



تغییرات مکانی ذخیره و ترسیب کربن لاشبرگ و لایه‌های خاک در منطقه جنگلی پارک جهان نما

رضانعلی پوررستمی^{۱*}، قوام‌الدین زاهدی امیری^۲، وحید اعتماد^۳

^۱ دانشجوی دکتری جنگل‌شناسی و اکولوژی جنگل، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج

^۲ استاد، گروه جنگلداری و اقتصاد جنگل، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج

^۳ دانشیار، گروه جنگلداری و اقتصاد جنگل، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، تهران

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۱۲/۲۱؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۲/۱۵)

چکیده

پژوهش حاضر به منظور بررسی تغییرپذیری مکانی ذخیره کربن لاشبرگ و ترسیب آن در لایه‌های خاک منطقه جنگلی پارک جهان نما کرج انجام گرفت. ابتدا نمونه خاک با روش نمونه‌برداری تلفیقی شبکه- ترانسکت در ۱۱۵ قطعه نمونه از عمق‌های ۰، ۱۵-، ۳۰- و ۵۰- سانتی‌متری برداشت شد. در آزمایشگاه پس از تعیین درصد کربن آلی به منظور بررسی تغییرات مکانی درصد کربن در نقاط نمونه‌برداری نشده از روش‌های مختلف زمین‌آماري (کریجینگ ساده، معمولی و روش وزنی معکوس) استفاده شد. دقت نتایج به کمک روش اعتبارسنجی متقابل با کمک معیارهای آماری MARE، MBE و RMSE ارزیابی شد. نتایج نشان داد درصد کربن در دو عمق اول دارای مدل تغییرنمای گوسین و در عمق سوم نمایی است. اثر قطعه‌ای و ساختار مکانی درصد کربن به ترتیب در عمق اول، دوم و سوم ۰/۰۰۱ و ۰/۹۹۹ درصد، ۰/۰۰۴۵ و ۰/۹۶۶ درصد و ۰/۰۰۵۸ و ۰/۹۵۶ درصد است که بیانگر ضعیف بودن اثر قطعه‌ای و قوی بودن ساختار مکانی درصد کربن، هم در لایه سطحی و هم در لایه‌های عمقی است. کم بودن خطای برآوردها نشان داد که کریجینگ معمولی توانست براساس مدل برازش شده درصد کربن برای هر سه عمق برآورد صحیحی داشته باشد. با توجه به اهداف این تحقیق، در ۳۶ هکتار با شبکه متراکم نمونه‌برداری (۱۱۵ پروفیل خاک) با توده‌های مختلف درختی به طور متوسط ۶۸/۵ تن در هکتار ظرفیت ترسیب کربن تا عمق ۵۰ سانتی‌متری خاک برآورد شد و در مجموع ذخیره کربن ترسیب شده در این سطح ۲۴۷۰ تن است. راهبرد نمونه‌برداری در این تحقیق برای برآورد ترسیب کربن خاک در جنگلکاری‌ها، الگوی مناسبی برای دیگر مناطق مشابه خواهد بود.

واژه‌های کلیدی: خاک جنگلی، زمین‌آمار، کریجینگ، نمونه‌برداری شبکه- ترانسکت.

مقدمه

فعالیت‌های صنعتی، نابودی جنگل‌ها و مراتع، و تخریب منابع اراضی و خاک است. در چنین وضعیتی، شناخت ظرفیت بوم‌سازگان‌های زمینی در جذب و ترسیب گازهای گلخانه‌ای به کنترل این روند کمک می‌کند (Zahedi & Zargham, 2018). تنها راهکار

یکی از مهم‌ترین مخاطرات توسعه پایدار در اکوسیستم‌های اقلیمی شکننده به‌ویژه در شرایط اقلیمی ایران، گرمایش جهانی و تغییر اقلیم ناشی از انتشار تصاعدی گازهای گلخانه‌ای است که معلول

انجام می‌گیرد (Webster & Margaret, 2007). تغییرات ایجادشده در یک فضای معین در صورت وجود ساختار مکانی، بر فواصل نزدیک به خود احتمال تأثیرگذاری بیشتری نسبت به فواصل دور از خود دارند. به‌طور کلی در زمین‌آمار با در نظر داشتن پدیده همسانگردی یا ناهمسانگردی، سعی در افزایش دقت برآوردها، تعیین دقت آنها و مشخص کردن زمان و محل مناسب برای اندازه‌گیری و جمع‌آوری اطلاعات دارند (Al-Karni & Al-Shamrani, 2000). با توجه به زمان‌بندی، منابع انسانی و مالی اغلب مقدار داده‌های موجود را محدود می‌کند. روش‌های زمین‌آمار، رویکرد علمی معتبری را برای بررسی تنوع ساختار مکانی، درون‌یابی داده‌های موجود و پیش‌بینی مقادیر در مکان‌های غیرمشخص با دقت مناسب فراهم می‌کنند. از این‌رو استفاده از زمین‌آمار برای کمی کردن پدیده‌های مکانی از جمله شاخص‌های مختلف خاک، امکان ارزیابی پیوستگی یا ناپیوستگی مکانی متغیرهای مختلف خاک را فراهم می‌کند، زیرا در جهان واقعی به‌دلیل محدودیت‌های محیطی، امکان برداشت در هر نقطه دلخواه وجود ندارد و از این‌رو از درون‌یابی استفاده می‌کنیم. درون‌یابی کارکرد اساسی و مهمی در ترسیم، آنالیز و فهم اطلاعات دو بُعدی دارد. برای تهیه نقشه درصد کربن ذخیره‌شده در عمق‌های مختلف خاک توده‌های جنگلکاری‌شده، کاربرد روش‌های آمار مکانی اجتناب‌ناپذیر است. تخمین زمین‌آمار از دقیق‌ترین روش‌های تخمین است، چراکه عوامل زیادی مانند فاصله نقاط، ناهمسانگردی و تغییرپذیری مکانی را بررسی می‌کند (Marchetti et al., 2012).

Farahnak (2015) در بررسی‌های خود در توده خالص و آمیخته راش در نم‌خانه جنگل خیرود نوشهر پی برد که اختلاف معنی‌داری بین دو توده از نظر مقدار کربن در لایه معدنی (۵۰-۳۰ سانتی‌متر) و نیز رابطه معنی‌داری بین درصد نیتروژن و تغییرات مکانی ترسیب کربن در لایه معدنی در عمق‌های مختلف

شناخته‌شده در کاهش کربن اتمسفری، ترسیب کربن توسط خاک، جنگل‌ها، مراتع و عرصه‌های جنگلکاری‌شده است. مواد آلی خاک به‌عنوان مهم‌ترین ذخیره کربن پس از فرایند تجزیه و معدنی شدن در محیط ناهمگن خاک تحت تأثیر عوامل میکروبی و اثرهای متقابل بین گیاهان و خصوصیات خاک قرار می‌گیرند و در پی این فرایند سبب تغییر ظرفیت ذخیره کربن خاک می‌شوند و سیستم ناهمگن را در محیط خاک به وجود می‌آورند (Dignac et al., 2017). تغییرات در این سیستم پویا به دو شکل تصادفی یا منظم رخ می‌دهد. تغییرات ساختاری، مشخص، تدریجی و تابعی از عوامل خاک‌سازی است، اما تغییرات غیرساختاری یا تصادفی در محدوده‌های کوچک رخ می‌دهد و به آنها تغییرات کوتاه‌دامنه گفته می‌شود (Freeman & Moisen, 2007). ارتباط مکانی بین مقدار یک کمیت در بین نمونه‌های برداشت‌شده، ممکن است به‌صورت مدل‌های ریاضی قابل بیان باشد که به آن ساختار مکانی گفته می‌شود (Hasani Pak, 2013). با توجه به شرایط ناهمگنی محیط اغلب خاک‌ها و تغییرات در جهات مختلف جغرافیایی می‌توان گفت که خاک محیطی ناهمسانگرد است و این ناهمسانگردی موجب تغییرپذیری حتی عمودی و افقی در بعضی از خصوصیات آن می‌شود (Assouline & Or, 2006). از این‌رو در بررسی تغییرات مکانی خصوصیات خاک با در نظر داشتن پدیده ناهمسانگردی در خاک‌های مختلف، استفاده از روش‌های زمین‌آمار می‌تواند ابزار قدرتمندی برای بررسی این تغییرپذیری باشد (Hasani Pak, 2013).

بررسی تغییرات مکانی با تکیه بر روش‌های زمین‌آمار برای متغیرهای ناحیه‌ای به‌ویژه در مطالعات خاک‌شناسی و خاک‌سنجی (پدومتری) کاربرد گسترده‌ای یافته است. در زمین‌آمار ابتدا وجود یا نبود ساختار مکانی بین داده‌ها بررسی می‌شود و سپس در صورت وجود ساختار مکانی، تحلیل داده‌ها

خاک وجود دارد.

Gharebaghi (2018) در ارزیابی مقدار ترسیب کربن در لایه‌های آلی و معدنی خاک در منطقه جنگلی پارک جهان‌نما، ثابت کرد که درصد کربن آلی با تغییرات عمق کاهش نشان می‌دهد و مقدار ترسیب کربن تحت تأثیر شیب زمین، پوشش گیاهی و عمق نمونه‌برداری است. (Borujeni et al. (2010) در بررسی تغییرات مکانی ویژگی خاک‌های شمال شرق چین از جمله ماده آلی، نیتروژن، فسفر و پتاسیم محلول و در دسترس به این نتیجه رسیدند که به غیر از نیتروژن در دسترس، روش کریجینگ برای درون‌یابی دیگر ویژگی‌های خاک قابل قبول است. Yuan et al. (2013) با تحقیقی در زمینه عوامل تعیین‌کننده کربن آلی خاک و الگوی مکانی آن در یک جنگل معتدله کهنسال در چین نتیجه گرفتند که برآورد تغییر کربن آلی خاک به شدت به تراکم نمونه‌گیری وابسته است و برای دستیابی به نتایج قوی به نمونه‌گیری بیشتری نیاز است. (Soucémariadin et al. (2018) در تحقیقی با هدف شناسایی اثر عامل‌های کنترلی بر پایداری کربن آلی خاک در بخشی از جنگل‌های معتدله فرانسه نشان دادند که طبقه خاک به صورت معنی‌داری بر پایداری کربن آلی خاک اثر می‌گذارد و پایداری کربن آلی خاک با افزایش عمق رابطه معنی‌داری دارد. با توجه به پژوهش‌های انجام‌گرفته، آگاهی از تغییرات مکانی درصد کربن در عمق‌های مختلف خاک در شناخت و بهره‌برداری صحیح از خاک ابزار مهمی به حساب می‌آید. هدف پژوهش حاضر، استفاده از زمین‌آمار به منظور تعیین الگوی تغییرات مکانی و تهیه نقشه‌های درصد کربن در عمق‌های مختلف است. در برنامه‌ریزی‌های مربوط به عملیات اصلاح مناطق جنگلی و توده‌های جنگلکاری‌شده در کاشت گونه‌های درختی مناسب، استفاده از نقشه درصد کربن ترسیب‌شده در خاک بسیار کمک می‌کند. این دست پژوهش‌ها در کنار کار صحرایی و آنالیزهای آزمایشگاهی با به‌کارگیری

مدل‌ها و روش‌های قدرتمند زمین‌آماري درصدد ارائه الگوی مفهومی مناسب برای برنامه‌ریزی و راهبرد نمونه‌برداری در عرصه‌های جنگلکاری هستند و استفاده از آنها توصیه می‌شود.

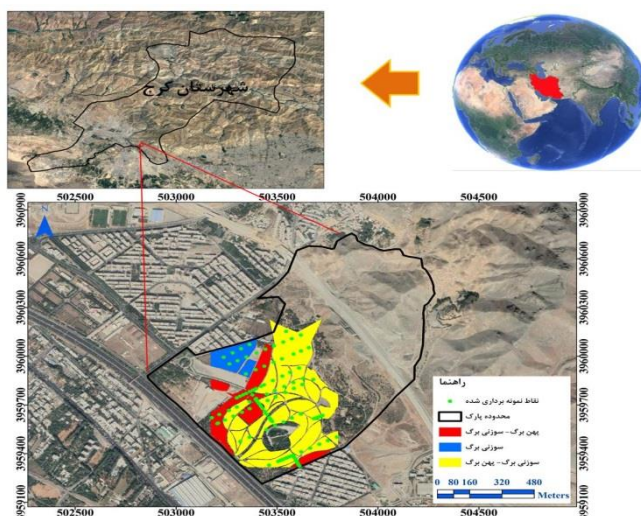
مواد و روش‌ها

منطقه پژوهش

پارک جنگلی جهان‌نما در محدوده جغرافیایی $51^{\circ} 01'$ تا $51^{\circ} 02'$ طول شرقی و $35^{\circ} 47'$ تا $35^{\circ} 46'$ عرض شمالی، در فاصله ۴ کیلومتری شرق شهر کرج در کنار اتوبان تهران-کرج واقع شده است (شکل ۱). این پارک ۱۱۴ هکتار مساحت دارد که ۶۰ هکتار آن نوار پوشش سبز دارد که در طی ۵۰ سال گذشته جنگلکاری شده است. گونه‌های بومی و خارجی غرس‌شده در این پارک شامل پهن‌برگان (ابریشم، ارغوان، انجیلی و غیره)، سوزنی‌برگان (ارس معمولی و غیره) و گیاهان زینتی (ماگنولیا، سماق آمریکایی، ختمی و غیره) است. شهرستان کرج با بارندگی سالیانه $247/3$ میلی‌متر دارای اقلیم نیمه‌خشک با زمستان به نسبت سرد و تابستان به نسبت معتدل است. از لحاظ خاک‌شناسی در واحد شمالی پارک با مساحت ۴۰ هکتار، در عمق ۳۰-۰ سانتی‌متری، قطر ذرات ساختمانی خاک ریز است و اجزای کلوییدی آن به سادگی از هم جدا می‌شوند و آثار ریشه گیاهان مشهود است. در عمق ۶۰-۳۰ سانتی‌متری، اجزای ساختمانی متراکم و یکپارچه همراه با سنگ، سنگریزه و لاشه سنگ تا حدود ۲۰-۱۵ درصد دیده می‌شود و آثار ریشه گیاهان در این لایه مشهود نیست. براساس مطالعات خاک‌شناسی دو رده اینسپتی‌سول و انتی‌سول (US Department of Agriculture, 1972) تشریح شد. در واحد جنوبی پارک با مساحت حدود ۷۰ هکتار، عمق خاک بیش از ۱۲۰ سانتی‌متر است. در عمق ۳۰-۰ سانتی‌متری آن خاک‌های دانه‌ریز خردشونده و جدا از هم بدون انسجام خاکدانه‌ای مشاهده می‌شود و در عمق ۶۰-۳۰ سانتی‌متری،

تشکیل می‌دهد فاقد آثار ریشه‌ای است (Jahannama Park booklet, 2010).

خاکدانه ریز کمی سفت شده مشهود است. غالب سنگ و سنگریزه در این لایه که سنگ‌های لاشه‌ای زاویه‌دار



شکل ۱- نمایی از موقعیت پارک جنگلی جهان‌نما در استان البرز

گرفت. بنابراین، بسته به شرایط پوشش درختی و آمیختگی آنها در منطقه، یک تا سه پروفیل به صورت شاهد به منظور تشریح حفر شد و برای تعیین عمق متوسط مشخص برای برداشت نمونه‌ها در محل تقاطع شبکه، یک قطعه نمونه کوچک در ابعاد ۱×۱ متر برای نمونه برداری لاشبرگ استفاده شد. سپس نمونه برداری از سه عمق ۰-۱۵، ۱۵-۳۰ و ۳۰-۵۰ سانتی‌متر در محل تقاطع گرید در شبکه نمونه برداری با اوگر انجام گرفت (Zahedi, 1998). موقعیت جغرافیایی نقاط نمونه برداری با استفاده از سیستم موقعیت یاب جهانی ثبت شد. سپس همه لاشبرگ‌های روی سطح زمین در داخل هر قطعه نمونه برداشت شده و در داخل کیسه‌های پلاستیکی به آزمایشگاه منتقل شد. پس از توزین و تعیین درصد رطوبت نمونه‌ها، برای اندازه‌گیری درصد کربن، نمونه‌ای به وزن ۲۰ گرم از هر یک جدا و آسیاب شده (MacDicken, 1997) و با روش احتراق و قرار گرفتن در کوره الکتریکی به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۳۷۵ درجه سانتی‌گراد درصد کربن تعیین شد. نمونه‌های

شیوه اجرای پژوهش

نمونه برداری متناسب با اهداف تحقیق و منطقه پژوهش انجام گرفت. نمونه برداری در منطقه جنگلی پارک که از قبل شناسایی و تفکیک شده بود، روی نقشه ۱:۲۵۰۰۰ اجرا شد. نمونه برداری خاک به صورت تلفیقی از شبکه و ترانسکت صورت گرفت (Zahedi, 1998). با توجه به هدف اصلی تحقیق یعنی بررسی تغییرات مکانی درصد کربن خاک و استفاده از تحلیل زمین آماری (Webster & Margaret, 2007) و با لحاظ این موضوع که حداقل نمونه برای مطالعات زمین آماری ۱۰۰ قطعه نمونه است، در این پژوهش، شبکه‌ای با ۱۱۵ قطعه نمونه در سه عمق در نظر گرفته شد. شبکه مورد نظر با گرید ۲۰۰ در ۲۰۰ متر منظم و سیستماتیک بود. طول ترانسکت تصادفی ۲۰۰ متر و فواصل نمونه برداری ۱۰ متر بود. محل تقاطع شبکه و حد فاصل بین نقاط تقاطع با حداقل ۱۱۵ قطعه نمونه (۳۴۵ نمونه خاک از سه افق معدنی و ۱۱۴ نمونه از افق آلی خاک، در مجموع ۴۵۹ نمونه) با توجه به شرایط زمینی و ضرورت تحقیق مدنظر قرار

شاخص‌های اساسی زیر است که ساختار مکانی را توضیح می‌دهند: اثر قطعه‌ای (C_0): مقدار واریوگرام به‌ازای فاصله صفر است که به‌ازای فاصله صفر باید به حداقل خود یعنی صفر تنزل یابد، ولی در عمل واریوگرام‌های واقعی از چنین شرایطی تبعیت نمی‌کنند. آستانه تأثیر ($C+C_0$): مقدار هر واریوگرام از مقدار کم شروع می‌شود و پس از فراز و نشیب‌هایی ممکن است به حد ثابتی میل کند که به آن سقف یا آستانه تأثیر گفته می‌شود. در زمین‌آمار واریوگرام‌هایی که به سقف مشخصی می‌رسند، اهمیت بیشتری دارند (Hasani Pak, 2013). درصد ساختار مکانی ($C/C+C_0$): کمیتی که برای طبقه‌بندی مقدار وابستگی مکانی متغیرها به‌کار می‌رود (Cambardella et al., 1994). اگر این نسبت کمتر از ۲۵ درصد باشد، وابستگی مکانی متغیر ضعیف است، اگر این نسبت بین ۲۵ تا ۷۵ درصد باشد، وابستگی مکانی آن متوسط و اگر بیشتر از ۷۵ درصد باشد، وابستگی مکانی متغیر قوی است. وابستگی مکانی قوی به این معناست که در دامنه تأثیر می‌توان متغیر مورد نظر را تخمین زد. دامنه تأثیر (A): فاصله‌ای است که در آن واریوگرام به حد ثابتی می‌رسد و به حالت خط افقی نزدیک می‌شود و هرچه بزرگ‌تر باشد، دلالت بر پیوستگی مکانی گسترده‌تری دارد. در شکل ۲ نمایی از یک تغییرنا (واریوگرام) ارائه شده است. برای محاسبه واریوگرام‌ها از مدل‌های همسانگرد (مستقل از جهت) و مدل‌های ناهمسانگرد (وابسته به جهت) استفاده شد که هر کدام خود شامل مدل‌های خطی، کروی، نمایی و گوسین هستند. در تحلیل واریوگرام‌ها نوع مدل و مقادیر متغیرهای دامنه تأثیر، آستانه تأثیر، واریانس مکانی، درصد ساختار مکانی، ضریب همبستگی، مجموع مربعات باقی‌مانده و اثر قطعه‌ای تعیین شد. از آنجا که انتخاب روش درون‌یابی مناسب، مستلزم انتخاب بهترین تابع نیم‌تغییرنا برای برازش روی داده‌هاست، پس از آزمون و خطای فراوان و با توجه به اثر قطعه‌ای ضعیف و ساختار مکانی قوی،

خاک تهیه‌شده از لایه‌های مختلف خاک نیز پس از انتقال به آزمایشگاه در هوای آزاد خشک شده و پس از خرد کردن کلوخه‌ها، جدا کردن ریشه‌ها، سنگ و دیگر ناخالصی‌ها از الک ۲ میلی‌متری عبور داده شد. پس از آن روی ذرات کوچک‌تر از ۲ میلی‌متر، بررسی‌های تجزیه شیمیایی خاک انجام گرفت. تعیین جرم مخصوص ظاهری خاک با استفاده از روش هیدرومتری انجام شد و درصد کربن آلی خاک در لایه‌های معدنی نیز با استفاده از روش والکلی-بلک تعیین شد (Walkley & Black, 1934).

تجزیه و تحلیل آماری

به منظور بررسی و تشریح ارتباط و ساختار مکانی از تجزیه و تحلیل زمین‌آمار تغییرنا یا واریوگرام در نرم‌افزار GS^+ نسخه ۹ استفاده شد. یکی از مهم‌ترین شروط استفاده از روش زمین‌آمار، داده‌هایی با توزیع نرمال است. از این‌رو در صورت لزوم اگر داده‌ها از توزیع نرمال تبعیت نکنند، باید تبدیل لگاریتمی یا نمایی یا تبدیل‌های دیگر انجام گیرد. زیرا برای مطالعات زمین‌آماري نرمال بودن داده‌های پیش‌شرط گام‌های بعدی یعنی بررسی واریوگرام و درون‌یابی‌های مختلف است (Webster & Margaret, 2007).

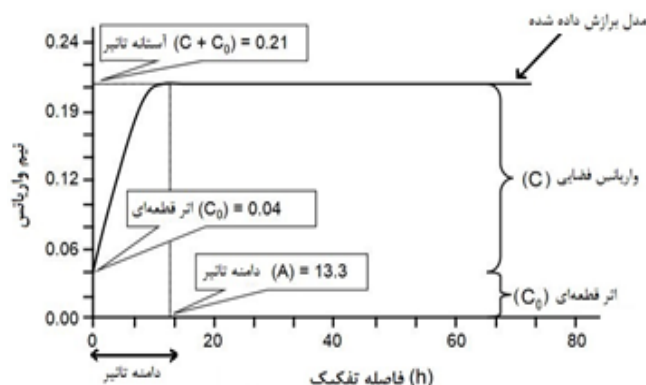
واریوگرام یا تغییرنا کمیتی برداری است که درجه همبستگی مکانی و شباهت بین نقاط اندازه‌گیری‌شده را برحسب مربع تفاضل مقدار دو نقطه و با توجه به جهت و فاصله آنها نشان می‌دهد. تغییرنا به‌طور گسترده در آنالیز اکولوژیکی ناهمگنی خاک استفاده شده (Zheng et al., 2008) و معادله آن به صورت رابطه ۱ است:

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

که در آن $N(h)$ تعداد جفت نمونه‌های به‌کاررفته در محاسبه به‌ازای هر فاصله‌ای مانند h است و به‌طور معمول هرچه h افزایش یابد تعداد جفت‌ها کم می‌شود (Hasani Pak, 2013). هر تغییرنا شامل

تغییرات داده‌ها وابسته به یکدیگر بوده و اصل همبستگی مکانی در مقیاس مطالعاتی برقرار است.

مدل نیم‌تغییرنمای مناسب ارزیابی شد. در نیم‌تغییرنمایی که دارای اثر قطعه‌ای ناخالص باشد،



شکل ۲- نمایی از یک تغییرنما (واریوگرام)

(Shabany, 2009). مقادیر معیارهای مذکور از رابطه‌های ۲، ۳ و ۴ به دست می‌آیند:

$$MARE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n \frac{|x_{fi} - x_{oi}|}{x_{oi}} \quad \text{رابطه ۲}$$

$$MBE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n (x_{fi} - x_{oi}) \quad \text{رابطه ۳}$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^n (x_{fi} - x_{oi})^2} \quad \text{رابطه ۴}$$

در رابطه‌های بالا x_{fi} مقدار داده برآوردشده، x_{oi} مقدار داده مشاهده شده توسط مدل و n : تعداد داده‌هاست. معیارهای یادشده، دقت مدل را براساس تفاضل بین مقادیر واقعی و مقادیر برآوردشده ارزیابی می‌کند. هرچه مقدار آنها کمتر و به صفر نزدیک‌تر باشد، حاکی از اختلاف کمتر بین مقادیر برآوردشده با مقادیر مشاهده شده است (Alijani et al., 2008)؛ و بیانگر این است که روش استفاده شده واقعیت را خوب شبیه‌سازی می‌کند (Faraji Sabokbar & Azizy, 2006). با استناد به مطالب بالا، در نهایت نقشه تغییرات مکانی درصد کربن خاک با استفاده از روش‌های درون‌یابی تهیه شد. روش دارای بیشترین

درون‌یابی نقاط نمونه برداری نشده با استفاده از تکنیک‌های زمین‌آمار از گام‌های اساسی تحقیق در بررسی پراکنش مکانی متغیر درصد کربن در عمق‌های مختلف منطقه تحقیق است. از این‌رو، از روش‌های مختلف زمین‌آماري مانند روش‌های کریجینگ ساده و معمولی و روش فاصله وزنی معکوس و نرمال به منظور درون‌یابی درصد کربن در نقاط نمونه برداری نشده استفاده شد.

- معیارهای ارزیابی صحت: کارایی درون‌یاب‌ها و به عبارتی دقت تخمین‌ها، با مقایسه مقدار انحراف تخمین‌ها از داده‌های اندازه‌گیری شده به روش اعتبارسنجی متقاطع ارزیابی شد. به طوری که در پایان ارزیابی، دو ستون شامل مقادیر مشاهده‌ای و برآوردشده وجود دارد که توسط آن می‌توان خطا و انحراف روش را بیان کرد (Mir Mousavi et al., 2010). رایج‌ترین معیارهای آماری برای تعیین این انحراف تخمین‌ها معیارهای میانگین قدر مطلق خطای نسبی^۱ (MARE)، میانگین خطای اریبی انحراف^۲ (MBE) و ریشه دوم میانگین مربعات خطا^۳ (RMSE) هستند

1. Mean Absolute Relative Error
2. Mean Bias Error
3. Root Mean Squared Error

$$C_c \left(\frac{g}{m^2} \right) = 10000 \times C(\%) \times \text{رابطه ۵}$$

$$Bd \left(\frac{g}{cm^3} \right) \times e(cm)$$

در این رابطه C_c وزن کربن ترسیب شده در ۱ متر مربع و C درصد تراکم کربن در لایه مشخصی از خاک و Bd جرم مخصوص ظاهری خاک بر حسب گرم بر سانتی متر مکعب و e ضخامت عمق خاک بر حسب سانتی متر است.

نتایج

آمار توصیفی درصد کربن

به منظور بررسی چگونگی توزیع داده‌ها و دستیابی به خلاصه‌ای از اطلاعات آماری درصد کربن در عمق‌های مختلف، توزیع فراوانی با کمک ویژگی‌های آن که شامل میانگین، حداقل، حداکثر، انحراف معیار، واریانس، چولگی و کشیدگی است به دو صورت لگاریتمی و غیرلگاریتمی بررسی شد که نتایج آن در جدول ۱ آمده است. آزمایش توزیع نرمال بودن داده‌ها براساس آزمون کولموگروف-اسمیرنوف نشان داد که همه متغیرها از توزیع نرمال برخوردارند. به علاوه مقادیر چولگی ارائه شده نیز نتایج نرمال بودن را تأیید می‌کند که در همه متغیرها بین ۱- و ۱+ قرار دارد.

دقت و کمترین خطای محاسباتی، به‌عنوان روش درون‌یابی مناسب انتخاب شد. هدف این تحقیق برآورد مقدار کربن در واحد سطح و در نتیجه تخمین ترسیب کربن در عرصه‌های جنگلکاری شده است. در این تحقیق برحسب عمق‌های مختلف خاک، درصد تراکم کربن و جرم مخصوص ظاهری خاک پس از نمونه‌گیری محاسبه شد. مدل به‌کاررفته در این پژوهش اولین بار در سال ۱۹۹۸ توسط زاهدی و وان مرونه در بلژیک به‌منظور برآورد مقدار ترسیب کربن خاک معرفی شد (Zahedi, 1998). در بعضی تحقیقات، مقدار ذخیره کربن تا عمق ۱۰۰ سانتی‌متری خاک در عرصه‌های جنگلی در نظر گرفته می‌شود، اما خاک‌های کم‌عمق مانند لیتوسول یا اینسپتی‌سول از ۱۰ سانتی‌متر تا حداکثر عمق ۵۰ سانتی‌متری برای ترسیب کربن خاک مدنظر قرار می‌گیرد (Zahedi, 1998). در این تحقیق تا عمق ۵۰ سانتی‌متری خاک در عرصه‌های جنگلکاری برای ترسیب کربن خاک در نظر گرفته شد. براساس مدل ریاضی زیر (رابطه ۵)، پس از اندازه‌گیری درصد تراکم کربن به تفکیک هر لایه خاک با استفاده از روش والکلی-بلک، مقدار ترسیب کربن با مقیاس گرم در متر مربع محاسبه می‌شود (Zahedi, 1998).

جدول ۱- نتایج تجزیه و تحلیل آماری درصد کربن در عمق‌های مختلف خاک

عمق (Cm)	آمار	میانگین	انحراف معیار	واریانس	حداقل	حداکثر	چولگی	کشیدگی
۰ - ۱۵	لگاریتمی	۰/۹۷۷	۰/۳۶۳	۰/۱۳۲	۰/۰۸	۱/۵۹	-۰/۴۹ (۰/۲۳)	-۰/۴۶ (۰/۴۵)
	غیرلگاریتمی	۱/۸۲۵	۰/۹۴۸	۰/۸۹۸	۰/۰۸	۳/۹۱	۰/۱۹ (۰/۲۳)	-۰/۶۹ (۰/۴۵)
۱۵ - ۳۰	لگاریتمی	۰/۷۰۴	۰/۳۷۸	۰/۱۴۳	۰/۰۰	۱/۶۲	۰/۰۲ (۰/۲۲)	-۰/۷۴ (۰/۴۵)
	غیرلگاریتمی	۱/۱۶۹	۰/۸۳۱	۰/۶۹	۰/۰۰	۴/۰۴	۰/۸۵ (۰/۲۲)	۰/۷۳ (۰/۴۵)
۳۰ - ۵۰	لگاریتمی	۰/۵۶۱	۰/۳۷	۰/۱۳۶	۰/۰۰	۱/۶۲	۰/۲۹ (۰/۲۲)	-۰/۷۶ (۰/۴۵)
	غیرلگاریتمی	۰/۸۷۹	۰/۷۳۸	۰/۵۴۴	۰/۰۰	۴/۰۴	۱/۱۹ (۰/۲۲)	۲/۲۸ (۰/۴۵)

تجزیه و تحلیل ساختار مکانی

به منظور انتخاب مناسب‌ترین روش درون‌یابی و نیز

تشخیص پدیده همسانگردی نیاز به انتخاب بهترین تابع نیم‌تغییرنما برای برازش داده‌هاست. برای درصد

درصد کربن در هر سه عمق تحت بررسی بیش از ۰/۹۵ است. این شاخص از مهم‌ترین عوامل مؤثر بر تأیید ساختار مکانی است که حتی در عمق اول در این تحقیق نزدیک به ۱ به‌دست آمده است و اثر قطعه‌ای درصد کربن در هر سه عمق تحت بررسی مقدار خیلی ناچیزی است؛ از این‌رو ساختار مکانی درصد کربن در هر سه عمق بسیار قوی است.

ارزیابی اعتبارسنجی و انتخاب بهترین روش

درون‌یابی

پس از انتخاب توابع نیم‌تغییرنمای مناسب (واریوگرام) برای درصد کربن هر کدام از عمق‌های تحت بررسی، هر کدام از روش‌های درون‌یابی ارزیابی شد. نتایج مربوط به ارزیابی روش‌های درون‌یابی در جدول ۳ نشان می‌دهد روشی که کمترین مقادیر ارزیابی خطا را داشته باشد بیشترین دقت را دارد و برای تهیه نقشه تغییرات مکانی درصد کربن در عمق مورد نظر انتخاب می‌شود (Webster & Margaret, 2007). از این‌رو، نتایج درون‌یابی درصد کربن نشان داد استفاده از روش کریجینگ معمولی در عمق اول، به‌دلیل کمترین مقادیر خطای MARE (۰/۴۴۹)، MBE (۰/۰۰۶۸-) و RMSE (۰/۹۶۱) نسبت به دیگر روش‌ها مناسب است. همچنین درون‌یابی درصد کربن در عمق دوم نیز به‌دلیل کمترین مقادیر میانگین قدر مطلق خطای نسبی (۰/۶۳۵)، میانگین خطای اریبی انحراف (۰/۱۲۶-) و ریشه دوم میانگین مربعات خطا (۰/۷۷۲) با روش کریجینگ معمولی انجام گرفت. در عمق سوم نیز تهیه نقشه پراکنش درصد کربن به‌دلیل کمترین خطا نسبت به دیگر روش‌ها ۰/۷۳۹، ۰/۱۰۷- و ۰/۶۸۶ با روش کریجینگ معمولی بهترین نتیجه را داشت. البته مقادیر معیارهای خطا در دو روش وزن‌دهی فاصله معکوس و وزن‌دهی فاصله نرمال با اختلاف اندکی نسبت به کریجینگ معمولی بیشتر بوده است.

در مرحله آخر نقشه‌های تغییرات مکانی درصد کربن در سه عمق تحت بررسی براساس مناسب‌ترین روش درون‌یابی در محیط نرم‌افزار GS+ نسخه ۹

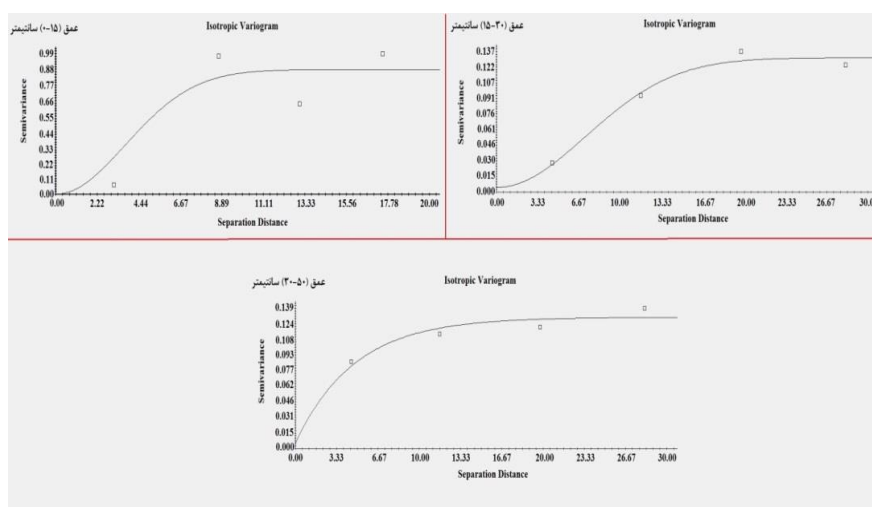
کربن تحت بررسی در عمق‌های مختلف خاک، ناهمسانگردی آنها کنترل شد که با توجه به تقارن نیم‌تغییرنما، درصد کربن در هر سه عمق همسانگرد است. در این پژوهش چهار نوع نیم‌تغییرنمای خطی، گوسی و گوسین و نمایی استفاده شد که در جدول ۲ ارائه شده است. همچنین مدل‌های نیم‌تغییرنمای برازش‌داده‌شده برای درصد کربن هر کدام از عمق‌های تحت بررسی در شکل ۳ ارائه شده است. با توجه به جدول ۲ برای درصد کربن در دو عمق ۱۵- و ۳۰- ۱۵ سانتی‌متر در این پژوهش مدل نیم‌تغییرنمای گوسین با در نظر گرفتن ساختار آن مناسب‌تر بوده است. این مدل با توجه به رفتار آن که تغییرات از نزدیکی مبدأ مختصات شروع شده و به‌تدریج شیب آن زیاد شده و در فاصله معینی که دامنه تأثیر (A) نام دارد به سقف خود می‌رسد. به‌عبارتی نتایج این تحقیق نشان داد که مدل گوسین واریوگرام تجربی برای درصد کربن در عمق اول پس از طی فاصله‌ای در حدود ۹ متر به سقف خود (۰/۸۸ درصد) می‌رسد. برای درصد کربن در عمق دوم نیز پس از طی فاصله ۱۷ متری به سقف ۰/۱۳ می‌رسد. برای درصد کربن در عمق سوم (۵۰- ۳۰ سانتی‌متر) مدل نیم‌تغییرنمای نمایی مناسب تشخیص داده شد. مدل نمایی کمی بالاتر از مبدأ مختصات شروع شده و به‌آرامی شیب آن کم می‌شود و پس از طی فاصله ۱۴ متری به سقف خود (۰/۱۳) می‌رسد. بزرگ بودن نسبت C/C_0 بیانگر زیاد بودن ساختار مکانی نسبت به ساختار تصادفی است. در نیم‌تغییرنمایی که مقدار واریانس تصادفی صفر است (بدون ساختار C_0)، مقدار این نسبت ۱ خواهد بود؛ در نتیجه هرگاه مقدار این نسبت صفر بود، یعنی اینکه هیچ وابستگی مکانی بین نمونه‌های اندازه‌گیری شده وجود ندارد. اگر این نسبت کمتر از ۰/۵ باشد نقش مؤلفه ساختاردار کمتر از مؤلفه بی‌ساختار است و ساختار مکانی ضعیف است و کاربرد زمین‌آمار مفید واقع نمی‌شود. نتایج نشان می‌دهد که در این پژوهش نسبت C/C_0 برای

تغییرات مقدار درصد کربن در دو عمق دیگر نیز صادق است. با این تفاوت که بیشترین دامنه تغییرات درصد کربن ۰/۱۵ تا ۳/۴۳ درصد است که در عمق ۳۰-۱۵ سانتی متری مشهود است. تغییرات درصد کربن در عمق سوم از ۰/۲۵ درصد در شمال منطقه تا ۱/۶۶ درصد در جنوب منطقه متفاوت است، به طوری که هرچه از شمال به جنوب حرکت می‌کنیم بر درصد کربن خاک افزوده می‌شود.

تهیه شد که در شکل ۴ نشان داده شده است. در هر سه نقشه، با حرکت از شمال به جنوب، درصد کربن افزایش می‌یابد. دامنه تغییرات درصد کربن در عمق اول بین ۱/۲۲ تا ۲/۶۷ درصد است که با حرکت از غرب به مرکز، درصد کربن افزایش می‌یابد و به ۲/۰۹ درصد می‌رسد. با رسیدن به جنوب منطقه، درصد کربن افزایش می‌یابد و به بالاترین مقدار خود برابر با ۲/۶۷ درصد می‌رسد. روند مذکور برای

جدول ۲- شاخص‌های تغییرنما، معیارهای انتخاب مدل و کنترل اعتبار آن برای درصد کربن در عمق‌های مختلف

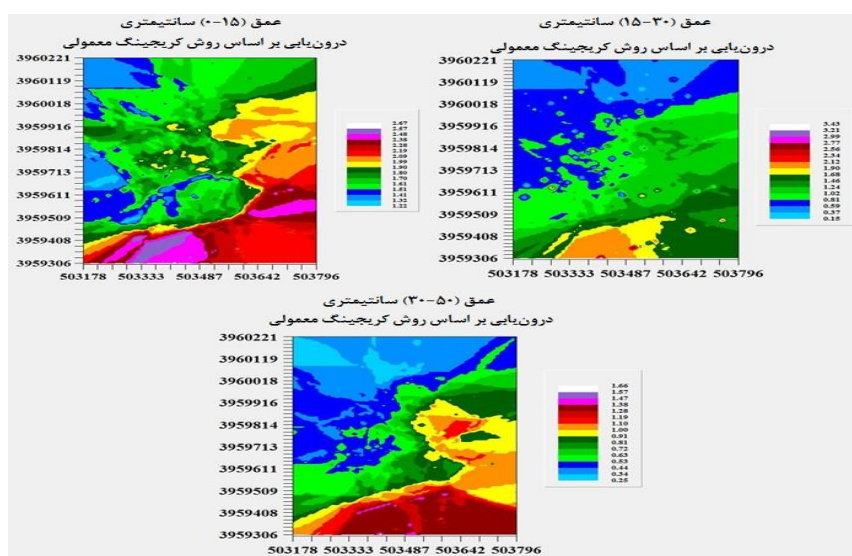
عمق (Cm)	مدل	اثر قطعه‌ای به درصد (C ₀)	آستانه تأثیر به درصد (C ₀ +C)	دامنه تأثیر به متر (A)	ضریب همبستگی (R)	واریانس مکانی (C)	ساختار مکانی به درصد (C/C+C ₀)
۱۵ - ۰	خطی	۰/۱۶۷۴	۱/۰۲۷۸	۱۷/۵۵	۰/۷۰	۰/۹۰۲۲	۰/۸۳۷
	کروی	۰/۰۰۱	۰/۸۵۵۰	۱۰/۷۵	۰/۸۷	۰/۸۵۴۱	۰/۹۹۹
	نمایی	۰/۰۰۱	۱/۰۰۴۹	۲۴/۷۸	۰/۷۹	۱/۰۰۳۹	۰/۹۹۹
	گوسین	۰/۰۰۱	۰/۸۸۱	۹/۰۷	۰/۸۸	۰/۸۸۰۱	۰/۹۹۹
۱۵ - ۳۰	خطی	۰/۰۳۰۴۶	۰/۱۴۵۳۵	۲۸/۲۰	۰/۸۶	۰/۱۱۴۸۹	۰/۷۹۰
	کروی	۰/۰۰۰۱	۰/۱۳۰۲	۲۲/۲۱	۰/۹۸	۰/۱۳۰۱	۰/۹۹۹
	نمایی	۰/۰۰۰۱	۰/۱۵۱۲	۳۸/۰۱	۰/۹۶	۰/۱۵۱۱	۰/۹۹۹
	گوسین	۰/۰۰۴۵	۰/۱۳۱	۱۷/۶۳	۰/۹۹	۰/۱۲۶۵	۰/۹۶۶
۳۰ - ۵۰	خطی	۰/۰۸۱۷	۰/۱۴۰۴	۲۸/۲۰	۰/۹۷	۰/۰۵۸۷۸	۰/۴۱۸
	کروی	۰/۰۰۰۱	۰/۱۲۵۲	۸/۹۸	۰/۸۷	۰/۱۲۵۱	۰/۹۹۹
	نمایی	۰/۰۰۵۸	۰/۱۳۰۶	۱۴/۳۴	۰/۹۳	۰/۱۲۴۸	۰/۹۵۶
	گوسین	۰/۰۰۱۹	۰/۱۲۴۸	۷/۲۵	۰/۸۷	۰/۱۲۲۹	۰/۹۸۵



شکل ۳- مدل و نیم‌تغییرنمای برازش داده‌شده برای درصد کربن در سه عمق تحت بررسی

جدول ۳- خطاهای تخمین زده شده برای درصد کربن هر یک از شبیه‌های درون‌یابی در عمق‌های مختلف

روش ارزیابی خطا			روش درون‌یابی	عمق (Cm)
(RMSE)	(MBE)	(MARE)		
۰/۹۶۱	-۰/۰۰۶۸	۰/۴۴۹	Ordinary Krijing	۰ - ۱۵
۳۸۸۶۶۶۵	۳۸۸۰۳۲۲/۵۲	۱	Simple Krijing	
۰/۹۸۲	-۰/۰۱۵	۰/۴۶۵	Inverse Distance Weighted	
۰/۹۸۶	۰/۰۱۴	۰/۴۴۹	Normal Distance Weighted	
۰/۷۷۲	-۰/۱۲۶۳۸	۰/۶۳۵	Ordinary Krijing	۱۵ - ۳۰
۳۴۳۲۳۶۴	۳۲۴۴۵۵۹/۲۷	۰/۹۹۹	Simple Krijing	
۰/۷۷۸	-۰/۱۳۸۲۸	۰/۶۵۴	Inverse Distance Weighted	
۰/۸۰۱	-۰/۰۹۰۹۵	۰/۶۶۰	Normal Distance Weighted	
۰/۶۸۶	-۰/۱۰۷۰۷	۰/۷۳۹	Ordinary Krijing	۳۰ - ۵۰
۳۸۶۳۷۷۷	۳۸۵۶۵۶۱/۰۹	۱	Simple Krijing	
۰/۶۹۱	-۰/۱۱۶۹۸	۰/۷۸۵	Inverse Distance Weighted	
۰/۶۹۸	-۰/۰۷۷۵۰	۰/۷۳۵	Normal Distance Weighted	



شکل ۴- نقشه درصد کربن خاک در سه عمق تحت بررسی

جدول ۴- میانگین ترسیب کربن در لایه‌های لاشبرگی (LFH) و عمق‌های مختلف خاک و ذخیره آن

در عرصه‌های مختلف جنگلکاری شده در پارک جنگلی جهان‌نما

عمق (cm)	میانگین (ton/h)	سوزنی برگان خالص (ton)	سوزنی برگ-پهن برگ (ton)	پهن برگ-سوزنی برگ (ton)	مجموع ذخیره کربن (ton)
۰ - ۱۵	۳۰	۹۶/۶	۸۰۴/۳	۱۷۳/۷	۱۰۷۴/۶
۱۵ - ۳۰	۱۹/۳	۶۲/۱	۵۱۷/۴	۱۱۱/۷	۶۹۷/۲
۳۰ - ۵۰	۱۹/۴	۶۲/۵	۵۲۰/۱	۱۱۲/۳	۶۹۴/۹
LFH	۰/۹	۰/۹۰	۰/۹۸	۰/۸۲	۲/۷

خطای کمتر روش کریجینگ معمولی) همخوانی دارد (Farahnak, 2015). از این‌رو، در تأیید این مطلب محققان (Webster & Oliver, 2007, 1998; Van Meirvenne) بیان کردند که در تخمین زمین‌آماري ویژگی‌های مختلف خاک، روش کریجینگ از روش وزن‌دهی فاصله معکوس و نرمال دقیق‌تر است.

با توجه به تابش بیشتر نور و سرعت معدنی شدن در بخش جنوبی پارک مواد آلی به سرعت تجزیه و در لایه‌های معدنی خاک ترسیب می‌شوند. از این‌رو، بررسی تغییرات مکانی مقدار کربن بیانگر درصد زیاد کربن در بخش جنوبی منطقه نسبت به بخش شمالی است. تغییرات درصد کربن در هر سه عمق بیانگر تأثیر شیب کم و عمق خاک‌زایی بیشتر در ذخیره و ترسیب کربن در بخش جنوبی منطقه است که با نتایج (Gharebaghi, 2018)، مبنی بر افزایش ترسیب کربن در شیب کم با خاک‌زایی مناسب مطابقت دارد. با توجه به مطالب یادشده می‌توان نتیجه گرفت که دقت روش کریجینگ از دیگر روش‌های استفاده‌شده بیشتر است. این یافته با نتایج دیگر محققان در قوی بودن روش کریجینگ در بررسی‌های مختلف خصوصیات خاک حتی در برآورد مقدار شوری خاک نسبت به روش‌های وزن‌دهی فاصله معکوس و کوکریجینگ همخوانی دارد (Yuan et al., 2013). با استناد به نتایج جدول‌های ۲ و ۳ ساختار مکانی قوی و اثر قطعه‌ای بسیار کم نشان‌دهنده الگوی مناسب و بهینه نمونه‌برداری است که تنها با استفاده از روش زمین‌آمار میسر است. می‌توان روش نمونه‌برداری را از عوامل مهم تأثیرگذار بر دقت روش‌های زمین‌آماري بیان کرد. از آنجا که طراحی نمونه‌برداری به‌منظور دستیابی به سطوح اعتماد معین، مستلزم داشتن اطلاعات کافی در زمینه نحوه تغییرپذیری در واحد نمونه‌برداری است، بدون اطلاع از ماهیت تغییرپذیری متغیر تحت بررسی، طراحی نمونه‌برداری دشوار خواهد بود. برای دستیابی به اهداف مذکور، شناخت ساختار مکانی متغیر مربوط در واحد نمونه‌برداری از

نتایج جدول ۴ نشان می‌دهد که میانگین ترسیب کربن در عمق اول معدنی خاک (۰-۱۵ سانتی‌متر)، اختلاف زیادی نسبت به دو عمق دیگر خاک دارد. در کل عرصه‌های تحت بررسی (سطح ۳۶ هکتار) در سه عرصه جنگلکاری‌شده در مجموع ذخیره کربن ترسیب‌شده در لایه لاشبرگی و سه عمق معدنی خاک (۵۰- سانتی‌متر) ۲۴۷۰ تن برآورد شده است که به‌طور متوسط ظرفیت این عرصه‌ها ۶۸/۵ تن در هکتار ترسیب کربن تا عمق ۵۰ سانتی‌متری خاک است. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که هر سه عرصه جنگلکاری در سه لایه خاک از لحاظ ذخیره کربن اختلاف چشمگیری را نشان می‌دهند. توده جنگلکاری سوزنی‌برگ-پهن‌برگ به‌ویژه در لایه اول خاک با بیشترین مقدار ذخیره کربن نسبت به دیگر لایه‌ها ظرفیت بیشتری در مقایسه با دیگر توده‌ها دارد. این نتایج نشان‌دهنده تأثیر تلفیق گونه‌ها در فعالیت‌های جنگلکاری است که الگوهای مکانی مختلفی را در عمق‌های مختلف خاک بیان می‌کند.

بحث

با توجه به تقارن تغییرنما، درصد کربن تحت بررسی در عمق‌های مختلف خاک همسانگرد نتیجه‌گیری شد که با نتایج تحقیق تأثیر مقدار نیتروژن بر ترسیب کربن در دو توده جنگلی راش خالص و آمیخته در جنگل آموزشی- پژوهشی خیرود نوشهر (Farahnak, 2015) مطابقت دارد. در این پژوهش با توجه به اینکه ساختار مکانی و اثر قطعه‌ای در هر سه عمق به ترتیب بیشتر از ۰/۹۵ و نزدیک به صفر است، ساختار مکانی درصد کربن در هر سه عمق بسیار قوی است.

نتایج درون‌یابی درصد کربن نشان داد استفاده از روش کریجینگ معمولی در هر سه عمق اول، دوم و سوم به‌دلیل کمترین مقادیر خطای MARE، MBE و RMSE نسبت به دیگر روش‌ها مناسب است که با نتایج تحقیق پراکنش مکانی ترسیب کربن در توده جنگلی راش خالص و آمیخته (مبنی بر دقت زیاد و

تن در هکتار ظرفیت ترسیب کربن در عمق ۵۰ سانتی‌متری خاک داشته باشد که بر این اساس، ذخیره کربن ترسیب‌شده در این سطح ۲۴۷۰ تن است. این تحقیق نشان داد که هر سه عرصه جنگلکاری در سه لایه خاک از لحاظ ذخیره کربن اختلاف زیادی را نشان می‌دهند. این نتایج با یافته‌های (Lei et al., 2019) مطابقت دارد. توده جنگلکاری سوزنی‌برگ-پهن‌برگ به‌ویژه در ۱۵-۰ سانتی‌متری خاک با بیشترین ذخیره کربن نسبت به دیگر لایه‌ها ظرفیت بیشتری را در مقایسه با دیگر توده‌ها نشان داده است که بیانگر تأثیر تلفیق گونه‌ها در عملیات جنگلکاری و فضای سبز است. بر این اساس می‌توان الگوهای مکانی مختلفی را در عمق‌های مختلف خاک در نظر گرفت. استفاده از این قابلیت بسیار مهم در عرصه‌های جنگلکاری در کنار کارکردهای تفریحی و تلطیف هوا، در زمینه تجارت کربن و کارکرد اقتصادی نیز جایگاه ویژه‌ای خواهد داشت.

اهمیت خاصی برخوردار است که با استفاده از بررسی‌های زمین‌آمار حاصل می‌شود. نقشه تغییرات مکانی درصد کربن در منطقه تحقیق در شناسایی و معرفی توده‌های جنگلی مناسب مهم است و در برنامه‌ریزی‌های مربوط به اصلاح خاک کاربرد دارد. با توجه به اهداف این تحقیق، برآورد ظرفیت ترسیب کربن در خاک و معرفی الگوی اجرایی مناسب برای توسعه جنگلکاری‌ها، از اهمیت زیادی برخوردار است. زیرا در شرایط فعلی که توسعه فضای سبز شهری در دستور کار برنامه‌ریزان قرار دارد، شناخت این ظرفیت و برآورد دقیق آن بسیار راهگشا خواهد بود. در منطقه جنگلی پارک جهان‌نما در سطح ۳۶ هکتار، مقدار ترسیب کربن در عمق اول بیشتر از دو عمق دیگر است که با توجه به ترکیب مواد آلی در سطح فوقانی خاک این موضوع بدیهی به نظر می‌رسد. با توجه به شبکه تراکم نمونه‌برداری (۱۱۵ نمونه خاک) به‌طور متوسط این عرصه‌ها با توده‌های مختلف درختی می‌تواند ۶۸/۵

References

- Alijani, B., O'Brien, J., & Yarnal, B. (2008). Spatial analysis of precipitation intensity and concentration in Iran. *Theoretical and Applied Climatology*, 94(1-2), 107-124.
- Assouline, A., & Or, D. (2006). Anisotropy factor of saturated and unsaturated soils. *Journal of Water Resources Research*, 42(12), 1-11.
- Al-Karni, A.A., & Al-Shamrani, M.A. (2000). Study of the effect of soil anisotropy on slope stability using method of slices. *Computers and Geotechnics*, 26(2), 83-103.
- Borujeni, I.E., Mohammadi, J., Salehi, M.H., Toomanian, N., & Poch, R.M. (2010). Assessing geopedological soil mapping approach by statistical and geostatistical methods: a case study in the Borujen region, Central Iran. *Catena*, 82(1), 1-14.
- Cambardella, C.A., Moorman, T.B., Parkin, T.B., Karlen, D.L., Novak, J.M., Turco, R.F., & Konopka, A.E. (1994). Field-scale variability of soil properties in central Iowa soils. *Soil science society of America journal*, 58(5), 1501-1511.
- Dignac, M.F., Derrien, D., Barré, P., Barot, S., Cécillon, L., Chenu, C., & Hedde, M. (2017). Increasing soil carbon storage: mechanisms, effects of agricultural practices and proxies. *A review. Agronomy for sustainable development*, 37(2), 14.
- Farahnak, M. (2015). Impact of nitrogen on spatial variability of carbon sequestration in different depths of forest soil (case study: pure and mixed beech stands in Kheyroud forest) Msc Thesis. Iran: University of Tehran.
- Faraji Sabokbar, H.A., & Azizy, Gh. (2006). Assessment of the accuracy of spatial interpolation methods (Case study: Patterning rainfall in areas Kardeh Mashhad). *Journal of Geographic Researches*. 38, 1-15.

- Freeman, E.A., & Moisen, G.G. (2007). Evaluating kriging as a tool to improve moderate resolution maps of forest biomass. *Environmental monitoring and assessment*, 128(1-3), 395-410.
- Gharebaghi, Z. (2018). Determination of carbon sequestration capacity in organic and mineral layers of soil in Gahannama. Iran: University of Zanjan.
- Hasani Pak, A.A. (2013). *Geostatistics*. Tehran: University of Tehran Press.
- Jahannama Park booklet, (2010). Soil survey laboratory, Parks and Green Space Organization of Karaj Municipality Press.
- Lei, Z., Yu, D., Zhou, F., Zhang, Y., Yu, D., Zhou, Y., & Han, Y. (2019). Changes in soil organic carbon and its influencing factors in the growth of *Pinus sylvestris* var. mongolica plantation in Horqin Sandy Land, Northeast China. *Scientific reports*, 9(1), 1-12.
- MacDicken, K.G. (1997). A guide to monitoring carbon storage in forestry and agroforestry projects. Washington DC: Earthscan Press.
- Marchetti, A., Piccini, C., Francaviglia, R., & Mabit, L. (2012). Spatial Distribution of Soil Organic Matter Using Geostatistics: A Key Indicator to Assess Soil Degradation Status in Central Italy. *Pedosphere*, 22(2), 230-242.
- Meirvenne, V. (1998). Integrating properties of soil map delineations into ordinary kriging. *European Journal of Soil Science*, 49(2), 213-229.
- Mir Mousavi, S.H., Mazidi, A., & Khosravi, Y. (2010). Determine the best methods of geostatistics to estimate rainfall distribution using GIS (Case Study: Isfahan Province). *Journal of Geography Space*, 30, 105-120.
- Shabany, M. (2009). Assessment of application geostatistical methods in severity of the drought zoning in Fars province. *Journal of Water Engineering*. 2, 31-36.
- Soucemarianadin, L., Cécillon, L., Chenu, C., Baudin, F., Nicolas, M., Savignac, F., & Barré, P. (2018). The contribution of deep soil horizons to persistent organic carbon sequestration in French forest soils. EGUGA Press.
- Trangmar, B.B., Yost, R.S., & Uehara, G. (1985). Application of geostatistics to spatial studies of soil. *Advances in agronomy*, 38, 45-94.
- US Department of Agriculture. (1972). Soil survey laboratory methods and procedures for collecting soil samples. US Government Press.
- Walkley, A., & Black, I.A. (1934). An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil science*, 37(1), 29-38.
- Webster, R., & Oliver, M.A. (2007). *Geostatistics for environmental scientists*. John Wiley press.
- Yuan, Z., Gazol, A., Lin, F., Ye, J., Shi, S., Wang, X., & Hao, Z. (2013). Soil organic carbon in an old-growth temperate forest: spatial pattern, determinants and bias in its quantification. *Geoderma*, 195, 48-55.
- Zahedi, GH. (1998). *Relation between ground vegetation and soil characteristics in a mixed hardwood stand* (PhD Thesis). Belgium: University of Gent.
- Zahedi, GH., & Zargham, N. (2018). Carbon sequestration in Terrestrial Ecosystems. Second Edition, Tehran: University of Tehran academic Press.
- Zheng, J., He, M., Li, X., Chen, Y., & Liu, L. (2008). Effects of *Salsola passerina* shrub patches on the microscale heterogeneity of soil in a montane grassland, China. *Journal of arid environments*, 72(3), 150-161.



Research Article

Spatial variability of carbon storage and sequestration in leaf litter and layers of soil in the forest area of Jahannama Park

R. Porrostami^{1*}, Q. Zahedi Amiri², and V. Etemad³

¹ Ph.D Student of Forestry, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, I. R. Iran

² Prof. of Forestry, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, I. R. Iran

³ Associate Prof. of Forestry, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, I. R. Iran

(Received: 11 March 2020, Accepted: 04 May 2020)

Abstract

This study was carried out to investigate the spatial variability of litter carbon storage and its sequestration in the soil layers in the forested area of Jahannama Park. First, 115 soil samples were taken from 0-15, 15-30, and 30-50 cm depths using the grid-transect sampling method. After the determination of the percentage of organic carbon, the geostatistical methods (simple kriging, ordinary kriging and inverse distance weighting methods) were used to investigate the spatial variability of carbon percentage in the non-sampled locations. The cross-validation method was used to evaluate the accuracy of the results using MARE, MBE, and RMSE statistical criteria. The results showed that the carbon content in the first two depths had a Gaussian variogram model and, in the third depth, was exponential. Nugget effect and spatial structure of carbon percentage in the first, second and third depths were 0.001%, 0.999%, 0.0045%, 0.966%, 0.0058%, and 0.956%, respectively, which shows the less nugget effect and good spatial structure of carbon in both the surface and the deep layers. Low estimation error showed that ordinary kriging was able to make the correct estimation for all of the depths. Considering the objectives of this study, in an area, about 36 hectares with a dense sampling network (115 soil profiles) with different tree stands, on average, 68.5 tons carbon sequestration per hectare has been estimated to a depth of 50 cm which is a total of 2470 tons of carbon sequestration in this area. The sampling strategy in this study to estimate the soil carbon sequestration in afforestation can be a good model for other similar areas.

Keywords: Forest soil, Geostatistics, Grid- transect sampling, Kriging