

بررسی توزیع جانبی و عمودی کربنات کلسیم در خاک با استفاده از زمین‌آمار و توابع اسپلاین

علیرضا امیریان چکان^{۱*}، فریدون سرمدیان^۲، جهانگرد محمدی^۳، روح‌الله تقی زاده مهرجردی^۴

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۰۷/۱۹ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۱۱/۰۷)

چکیده

در بیشتر مطالعات مربوط به توزیع کربن خاک، به توزیع سه بعدی کربن معدنی کمتر توجه شده است. کربنات کلسیم شکل غالب کربنات‌ها در خاک‌های مناطق خشک و نیمه‌خشک است که دانستن توزیع سه بعدی آن برای شناسایی عوامل مؤثر بر توزیع آن، پیش‌بینی برخی رفتارهای مهم و مدیریت بهتر خاک اهمیت دارد. این پژوهش با هدف بررسی توزیع سه بعدی کربنات کلسیم خاک در منطقه‌ای به وسعت ۳۶۰۰ هکتار در دشت سیلاخور (استان لرستان) انجام گرفت. برای این منظور، تابع اسپلاین با سطح برابر به داده‌های کربنات کلسیم بدست آمده از ۱۰۳ مکان تا عمق یک متری برازش داده شد و مقادیر کربنات کلسیم در پنج عمق استاندارد پروژه جهانی نقشه‌برداری رقومی برآورد گردید. سپس از کریجینگ معمولی برای تهیه نقشه پیوسته تغییرات جانبی کربنات کلسیم در همه عمق‌ها استفاده شد. بررسی‌های زمین‌آماري نشان داد که در همه عمق‌ها مدل کروی بهترین مدل برای نشان دادن ساختار تغییرات مکانی کربنات کلسیم بود. نسبت اثر قطعه‌ای به آستانه واریوگرام برای همه عمق‌ها کمتر از ۲۵ درصد بود که بیانگر پیوستگی مکانی قوی کربنات کلسیم است. بررسی ناهمسانگردی بیانگر بیشتر بودن دامنه واریوگرام‌ها در امتداد دشت نسبت به امتداد عمود بر آن بود که نشان‌دهنده پیوستگی مکانی بیشتر در این امتداد به دلیل یکنواختی بیشتر مواد مادری، کاربری اراضی و شیب است. نتایج برازش توابع اسپلاین بیانگر کارایی خوب آن‌ها در تخمین تغییرات عمودی کربنات کلسیم ($R^2=0/88$ و $RMSE=0/99$) بود. نقشه‌های توزیع جانبی و توابع اسپلاین هر دو بیانگر روند افزایشی کربنات کلسیم با عمق بودند. در بخش‌های شرقی و جنوبی منطقه به دلیل زهکشی ضعیف و در نتیجه کاهش آبشویی، مقدار کربنات کلسیم در خاک‌ها بالا و روند افزایشی آن با عمق زیاد محسوس نبود. به‌طور کلی نتایج نشان داد که کاربرد همزمان توابع اسپلاین با روش‌های زمین‌آماري، رویکرد امیدوارکننده‌ای در بررسی تغییرات سه‌بعدی خواص خاک و برطرف کردن برخی مشکلات نقشه‌های سنتی است.

واژه‌های کلیدی: دشت سیلاخور، معادلات اسپلاین، نقشه‌برداری سه بعدی خاک، نقشه پیوسته خاک

۱- استادیار گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده محیط‌زیست و منابع طبیعی، دانشگاه صنعتی خاتم‌الانبیاء بهبهان (مکاتبه کننده)

۲- استادیار گروه مدیریت مناطق بیابانی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه اردکان

۳- استادیار گروه مهندسی علوم خاک، دانشگاه تهران

۴- دانشیار گروه علوم خاک، دانشگاه شهرکرد

*پست الکترونیک: amirian@bkatu.ac.ir

مقدمه

کربن در خاک به دو صورت آلی و معدنی ذخیره می‌شود. بیشتر مطالعات در ارتباط با ذخیره آلی کربن انجام گرفته است و به فرم معدنی آن در خاک توجه کمتری شده است (Adhikari et al., 2013). این در حالی است که در مناطق خشک و نیمه‌خشک شکل معدنی کربن خاک که بیشتر به صورت کربنات‌هاست، فرم غالب بوده و حدود ۲ تا ۱۰ برابر بیشتر از فرم آلی است (Esvaren et al., 2000). برخلاف کربن آلی، تبادل شکل‌های مختلف کربن معدنی با اتمسفر و مشارکت آن‌ها در چرخه‌های زیستی کربن بسیار کند است. همچنین کربنات‌ها برعکس ماده آلی، بیشتر در لایه‌های پایینی خاک تجمع می‌یابند. این دو تفاوت، دلیل اصلی تمرکز کمتر مطالعات روی کربن معدنی در خاک است. کربنات‌ها به‌خصوص کربنات کلسیم که در اغلب خاک‌های نواحی خشک و نیمه‌خشک از جمله خاک‌های ایران به‌وفور یافت می‌شوند تأثیر زیادی روی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک‌ها دارند. کربنات‌های موجود در خاک معمولاً واکنش خاک، قابلیت در دسترس بودن عناصر غذایی (به‌ویژه عناصر کم‌مصرف) و هم‌آوری ذرات را تحت تأثیر قرار می‌دهند (Esvaren et al., 2000). کربنات‌ها ترکیبات مهم و کلیدی در محیط‌های خشک و نیمه‌خشک هستند که از جنبه‌های زیست‌محیطی، پیدایش خاک، تاریخچه تکامل اراضی و اقلیم گذشته اهمیت زیادی دارند (Laudicina et al., 2013). در رده‌بندی خاک، اطلاعات در مورد کربنات کلسیم خاک برای شناسایی افق‌های سطحی آن‌تروپیک، مالیک، اومبریک، افق‌های عمقی کلسیک، پتروکلسیک و کمبیک و در سطوح پایین‌تر رده‌هایی مثل آلفی‌سول، اریدی‌سول، اینسپتی‌سول و مالی‌سول و در سطح فامیلی مورد نیاز است (Soil Survey Staff, 2014). بنابراین میزان ذخیره کربن معدنی در خاک و توزیع آن نقش مهمی در تغییرات پویای اتمسفر، پوشش گیاهی و خاک ایفا می‌کند و اطلاعات در مورد آن اهمیت زیادی در شناسایی و مدیریت بهتر خاک‌ها دارد.

اطلاعات در مورد ویژگی‌های خاک اغلب در مقیاس و قالب موردنیاز (مثلاً داده‌های رستری در مقایسه با داده‌های وکتوری) در دسترس نیست (Greve et al., 2012; Liu et al., 2012; Akpa et al., 2014; Malone et al., 2011; Taghizadeh-Adhikari et al., 2013; Malone et al., 2009; Taghizadeh-Mehrjardi et al., 2014a,b). در مطالعات متعددی استفاده گردیده است

داده‌های کم که تلاش برای جمع‌آوری داده‌های بیشتر با محدودیت‌های مالی و حمایتی مواجه است، بیشتر مشهود است (Akpa et al., 2014). هرچند که نقشه‌های سنتی حاوی اطلاعات مفیدی در مورد خاک‌ها می‌باشند، ولی تغییرپذیری درون کلاس‌ها را از دید پنهان می‌نمایند. خاک‌شناسان از اواخر دهه ۷۰ به این محدودیت‌ها در مدل‌سازی تغییرات مکانی ویژگی‌های خاک پی بردند (Lark, 2010). نتیجه این محدودیت‌ها تولید نقشه‌هایی با قطعیت پایین است (McBratney & Webster, 1986). همچنین، با وجود این‌که بررسی‌ها نشان داده‌اند ویژگی‌های خاک معمولاً به‌صورت پیوسته با عمق تغییر می‌کنند (Ponce-Hernandez et al., 1986)، در نقشه‌های سنتی این تدریجی بودن به‌صورت کمی در نظر گرفته نمی‌شود که این امر می‌تواند منجر به بروز خطا گردد.

برای در نظر گرفتن تغییرات تدریجی جانبی و عمودی خاک رویکردهای مختلفی ارائه گردیده‌اند. زمین‌آمارا راهکاری برای بررسی تغییرات پیوسته متغیرهایی است که به دلایلی از جمله پیچیدگی فرآیندها و وابستگی نتایج حاصل از آن‌ها به شرایط اولیه ناشناخته، نمی‌توان آن‌ها را با روش‌های جبری تخمین زد (Lark, 2010). همچنین برای بررسی تغییرات عمودی ویژگی‌های خاک، توابع عمق خاک مختلفی ارائه گردیده است. این توابع شامل روش‌های ساده دستی تا روش‌های توسعه‌یافته‌تر مثل رگرسیون خطی و چندجمله‌ای‌ها (Campbell et al., 1970)، اسپلاین‌هایی با سطح یکسان^۲ (Ponce-Hernandez et al., 1986) و توابع نمایی کاهشی^۳ (Minasny et al., 2006) می‌باشند. معادلات اسپلاین از جمله معادلات عمقی هستند که کارایی بیشتر آن‌ها نسبت به سایر معادلات توسط بیشاپ و همکاران (Bishop et al., 1999) نشان داده شده است و از آن‌ها در مطالعات متعددی استفاده گردیده است (Adhikari et al., 2013; Akpa et al., 2014; Malone et al., 2009; Malone et al., 2011; Taghizadeh-Mehrjardi et al., 2014a,b). پژوهشگران به بررسی همزمان تغییرات جانبی و عمودی ویژگی‌هایی از خاک مثل بافت (Adhikari et al., 2013; Liu et al., 2012; Akpa et al., 2014) کربن آلی (Liu et al., 2012; Akpa et al., 2014) و ظرفیت

3 - Exponential decay functions

1- Geo-Statistics
2- Equal area splines

لرستان انجام گرفت (شکل ۱). منطقه بر اساس سیستم UTM در طول ۳۱۱۳۴۰ تا ۳۱۶۵۹۰ متر و عرض آن از ۳۷۱۱۲۵۰ تا ۳۷۲۰۹۸۰ متر متغیر است. بر اساس آمار ۱۵ ساله ایستگاه هواشناسی شهرستان دورود (۱۳۹۴-۱۳۸۰) میانگین دمای سالیانه منطقه ۱۶/۲ درجه سلسیوس، بارندگی و تبخیر سالیانه آن نیز به ترتیب ۶۲۳ و ۲۲۳۰ میلی‌متر می‌باشد. امتداد این دشت شمال‌غربی-جنوب-شرقی است که بین زون زمین‌شناسی سندج-سیرجان در شمال و رشته کوه‌های زاگرس در جنوب قرار گرفته است. واحدهای ژئومورفولوژی منطقه شامل پادگان‌های آبرفتی جدید در امتداد رودخانه‌های منطقه و دشت‌های دامنه‌ای در دامنه کوه‌های مشرف به دشت می‌باشند. شیب منطقه از حدود ۰/۲ درصد در بخش‌های مرکزی دشت تا حدود ۸ درصد در بخش‌های جنوبی متغیر است. بر اساس داده‌های اقلیمی ایستگاه هواشناسی شهرستان دورود و نقشه رژیم‌های رطوبتی و حرارتی خاک‌های ایران، رژیم رطوبتی خاک‌های منطقه زریک و رژیم حرارتی آن‌ها ترمیک تعیین گردید. با توجه به مطالعات صحرایی و آزمایشگاهی و بر اساس سیستم رده‌بندی آمریکایی (Soil Survey Staff, 2014)، خاک‌های منطقه در چهار گروه بزرگ Calcixerepts, Haploxerepts, Xerorthents, Xerofluvents طبقه‌بندی گردیدند.

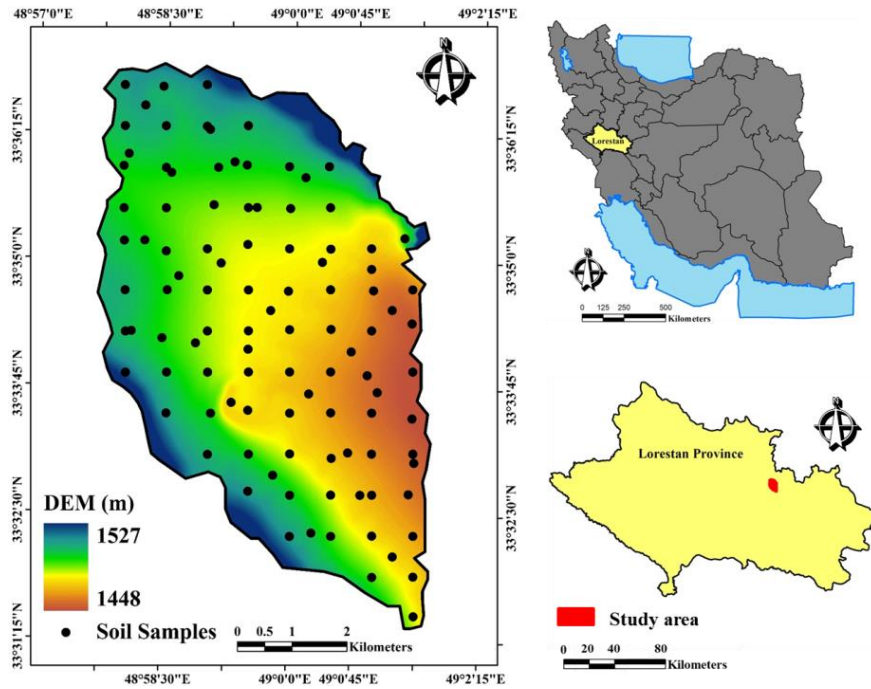
نمونه‌برداری از خاک و تجزیه‌های آزمایشگاهی: در این پژوهش نمونه‌برداری از ۱۰۳ مکان در منطقه انجام گرفت (شکل ۱). از این تعداد، ۷۵ نقطه با فواصل منظم برای حفر خاک‌رخ و حفر توسط مته (به‌صورت یک‌درمیان)، و ۲۸ نقطه به‌صورت تصادفی و در فواصل بین نقاط شبکه منظم برای حفر با استفاده از مته در نظر گرفته شد. پس از تعیین موقعیت نقاط در صحرا با استفاده از دستگاه GPS، نمونه‌های خاک تا عمق یک متری از محل‌های انتخاب شده برداشت شد و برای مطالعات بعدی به آزمایشگاه منتقل گردید. پس از هوا خشک شدن نمونه‌ها و عبور آن‌ها از الک دو میلی‌متری، درصد کربنات کلسیم معادل به روش کلسی‌متری حجمی تعیین گردید (Nelson, 1982).

تبادل کاتیونی (Taghizadeh-Mehrjardi *et al.*, 2014b)، آب قابل دسترس^۴ (Malone *et al.*, 2009) و شوری (Taghizadeh-Mehrjardi *et al.*, 2014a) پرداخته‌اند. در این مطالعات از معادلات عمق خاک برای مشخص کردن توزیع عمودی خصوصیات مورد نظر و از روش‌هایی چون سنجش از دور^۵ و زمین‌آمار برای تهیه نقشه پیوسته متغیر مورد نظر در کل منطقه استفاده شده است.

علی‌رغم اهمیت کربن معدنی به‌عنوان مخزنی از کربن در خشکی‌ها و همچنین نقش آن در چرخه جهانی کربن، مطالعات انجام شده در ارتباط با آن خیلی محدود است (Zamanian *et al.*, 2016) و به نظر می‌رسد تاکنون از معادلات اسپلین و روش‌های زمین‌آمار به‌طور هم‌زمان برای بررسی توزیع سه بعدی کربنات کلسیم در خاک‌های دنیا استفاده نشده است. با استفاده از معادلات عمق می‌توان مقدار این ترکیب مهم را در هر عمق و یا هر بازه عمق دلخواه تخمین زد و با استفاده از روش‌های زمین‌آمار می‌توان نقشه پیوسته تغییرات مکانی آن را به‌دست آورد. از آنجا که کربنات کلسیم از ترکیبات رایج خاک‌های مناطق خشک و نیمه‌خشک از جمله خاک‌های ایران است و تأثیر زیادی روی خواص فیزیکی و شیمیایی خاک‌ها دارد، داشتن داده‌های کمی و پیوسته از تغییرات جانبی و عمودی آن برای مدیریت و شناخت بهتر خاک‌ها از اهمیت زیادی برخوردار است. همچنین از این داده‌ها می‌توان در پیش‌بینی برخی رفتارهای مهم خاک استفاده کرد و عوامل تأثیرگذار بر توزیع و تجمع کربنات‌ها را مورد بررسی قرار داد. بنابراین، هدف اصلی این پژوهش بررسی کارایی توابع اسپلین و روش‌های زمین‌آمار برای به‌دست آوردن داده‌های پیوسته مکانی از تغییرات جانبی و عمودی کربنات کلسیم معادل در خاک بود.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه: پژوهش حاضر در بخشی از دشت سیلاخور به وسعت تقریبی ۳۶۰۰ هکتار و ارتفاع متوسط ۱۴۵۰ متر واقع در شمال غربی شهرستان دورود در استان



شکل ۱- موقعیت منطقه مورد مطالعه و نحوه پراکنش مکان های نمونه برداری خاک
Figure 1. Study area and the locations of sampling sites

$$y_i = \bar{f}_i + e_i \quad (1)$$

در این رابطه \bar{f}_i میانگین $f(x)$ در بازه (x_{i-1}, x_i) و e_i خطا با میانگین صفر و واریانس σ^2 است. تابع $f(x)$ نامعلوم است و باید با استفاده از داده های خاک رخ تخمین زده شود. توابع اسپلاین با انتخاب مقداری برای $f(x)$ در جهت کمینه سازی رابطه ۲ به داده های خاک رخ تطابق داده می شوند:

$$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{f}_i)^2 + \lambda \int_{x_0}^{x_n} [f'(x)]^2 dx \quad (2)$$

بخش اول رابطه ۲ دقت برازش مدل بر داده ها را نشان می دهد، بخش دوم میزان ناهمواری تابع $f(x)$ را نشان می دهد و λ پارامتر کنترل کننده میزان نرم کنندگی^۶ تابع اسپلاین است. به عبارت دیگر حدی که تابع اسپلاین مجاز است تغییرات پله ای و ناگهانی را به صورت تدریجی نشان دهد، توسط λ کنترل می شود. برای به دست آوردن نتیجه مطلوب، مقادیر مختلف λ (۱، ۰/۱، ۰/۰۱، ۰/۰۰۱، ۰/۰۰۰۱ و ۰/۰۰۰۰۱) مورد استفاده قرار می گیرد و لاندایی که منجر به کمترین RMSE می شود انتخاب می گردد.

برازش معادله عمق خاک: در این بررسی از معادله عمق اسپلاین با سطوح برابر (Bishop *et al.*, 1999; Malone *et al.*, 2009) برای تخمین تغییرات عمودی کربنات کلسیم استفاده گردید. برای این منظور، این معادله به داده های اندازه گیری شده کربنات کلسیم در اعماق مختلف خاک در ۱۰۳ نقطه مطالعاتی برازش داده شد. با استفاده از معادلات عمق می توان مقدار متغیر مورد نظر را در هر عمق دلخواه تخمین زد. در این تحقیق درصد کربنات کلسیم در پنج عمق استاندارد مطابق پروژه جهانی نقشه برداری خاک^۶ شامل اعماق ۰-۵، ۵-۱۰، ۱۰-۳۰، ۳۰-۶۰ و ۶۰-۱۰۰ سانتی متری (Malone *et al.*, 2009) با استفاده از رابطه ۱ تخمین زده شد.

یک اسپلاین با سطح یکسان از تعدادی چندجمله ای درجه دوم تشکیل شده است که در گره هایی که در مرز افق های خاک قرار دارند به هم متصل می شوند. اگر عمق خاک با x عمق مرز بالایی افق ها با $x_0 < x_1, \dots, < x_n$ و تابع عمق توصیف کننده مقادیر واقعی ویژگی مورد نظر با $f(x)$ نشان داده شود، مقدار تخمینی ویژگی مورد نظر (y_i) به زبان ریاضی به صورت زیر است:

8 - Smoothing

6- Global Soil Map Project
7 - Roughness of function

نتایج و بحث

خلاصه آماری داده‌ها: خلاصه آماری مقادیر کربنات کلسیم پیش‌بینی شده در ۵ عمق استاندارد در جدول ۱ نشان داده شده است. با توجه به اینکه رسوبات دشت سیلاخور بیشتر از مواد مادری آهکی تشکیل شده‌اند، به‌طور کلی مقدار کربنات کلسیم در خاک‌های منطقه نسبتاً بالاست. افزایش کربنات‌ها با عمق معمولاً ناشی از فرآیند آبشویی آن‌ها از لایه‌های بالایی و تجمع در لایه‌های پایینی است (Badí *et al.*, 2013) که می‌تواند منجر به تشکیل افق کلسیک گردد. همچنین با توجه به بالا بودن مقدار تبخیر در منطقه، صعود مویینگی کربنات‌ها از آب‌های زیرزمینی را می‌توان دلیل دیگری برای تجمع آن‌ها در لایه‌های خاک در جاهایی که سطح آب زیرزمینی بالا است دانست. در اکثر خاک‌های منطقه تجمع بیشتر کربنات‌ها در لایه‌های پایینی نسبت به لایه‌های بالایی و وجود آن‌ها به اشکال پودری، رشته‌ای و سخت دانه تأیید شده است (Amirian-Chakan, 2012). تان و همکاران (Tan *et al.*, 2014) نیز در بررسی خود روی خاک‌های لسی چین نشان دادند مقدار کربنات کلسیم با افزایش عمق افزایش می‌یابد.

مقادیر انحراف معیار نشان می‌دهد که میزان تغییرپذیری کربنات کلسیم در سه لایه بالایی (تا عمق ۳۰ سانتی‌متر) تقریباً مشابه هم و کمتر از دو لایه پایینی است. همگن بودن لایه‌های بالایی و مشابه بودن میزان تغییرات کربنات کلسیم می‌تواند به دلیل فعالیت کشاورزی از جمله شخم زدن باشد که باعث همگن‌سازی لایه‌های سطحی (لایه شخم) می‌گردد.

در چهار عمق بالایی توزیع داده‌ها دارای مقداری چولگی به راست است ولی در عمق پنجم توزیع داده‌ها تقریباً به نرمال نزدیک است. بنابراین برای مدل‌سازی‌های زمین‌آماری، داده‌های چهار عمق اول به صورت لگاریتمی وارد مدل شدند. در صورتی که مقدار ضریب چولگی بین $+0/5$ تا $-0/5$ باشد معمولاً نیازی به تبدیل داده‌ها نیست (Webster, 2001). بنابراین داده‌های لایه پنجم بدون تبدیل برای مدل‌سازی واریوگرام به کار گرفته شدند.

تجزیه و تحلیل‌های زمین‌آماری: در این پژوهش قبل از انجام تجزیه و تحلیل‌های زمین‌آماری، توزیع داده‌ها مورد بررسی قرار گرفت و برای مشخص نمودن میزان انحراف توزیع داده‌ها از توزیع نرمال از ضریب چولگی استفاده گردید. با توجه به اینکه داده‌ها معمولاً دارای روند^۹ هستند، در شرایطی که روند معنی‌داری در داده‌ها وجود داشته باشد بهتر است در بررسی‌های واریوگرافی حذف شود. در این تحقیق برای بررسی روند از ابزار تجزیه و تحلیل روند در نرم‌افزار ArcGIS استفاده گردید. برای مدل‌سازی دقیق واریوگرام‌های تجربی که ورودی روش‌های مختلف درون-یابی کریجینگ می‌باشند، وضعیت جهت‌دار بودن پیوستگی مکانی داده‌ها باید مشخص شود (Oliver & Webster, 1990). بیضی ناهمسانگردی ابزار مناسبی برای بررسی جهت‌دار بودن پیوستگی مکانی داده‌ها است (Moral *et al.*, 2011). در این پژوهش از نسبت ناهمسانگردی که برابر با نسبت بزرگترین دامنه (قطر بزرگ بیضی) به کوچکترین دامنه (قطر کوچک بیضی) است به عنوان معیاری برای بررسی میزان ناهمسانگردی استفاده شد. برای محاسبه واریانس به صورت پیوسته، مدل‌های تجربی مختلفی مثل مدل‌های گوسی، کروی و نمایی به واریوگرام برازش داده شد و بهترین مدل بر اساس مقدار RMSE (رابطه ۳، انتخاب گردید. پس از برازش مدل‌های مناسب بر واریوگرام‌های تجربی، از کریجینگ معمولی در محیط نرم‌افزار ArcGIS برای تهیه نقشه‌های پیوسته توزیع کربنات کلسیم استفاده گردید.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2} \quad (3)$$

در این رابطه O_i مقدار اندازه‌گیری شده، P_i مقدار تخمینی و n تعداد داده‌ها است.

جدول ۱- خلاصه آماری مقادیر کربنات کلسیم در پنج عمق استاندارد

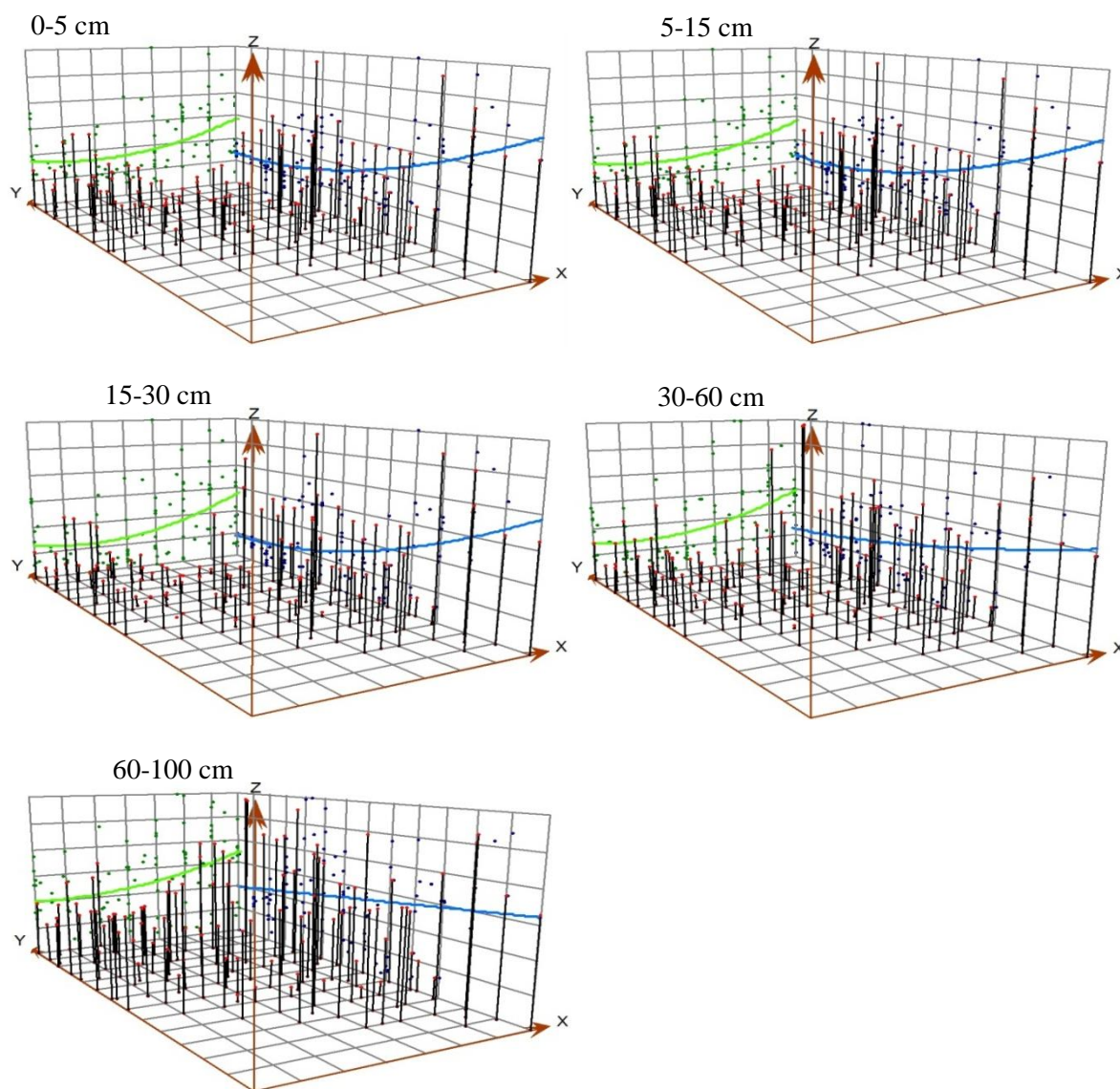
Table 1. Summary statistics of calcium carbonates in the five standard depths

چولگی	انحراف معیار	میانگین	حداکثر	حداقل	عمق
Skewness	Standard deviation	Mean	Max	Min	Depth
		(%)			(cm)
1.01	9.02	18.57	49.14	3.57	0-5
1.01	8.99	18.72	49.10	4.36	5-15
0.94	9.07	19.92	48.78	9.05	15-30
0.91	11.04	23.69	58.26	8.02	30-60
0.32	11.10	26.52	53.20	7.07	60-100

صرف نظر کرد و واریوگرام را همسانگرد در نظر گرفت (Oliver & Webster, 1990). این نسبت برای اعماق مورد بررسی به ترتیب از سطح به عمق برابر با ۱/۹۵، ۲/۱۰۰، ۲/۳۳، ۲/۳۴ و ۲/۲۰ به دست آمد (جدول ۲) با توجه به اینکه برای همه عمق‌ها این نسبت کمتر از ۲/۵ به دست آمد، همه واریوگرام‌ها 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 ۳ نشان می‌دهند که درصد کربنات کلسیم در همه اعماق دارای بیشترین پیوستگی در جهت شمال غربی-جنوب شرقی و کمترین پیوستگی در جهت شمال شرقی-جنوب غربی می‌باشند. مقادیر دامنه واریوگرام (قطرهای بیضی) در جهت‌های مختلف می‌تواند به عوامل متعددی از جمله فرسایش، رسوب‌گذاری، پوشش اراضی، توپوگرافی، مواد مادری و فعالیت‌های انسان بستگی داشته باشد (Tsefahunegn *et al.*, 2011). با توجه به نتایج به دست آمده، بیشترین پیوستگی مکانی در امتداد شمال-غربی-جنوب شرقی می‌باشد که با واقعیت منطقه نیز سازگار است. زیرا شیب، کاربری اراضی، مواد مادری و وضعیت رسوب‌گذاری در این امتداد نسبت به امتداد عمود بر آن از تغییرپذیری کمتری برخوردارند و در نتیجه دامنه واریوگرام در این جهت بیشتر است.

تحلیل روند در داده‌های کربنات کلسیم: در شکل ۲ وضعیت روند موجود در مقادیر کربنات کلسیم پنج عمق مورد بررسی نشان داده شده است. در همه لایه‌ها مقداری روند در جهت شرقی-غربی (خطوط سبز) و شمالی-جنوبی (خطوط آبی) وجود دارد. روند در سه لایه اول، مشابه هم و به صورت منحنی است. در دو لایه پایین نیز روند مشابه و در جهت شرقی-غربی به صورت منحنی و در جهت شمالی-جنوبی به صورت خط شیب‌دار است. با توجه به اینکه مقدار روند در همه لایه‌ها کم بود و حذف آن باعث بهبود نتایج نشد (داده‌ها نشان داده نشده‌اند)، در محاسبه واریوگرام روند حذف نگردید. وجود روند می‌تواند به دلایلی از جمله تغییرات شیب و مواد مادری باشد (Lark, 2010). کم بودن روند می‌تواند به دلایلی از جمله تغییرات کم مواد مادری، شیب و سایر عوامل تأثیرگذار بر روند در منطقه باشد. با توجه به اینکه اکثر منطقه مطالعاتی دارای شیب کم است، احتمالاً مقداری از روند به دلیل شیب بیشتر اراضی در حاشیه دشت و مقداری هم به دلیل تفاوت اندازه رسوبات در قسمت‌های مختلف دشت می‌باشد.

ناهمسانگردی واریوگرام‌های کربنات کلسیم: استفاده از بیضی همسانگردی از روش‌های رایج برای بررسی میزان ناهمسانگردی است. هر چند که شاخص دقیقی برای کمی کردن میزان ناهمسانگردی وجود ندارد، ولی در صورتی که این نسبت کمتر از ۲/۵ باشد می‌توان از ناهمسانگردی

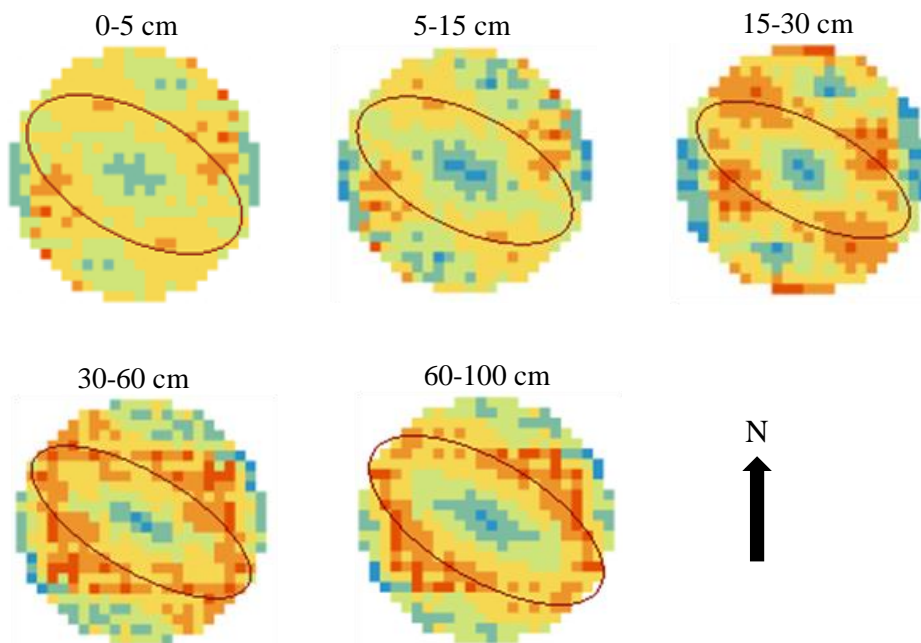


شکل ۲- وضعیت روند در داده‌های کربنات کلسیم در پنج عمق استاندارد
 Figure 2. Trend analysis of calcium carbonate data in the five standard depths

جدول ۲- مقادیر کوچکترین دامنه، بزرگترین دامنه و نسبت ناهمسانگردی واریوگرام‌های کربنات کلسیم در پنج عمق استاندارد

Table 2. Minor and major range and anisotropy ratio of variograms for five standard depths

نسبت ناهمسانگردی Anisotropy ratio	بزرگترین دامنه Max. Range (m)	کوچکترین دامنه Min. Range (m)	عمق Depth (cm)
1.95	4181.98	2132.48	0-5
2.00	4123.82	2054.81	5-15
2.33	4662.81	1997.93	15-30
2.34	4435.69	1891.73	30-60
2.20	4598.52	2082.67	60-100

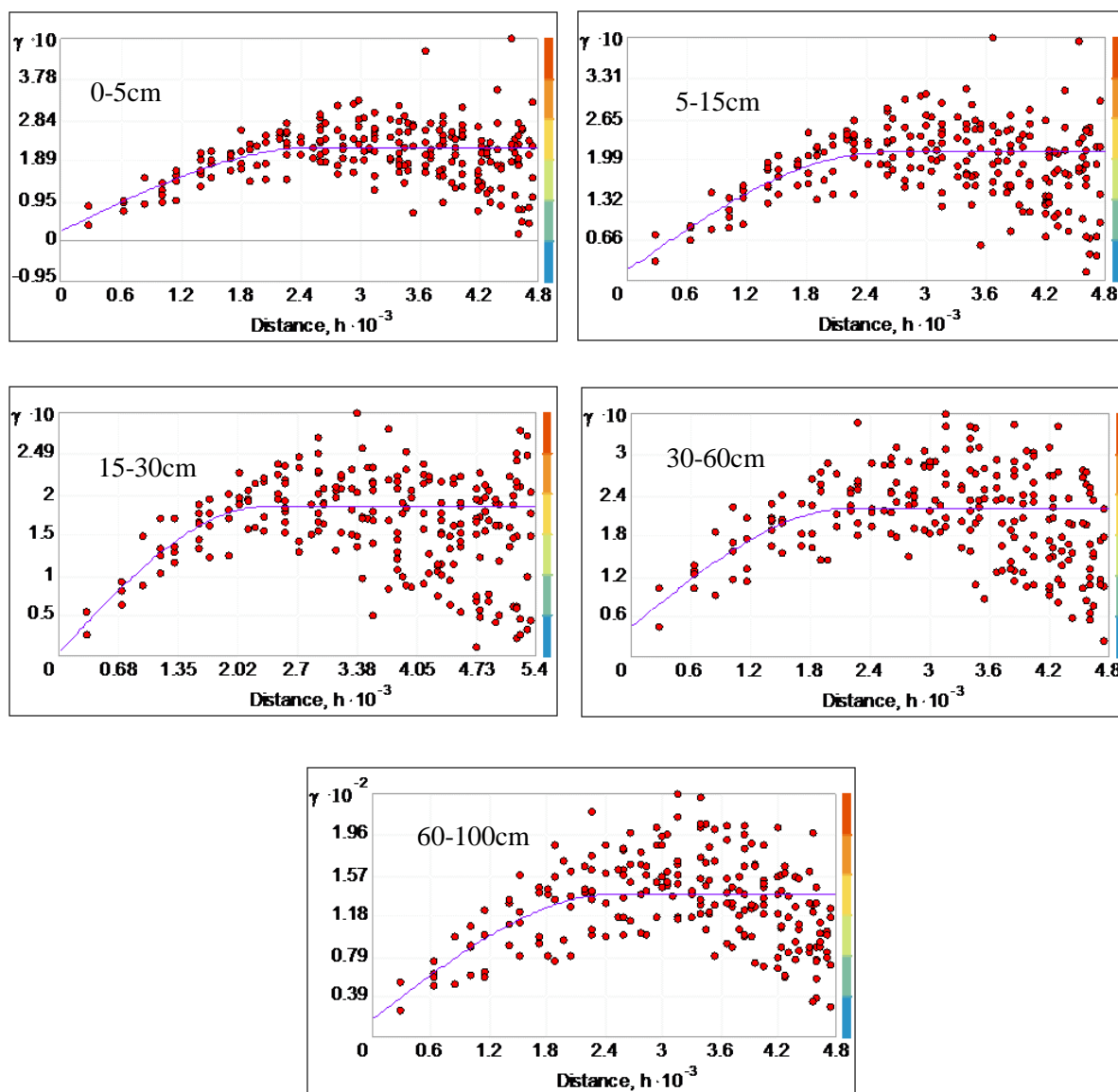


شکل ۳- بیضی‌های ناهمسانگردی واریوگرام‌های درصد کربنات کلسیم در پنج عمق استاندارد

Figure 3. Anisotropy ellipses of semi-variograms of calcium carbonate in the five standard depths

پیوستگی مکانی متغیر ناحیه‌ای، نسبت واریانس اثر قطعه‌ای به آستانه است. در صورتی که این نسبت کمتر از ۲۵ درصد باشد پیوستگی مکانی قوی، اگر بین ۲۵ تا ۷۵ درصد باشد پیوستگی مکانی متوسط و اگر بیشتر از ۷۵ درصد باشد بیانگر پیوستگی مکانی ضعیف است. در جدول ۳ مدل‌های برازش داده شده، واریانس قطعه‌ای، آستانه، دامنه واریوگرام و نسبت واریانس قطعه‌ای به آستانه ارائه شده است. بهترین مدل برای همه اعماق مدل کروی بود. نتایج نشان می‌دهد که در واریوگرام‌های همه اعماق نسبت اثر قطعه‌ای به آستانه، کمتر از ۲۵ درصد است که بیانگر پیوستگی قوی متغیر مورد بررسی است. به‌طور کلی پیوستگی مکانی زیاد در خواص خاک را می‌توان به عوامل ذاتی (فرآیندهای خاکسازی) و پیوستگی مکانی ضعیف را به عوامل بیرونی (مدیریت و عملیات کشت و کار) ارتباط داد (Amirinejad *et al.*, 2011). بنابراین، پیوستگی زیاد کربنات کلسیم را می‌توان تا حدودی مربوط به یکنواختی منطقه مطالعاتی از نظر مواد مادری و شیب دانست.

تحلیل ساختار مکانی کربنات کلسیم: با استفاده از واریوگرام می‌توان اطلاعات مفیدی در مورد ساختار تغییرات مکانی متغیر مورد بررسی به دست آورد (Lark, 2010). واریوگرام‌های تجربی و بهترین مدل‌های برازش داده شده بر آن‌ها برای عمق‌های مختلف در شکل ۴ ارائه شده است. همه واریوگرام‌ها دارای ساختار نسبتاً خوب و اثر قطعه‌ای کم می‌باشند. ساختار خوب واریوگرام می‌تواند بیانگر این باشد که فواصل نمونه برای نشان دادن ساختار مکانی متغیر مورد بررسی مناسب می‌باشد (Liu *et al.*, 2012). همه مدل‌های برازش داده شده دارای واریانس قطعه‌ای و سقف می‌باشند. سقف‌دار بودن مدل‌ها یکی از دلایل صادق بودن فرضیات ایستایی نوع دوم است (Oliver & Webster, 1990). واریانس قطعه‌ای می‌تواند ناشی از عواملی چون خطای نمونه برداری، تغییرات کوتاه دامنه و تغییرات ذاتی باشد (Kerry & Oliver, 2003; Wang *et al.*, 2009). خصوصیتی با پیوستگی متوسط تا قوی می‌توانند منجر به تولید نقشه‌هایی با کارایی بالا گردند (Teschner *et al.*, 2011). یکی از شاخص‌های مناسب برای بررسی میزان



شکل ۴- واریوگرام‌های تجربی درصد کربنات کلسیم در پنج عمق استاندارد (h گام بر حسب کیلومتر است)
Figure 4. Experimental semi-variograms for calcium carbonate in the five standard depths

در منطقه و یا مناطق مشابه استفاده کرد. به‌عنوان یک راهنمای کلی، فواصل نمونه‌برداری باید کمتر از نصف دامنه (*Greve et al., 2012*) و یا حدود یک سوم آن باشد (*Andronikov et al., 2000*). یک سوم میانگین دامنه واریوگرام‌های کربنات کلسیم همه عمق‌ها حدود ۸۰۰ متر است که نشان‌دهنده مناسب بودن فواصل بین نقاط نمونه‌برداری در این تحقیق (۷۵۰ متر) برای نشان دادن ساختار مکانی کربنات کلسیم خاک است.

فاصله‌ای که واریوگرام به آستانه می‌رسد دامنه نام دارد و بعد از این فاصله، داده‌ها فاقد همبستگی مکانی می‌باشند. مقادیر دامنه واریوگرام‌ها از سطح به عمق به ترتیب برابر با ۲۵۳۲/۹۶ و ۲۲۰۳/۱۴، ۲۳۱۱/۸۷، ۲۵۵۱/۳۰، ۲۶۰۴/۱۳ متر به‌دست آمد (جدول ۳). دامنه واریوگرام به مقیاس اندازه‌گیری و عوامل مؤثر بر تغییرات مکانی خاک بستگی دارد (*Amirinejad et al., 2011*). از دامنه می‌توان به‌عنوان معیاری در انتخاب فواصل نمونه‌برداری در مطالعات بعدی

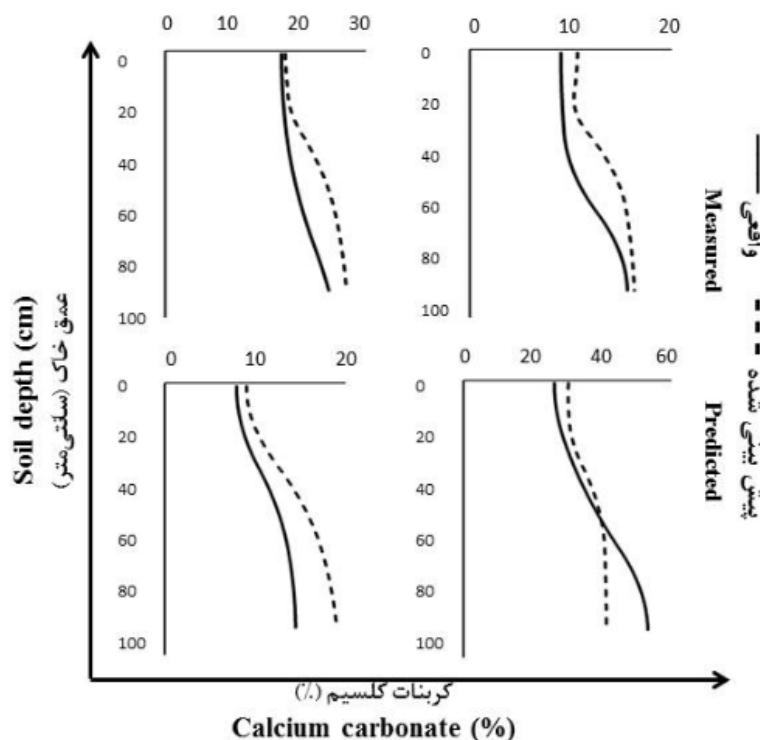
جدول ۳- مدل های برازش شده بر واریوگرام های تجربی درصد کربنات کلسیم در پنج عمق استاندارد و ویژگی های آنها
Table 3. Models fitted on experimental semi-variograms of calcium carbonate in the five standard depths

عمق Depth (cm)	مدل Model	تبدیل Transformation	آستانه Sill (C)	واریانس قطعه ای Nugget (C ₀)	واریانس قطعه ای /آستانه C ₀ /C	دامنه Range (m)	گام Lag (m)	تعداد گام No. of Lag	RMSE (%)
0-5	Spherica	Log	0.219	0.021	9.99	2604.13	400	12	5.18
5-15	Spherica	Log	0.021	0.016	7.97	2551.30	400	12	4.87
15-30	Spherica	Log	0.183	0.003	1.91	2311.87	450	12	5.15
30-60	Spherica	Log	0.220	0.043	19.92	2203.14	400	12	7.91
60-100	Spherica	None	139.06	16.82	12.09	2532.96	400	12	7.11

سانتی متری روند افزایشی دارد و از این عمق به بعد تغییرات آن تقریباً ثابت است که با نتایج ژائو و همکاران (Zhao *et al.*, 2016) تا حدودی مطابقت دارد. آن ها روند افزایشی کربنات در خاک تا عمق ۵۰ سانتی متری و ثابت شدن تغییرات آن در عمق های پایین تر را به تولید بیشتر CO₂ در اثر فعالیت موجودات زنده در لایه های سطحی و عمق نفوذ آب در خاک ارتباط دادند. دی اکسید کربن تولید شده باعث انحلال کربنات ها و انتقال راحت تر آن ها به لایه های زیرین خاک می گردد. با کم شدن فشار جزئی گاز CO₂ و نفوذ آب در عمق های پایین، کربنات ها مجدداً در خاک رسوب می نمایند.

با وجود این که در مطالعات متعددی از توابع اسپلین برای بررسی توزیع عمودی کربن آلی خاک استفاده شده است، ولی از این توابع در بررسی توزیع عمودی کربنات های خاک استفاده نگردیده است. ویلفورد و همکاران (Wilford *et al.*, 2015) فقط به بررسی توزیع جانبی کربنات کلسیم در اعماق ۱۰-۰ و ۸۰-۶۰ سانتی متری با استفاده داده های ژئوشیمیایی و متغیرهای محیطی کمکی از جمله اقلیم، مواد مادری و پستی و بلندی در سراسر استرالیا پرداختند. سرینیواس و همکاران (Sreenivas *et al.*, 2016) نیز مقدار کل کربن خاک (آلی و معدنی) را برای کشور هندوستان تا عمق یک متری با استفاده از روش های نقشه برداری رقومی تخمین زدند.

توزیع عمودی کربنات کلسیم: مقادیر خطای ارائه شده در جدول ۳ نشان می دهد که بهترین تخمین زمین آماری مربوط به خاک سطحی (۳۰-۰ سانتی متر) با ریشه مربعات خطا از ۴/۸۷ تا ۵/۱۸ درصد و بیشترین خطا مربوط به پیش بینی میزان کربنات کلسیم در لایه های پایین خاک می باشد (۱۰۰-۳۰ سانتی متر). در شکل ۵ تابع اسپلین برازش داده شده به داده های واقعی و داده های تخمین زده شده توسط زمین آمار در عمق های مختلف برای چهار نقطه از منطقه به عنوان نمونه نشان داده شده است. این شکل به خوبی نشان می دهد که تطابق نسبتاً بالایی بین تغییرات عمودی داده های واقعی و داده های پیش بینی شده وجود دارد که هم بیانگر کارایی بالای معادلات عمق اسپلین در نشان دادن روند تغییرات عمودی و هم بیانگر کارایی مناسب روش کریجینگ در تخمین تغییرات جانبی کربنات کلسیم در عمق های مختلف است. میانگین مقادیر R² و RMSE برای توابع اسپلین برازش داده شده به داده های کل نقاط مطالعاتی تا عمق یک متری به ترتیب برابر با ۰/۸۸ و ۰/۹۹ به دست آمد. به طور کلی با افزایش عمق، کارایی توابع اسپلین در پیش بینی تغییرات ویژگی های خاک کاهش یافته است (شکل ۵). بزرگتر بودن بازه های عمقی در لایه های پایینی (۱۰۰-۶۰ و ۶۰-۳۰ سانتی متر) می تواند دلیل کم شدن دقت پیش بینی معادلات اسپلین در عمق های پایین تر باشد. منحنی های برازش داده شده شکل ۵، نشان می دهند که مقدار کربنات کلسیم تا عمق حدود ۶۰



شکل ۵- تغییرات عمودی کربنات کلسیم در چهار نیمرخ خاک

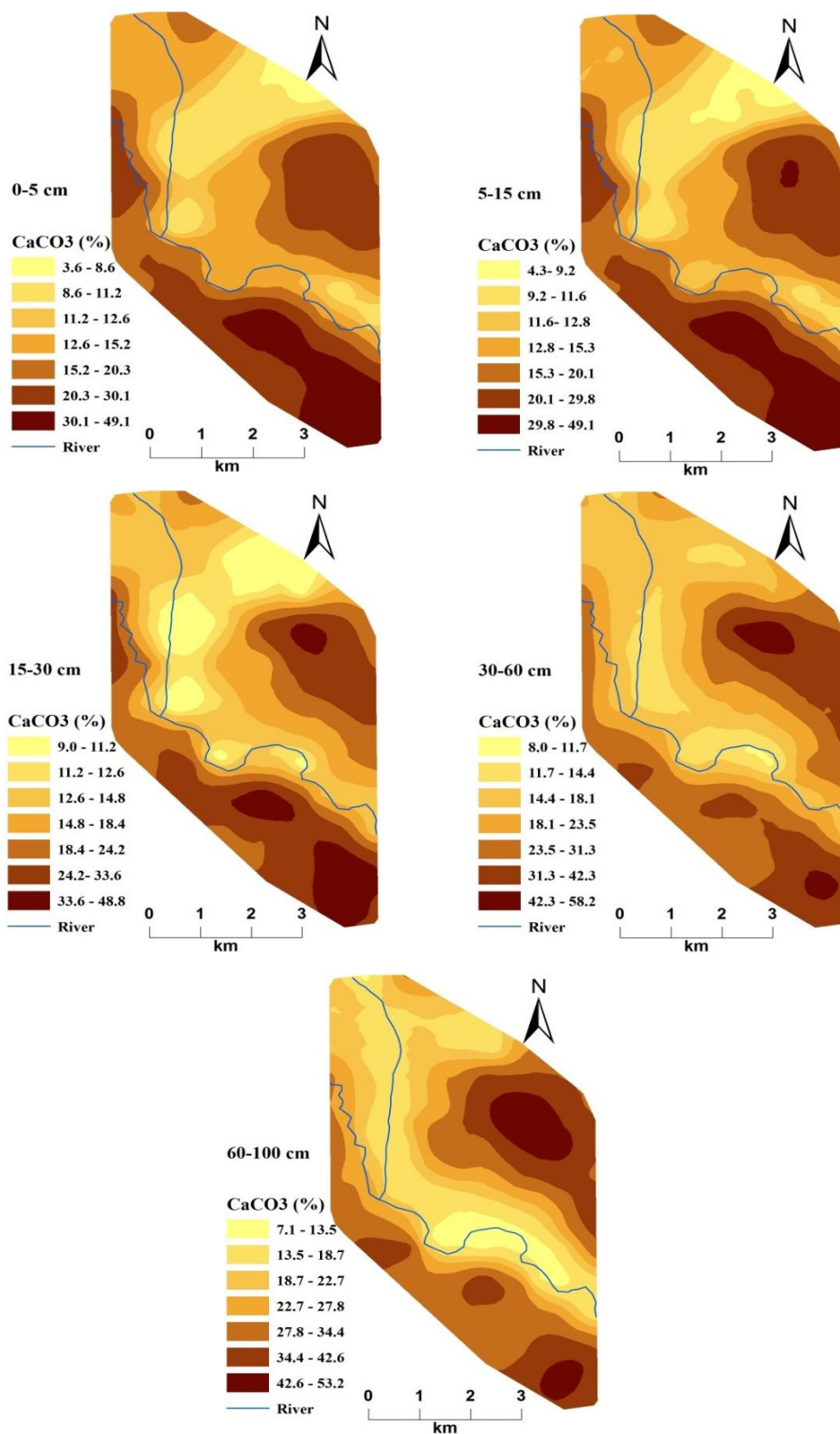
Figure 5. Vertical distribution of calcium carbonate in four selected profiles

می‌کند. کمترین میزان کربنات کلسیم تقریباً مربوط به بخش‌هایی است که در امتداد رودخانه‌های منطقه وجود دارند. در رسوبات اطراف رودخانه به دلیل بافت سبک‌تر و نفوذپذیری بیشتر، مقدار کربنات کلسیم به طور مشخصی کمتر از سایر قسمت‌های منطقه است. عمق افق تجمع کربنات کلسیم، ضخامت آن و درصد کربنات کلسیم به مواد مادری، نفوذپذیری، بافت، ساختمان و سن خاک بستگی دارد (Landi *et al.*, 2004). پرسلی و همکاران (Presley *et al.*, 2004) بیان داشتند که بافت خاک بر نفوذپذیری و در نتیجه میزان تجمع املاح و کربنات کلسیم تأثیر دارد. بررسی انجام‌شده توسط ماک و همکاران (Maki *et al.*, 2007) در مغولستان بیانگر شستشوی عمقی‌تر کربنات کلسیم در خاک‌هایی با بافت سبک‌تر بود. علاوه بر بارندگی، از فرآیندهای دیگری که باعث انتقال کربنات‌ها به لایه‌های پایینی می‌شود، آبیاری طولانی‌مدت است. در مطالعه انجام شده در ارتباط با ذخیره کربن آلی و معدنی خاک در هندوستان، تأثیر کاربری اراضی بر مقدار کربن معدنی خاک گزارش شده است (Sreenivas *et al.*, 2016). دلیل پایین بودن کربنات کلسیم در قسمت‌های شمال‌غربی منطقه احتمالاً زهکشی مناسب اراضی و آبیاری طولانی‌مدت اراضی

پهنه‌بندی کربنات کلسیم: درک صحیح از تغییرات مکانی خاک که از طریق آمار کلاسیک امکان‌پذیر نیست، به کارشناسان دید بهتری در مورد خصوصیات و رفتار خاک برای استفاده در کشاورزی دقیق می‌دهد (Tesfahunegn *et al.*, 2011). در شکل ۶ نقشه پیوسته توزیع کربنات کلسیم در پنج عمق استاندارد ارائه شده است. توزیع کربنات کلسیم در عمق‌های مختلف تقریباً مشابه است. بیشترین مقادیر کربنات کلسیم در بخش‌های شرقی، جنوبی و غربی منطقه است. اگلی و فیتز (Egli & Fitz, 2001) بیان داشتند مقدار آبشویی کربنات‌ها در خاک به مقدار آن در خاک، سن، بارندگی، نفوذپذیری و وضعیت زهکشی خاک بستگی دارد. هر چه زهکشی خاک ضعیف‌تر باشد میزان آبشویی کمتر و در نتیجه انتقال املاحی مثل کربنات کلسیم به لایه‌های عمقی کمتر رخ می‌دهد و در نتیجه تجمع آن در لایه‌های بالایی خاک بیشتر است. همچنین در خاک‌هایی با زهکشی ضعیف احتمال حرکت رو به بالای کربنات‌ها در اثر صعود موینگی وجود دارد. بررسی قبلی انجام شده در منطقه (Amirian-Chakan, 2012) زهکشی ضعیف خاک در قسمت‌های شرقی و بالا بودن سطح آب زیرزمینی در بخش‌هایی از جنوب منطقه به خصوص جنوب شرقی را تأیید

تجمع کربنات کلسیم در این قسمت‌ها پایین‌تر از یک متر بود (حدوداً ۱۱۰ سانتی‌متر).

در این بخش‌ها است که می‌تواند باعث انتقال کربنات کلسیم به لایه‌های پایینی گردد. در بررسی انجام شده در منطقه (Amirian-Chakan, 2012) نشان داده شد که عمق



شکل ۶- نقشه پیوسته توزیع کربنات کلسیم در اعماق مختلف خاک
Figure 6. Continues maps of calcium carbonate in the five standard depths

نتیجه‌گیری کلی

توابع اسپلاین می‌توان داده‌های به‌دست آمده از افق‌ها را برای بازه‌های عمق یکسان به دست آورد تا کار مقایسه آن‌ها راحت‌تر شود. همچنین از آنجا که توابع عمق به داده‌های به‌دست آمده از نقاطی که با فاصله از هم قرار گرفته‌اند برازش داده می‌شوند، نتایج این پژوهش نشان داد با استفاده از روش‌های زمین‌آماری می‌توان نقشه پیوسته مقادیر تخمینی توسط معادلات اسپلاین برای کل منطقه را به‌دست آورد. با توجه به اینکه کربنات‌ها از ترکیبات رایج خاک‌های ایران هستند و نقش مهمی در خواص شیمیایی و فیزیکی خاک‌ها و همچنین در چرخه جهانی کربن دارند و مطالعات کمی در زمینه توزیع جانبی و عمودی و مقدار ذخیره آن‌ها در خاک صورت گرفته است، پیشنهاد می‌شود با استفاده از معادلات اسپلاین و روشهای پهنه‌بندی پیوسته، مطالعاتی جامع‌تر و وسیع‌تر در این زمینه انجام گیرد.

این پژوهش با هدف بررسی کارایی معادلات اسپلاین و روش‌های زمین‌آمار برای مطالعه تغییرات جانبی و عمودی کربنات کلسیم در بخشی از دشت سیلاخور در استان لرستان انجام گرفت. نتایج نشان داد که معادلات اسپلاین قادر هستند توزیع عمودی کربنات کلسیم در عمق‌های موردنظر را با دقت قابل‌قبولی تخمین نمایند. بنابراین از این معادلات می‌توان برای تخمین مقدار کربنات‌ها در هر عمق و یا بازه عمق دلخواه استفاده نمود و تغییرات پیوسته و تدریجی آن‌ها را بررسی نمود. با توجه به اینکه در روش‌های مرسوم، نمونه‌ها از افق‌های خاک برداشته می‌شوند، مقایسه ویژگی‌های خاک در بخش‌های مختلف یک منطقه به‌دلیل تفاوت در ضخامت افق‌ها زیاد منطقی نیست. با استفاده از

References

- Adhikari K., Kheir R.B., Greve M.B., Bøcher P.K., Malone B.P., Minasny B., McBratney A.B., and Greve M.H. 2013. High-resolution 3-D mapping of soil texture in Denmark. *Soil Science Society of America Journal*, 77: 860-876.
- Akpa S.I.C., Odeh I.O.A., and Bishop T.F.A. 2014. Digital mapping of soil particle-size fractions for Nigeria. *Soil Science Society of America Journal*, 78: 1953-1966.
- Amirian-Chakan A. 2012. Spatial modeling of land suitability using fuzzy sets theory and geo-statistics techniques. Ph.D. dissertation, University of Tehran, Tehran. (In Persian).
- Amirinejad A.A., Kamble K., Aggarwal P., Chakraborty D., Pradhan S., and Mittal R.B. 2011. Assessment and mapping of spatial variation of soil physical health in a farm. *Geoderma*, 160: 293-303.
- Andronikov S.V., Davidson D.A., and Spiers R.B. 2000. Variability in contamination by heavy metals: sampling implications. *Water, Air and Soil Pollution*, 120: 29-45.
- Badí D., Martí C., Aznar J.M., and León J. 2013. Influence of slope and parent rock on soil genesis and classification in semiarid mountainous environments. *Geoderma*, 193: 13-21.
- Bishop T.F.A., McBratney A.B., and Laslett G.M. 1999. Modelling soil attribute depth functions with equal-area quadratic smoothing splines. *Geoderma*, 91: 27-45.
- Campbell N.A., Mulcahy M.J., and McArthur W.M. 1970. Numerical classification of soil profiles on the basis of field morphological properties. *Australian Journal of Soil Research*, 8: 43-58.
- Egli M., and Fitz P. 2001. Quantitative aspects of carbonate leaching of soils with differing ages and climate. *Catena*, 46: 35-62.
- Esvaren H., Reich P.F., Kimble J.M., Beinroth F.H., Padmanabhan E., and Moncharoen P. 2000. Global carbon stocks. In: Lal *et al.* (Ed.), *Global Change and Pedogenic Carbonate*. CRC Press, Boca Ratan, pp. 15-25.
- Greve M.H., Kheir R.B., Greve M.B., and Bøcher P.K. 2012. Using digital elevation models as an environmental predictor for soil clay contents. *Soil Science Society of America Journal*, 76: 2116-2127.
- Kerry R., and Oliver M.A. 2003. Variograms of ancillary data to aid sampling for soil surveys. *Precision Agriculture*, 4: 261-278.
- Landi A., Mermut A.R., and Anderson D.W. 2004. Carbon distribution in a hummocky landscape from Saskatchewan, Canada. *Soil Science Society of America Journal*, 68: 175-184.
- Lark R.M. 2010. Two contrasting spatial processes with a common variograms: inference about spatial models from higher-order statistics. *European Journal of Soil Science*, 61: 479-492.
- Laudicina V.M., Scalenghe R., Pisciotta A., Parello F., and Dazzi C. 2013. Pedogenic carbonates and carbon pools in gypsiferous soils of semiarid Mediterranean environment in south Italy. *Geoderma*, 192: 31-38.

- Liu F., Zhang G., Sun J., Zhao Y., and Li D. 2012. Mapping the three-dimensional distribution of soil organic matter across a Subtropical Hilly Landscape. *Soil Science Society of America Journal*, 77: 1241-1253.
- Maki A., Kenji T., Kiukazu K., and Teruo H. 2007. Morphological and physio-chemical characteristics of soils in a steppe region of the Kherlen river basin, Mongolia. *Journal of Hydrology*, 333: 100-108.
- Malone B.P., McBratney A.B., Minasny B., and Laslett G.M. 2009. Mapping continuous depth functions of soil carbon storage and available water capacity. *Geoderma*, 154: 138-152.
- Malone B.P., McBratney A.B., Minasny B. 2011. Empirical estimates of uncertainty for mapping continuous depth functions of soil attributes. *Geoderma*, 160: 614-626.
- McBratney A.B., and Webster R. 1986. Choosing functions for semi-variograms of soil properties and fitting them to sampling estimates. *Journal of Soil Science*, 37: 617-639.
- McBratney A.B., Mendonça-Santos M.L., and Minasny B. 2003. On digital soil mapping. *Geoderma*, 117: 3-52.
- Minasny B., McBratney A.B., Mendonca-Santos M.L., Odeh I.O.A., and Guyon B. 2006. Prediction and digital mapping of soil carbon storage in the Lower Namoi Valley. *Australian Journal of Soil Research*, 44: 233-244.
- Mishra U., Lal R., Slater B., Calhoun F., Liu D., and Van Meirvenne M. 2009. Predicting soil organic carbon stock using profile depth distribution functions and ordinary kriging. *Soil Science Society of America Journal*, 73: 614-621.
- Moral F.J., Terrón J.M., and Rebollo F.J. 2011. Site-specific management zones based on the Rasch model and geo-statistical techniques. *Computer and Electronic in Agriculture*, 75: 223-230.
- Nelson R.E. 1982. Carbonate and gypsum. In: A. L. Page *et al.* (Ed.), *Methods of Soil Analysis-Part 2*. 2nd Ed. Agronomy Monograph. 9. ASA and SSSA, Madison, WI, pp. 11-199.
- Oliver M.A., and Webster R. 1990. Kriging: a method of interpolation for geographical information systems. *International Journal of Geographical Information System*, 4: 313-332.
- Ponce-Hernandez R., Marriott F.H.C., and Beckett P.H.T. 1986. An improved method for reconstructing a soil profile from analysis of a small number of samples. *Journal of Soil Science*, 37: 455-467.
- Presley D.R., Ransom M.D., Kluitenberg G.J., and Finnell P.R. 2004. Effects of thirty years of irrigation on the genesis and morphology of two semiarid soils in Kansans. *Soil Science Society of America Journal*, 68:1916-1926.
- Soil Survey Staff. 2014. *Keys to Soil Taxonomy* (11th Ed). USDA-NRCS, Washington.
- Sreenivas K., Dadhwal V.K., Kumar S., Sri Harsha G., Mitrana T., Sujatha G., Janaki Rama Suresh G., Fyzee, M.A., and Ravisankar T. 2016. Digital mapping of soil organic and inorganic carbon status in India. *Geoderma*, 269: 160-173.
- Taghizadeh-Mehrjardi R., Minasny B., Sarmadian F., and Malone P.B. 2014a. Digital mapping of soil salinity in Ardakan region, central Iran. *Geoderma*, 213, 15-28.
- Taghizadeh-Mehrjardi R., Amirin Chakan A., and Sarmadian F. 2014b. 3D digital mapping of soil cation exchange capacity in Dorud, Lorestan province. *Journal of Water and Soil*, 28: 998-1010. (In Persian)
- Tan W.F., Zhang R., Cao H., Huang C.Q., Wang M., Koopal M.K., and Yang G.K. 2014. Soil inorganic carbon stock under different soil types and land uses on the loess plateau region of China. *Catena*, 121: 22-30.
- Tesfahunegn G.B., Tamene L., and Vlek P.L.G. 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.
- Wang Y., Zhang X., and Huang C. 2009. Spatial variability of soil total nitrogen and soil total phosphorus under different land uses in a small watershed on the Loess Plateau, China. *Geoderma*, 150: 141-149.
- Webster R. 2001. Statistics to support soil research and their presentation. *European Journal of Soil Science*, 52: 331-340.
- Wilford J., de Caritat P., and Bui E. 2015. Modelling the abundance of soil calcium carbonate across Australia using geochemical survey data and environmental predictors. *Geoderma*, 259-260, 81-92.
- Zamanian k., Pustovoytov K., and Kuzyakov Y. 2016. Pedogenic carbonates: forms and formation processes. *Earth Science Reviews*. (In press).
- Zhao W., Zhang R., Huang C., Wang B., Cao H., Koopal L.K., and Tan T. 2016. Effect of different vegetation cover on the vertical distribution of soil organic and inorganic carbon in the Zhifanggou Watershed on the loess plateau. *Catena*, 139: 191-198.

Study of Lateral and Vertical Distribution of Soil Calcium Carbonate Using Geostatistics and Spline Functions

Alireza Amirian Chakan^{1*}, Ruhollah Taghizadeh-Mehrjardi², Fereydoon Sarmadian³, Jahangard Mohammadi⁴

(Received: October 2016

Accepted: January 2017)

Abstract

In most studies on the distribution of soil carbon, three-dimensional distributions of soil inorganic carbon were neglected. Calcium carbonate is the most common carbonate in arid and semi-arid soils. Information on its spatial three-dimensional distribution is very important to determine factors controlling its distribution, to predict soil behavior and to improve soil management practice. The study aimed to map three-dimensional distributions of soil calcium carbonate (SCC) in an area of 3600 ha located in Silakhor plain (Lorestan province). An equal-area spline depth function (ESDF) was fitted to the measured SCC data of 103 pedons and the amounts of SCC at the five standard depths of the global soil map project were estimated. Then, ordinary kriging was employed to map the lateral distribution of SCC at all specified depths. Geo-statistical analysis showed that spherical model was the best model representing spatial structure of calcium carbonate in all depths. All experimental variograms had a nugget to sill ratio less than 25 %, which indicated strong spatial dependence for SCC. Anisotropy analysis indicated that the ranges of variograms for all specified depths in the northwest-southeast direction were more than perpendicular direction. It indicated that SCC had more spatial dependence along Silakhor plain due to small variations in land use, slope and parent materials along the plain. Spline functions showed good performance in predicting vertical distribution of SCC ($R^2=0.88$, $RMSE=0.99$). Both lateral continuous maps and spline functions indicated an increasing trend in SCC with increasing depth. In the eastern and southern parts, due to poor drainage and low leaching, SCC was high and its increasing trend with depths was not significant. Generally, results indicated that combination of spline functions and geo-statistical method is a promising approach to map three-dimensional distribution of SCC and to deal with some of the problem arising from legacy soil maps.

Keywords: Continuous soil map, Silakhor plain, spline functions, three-dimensional soil mapping

1- Assistant Professor, Department of Rangeland and Watershed Management, Behbahan Khatamalanbia University of Technology

2- Assistant Professor, Department of Desert Regions Management, Faculty of Agriculture & Natural Resources, Ardakan University

3- Professor, Department of Soil Science Engineering, University of Tehran

4- Associate Professor, Department of Soil Science, Shahrekord University

* Corresponding Author Email: amirian@bkatu.ac.ir