیک به هم از نظر مقدار عددی، بسیار شبیه‌تر به یکدیگر هستند تا دو نمونه‌ای که با فاصله‌ی زیادی از یکدیگر قرار دارند (Jahangardi and Pedometry 2006). زمین‌آمار و سیستم اطلاعات جغرافیایی به‌عنوان ابزارهایی مفید در تهیه نقشه‌های ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک بر اساس تعداد محدودی نمونه در اراضی کشاورزی به کار می‌روند (Emadi *et al.*, 2016). روش‌های زمین‌آمار در علوم خاک توسط محققین مختلفی به کار گرفته شده است. Mousavi *et al.* (2017). به بررسی تغییر-پذیری ویژگی‌های کلیدی خاک در اراضی دشت قزوین پرداختند و بیان کردند که جرم مخصوص ظاهری، درصد سیلت و توزیع کل خلل و فرج از الگوی نیم‌تغییرنمای کروی پیروی می‌نمایند و روش کریجینگ دارای توانایی بیشتری در پیش‌بینی این ویژگی‌ها نسبت به روش وزن دهی معکوس فاصله است. Reza *et al.* (2016) توزیع مکانی رس، سیلت، شن، رطوبت ظرفیت زراعی، نقطه پژمردگی دائم، رطوبت قابل استفاده خاک‌های آبرفتی هند را با استفاده از روش‌های زمین‌آمار بررسی کردند و مدل‌های نمایی و کروی را بر تغییرنمای این ویژگی‌ها برازش دادند. نتایج نشان داد که کلاس وابستگی مکانی برای تمامی ویژگی‌ها به جز رس متوسط بود و الگوی توزیع مکانی آب قابل دسترس خیلی نزدیک به الگوی تغییرات مکانی شن و رس بود و بیان کردند که نقشه‌های کریجینگ اطلاعات مناسبی را در رابطه با دور آبیاری منطقه ارائه می‌دهند. Sarmadian & Taghizadeh (2010) Mehrijedi با استفاده از تخمین‌گرهای زمین‌آمار و با کمک گرفتن از اطلاعات رقمی سنجه TM به‌عنوان متغیر ثانویه، برخی از ویژگی‌های خاک سطحی، شامل شوری، درصد رطوبت اشباع، نسبت جذب سدیم و درصد آهک را برآورد نمودند. نتایج نشان داد که تخمین‌گرهای زمین‌آمار نسبت به روابط همبستگی خطی از برتری نسبی برخوردار بوده و روش کریجینگ به‌عنوان روش برتر نسبت به روش‌های معمولی برآورد داده‌های

خاک می‌تواند همان مقاومت اصطکاکی ناشی از لغزیدن ذرات روی همدیگر، حرکت غلتک مانند بین دانه‌های مجاور و قفل شدن دانه‌ها در یکدیگر باشد. همین‌طور پیوندهای شیمیایی بین ذرات رس خاک باعث چسبندگی و مقاومت در برابر نیرو و تنش وارده می‌گردد. مقاومت برشی لایه رویین خاک تحت تأثیر ویژگی‌های متفاوتی از خاک می‌باشد که این ویژگی‌ها عبارتند از: شیمی کانی‌ها و کلوئیدهای آلی که بر چسبندگی خاکدانه‌ها اثر می‌گذارند، اندازه، شکل و ساختمان ذرات و خاکدانه‌ها که مقاومت اصطکاکی خاک را تحت تأثیر قرار می‌دهند، وجود شبکه ریشه‌ها که ساختار بزرگتری از خاکدانه‌ها را تشکیل می‌دهند (Khalil Moghadam *et al.*, 2011). Khalil Moghadam براساس پژوهش‌های گذشته در زمینه‌ی فرسایش خاک بیان نمودند که شرایط خاک زمانی که به حد آستانه فرسایش‌پذیری به‌وسیله جریان شیار برسد، به‌وسیله مقاومت برشی لایه رویین خاک کنترل می‌شود. همچنین فرآیند جداسازی ذرات به‌وسیله قطرات باران به مقاومت برشی لایه رویین خاک وابسته است (Bachmann *et al.*, 2006). بنابراین مقاومت برشی لایه رویین خاک می‌تواند همان مقاومت اصطکاکی ناشی از لغزیدن ذرات روی همدیگر، حرکت غلتک مانند بین دانه‌های مجاور و قفل شدن دانه‌ها در یکدیگر باشد. همچنین پیوندهای شیمیایی بین ذرات رس خاک سبب چسبندگی و مقاومت در برابر نیرو و تنش وارده می‌شود (Khalil Moghadam *et al.*, Movahedan *et al.*, 2013). نیز دلیل افزایش مقاومت فروروی با کاربرد برخی پلیمرها را این‌گونه بیان کردند که مواد پلیمری پس از افزوده شدن به خاک، در منافذ خاک نفوذ کرده و در اثر قرار گرفتن در هوای آزاد و سپس تبخیر آب آن‌ها، تشکیل شاخه‌های گسترده پلیمری می‌دهند. در حقیقت ماده پلیمری با افزایش پایداری خاکدانه‌ها در حالت خشک و اتصال خاکدانه‌های خاک سطحی و ذرات منفرد به یکدیگر و بزرگ شدن آن‌ها، سبب افزایش مقاومت فروروی خاک می‌شود. بنابراین با توجه به اهمیت این دو ویژگی مکانیکی خاک، شناخت رفتار در خاک نیاز به درک صحیحی از الگوی تغییرپذیری این ویژگی‌ها دارد.

اطلاع از تغییرپذیری ویژگی‌های خاک و تهیه نقشه آنها برای تعیین نیاز کودی محصولات، مدیریت حاصلخیزی خاک، کشاورزی دقیق و تولید پایدار ضروری است (Brevik *et al.*, 2015). تغییرپذیری ویژگی‌های خاک با این فرض که توزیع ویژگی‌های خاک در طبیعت به‌صورت تصادفی است، اغلب توسط روش‌های آمار کلاسیک بیان می‌شود. در این روش‌ها نتایج به‌دست آمده از اندازه‌گیری نمونه‌ها مستقل از موقعیت مکانی آنها

مکانی خاک معرفی شد.

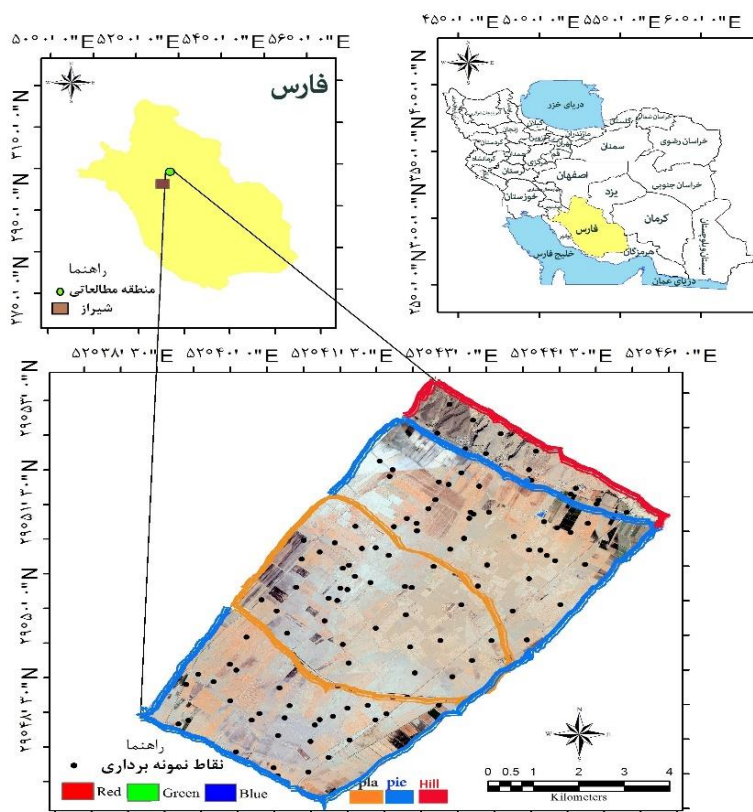
علیرغم اینکه پژوهش‌های متعددی در مورد تغییرپذیری مکانی ویژگی‌های خاک و همچنین اثر کاربری اراضی بر ویژگی‌های خاک انجام شده است اما مطالعات محدودی در مورد اثر کاربری اراضی و واحدهای مختلف فیزیوگرافی بر ویژگی‌های مکانیکی خاک از جمله مقاومت فروروی و برشی انجام شده است. بنابراین مطالعه حاضر باهدف بررسی اثر کاربری اراضی و نوع واحدهای فیزیوگرافی بر مقاومت فروروی و مقاومت برشی خاک و بررسی تغییرات مکانی و تعیین کلاس وابستگی مکانی این ویژگی‌های مهم خاک و درنهایت برآورد آن‌ها با استفاده از روش‌های زمین‌آماري نظیر کریجینگ معمولی، کوکریجینگ و همچنین روش وزن‌دهی معکوس فاصله برای بررسی تغییرات مکانی و درنهایت تهیه نقشه پهنه‌بندی آن‌ها در بخشی از اراضی منطقه لپویی در استان فارس انجام شد.

## مواد و روش‌ها

### موقعیت منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه با مساحت حدود ۵ هزار هکتار بخشی از

اراضی دشت لپویی در استان فارس است که در موقعیت عرض-های جغرافیایی  $29^{\circ} 78'$  تا  $29^{\circ} 88'$  شمالی و طول‌های جغرافیایی  $52^{\circ} 68'$  تا  $52^{\circ} 71'$  شرقی واقع شده است (شکل ۱). از نظر فیزیوگرافی منطقه مورد مطالعه، بر روی واحدهای تپه، دشت‌های دامنه‌ای و دشت با درصد شیب ۱ تا ۱۲ درصد قرار دارد. دامنه تغییرات ارتفاع برابر ۱۵۹۱ تا ۱۶۰۶ متر از سطح دریاو بر اساس اطلاعات اقلیمی ۲۰ ساله ایستگاه هواشناسی زرقان (۱۳۷۹-۱۳۹۹)، میانگین بارندگی سالانه آن ۴۴۶ میلی‌متر و متوسط درجه حرارت ۱۷ درجه سانتی‌گراد است (اداره کل هواشناسی استان فارس). مواد مادری خاک‌های منطقه شامل موادی با منشأ آهک و شیل در ارتفاعات تا مواد آبرفتی و واریزه‌ها در مناطق کم ارتفاع و دشت‌ها می‌باشند. با توجه به نقشه رژیم‌های رطوبتی و حرارتی خاک‌های ایران (Banaie, 1988) منطقه مورد مطالعه دارای رژیم رطوبتی زیریک<sup>۱</sup> و رژیم حرارتی ترمیک<sup>۲</sup> است و خاک‌های منطقه بر اساس سامانه رده‌بندی خاک آمریکایی (۲۰۱۴) در دو رده اینسپیتی سول و انتی سول قرار دارند. کاربری غالب اراضی مورد بررسی شامل مرتع و زراعت آبی (شامل کشت گندم، جو، کلزا و صیفی‌جات) می‌باشند.



شکل ۱- موقعیت منطقه مورد مطالعه و محل نقاط نمونه‌برداری شده. رنگ‌ها به ترتیب نشان دهنده‌ی موقعیت واحدهای فیزیوگرافی تفکیک شده بر روی تصویر ماهواره‌ی گوگل می‌باشد، قرمز (Hill): واحد فیزیوگرافی تپه، آبی (Pie): دشت دامنه‌ای، نارنجی (Pla): دشت

مقاومت فروروی خاک‌ها به وسیله دستگاه نفوذسنج دستی پنترومتر (مدل E.I.E) با میله باریک استوانه‌ای شکل به قطر ۶ میلی‌متر و طول ۵/۷ سانتی‌متر در سه تکرار برای هر نقطه اندازه‌گیری شد به این صورت که نفوذسنج تا حد قسمت علامت‌گذاری شده (حدود ۶ میلی‌متر) به داخل خاک فشار داده شده و مقدار فشار لازم (برحسب مگاپاسکال) برای نفوذ از روی شاخص کناری آن یادداشت شد. در این پژوهش، برای اندازه‌گیری مقاومت برشی لایه رویین خاک از پره برشی استفاده شد. روش کار بدین صورت است که پره برشی در داخل خاک تا جایی که پره‌ها کاملاً در خاک قرار بگیرد وارد می‌شود. سپس شروع به دوران پره برشی در جهت عقربه‌های ساعت کرده و تا برش (گسیختگی) خاک، ادامه می‌دهیم که حدود ۵ تا ۱۰ ثانیه طول می‌کشد. حداکثر مقدار تنش وارده روی صفحه مدرج در بالای پره برشی ثبت می‌شود (شکل ۲).

**مطالعات صحرایی و اندازه‌گیری مقاومت فروروی و برشی خاک**  
ابتدا با استفاده از تصویر Earth Google مربوط به منطقه مورد مطالعه، بررسی‌های اولیه و شناسایی هر چه بهتر موقعیت مشاهدات با دقت کافی انجام شد. سپس بر اساس بازدیدهای صحرایی، در نهایت موقعیت ۱۳۰ نقطه مشاهداتی با متوسط فاصله ۵۰۰ متر بر اساس الگوی نمونه‌برداری طبقه‌بندی تصادفی و درصد تغییرات شیب (تپه بیش از ۱۲ درصد، دشت دامنه‌ای ۲ تا ۵ درصد و دشت ۰ تا ۲ درصد) در هریک از واحدهای فیزیوگرافی نهایی شد. طی عملیات میدانی با استفاده از دستگاه موقعیت‌یاب جهانی (GPS) مختصات جغرافیایی دقیق نقاط ثبت شد. سپس با استفاده از دو دستگاه نفوذسنج دستی و مقاومت-سنج برش پره‌ای به ترتیب دو ویژگی مکانیکی مقاومت فروروی و مقاومت برشی خاک سطحی، در محل و در انتهای فصل تابستان و حدود ۴ تا ۵ ماه پس از آخرین بارندگی که خاک خشک و با رطوبت اولیه بسیار کم بود انجام شد. در این پژوهش تعیین



شکل ۲- نمایی از دستگاه‌های نفوذسنج دستی و مقاومت‌سنج برش پره‌ای مورد استفاده و یکی از نقاط نمونه‌برداری حین عملیات میدانی

محاسبه شد. یکی از روش‌های ارزیابی نرمال بودن داده‌ها استفاده از ضریب چولگی است، هنگامی که این ضریب کمتر از ۰/۵ باشد، داده‌ها احتیاجی به تبدیل نخواهند داشت ولی چنانچه ضریب چولگی بین ۰/۵ تا ۱ و بیشتر از ۱ باشد بایستی فرآیند نرمال‌سازی بر روی داده‌ها انجام شود (Shao, ۲۰۰۶). علاوه بر بررسی توزیع نرمال بودن داده‌ها بر مبنای ضریب چولگی، از هیستوگرام فراوانی و آزمون کولموگروف-اسمیرنوف نیز استفاده شد.

### بررسی‌های آماری و نرمال‌سازی داده‌ها

اولین گام در استفاده از روش‌های زمین‌آماري بررسی وجود ساختار مکانی در بین داده‌ها تحلیل نیم‌تغییرنما می‌باشد. شرط استفاده از این تحلیل و انجام برآوردهای زمین‌آماري نرمال بودن توزیع داده‌ها است (Webster & Oliver, ۲۰۱۴). با استفاده از شاخص‌های آماری میانگین، حداکثر، ضریب چولگی، ضریب کشیدگی و درصد ضریب تغییرات خلاصه آماری و وضعیت نرمال بودن توزیع داده‌ها با استفاده از نرم افزار SPSS نسخه ۲۴

چنانچه نیم‌تغییرنما به سقف معینی برسد و دامنه تأثیر مشخصی داشته باشد، ساختار فضایی و شرایط صدق فرضیه ذاتی می‌تواند وجود داشته باشد (Burgess and Webster, 1980). نیم‌تغییرنما با استفاده از رابطه (۲) محاسبه می‌شود (Goovaerts, 2000).

$$\gamma(h) = \frac{1}{2n(h)} \sum_{i=1}^{n(h)} [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2 \quad (\text{رابطه ۲})$$

که در آن  $\gamma_h$  مقدار نیم‌تغییرنما به ازای هر فاصله  $h$ ،  $N_h$  تعداد جفت نمونه‌های به کاررفته در محاسبه  $\gamma_h$  در فاصله  $h$ ،  $Z(x_i)$  و  $Z(x_i + h)$  به ترتیب مقادیر متغیر مورد نظر در موقعیت‌های نمونه برداری  $x_i$  و  $x_i+h$  می‌باشند. معادلات برآورد برای روش‌های کریجینگ و کوکریجینگ معمولی به صورت روابط (۳) و (۴) می‌باشند:

$$Z^*(x_0) = \sum_{i=1}^n w_i Z(x_i) \quad (\text{رابطه ۳})$$

$$Z^*(x_0) = \sum_{i=1}^n w_i Z(x_i) \sum_{j=1}^m w_j V(x_j) \quad (\text{رابطه ۴})$$

که در آنها  $Z^*(x_0)$  مقدار برآورد شده برای متغیر  $Z$  در نقطه  $x_0$ ،  $Z(x_i)$  و  $V(x_j)$  به ترتیب مقادیر مشاهده شده متغیرهای اصلی و کمکی در موقعیت‌های نمونه برداری  $x_i$  و  $x_j$ ،  $w_i$  و  $w_j$  به ترتیب وزن‌های اختصاص یافته به آنها و  $n$  و  $m$  نیز به ترتیب تعداد مشاهدات متغیرهای اصلی و کمکی می‌باشند (Mohammadi, 2006). متغیرهای کمکی مورد استفاده در این پژوهش شامل مشتقات اولیه و ثانویه مدل رقومی ارتفاع می‌باشد که پس از تهیه و بررسی روابط همبستگی، بهینه‌ترین آنها برای انجام مدل‌سازی انتخاب شدند.

#### متغیرهای کمکی و همبستگی آنها با متغیرهای اصلی

با توجه به اینکه تغییرات خاک‌ها متأثر از نقش عوامل خاکساز می‌باشد، در این تحقیق مشتقات اولیه و ثانویه مدل رقومی ارتفاع با قدرت تفکیک مکانی ۳۰ متر به عنوان متغیر کمکی و نماینده فاکتور خاکساز توپوگرافی برای مدل‌سازی و پیش‌بینی مکانی دو متغیر مقاومت فروروی و مقاومت برشی در مدل کوکریجینگ استفاده شدند. تهیه‌ی این متغیرهای کمکی در نرم‌افزار SAGA GIS نسخه ۴/۷ انجام شد و سپس از میان مجموع ۲۰ فاکتور تهیه شده براساس روش همبستگی خطی پیرسون، در نهایت چهار پارامتر مدل رقومی ارتفاع (پستی و بلندی سطح زمین یا ارتفاع از سطح دریا)، فاصله اقلیدسی تا شبکه آبراه

مطالعات زمین‌آماری شامل دو مرحله‌ی نیم‌تغییرنما و برآورد است. در مرحله‌ی نیم‌تغییرنما، ابتدا وضعیت همسانگردی شاخص‌های پایداری محاسبه شده، ترسیم نیم‌تغییرنماهای رویه-ای در محیط نرم‌افزاری (Arc GIS-10.6.1) بررسی شد و سپس با استفاده از تابع نیم‌تغییرنما (Goovaerts, ۲۰۰۰)، ساختار مکانی آنها بررسی شد. پس از محاسبه‌ی نیم‌تغییرنماهای تجربی برای هر دو ویژگی (مقاومت فروروی و مقاومت برشی)، مدل‌های نظری مناسب برآنها برازش داده شد. در مرحله بعد با استفاده از پارامترهای بهترین مدل برازش داده شده بر نیم‌تغییرنما و با استفاده از تخمینگر کریجینگ معمولی، کوکریجینگ و وزن‌دهی معکوس فاصله، برآورد و تهیه نقشه ویژگی‌های مورد نظر تهیه و پهنه‌بندی‌ها انجام شد.

#### روش‌های درون‌یابی

##### وزن‌دهی معکوس فاصله

در روش وزن‌دهی معکوس فاصله (IDW) برای هر یک از نقاط اندازه‌گیری، وزنی براساس فاصله بین آن نقطه تا موقعیت نقطه مجهول در نظر گرفته می‌شود. سپس این اوزان توسط توان وزن-دهی کنترل می‌شوند، به طوری که توان‌های بزرگ‌تر اثر نقاط دورتر از نقطه مورد برآورد را کاهش داده و توان‌های کوچک‌تر وزن‌ها را به طور یکنواخت‌تری بین نقاط همسایگی توزیع می‌کنند. البته باید توجه داشت که این روش بدون توجه به موقعیت و آرایش نقاط، فقط فاصله آن‌ها را در نظر می‌گیرد، به این معنی که نقاطی که دارای فاصله یکسانی از نقطه برآورد هستند دارای وزن یکسان می‌باشند (Davis, 1987). مقدار فاکتور وزنی با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\lambda_i = \frac{D_i^{-\alpha}}{\sum_{i=1}^n D_i^{-\alpha}} \quad (\text{رابطه ۱})$$

که در آن وزن نقطه  $i$ ، فاصله نقطه  $i$  تا نقطه مجهول و  $\alpha$  توان وزن‌دهی می‌باشد.

##### کریجینگ و کوکریجینگ

در این بخش از پژوهش از دو روش زمین‌آماری کریجینگ معمولی و کوکریجینگ برای برآورد استفاده شد، زیرا هر دو روش، با کمترین خطای برآورد شناخته شده‌اند (Western et al., 2004). کریجینگ یک روش درون‌یابی زمین‌آماري است که از تابع نیم‌تغییرنما ۲ برای بیان همبستگی مکانی استفاده می‌کند، نیم‌تغییرنما به بررسی و شناخت ویژگی‌های ساختاری متغیر ناحیه‌ای می‌پردازد و چگونگی تغییرات آن را بیان می‌نماید،

دقت هر روش است (Lin, 1989). روشی که در آن میزان MAE کوچکتر باشد مقادیر محاسبه شده توسط مدل و مقادیر واقعی به هم نزدیکتر بوده و مدل خطای کمتری دارد.

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i \hat{y}_i)}{\sum_{i=1}^n (y_i \hat{y}_i)} \quad (\text{رابطه ۶})$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (\text{رابطه ۷})$$

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (\text{رابطه ۸})$$

$$MSE = \left| \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\hat{y}_{(x_i)} - y_{(x_i)})^2 \right| \quad (\text{رابطه ۹})$$

که در آنها n تعداد نقاط نمونه‌برداری،  $y(x_i)$  مقدار برآورد شده و  $\hat{y}(x_i)$  مقدار اندازه‌گیری شده متغیر مورد مطالعه می‌باشند.

کوتاه‌ترین فاصله بین هر نقطه تا رودخانه یا آبراهه بر اساس رابطه فیثاغورث، موقعیت نسبی شیب و ارتفاعات شیب‌دار انتخاب شدند.

### اعتبارسنجی

یک تخمینگر مناسب بایستی دارای خطای میانگین مربعات صفر یا نزدیک به صفر باشد و میانگین مجذور خطای آن حتی‌الامکان حداقل مقدار عددی را داشته باشد. هر چه این دو مقدار کوچکتر باشند دقت روش بیشتر است (Abdollahi et al., 2013). بر همین اساس، برای اعتبارسنجی صحت مدل‌های مورد استفاده و همچنین نتایج برآورد، از پارامترهای آماری ضریب تبیین<sup>۱</sup> ( $R^2$ ) به منظور تعیین میزان توافق بین مقادیر مشاهده شده و پیش‌بینی شده (Grimm et al., 2008) است و طبقه‌بندی کمی و کیفی آن در جدول (۱) ارائه شده است استفاده شد. همچنین از خطای میانگین مربعات<sup>۲</sup> (MSE) و ریشه میانگین مربعات خطا<sup>۳</sup> (RMSE) برای بررسی صحت پیش‌بینی یا کیفیت پیش‌بینی و از میانگین قدر مطلق خطا (MAE)<sup>۴</sup> استفاده شد، که MAE نشانگر

جدول ۱- طبقه‌بندی ضریب تبیین برای برآورد ویژگی‌های خاک (Rossel and McBratney, 2008)

طبقه‌بندی کیفیت برآورد	دامنه مقادیر ضریب تبیین
خیلی خوب	> ۰/۸۱
خوب	۰/۶۱ - ۰/۸۱
متوسط	۰/۴۰ - ۰/۶
ضعیف	< ۰/۴

### نتایج و بحث

خلاصه آماری متغیرهای مورد مطالعه در جدول (۲) ارائه شده است. در این جدول آماره‌های توصیفی شامل میانگین، انحراف معیار، چولگی، کشیدگی، مقادیر حداکثر و حداقل همچنین ضریب تغییرات برای دو ویژگی مقاومت فروروی و مقاومت برشی و متغیرهای کمکی منتخب نشان داده شده است. بر اساس طبقه‌بندی متغیرهای با ضریب تغییرات کمتر از ۱۵ درصد دارای تغییرات کم، متغیرهای با تغییرات متوسط دارای ضریب تغییرات ۱۵-۳۵ درصد و متغیرهای با ضریب تغییرات بیش از ۳۵ درصد دارای تغییرات زیاد می‌باشند (Wilding and Dress, 1983). ضریب تغییرات معیاری از تغییرپذیری نسبی است و بر اساس این تقسیم‌بندی ضریب تغییرات مقاومت فروروی، فاصله اقلیدوسی تا شبکه آبراهه<sup>۵</sup> و شاخص موقعیت نسبی شیب با بیشترین ضریب تغییرات دارای کلاس تغییرپذیری زیاد می‌باشند. از دلایل زیاد بودن ضریب تغییرات در منطقه می‌توان

### تحلیل آماری، آنالیز واریانس و مقایسه میانگین

محاسبات آمار توصیفی و نیز آزمون نرمال بودن توزیع داده‌ها با نرم افزار SPSS نسخه ۲۱ انجام شد. برای بررسی اثر نوع کاربری اراضی (مرتع و زراعت آبی) و همچنین نوع واحد فیزیوگرافی (تپه، دشت دامنه‌ای و دشت) بر تغییرات دو ویژگی مقاومت فروروی و مقاومت برشی در خاک‌های مورد مطالعه، از آنالیز واریانس یک-طرفه استفاده و مقایسه میانگین‌ها با استفاده از آزمون LSD در سطح معنی‌داری ۰/۰۵ توسط نرم‌افزار Statistix نسخه ۸/۰ انجام شد. تحلیل تغییرپذیری مکانی ویژگی‌ها بر اساس محاسبه و مدلسازی نیم‌تغییرنمای تجربی با استفاده از نرم افزار GS+ نسخه ۵.1 استفاده شد و پس از برازش مدل، مقادیر پارامترهای نیم-تغییرنماها استخراج شد و سپس درون‌یابی و پهنه‌بندی متغیرها در نقاط نمونه‌برداری نشده با استفاده از روش‌های کریجینگ، کوکریجینگ و IDW در نرم‌افزار ArcGIS انجام شد.

4- Mean absolute error  
Vertical distance to channel network.5

1-Coefficient of determination  
2-Mean square error  
3- Root mean square error

بودن داده‌ها به وسیله هیستوگرام آن‌ها و آزمون کولموگروف اسمیرنوف نیز مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که مقاومت برشی از توزیع نرمال برخوردار است اما مقادیر مقاومت فروروی نرمال نبود که با استفاده از روش تبدیل ریشه دوم نرمال شد. طبق جدول (۲) میانگین مقاومت برشی بیش از مقاومت فروروی است که از دلایلان فشرده نبودن خاک سطحی، تراکم کم و همچنین درصد ماده‌ی آلی خاک است که سبب بهبود تخلخل و تهویه می‌شود. (Khalil Moghadam et al., 2011) بیان کردند مقاومت برشی لایه رویین خاک در مراتع و مراتع تخریب‌شده دارای تغییرپذیری زیادی است که می‌تواند به دلیل تغییرات خاکدانه‌ها در گروه‌های بافتی مختلف و کاربری‌های متفاوت باشد. بررسی داده‌های حاصل از آزمایش مقاومت فروروی و مقاومت برشی نشان داد که حداکثر مقاومت فروروی و برشی در سطح خاک در نقاط مختلف منطقه مورد مطالعه متفاوت است که می‌تواند به دلیل تغییر در ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک و همچنین تغییر کاربری اراضی باشد.

به وضعیت مدیریت زراعی اشاره کرد. درجه تغییرات مقاومت برشی و ارتفاعات شیب‌دار متوسط بوده و طبق جدول (۲) میزان ضریب تغییرات مدل رقومی ارتفاع کم می‌باشد. مقدار حداقل و حداکثر ویژگی مقاومت فروروی به ترتیب از صفر تا چهار مگاپاسکال متغیر می‌باشد و همچنین مقدار مقاومت برشی نیز از ۰/۷۵ تا ۴/۵۰ مگاپاسکال متغیر بود که حاکی از تفاوت هر یک از مقادیر مقاومت‌ها در کاربری‌ها و واحدهای فیزیوگرافی مختلف در منطقه می‌باشد.

نتایج حاصل از آزمون نرمال بودن داده‌ها نشان داد که مقاومت برشی از توزیع نرمال پیروی می‌نماید و ضریب چولگی این ویژگی‌ها بین -۱ و +۱ قرار داشت. مطالعه‌ی چولگی، متداولترین شیوه‌ی بررسی انحراف از توزیع نرمال یک متغیر می‌باشد. چنانچه متغیر مزبور، دارای چولگی خارج از دامنه‌ی -۱ تا +۱ باشد، واریانس‌های آن دارای اعتبار کمتری خواهد بود (Robinson and Metternicht, 2006). با توجه به اینکه چولگی، آماره‌ای توصیفی است (Park, 2008)؛ بنابراین همواره نمی‌تواند قابل اعتماد باشد. به همین دلیل نرمال

جدول ۲- خلاصه آماری متغیر اصلی و متغیرهای کمکی مورد استفاده برای برآورد آن‌ها

شاخص‌های آماری	مقاومت فروروی (مگاپاسکال)	مقاومت برشی (مگاپاسکال)	فاصله اقلیدوسی تا شبکه آبراهه (متر)	موقعیت نسبی شیب	ارتفاعات شیب- دار (متر)	مدل رقومی ارتفاع (متر)
حداقل	۰/۰۰	۰/۷۵	۰/۰۰	۰/۰۰	۳/۲۹	۱۵۷۶
حداکثر	۴/۰۰	۴/۵۰	۲۲/۷۵	۰/۰۸	۱۳/۴۰	۱۶۰۵
میانگین	۰/۵۳	۲/۸۰	۱/۷۸	۰/۰۱	۵/۱۴	۱۵۸۵
انحراف استاندارد	۰/۹۶	۰/۹۵	۲/۸۴	۰/۰۱	۱/۳۷	۴/۱۱
ضریب تغییرات (درصد)	۱۸۰/۵۴	۳۳/۹۹	۱۵۹	۱۲۴	۲۶/۶۸	۰/۲۶
چولگی (Skewness)	۲/۳۶	-۰/۱۶	۵/۴۲	۴/۰۰	۲/۹۰	۲/۰۶
کشیدگی (Kurtosis)	۴/۹۸	-۰/۷۹	۳۴/۵۳	۲۲/۳۹	۱۴/۷۲	۸/۲۷

بنابراین، نیاز به روش‌هایی که تغییرات مقادیر عددی ویژگی‌های خاک را به عنوان تابعی از موقعیت جغرافیایی آنها در نظر بگیرند، احساس می‌شود (Mohammadi, 2006). در این راستا، استفاده از علم زمین آمار می‌تواند کارگشا باشد چرا که درک بهتری از الگوی تغییرپذیری مکانی ویژگی‌های خاک را فراهم می‌آورد (Webster and Oliver, 2007).

#### اثر واحد فیزیوگرافی و کاربری

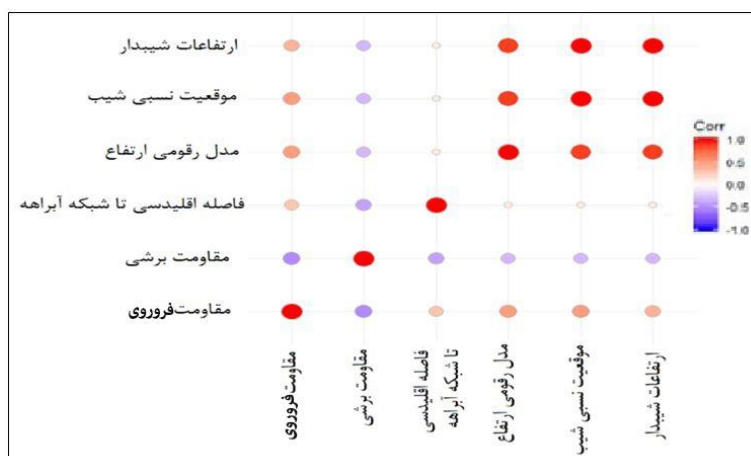
نتایج تجزیه واریانس در خصوص اثر نوع واحد فیزیوگرافی و نوع کاربری اراضی (جدول ۳ و ۴) نشان‌دهنده اثر معنی‌دار عامل کاربری اراضی بر مقاومت برشی و فروروی با مقادیر میانگین مربعات به ترتیب برابر با ۱۹/۵۸ و ۱۳/۲۳ مگاپاسکال در سطح معنی‌داری یک و پنج درصد است و همچنین عامل توپوگرافی نیز بر مقاومت برشی و فروروی با میانگین مربعات به ترتیب برابر با

بر اساس شکل (۳) مقادیر دو پارامتر مقاومت فروروی و مقاومت برشی دارای همبستگی منفی معنی‌دار در سطح یک درصد می‌باشند که نشان‌دهنده ارتباط معکوس و قوی بین این دو پارامتر می‌باشد، همچنین این نوع ارتباط بین پارامترهای فاصله اقلیدوسی تا شبکه آبراهه - مقاومت برشی، مساحت حوزه آبخیز - مقاومت برشی، شاخص موقعیت نسبی - مقاومت برشی، ارتفاعات شیب‌دار - مقاومت برشی، مدل رقومی ارتفاع - مقاومت برشی برقرار است. با وجودی که استفاده از ضریب تغییرپذیری تا حدودی می‌تواند بازگوکننده‌ی پراکنش نسبی متغیرها باشد؛ لیکن این عامل، جزئی از آمار کلاسیک محسوب می‌شود که در آن به دلیل داشتن فرض‌هایی نظیر استقلال نمونه‌ها از یکدیگر، قادر به ارائه‌ی ساختار مکانی ویژگی‌های خاک نمی‌باشد؛



واحدهای دشت و دشت دامنه‌ای با واحد فیزیوگرافی تپه می‌باشد. البته شایان ذکر است روند تغییرات مقایسه میانگین برای دو متغیر نشان‌دهنده رابطه عکس وابستگی آن‌ها در ارتباط با واحدهای فیزیوگرافی می‌باشد به نحوی که در واحد فیزیوگرافی تپه مقدار مقاومت فروری بیشتر از مقاومت برشی بوده و عکس آن در دو واحد دشت و دشت دامنه‌ای نسبت به تپه در خصوص تغییرات مقاومت فروری دیده می‌شود.

۸/۹۸ و ۹/۵ مگاپاسکال در سطح یک درصد اثر معنی‌دار دارد که نشان‌دهنده تأثیر معنی‌دار این دو عامل بر تغییرات دو متغیر مکانیکی مورد مطالعه در خاک است. نتایج مقایسه میانگین اثر نوع واحد فیزیوگرافی (تپه، دشت دامنه‌ای و دشت) و کاربری اراضی (مرتع و کشت آبی) بر هر دو پارامتر مقاومت فروری و مقاومت برشی با استفاده از آزمون LSD در شکل (۴) ارائه شده است. بر اساس شکل‌های (۴ الف و ب) نتایج حاکی از وجود اختلاف معنی‌دار بین دو متغیر مقاومت برشی و فروری بین



شکل ۳- همبستگی خطی بین متغیرهای هدف و متغیرهای کمکی در منطقه مورد مطالعه

یا وجود شن بیشتر در خاک کاربری باغ در مقایسه با دو کاربری دیگر باشد. با بررسی اثر واحدهای مختلف فیزیوگرافی بر روی دو پارامتر مکانیکی مقاومت فروری و مقاومت برشی نشان داده شد که میزان مقاومت برشی در واحدهای فیزیوگرافی دشت دامنه‌ای و دشت در مقایسه با تپه به‌طور معنی‌داری افزایش یافت در حالی که میزان پارامتر مقاومت فروری در واحدهای فیزیوگرافی دشت دامنه‌ای و دشت نسبت به تپه کاهش معنی‌داری داشتند. تخریب اراضی به‌طور معنی‌داری مقاومت برشی لایه رویین خاک را کاهش داده است (Khalil Moghadam et al., 2011).

نتایج مقایسه میانگین نوع کاربری اراضی (شکل‌های ۴ پ و ت) نیز نشان‌دهنده وجود اختلاف معنی‌دار بین مقدار دو پارامتر مکانیکی مورد بررسی در دو کاربری مرتع و کشت آبی می‌باشد. مقاومت‌های فروری و برشی در اثر عملیات مدیریت اراضی که بر نوع پوشش گیاهی، ماده آلی، ساختمان و تخلخل خاک اثر می‌گذارد، تغییر می‌یابد. (Mozafari et al., 2019) بیان کردند عدم وجود تفاوت در جرم مخصوص ظاهری در کاربری‌های زراعت معمولی و زراعت یونجه قابل توجه است. ولی با توجه به زیاد بودن ماده آلی در کاربری باغ نسبت به دو کاربری دیگر می‌تواند به دلیل فشردگی خاک در اثر ورود دام‌های اهلی به زمین باغ و

جدول ۳- نتایج تجزیه واریانس اثر واحد فیزیوگرافی بر مقاومت برشی و فروری در خاک‌های منطقه مورد مطالعه

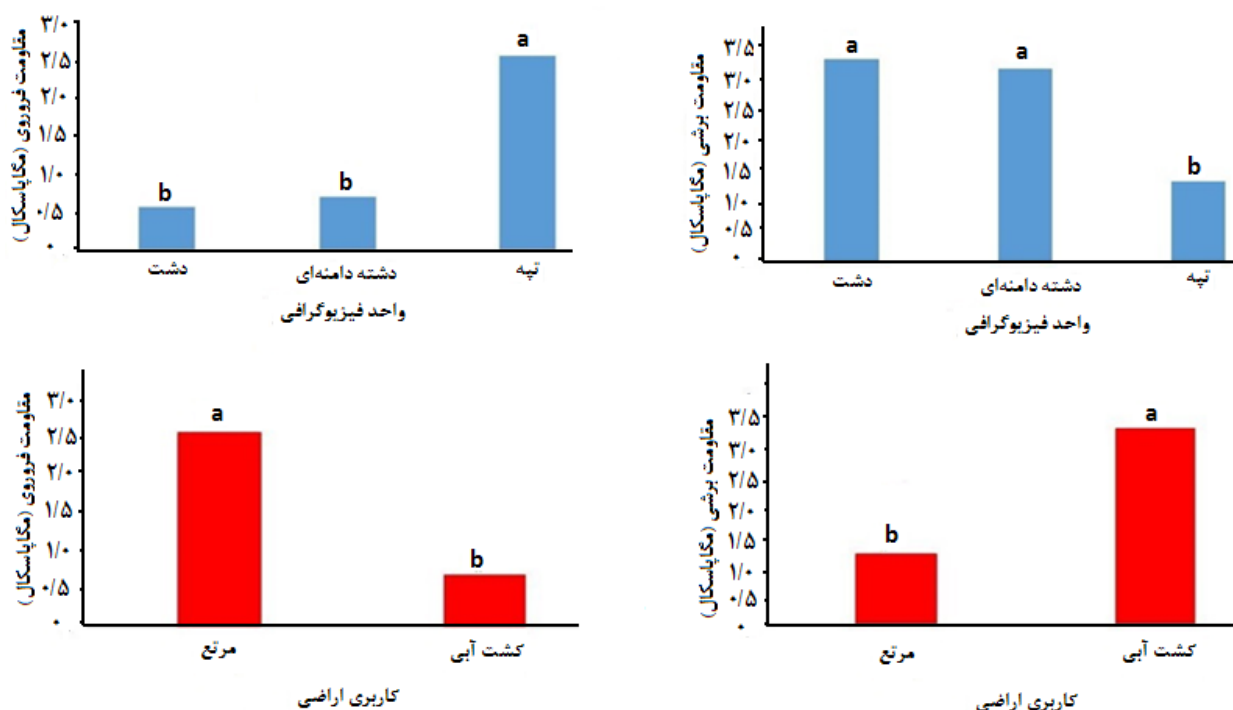
میانگین مربعات		درجه آزادی	منابع تغییر
مقاومت فروری	مقاومت برشی		
**۹/۵۰	**۸/۹۸	۲	کاربری
۱/۲۳۷	۰/۵۳۸	۱۴	خطا
۸۹/۴۶	۲۹/۷۰		ضریب تغییرات (درصد)

\*\* و \* به ترتیب در سطوح ۱ و ۵ درصد معنی‌دار می‌باشند.

جدول ۴- نتایج تجزیه واریانس اثر کاربری اراضی بر مقاومت برشی و فروری در خاک‌های منطقه مورد مطالعه

میانگین مربعات		درجه آزادی	منابع تغییر
مقاومت فروری	مقاومت برشی		
*۱۳/۲۳	**۱۹/۵۸	۱	کاربری
۱/۳۶۱	۰/۶۷۴	۷	خطا
۷۳/۳۶	۳۴/۸۶		ضریب تغییرات(درصد)

\*\* و \* به ترتیب در سطوح ۱ و ۵ درصد معنی دار می‌باشند.



شکل ۴- نتایج مقایسه میانگین مقاومت فروری و برشی (مگاپاسکال) در خاک‌های مورد مطالعه در کاربری‌های مختلف اراضی و واحدهای فیزیوگرافی در منطقه مورد مطالعه (در هر شکل حروف مشابه نشان‌دهنده عدم وجود تفاوت معنی دار در ویژگی‌های مورد مطالعه بر اساس آزمون LSD در سطح احتمال پنج درصد است)

#### ناهمسانگردی

شد. اما برای سایر موارد که این نسبت کمتر از ۲/۵ به دست آمد، همه نیم‌تغییرنماها همسانگرد در نظر گرفته شدند. قطر بزرگ بیضی نشان‌دهنده جهتی است که متغیر مورد بررسی دارای بیشترین پیوستگی مکانی و قطر کوچک آن نشان‌دهنده جهتی است که دارای کمترین پیوستگی مکانی است. بیضی‌های ناهمسانگردی شکل (۵) نشان می‌دهند که ویژگی‌های مورد مطالعه دارای بیشترین پیوستگی در جهت شمال شرق- جنوب غرب و کمترین پیوستگی در جهت شمال غرب- جنوب شرق می‌باشند. مقادیر دامنه نیم‌تغییرنما (قطرهای بیضی) در جهت‌های مختلف می‌تواند به عوامل متعددی از جمله فرسایش، رسوب‌گذاری، پوشش اراضی، توپوگرافی، مواد مادری و فعالیت‌های انسان بستگی داشته باشد (Tesfahunegn et al., 2011). با

استفاده از بیضی ناهمسانگردی از روش‌های رایج برای بررسی میزان ناهمسانگردی است. هرچند که شاخص دقیقی برای کمی کردن میزان ناهمسانگردی وجود ندارد، ولی در صورتی که این نسبت کمتر از ۲/۵ باشد می‌توان از ناهمسانگردی صرف نظر کرد و تغییرنما را همسانگرد در نظر گرفت (Oliver & Webster, 2014). این نسبت برای مقاومت فروری و مقاومت برشی بر اساس تخمینگر کریجینگ معمولی و کوکریجینگ به ترتیب برابر ۲/۷۲، ۱/۳۰، ۱/۳۹ و ۱/۲۴ به دست آمد (جدول ۵). با توجه به اینکه مقدار نسبت ناهمسانگردی برای نیم‌تغییرنمای مقاومت فروری برای استفاده در تخمینگر کریجینگ معمولی بیشتر از ۲/۵ به دست آمد بنابراین نیم‌تغییرنمای آن ناهمسانگرد در نظر گرفته

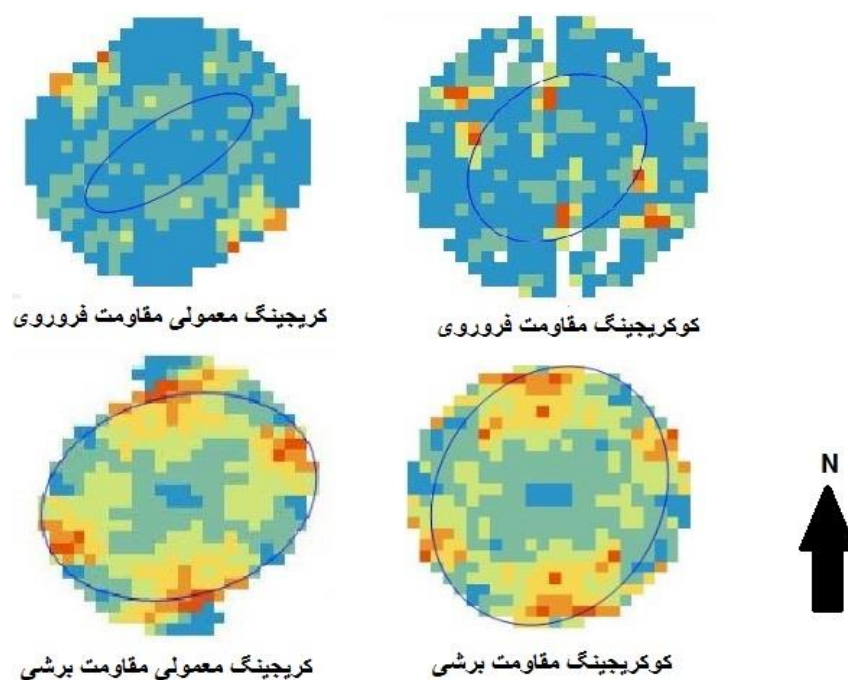
رسوب‌گذاری در این امتداد نسبت به امتداد عمود بر آن از تغییرپذیری کمتری برخوردارند و در نتیجه دامنه نیم‌تغییرنا در این جهت بیشتر است (Uyan, 2016).

توجه به نتایج به‌دست‌آمده بیشترین پیوستگی مکانی در امتداد شمال شرق - جنوب غرب است که با واقعیت منطقه نیز سازگار است؛ زیرا شیب، کاربری اراضی، مواد مادری و وضعیت

جدول ۵- مقادیر کوچک‌ترین دامنه، بزرگ‌ترین دامنه و نسبت ناهمسانگردی نیم‌تغییرنماهای مقاومت فروری و مقاومت برشی برای استفاده در تخمینگرهای

#### کریجینگ معمولی و کوکریجینگ

متغیر	تخمینگر	کوچک‌ترین دامنه (متر)	بزرگ‌ترین دامنه (متر)	نسبت ناهمسانگردی
مقاومت فروری	کریجینگ معمولی	۱۵۱۴/۲۴۱	۴۱۳۳/۲۷۳	۲/۷۲
	کوکریجینگ	۳۷۸/۱۱۸	۴۹۴/۱۲۴	۱/۳۰
مقاومت برشی	کریجینگ معمولی	۴۹۰۹/۳۷۶	۶۸۵۵/۴۹	۱/۳۹
	کوکریجینگ	۵۰۳۰/۲۷۵	۶۲۶۳/۸۷۳	۱/۲۴



شکل ۵- بیضی‌های ناهمسانگردی تغییرنماهای مقاومت فروری و مقاومت برشی برای برآورد با استفاده از روش کریجینگ معمولی و تغییرنماهای متقابل آنها برای برآورد با استفاده از روش کوکریجینگ

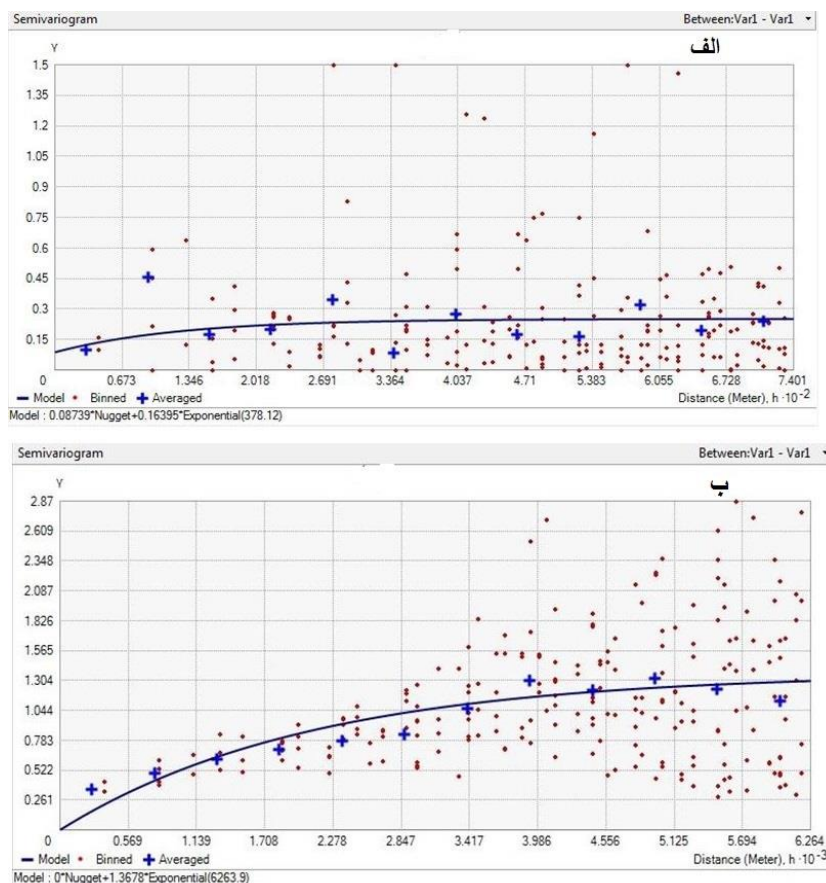
بود (به جز نیم‌تغییرنمای مقاومت فروری برای استفاده در تخمینگر کریجینگ معمولی که با نسبت ناهمسانگردی ۲/۷۲، ناهمسانگرد در نظر گرفته شد). در شکل (۶) تغییرنمای همه جهته مقاومت فروری و برشی و در جدول (۶) پارامترهای تغییر-نمای ویژگی‌های موردنظر نشان داده شده است.

#### تغییرپذیری مکانی

یکی از مهم‌ترین اهداف استفاده از روش‌های زمین‌آماري بررسی وجود ساختار مکانی در بین داده‌ها از طریق تحلیل نیم‌تغییرنما می‌باشد. نیم‌تغییرنمای تجربی متغیرهای مورد مطالعه نشان‌دهنده یکسان بودن پیوستگی مقادیر این متغیرها در جهت-های جغرافیایی مختلف و همسانگرد بودن تغییرات این متغیرها

جدول ۶- بهترین مدل برازش داده شده به تغییرنمای ویژگی‌های مورد مطالعه و ضرایب آن‌ها

متغیر	مدل	ضریب تبیین	دامنه تأثیر (متر)	اثر قطعه‌ای ( $C_0$ )	حد آستانه ( $C_0 + C$ )	نسبت $C_0/C_0+C$	کلاس وابستگی مکانی
مقاومت فروری	نمایی	۰/۵۲	۳۷۸۰	۰/۰۸	۰/۱۶	۰/۵	متوسط
مقاومت برشی	نمایی	۰/۷۴	۶۲۶۴	۰/۰۰	۱/۳۶	۰	قوی



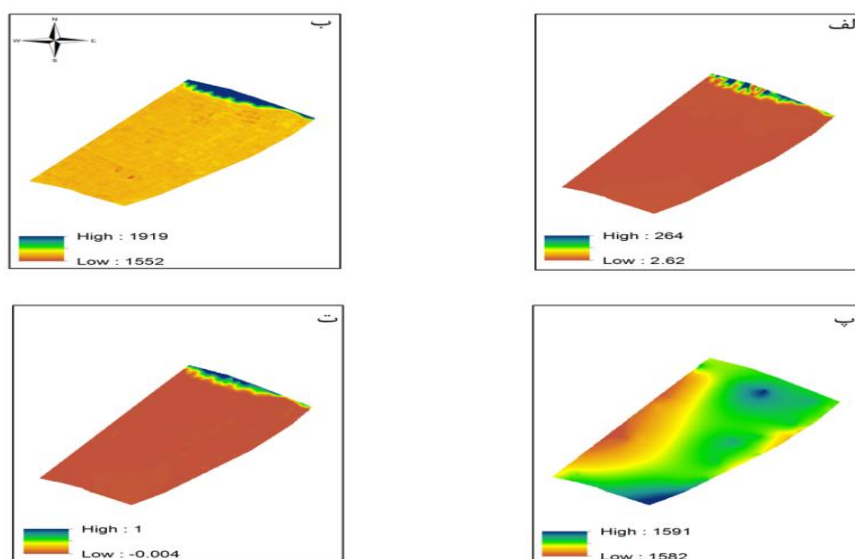
شکل ۶- نیم تغییرنمای همه جهته الف) مقاومت فروروی و ب) مقاومت برشی در خاک‌های منطقه مورد مطالعه. نقاط قرمز (Binned) نشان‌دهنده زوج نقاط مورد استفاده برای محاسبه نیم تغییرنما به ازای هر فاصله مشخص و نقاط آبی (Average) نشان‌دهنده میانگین مقادیر نیم تغییرنما به ازای هر فاصله مشخص می‌باشد.

متغیر مورد مطالعه را مشخص می‌کند و اطلاعاتی در رابطه بافاصله مجاز نمونه برداری ارائه می‌کند (Taati *et al.*, 2020).

#### متغیرهای کمکی

در این پژوهش از مشتقات اولیه و ثانویه مدل رقومی ارتفاع با تفکیک مکانی ۳۰ متر به عنوان متغیر کمکی و نماینده فاکتور خاک ساز توپوگرافی برای مدل سازی و پیش بینی مکانی دو متغیر اصلی مقاومت فروروی و مقاومت برشی استفاده شد. از این متغیرهای کمکی برای تخمینگر کوکریجینگ استفاده می‌شود. در این پژوهش برای برآورد مقاومت برشی و فروروی از متغیرهای کمکی فاصله اقلیدسی تا شبکه آبراهه، موقعیت نسبی شیب، ارتفاعات شیب دار و مدل رقومی ارتفاع استفاده شد (شکل ۷) و بر اساس ضریب همبستگی محاسبه شده (شکل ۳)، در هر مورد از متغیر کمکی که بیشترین ضریب همبستگی با متغیر مورد مطالعه را داشت (مدل رقومی ارتفاع برای مقاومت فروروی و فاصله اقلیدسی تا شبکه آبراهه برای مقاومت برشی) به عنوان متغیر کمکی برای برآورد با استفاده از روش کوکریجینگ استفاده شد.

براساس شکل (۶) نیم تغییرنمای تجربی برای متغیر مقاومت برشی نشان دهنده مقادیر اثر قطعه ای کمتر، دامنه تأثیر زیادتر و حد آستانه کمتر است که بیانگر وجود ساختار مکانی قوی تر می باشد، در حالی که برای مقاومت فروروی با افزایش اثر قطعه ای و کاهش حد آستانه کلاس وابستگی مکانی متوسط مشاهده می شود. مدل های برازش داده شده برای دو متغیر مقاومت فروروی و مقاومت برشی، نمائی بود. نسبت اثر قطعه ای به آستانه را می توان برای ارزیابی ساختار مکانی داده ها مورد بررسی قرارداد. هنگامی که این نسبت کمتر از ۲۵ درصد، ۲۵ تا ۷۵ درصد و بیش از ۷۵ درصد باشد متغیر به ترتیب دارای ساختار مکانی قوی، متوسط و ضعیف می باشد. همچنین در جدول (۶) مشاهده می شود که با توجه به اینکه نسبت اثر قطعه ای به آستانه برای مقاومت فروروی ۰/۵ است این پارامتر دارای پیوستگی مکانی متوسط است. همچنین این نسبت برای مقاومت برشی کمتر از ۰/۲۵ به دست آمد که نشان دهنده ساختار مکانی قوی می باشد. دامنه تأثیر داده ها نیز حد واسط ۳۷۸۰ تا ۶۲۶۴ متر است که دامنه تأثیر بیشتر مربوط به مقاومت برشی و دامنه تأثیر کمتر در مقاومت فروروی مشاهده می شود. دامنه، حد همبستگی مکانی



شکل ۷- پراکنش مکانی متغیرهای کمکی مورد استفاده برای پیش‌بینی مقاومت فروروی و مقاومت برشی. (الف: موقعیت نسبی شیب، ب: مدل رقومی ارتفاع، پ: فاصله اقلیدسی تا شبکه آبراهه، ت: ارتفاعات شیب‌دار)

#### درون‌یابی و بررسی عملکرد مدل‌ها

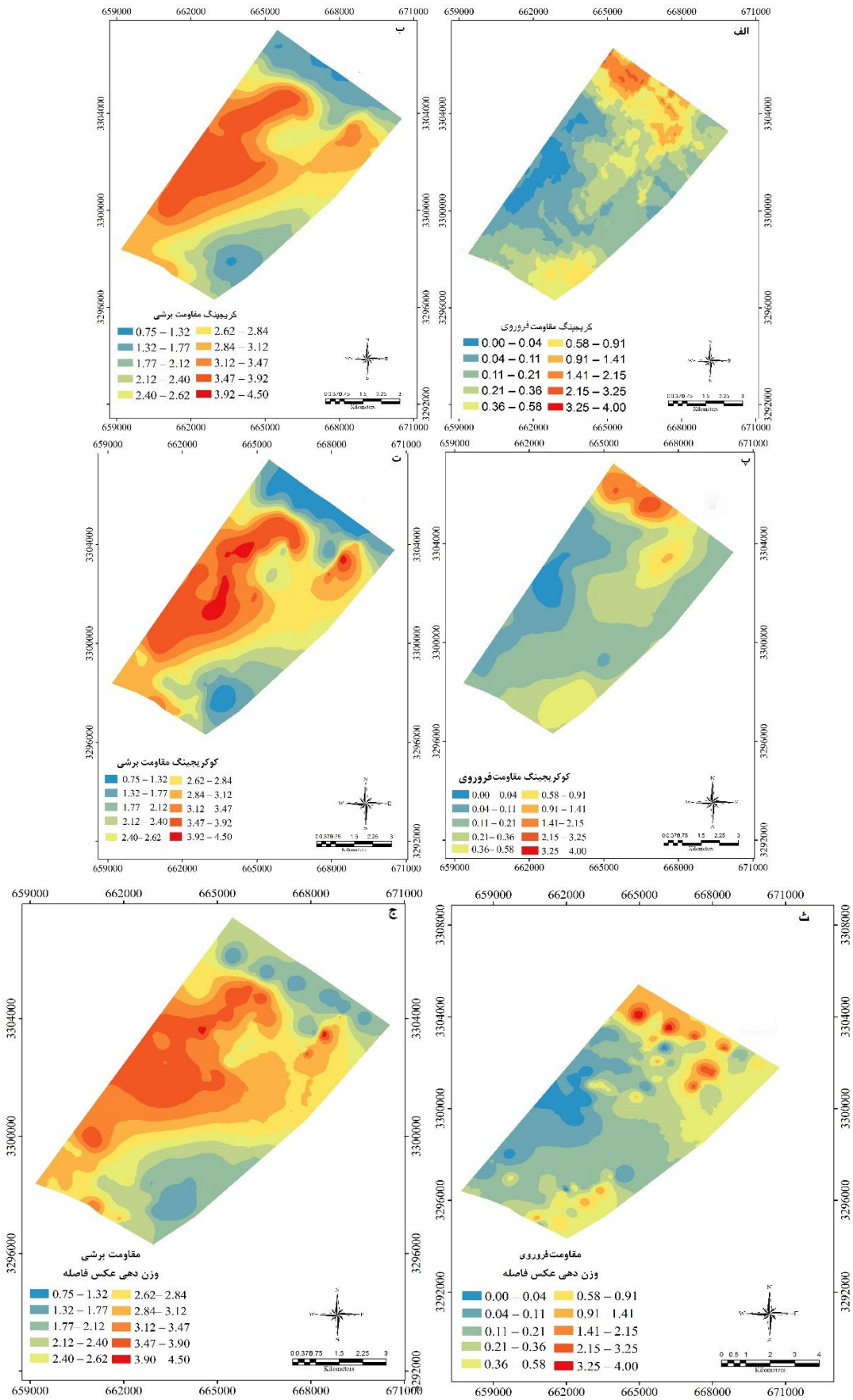
نتایج برآورد مقاومت فروروی و برشی لایه رویین خاک با سه مدل کریجینگ معمولی، کوکریجینگ (با متغیرهای کمکی ذکر شده در بخش‌های قبل) و وزن‌دهی معکوس فاصله در جدول (۷) ارائه شده است. نتایج بیانگر این است که مقادیر ضریب تبیین ( $R^2$ ) برای برآورد مقاومت برشی خاک با استفاده از روش‌های کوکریجینگ، کریجینگ معمولی و وزن‌دهی معکوس فاصله به ترتیب برابر با  $0/554$ ،  $0/534$  و  $0/440$  است که نشان‌دهنده عملکرد بهتر دو روش کوکریجینگ و سپس کریجینگ در برآورد این ویژگی می‌باشد. همچنین نتایج اعتبارسنجی مقاومت فروروی بر مبنای ضریب تبیین نشان داد که در روش‌های کوکریجینگ، کریجینگ معمولی و وزن‌دهی معکوس فاصله به ترتیب اعداد  $0/38$ ،  $0/217$  و  $0/39$  حاصل شده است و همانند مقاومت برشی برای مقاومت فروروی نیز دو روش کوکریجینگ و کریجینگ معمولی دارای عملکرد بهتری بودند (جدول ۷). تفاوت آماره‌های

ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) و میانگین قدر مطلق خطا (MAE) بین سه روش درون‌یابی در برآورد مقاومت برشی برخلاف مقاومت فروروی چندان مشهود نبود و خطای میانگین مربعات (MSE) برای روش‌های درون‌یابی مربوط به برآورد دو متغیر بین  $0/002$  تا  $0/082$  بود. همان‌گونه که در جدول (۷) نشان داده شده است برای متغیر مقاومت فروروی بهترین تخمینگر در بین روش‌های زمین‌آماری کوکریجینگ با  $RMSE=0/01$  و  $R^2=0/38$  می‌باشد و در بین مدل‌های استفاده شده دارای بیشترین دقت تخمین است. برای برآورد مقاومت برشی نیز بهترین روش زمین‌آماری مورد استفاده کوکریجینگ است ( $RMSE=0/04$  و  $R^2=0/554$ ) همچنین براساس نتایج جداول ۱ و ۷ روش‌های زمین‌آماری کریجینگ معمولی و کوکریجینگ برای برآورد مقادیر مقاومت برشی دارای دقت متوسط می‌باشد و روش‌های کریجینگ معمولی، کوکریجینگ و وزن‌دهی معکوس فاصله برای برآورد مقادیر مقاومت فروروی دارای عملکرد ضعیف می‌باشند.

جدول ۷- نتایج اعتبارسنجی پیش‌بینی مکانی مقاومت فروروی و مقاومت برشی در خاک‌های مورد مطالعه

متغیر	تخمینگر	$R^2$	RMSE	MSE	MAE
مقاومت فروروی	کریجینگ معمولی	0/217	0/05	0/003	0/0005
	کوکریجینگ	0/38	0/01	0/0002	0/0003
	وزن دهی معکوس فاصله	0/039	0/68	0/474	0/072
مقاومت برشی	کریجینگ معمولی	0/534	0/14	0/021	0/015
	کوکریجینگ	0/554	0/04	0/002	0/005
	وزن دهی معکوس فاصله	0/440	0/28	0/082	0/029

$R^2$ : ضریب تبیین، RMSE: ریشه میانگین مربعات خطا، MSE: خطای میانگین مربعات، MAE: میانگین قدر مطلق خطا



شکل ۸- نقشه پهنه‌بندی مقاومت فروری و مقاومت برشی برآورد زده‌شده با روش‌های برآورد مختلف در منطقه مورد مطالعه

روش‌های برآورد کرچینگ، کوکرچینگ و وزن دهی معکوس

نقشه‌های پهنه‌بندی مقاومت فروری و برشی با استفاده از

فاصله در شکل (۸) نشان داده شده است.

مقایسه نتایج به دست آمده از سه روش برآورد کریجینگ معمولی، کوکریجینگ و وزن‌دهی معکوس فاصله برای برآورد مقاومت فروری و مقاومت برشی در منطقه مورد مطالعه نشان داد که استفاده از روش کوکریجینگ برای پهنه‌بندی هر دو پارامتر مکانیکی خاک نسبت به دو روش دیگر دارای صحت و دقت بیشتری می‌باشد. با توجه به شکل (۸) مقدار مقاومت برشی از شمال شرقی به جنوب غربی از مقدار ۰/۷۵ به ۳/۴۷ مگاپاسکال افزایش یافته است که نشان‌دهنده افزایش تراکم در این نواحی می‌باشد. جابجایی برشی خاک که از شروع برش تا نقطه ماکزیمم برش رخ می‌دهد به نوع و شرایط فیزیکی خاک بستگی دارد، همچنین اندازه‌گیری مقاومت برشی شدیداً به حالت تراکم خاک وابسته است (Komandi, 1992). همچنین افزایش جرم مخصوص ظاهری خاک نشان‌دهنده تراکم زیاد ذرات خاک است و در نتیجه نیروی بیشتری برای از هم گسیختگی آن نیاز است (Brevik et al., 2015). لازم به یادآوری است که با افزایش رطوبت، مقاومت برشی در هر یک از نقاط نمونه‌برداری نیز به‌طور معنی‌داری کاهش می‌یابد (Rezae and Tabatabai, 2019). بیان کردند که نیروهای چسبندگی سطحی میان ذرات آب‌و خاک‌ضعیف‌تر از نیروهای چسبندگی بین ذرات خاک است بنابراین با افزایش رطوبت، مقاومت برشی خاک کاهش می‌یابد. از دلایل کاهش مقاومت برشی در بخش شمالی منطقه این است که این مناطق بر روی واحد فیزیوگرافی تپه و کاربری مرتع واقع شده‌اند و نسبت به سایر اراضی مورد مطالعه (واحدهای دشت و دشت دامنه‌ای) براساس مشاهدات میدانی دارای عوارض فرسایشی شدید، سنگ و سنگریزه و شسته شدن خاک سطحی می‌باشند که می‌تواند از مهم‌ترین دلایل کاهش مقدار این پارامتر در خاک سطحی نسبت به مناطق پایین‌دست باشد. شخم مراتع سبب تخریب خاکدانه‌ها می‌شود و از طرفی وجود جریان‌های رواناب به راحتی ذرات ریز را از مناطق مرتفع به مناطق پست حمل می‌نماید بنابراین مقاومت برشی لایه رویین در مناطق بالادست به دلیل از دست رفتن خاک و تجمع سنگریزه کاهش و در پایین‌دست به دلیل تشکیل سله افزایش می‌یابد (Castro Filho et al., 2002). Western et al. (2004) دلیل کاهش مقاومت برشی خاک با افزایش رطوبت را کاهش مقاومت اصطکاکی بین ذرات خاک دانستند. در نواحی که پوشش گیاهی و ماده‌ی آلی خاک بیشتر بود، مشاهده شد که مقاومت برشی کمتر است که می‌تواند به این دلیل باشد که در لایه‌های سطحی خاک، توسط ریشه گیاه منافذ و ترک‌هایی ایجاد شده که منجر به مقاومت برشی کمتر می‌شود. این نتایج بان‌تایچ Shao et al. (2006) که بیان کردند مقاومت برشی معمولاً با

افزایش جرم مخصوص ظاهری افزایش می‌یابد هم خوانی دارد. براساس شکل (۲) سه پارامتر فاصله اقلیدسی تا شبکه آبراهه، ارتفاعات شیب‌دار و موقعیت نسبی شیب با مقاومت برشی رابطه منفی و معنی‌دار در سطح یک درصد نشان دادند. Khalil Moghadam et al. (2011) گزارش نمودند که با توجه به اینکه شیب از عوامل خاک‌ساز است بر شدت هوازدگی خاک و ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی آن مؤثر است؛ همچنین ایشان ارتباط معکوس بین ویژگی‌های توپوگرافی (درصد شیب) را با پارامتر مقاومت برشی لایه سطحی خاک در مدل‌های رگرسیونی برازش داده‌ی خود گزارش نمودند.

بر اساس شکل (۷) مشاهده می‌شود که مقادیر مقاومت فروری از شمال شرقی به جنوب غربی از مقدار ۲/۱۵ به ۰/۰۴ مگاپاسکال بر سانتی‌متر مربع در منطقه کاهش می‌یابد. همچنین مشاهده می‌شود که در بخش‌های مرکزی منطقه و همچنین در امتداد جنوب غربی منطقه کمترین مقدار مقاومت فروری وجود دارد که از دلایل آن می‌توان به واقع شدن این مناطق در واحدهای فیزیوگرافی دشت و دشت دامنه‌ای اشاره کرد که سبب وجود پوشش گیاهی مناسب، انجام عملیات خاک‌ورزی حداقل، استفاده از کودهای آلی و وضعیت ساختمان و خلل و فرج خاک مطلوب سطحی سبب کاهش مقاومت فروری می‌شود. برخی پژوهشگران نیز گزارش کردند افزودن مواد آلی از طریق کاربرد کود دامی، ورمی‌کمپوست و لجن بیولوژیکی سبب ایجاد خاکدانه‌های قوی و پایدار و سبب کاهش تشکیل سله در لایه سطحی خاک و در نهایت منجر به کاهش مقاومت فروری خاک می‌شود (Asghari et al., 2013). براساس نتایج همبستگی بین مقادیر مقاومت فروری و مقاومت برشی با پارامترهای توپوگرافی موقعیت نسبی شیب به- ترتیب مقاومت فروری دارای رابطه‌ی مثبت و معنی‌دار قوی و مقاومت برشی دارای ارتباط منفی بود. در پژوهشی Khalil Moghadam et al. (2011) با استفاده از پارامترهای خاک و ویژگی‌های توپوگرافی از قبیل شیب، جهت شیب و ارتفاع به پیش‌بینی مکانی مقاومت برشی لایه‌ی رویین خاک پرداختند و مشاهده کردند که ضمن تاثیر ویژگی‌های توپوگرافی در پیش‌بینی مقاومت برشی خاک در مدل‌های رگرسیونی حاصل مشابه با نتایج این تحقیق رابطه‌ی رگرسیونی منفی از خود نشان دادند.

### نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر نشان داد کاربری اراضی و نوع واحدهای فیزیوگرافی اثر معنی‌داری بر مقاومت فروری و مقاومت برشی داشتند و همچنین سیستم اطلاعات جغرافیایی و زمین‌آمار از قابلیت نسبتاً مناسبی برای بررسی توزیع مکانی و پهنه‌بندی

می‌شود در مطالعات آینده علاوه بر استفاده از سایر روش‌های درون‌یابی، از شاخص‌های مستخرج از تصویر ماهواره‌ای و دیگر نمایندگان فاکتورهای خاکسازي در کنار سایر مدل‌های خطی و غیرخطی در پیش‌بینی این دو پارامتر مهم فیزیکی خاک در منطقه استفاده شود.

لازم به ذکر است در پژوهش حاضر اندازه‌گیری مقاومت فروری و برشی خاک در انتهای فصل تابستان و حدود ۴ تا ۵ ماه پس از آخرین بارندگی که خاک خشک و با رطوبت اولیه بسیار کم بود انجام شده است و عملاً در زمان اندازه‌گیری رطوبت خاک-ها ناچیز و تقریباً یکسان بوده است. با توجه به اینکه در این پژوهش هدف بررسی تغییرات مکانی و همچنین مقایسه مقادیر مقاومت فروری و برشی در کاربری‌ها و واحدهای فیزیوگرافی در شرایط طبیعی و مزرعه بود بنابراین عملاً حتی چنانچه تغییرات جزئی رطوبت در زمان اندازه‌گیری وجود داشته باشد با لحاظ هدف مطالعه، اشکالی ایجاد نخواهد نمود. البته پیشنهاد می‌شود در مطالعات بعدی در زمان اندازه‌گیری مقاومت‌های فروری و برشی، میزان رطوبت خاک نیز اندازه‌گیری و اثر مقدار رطوبت بر ویژگی‌های مذکور بررسی شود.

**"هیچ‌گونه تعارض منافع بین نویسندگان وجود ندارد"**

## REFERENCES

- Abdollahi, S., Delavar, M. A., & Shekari, P. (2013). Spatial distribution mapping of Pb, Zn and Cd and soil pollution assessment in Anguran area of Zanjan province. *Journal of Water and Soil*, 6, 1410-1420.
- Aghasi, B., Jalalian, A., Khademi, H., & Toomanian, N. (2017). Sub-basin scale spatial variability of soil properties in Central Iran. *Arabian Journal of Geosciences*, 10(6), 136.
- Asghari, Sh., Neyshabouri, F., Abasi, N., Asghar Zadeh, Sh., & Ostan. (2013). Effect of polyacrylamide, manure, vermicompost and biological sludge on aggregate stability, subsidence resistance and water usability in a sandy loam soil. *Journal of Soil and Water Knowledge*, 20, 15-29.
- Bachmann, J., Contreras, K., Hartge, K. H., & MacDonald, R. (2006). Comparison of soil strength data obtained in situ with penetrometer and with vane shear test. *Soil and Tillage Research*, 87(1), 112-118.
- Brevik, E. C., Cerdà, A., Mataix-Solera, J., Pereg, L., Quinton, J. N., Six, J., & Van Oost, K. (2015). The interdisciplinary nature of soil. *Soil*, 1(1), 117-129.
- Burgess, T. M., & Webster, R. (1980). Optimal interpolation and isarithmic mapping of soil properties: II block kriging. *Journal of Soil Science*, 31(2), 333-341.
- Castro Filho, C. D., Lourenço, A., Guimarães, M. D. F., & Fonseca, I. C. B. (2002). Aggregate stability under different soil management systems in a red latosol in the state of Parana, Brazil. *Soil and Tillage Research*, 65(1), 45-51.
- Davis, B. M. (1987). Uses and abuses of cross-validation in geostatistics. *Mathematical geology*, 19(3), 241-248.
- Emadi, M., Shahriari, A. R., Sadegh-Zadeh, F., Jalili Seh-Bardan, B., & Dindarlou, A. (2016). Geostatistics-based spatial distribution of soil moisture and temperature regime classes in Mazandaran province, northern Iran. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 62(4), 502-522.
- Goovaerts, P. (2000). Geostatistical approaches for incorporating elevation into the spatial interpolation of rainfall. *Journal of Hydrology*, 228(1-2), 113-129.
- Grimm, R., Behrens, T., Märker, M., & Elsenbeer, H. (2008). Soil organic carbon concentrations and stocks on Barro Colorado Island- Digital soil mapping using Random Forests analysis. *Geoderma*, 146(1-2), 102-113.
- Jahangardi, M., & Pedometry T. (2006). *Spatial statistics*. First Ed., Tehran. Eyelid Publications. 453 p.
- Khalil Moghadam, B., Afyoni, M., Jalalian, A., Abbaspour, K., & Dehghani, A. (2011). Estimation of soil shear strength using transfer and

ویژگی‌های مورد مطالعه برخوردار هستند. الگوی تغییرپذیری مکانی این دو متغیر نیز مؤید مناسب‌تر بودن برازش مدل نیم-تغییرنمای تجربی نمایی نسبت به سایر مدل‌های برازش نیم-تغییرنما در منطقه بود. هرچند نتایج نشان داد که تخمین‌گرهای مورد استفاده عملکرد خیلی مناسبی در برآورد و تهیه نقشه مقاومت برشی خاک در منطقه نداشتند. تفاوت آماره‌های ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) و میانگین قدر مطلق خطا (MAE) بین سه روش درون‌یابی در برآورد متغیرها چندان مشهود نبود و خطای میانگین مربعات (MSE) برای هر سه روش برآورد کم بود. بنابراین تجزیه و تحلیل‌های نیم‌تغییرنما، به‌عنوان مهم‌ترین مدل توصیف‌کننده‌ی رفتار مکانی متغیرهای ناحیه‌ای می‌تواند به‌عنوان ابزاری برای بررسی و مدل‌سازی تغییرات و پراکنش مکانی ویژگی‌های مکانیکی مقاومت فروری و برشی خاک استفاده شود. هرچند به‌طور کلی نتایج این پژوهش نشان داد که روش‌های زمین‌آماري مورد استفاده، روش‌های خیلی دقیق و مناسبی برای برآورد دو پارامتر مکانیکی مورد بررسی نمی‌باشند. البته از بین روش‌های مورد استفاده، روش کوکریجینگ معمولی با استفاده از متغیرهای کمکی ذکر شده، در مقایسه با روش‌های وزن‌دهی عکس فاصله و کوکریجینگ معمولی از دقت بیشتری برای برآورد ویژگی‌های مورد مطالعه برخوردار بود. بنابراین پیشنهاد



- soil spatial prediction functions. *Journal of Water and Soil*, 187-195.
- Komandi, G. (1992). On the mechanical properties of soil as they affect traction. *Journal of Terramechanics*, 29(4-5), 373-380.
- Lin, L. (1989). A concordance correlation coefficient to evaluate reproducibility. *Biometrics*, 45, 255-268.
- Mohammadi, J. (2006). *Pedometrics, Volume II (Spatial statistics)*. Pelk Publishers, Tehran.
- Moosavi, A. A., & Sepaskhah, A. R. (2012). Spatial variability of physicochemical properties and hydraulic characteristics of a gravelly calcareous soil. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 58, 631-656.
- Moradi Choghamarani, F., Moosavi, A. A., & Khalili Moghaddam, B. (2016). Spatial variability of water retention parameters and saturated hydraulic conductivity in a calcareous Inceptisols (Khuzestan province of Iran) under sugarcane cropping. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 62, 1686-1699.
- Mousavi, S. R., Sarmadian, F., Dehghani, S., Sadikhani, M. R., & Taati, A. (2017). Evaluating inverse distance weighting and kriging methods in estimation of some physical and chemical properties of soil in Qazvin Plain. *Eurasian Journal of Soil Science*, 6(4), 327.
- Movahedan, M., Abbasi, V., & Keramati, K. (2013). The effect of polyvinyl acetate polymer on the stability of dry aggregates. *Journal of Soil Research*, 27, 606-616.
- Mozaffari, H., Moosavi, S. A., & Sepaskhah, A. (2019). Effect of land use on some physical and chemical properties of a calcareous soil. *Journal of Soil Research*, 33(4), 525-540.
- Oliver, M. A., & Webster, R. (2014). A tutorial guide to geostatistics: Computing and modelling variograms and kriging. *Catena*, 113, 56-69.
- Park, H. M. (2008). Univariate analysis and normality test using SAS, Stata, and SPSS. A Working Paper of University Information Technology Services (UITS) Center for Statistical and Mathematical Computing, Indiana University, 41 p.
- Reza, S. K., Nayak, D. C., Chattopadhyay, T., Mukhopadhyay, S., Singh, S. K., & Srinivasan, R. (2016). Spatial distribution of soil physical properties of alluvial soils: a geostatistical approach. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 62(7), 972-981.
- Rezaei, M., & Tabatabai Klor R. (2019). Investigation of the effect of depth and moisture on soil shear strength in field and laboratory, 50 (2), 367-374.
- Robinson, T. P., & Metternicht, G. (2006). Testing the performance of spatial interpolation techniques for mapping soil properties. *Computers and Electronics in Agriculture*, 50(2), 97-108.
- Rossel, R.A., McBratney, A.B., (2008). Diffuse reflectance spectroscopy as a tool 731 for digital soil mapping, in: McBratney, A.B., Hartemink, A.E., Mendonca-Santos, L. 732 (Eds.), *Digital Soil Mapping with Limited Data. Developments in Soil*.
- Sarmadian, F., & Taghizadeh Mehrjerdi, R. (2010). Comparison of interpolation methods to prepare soil quality characteristics map Case study (Faculty of Agriculture). *Iranian Soil and Water Research*, 40 (2).
- Shao, W. H., Ji, Y. J., Li, P. Y. & You, L. B. (2006). Spatial Variability of Soil Nutrients and Influencing Factors in a Vegetable Production Area of Hebei Province in China. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 75, 201-212.
- Taati, A., Sarmadian, F., Mottaqian, H. & Mousavi, S. R. (2020). Zoning of some surface and depth characteristics of soil profiles using geostatistical technique in a part of Qazvin plain lands. *Man and the Environment*.
- Tesfahunegn, G. B., Tamene, L., & Vlek, P. L. (2011). Catchment-scale spatial variability of soil properties and implications on site-specific soil management in northern Ethiopia. *Soil and Tillage Research*, 117, 124-139.
- Uyan, M. (2016). Determination of agricultural soil index using geostatistical analysis and GIS on land consolidation projects: A case study in Konya/Turkey. *Computers and Electronics in Agriculture*, 123, 402-409.
- Webster, R., & Oliver, M. A. (2007). *Geostatistics for environmental scientists*. John Wiley & Sons.
- Western, A. W., Zhou, S. L., Grayson, R. B., McMahon, T. A., Blöschl, G., & Wilson, D. J. (2004). Spatial correlation of soil moisture in small catchments and its relationship to dominant spatial hydrological processes. *Journal of Hydrology*, 286(1-4), 113-134.
- Wilding, L., & Drees, L. R. (1983). *Spatial variability and pedology. Pedogenesis and soil taxonomy*/edited by LP Wilding, NE Smeck, and GF Hall.