

## تلفیق داده‌های توپوگرافی و ویژگی‌های خاک برای پیش‌بینی مکانی پارامترهای مدل منحنی انقباض خاک

زهرا ذوالفقاری<sup>۱</sup>، \*شمس‌الله ایوبی<sup>۲</sup> و محمدرضا مصدقی<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup>دانش آموخته کارشناسی ارشد گروه علوم خاک، دانشگاه صنعتی اصفهان، آستاد گروه علوم خاک، دانشگاه صنعتی اصفهان،

<sup>۲</sup>دانشیار گروه علوم خاک، دانشگاه صنعتی اصفهان

تاریخ دریافت: ۹۲/۱۱/۱۹؛ تاریخ پذیرش: ۹۳/۲/۳۰

### چکیده

در نقشه‌های خاک اطلاعات ناچیزی در ارتباط با ویژگی‌های رئولوژیک خاک ارایه می‌شود. انبساط و انقباض به‌عنوان یکی از مهم‌ترین پدیده‌های فیزیکی و مکانیکی خاک محسوب می‌شوند که در ارتباط با پایداری سازه‌ها و همچنین مباحث خاک‌ورزی و آبیاری در کشاورزی اهمیت دارند. این پژوهش به‌منظور بررسی تغییرات مکانی پارامترهای مدل منحنی انقباض خاک در بخشی از اراضی کوه‌رنگ استان چهارمحال و بختیاری انجام گرفت. بدین‌منظور ۹۹ نقطه در منطقه انتخاب و نمونه‌های کلوخه از لایه ۱۰-۰ سانتی‌متری برداشت و به آزمایشگاه منتقل شد. منحنی انقباض خاک با پوشش دادن کلوخه‌ها با رزین اکریلیکی (اندکی تراوا به بخار آب و ناتراوا به آب مایع) براساس قانون ارشمیدس اندازه‌گیری شد. سپس با ترسیم مقادیر نسبت پوکی ( $e$ ) در برابر نسبت حجم آب ( $\theta$ )، منحنی انقباض خاک رسم شده و مدل پنگ و هورن (۲۰۰۵) بر آن برازش داده شد و پارامترهای مدل شامل  $e_s$ ،  $e_r$ ،  $\alpha$ ،  $m$  و  $n$  برای هر نمونه خاک بهینه گردید. ساختار مکانی پارامترهای مدل به کمک شاخص موران-I تعیین گردید. برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک و توپوگرافی به‌عنوان داده‌های کمکی در روش رگرسیون- کریجینگ مورد استفاده قرار گرفتند. مقایسه روش‌های کریجینگ معمولی (OK) و رگرسیون- کریجینگ (RK) نشان داد که در مورد تخمین مکانی پارامترهای  $e_s$ ،  $e_r$  و  $\alpha$  روش RK بر روش OK برتری داشت، ولی در مورد دو پارامتر  $n$  و  $m$  مدل RK نتوانست کارا تر باشد. عدم موفقیت روش RK در مورد دو پارامتر  $n$  و  $m$  به‌طور عمده ناشی از ارتباط رگرسیونی ضعیف بین پارامترهای مورد بررسی با ویژگی‌های کمکی خاک و توپوگرافی می‌باشد. الگوی پراکنش مکانی پارامترها نشان داد که دو پارامتر  $e_s$  و  $e_r$  و همچنین دو پارامتر  $m$  و  $\alpha$  مطابقت مکانی زیادی با هم دیگر نشان دادند که با نتایج حاصله از ضرایب هم‌پراکنش بین نقشه‌های نام‌برده هماهنگی داشت. به‌طورکلی نتایج این پژوهش نشان داد که پارامترهای مدل انقباض خاک در منطقه مورد بررسی، دارای وابستگی مکانی هستند و دانسته‌های مکانی ارایه شده می‌تواند در راستای نمونه‌برداری‌های بعدی جهت مدل‌سازی انقباض‌پذیری خاک‌ها و همچنین مدیریت دقیق مکانی کاربردهای مهندسی و زیرساخت‌های کشاورزی و خاک‌ورزی در سطح منطقه مورد بررسی به‌کار گرفته شود.

**واژه‌های کلیدی:** پارامترهای منحنی انقباض خاک، مدل پنگ و هورن (۲۰۰۵)، تغییرات مکانی، رگرسیون- کریجینگ،

شاخص موران-I

\* مسئول مکاتبه: [ayoubi@cc.iut.ac.ir](mailto:ayoubi@cc.iut.ac.ir)

## مقدمه

تغییر حجم خاک‌های انبساط‌پذیر (افزایش حجم یا تورم<sup>۱</sup> و کاهش حجم یا انقباض<sup>۲</sup>) در مواجهه با تغییرات اقلیمی (بارندگی) و نوسانات فصلی رطوبت، برای سازه‌های مهندسی یک مسأله جدی به شمار می‌آید، به طوری که در ایالات متحده آمریکا خسارت سالانه ناشی از انبساط و انقباض خاک‌های انبساط‌پذیر در بزرگراه‌ها، معابر، فرودگاه‌ها، پوشش تونل‌ها، کانال‌های آبیاری و دیگر سازه‌ها، بالغ بر ۹۰۰۰ میلیون دلار برآورد شده است که به تنهایی بزرگ‌تر از خسارات ناشی از بلایای طبیعی مانند سیل، طوفان و زلزله می‌باشد (پارسائی و رئیسی استبرق، ۲۰۰۸؛ میسرا و همکاران، ۲۰۰۷). همچنین درز و شکاف‌های ناشی از انقباض خاک سبب قطع ریشه درختان و گیاهان زراعی و در مراتع، موجب گیرکردن پای دام در درون این درز و شکاف‌ها و شکستگی آن‌ها و بالاخره ایجاد پستی و بلندی‌های گلیکای<sup>۳</sup> می‌شود که مانعی برای کشاورزی مکانیزه محسوب می‌گردند (USDA, NRCS, ۱۹۹۹).

خشک شدن خاک‌های رسی، منجر به شکل‌گیری ترک‌های انقباضی می‌شود. آب و املاح به سرعت در درون شیارها و درز و ترک‌ها به خاک زیرین جریان می‌یابند؛ بنابراین ناحیه فعالیت ریشه گیاه به نسبت خشک می‌ماند. این فرآیند ممکن است منجر به کمبود آب و مواد غذایی گیاهان و آلودگی خاک‌های زیرین و آب‌های زیرزمینی به آلاینده‌های معدنی، آلی و میکروبی شود. ساختمان‌ها و بناهای ساخته‌شده روی خاک‌های رسی متورم‌شونده نیز با خطر جدی آسیب‌دیدگی و تخریب روبرو هستند (برونسویک، ۱۹۹۱).

رفتار انقباضی خاک‌های متورم‌شونده را می‌توان براساس وابستگی یک متغیر مرتبط با حجم خاک (مانند نسبت پوکی،  $e$ ) به یک متغیر مرتبط با رطوبت خاک (مانند رطوبت وزنی،  $w$ ) مورد بررسی قرار داد. تغییرات این دو متغیر در فرآیند تر و خشک شدن خاک، مشخص‌کننده مسیرهای تورمی - انقباضی خاک می‌باشد. این مسیرها در تفهیم فرآیندهای تورم و انقباض دارای اهمیت بوده و ابزاری برای پیش‌بینی تغییر حجم ناشی از تورم و انقباض خاک فراهم می‌کنند (میسرا و همکاران، ۲۰۰۷). رابطه بین تغییر حجم خاک و تنش ناشی از مکش ماتریک (تنش‌های هیدرولیکی)، انقباض و انبساط نام دارد (برادو و بویون، ۱۹۹۵؛ گرونولت و گرت، ۲۰۰۱؛ چرتکوف، ۲۰۰۳؛ پنگ و هورن، ۲۰۰۵). در اثر انقباض، ذرات و منافذ خاک تحت تنش‌های آبی، بازآرایی می‌کنند. تغییر حجم در مسیرهای خشک و مرطوب شدن ساختار منافذ خاک را به شدت تحت‌تأثیر قرار می‌دهد (پنگ و همکاران، ۲۰۱۲).

رابطه بین تغییر حجم و رطوبت خاک معمولاً در قالب یک منحنی سیگموئیدی نمایش داده می‌شود. این منحنی S- شکل که منحنی انقباض خاک<sup>۴</sup> نام دارد از نقطه اشباع تا خشک کامل در حالت کلی به ترتیب دارای ۴ فاز (ناحیه) مختلف است: انقباض ساختاری یا ساختمانی<sup>۵</sup>، انقباض بهنجار (نرمال) یا متناسب<sup>۶</sup>، انقباض پس‌ماند (باقی‌مانده)<sup>۷</sup> و انقباض صفر<sup>۸</sup> (هینس، ۱۹۲۳؛ استیرک، ۱۹۵۴). برای برآزش مدل بر داده‌های تغییر حجم و رطوبت خاک، مدل‌های مختلفی توسعه یافته است که در این پژوهش از مدل پنگ و هورن (۲۰۰۵) استفاده شد.

- 4- Soil shrinkage curve
- 5- Structural shrinkage
- 6- Normal/Proportional shrinkage
- 7- Residual shrinkage
- 8- Zero shrinkage

- 1- Swelling
- 2- Shrinkage
- 3- Gilgai

شیمیایی خاک در دنیا و ایران پژوهش‌های متعددی انجام گرفته است، ولی با توجه به ضرورت شناخت تغییرات مکانی دقیق رفتار انقباض و انبساط خاک‌ها تاکنون در ایران و حتی براساس بررسی منابع صورت گرفته در دنیا نیز پژوهشی در این زمینه انجام نگرفته است. از این رو این پژوهش برای بررسی تغییرپذیری مکانی پارامترهای مدل انقباض خاک با استفاده از شاخص موران در بررسی پیوستگی مکانی و مقایسه تکنیک‌های کریجینگ و رگرسیون-کریجینگ، در بخشی از اراضی منطقه چلگرد استان چهارمحال و بختیاری اجرا شد.

### مواد و روش‌ها

**معرفی منطقه مورد مطالعه:** منطقه مورد مطالعه در بخشی از اراضی تپه‌ماهوری چلگرد استان چهارمحال و بختیاری در بین طول‌های جغرافیایی ۵۰ درجه و ۵ دقیقه تا ۵۰ درجه و ۲۸ دقیقه شرقی و بین عرض‌های جغرافیایی ۳۲ درجه و ۱۳ دقیقه و ۳۲ درجه و ۳۵ دقیقه شمالی با مساحت تقریبی ۳۷۰ کیلومترمربع واقع شده است (شکل ۱). میانگین ارتفاع منطقه ۲۳۶۰ متر بالای سطح آب‌های آزاد است. میانگین دما و بارندگی سالانه به ترتیب ۹/۴ درجه سانتی‌گراد و ۷۸۰ میلی‌متر می‌باشند. براساس طبقه‌بندی خاک آمریکایی (USDA)، خاک‌های منطقه دارای رژیم رطوبتی زیریک<sup>۴</sup> و رژیم حرارتی مزیک<sup>۵</sup> می‌باشند. خاک‌های منطقه روی اراضی تپه‌ماهوری متشکل از سنگ‌های رسوبی کرتاسه و دشت‌های آن روی رسوبات ناشی از هوازدگی این سنگ‌ها واقع شده است. کاربری‌های غالب منطقه شامل کشت آبی، کشت دیم و مرتع می‌باشند (کلیشادی و همکاران، ۲۰۱۴).

از آن‌جا که ویژگی‌های خاک به‌طور پیوسته تغییر می‌کنند، علم زمین‌آمار<sup>۱</sup> امکان بررسی مقدار هر ویژگی را با توجه به پراکندگی فاصله و جهت نقاط همسایه فراهم می‌کند. سال‌هاست که از میان روش‌های میان‌یابی و تخمین در نقاط نمونه‌برداری نشده در علوم مختلف زمین و خاک‌شناسی، از تکنیک کریجینگ معمولی (OK)<sup>۲</sup> استفاده می‌شود (مرادی و همکاران، ۲۰۱۲؛ موسوی‌فرد و همکاران، ۲۰۱۳؛ جلالی و همکاران، ۲۰۱۳). در سال‌های اخیر استفاده از تکنیک‌های هیبرید (دوتایی) در مدل‌سازی و تعیین الگوی پراکنش مکانی ویژگی‌های خاک، افزایش قابل توجهی یافته است. یکی از روش‌های هیبرید که اخیراً به‌طور موفقیت‌آمیزی در پیش‌بینی مکانی مورد استفاده قرار می‌گیرد، روش رگرسیون-کریجینگ می‌باشد (تقی‌زاده‌مهرجردی و همکاران، ۲۰۱۴؛ روگر و همکاران، ۲۰۱۴). در این تکنیک، مدل رگرسیونی بین متغیر اصلی و متغیرهای کمکی برقرار می‌گردد. سپس با استفاده از کریجینگ، باقی‌مانده‌های<sup>۳</sup> این مدل رگرسیونی (اختلاف بین مقدار اندازه‌گیری شده و مقدار پیش‌بینی شده توسط مدل رگرسیون) پهنه‌بندی شده و در نهایت با ترکیب این دو مقدار، پارامتر مورد نظر در نقاط مختلف برآورد می‌گردد. از مهم‌ترین متغیرهای کمکی که در تخمین مکانی ویژگی‌های خاک به کمک تکنیک‌های هیبرید مورد استفاده قرار می‌گیرند، می‌توان به ویژگی‌های مختلف سطحی خاک، تصاویر ماهواره‌ای، نقشه‌های کاربری اراضی، نقشه‌های زمین‌شناسی و ویژگی‌های توپوگرافی اشاره کرد (تقی‌زاده‌مهرجردی و همکاران، ۲۰۱۴).

هر چند با استفاده از تکنیک زمین‌آمار برای پیش‌بینی مکانی برخی از ویژگی‌های فیزیکی و

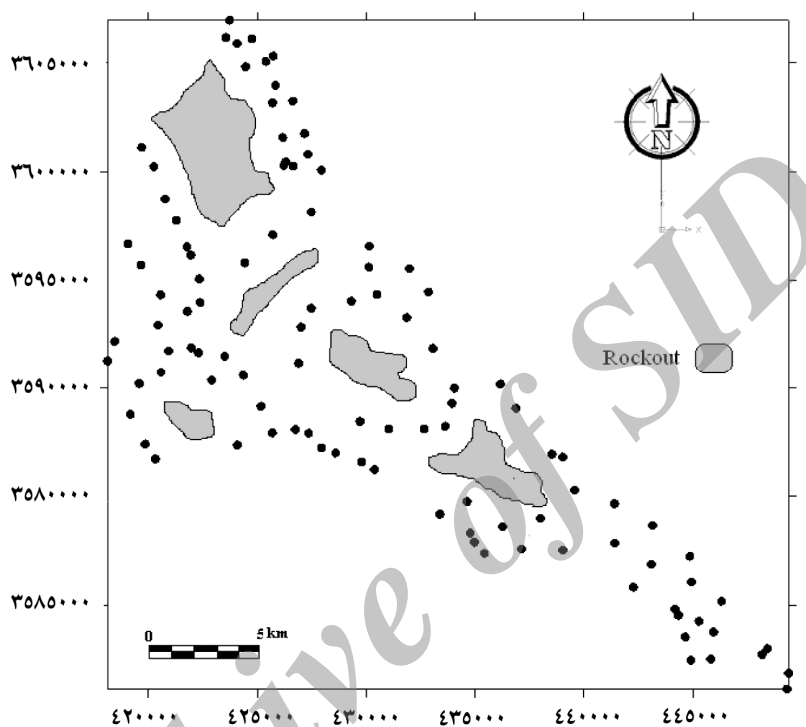
4- Xeric  
5- Mesic

1- Geostatistics  
2- Ordinary-kriging  
3- Residual

### نمونه برداری خاک و اندازه گیری های آزمایشگاهی:

برای استفاده از روش های زمین آماری، ۹۹ نقطه به صورت تصادفی نظام دار که موقعیت های مختلف شیب و کاربری زمین را پوشش دهد، انتخاب شدند

که توزیع آن ها در شکل ۱ ارایه شده است. نمونه های خاک دست نخورده به صورت کلوخه در هر نقطه از لایه رویین (۰ تا ۱۰ سانتی متر) برداشت شده و به آزمایشگاه منتقل شدند.



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی منطقه مورد بررسی و پراکنش نقاط نمونه برداری در منطقه چلگرد استان چهارمحال و بختیاری.

به آب مایع (آب گریز)، تراوایی نسبت به بخار آب (خروج گند بخار آب از پوشش)، خاصیت ارتجاعی و انبساط و انقباض به همراه خاک و عدم نفوذ به پیکره خاک را دارا می باشد. کلوخه ها با رزین نام برده پوشانده شده و به وسیله نخ و قلاب در هوای آزاد آویزان و خشک شدند. این رزین قادر است رطوبت را به صورت بخار از دست بدهد، در حالی که هنگام اندازه گیری وزن آن در آب، آب وارد آن نمی شود. پس از پوشش دهی، مقداری از رزین روی کلوخه تراشیده شده و کلوخه از این محل در دستگاه جعبه شن قرار داده شد تا اشباع گردد. سپس محل تراشیده شده کلوخه اشباع از آب، با رزین روکش داده شد.

برای اندازه گیری منحنی انقباض خاک، یکی از روش های متداول استفاده از رزین ساران<sup>۱</sup> است. با توجه به عدم دسترسی به این رزین، در این پژوهش تلاش بر آن شد تا از بین محصولات رزینی داخلی، محصولی مشابه با رزین ساران انتخاب گردد. در این راستا پس از آزمودن تعدادی از رزین های تولید داخل، از یک رزین اکریلیکی مایع و غیرسمی به نام SH-750<sup>۲</sup> استفاده شد. رزین SH-750 تمام ویژگی های شیمیایی و فیزیکی مورد نیاز پوشش دهی برای اندازه گیری انقباض خاک اعم از ناتراوایی نسبت

1- Saran resin

2- A copolymer of VA/VEOVA/Acrylate monomers

(۲)

$$e(\vartheta) = \begin{cases} e_r & \vartheta = 0 \\ e_r + \frac{e_s - e_r}{\left[1 + \left(\frac{\alpha \vartheta}{e_s - \vartheta}\right)^{-n}\right]^m} & 0 < \vartheta < \vartheta_s \\ e_s & \vartheta = \vartheta_s \end{cases} \quad n > 0$$

که در آن،  $e_r$  و  $e_s$  به ترتیب نسبت پوکی باقی مانده<sup>۱</sup> و نسبت پوکی اشباع<sup>۲</sup> و  $\alpha$ ،  $n$  و  $m$  پارامترهای برازش مدل می باشند. این مدل انعطاف پذیری خوبی داشته و تمامی نواحی منحنی انقباض خاک را در بر می گیرد (پنگ و هورن، ۲۰۰۵). پس از برازش مدل پنگ و هورن (۲۰۰۵) بر داده های اندازه گیری شده، پارامترهای  $e_r$ ،  $e_s$ ،  $\alpha$ ،  $n$  و  $m$  برای هر نمونه خاک استخراج و برای مدل سازی مکانی مورد استفاده قرار گرفتند.

**توصیف آماری و زمین آماری:** به منظور بررسی چگونگی توزیع داده ها و دستیابی به خلاصه ای از اطلاعات آماری هر ویژگی، مقادیر میانگین، حداقل، حداکثر، ضریب تغییرات و چولگی مورد بررسی قرار گرفت (SPSS 16.01). ناهم سان گردی داده ها توسط تغییرنمای سطحی بررسی و پس از تعیین درجه ناهم سان گردی، تغییرنماهای همه جهته برای پارامترهای مورد نظر ترسیم گردید. محاسبه و ترسیم تغییرنما برای متغیرهای نرمال توسط برنامه GS<sup>+</sup> صورت گرفت. به منظور بررسی اعتبار تغییرنما، انتخاب پارامترهای مدل به گونه ای صورت گرفت که مدل نهایی، دارای حداقل میانگین خطای مطلق<sup>۳</sup> (MAE) و ریشه میانگین مربعات خطا<sup>۴</sup> (RMSE) باشد:

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^N [Z^*(x_i) - Z(x_i)]}{N} \quad (۳)$$

سپس با گذشت زمان کلوخه ها در بیرون و غوطه ور در آب وزن شده و کاهش وزن کلوخه ها در آب براساس قانون ارشمیدس به تغییر حجم آن نسبت داده شد. این کار تا ثابت شدن وزن کلوخه ادامه یافت و مقادیر جفتی نسبت پوکی ( $e$ ) در برابر نسبت رطوبت ( $v$ ) به عنوان منحنی انقباض خاک محاسبه شدند.

**مدل سازی داده های انقباض خاک با مدل پنگ و هورن (۲۰۰۵):** نسبت پوکی ( $e$ ) و نسبت رطوبت ( $v$ ) در خاک وابسته به تخلخل هستند. محدوده  $v$  می تواند از صفر تا  $v_s$  باشد که به ترتیب نسبت رطوبت در حالت آون- خشک (دمای ۱۰۵ درجه سانتی گراد) و حالت اشباع تعریف می شوند. به علاوه،  $e$  نیز در دامنه نسبت پوکی باقی مانده ( $e_r$ ) تا نسبت پوکی اشباع ( $e_s$ ) متغیر است. در حالت اشباع،  $v_s$  برابر  $e_s$  است. در این پژوهش مدل پنگ و هورن (۲۰۰۵) برای برازش بر داده های  $e$  در برابر  $v$  استفاده شد. چون منحنی انقباض خاک از نظر شکل ظاهری به نوعی عکس منحنی مشخصه رطوبتی خاک است، می توان معادله ای برای مدل سازی منحنی انقباض خاک از روی معادله ون گنوختن (۱۹۸۰) برای منحنی مشخصه رطوبتی خاک (رابطه ۱) ارایه کرد:

$$\theta(\psi) = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + (\alpha \psi)^n]^m} \quad (۱)$$

که در آن،  $\theta$ : مقدار رطوبت حجمی خاک،  $\psi$ : مکش ماتریک و  $\theta_r$  و  $\theta_s$  به ترتیب رطوبت های حجمی باقی مانده و اشباع و  $\alpha$ ،  $n$  و  $m$  پارامترهای برازش مدل می باشند.

با ایجاد تغییراتی در رابطه ۱ و تعریف حدود مرزی برای  $e$  و  $\vartheta$ ، رابطه ۲ توسط پنگ و هورن (۲۰۰۵) برای مدل سازی منحنی انقباض خاک پیشنهاد شد:

- 1- Residual void ratio
- 2- Saturation void ratio
- 3- Mean Absolute Error
- 4- Root Mean Squared Errors.

به منظور تعیین کلاس وابستگی مکانی پارامترهای مورد بررسی، از نسبت واریانس اثر قطعه‌ای به واریانس کل استفاده شد که توسط کمبردلا و همکاران (۱۹۹۴) پیشنهاد شده است. در این نسبت، که نسبت همبستگی نامیده شده و معمولاً به صورت درصد نشان داده می‌شود، واریانس اثر قطعه‌ای به صورت درصدی از واریانس کل بیان می‌شود. در این رابطه واریانس کل از مجموع مقادیر اثر قطعه‌ای و مقدار آستانه به دست می‌آید. چنانچه این کمیت کم‌تر از ۲۵ درصد باشد نشان‌دهنده وابستگی مکانی قوی، اگر بین ۲۵ تا ۷۵ درصد قرار گیرد بیانگر وابستگی مکانی متوسط و چنانچه بزرگ‌تر از ۷۵ درصد باشد نشان‌دهنده وابستگی مکانی ضعیف خواهد بود. همچنین در صورتی که درصد همبستگی در مورد متغیری برابر ۱۰۰ درصد باشد، آن متغیر وابستگی مکانی ندارد.

پیش‌بینی مکانی پارامترهای مدل انقباض پنگ و هورن (۲۰۰۵) به روش کریجینگ معمولی (OK) انجام شد. برای تلفیق داده‌های خاک و توپوگرافی جهت بهبود تخمین مکانی پارامترهای مدل انقباض پنگ و هورن (۲۰۰۵) در منطقه مورد مطالعه از روش هیبریدی رگرسیون-کریجینگ (RK)<sup>۳</sup> نیز استفاده شد. در این پژوهش از برخی ویژگی‌های خاک (توزیع اندازه ذرات، درصد ماده آلی، درصد آهک و گنجایش تبادل کاتیونی) و همچنین ویژگی‌های توپوگرافی (استخراج شده از مدل رقومی ارتفاع توسط نرم‌افزار DIGEM) استفاده شد. یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های توپوگرافی وارد شده در مدل‌های رگرسیون شاخص DA<sup>۴</sup> بود. این شاخص به مفهوم مساحت پایین دست نقطه مورد نظر روی خط کنتور قرار گرفته، شناخته می‌شود و نشان‌دهنده میزان آب زه‌کشی شده از این نقطه به پایین دست حوضه آبخیز

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N [Z^*(x_i) - Z(x_i)]^2}{N}} \quad (۴)$$

که در آن‌ها،  $N$ : تعداد نقاط مشاهده‌ای،  $Z^*(x_i)$ : مقدار برآوردی بر نقطه  $i$  ام،  $Z(x_i)$ : مقدار مشاهده‌ای برای نقطه  $i$  ام در نقطه  $x_i$  می‌باشند.

به منظور بررسی همبستگی فضایی پارامترهای مورد بررسی از شاخص موران- $I$  استفاده شد که توسط رابطه زیر محاسبه گردید (تفلسدروف، ۲۰۰۰):

$$I = \frac{M}{\sum_i \sum_j w_{ij}} \times \frac{\sum_i \sum_j w_{ij} (X_i - \bar{X})(X_j - \bar{X})}{\sum_j (X_j - \bar{X})^2} \quad (۵)$$

که در آن،  $M$ : تعداد ابعاد مکانی که در این پژوهش مقدار آن برابر ۲ است که با زیرنویس‌های  $i$  و  $j$  نشان داده شده است.  $X_i$ : مقدار متغیر در بعد  $X$  و  $X_j$ : مقدار متغیر در بعد  $Y$ ،  $\bar{X}$ : میانگین متغیر و  $w_{ij}$ : عضوی از آرایه وزن‌های مکانی است.

در این پژوهش برای نمایش میزان وابستگی مکانی از شاخص Moran's I برای تفسیر میزان وابستگی متغیرهای مورد بررسی استفاده شد. این شاخص اولین بار توسط موران در سال ۱۹۴۸ پیشنهاد شد که میزان وابستگی فضایی متغیر را نشان می‌دهد و مقدار آن بین +۱ تا -۱ تغییر می‌کند. مقدار مثبت این شاخص نشانگر آن است که مقادیر متغیر مورد نظر در فواصل مکانی دارای گرایش بیش‌تری نسبت به هم بوده و به عبارتی دارای خود-همبستگی مکانی<sup>۲</sup> هستند. در مقابل، مقادیر صفر و منفی، ناهمگنی و تصادفی بودن متغیر را نشان می‌دهد. مقادیر مثبت این شاخص برای پارامتر مورد بررسی نشان‌دهنده وجود وابستگی مکانی است.

3- Regression-Kriging

4- Dispersion area

1- Moran's I

2- Spatial Auto-Correlation

$$RMSE_r = \frac{RMSE}{S_z} \times 100 \quad (7)$$

که در آن،  $S_z$ : انحراف معیار تخمین می‌باشد. پس از تعیین بهترین مدل، نقشه‌های پیوسته توسط نرم‌افزار ArcGIS برای هر پارامتر مدل انقباض خاک ترسیم گردید (جانستون و همکاران، ۲۰۰۱). برای بررسی روند<sup>۲</sup> تغییرات متغیر در بعد  $X$  و  $Y$  بررسی شد و نتایج نشان داد که داده‌ها هیچ‌گونه روندی از خود نشان ندادند. برای بررسی میزان ارتباط مکانی بین دو نقشه (نقشه‌های جفتی پارامترهای مدل انقباض خاک) از نظر وابستگی مکانی، ضریب هم‌پراکنش<sup>۳</sup> برای هر جفت متغیر با استفاده از رابطه زیر محاسبه شد (گوارتز، ۱۹۹۴):

$$Co-dis = \frac{\gamma_{u,q}(h)}{\sqrt{\gamma_u(h)\gamma_q(h)}} \quad (8)$$

که در آن،  $Co-dis$ : ضریب هم‌پراکنش بین دو متغیر  $u$  و  $q$ ،  $\gamma_{u,q}(h)$  بوده، تغییرنمای عرضی بین این دو متغیر،  $\gamma_u(h)$  و  $\gamma_q(h)$  نیمه تغییرنماهای دو متغیر نام‌برده و  $h$ : فاصله مکانی می‌باشند. این ضریب چگونگی همبستگی مکانی بین دو متغیر را بیان می‌کند.

### نتایج و بحث

توصیف کلی ویژگی‌های خاک‌های منطقه: خلاصه‌ای از توصیف آماری ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک و توپوگرافی که در مدل رگرسیون-کریجینگ معنی دار شده‌اند، در جدول ۱ ارائه شده است. ضریب تغییرات (CV) برای نشان دادن میزان

است (ویلسون و گالات، ۲۰۰۰). در این روش پس از برازش مدل رگرسیونی چندمتغیره بین پارامترهای مدل انقباض پنگ و هورن و ویژگی‌های ذکرشده، باقی‌مانده رگرسیون محاسبه شد و پس از مدل‌سازی مکانی روی مقادیر باقی‌مانده‌ها در نقاط نمونه‌گیری نشده (به‌عنوان مثال  $S_i$ ) و جمع آن با مقادیر پیش‌بینی‌شده پارامتر توسط مدل رگرسیون چندمتغیره خطی، پارامتر مورد نظر در نقطه  $S_i$  طبق رابطه زیر به‌دست آمد:

$$\hat{Z}(S_i) = \hat{m}(S_i) + \hat{e}(S_i) \rightarrow \sum_{k=1}^p \hat{\beta}_k \cdot q_k(S_i) + \sum_{i=1}^n \lambda_i \cdot e(S_i) \quad (6)$$

که در آن،  $\hat{Z}(S_i)$ : مقدار متغیر مورد نظر در نقطه مفروض،  $\hat{e}(S_i)$ : مقدار باقی‌مانده به‌دست آمده از مدل رگرسیونی در نقطه مفروض،  $\hat{m}(S_i)$ : مقدار به‌دست آمده از مدل رگرسیونی در نقطه مفروض،  $\hat{\beta}_k$ : ضریب ثابت مدل رگرسیونی در نقطه مفروض، و  $q_k$ : مقادیر متغیرهای کمکی در نقطه مفروض می‌باشند.

روش ارزیابی و انتخاب مدل‌ها: برای انتخاب روش مناسب تخمین برای هر پارامتر مدل انقباض خاک، از بین دو تکنیک کریجینگ معمولی و رگرسیون-کریجینگ، از تکنیک ارزیابی متقابل<sup>۱</sup> استفاده شد. در این روش، در هر مرحله یک نقطه مشاهده‌ای حذف شده و با استفاده از بقیه نقاط مشاهده‌ای، به کمک مدل اعتبارسنجی شده مقدار پارامتر در آن نقطه برآورد می‌شود. معیارهای مختلفی نیز برای ارزیابی کارایی روش‌های میان‌یابی وجود دارد که در این پژوهش از میانگین خطای مطلق، ریشه دوم میانگین مربعات خطا، درصد ریشه دوم میانگین مربعات خطای نرمال‌شده (RMSEr%) و ضریب همبستگی ( $r$ ) استفاده شد:

2- Trend

3- Co-dispersion coefficient

1- Cross validation

نشان دادند، می‌توان به شن و اجزاء آن، ماده آلی، کربنات کلسیم و SAR اشاره کرد در حالی که سایر ویژگی‌های خاک تغییرپذیری به نسبت کمی داشتند. شاخص توپوگرافی DA نیز تغییرپذیری زیادی از خود نشان داد. ( $CV=103/77$ )

تغییرپذیری ویژگی‌های خاک مورد استفاده قرار گرفت. از بین ویژگی‌های خاک، درصد شن خیلی درشت بیش‌ترین تغییرپذیری ( $CV=97/05$ ) و چگالی ظاهری ( $CV=7/82$ ) کم‌ترین تغییرپذیری را داشتند. از متغیرهای خاک که تغییرپذیری به نسبت زیادی

جدول ۱- توصیف آماری ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک در نقاط مورد بررسی ( $N=99$ ).

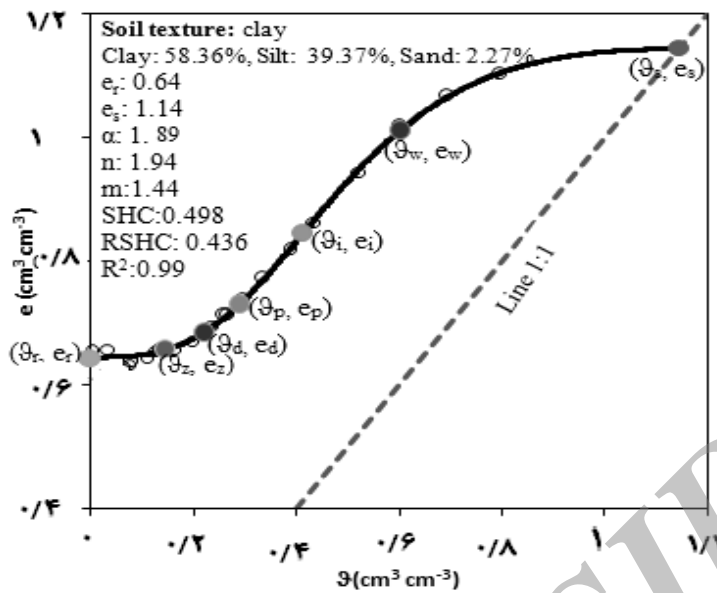
متغیر	واحد	کمینه	بیشینه	میانگین	انحراف معیار	CV(%)	چولگی	دامنه
Clay	درصد	۳/۲	۵۸/۴	۳۴/۶	۱۰/۵۳	۳۰/۴۴	-۰/۶۹	۵۵/۱۶
Sand	درصد	۱/۰	۱۹/۲	۷/۱	۴/۴۳	۶۲/۸۳	۰/۹۲	۱۸/۱۸
VCS	درصد	۰/۰	۷/۳	۱/۰	۰/۹۹	۹۷/۰۵	۳/۱۳	۷/۲۷
CS	درصد	۰/۰	۳/۷	۰/۹	۰/۷۳	۸۳/۹۰	۱/۵۳	۳/۷۱
MS	درصد	۰/۱	۴/۳	۱/۰	۰/۸۳	۷۹/۸۰	۱/۳۶	۴/۲۶
$d_g$	میلی‌متر	۰/۰۰۴	۰/۰۴۵	۰/۰۱۲	۰/۰۰۶	۵۰/۰۰	۲/۵۳	۰/۰۴۱
OM	درصد	۰/۱۰	۴/۳۸	۱/۵۱	۰/۸۲	۵۴/۳۰	۰/۸۹	۴/۲۸
CCE	درصد	۰/۰	۵۱/۵	۱۶/۲	۱۲/۰۲	۷۴/۲۴	۰/۷۸	۵۱/۵۰
CEC	cmol(+)/kg	۲/۴۷	۷۰/۳۳	۴۹/۱۹	۱۰/۳۳	۲۱/۰۰	-۱/۰۹	۶۷/۸۶
SAR	(meq/l) <sup>۱/۰</sup>	۰/۱۱	۴/۵۵	۱/۱۹	۰/۷۶	۶۳/۸۶	۱/۴۲	۴/۴۴
BD	میلی‌گرم بر مترمکعب	۱/۰۸	۱/۵۰	۱/۲۴	۰/۰۹۷	۷/۸۲	۰/۵۲	۰/۴۲
DA	مترمربع	۱۰/۰	۳۰۰/۰	۷۳/۸۵	۷۶/۶۴	۱۰۳/۷۷	۱/۳۴	۲۹۰/۰

Clay: رس، Sand: شن، VCS: شن خیلی درشت، CS: شن درشت، MS: شن متوسط، OM: ماده آلی، CCE: کربنات کلسیم معادل، CEC: گنجایش تبادل کاتیونی، SAR: نسبت جذب سدیم، BD: چگالی ظاهری، DA: مساحت پراکندگی، CV: ضریب تغییرات.

Excel بهینه شد. بدین منظور از روش لونیبرگ-مارکوات برای بهینه‌سازی غیرخطی مدل با تابع هدف حداقل‌سازی مجموع مربعات خطا (SSE) استفاده شد. تقریباً در تمامی خاک‌های مورد بررسی، منحنی انقباض از ۴ ناحیه انقباض ساختاری، بهنجار، پس‌ماند و صفر تشکیل شده و عمده کاهش حجم خاک در ناحیه انقباض بهنجار رخ داده بود (شکل ۲).

نتایج منحنی انقباض در خاک‌های منطقه مورد بررسی: همان‌طور که در بخش مواد و روش‌ها ذکر شد، برای مدل‌سازی داده‌های منحنی انقباض خاک (داده‌های نسبت پوکی،  $e$ ، در برابر نسبت رطوبت،  $\theta$ ) از مدل پنگ و هورن (۲۰۰۵) استفاده شد. مدل نام‌برده دارای پنج پارامتر مشتمل بر  $m$  و  $\alpha$   $n$   $e_s$   $e_r$  می‌باشد که مقادیر آن‌ها برای هر خاک با استفاده از نرم‌افزار Solver در نرم‌افزار





شکل ۲- نمونه‌ای از داده‌های اندازه‌گیری شده منحنی انقباض یک خاک رسی و برازش مدل پنگ و هورن (۲۰۰۵) بر آن در منطقه مورد بررسی.

انقباض خاک‌های مورد بررسی در جدول ۲ ارائه شده است. سه پارامتر اصلی  $\alpha$ ،  $n$  و  $m$  شکل منحنی انقباض را کنترل می‌کنند. مقادیر  $\alpha$  از ۰/۵۸۳ تا ۳/۰۶۴ (با میانگین ۱/۳۹۳) متغیر بودند. پنگ و هورن (۲۰۰۵) برای ۱۲ نوع خاک از منابع مختلف، مقدار  $\alpha$  را در دامنه ۰/۶۷ تا ۱۳۱۱ گزارش کردند. مقادیر  $n$  و  $m$  نیز به ترتیب در دامنه‌های ۱۱/۰۴-۱/۰۵ و ۲/۹۸-۰/۱۱ متغیر بودند (جدول ۲). این در حالی است که پنگ و هورن (۲۰۰۵) برای ۱۲ خاک مورد بررسی، مقادیر پارامتر  $m$  را تا بیش از ۱۳۹۰ تخمین زدند. به دلیل وابستگی پارامترهای مدل به یک دیگر و دامنه وسیع مقادیر گزارش شده پارامترها در منابع (پنگ و هورن، ۲۰۰۵)، در این پژوهش سعی شد تا حد امکان با اعمال محدودیت بر پارامترهای مدل ( $\alpha$ )،  $n$  و  $m$ ) و سعی و خطاهای متعدد، از برازش اعداد خیلی بزرگ و پرت جلوگیری شود. براساس ضریب چولگی، تمامی پارامترهای مدل به جز پارامتر  $n$  دارای توزیع نرمال هستند (جدول ۲). نتایج آمار توصیفی نیز نشان داد که پارامتر  $e_s$  دارای کم‌ترین ضریب تغییرات

مدل پنگ و هورن (۲۰۰۵) به دلیل انعطاف‌پذیری زیاد توانست بر تمامی داده‌های منحنی انقباض خاک‌ها برازش خوبی ایجاد کند ( $R^2 > 0.99$ ). پنگ و هورن (۲۰۰۵) نیز در برازش این مدل سیگموئیدی بر داده‌های انقباض چند خاک دست‌خورده و دست‌نخورده، به ضرایب تبیین نزدیک به یک دست یافتند. همان‌طور که به‌عنوان نمونه در شکل ۲ مشهود است، منحنی انقباض بالای خط ۱:۱ قرار گرفته است، چرا که خاک‌های دست‌نخورده دارای انقباض ساختمانی و خروج آب بین خاکدانه‌ای بوده و به زودی پس از نقطه اشباع ( $e_s$ )، از خط ۱:۱ فاصله می‌گیرند. همچنین شیب ناحیه انقباض بهنجار نیز در بیش‌تر خاک‌های مورد بررسی کم‌تر از ۱ می‌باشد، به این مفهوم که به‌ازای واحد حجم خروج آب منفذی، کاهش حجم منافذ کم‌تری رخ می‌دهد.

توصیف آماری پارامترهای مدل پنگ و هورن (۲۰۰۵) منحنی انقباض در خاک‌های مورد بررسی: خلاصه‌ای از آماره‌های توصیفی پنج پارامتر برازش‌یافته مدل پنگ و هورن (۲۰۰۵) بر منحنی

فاصله بین نقاط نمونه برداری خاک جهت اندازه گیری منحنی انقباض و پارامترهای مورد بررسی کاربرد دارد. نتایج تجزیه و تحلیل تغییرپذیری مکانی پارامترهای منحنی انقباض خاک به روش رگرسیون- کریجینگ (RK): در این پژوهش، برخی ویژگی های فیزیکی و شیمیایی خاک و ویژگی های توپوگرافی (جدول ۱) به عنوان متغیرهای محیطی کمکی برای بهبود تخمین مورد استفاده قرار گرفتند. نتایج تجزیه رگرسیون چندمتغیره بین پنج پارامتر مدل پنگ و هورن (۲۰۰۵) و داده های زود یافت در جدول ۳ ارائه شده است. نتایج جدول نشان می دهد که ویژگی های ماده آلی، شن خیلی درشت، شن متوسط، چگالی ظاهری، شن و شن درشت در مجموع ۴۸ درصد از تغییرات پارامتر  $e_f$  را در منطقه توجیه کرده اند. در مورد پارامترهای  $e_s$  و  $\alpha$  نیز برخی ویژگی های خاک و ویژگی شاخص پراکندگی حوضه (DA)، توانستند به ترتیب ۴۳ و ۳۰ درصد از تغییرات آنها را توجیه کنند. این در حالی است که در مورد دو پارامتر  $n$  و  $m$  درصد رس به تنهایی وارد مدل شده و توانست به ترتیب ۱۲ و ۱۴ درصد از تغییرات آنها را توجیه نماید (جدول ۳).

(۱۴ درصد) بوده و پارامتر  $m$  با ضریب تغییرات ۶۱/۴ درصد دارای بیشترین تغییرپذیری در منطقه مورد بررسی بودند.

نتایج تجزیه و تحلیل تغییرپذیری مکانی پارامترهای منحنی انقباض خاک به روش کریجینگ معمولی:

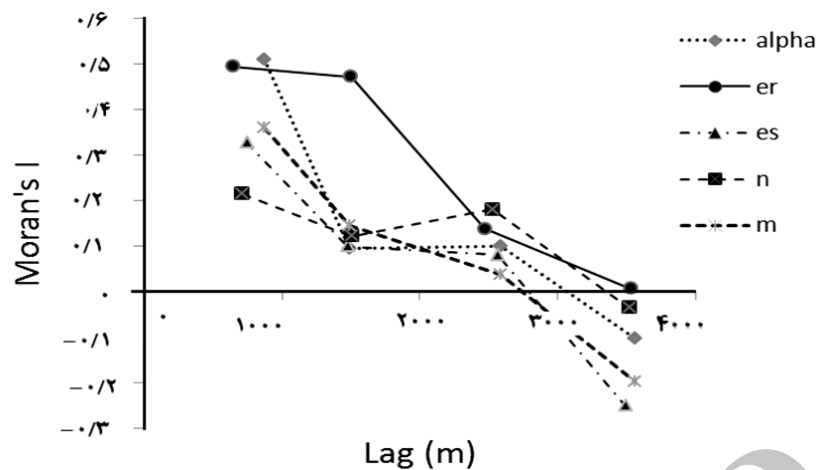
برای تشخیص پدیده همسان گردی در این پژوهش از تغییرنمای سطحی استفاده شد. نتایج تجزیه همسان گردی نشان داد که همه پارامترها همسان گرد بوده و به عبارتی پیوستگی مکانی مقادیر مربوط به پارامترهای مورد بررسی در جهات مختلف جغرافیایی یکسان بودند. این نتیجه بیانگر آن است که می توان از تغییرنمای همه جهته<sup>۱</sup> برای محاسبات بعدی استفاده نمود (جوآنگ و لی، ۲۰۰۰). در روش کریجینگ پس از برازش مدل های زمین آماری به مقادیر نیمه واریانس تجربی (به جز برای پارامتر  $n$  که از لوگ- نرمال استفاده شد)، فرآیند کریجینگ صورت گرفت. فاصله مکانی که خط شاخص موران محور  $X$  را قطع کرده است، میزان دامنه تأثیر برای آن پارامتر را نشان می دهد (شکل ۳).

بنابراین دامنه تأثیر پنج پارامتر انقباض خاک مورد بررسی، از حدود ۲۸۰۰ تا ۳۷۰۰ متر در نوسان می باشد (شکل ۳). آگاهی از دامنه تأثیر برای طراحی نمونه برداری در پژوهش های بعدی و همچنین حداکثر

جدول ۲- خلاصه ای از توصیف آماری پارامترهای برازش یافته مدل انقباض پنگ و هورن (۲۰۰۵)

بر داده های منحنی انقباض خاک های مورد بررسی ( $N=99$ ).

پارامتر	کمینه	بیشینه	میانگین	انحراف معیار	ضریب تغییرات	ضریب چولگی
$e_f$	۰/۴۰۷	۰/۹۰۱	۰/۵۷۸	۰/۰۹۹	۱۵/۷۸	۰/۶۶
$e_s$	۰/۶۷۵	۱/۳۹۴	۱/۰۰۶	۰/۱۴۲	۱۴/۰۰	۰/۴۲
$\alpha$	۰/۵۸۳	۳/۰۶۴	۱/۳۹۳	۰/۵۱۹	۳۷/۴۱	۰/۸۴
$n$	۱/۰۴۸	۱۱/۰۴۰	۲/۴۴۴	۱/۴۴۶	۵۹/۰۱	۳/۲۳
$m$	۰/۱۰۵	۲/۹۸۱	۱/۰۱۱	۰/۶۲۴	۶۱/۳۸	۰/۹۴



شکل ۳- کورولوگرام مکانی (شاخص موران در برابر فاصله مکانی) برای پارامترهای مدل انقباض خاک پنگ و هورن (۲۰۰۵) در منطقه مورد بررسی.

جدول ۳- خلاصه نتایج رگرسیون چندمتغیره خطی بین پارامترهای مدل پنگ و هورن (۲۰۰۵) و تخمین گرها (متغیرهای خاک و محیطی) در منطقه مورد بررسی.

پارامتر	متغیر تخمین گر	$R^2$	SE	P value
$e_r$	عرض از مبدا	۰/۰۹۳	۰/۱۰۳	۰/۳۷
	$OM^{-1}$	۰/۱۴۲	۰/۰۲۷	<۰/۰۰۱
	VCS	۰/۰۳۱	۰/۰۱۱	۰/۰۰۷
	$MS^{-1}$	-۰/۰۱۱	۰/۰۰۴	۰/۰۰۳
	$BD^{-1}$	۰/۳۵۶	۰/۱۲۷	۰/۰۰۶
	$\exp(Sand)^{-1}$	$9 \times 10^{-11}$	$3/23 \times 10^{-11}$	۰/۰۰۶
	$\ln CS$	-۰/۰۳۵	۰/۰۱۷	۰/۰۴۷
$e_s$	عرض از مبدا	۰/۹۸	۰/۰۳۶	<۰/۰۰۱
	Clay $\times$ OM	-۰/۰۰۲	۰/۰۰۰۱	<۰/۰۰۱
	DA	۰/۰۰۱	۰/۳۵۸	<۰/۰۰۱
	SAR	۰/۰۶	۰/۰۱۵	<۰/۰۰۱
	$VCS^T$	۰/۰۰۶	۰/۰۰۲	۰/۰۰۲
	$CCE^{1/5}$	-۰/۰۱۸	۰/۰۰۱	۰/۰۳۶
	$\ln \alpha$	عرض از مبدا	-۰/۱۷۸	۰/۳۶
$d_g$		-۲۶/۸۵	۵/۷۰	<۰/۰۰۱
$CCE^{-1}$		-۰/۶۲	۰/۱۹	۰/۰۰۲
$\ln CEC$		۰/۲۰۴	۰/۰۹	۰/۰۳
DA		۰/۰۰۱	۰/۰۰۰۱	۰/۰۴
$\ln n$	عرض از مبدا	۱/۱۳۹	۰/۲۴	<۰/۰۰۱
	Clay	-۰/۰۱	-۰/۰۴	۰/۰۱
$\ln m$	عرض از مبدا	۰/۲۶	۰/۲۳	<۰/۰۰۱
	Clay	۰/۰۲۲	۰/۰۰۶	<۰/۰۰۱

SE: خطای استاندارد، OM: درصد ماده آلی، VSC: درصد شن خیلی درشت، MS: درصد شن متوسط، BD: چگالی ظاهری، Sand: درصد شن، CS: درصد شن درشت، Clay: درصد رس، DA: شاخص پراکندگی، SAR: نسبت جذب سدیم، CCE: درصد آهک معادل، CEC: گنجایش تبادل کاتیونی، \* معنی دار در سطح احتمال ۹۵ درصد و \*\* معنی دار در سطح احتمال ۹۹ درصد.

صورت گرفته است، مدل کروی یکی از رایج ترین مدل های زمین آماری است که تغییرات مکانی خاک را به خوبی توصیف می کند (ویستر و الیور، ۲۰۰۷). دامنه تأثیر مدل های برازش یافته از حداقل ۳۸۵۰ تا حداکثر ۵۱۳۰ متر برای باقی مانده های مدل رگرسیون پارامتر  $e_s$  و  $\alpha$  تغییر کرده است. یکی از مهم ترین دستاوردهای تغییرپذیری مکانی در این پژوهش مقادیر دامنه تأثیر می باشد که پژوهشگر یا کاربر را قادر می سازد در پژوهش های بعدی فاصله نمونه برداری مناسب را انتخاب نماید (آسکین و کیزیلکای، ۲۰۰۶).

پس از اعمال مدل های ارایه شده در جدول ۳، به داده های واقعی دوباره مقدار برازش و مقدار باقی مانده (تفاضل مقدار واقعی و مقدار پیش بینی شده) محاسبه شده و به عنوان مقدار خطای باقی مانده در نظر گرفته شد. سپس مدل های زمین آماری به مقدار باقی مانده خطا برازش داده شد که نتایج آن در جدول ۴ آورده شده است. نتایج برازش مدل های زمین آماری بر داده های باقی مانده از رگرسیون چندمتغیره نشان داد که مدل کروی برازش یافته به همه پارامترها (به جز  $n$  با مدل نمایی) به عنوان بهترین مدل شناخته شد. در بیش تر پژوهش های زمین آماری که تا به حال

جدول ۴- خلاصه نتایج ویژگی های مدل زمین آماری برازش یافته به مقادیر باقی مانده خطای رگرسیون چندمتغیره در تکنیک کریجینگ- رگرسیون برای پیش بینی مکانی پارامترهای مدل پنگ و هورن (۲۰۰۵) در منطقه مورد بررسی ( $N=99$ ).

پارامترهای مدل زمین آمار				پارامتر مدل پنگ و هورن			
MAE	RMSE	دامنه تأثیر (متر)	$(Nugget/Sill) \times 100$	سقف (Sill)	اثر قطعه ای	مدل	
$-7.7 \times 10^{-2}$	$6.7 \times 10^{-2}$	۴۰۸۰	۰/۲	$4/2 \times 10^{-2}$	$1 \times 10^{-2}$	کروی	$e_f$
$2/1 \times 10^{-3}$	$7/8 \times 10^{-2}$	۳۸۵۰	۰/۲	$5/8 \times 10^{-2}$	$1/2 \times 10^{-2}$	کروی	$e_s$
$-1/38 \times 10^{-2}$	$1/36 \times 10^{-1}$	۵۱۳۰	۴۱	$4 \times 10^{-2}$	$1/67 \times 10^{-2}$	کروی	$\alpha$
$5 \times 10^{-3}$	$4 \times 10^{-1}$	۴۸۷۰	۱۳	$1/9 \times 10^{-1}$	$2/4 \times 10^{-2}$	نمایی	$n$
۱/۲۲	۱/۳۹	۳۹۹۰	۱۸	$4/7 \times 10^{-1}$	$8/4 \times 10^{-2}$	کروی	$m$

مدل سازی مکانی به دو روش کریجینگ معمولی (OK) و کریجینگ- رگرسیون (RK) در تمامی ۹۹ نقطه مورد بررسی، ارزیابی آن ها به روش تکنیک ارزیابی متقابل انجام گرفت. نتایج ارزیابی متقابل در جدول ۵ ارایه شده است. در مورد سه پارامتر  $e_f$ ،  $e_s$  و  $\alpha$  تکنیک RK نتایج قابل قبول تری نسبت به تکنیک OK نشان داده است. کم تر بودن شاخص های خطا، مانند RMSE، MAE

بر اساس طبقه بندی پیشنهادی کمبردلا و همکاران (۱۹۹۴)، پارامترهای  $e_f$  و  $e_s$  با درصد همبستگی کم تر از ۱ و پارامترهای  $n$  و  $m$  با درصد همبستگی ۱۳ و ۱۸ دارای وابستگی مکانی قوی در منطقه هستند، در حالی که متغیر  $\alpha$  با ضریب ۴۱ درصد، دارای وابستگی مکانی متوسط می باشد. مقایسه نتایج رگرسیون معمولی و رگرسیون- کریجینگ و تخمین مکانی: پس از انجام

پارامترهای  $n$  و  $m$  از تکنیک OK برای تخمین توزیع مکانی آن‌ها به کمک نرم‌افزار ArcGIS استفاده شد که نتایج پراکنش مکانی این پارامترها در شکل ۴ ارائه شده است. توزیع مکانی پارامترهای  $e_r$  و  $e_s$  در شکل‌های ۴-الف و ۴-ب نشان می‌دهد که بیش‌ترین مقادیر این پارامترها در بخش جنوب‌شرقی منطقه مشاهده می‌شود. این یافته بیان می‌کند که احتمالاً فاکتورهای ذاتی خاک و محیطی که این پارامترهای انقباض خاک را کنترل می‌کنند، در این بخش از منطقه باعث افزایش نسبت پوکی اشباع (تخلخل) و باقی‌مانده خاک شده است.

برای کمی‌کردن میزان همبستگی نقشه‌ها از ضریب هم‌پراکنش (Co-dis) استفاده شد (جدول ۶). پارامترهای  $e_r$  و  $e_s$  دارای همبستگی مکانی مثبت و معنی‌دار (۰/۶۸) هستند. پراکنش مکانی پارامتر  $\alpha$  الگوی کاملاً متفاوتی با دو پارامتر  $e_r$  و  $e_s$  نشان می‌دهد. مقادیر (Co-dis) ارائه شده در جدول ۶ نیز این یافته را تأیید می‌نماید که بین آن‌ها ضریب همبستگی مکانی معنی‌داری حاصل نشده است. روند تغییرات ضریب  $\alpha$  کاملاً با روند تغییرات مکانی  $m$  مطابقت دارد ولی عکس روند تغییرات پارامتر  $n$  می‌باشد (شکل ۴). همان‌طور که نتایج جدول ۶ و شکل ۴ نشان می‌دهد پارامترهای  $m$  و  $n$  نیز روند کاملاً معکوسی نسبت به هم دارند ( $r = -0/94$ )، به عبارتی در مکان‌هایی که پارامتر  $n$  حداکثر بوده است، مقدار  $m$  مقادیر کمی دارد. پنگ و هورن (۲۰۰۵) نیز تأکید کردند که به علت اثر متقابل پارامترهای مدل انقباض، تفسیر فیزیکی آن‌ها دشوار است. ولی در مجموع

و RMSEr و بیش‌تر بودن ضریب همبستگی ( $r$ ) برای این سه پارامتر در روش RK نسبت به روش OK این نتیجه را تأیید می‌نماید. روگر و همکاران (۲۰۱۴) برای پیش‌بینی مکانی شکل‌های مختلف فسفر در خاک‌های سوئیس به کمک داده‌های کمکی توپوگرافی و کاربری اراضی و استفاده از تکنیک‌های OK و RK نشان دادند که برای برآورد شکل‌های مختلف فسفر خاک، تکنیک RK موفق‌تر عمل کرده است. تقی‌زاده مهرجردی و همکاران (۲۰۱۴) در منطقه اردکان یزد به کمک داده‌های زودیافت سنجش از دور و رسانایی ظاهری (EM-38) نشان دادند که روش‌های هیبریدی مانند کوکریجینگ<sup>۱</sup> و RK در برآورد مکانی رسانایی الکتریکی خاک سطحی موفق‌تر از تکنیک کریجینگ معمولی عمل کرده‌اند.

در مقابل نتایج ارائه شده در جدول ۵ براساس مقادیر معیارهای RMSEr، MAE، RMSE و  $r$  نشان داد که تکنیک RK برای پارامترهای  $n$  و  $m$  نتوانسته است موفق‌تر از تکنیک OK عمل نماید. به نظر می‌رسد یکی از مهم‌ترین دلایل این کارایی کم‌تر، کم‌بودن ضرایب تبیین معادلات رگرسیونی تخمین پارامترهای  $n$  و  $m$  با استفاده از ویژگی‌های زودیافت می‌باشد (جدول ۳). درصد رس تنها ۱۲ و ۱۴ درصد از تغییرات پارامترهای نام‌برده را توجیه کرده است؛ مقدار کم ضریب تبیین بین متغیرهای کمکی و پارامترهای مورد نظر، نتوانسته است باعث بهبود تخمین مکانی در روش کریجینگ-رگرسیون گردد.

در نهایت با توجه به کارایی نسبی تکنیک‌ها، برای سه پارامتر  $e_r$ ،  $e_s$  و  $\alpha$  از تکنیک RK و برای

#### 1- Co-kriging

با اطلاع و آگاهی از تغییرات مکانی این پارامترها در منطقه، می‌توان با دقت مناسب بدون اندازه‌گیری در نقاط نمونه‌برداری نشده و صعب‌العبور، مدل منحنی انقباض خاک را ترسیم کرده و رفتار انقباض-انبساط‌پذیری خاک را پیش‌بینی نمود.

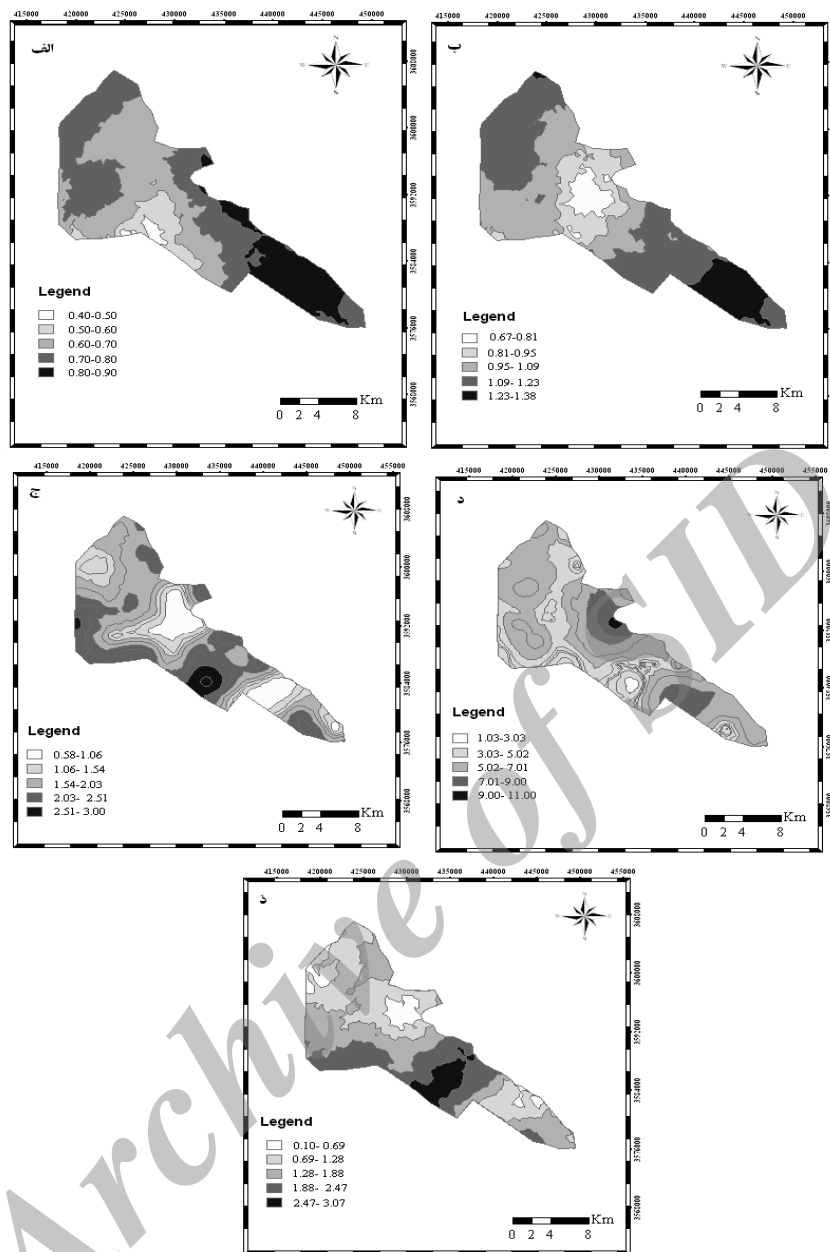
جدول ۵- ارزیابی دقت تکنیک‌های کریجینگ معمولی (OK) و رگرسیون-کریجینگ (RK) برای پیش‌بینی مکانی پارامترهای مدل انقباض خاک پنگ و هورن (۲۰۰۵) در منطقه مورد بررسی.

پارامتر مدل پنگ و هورن	تکنیک	RMSE	MAE	RMSEr (%)	r
$e_r$	OK	۰/۰۷۱	۰/۰۲۴	۶۴/۸۸	۰/۷۸
	RK	۰/۰۶۱	۰/۰۱۹	۵۸/۶۰	۰/۸۳
$e_s$	OK	۰/۲۴۳	۰/۰۳۰	۱۰۰/۳۳	۰/۷۱
	RK	۰/۱۲۳	۰/۰۲۵	۹۰/۵۱	۰/۸۲
A	OK	۰/۴۱۶	-۰/۱۰۳	۸۴/۹۶	۰/۶۷
	RK	۰/۳۳۴	-۰/۰۶۱	۶۷/۶۲	۰/۷۹
n	OK	۰/۹۷۲	۰/۱۱۷	۶۳/۴۴	۰/۷۸
	RK	۱/۱۳۲	۰/۱۳۴	۷۶/۶۳	۰/۶۹
m	OK	۰/۴۱۹	۰/۰۱۳	۷۱/۹۰	۰/۷۹
	RK	۰/۵۲۱	-۰/۰۷	۸۳/۰۹	۰/۶۸

جدول ۶- ضرایب هم‌پراکنش (Co-dis) بین نقشه‌های پارامترهای برازش مدل انقباض پنگ و هورن (۲۰۰۵) در خاک‌های مورد بررسی.

m	n	A	$e_s$	$e_r$	
				۱	$e_r$
			۱	۰/۶۸**	$e_s$
		۱	۰/۳۲**	-۰/۰۵	A
	۱	-۰/۸۷**	-۰/۱۵	۰/۲۳*	N
۱	-۰/۹۴**	۰/۹۰**	۰/۱۹	-۰/۰۱	m

\* معنی‌دار در سطح احتمال ۹۵ درصد و \*\* معنی‌دار در سطح احتمال ۹۹ درصد.



شکل ۴- نقشه پراکنش مکانی پارامترهای مدل انقباض خاک پنگ و هورن (۲۰۰۵): نسبت پوکی باقی مانده ( $e_r$ ) (الف)، نسبت پوکی اشباع ( $e_s$ ) (ب) و  $\alpha$  (ج) برآوردشده به روش رگرسیون- کریجینگ و پارامترهای  $n$  (د) و  $m$  (ذ) برآوردشده به روش کریجینگ معمولی در خاک‌های منطقه مورد بررسی.

بختیاری نشان داد که مدل کروی بهترین مدل تغییرنمایی برای بیان تغییرپذیری مکانی این پارامترها بود و دامنه تأثیر پارامترها از ۲۸۰۰ تا ۳۷۰۰ متر به کمک شاخص موران-I برآورد شد. کریجینگ معمولی برای پیش‌بینی مکانی همه پارامترهای مدل

### نتیجه‌گیری

نتایج تجزیه و تحلیل‌های تغییرپذیری مکانی پارامترهای برازش‌یافته ( $m$  و  $n$ ،  $\alpha$ ،  $e_s$ ،  $e_r$ ) مدل پنگ و هورن (۲۰۰۵) بر داده‌های منحنی انقباض در خاک‌های بخشی از منطقه چلگرد استان چهارمحال و

همبستگی منفی قوی و بین پارامترهای  $\alpha$  و  $m$  ضریب همبستگی مثبت قوی وجود دارد. روی هم رفته نتایج این پژوهش نشان داد که پارامترهای مدل انقباض خاک در منطقه مورد بررسی دارای وابستگی مکانی هستند. دانسته‌های مکانی به دست آمده در این پژوهش می‌تواند در راستای نمونه‌برداری‌های بعدی برای اندازه‌گیری و مدل سازی انقباض پذیری خاک‌ها، و همچنین مدیریت دقیق مکانی کاربردهای مهندسی و زیرساخت‌های کشاورزی و خاک‌ورزی در منطقه مورد بررسی به کار گرفته شوند.

انقباض خاک دارای نتایج رضایت‌بخشی بود. استفاده از داده‌های کمکی ویژگی‌های خاک و توپوگرافی به کمک تکنیک رگرسیون- کریجینگ، پیش‌بینی مکانی پارامترهای  $e_r$ ،  $e_s$  و  $\alpha$  را بهبود بخشید. ولی به‌علت همبستگی ضعیف ویژگی‌های کمکی با پارامترهای  $m$  و  $n$ ، تکنیک کریجینگ- رگرسیون در مورد این دو پارامتر مدل انقباض خاک کارآتر از کریجینگ معمولی نبود. همبستگی مکانی بین پنج پارامتر به کمک ضریب هم‌پراکنش نشان داد که بین پارامترهای  $\alpha$  و  $n$  و همچنین بین پارامترهای  $m$  و  $n$  ضریب

#### منابع

1. Askin, T., and Kizilkaya, R. 2006. Assessing spatial variability of soil enzyme activities in pasture topsoils using geostatistics. *Eur. J. Soil Biol.* 42: 230-237.
2. Braudeau, E., and Boivin, P. 1995. Transient determination of shrinkage curve for undisturbed soil samples: a standardized experimental method. In: P. Baveye and M.B. McBride (Eds.), *Clay Swelling and Expansive Soils*. Kluwer Academic, Norwell, MA. Pp: 53-65.
3. Bronswijk, J.J.B. 1991. Relation between vertical soil movements and water content changes in cracking clays. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 55: 1220-1226.
4. Cambardella, C.A., Moorman, T.B., Novak, J.M., Parkin, T.B., Karlen, D.L., Turco, R.F., and Konopka, A.E. 1994. Field-scale variability of soil properties in central Iowa soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 58: 1501-1511.
5. Chertkov, V.Y. 2003. Modelling the shrinkage curve of soil clay pastes. *Geoderma*. 112: 71-95.
6. Goovaerts, P. 1994. Study of spatial relationships between two set of variables using multivariate geostatistics. *Geoderma*. 62: 93-107.
7. Groenevelt, P.H., and Grant, C.D. 2001. Re-evaluation of the structural properties of some British swelling soils. *Eur. J. Soil Sci.* 52: 469-477.
8. Haines, W.B. 1923. The volume changes associated with variations of water content in soil. *J. Agric. Sci. Camb.* 13: 293-310.
9. Jalali, G., Tehrani, M.M., and Broumand, N. 2013. Comparison of different geostatistical approaches for prediction of spatial variability of soil nutrition in east of Mazandaran province. *Soil Res. J.* 27: 195-204. (In Persian)
10. Johnston, K., Ver Hoef, J.M., Krivoruchko, K., and Lucas, N. 2001. *Using ArcGIS Geostatistical Analyst*, ESRI, New York, USA.
11. Juang, K.W., and Lee, D.Y. 2000. Comparison of three nonparametric kriging methods for delineating heavy metal contaminated soils. *J. Environ. Qual.* 29: 197-205.
12. Kelishadi, H., Mosaddeghi, 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.
13. Mishra, A.K., Dhawan, S., and Rao, S.M. 2007. Analysis of swelling and shrinkage behavior of compacted clays. *Geotech. Geo. Eng. Inter. J.* 26: 289-298.
14. Moradi, G., Noorani, V., and Taghizadeh, F. 2012. Spatial prediction of soil saturated hydraulic conductivity using multivariate geostatistics technique. *Civil Eng. Environ. Sci.* 68: 79-80. (In Persian)



15. Mousavaifard, S.M., Momtaz, H., and Khordaveriluo, H. 2013. Efficacy of different geostatistics predictors for mapping of some soil physical properties. *Soil Water Cons. J.* 3: 134-156. (In Persian)
16. Parsaee, B., and Reisei Estabragh, A. 2008. Investigation of swelling and shrinkage behavior of an expanded soil. *Soil Water Res.* 41: 87-94.
17. Peng, X., and Horn, R. 2005. Modeling soil shrinkage curve across a wide range of soil types. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 69: 584-592.
18. Peng, X., Zhang, Z.B., Wang, L.L., and Gan, L. 2012. Does soil compaction change soil shrinkage behaviour? *Soil. Till. Res.* 125: 89-95.
19. Roger, A., Libohova, Z., Rossier, N., Joost, S., Maltas, A., Frossard, E., and Sinaj, S. 2014. Spatial variability of soil phosphorus in the Fribourg canton, Switzerland. *Geoderma.* 217/218: 26-36.
20. Stirk, G.B. 1954. Some aspects of soil shrinkage and the effect of cracking upon water entry into the soil. *Aust. J. Agric. Res.* 5: 279-290.
21. Taghizadeh-Mehrjardi, R., Minasny, B., Sarmadian, F., and Malone, B.P. 2014. Digital mapping of soil salinity in Ardakan region, central Iran. *Geoderma.* 213: 15-28.
22. Tiefelsdorf, M. 2000. *Modeling Spatial Processes: The Identification and Analysis of Spatial Relationships in Regression Residuals by Means of Moran's I.* Berlin: Springer-Verlag.
23. USDA and NRCS. 1999. *Soil Taxonomy a Basic System of Soil Classification for Making and Interpreting Soil Surveys.* 2<sup>nd</sup> ed. by Soil Survey Staff. Washington, DC.
24. van Genuchten, M.Th. 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 44: 892-898.
25. Webster, R., and Oliver, M.A. 2007. *Geostatistics for Environmental Scientists,* 2<sup>nd</sup> Ed. John Wiley & Sons, Chichester.
26. Wilson, J.P., and Gallant, J.C. 2000. *Secondary Topographic Parameters. Terrain Analysis: Principles and Applications.* John Wiley & Sons: New York.



---

## Combining topographic and soil attributes for spatial prediction of model parameters of soil shrinkage curve

Z. Zolfaghari<sup>1</sup>, \*Sh. Ayoubi<sup>2</sup> and M.R. Mosaddeghi<sup>3</sup>

<sup>1</sup>M.Sc. Graduate, Dept. of Soil Science, Isfahan University of Technology, <sup>2</sup>Professor, Dept. of Soil Science, Isfahan University of Technology, <sup>3</sup>Associate Prof., Dept. of Soil Science, Isfahan University of Technology  
Received: 02/08/2014; Accepted: 05/20/2014

---

### Abstract

Engineering and soil mechanical properties are not usually presented in soil maps. Swelling and shrinkage are among the important soil mechanical and physical properties which play a vital role in the stability of buildings and also for tillage practices and irrigation in agriculture. This study was conducted to investigate the spatial variability of model parameters of soil shrinkage curve in Chelgerd district, Chaharmahal-va-Bakhtiari province. Ninety nine locations were selected and soil clods were collected from the 0-10 cm layer and brought to the laboratory. Soil shrinkage curve was measured, according to *Archimedes's* principle, by covering the undisturbed clods with an Acrylic Resin which was slowly permeable to water vapor and impermeable to liquid water. Then, the void ratio ( $e$ ) values were plotted vs. the moisture volume ratio ( $v$ ) values. The shrinkage curve data were modeled using Peng and Horn (2005) model and the model parameters ( $e_r$ ,  $e_s$ ,  $\alpha$ ,  $n$  and  $m$ ) were optimized for each soil. Spatial structures of the model parameters were identified by the means of Moran's I index. Selected soil physical and chemical properties and topographic attributes were employed as auxiliary data in regression-kriging method. Using ordinary-kriging (OK) and regression-kriging (RK) methods showed that for spatial prediction of  $e_r$ ,  $e_s$  and  $\alpha$ , the RK method was superior when compared to the OK method. However, the RK was not successful for spatial prediction of  $n$  and  $m$ ; this could be due to low coefficient of determination of the regression equations relating parameters  $n$  and  $m$  to auxiliary soil and topographic attributes. Trends of spatial variability showed that paired parameters  $e_r$  and  $e_s$  or  $\alpha$  and  $n$  have high spatial correspondences which were consistent with the co-dispersion coefficients in the mentioned maps. Overall, the results of this research indicated that soil shrinkage model parameters possess spatial variability in the study region and the obtained spatial information could help sampling strategy for modeling soil shrinkage in future. Moreover, the results might be useful for precise spatial management for engineering purposes and agricultural and tillage fundamental applications in the region.

**Keywords:** Soil shrinkage curve parameters, Peng and Horn (2005) model, Spatial variability, Regression-kriging, Moran's index

---

\* Corresponding Authors; Email: ayoubi@cc.iut.ac.ir