



دانشگاه گیلان

نشریه پژوهش‌های علوم و فناوری چوب و جنگل

جلد بیست و هفتم، شماره سوم، ۱۳۹۹

۱۳۰-۱۰۹

<http://jwfst.gau.ac.ir>

DOI: 10.22069/jwfst.2020.18170.1878

برآورد تغییرات مکانی ضخامت لاشبرگ در سری یک و دو توده‌های جنگلی طبیعی و دست‌کاشت عرب‌داغ گلستان

علی مستوری^۱، *شعبان شتایی جویباری^۲، محمدهادی معیری^۳ و خسرو ثاقب‌طالبی^۴

^۱دانشجوی دکتری، گروه جنگلداری، دانشکده علوم جنگل، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران،

^۲استاد گروه جنگلداری، دانشکده علوم جنگل، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران،

^۳دانشیار گروه جنگلداری، دانشکده علوم جنگل، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران،

^۴استاد پژوهشی مؤسسه تحقیقات جنگل‌ها و مراتع کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۵/۰۶؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۵/۳۰

چکیده

سابقه و هدف: با توجه به اهمیت ضخامت لاشبرگ در تنظیم میکروکلیم و خصوصیات فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک، تنظیم تبادلات ورودی و خروجی خاک، تحول و تداوم توده‌های جنگلی و بررسی وضعیت میزان آن در توده‌های دست‌کاشت و شرایط محیطی مختلف، این مطالعه با هدف برآورد ضخامت لاشبرگ و تهیه نقشه توزیع مکانی آن از طریق مقایسه روش‌های مختلف میان‌یابی قطعی و زمین‌آماری در منطقه جنگلی عرب‌داغ واقع در شمال شرق استان گلستان انجام گردید.

مواد و روش‌ها: اطلاعات ضخامت لاشبرگ در ۴۲۲ قطعه نمونه دایره‌ای با مساحت ۴۰۰ مترمربع در قالب شبکه خوشه‌ای منظم با ابعاد شبکه ۶۰۰×۴۰۰ (هر خوشه ۵ قطعه نمونه با فواصل ۱۰۰ متری) از توده‌های سوزنی‌برگان (کاج بروسیا، زربین، سرو نقره‌ای، کاج بادامی، کاج اروپایی)، پهن‌برگان (آزاد، ممرز، انجیلی، افراپلت) و مخلوط پهن‌برگان و پوشش درختچه‌ای و بوته‌ای (سیاه‌ال، سیاه‌تلو، انار وحشی) جمع‌آوری گردید و پس از آنالیز اولیه در نرم‌افزارهای آماری، بانک اطلاعاتی مکانی و توصیفی آن‌ها در محیط GIS تهیه شد. سپس به منظور تولید نقشه موضوعی ضخامت لاشبرگ، کارایی روش‌های مختلف درون‌یابی EBK، OK، RBF، LPT، LDW و Co-kriging مورد مقایسه و آنالیز قرار گرفتند. اعتبارسنجی متقابل برای ارزیابی دقت تکنیک‌های مختلف درون‌یابی به وسیله ضریب تبیین (R^2)، میانگین خطای نسبی (MRE)، میانگین خطای اربیبی (MBE)، میانگین خطای مطلق (MAE) و میانگین جذر مربعات خطا (RMSE) انجام شد.

یافته‌ها: نتایج این پژوهش نشان داد بیش‌ترین ضخامت لاشبرگ در توده‌های پهن‌برگ طبیعی و کم‌ترین ضخامت در تیپ سوزنی برگ سرو نقره‌ای در منطقه بوده است. هم‌چنین در گروه پهن‌برگ، تیپ خالص آزاد بیش‌ترین تغییرات

* مسئول مکاتبه: shataee@gau.ac.ir

ضخامت لاشبرگ را داشته (۱/۰۹ سانتی‌متر) و تیپ خالص ممرز با کم‌ترین مقدار انحراف معیار (۰/۲۷ سانتی‌متر)، تقریباً ضخامت ثابتی را نشان داد درحالی‌که در گروه سوزنی‌برگان تیپ‌های کاج بروسیا بیش‌ترین تغییرات ضخامت لاشبرگ را به نمایش گذاشت. نتایج این مطالعه نشان داد که روش درون‌یابی زمین آماری کوکریجینگ معمولی به‌ترتیب با مدل‌های نمایی (۰/۷۸۳)، کروی (۰/۷۸۹) و گوسی (۰/۷۹۱) با داده کمی سطح مقطع در هکتار با حداقل جذر مربعات خطا و بیش‌ترین ضریب تبیین، قابلیت بهتری در مقایسه با روش‌های درون‌یابی کوریجینگ (۰/۸ تا ۰/۸۱۷) و قطعی (۰/۸۷۵ تا ۱/۰۵) در درون‌یابی توزیع مکانی ضخامت لاشبرگ اکوسیستم جنگلی منطقه عرب‌داغ دارد.

نتیجه‌گیری: با توجه به تأثیر ضخامت لاشبرگ بر روی برخی از فاکتورهای توده و رویشگاه مانند زادآوری، کیفیت و نفوذپذیری خاک و شدت برخی از آشفته‌گی‌های طبیعی رایج در منطقه مانند آتش‌سوزی و نتایج حاصل از این پژوهش، روش میان‌یابی کوکریجینگ معمولی با مدل‌های نمایی و گوسی در مقایسه با سایر روش‌ها، به‌دلیل دقت و صحت نتایج به‌دست‌آمده می‌تواند در تعیین ضخامت لاشبرگ توده‌های جنگلی و هم‌چنین مدیریت طرح‌های پرورشی و جنگل‌کاری مشابه کارایی بیش‌تری داشته باشد.

واژه‌های کلیدی: پهن‌برگان، درون‌یابی، سوزنی‌برگان، کوکریجینگ معمولی، لاشبرگ

مقدمه

آتش‌سوزی به‌کار گرفته می‌شود و میزان اشتعال‌پذیری آن در گونه‌های مختلف متفاوت است (۱ و ۴۲). این لایه یکی از اصلی‌ترین منابع ذخیره کربن در اکوسیستم‌های جنگلی است (۶۱)؛ یکی از مؤلفه‌های اصلی چرخه کربن و مواد غذایی است که از طریق ایجاد حریم بین خاک و اتمسفر، میکروکلیمای خاک را تنظیم می‌کند (۴۹). اندازه‌گیری ضخامت لاشبرگ در همه سطوح توده‌های جنگلی ذاتاً وقت‌گیر و هزینه‌بر است و با تعداد کم نمونه‌ها نیز نمی‌توان سطح واقعی تغییرات متغیر موردنظر را منعکس نمود؛ بنابراین پهن‌بندی و ارزیابی دقیق کمی و کیفی ذخایر کربن لایه لاشبرگ اکوسیستم‌های جنگلی با استفاده از روش‌های تعمیمی نظیر روش‌های آماری کلاسیک و روش‌های درون‌یابی می‌تواند گام مهمی در مدیریت به‌ویژه ارزیابی پتانسیل ترسیب کربن باشد (۳۶).

روش‌های آمار کلاسیک نمی‌تواند به‌خوبی ارزش و پراکنش مکانی متغیرهای محیطی همانند لاشبرگ را در موقعیت‌های نمونه‌برداری نشده تخمین بزند (۷).

لاشبرگ نقش مهمی در حفاظت و نگهداری جنگل‌ها به‌خصوص جنگل‌های گرمسیری دارد (۱۳ و ۵۴). این لایه باعث ایجاد تعادل بین عناصر ورودی و تجزیه مواد آلی می‌شود (۳۹ و ۴۲). لایه لاشبرگ مانع از هدر رفتن و آبشویی مواد غذایی و آب در اثر تبخیر می‌شود (۱۷، ۲۲ و ۲۳). هم‌چنین نه‌تنها به حفظ و نگهداری بلکه باعث بهبود مشخصه‌های فیزیکی و شیمیایی خاک می‌شود (۲۲، ۲۳، ۳۹ و ۱۷). خصوصیات لایه لاشبرگ به‌عنوان یک شاخص در ارزیابی شرایط محلی مناطق جنگل‌کاری مانند وضعیت ذخیره کربن، رطوبت خاک، شکل‌گیری عناصر معدنی و از همه مهم‌تر، در ارزیابی شرایط جنگل در مناطق تخریب یافته تحت تجدید حیات عمل می‌کند که در تضمین آینده جنگل نقش به‌سزایی دارد (۲۸، ۲۹، ۵۳، ۱۱، ۳۸ و ۵۲). لایه لاشبرگ یک پارامتر مؤثر در تعیین رژیم آتش‌سوزی جنگل نیز می‌باشد که در پهن‌بندی ریسک به‌ویژه ریسک

رگرسیون خطی چندگانه دقت برآورد را کاهش دادند (۵۱). در زمینه برآورد توزیع مکانی ضخامت و تراکم لاشبرگ اکوسیستم‌های جنگلی، مطالعات محدودی از تکنیک‌های درون‌یابی به‌خصوص تکنیک‌های زمین‌آماری استفاده کرده‌اند.

یانگ و همکاران (۲۰۰۹) با استفاده از روش‌های زمین‌آمار به مطالعه و تخمین میزان ضخامت لاشبرگ در بخشی از جنگل‌های بوره‌آل کشور کانادا پرداخت و با استفاده از روش کوکریجینگ (مدل کروی) و داده کمکی انتشار اشعه گاما توانست دقت تخمین را ۲۷ درصد بهبود ببخشد (۵۶). کانکل و همکاران (۲۰۱۱) از مدل‌های کوکریجینگ و رگرسیون خطی چندگانه به پیش‌بینی توزیع مکانی ذخیره کربن پرداختند و به این نتیجه رسیدند که روش کوکریجینگ با به‌کارگیری متغیرهای فیزیوگرافی جهت و ارتفاع بهتر می‌تواند روند تغییرات متغیر هدف را ارزیابی نماید (۲۷). کیوین و همکاران (۲۰۱۹) به پیش‌بینی مقدار لاشبرگ با استفاده از روش‌های کوکریجینگ معمولی با تجزیه و تحلیل همبستگی پیرسون، مؤلفه اصلی^{۱۲} و بر اساس اساس روش اعتبارسنجی متقاطع در جنگل‌های مخلوط دست‌کاشت در کشور چین پرداختند. نتایج نشان داد که مقدار لاشبرگ در افق نیمه تجزیه‌شده، ۱۹/۶۵ تن در هکتار و در افق تجزیه کامل، ۱۰/۳۷ تن در هکتار بوده و هم‌چنین، توزیع مکانی مقدار لاشبرگ در هر دو افق، یک الگوی ناهمگنی داشتند. از بین متغیرهای توده و لاشبرگ، میزان رطوبت لاشبرگ قوی‌ترین همبستگی را با مقدار لاشبرگ داشته است. نتایج اعتبارسنجی متقاطع نشان داد که روش میان‌یابی کوکریجینگ معمولی با تجزیه و تحلیل مؤلفه اصلی دقیق‌ترین نقشه را ایجاد کرده است (۴۵).

بنابراین روش‌های درون‌یابی مختلفی مانند روش‌های قطعی^۱ (فاصله وزن‌دهی معکوس^۲، تابع پایه‌شعاعی^۳، چندجمله‌ای جهانی^۴ و چندجمله‌ای محلی^۵)، روش‌های زمین‌آماری^۶ (کریجینگ معمولی^۷، کریجینگ ساده^۸ و کوکریجینگ^۹) و تکنیک‌های هیبرید (رگرسیون کریجینگ^{۱۰} و رگرسیون کریجینگ وزنی جهانی^{۱۱}) به‌کار گرفته شده‌اند (۳۱). در تمامی این تکنیک‌ها بر این اصل استوار است که نقاط نزدیک‌تر به احتمال زیاد خصوصیات مشابه‌تری در مقایسه با نقاط دورتر دارند (۳۷). روش‌های زمین‌آماری به‌طور موفقیت‌آمیز در بررسی تغییرات مکانی پارامترهای پیوسته محیطی خاک و فرایند تولید نقشه آن‌ها با به حداقل رساندن واریانس خطای برآوردی مورد استفاده قرار گرفتند (۵، ۸، ۱۳، ۳۴، ۴۷). نتایج برخی مطالعات نشان داد است که روش‌های زمین‌آماری مانند کریجینگ و کوکریجینگ در مقایسه با روش‌های درون‌یابی قطعی مثل IDW بهتر می‌توانند چنین ویژگی‌های را پیش‌بینی نمایند (۴۳ و ۵۸). پژوهشگران مختلفی در این زمینه پژوهش نمودند از جمله شن و همکاران (۲۰۱۹) روش‌های مختلف درون‌یابی را جهت برآورد مقدار فسفر خاک در شمال‌شرق چین استفاده نمودند و بیان کردند، روش‌های کریجینگ رگرسیونی و کریجینگ رگرسیونی وزنی در مقایسه با تکنیک درون‌یابی کریجینگ معمولی بهتر توانستند دقت برآورد فسفر خاک را بهبود دهند و بالعکس تکنیک‌های فاصله وزنی معکوس، کوکریجینگ و

- 1- Deterministic
- 2- Inverse distance weighting (IDW)
- 3- Radial basis function (RBF)
- 4- Global polynomial interpolation (GPI)
- 5- Local polynomial interpolation (LPI)
- 6- Geostatistical
- 7- Ordinary kriging (OK)
- 8- Simple kriging (SK)
- 9- Co-kriging (COK)
- 10- Regression kriging (RK)
- 11- Global weighted regression kriging (GWRK)

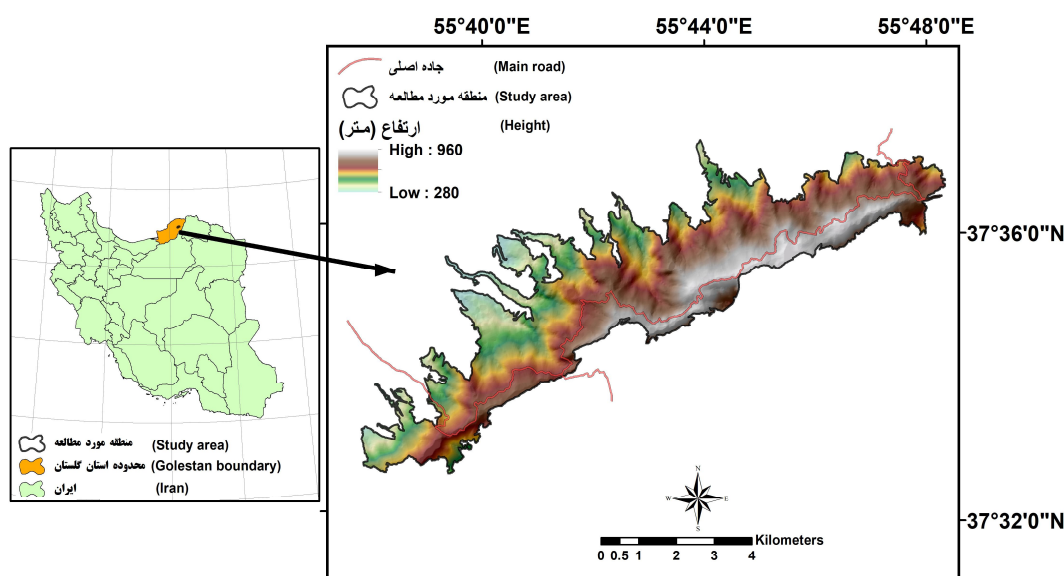
1- Co-kriging principal component analysis (COKPCA)

"۳۷°۳۰'۴۶" تا "۳۷°۳۸'۲۰" عرض شمالی با مساحت ۳۵۰۰ هکتار قرار دارد (شکل ۱). این حوزه دارای جنگل‌های طبیعی پهن‌برگ با غالبیت گونه‌های آزاد، ممرز، بلوط، مخروطه بوده که حدود ۵۰ درصد آن از سال ۱۳۶۵ تا ۱۳۶۹ با گونه‌های زربین، کاج بروسیا، کاج بادامی، کاج اروپایی و سرو نقره‌ای با فاصله کاشت ۳×۳ متر، جنگل‌کاری شده است. از نظر زمین‌شناسی از نهشته‌های رسوبی لسی تشکیل شده است. عرصه موردنظر در دامنه ارتفاعی ۲۰۰ تا ۱۰۰۰ متر بالاتر از سطح دریا قرار گرفته است. متوسط بارندگی سالیانه ۵۳۶/۸ میلی‌متر و متوسط دمای ماهیانه ۱۶/۹ درجه سانتی‌گراد و نوع اقلیم منطقه بر اساس ضریب خشکی دومارتن نیمه‌خشک و بر اساس کلیموگرام آمبرژه نیمه‌خشک سرد است (۱۲).

با توجه به اهمیت ضخامت لاشبرگ در تحولات مثبت و منفی توده‌های جنگلی، پژوهش حاضر با هدف، مشخص کردن وضعیت میزان ضخامت لاشبرگ در توده‌های سوزنی‌برگ و پهن‌برگ جنگل‌های طبیعی و دست‌کاشت، به دنبال مقایسه کارایی شش تکنیک درونیابی قطعی فاصله معکوس وزنی، چندجمله‌ای منطقه‌ای و تابع شعاعی و زمین‌آماری کریجینگ معمولی، بی‌زین تجربی و کوکریجینگ و انتخاب بهترین روش برآورد ضخامت لاشبرگ و تهیه نقشه توزیع مکانی آن در منطقه عرب‌داغ استان گلستان صورت گرفت.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه: حوزه عرب‌داغ در ۴۰ کیلومتری شمال‌شرق شهرستان کلاله در استان گلستان و در محدوده "۵۵°۳۵'۵" تا "۵۵°۵۱'۶" طول شرقی و

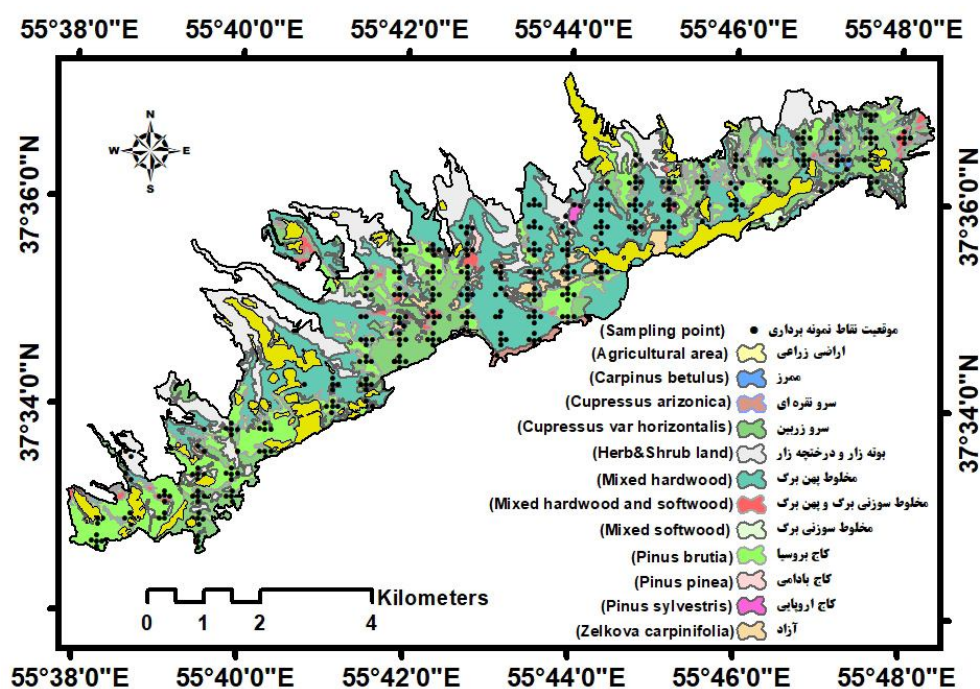


شکل ۱- موقعیت منطقه مورد مطالعه.

Figure 1. Location of the study area.

مراکز قطعه نمونه‌ها با DGPS ثبت و وارد محیط GIS گردید تا برای تولید نقشه توزیع مکانی نقاط، بانک اطلاعاتی و پردازش‌های مکانی استفاده گردد. نقشه توده‌های درختی منطقه هم از طریق بازدید زمینی و تفسیر چشمی تصاویر ماهواره SPOT6 مربوط به تاریخ ۱۵ تیرماه سال ۱۳۹۷ و تصاویر Google earth در ۱۲ طبقه شامل توده‌های زربین، کاج بروسیا، کاج بادامی، کاج اروپایی، پهن‌برگ، مخلوط سوزنی‌برگ، مخلوط سوزنی‌برگ و پهن‌برگ، اراضی کشاورزی و سایر تهیه گردیده است (شکل ۲).

نمونه‌برداری و جمع‌آوری اطلاعات: در این پژوهش از اطلاعات ۴۲۲ قطعه‌نمونه دایره‌ای به مساحت ۴۰۰ مترمربع که در قالب یک شبکه منظم خوشه‌ای به ابعاد ۴۰۰×۶۰۰ متر در عرصه مورد مطالعه برای پژوهش مدل‌سازی جامع خطرات تهدیدکننده توده‌های جنگلی منطقه مورد مطالعه طراحی شده بود، استفاده گردید. به‌طوری‌که در هر خوشه ۵ قطعه‌نمونه با فاصله ۱۰۰ متر از هم قرار گرفتند. ضخامت لاشبرگ در داخل هر قطعه نمونه در ۳ تا ۵ نقطه اندازه‌گیری و میانگین‌گیری گردیده است و در نهایت، موقعیت



شکل ۲- نقشه تپ پوشش گیاهی و موقعیت نقاط نمونه‌برداری در منطقه.

Figure 2. Vegetation type map and location of sampling points in the study area.

درختچه‌ای و تعداد درختان در هکتار) و رویشگاه (ارتفاع از سطح دریا، درصد شیب و متوسط بارندگی سالیانه) به‌منظور به‌کارگیری این پارامترها در درون‌یابی کوکرینجینگ از ضریب همبستگی اسپیرمن استفاده شد.

آنالیز آماری: به‌منظور بررسی نرمال بودن داده‌ها از آزمون کولموگروف اسمیرنوف و ضرایب چولگی و کشیدگی استفاده گردید (۵۶). هم‌چنین جهت شناسایی ارتباط ضخامت لاشبرگ با برخی از پارامترهای توده (متوسط ارتفاع درختان، متوسط قطر، سطح مقطع، درصد تاج پوشش، درصد پوشش

ArcGIS 10.4 و GS⁺ مورد بررسی قرار گرفت که

به شرح زیر می‌باشد:

تکنیک فاصله وزنی معکوس (IDW): در این روش وزن‌های اختصاص یافته به نقاط، معکوس فاصله آن‌ها از نقطه نامعلوم خواهد بود. هم‌چنین این وزن‌ها به وسیله توان کنترل می‌شوند و با افزایش توان اهمیت نقاط نزدیک‌تر چندین برابر می‌شود (۴۱). در این روش فاکتور وزن بر اساس رابطه ۲ محاسبه می‌گردد.

$$\lambda_i = \frac{D_i^{-a}}{\sum_{i=1}^n D_i^{-a}} \quad (2)$$

که در آن، λ_i ارزش میان‌یابی شده هر نقطه، n تعداد کل نقاط نمونه‌برداری، D_i اختلاف بین ارزش‌های میان‌یابی شده و ارزش‌های نمونه‌برداری و a توان موردنظر (۴۳).

روش چندجمله‌ای محلی (LPI): این روش بجای کل داده، مدل‌سازی را صرفاً در محدوده تعریف شده انجام می‌دهد (۱۸). همسایه‌ها می‌توانند همپوشانی داشته باشند و ارزش سطحی در مرکز هر همسایه به‌عنوان ارزش تخمینی برآورد می‌گردد.

تابع شعاعی (RBF): در این روش سطح تولید شده نیاز به عبور از هر نقطه اندازه‌گیری شده دارد و مقادیر پیش‌بینی شده می‌توانند بالاتر از حداکثر یا کمتر از حداقل مقادیر اندازه‌گیری شده باشند (۳۰). مزیت خاص روش‌های RBF توانایی آن‌ها بر روی داده‌های پراکنده در هر فضای چندبعدی می‌باشد (۲۴). تابع پایه شعاعی مدل‌سازی سطح را با توجه به ارزش نقاط اندازه‌گیری شده انجام می‌دهد و انحنای کل سطح را به حداقل می‌رساند (۲۱). این تکنیک هنگامی که یک تغییر چشمگیر در مقادیر سطح در فواصل کوتاه وجود داشته باشد قابلیت خودش را از دست می‌دهد (۹).

تکنیک‌های درون‌یابی: برخلاف روش‌های درون‌یابی

قطعی، روش‌های زمین‌آماري بر پایه ویژگی‌های مکانی و ساختار تغییرات مکانی آماری داده‌ها می‌باشند. روش‌های زمین‌آمار از تکنیک واریوگرام و سمی‌واریوگرام برای اندازه‌گیری تغییرات مکانی متغیر مورد نظر استفاده می‌کند (۵۷ و ۴۳).

سمی‌واریوگرام از سه جزء تشکیل شده است: دامنه تأثیر، حد آستانه (سقف) و اثر قطعه‌ای (۲۰) که بیانگر واریانس ساختاردار و واریانس بدون ساختار می‌باشد. با افزایش فاصله بین نقاط، سمی‌واریوگرام افزایش می‌یابد تا به یک ارزش تقریباً ماکزیمم می‌رسد (سقف) که معادل فاصله‌ای این واریانس دامنه گفته می‌شود. از نسبت واریانس ساختاردار به حد آستانه، به‌عنوان شاخصی برای بیان قدرت ساختار مکانی استفاده می‌شود. مقادیر نسبت ۷۵ درصد و بیش‌تر، بیانگر ساختار قوی، بین ۲۵ تا ۷۵ درصد، ساختار متوسط و نسبت کم‌تر از ۲۵ درصد نشان‌دهنده ساختار مکانی ضعیف متغیر موردنظر می‌باشد (۴۰). سمی واریوگرام بین مؤلفه‌های جفت نقاط از رابطه ۱ به‌دست می‌آید (۱۴).

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

که در آن، $N(h)$ تعداد کل جفت داده‌هایی که از طریق فاصله جدا می‌شوند، $Z(h)$ ارزش اندازه‌گیری شده برای متغیر موردنظر و X موقعیت نقاط را نشان می‌دهد.

در این پژوهش کارایی سه تکنیک درون‌یابی قطعی شامل فاصله معکوس وزنی (IDW)، چندجمله‌ای منطقه‌ای (LPI) و تابع شعاعی (RBF) و سه روش میان‌یابی زمین‌آماري کریجینگ معمولی (OK)، کریجینگ بیزین تجربی (EBK) و کوکریجینگ (COK) با استفاده از نرم‌افزارهای

ژئوفیزیکی درون‌یابی مکانی می‌باشد. این الگوریتم هنگامی که پوشش داده‌ها خوب است، روندهای محلی را گسترش می‌دهد (۲۶ و ۲۵).

اعتبارسنجی (Cross-validation): برآورد اعتبارسنجی با روش تقابل سنجی متقابل و با کنار گذاشتن نمونه‌های غیر از مدل‌سازی انجام پذیرفت (۷) و نتایج هر یک به وسیله آماره‌های میانگین خطای مطلق^۴، میانگین خطا^۵، جذر میانگین مربعات خطا^{۱۶} و میزان بهبود نسبی^{۱۷} ارزیابی گردید. شاخص‌های آماری، میانگین خطای نسبی (MRE)، میانگین خطای اریبی (MBE)، میانگین خطای مطلق (MAE) و میانگین جذر مربعات خطا (RMSE) برای اندازه‌گیری خطا و ضریب تبیین (R² value) برای ارزیابی دقت مدل‌های درون‌یابی به کار گرفته شدند. اگر خطای برآوردی بدون اریب باشد، ارزش این شاخص‌ها نزدیک صفر خواهد بود که نشان می‌دهد ارزش‌های برآوردی اختلاف چندانی با ارزش‌های واقعی ندارند. پارامترهای این شاخص‌ها به صورت رابطه‌های ۴ و ۵ می‌باشد.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2}{N}} \quad (4)$$

$$MBE = \frac{\sum_{i=1}^N (P_i - O_i)}{N} \quad (5)$$

که در آن، O_i ارزش مشاهدات، p_i ارزش پیش‌بینی شده، N تعداد نمونه‌ها.

کریجینگ معمولی (OK): کریجینگ به رویه درون‌یابی خطی محسوب می‌شود که بهترین برآورد بدون اریب خطی را برای داده‌های که در فضا متفاوت می‌باشند فراهم می‌آورد (۴۳). در این تکنیک از سمی‌واریوگرام به‌عنوان تابعی از فاصله، برای بررسی میزان انسجام مکانی و همبستگی آماری بهره جسته می‌شود و برای برازش مدل نیز از ضریب تبیین (R²) استفاده می‌شود (۴۴). بنابراین در این روش برآوردها از رابطه ۳ محاسبه می‌گردد.

$$\hat{z}(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i z(x_i) \quad (3)$$

که در آن، Z(X₀) ارزش برآوردی در موقعیت (X₀)، Z(X_i) ارزش اندازه‌گیری شده در موقعیت (X_i) و n تعداد نقاط در شعاع جستجو (بستگی به نحوه تعریف کاربر دارد) می‌باشند. وزن‌ها در این روش بستگی به پارامترهای مدل سمی واریوگرام و چارچوب نمونه‌برداری دارد (۴۶ و ۵۹).

کوکریجینگ (Co-kriging): در این روش یک یا چند متغیر اندازه‌گیری شده که با متغیر هدف همبستگی خطی دارد در برآورد آن به‌عنوان داده‌های کمکی عمل می‌کنند (۵۵ و ۱۵). در غیر این صورت باید از سایر روش‌های میان‌یابی غیرخطی استفاده شود (۴۸ و ۱۶). در این روش شناسایی وزن و میزان تأثیرگذاری نقاط همسایه از طریق سمی واریوگرام متقاطع انجام می‌گیرد. همبستگی بین متغیرهای اصلی و کمکی اهمیت به‌سزایی دارد چون باعث کارآمد شدن بیشتر مدل‌های کوکریجینگ می‌شود (۴).

کریجینگ تجربی (EBK): در این فرایند، فرض بر این است که سمی واریوگرام برآورد شده معادله درستی برای درون‌یابی منطقه است و از میان‌یابی خطی برای بررسی تغییرات مکانی استفاده می‌کند و نتیجه آن یک الگوریتم غیرثابت برای تصحیح

- 1- Mean absolute error (MAE)
- 2- Mean error (ME)
- 3- Root mean square error (RMSE)
- 4- Relative improvement

برعکس (۵۰). اعتبارسنجی داده‌ها پس از استخراج در محیط ArcGIS از طریق فرمول‌نویسی در محیط اکسل محاسبه گردید.

در ضمن بهبود نسبی یک مدل نسبت به مدل‌های دیگر از رابطه‌های زیر به دست می‌آید:

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^N |P_i - O_i|}{N} \quad (6)$$

$$RI = (RMSE_R - RMSE_E) / RMSE_R \times 100\% \quad (7)$$

نتایج

تپ پوشش گیاهی: جدول ۱ مساحت و درصد توده‌های جنگلی منطقه را نشان می‌دهد. ضمن این‌که پوشش‌های درختچه‌ای، خشبی و هم‌چنین پوشش مخلوط سوزنی‌برگ و پهن‌برگ در طبقه سایر گنجانده شد که مساحت قابل‌توجهی از عرصه را به خود اختصاص داده است.

که در آن، $RMSE$ و $RMSE_R$ به ترتیب جذر میانگین مربعات خطاهای مرجع و روش برآوردی می‌باشد. اگر این شاخص مثبت باشد نشان می‌دهد که صحت مدل برآوردی بیش‌تر از مدل مرجع می‌باشد و

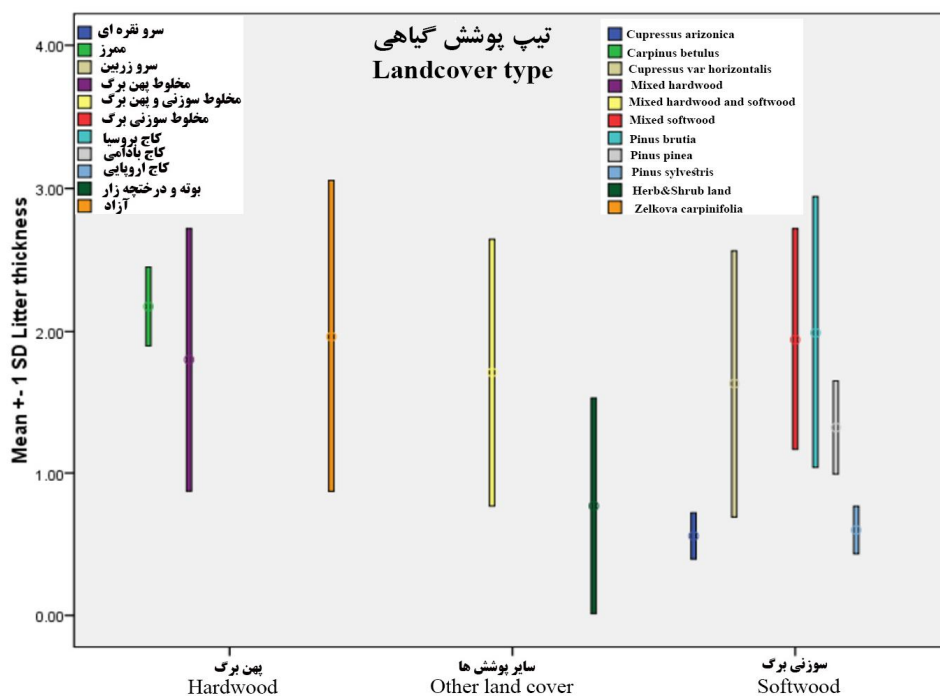
جدول ۱- مساحت و درصد مساحت تپ‌های پوشش گیاهی.

Table 1. Area and percentage of vegetation types.

مساحت (%) Area (%)	مساحت به هکتار Area (ha)	پوشش گیاهی Land cover	تپ Type
10.68	378.8	اراضی کشاورزی Agricultural area	اراضی کشاورزی Agricultural area
0.08	2.9	پهن‌برگ Hardwood	ممرز خالص <i>Carpinus betulus</i>
30.75	1090.3	پهن‌برگ Hardwood	مخلوط پهن‌برگ Mixed hardwood
2.99	106.1	پهن‌برگ Hardwood	آزاد خالص <i>Zelkova carpinifolia</i>
0.58	20.7	سوزنی‌برگ Softwood	سرو نقره‌ای <i>Cupressus arizonica</i>
18.33	650.0	سوزنی‌برگ Softwood	زربین <i>Cupressus sempervirens var horizontalis</i>
0.55	19.5	سوزنی‌برگ Softwood	مخلوط سوزنی‌برگ Mixed softwood
16.59	588.1	سوزنی‌برگ Softwood	کاج بروسیا <i>Pinus brutia</i>
0.36	12.7	سوزنی‌برگ Softwood	کاج بادامی <i>Pinus pinea</i>
0.22	7.8	سوزنی‌برگ Softwood	کاج اروپایی <i>Pinus sylvestris</i>
1.81	64.1	سایر Other	مخلوط پهن‌برگ و سوزنی‌برگ Mixed hardwood and softwood
17.05	604.5	سایر Other	بوته‌زار و درختچه‌زار Herb & Shrub land

ضخامت لاشبرگ بین ۰/۳ تا ۴/۵ سانتی متر نوسان دارد ولی در غالب این توده‌ها ضخامت لاشبرگ کم‌تر است؛ اما در توده‌های سوزنی‌برگ این ضریب بین ۰/۰۰۹- (کاج بادامی) تا ۱/۰۹+ (تیپ مخلوط سوزنی‌برگان) تغییرات دارد علی‌رغم این‌که، این توده‌ها دامنه ضخامت لاشبرگ یکسانی با گروه پهن‌برگ دارند. به‌طورکلی، تیپ ممرز خالص بیش‌ترین ضخامت و تیپ سرو نقره‌ای کم‌ترین ضخامت لاشبرگ را در منطقه مورد مطالعه داشتند. به‌طورکلی، میانگین ضخامت لاشبرگ گروه پهن‌برگ بیش‌تر از سوزنی‌برگ بود که موافق یافته‌های هانگ و همکاران (۲۰۰۶) و مخالف یافته‌های برگ و مک‌کلورگرتی (۲۰۰۳) می‌باشد (۱۹ و ۶). ضمن این‌که یافته‌های تحقیقاتی فو و همکاران (۲۰۱۴) در جنگل‌های جنوب‌شرق چین نشان داد، بیش‌ترین تراکم لاشبرگ به‌ترتیب به تیپ‌های پهن‌برگ، مخلوط پهن‌برگ و سوزنی‌برگ و سوزنی‌برگ و سوزنی‌برگ تعلق گرفته است (۱۳).

نتایج این مطالعه نشان داد که اختلاف چندانی بین تغییرات ضخامت لاشبرگ در سه گروه مورد بررسی در حالت کلی وجود ندارد، اما در بین تیپ‌های هر گروه این تغییرت زیاد بود، به‌طوری‌که در گروه پهن‌برگ، تیپ خالص آزاد بیش‌ترین تغییرات را داشته (۱/۰۹ سانتی‌متر) و تیپ خالص ممرز با کم‌ترین مقدار انحراف معیار (۰/۲۷ سانتی‌متر)، تقریباً ضخامت ثابتی را نشان داد (شکل ۳). درحالی‌که تغییرات ضخامت لاشبرگ در تیپ‌های گروه سوزنی‌برگ دست‌کاشت بسیار شدیدتر بود و تیپ‌های کاج بروسیا، زرین و تیپ مخلوط سوزنی‌برگ به‌ترتیب بیش‌ترین تغییرات ضخامت لاشبرگ را به خودشان اختصاص داده بودند. تغییرات ضخامت لاشبرگ در توده‌های مخلوط پهن‌برگ و سوزنی‌برگ نیز نزدیک به یک سانتی‌متر بوده است. هم‌چنین همان‌طوری که در جدول ۲ نشان داده شده است، در تمام تیپ‌های گروه پهن‌برگ، ضریب چولگی مثبت بود که گویای این مطلب است که علی‌رغم این‌که در این توده‌ها



شکل ۳- تغییرات ضخامت لاشبرگ (سانتی‌متر) در تیپ‌های پوشش گیاهی.

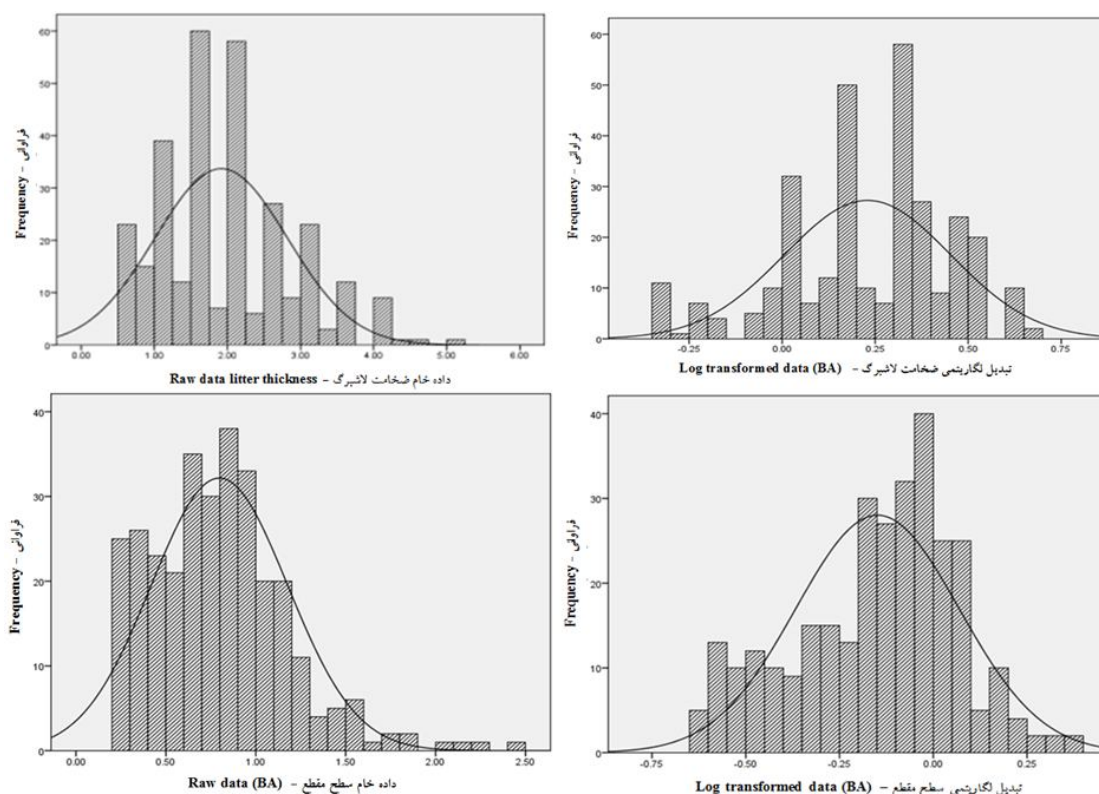
Figure 3. Litter thickness variations in vegetation types.

شکل ۴ داده‌های نرمال ضخامت لاشبرگ و سطح مقطع را پس از تبدیل لگاریتمی نمایش می‌دهد ($p\text{-value} > 0.05$).
 نرمال بودن توزیع داده‌ها برای آنالیزهای زمین آمار یکی از شروط اصلی می‌باشد که با استفاده از آزمون کولموگروف اسمیرنوف و ضرایب چولگی و کشیدگی مورد بررسی قرار گرفت (جدول ۲).

جدول ۲- تجزیه آماری مشخصه ضخامت لاشبرگ (cm) در واحد تیپ پوشش گیاهی.

Table 2. Statistical analysis of litter thickness (cm) characteristic in vegetation type unit.

حداقل Minimum	حداکثر Maximum	میانگین Mean	انحراف معیار Std. error	چولگی Skewness	کشیدگی Kurtosis	تیپ پوشش گیاهی Land cover type	گروه Group
1.9	2.5	2.18	0.28	0.32	-3.03	ممرز <i>Carpinus betulus</i>	
0.4	4.5	1.8	0.92	0.59	0.1	مخلوط پهن‌برگ Mixed hardwood	پهن‌برگ Hardwood
0.3	4	1.96	1.09	0.18	-1.2	آزاد <i>Zelkova carpinifolia</i>	
0.3	4.5	1.83	0.94	0.49	-0.22	کل Total	
0.3	0.8	0.56	0.16	-0.22	1.66	سرو نقره‌ای <i>Cupressus arizonica</i>	
0.1	5	1.63	0.94	0.86	0.96	زربین <i>Cupressus sempervirens var horizontalis</i>	
1.2	3.2	1.94	0.78	1.11	-0.6	مخلوط سوزنی‌برگ Mixed softwood	
0.1	4	1.99	0.95	0.15	-0.61	کاج بروسیا <i>Pinus brutia</i>	سوزنی‌برگ Softwood
0.9	1.7	1.32	0.33	0	-1.61	کاج بادامی <i>Pinus pinea</i>	
0.4	0.8	0.6	0.17	0.38	-1.79	کاج اروپایی <i>Pinus sylvestris</i>	
0.1	5	1.72	0.96	0.58	-0.06	کل Total	
0.4	3	1.71	0.94	-0.08	-1.27	مخلوط سوزنی‌برگ و پهن‌برگ Mixed hardwood and softwood	
0.1	3	0.77	0.76	2.47	6.69	بوته‌زار و درختچه‌زار Herb & Shrub land	سایر Other
0.1	3	1.27	0.97	0.68	-0.97	کل Total	



شکل ۴- هیستوگرام داده خام ضخامت لاشبرگ (a)، تبدیل لگاریتمی ضخامت لاشبرگ (b)، داده خام سطح مقطع (c) و تبدیل لگاریتمی سطح مقطع (d).

Figure 4. Histogram of raw litter thickness data (a), logarithmic transformed of litter thickness (b), raw data of basal area (c) and logarithmic transformed of basal area (d).

جنگل‌های نیمه‌استوایی افزایش پیدا کرده و برخی مطالعات نیز خلاف آن را ثابت کرده‌اند (۶۰ و ۳۳). همبستگی مثبت بین ضخامت لاشبرگ و ارتفاع از سطح دریا می‌تواند به شرایط خاص توپوگرافی منطقه نسبت داده شود. سطح مقطع در هکتار بالاترین ضریب همبستگی را با ضخامت لاشبرگ داشت و می‌تواند به‌عنوان داده‌های کمکی از آنالیزهای مکانی مورد استفاده قرار بگیرد.

ارتباط متغیرها با ضخامت لاشبرگ: نتایج نشان داد که بین ضخامت لاشبرگ و متغیرهای درصد تاج پوشش، تعداد درخت در هکتار، سطح مقطع در هکتار، میانگین قطر، میانگین ارتفاع توده و ارتفاع رویشگاه رابطه خطی مثبت و معنی‌دار وجود دارد. درحالی‌که ارتباط سایر متغیرهای رویشگاه با ضخامت لاشبرگ معنی‌دار نبود (جدول ۳). به‌طوری‌که با افزایش ارتفاع، تراکم لاشبرگ نیز در

جدول ۳- ضریب همبستگی بین ضخامت لاشبرگ و سایر متغیرها.

Table 3. Correlation coefficient between litter thickness and other variables.

ضریب همبستگی (r) Correlation coefficient	متغیر Variable
0.252*	تاج پوشش Crown cover
0.046	پوشش درختچه‌ای Shrub cover
0.128*	تعداد در هکتار Tree density
0.310**	رویه زمینی Basal area
0.162*	میانگین قطر Mean diameter
0.210*	میانگین ارتفاع توده Mean stand height
0.116*	ارتفاع از سطح دریا Elevation
-0.094	شیب Slope
0.059	متوسط بارش Mean precipitation

** در سطح ۹۹ درصد اطمینان

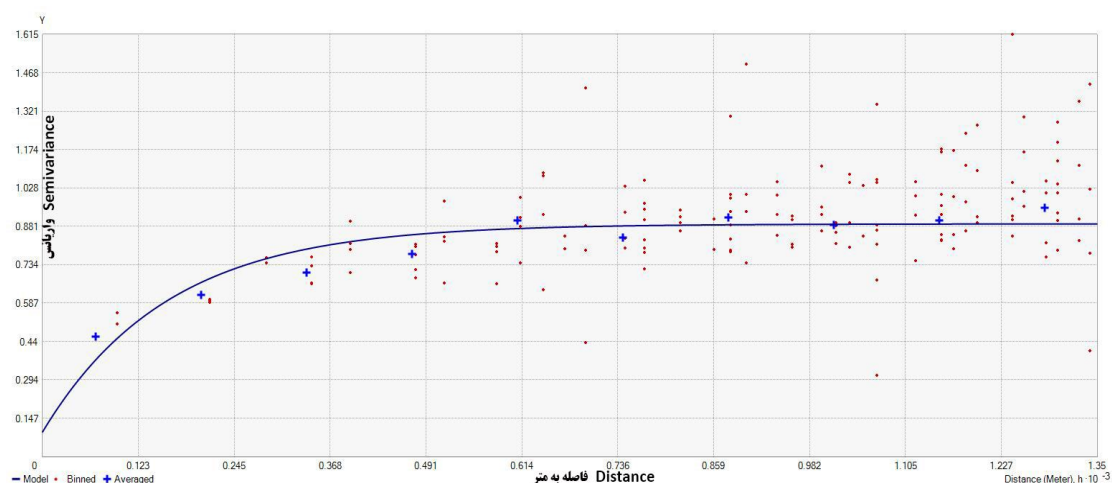
** The 99% confidence level

* در سطح ۹۵ درصد اطمینان

* The 95% confidence level

تغییرات ضخامت لاشبرگ بهترین برازش را با مدل نمایی و با استفاده از داده کمی سطح مقطع در هکتار دارد و مقادیر Nugget و Sill به ترتیب برابر ۰/۰۹۳ و ۰/۷۹۶ می‌باشد. همچنین نسبت بخش دارای ساختار منحنی سمی واریوگرام به واریانس سقف (۸۸/۳ درصد)، بیانگر وابستگی مکانی خوب متغیر ناحیه‌ای ضخامت لاشبرگ در منطقه عرب‌داغ است (جدول ۴).

درون‌یابی: شکل ۵ سمی واریوگرام متقابل برازش ضخامت لاشبرگ به کمک متغیر سطح مقطع در هکتار را نشان می‌دهد. محاسبات اولیه واریوگرام‌های داده‌های تبدیل‌شده در جهات مختلف نشان داد که تمام سمی‌واریوگرام‌ها ایزوتراپی است و تغییرات معنی‌داری در جهات مختلف رخ نداده است و سمی واریوگرام تنها به فاصله بین نقاط نمونه وابسته است (۳). تجزیه و تحلیل سمی واریوگرام نشان داد که



شکل ۵- تلاقی سمی واریوگرام تجربی برازش شده با مدل نمایی برای ضخامت لاشبرگ.

Figure 5. Fitted experimental cross semivariogram with exponential model for litter thickness.

جدول ۴- پارامترهای سمی واریوگرام تجربی برازش شده با مدل‌های مختلف برای ضخامت لاشبرگ.

Table 4. Parameters of fitted experimental cross semivariogram of different models for litter thickness.

روش	مدل	اثر قطعه‌ای	سقف واریانس	نسبت ساختار مکانی	ضریب تبیین	باقیمانده مجذور مربعات
Method	Model	Nugget	Sill semi variance	Nugget/Sill	R ²	RSS
Kriging	کروی Spherical	0.22	0.68	0.676	0.89	0.076
Kriging	نمایی Exponential	0.22	0.743	0.704	0.975	0.017
Kriging	گوسی Gaussian	0.24	.066	0.638	0.823	0.109
Cokriging	کروی Spherical	0.09	0.78	0.84	0.981	0.014
Cokriging	نمایی Exponential	0.093	0.796	0.883	0.981	0.014
Cokriging	گوسی Gaussian	0.253	0.656	0.61	0.802	0.154

خطای مجذور مربعات تشخیص داده شد. در برآورد برخی از پارامترهای کمی جنگل مانند زی توده نیز مدل نمایی به‌عنوان بهترین مدل نتیجه‌گیری شده است (۵۰). مدل تابع پایه شعاعی با تابع Spline with tension در مقایسه با سایر روش‌ها، نامناسب‌ترین مدل برای پهنه‌بندی متغیر ضخامت لاشبرگ بود (RB=۳۰/۲۷٪، RMSE=۱/۰۵ و MAE=۰/۸۱۶، MBE=۰/۰۰۵).

نتایج نشان داد که روش کوکریجینگ با متغیر کمکی سطح مقطع در هکتار، به دلیل داشتن بالاترین دقت و کمترین خطا، تخمین‌گر مناسبی برای متغیر ضخامت لاشبرگ می‌باشند. هم‌چنین بر اساس نتایج اعتبارسنجی متقابل، هر سه مدل (نمایی، کروی و گوسی) عملکرد خوبی را نشان دادند (جدول ۵)، اما مدل نمایی به‌عنوان بهترین مدل با توجه به درصد

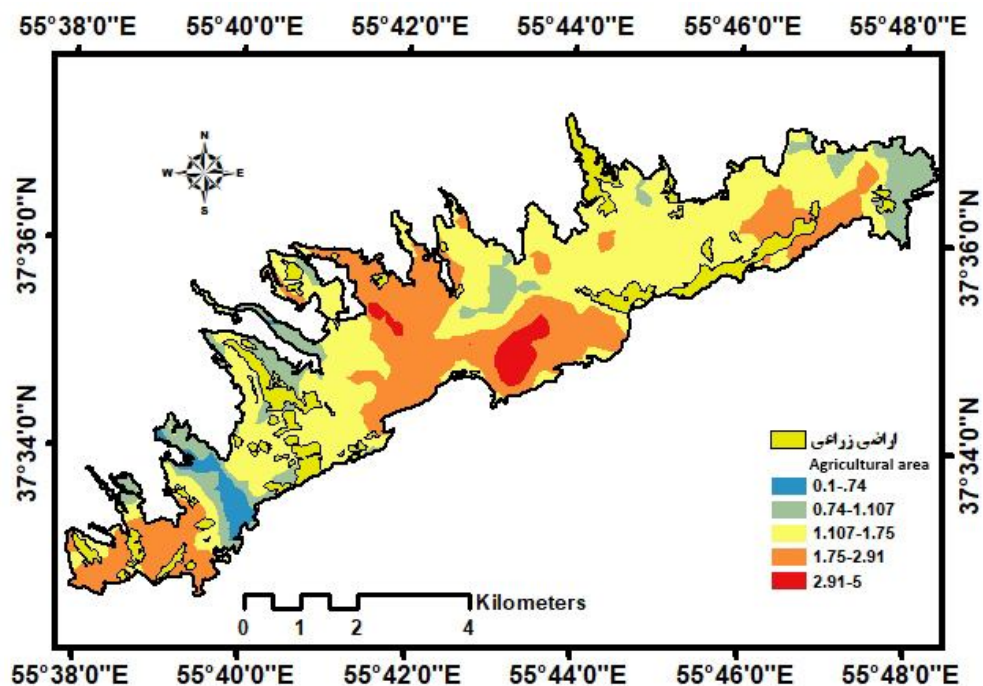
جدول ۵- نتایج ارزیابی صحت روش‌های مختلف درون‌یابی ضخامت لاشبرگ در منطقه مورد مطالعه.

Table 5. Evaluation results of different interpolation methods of litter thickness in the study area.

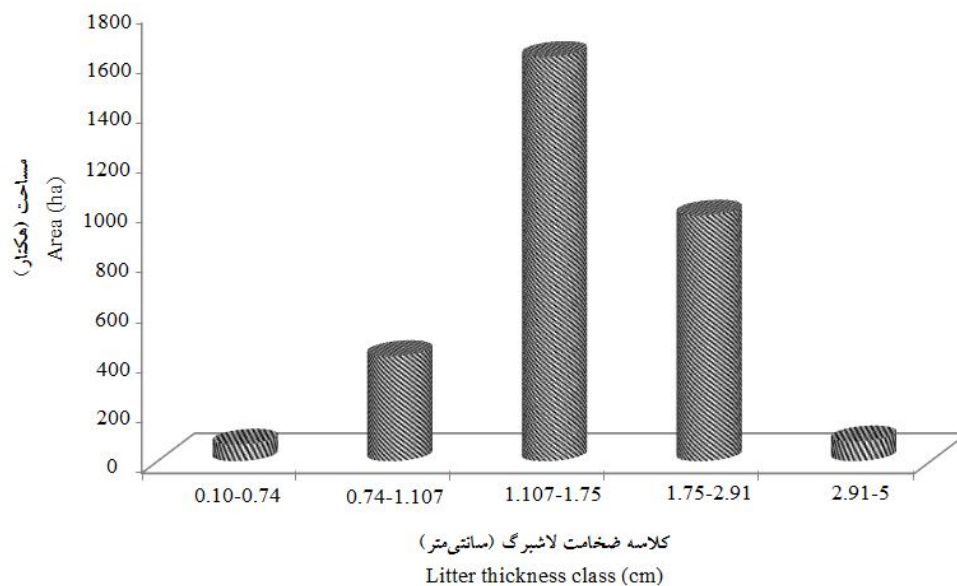
نوع Type	روش Method	مدل Model	RMSE	MBE	MAE	%RI
Geostatistical	Cokriging	Exponential	0.783	-0.0088	0.633	2.85
Geostatistical	Cokriging	Spherical	0.789	-0.00603	0.631	2.11
Geostatistical	Cokriging	Gaussian	0.791	-0.00679	0.629	1.86
Geostatistical	Kriging	Exponential	0.8	0.0146	0.653	0.74
Geostatistical	Kriging	Spherical	0.806	-0.0144	0.652	0.00
Geostatistical	Kriging	Gaussian	0.817	-0.0114	0.655	-1.36
Geostatistical	EBK	Power	0.875	-0.0163	0.719	-8.56
Geostatistical	EBK	Thin Plate Spline	0.879	0.0178	0.722	-9.06
Deterministic	EBK	Linear	0.881	-0.0176	0.722	-9.31
Deterministic	IDW	Power2	0.896	-0.0177	0.722	-11.17
Deterministic	RBF	Completely Regularized Spline	0.886	-0.0117	0.73	-9.93
Deterministic	RBF	Spline With Tension	0.881	-0.0129	0.718	-9.31
Deterministic	RBF	Multiquadric	0.929	-0.004	0.734	-15.26
Deterministic	RBF	Inverse Multiquadric	0.885	-0.0177	0.729	-9.8
Deterministic	RBF	Thin Plate Spline	1.05	0.005	0.816	-30.27
Deterministic	LPI	Exponential	0.888	0.0159	0.824	-10.17
Deterministic	LPI	Gaussian	0.891	0.0223	0.73	-10.55
Deterministic	LPI	Quartic	0.91	0.0302	0.746	-12.90

نهایی با توجه به روش Natural break در نرم‌افزار ArcGIS 10.5 در پنج کلاسه طبقه‌بندی شد که فراوانی مساحت آن‌ها در شکل ۷ آورده شده است. نتایج پهنه‌بندی ضخامت لاشبرگ بیانگر آن بوده که در بیش از ۶۵ درصد منطقه، ضخامت لاشبرگ کم‌تر از ۲ سانتی‌متر می‌باشد و تنها حدود ۸۰ هکتار از منطقه بیش از ۳ سانتی‌متر ضخامت لاشبرگ دارد.

به‌منظور درک بهتر تغییرات مکانی ضخامت لاشبرگ، یک نقشه به روش کوکریجینگ برای منطقه عرب‌داغ تهیه گردید (شکل ۶). با توجه به نقشه، تغییرات ضخامت لاشبرگ یکنواخت نمی‌باشد که این موضوع می‌تواند ناشی از تنوع پوشش گیاهی منطقه، آشفته‌گی‌های طبیعی مانند آتش‌سوزی، باد و برف و دخالت‌های پرورشی که به‌صورت پراکنده انجام گرفته است، باشد (۱۰ و ۳۲). همچنین نقشه



شکل ۶- نقشه توزیع مکانی ضخامت لاشبرگ منطقه عرب‌داغ تهیه شده به روش کوکریجینگ.
 Figure 6. Litter thickness map of Arabdagh region produced by co-kriging method.



شکل ۷- نمودار کلاسه‌های ضخامت لاشبرگ حاصل از طبقه‌بندی نقشه درون‌یابی در منطقه عرب‌داغ.
 Figure 7. Diagram of litter thickness classes derived from classified interpolation map in Arabdagh region.

(Cokriging, Kriging و EBK) به منظور یافتن مناسب‌ترین روش و مدل درون‌یابی ضخامت لاشبرگ استفاده گردید. یافته‌های این پژوهش نشان داد که روش‌های زمین‌آمار در مقایسه با سایر روش‌ها، عملکرد خوبی در تخمین ضخامت لاشبرگ داشتند و مدل‌نمایی بهترین مدل در ارائه تغییرات مکانی سمی واریوگرام بود. در این مطالعه ساختار مکانی (۸۴ درصد) نشان از وابستگی مکانی خوب متغیر ناحیه‌ای ضخامت لاشبرگ می‌باشد. تحلیل و مقایسه نتایج روش‌های مختلف درون‌یابی ثابت کرد که روش زمین‌آمار کوکریجینگ (مدل‌نمایی و با داده کمکی) بهترین روش تخمین تغییرات مکانی ضخامت لاشبرگ و تهیه نقشه آن می‌باشد؛ و همان‌طور که انتظار می‌رفت داده ثانویه سطح مقطع در هکتار توانست دقت تخمین را بهبود ببخشد. به منظور کاهش خطای تخمین می‌توان تأثیر سایر پارامترهای رویشگاه و توده را نیز مورد بررسی قرار داد. البته با توجه به این‌که روش کوکریجینگ بر اساس یک فرمول خطی بین متغیر اصلی و داده‌های کمکی عمل می‌کند، بنابراین این همبستگی بین آن‌ها باید با دقت مورد بررسی قرار بگیرد و اگر گرایش خطی بین متغیر اصلی با متغیرهای کمکی نبود بهتر است که از سایر روش‌های میان‌یابی که نیازی به فرمول خطی بین آن‌ها وجود ندارند (مانند کریجینگ‌های Indicator یا Bayesian)، مورد استفاده قرار بگیرد. چنین نقشه‌های زمین مرجع حاصل از درون‌یابی می‌تواند برای مدیران جنگل در تصمیم‌گیری‌ها و برنامه‌ریزی‌های مدیریتی بسیار مفید باشند. همچنین برای انجام طرح‌های مکان‌یابی که نیاز به نقشه‌های دقیق از پهنه‌های مختلف است، می‌توان از این نقشه‌ها به راحتی استفاده نمود.

نتایج نشان داد که کوکریجینگ بهترین مدل و تابع پایه شعاعی نامناسب‌ترین مدل در تخمین مقدار ضخامت لاشبرگ بودند، به طوری که روش کوکریجینگ با مدل‌نمایی (با داده کمکی سطح مقطع در هکتار) در مقایسه با روش کریجینگ معمولی (با مدل کروی) که در برخی از مطالعات محیطی به عنوان بهترین روش معرفی شده است توانست دقت برآورد را ($RF=0.2/85$) بهبود ببخشد درحالی‌که روش تابع پایه شعاعی با تابع Thin plate spline حدود $30/3$ درصد دقت را پایین آورده است. این نتایج با یافته‌های پاکارمونوز و همکاران (۲۰۱۰) در جنگل‌های بورآل منطقه کوبه کانادا همسو می‌باشد (۴۲). تکنیک‌های درون‌یابی زمین مکانی مانند کوکریجینگ و کریجینگ با تحلیل ساختار درونی متغیرهای محیطی توانستند تخمین‌های بدون اریب و با کم‌ترین خطا ارائه بدهند. با توجه به نقشه درون‌یابی، ضخامت لاشبرگ در قسمت‌های شرقی و غربی منطقه کم‌تر از بخش‌های میانی می‌باشد. به‌طورکلی روش‌های درون‌یابی از طریق زمین‌آمار در این مطالعه در مقایسه با روش‌های قطعی نتایج مطلوب‌تری داشت که با یافته‌های برخی از پژوهشگران در زمینه متغیرهای محیطی سازگاری دارد (۲، ۴۳، ۳۵ و ۵۸).

نتیجه‌گیری

در منطقه عرب‌داغ ۱۲ تیپ پوشش گیاهی شناسایی و در سه گروه پهن‌برگ، سوزنی‌برگ دست‌کاشت و سایر طبقه‌بندی شدند. نتایج نشان داد، بین پارامترهای مختلف، متغیر سطح مقطع در هکتار بیش‌ترین ضریب همبستگی را با متغیر ضخامت لاشبرگ داشتند. در این مطالعه از مقایسه روش‌های میان‌یابی قطعی (IDW, LPI و RBF) و زمین‌آمار

منابع

1. Aghajani, H., Fallah, A., and Emadian, S.F. 2014. Modeling and analyzing the surface fire behavior in Hyrcanian forest of Iran. *J. of Forest Science*. 60: 9. 353-362.
2. Ali, S.M., and Malik, R.N. 2011. Spatial distribution of metals in top soils of Islamabad city, Pakistan. *Environmental Monitoring and Assessment*. 172: 1-16.
3. Andronikov, S.V., Davidson, D.A., and Spiers, R.B. 2000. Variability in contamination by heavy metals: sampling implications. *Water, Air, Soil Pollution*. 120: 29-45.
4. Basaran, M., Erpul, G., Ozcan, A.U., Saygin, D.S., Kibar, M., Bayramin, I., and Yilman, F.E. 2011. Spatial information of soil hydraulic conductivity and performance of cokriging over kriging in a semi-arid basin scale. *Environmental Earth Sciences J*. 63: 827-838.
5. Behera, S.K., and Shukla, A.K. 2015. Spatial distribution of surface soil acidity, electrical conductivity, soil organic carbon content and exchangeable potassium, calcium and magnesium in some cropped acid soils of India. *Land Degradation and Development*. 26: 71-79.
6. Berg, B., and McLaugherty, C. 2003. Plant litter – decomposition, humus formation, carbon sequestration. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg.
7. Bhunia, G.S., Shit, P.K., and Maiti, R. 2018. Comparison of GIS-based interpolation methods for spatial distribution of soil organic carbon (SOC). *J. of the Saudi Society of Agricultural Sciences*. 17: 2. 114-126.
8. Burrough, P.A., and McDonnell, R.A. 1998. Principles of geographical information systems. Oxford University Press, Oxford.
9. Cheng, X.F., and Xie, Y. 2009. Spatial distribution of soil organic carbon density in Anhui province based on GIS. *Scientia Geographica Sinica*. 29: 4. 540-544.
10. Conti, G., Pérez-Harguindeguy, N., Quétier, F., Gorné, L.D., Jaureguiberry, P., Bertone, G.A., Enrico, L., Cuchietti, A., and Díaz, S. 2014. Large changes in carbon storage under different land-use regimes in subtropical seasonally dry forests of southern South America. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. 197: 68-76.
11. Cunha, G.D.M., Gama-Rodrigues, A.C.D., and Costa, G.S. 2005. Ciclagem de nutrientes em *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden no Norte Fluminense. *Revista Árvore*. 29: 353-363.
12. Forest Silvicultural plan of Arab Dagh area. 2016. General Department of natural resources and watershed management, 120p.
13. Fu, W.J., Jiang, P.K., Zhou, G.M., and Zhao, K.L. 2014. Using Moran's I and GIS to study the spatial pattern of forest litter carbon density in a subtropical region of southeastern China. *Biogeosciences*. 11: 8. 2401-2409.
14. Goovaerts, P. 1999. Geostatistics in soil science. *Geoderma*. 89: 1-45.
15. Goovaerts, P. 1997. Geostatistics for natural resources evaluation. Oxford University Press, New York.
16. Goovaerts, P. 2009. AUTO-IK: a 2D indicator kriging program for the automated non-parametric modeling of local uncertainty in earth sciences. *Computers and Geosciences*. 35: 6. 1255-1270.
17. Hairiah, K., Sulistyani, H., Suprayogo, D., Purnomosidhi, P., Widodo, R.H., and Van Noordwijk, M. 2006. Litter layer residence time in forest and coffee agroforestry systems in Sumberjaya, West Lampung. *Forest Ecology and Management*. 224: 1-2. 45-57.
18. Hani, A., and Abari, S.A.H. 2011. Determination of Cd, Zn, K, pH, TNV, organic material and electrical conductivity (EC) distribution in agricultural soils using geostatistics and GIS (case study: South Western of Natanz, Iran). *World Academy of Science, Engineering and Technology*. 5: 12. 22-25.
19. Huang, C.C., Ge, Y., Zhu, J.R., Yuan, W.G., Qi, L.Z., Jiang, B., Shen, Q., and Chang, J. 2005. The litter of *Pinus massoniana* ecological public-welfare forest in Zhejiang province and its relationship with the community characters. *Acta Ecologica Sinica*. 25: 2507-2513.

20. Isaaks, E.H., and Srivastava, R.M. 1989. An introduction to applied geostatistics. Oxford University, New York.
21. Johnston, K., Ver Hoef, J.M., Krivoruchko, K., and Lucas, N. 2001. Using ArcGIS geostatistical analyst. ESRI Press, Redlands, CA.
22. Jordan, C.F., and Escalante, G. 1980. Root productivity in an Amazonian rain forest. *Ecology*. 61: 14-18.
23. Jordan, C.F., and Herrera, R. 1981. Tropical rain forests: are nutrients really critical?. *The American Naturalist*. 117: 167-180.
24. Kedward, L., Allen, C.B., and Rendall, T.C. 2017. Efficient and exact mesh deformation using multiscale RBF interpolation. *J. of Computational Physics*. 345: 732-751.
25. Krivoruchko, K. 2012. Empirical bayesian kriging. esri, redlands, CA, USA. Available: online: <<http://www.esri.com/news/arcuser/1012/empirical-Bayesian-kriging.html>> (accessed 17.10.15).
26. Krivoruchko, K., and Butler, K. 2013. Unequal probability-based spatial mapping. Esri, Redlands, CA, USA: Available online: <<http://www.esri.com/esri/news/arcuser/spring2013/~media/Files/Pdfs/news/arcuser/0313/unequal.pdf>>.
27. Kunkel, M.L., Flores, A.N., Smith, T.J., McNamara, J.P., and Benner, S.G. 2011. A simplified approach for estimating soil carbon and nitrogen stocks in semi-arid complex terrain. *Geoderma*, 165: 1-11.
28. Lavelle, P., Barros, E., Blanchart, E., Brown, G., Desjardins, T., Mariani, L., and Rossi, J.P. 2001. Soil organic matter management in the tropics: why feeding the soil macro fauna? *Nutrient Cycling in Agro Ecosystems*. 61: 53-61.
29. Lavelle, P., and Spain, A.V. 2002. *Soil ecology*. Kluwer Academic Publication, Dordrecht, 654p.
30. Li, X.F., Chen, Z.B., Chen, H.B., and Chen, Z.Q. 2011. Spatial distribution of soil nutrients and their response to land use in eroded area of South China. *Procedia Environmental Sciences*. 10: 14-19.
31. Li, W., Zhang, C., and Wang, K. 2012. Comparison of geographically weighted regression and regression kriging for estimating the spatial distribution of soil organic matter. *Geosciences and Remote Sensing*. 49: 915-932.
32. Lin, Z., Chao, L., Wu, C., Hong, W., Hong, T., and Hu, X. 2017. Spatial analysis of carbon storage density of mid-subtropical forests using geostatistics: a case study in Jiangle County, southeast China. *Acta Geochim.* 37: 1. 90-101.
33. Ling, H., Chen, G.S., and Chen, Z.Q. 2009. The impact factors on forest litter of Chinese forest. *J. of Subtropical Resources and Environment*. 4: 66-71.
34. Liu, L., Wang, H., Dai, W., Lei, X., Yang, X., and Li, X. 2014. Spatial variability of soil organic carbon in the forestlands of northeast China. *J. of Forestry Research*. 25: 4. 867-876.
35. Liu, L., Jin, Y., Wang, J., Hong, Q., Pan, Z., and Zhao, J. 2019. Comparison of spatial interpolation methods on slowly available potassium in soils. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 234: 1. 12-18.
36. Liu, Z., Shao, M.A., and Wang, Y. 2011. Effect of environmental factors on regional soil organic carbon stocks across the Loess Plateau region, China. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. 142: 184-194.
37. Luo, W., Taylor, M.C., and Parker, S.R. 2008. A comparison of spatial interpolation methods to estimate continuous wind speed surfaces using irregularly distributed data from England and Wales. *International J. of Climatology*. 28: 947-959.
38. Marimon Júnior, B.H. 2007. Relação entre diversidade arbórea e aspectos do ciclo biogeoquímico de uma floresta monodominante de *Brosimum rubescens* Taub. e uma floresta mista no leste matogrossense. Ph.D. Thesis. Departamento de Ecologia, Universidade de Brasília, Brasília, 252p. <https://repositorio.unb.br/handle/10482/1145?locale=en>.

39. Marimon-Junior, B.H., and John, D. 2008. A new instrument for measurement and collection of quantitative samples of the litter layer in forests. *Forest Ecology and Management*. 255: 7. 2244-2250.
40. Mishra, U., Torn, M.S., Masanet, E., and Ogle, S.M. 2012. Improving regional soil carbon inventories: combining the IPCC carbon inventory method with regression kriging. *Geoderma*, 189: 288-295.
41. Mueller, T.G., Pierce, F.J., Schabenberger, O., and Warncke, D.D. 2001. Map quality for site-specific fertility management. *Soil Science Society of America J.* 65: 5. 1547-1558.
42. Paucar-Munoz, H., Richer-Laflèche, M., and Bégin, Y. 2010. Field litter thickness assessed by gamma-ray spectrometry. *Forest Ecology and Management*. 260: 10. 1640-1645.
43. Pourbabai, H., and Namiranian, M. 1993. Investigating and determining the most appropriate dimensions of the sampling network and the plot size in planted forests (Tada pine). Master's thesis Forestry, Tarbiat Modares University. (In Persian)
44. Robertson, G.P. 2008. GS+: Geostatistics for the Environmental Sciences. Gamma Design, Plainwell, Mich.
45. Qin, Q., Wang, H., Lei, X., Li, X., Xie, Y., and Zheng, Y. 2019. Spatial variability in the amount of forest litter at the local scale in northeastern China: Kriging and cokriging approaches to interpolation. *Ecology and Evolution*. 10: 1. 778-790.
46. Robinson, T.P., and Metternicht, G. 2006. Testing the performance of spatial interpolation techniques for mapping soil properties. *Computers and Electronics in Agriculture*. 50: 97-108.
47. Saito, H., McKenna, S.A., Zimmerman, D.A., and Coburn, T.C. 2005. Geostatistical interpolation of object counts collected from multiple strip transects: ordinary kriging versus finite domain kriging. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*. 19: 1. 71-85.
48. Savelieva, E., Demyanov, V., Kanevski, M., Serre, M., and Christakos, G. 2005. BME-based uncertainty assessment of the Chernobyl fallout. *Geoderma*. 128: 312-324.
49. Sayer, E.J. 2006. Using experimental manipulation to assess the roles of leaf litter in the functioning of forest ecosystems. *Biological Reviews*. 81: 1-31.
50. Scolforo, H.F., Scolforo, J.R.S., de Mello, J.M., de Mello, C.R., and Morais, V.A. 2016. Spatial interpolators for improving the mapping of carbon stock of the arboreal vegetation in Brazilian biomes of Atlantic forest and Savanna. *Forest Ecology and Management*. 376: 24-35.
51. Shen, Q., Wang, Y., Wang, X., Liu, X., Zhang, X., and Zhang, S. 2019. Comparing interpolation methods to predict soil total phosphorus in the Mollisol area of Northeast China. *Catena*. 174: 59-72.
52. Souza, J.A., and Davide, J.A. 2001. Deposição de serapilheira e nutrientes em uma mata na área minerada e em plantações de bracatinga (*Mimosa scabrella*) e de eucalipto (*Eucalyptus saligna*) em áreas de mineração de bauxita. *CERNE*, 7: 101-113: <https://www.redalyc.org/pdf/744/74470109.pdf>.
53. Swift, M.J., and Bignell, D. 2000. Standard methods for assessment of soil biodiversity and land use practice. Alternatives to Slash and Burn Project Lecture Note 6B, ICRAF SE Asia, Bogor, 34p.
54. Vitousek, P.M., and Sanford, R.L. 1986. Nutrient cycling in moist tropical forests. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*. 65: 285-298.
55. Yamamoto, J.K., and Landim, P.M.B. 2013. *Geoestatística: Conceitos e aplicações*, first ed. Oficina de Textos, São Paulo.
56. Yang, Y., Yang, J., Li, S., Zhang, X., and Zhu, D. 2009. Comparison of spatial interpolation methods for maize growth period. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*. 25: 9. 163-167.

57. Webster, R., and Oliver, M.A. 2001. Geostatistics for environmental scientists. Wiley, New York.
58. Zare-mehrjardi, M., Taghizadeh-Mehrjardi, R., and Akbarzadeh, A. 2010. Evaluation of geostatistical techniques for mapping spatial distribution of soil PH, salinity and plant cover affected by environmental factors in Southern Iran. *Notulae Scientia Biologicae*. 2: 4. 92-103.
59. Zhang, C., and McGrath, D. 2004. Geostatistical and GIS analysis on soil organic carbon concentrations in grassland of southeastern Ireland from two different periods. *Geoderma*. 119: 261-275.
60. Zhang, F., Du, Q., Ge, H.L., Liu, A.X., Fu, W.J., and Ji, B.Y. 2012. Spatial distribution of forest carbon in Zhejiang Province with geostatistics based on CFI sample plots. *Acta Ecologica Sinica*. 32: 5275- 5286.
61. Zhou, X., Wu, Z., Zheng, L., Cai, R., Luo, J., and Lin, H. 2008. Biomass and nutrient content of forest litter in natural forest of different intensity harvesting after ten years. *Silva Science Teaching Resources*. 44: 25-28.



Estimation of spatial variation of litter thickness in districts one and two of natural and planted forest stands in Arabdagh area

A. Mastouri¹, *Sh. Shataee Jouibary², M.H. Moayeri³ and Kh. Sagheb-Talebi⁴

¹Ph.D. Student, Dept. of Forestry, Faculty of Forest Sciences, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran,

²Professor, Dept. of Forestry, Faculty of Forest Sciences, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran,

³Associate Prof., Dept. of Forestry, Faculty of Forest Sciences, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran,

⁴Professor, Research Institute of Forests and Rangelands, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Tehran, Iran

Received: 07.27.2020; Accepted: 08.20.2020

Abstract

Background and Objectives: Regarding the importance of litter thickness in the regulation of microclimate and the physical, chemical and biological characteristics of soil, the regulation of soil input and output exchanges and evolution and continuity of forest stands and investigating its characteristics in planted forests and different environmental conditions, this study estimated litter thickness and provided its spatial variability map through using and comparing the different techniques of interpolation and geostatistics in Arabdagh area located in northeast of Golestan province.

Materials and Methods: Litter thickness data were collected in 422 circular sample plots each one with an area of 400 m² using a systematic cluster network (400×600 m, each cluster includes 5 plots with a distance of 100 meters) in different needle-leaved (*Pinus brutia*, *Cupressus sempervirens* var. *horizontalis*, *Pinus pinea*, *Pinus sylvestries*), broad-leaved (*Zelkova carpinifolia*, *Carpinus betulus*, *Parrotia persica*, *Acer velutinum*) and mixture of shrub and herb stands (*Cornus australis*, *Paliurus spina-christi*, *Punica granatum*) then after an initial analysis of the data in statistical software, their spatial and descriptive database was prepared in GIS environment. In order to produce litter thickness thematic map, the efficiency of different interpolation methods of EBK, OK, RBF, LPT, LDW and Co-kriging were compared. Cross-validation was performed to evaluate the accuracy of different interpolation techniques by the coefficient of determination (R²), mean relative error (MRE), mean bias error (MBE), mean absolute error (MAE) and root mean square error (RMSE).

Results: The results of this study showed that the highest thickness of the litter was in the natural broad-leaved stands and the lowest thickness was in *Cupressus arizonica* plantation in the study area. Also, in the broad-leaved group, the pure *Zelkova carpinifolia* forest type had the most changes (1.09 cm) while *Carpinus betulus* forest type had the lowest standard deviation (0.27 cm) and had almost a constant thickness. In the needle-leaved group, the *Pinus brutia* forest type showed the most variations in thickness of the litter. The results of this study showed that the Co-kriging interpolation method with the exponential (0.783), spherical (0.789) and Gaussian (0.791) models using the auxiliary data of basal area per hectare and with least squares error and the highest coefficient of determination had better capability in spatial distribution

*Corresponding author: shataee@gau.ac.ir

interpolation of litter thickness in Arabdagh region compared to kriging (0.8 to 0.817) and deterministic models (0.875 to 1.05).

Conclusion: Due to the effect of litter thickness on some stand and habitat factors such as regeneration, soil quality and infiltration and the severity of some common natural disturbances in the region such as fire and considering the results of this study, the Co-kriging interpolation method with the exponential and Gaussian models due to the accuracy of the results can be more effective in determining the litter thickness of forest stands as well as managing similar stands and afforestation plans compared to other methods.

Keywords: Broad-leaved, Co-kriging, Interpolation, Litter, Needle-leaved