فصلنامهٔ علمی - پژوهشی تحقیقات جنگل و صنوبر ایران
جلد ۱۷ شمارهٔ ۲، صفحهٔ ۳۱۸-۳۰۳، (۱۳۸۸)

کارايي کريجينگ در برآورد و نقشه‌سازي موجودي جنگل‌کاريها (مطالعه موردي: جنگل‌کاري بنشکي رامسر)

رضا اخوان [۱*] و کريستوف کلاين [۲]

۱*- نويسنده مسئول، استاديار پژوهشي، مؤسسه تحقيقات جنگلها و مراتع کشور. پست الکترونيک: akhavan@rifr-ac.ir
۲- استاد، انستيتوی آماربرداری جنگل و سنجش از دور، دانشگاه گوتينگن، آلمان.
تاريخ دريافت: ۸۷/۱۰/۸ تاريخ پذيرش: ۸۸/۲/۲۳

چکیده

این تحقیق به‌منظور بررسی ساختار مکانی متغیرهای کمّی جنگل و امکان استفاده از روش کریجینگ زمین‌آمار برای برآورد و نقشه‌سازی از آنها در یک جنگل‌کاری ۱۸ ساله پلت به مساحت ٦٣ هکتار در شمال کشور انجام شده است. نمونه‌برداری با استفاده از شبکه‌ای منظم به ابعاد ۱۲۵×۵۰ متر و با اندازه‌گیری قطعات نمونه دایره‌ای شکل ۲ آری انجام شد. پس از انجام آماربرداری، ۹٦ قطعه نمونه در این جنگل‌کاری اندازه‌گیری و همچنین ۱٤/۲۵ هکتار از سطح آن به‌منظور مقایسه روشهای مختلف برآورد، آماربرداری صددرصد شد. با استفاده از داده‌های زمین‌مرجع برداشت شده، واریوگرام‌های تجربی همسانگرد برای متغیرهای رویه‌زمینی، تراکم و ارتفاع کل درختان محاسبه شد. نتایج واریوگرافی نشان داد که از سه متغیر مورد بررسی فقط تراکم درختان از ساختار مکانی مناسبی برخوردار نمی‌باشد. همچنین براساس واریوگرافی انجام شده، فاصله مناسب برای نمونه‌برداری از متغیرهای رویه‌زمینی و ارتفاع کل درختان به‌ترتیب ١٦٥ متر و ۳۵۰ متر بدست آمد. برآوردها با استفاده از مدل کروی برازش شده بر واریوگرام‌ها و به‌روش کریجینگ معمولی با بلوکهای ۱۵×۱۵ متر انجام شد. نتایج ارزیابی صحت نشان داد که به‌غیر از متغیر تراکم درختان، سایر برآوردها نااریب می‌باشد و در نتیجه می‌توان نقشه توزیع مکانی متغیرهای رویه‌زمینی و ارتفاع کل درختان را با دقتی مناسب تولید کرد. همچنین نتیجه آماربرداری صددرصد در محدوده ۱٤/۲۵ هکتاری نیز نشان داد که در این منطقه، رویه‌زمینی برآورد شده به‌روش کریجینگ با مقدار واقعی آن تفاوت معنی‌داری ندارد، ولی دقت برآورد کریجینگ دو برابر دقت برآورد به‌روش کلاسیک است. بنابراین براساس نتایج تحقیق حاضر می‌توان استفاده از روش زمین‌آمار را در مدیریت جنگل‌کاریها پیشنهاد داد.

واژه‌های کلیدی: زمین‌آمار، ساختار مکانی، کریجینگ، نقشه‌سازی، جنگل‌کاری.

مقدمه

برآورد و نقشه‌سازی از متغیرهای کمّی جنگل امری اجتناب‌ناپذیر در مدیریت و برنامه‌ریزی جنگل است (Husch *et al.*, 1982)، اما برخی از متغیرهای کمّی جنگل که دارای همبستگی مکانی (spatial correlation) می‌باشند، با بکارگیری آمار کلاسیک قابل تجزیه و تحلیل مکانی نیستند. زمانی که همبستگی مکانی در یک متغیر وجود داشته باشد، نمونه‌های نزدیک شباهت بیشتری نسبت به‌هم دارند تا نمونه‌های دورتر. در این حالت اصطلاحاً گفته می‌شود که این نمونه‌ها دارای خودهمبستگی (autocorrelation) هستند. به چنین متغیرهایی، متغیر ناحیه‌ای (regionalized variable) گفته می‌شود که پایه و اساس زمین‌آمار را تشکیل می‌دهد. نظریه متغیر ناحیه‌ای اولین بار در سال ۱۹٦۵ توسط Matheron ریاضیدان مدرسه معدن فرانسه ارائه شد. اما

قبل از او در سال ۱۹۵۱ یک مهندس معدن در آفریقای جنوبی به‌نام Krige یک روش درون‌یابی را برای برآورد میزان ذخایر طلا ارائه کرده بود که بعدها به افتخار او به‌روش درون‌یابی کریجینگ معروف شد. زمین‌آمار (geostatistics) که شامل دو بخش واریوگرافی (variography) و کریجینگ (kriging) است، ابزار مناسبی برای تحلیل تغییرات مکانی و نیز برآورد متغیرهایی است که دارای وابستگی مکانی (spatial dependence) می‌باشند. امروزه روشهای زمین‌آماری، زمینه کاربرد خود را در علوم جنگل پیدا کرده‌اند، به‌طوری‌که با بکارگیری آنها می‌توان به ابعاد بهینه شبکه نمونه‌برداری در جنگل دست یافت (Bellehumeur & Legendre, 1998) و نیز متغیرهای جنگل را برآورد و نقشه‌سازی کرد (Samra *et al.*,1989; Holmgren & Thuresson, 1997).

در زمینه استفاده از زمین‌آمار برای برآورد موجودی جنگل، اولین تحقیق انجام شده در کشور مربوط به اخوان (۱۳۸۳) می‌باشد که کاربرد زمین‌آمار را به‌منظور برآورد موجودی جنگلهای ناهمسال و طبیعی خزری ایران بررسی کردند. نتیجه تحقیق آنها نشان داد که در جنگلهای تحت مدیریت به‌دلیل دخالتهای انجام شده، پیوستگی روند تغییرات در متغیرهای موجودی جنگل از بین رفته و در نتیجه ساختار مکانی مناسبی وجود ندارد. از این رو استفاده از کریجینگ به‌منظور برآورد و نقشه‌سازی در این نوع جنگلها کاربردی نخواهد داشت. محمدی و همکاران (۱۳۸۷) به مقایسه استفاده از سنجش از دور و زمین‌آمار در برآورد تراکم جنگلهای بلوط لوه گرگان پرداختند و نتیجه گرفتند که در مقیاس محلی تفاوت زیادی بین این دو روش وجود ندارد، اما در سطوح وسیع استفاده از سنجش از دور نسبت به زمین‌آمار برتری دارد. قنبری (۱۳۸۷) به بررسی خصوصیات آلومتریک جنگل شصت‌کلاته گرگان از قبیل حجم، رویه‌زمینی و تراکم درختان با استفاده از زمین‌آمار و GIS پرداخت و نتیجه گرفت که این خصوصیات از ساختار مکانی متوسطی برخوردارند.

اما در سایر کشورها تحقیقات زیادی در این زمینه صورت گرفته است. اولین بار Guibal (1973) در جنگلهای ناهمسال حاره‌ای کشور گابن از روش کریجینگ به‌منظور برآورد موجودی حجمی استفاده کرد و به این نتیجه رسید که دقت زمین‌آمار نسبت به آمار کلاسیک بیشتر است. پس از او Marbeau (1976)، Duplat & Peyrotte (1981) و Houiller (1986) تحقیقات مشابهی انجام دادند. Jost (1993) در آلمان اشتباه آماربرداری به دو روش منظم تصادفی (سیستماتیک) و زمین‌آمار را در جنگلهای سوزنی‌برگ و پهن‌برگ همگن و همسال مقایسه کرد. نتیجه تحقیق او نشان داد که دقت برآورد به‌روش زمین‌آمار بیشتر از روش کلاسیک است. Gunnarsson *et al.* (1998) در سوئد کارایی کریجینگ را در سطح توده‌های دست‌کاشت جنگلی که براساس سن طبقه‌بندی شده بودند بررسی کردند. نتیجه برآورد موجودی حجمی با کریجینگ در توده‌های همسال سوزنی‌برگ مناسب بود، اما در توده‌های همسال پهن‌برگ، همبستگی مکانی مناسبی برای موجودی حجمی جنگل و استفاده از روش زمین‌آمار بدست نیامد. Mandallaz (1993 & 2000) در سوئیس روش زمین‌آمار را در نمونه‌برداری مضاعف (با استفاده از عکسهای هوایی) در جنگلهای آمیخته (سوزنی و پهن‌برگ) و ناهمسال بکار برد و کریجینگ مضاعف (Double kriging) را روشی مناسب در برآورد موجودی جنگل معرفی کرد. Biondi *et al.* (1994) در تحقیقی در جنگلهای پیش رُسته (old growth) آمریکا دریافتند که مشخصه رویه‌زمینی درختان می‌تواند به‌عنوان یک متغیر ناحیه‌ای مورد تجزیه و تحلیل قرار گیرد. اما ساختار مکانی آن تنها تا ۳۰ متر ادامه دارد. Nanos & Montero (2001) در جنگلهای کاج اسپانیا برای برازش توزیع فراوانی قطر درختان از توزیع وایبول و کریجینگ استفاده

کردند. Tuominen *et al.* (2003) در مطالعه‌ای کاربرد زمین‌آمار را به‌منظور بهبود دقت برآورد موجودی جنگلهای مدیریت شده بورآل فنلاند بررسی و به این نتیجه رسیدند که به‌دلیل قطع و برداشتهای انجام شده و عدم پیوستگی مکانی متغیرها، استفاده از کریجینگ منجر به افزایش دقت برآورد در سطح این توده‌های جنگلی نخواهد شد. Nanos *et al.* (2004) برای مدل‌سازی توزیع ضریب قدکشیدگی درختان کاج در مرکز اسپانیا از زمین‌آمار استفاده کردند. Montes *et al.* (2005) در اسپانیا از کریجینگ به‌منظور برآورد میزان تولید چوب‌پنبه درختان بلوط (*Quercus suber*) استفاده کردند و به این نتیجه رسیدند که دقت برآورد با استفاده از روش زمین‌آمار بیشتر از روش کلاسیک می‌باشد. Freeman & Moisen (2007) در آمریکا برای تهیه نقشه زیست‌توده (biomass) جنگل از روش زمین‌آمار استفاده کردند و به این نتیجه رسیدند که به‌دلیل وجود اثر قطعه‌ای زیاد و الگوی تناوبی واریوگرام، استفاده از کریجینگ به بهبود دقت این نقشه‌ها کمک نمی‌کند.

با توجه به سوابق تحقیق ارائه شده، اهداف تحقیق حاضر عبارتند از:

- بررسی تغییرات مکانی و استفاده از روش واریوگرافی در زمین‌آمار به‌منظور تعیین ابعاد بهینه شبکه آماربرداری در این جنگل‌کاری
- نقشه‌سازی از متغیرهای رویه‌زمینی (سطح مقطع برابر سینه)، تراکم جنگل (تعداد در هکتار درختان) و ارتفاع کل درختان به‌کمک روش کریجینگ زمین‌آمار
- افزایش دقت برآورد متغیرهای یادشده با استفاده از روش کریجینگ نسبت به‌روش آمار کلاسیک.

مواد و روشها

منطقه مورد مطالعه

این بررسی در یک جنگل‌کاری به‌وسعت ٦٣ هکتار در منطقه بنشکی رامسر واقع در حوضه ۳۱ جنگلهای شمال کشور انجام شده است. این جنگل‌کاری در سال ١٣٦٨ در محل قطع یکسره یک جنگل نیمه‌مخروبه با فاصله کاشت ۳×۳ متر و با گونه پلت (*Acer velutinum* Boiss.) اجرا شده است. جنگل‌کاری بر روی دامنه‌ای با شیب بین ۱۰ تا ٦٥ درصد و با جهت عمومی جنوب‌شرقی واقع شده است. سه روستای کوچک در اطراف این جنگل‌کاری و یک جاده دسترسی در میان آن قرار دارد (شکل ۱). ارتفاع منطقه بین ۲۰۰ تا ٤٥٠ متر بالاتر از سطح دریاست و مختصات تقریبی مرکز آن ′٤٨ °٥٠ طول شرقی و ′٣٨ °٣٦ عرض شمالی است. میانگین بارندگی و درجه حرارت سالیانه در این منطقه به‌ترتیب برابر با ۹۲۳ میلی‌متر و ۱۵/۷ درجه سانتی‌گراد است (بی‌نام، ١٣٦٥). از زمان کاشت تاکنون هیچ‌گونه عملیات پرورشی در این جنگل‌کاری صورت نگرفته است و در نتیجه درختان پلت به‌سبب رقابت نوری به‌صورت ترکه‌ای بالا رفته‌اند (متوسط ضریب قدکشیدگی محاسبه شده در همین منطقه ۹۹ است). در زمان انجام این تحقیق، جنگل‌کاری موصوف ۱۸ ساله بوده است.

روش تحقیق

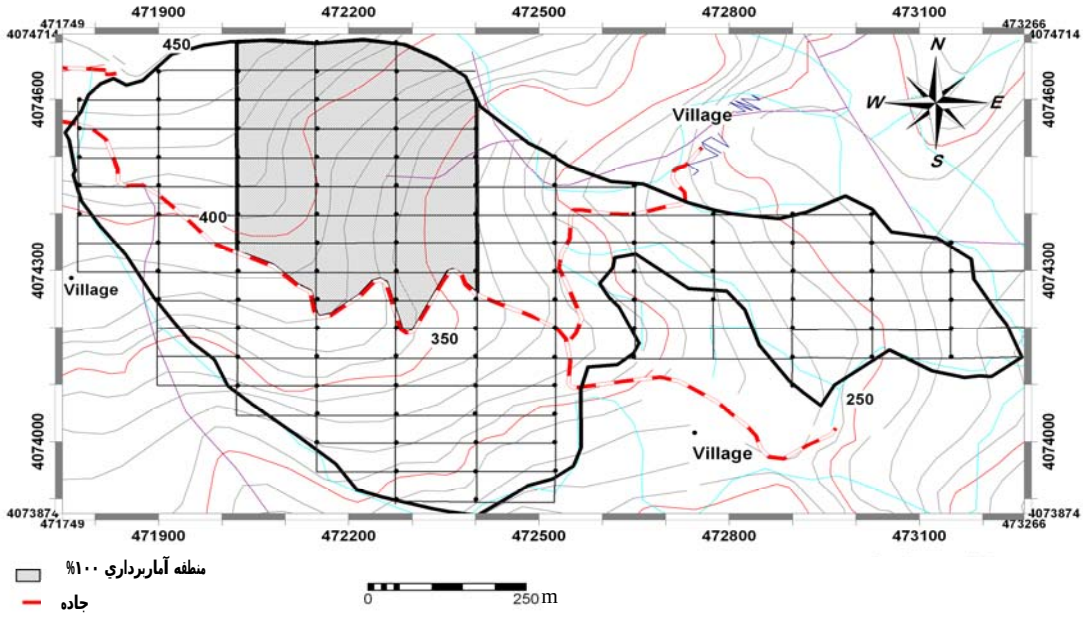
- نمونه‌برداري

برای نمونه‌برداری در این جنگل‌کاری از روش منظم با نقطه شروع تصادفی (سیستماتیک- تصادفی) استفاده شد. با توجه به‌وسعت منطقه (٦٣ هکتار) و تعداد نمونه لازم برای تجزیه و تحلیل زمین‌آماری در حالت بهینه (۱۰۰ نمونه) و نیز از آن‌جایی‌که اصولاً زمین‌آمار بر مبنای همبستگی مکانی بین نمونه‌ها به‌ویژه در فواصل کوتاه استوار است، ابعاد شبکه آماربرداری برابر با ۱۲۵×۵۰ متر

(۵۰ متر در جهت شیب) محاسبه و طراحی شد. با توجه به فاصله کاشت ۳×۳ متر، برای قرارگیری حداقل ۱۰ درخت در هر قطعه نمونه (زبیری، ۱۳۷۳)، مساحت ۱ آر کافی بود. اما چون پس از گذشت ۱۸ سال ممکن بود تعدادی از پایه‌ها خشک و حذف شده باشند، سطح قطعه نمونه برای اطمینان بیشتر، ۲ آر و به شکل دایره در نظر گرفته شد. در داخل هر قطعه نمونه کلیه درختان قطورتر از ۷/۵ سانتی‌متر در ارتفاع برابر سینه و ارتفاع کل نزدیک‌ترین درخت به مرکز قطعه نمونه اندازه‌گیری شد.

همچنین موقعیت مکانی مرکز هر قطعه نمونه نیز به‌وسیله دستگاه GPS در سیستم مختصات UTM ثبت گردید تا در تجزیه و تحلیلهای زمین‌آماری مورد استفاده قرار گیرد.

بخشی از منطقه تحقیق به مساحت ۱٤/۲۵ هکتار که ۳۲ قطعه نمونه از شبکه آماربرداری موصوف را در خود جای می‌داد، برای آماربرداری صددرصد از قطر درختان انتخاب شد تا امکان مقایسه نتایج نمونه‌برداری و برآورد کریجینگ با آماربرداری صددرصد فراهم شود (شکل ۱).



شکل ۱- منطقه مورد مطالعه به‌همراه شبکه نمونه‌برداری

- تجزیه و تحلیل زمین‌آماري

در زمین‌آمار فرض بر این است که نمونه‌های انتخاب شده از جامعه مستقل نبوده بلکه تا فاصله معینی به‌صورت مکانی نسبت به‌هم وابستگی دارند. این ارتباط مکانی ممکن است در قالب یک مدل ریاضی قابل بیان باشد که به این مدلهای ریاضی ساختار مکانی (spatial structure) گفته می‌شود (حسنی پاک، ۱۳۷۷). زمین‌آمار برای مطالعه متغیرهایی بوجود آمد که دارای توزیع پیوسته مکانی هستند و اصطلاحاً متغیر ناحیه‌ای (regionalized variable) نامیده می‌شوند. اصل اولیه در زمین‌آمار این است که شباهت مقادیر یک متغیر ناحیه‌ای با افزایش فاصله کاهش می‌یابد و یا به‌عبارت ساده‌تر نمونه‌های نزدیک شباهت بیشتری نسبت به‌هم دارند تا نمونه‌های دورتر (Isaak & Srivastava, 1989; Goovaerts, 1997).

به‌طورکلی زمین‌آمار شامل دو بخش اصلی واریوگرافی و کریجینگ است (Cressie, 1993).

- واریوگرافی

سمی‌واریوگرام (semi-variogram) یا به اختصار واریوگرام که نمودار واریانس بر مبنای فاصله بین نمونه‌هاست، رکن اصلی و قلب زمین‌آمار است که ساختار ارتباط مکانی بین نمونه‌ها را نشان می‌دهد. تابع سمی‌واریوگرام یا نیم‌تغییرنما به‌صورت رابطه (۱) تعریف می‌شود (Webster & Oliver, 2000):

$$\hat{\gamma}(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [z(x_i) - z(x_i + h)]^2 \qquad (۱)$$

به‌طوری‌که $\hat{\gamma}(h)$ مقدار واریوگرام برای تعداد N جفت نمونه است که با فاصله h (گام یا Lag) از یکدیگر جدا شده‌اند، $z(x_i)$ و $z(x_i + h)$ نیز مقادیر متغیر ناحیه‌ای x در نقاط i و $i + h$ می‌باشند.

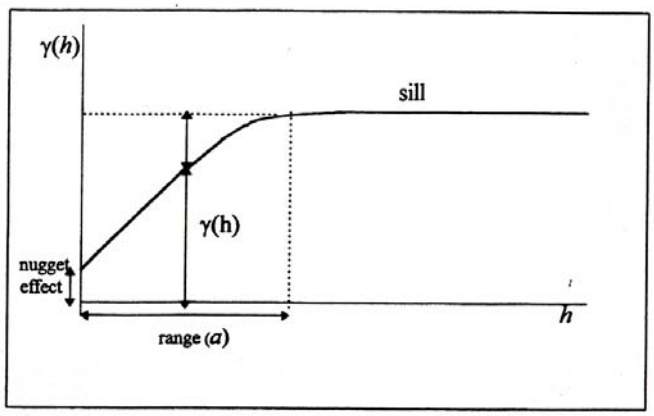
مقدار واریوگرام وابسته به فاصله بین مقادیر یک متغیر ناحیه‌ای در دو نقطه است. اگر این مقدار وابسته به جهت نیز باشد، واریوگرام ناهمسانگرد (anisotropic) و در غیر این صورت همسانگرد (isotropic) نامیده می‌شود. در واریوگرافی از سه مؤلفه برای تشریح و مدل‌سازی رفتار واریوگرام استفاده می‌شود: دامنه تأثیر (range)، حد آستانه یا سقف (sill) و اثر قطعه‌ای (nugget effect). دامنه تأثیر حداکثر فاصله‌ایست که پس از آن ساختار مکانی دیگر وجود نداشته و واریوگرام به یک مقدار ثابت می‌رسد. پس از عبور از دامنه تأثیر هیچ‌گونه ارتباط مکانی بین نمونه‌ها وجود نداشته و نمونه‌ها مستقل از یکدیگر خواهند بود. بدیهی است که دامنه تأثیر کوتاه بیانگر تغییرپذیری زیاد و دامنه تأثیر بلند نشان‌دهنده همگن بودن جامعه مورد مطالعه است. بنابراین می‌توان در حالت اخیر فاصله نمونه‌برداریها را افزایش داد.

اصولاً واریوگرام باید از نقطه صفر محور y بگذرد، به‌دلیل این که نمونه‌هایی که در یک نقطه اندازه‌گیری شده‌اند (h=۰) باید دارای ارزش یکسانی باشند. اما اغلب در عمل، واریوگرام دارای عرض از مبدأیی است که اثر قطعه‌ای نامیده می‌شود که بیانگر واریانس تصادفی و بدون ساختار است. اثر قطعه‌ای به‌علت وجود تغییرات در فواصل کمتر از حداقل فاصله نمونه‌برداری و یا به‌دلیل خطای نمونه‌برداری و اندازه‌گیری بروز می‌کند.

وقتی واریوگرام به مقدار ثابت خود می‌رسد، ارتفاع واریوگرام برابر حد آستانه یا سقف واریوگرام است که برابر مجموع واریانس تصادفی و ساختاردار می‌باشد. زمین‌آمار توانایی جدایش واریانس تصادفی را از واریانس ساختاردار دارد. در نتیجه با مشخص شدن بخش غیرتصادفی واریانس می‌توان با تعداد نمونه کمتری به دقت مورد نظر دست یافت (حسنی پاک، ۱۳۷۷).

نسبت واریانس ساختاردار به حد آستانه، ساختار مکانی واریوگرام است. اگر ساختار مکانی ۷۵ درصد و بیشتر باشد، نشان‌دهنده ساختار قوی، بین ۲۵ تا ۷۵ درصد نشان‌دهنده ساختار متوسط و کمتر از ۲۵ درصد نشان‌دهنده ساختار ضعیف برای متغیر مورد بررسی است (Ganawa & Mohammad Sharif, 2003).

شکل ۲ یک واریوگرام نظری را به‌همراه مؤلفه‌های آن نشان می‌دهد.



شکل ۲- یک واریوگرام نظری به‌همراه مؤلفه‌های آن (برگرفته از Zahedi Amiri, 1998)

قبل از درون‌یابی به‌روش کریجینگ باید یک مدل نظری را بر واریوگرام تجربی برازش کرد، زیرا زمین‌آمار روشی وابسته به مدل (model dependent) است. مدلهای متفاوتی وجود دارند، ازجمله مدل خطی (linear)، کروی (spherical)، نمایی (exponential) و گوسی (gaussian) که می‌توان از آنها استفاده کرد. اما متداولترین مدل که بیشترین کاربرد را در مطالعات زیست‌محیطی دارد، مدل کروی است. البته باید به‌هنگام مدل‌سازی واریوگرام، مدلی را انتخاب کرد که کمترین میزان مجموع باقیمانده‌ها (residuals) را داشته باشد. نرم‌افزارهای امروزی این امکان را در اختیار کاربر قرار می‌دهند. مدل کروی به‌صورت رابطه (۲) تعریف می‌شود (Webster & Oliver, 2000):

$$\gamma(h) = c_0 + c\left\{\frac{3h}{2a} - \frac{1}{2}\left(\frac{h}{a}\right)^3\right\} \quad 0 < h \le a$$

$$\gamma(h) = c_0 + c \qquad h > a \qquad (۲)$$

به‌طوری‌که c_0، c و a به‌ترتیب نشان‌دهنده اثر قطعه‌ای، واریانس ساختاردار و دامنه تأثیر می‌باشند.

در بررسی حاضر، مدل با استفاده از روش هیبرید؛ بر مبنای تفسیر چشمی و خودکار (حداقل مجموع مربعات باقیمانده‌ها) به واریوگرامهای تجربی برازش شد. بر این اساس و با توجه به مشخصه نیکویی برازش (goodness of fit) برای برازش تمامی واریوگرامهای محاسبه شده، مدل کروی انتخاب که در همه آنها مقدار اثر قطعه‌ای در نظر گرفته شد.

- کریجینگ

کریجینگ روش درون‌یابی و برآورد در زمین‌آمار است که قادر است براساس مدل برازش شده بر واریوگرام تجربی و نمونه‌های اندازه‌گیری شده در جامعه، نقاط نمونه‌برداری نشده را بدون اریبی و با حداقل واریانس برآورد کند. انواع متفاوتی از کریجینگ وجود دارد، ازجمله کریجینگ ساده (simple)، معمولی (ordinary) و عام (universal). اما عمومی‌ترین روش آن در عمل که در علوم زیست‌محیطی نیز کاربرد فراوانی دارد، کریجینگ معمولی است. تابع کریجینگ به‌صورت رابطه (۳) تعریف می‌شود (Webster & Oliver, 2000):

$$\hat{z}(x) = \sum_{i=1}^{n} \lambda_i z(x_i) \qquad (۳)$$

به‌طوری‌که λ_i وزن مرتبط با ارزش متغیر ناحیه‌ای x در نقطه i است؛ در شرایطی که:

$$\sum_{i=1}^{n} \lambda_i = 1$$

کریجینگ را هم می‌توان به‌صورت نقطه‌ای و هم به‌صورت بلوکی انجام داد. در حالت بلوکی مقادیر برآورد شده به‌وسیله نمونه‌ها به سطح نسبت داده می‌شوند. ویژگی دیگر کریجینگ علاوه بر دقت برآورد این است که به‌همراه هر برآوردی (نقشه کریجینگ) میزان خطای آن (نقشه انحراف معیار کریجینگ) را نیز محاسبه می‌کند. بنابراین با استفاده از این ویژگی می‌توان کیفیت برآوردها را کمّی‌کرد.

در این بررسی از کریجینگ معمولی به شکل بلوکی استفاده شده است. ابعاد بلوک بکار رفته ۱۵×۱۵ متر می‌باشد که با مساحت قطعه نمونه (۲۰۰ مترمربع) هماهنگی دارد.

- ارزیابی صحت

در این بررسی برای ارزیابی صحت کریجینگ از روش ارزیابی متقابل (cross-validation) استفاده شده است. در این روش همه داده‌های اولیه، یک به یک و به‌ترتیب از محاسبات خارج شده و مجدداً با استفاده از مدل واریوگرام و سایر داده‌ها برآورد می‌شوند. سپس از مجموع تفاضل مقادیر اولیه با مقادیر برآورد شده برای ارزیابی صحت کریجینگ استفاده می‌شود. در نهایت با محاسبه دو آماره میانگین خطا (Mean Error; ME) و خطای برآورد (Root Mean Square Error; RMSE) درباره کیفیت برآورد کریجینگ قضاوت می‌شود. درحالتی‌که برآوردها صحیح و بدون اشتباه باشند، مقدار این دو آماره باید برابر صفر شود که به‌صورت رابطه‌های (٤) و (٥) محاسبه می‌شوند (Webster & Oliver, 2000):

$$ME = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\left[z(x_i) - \hat{z}(x_i)\right] \qquad (۴)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\left[z(x_i) - \hat{z}(x_i)\right]^2} \qquad (۵)$$

$\hat{z}(x_i)$: برآورد مقدار متغیر ناحیه‌ای x در نقطه i

برای تجزیه و تحلیل زمین‌آماری در این مطالعه از نرم‌افزار GS^+ نسخه ۹ (Gamma Design Software, LLC, Plain well, MI) استفاده شده است.

نتایج

- نمونه‌برداري

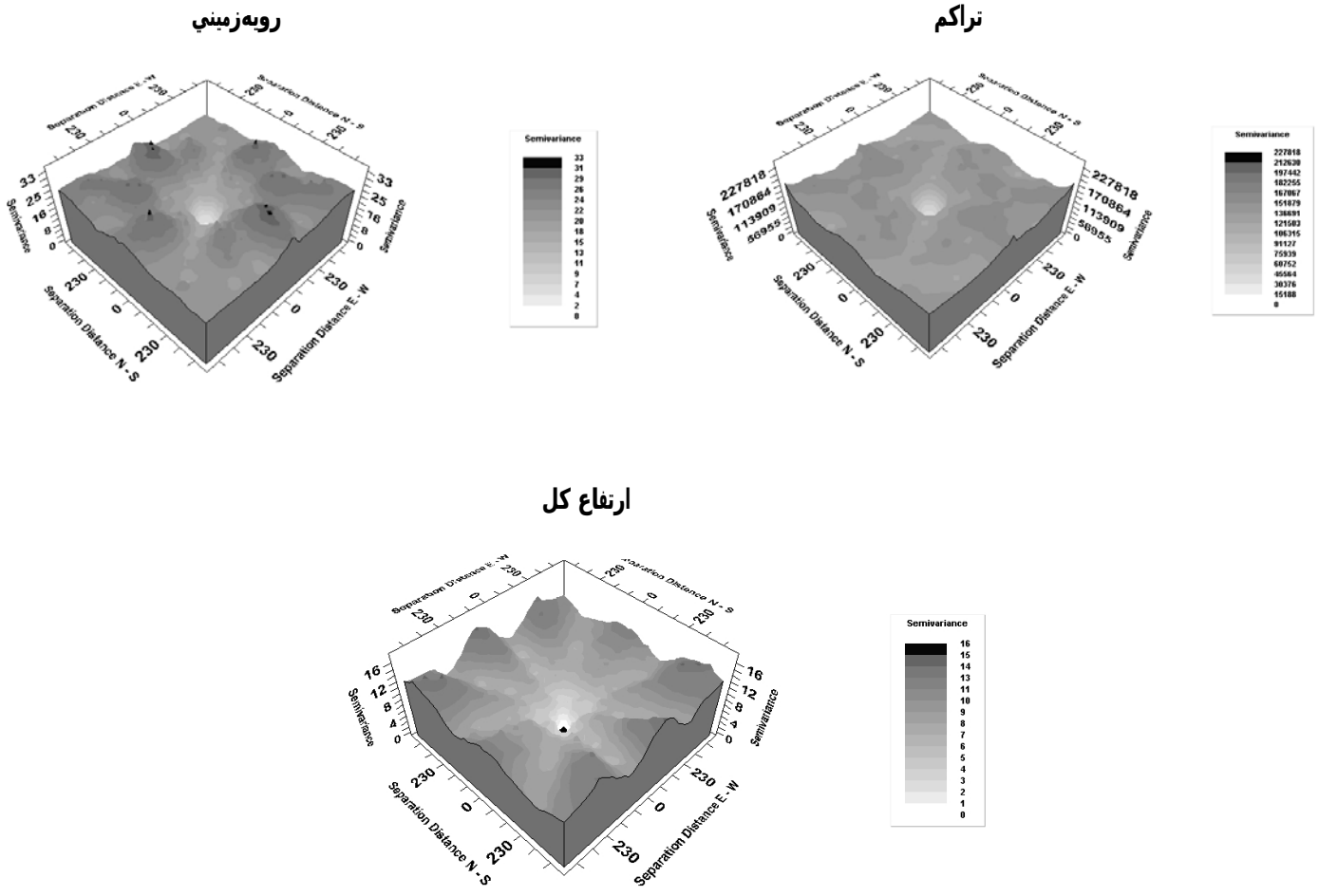
پس از انجام نمونه‌برداری در عرصه مورد مطالعه، در مجموع ۹٦ قطعه نمونه مورد اندازه‌گیری قرار گرفت. بررسی داده‌ها نشان داد که تقریباً از توزیع نرمال تبعیت می‌کنند و نیازی به تبدیل آنها نمی‌باشد. جدول ۱ مشخصه‌های آماری متغیرهای مورد بررسی را نشان می‌دهد.

جدول ۱- مشخصه‌های آماری متغیرهای مورد بررسی

متغیر	میانگین	حداقل	حداکثر	انحراف معیار	ضریب تغییرات	چولگي	دقت برآورد (E%)
رویه‌زميني (مترمربع در هکتار)	۱۲/۱۳	۰/۶۶	۳۰/۸۶	۵/۷۳	%۴۷/۲۴	۰/۰۹	%۹/۶۴
تراکم (تعداد در هکتار)	۷۷۹	۵۰	۱۵۵۰	۳۷۲/۱۶	%۴۷/۷۶	۰/۰۴	%۹/۷۴
ارتفاع کل (متر)	۱۳/۷۶	۸/۰	۲۳/۷	۲/۸۹	%۲۱/۰۰	۰/۴۸	%۴/۲۸

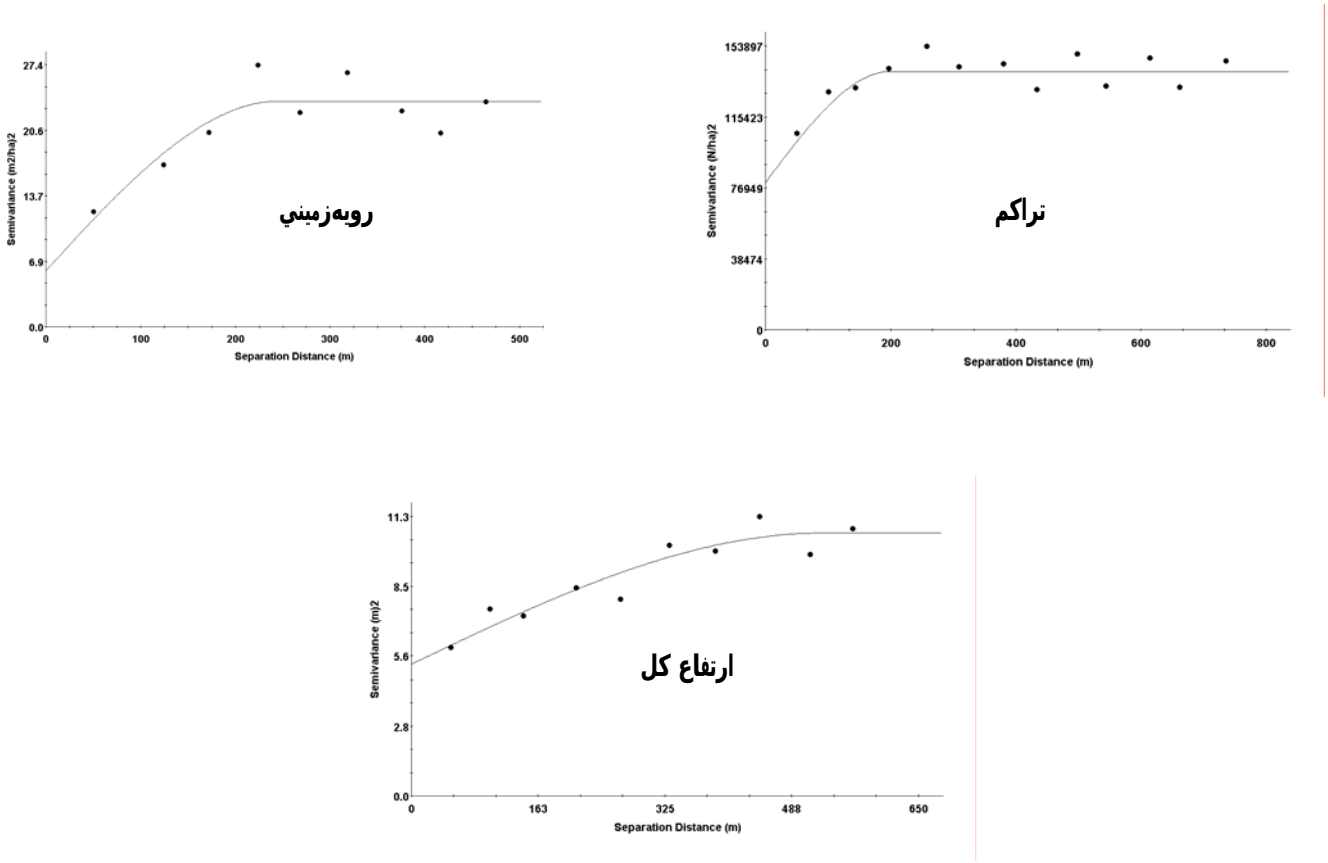
- واریوگرافي

در محاسبه واریوگرام‌های متغیرهای مورد بررسی هیچ‌گونه علائمی از ناهمسانگردی (هندسی یا منطقه‌ای) مشاهده نشد. شکل ۳ واریوگرام سطحی (variogram surface) متغیرهای مورد بررسی را نشان می‌دهد که براساس آن مقدار واریوگرام‌ها در جهت‌های N-S و E-W تقریباً یکسان و مستقل از جهت می‌باشند.



شکل ۳- واریوگرام سطحی متغیرهای مورد بررسی

بنابراین کلیه واریوگرام‌ها به‌صورت چندجهته (omni-directional) محاسبه شده و با استفاده از مدل کروی برازش شدند (شکل ٤).



شکل ٤- واریوگرام‌های تجربی و مدلهای برازش شده به آنها برای متغیرهای مورد بررسی (حداقل تعداد جفت نمونه‌ها در هر گام ٦٦ است)

جدول ۲ مشخصه‌های واریوگرام‌های برازش شده را نشان می‌دهد.

جدول ۲- مشخصه‌های واریوگرام‌ها و مدلهای کروی برازش شده به آنها

متغیر	طول گام (متر)	اثر قطعه‌اي	حد آستانه	دامنه تأثیر (متر)	ساختار مكاني
رویه‌زمیني (مترمربع در هکتار)	۵۰	۵/۹	۲۳/۶	۲۴۶	۷۵% (قوي)
تراکم (تعداد در هکتار)	۵۸	۸۰۰۰۰۰	۱۴۰۲۰۰	۲۰۰	۴۳% (متوسط)
ارتفاع کل (متر)	۶۰	۵/۳	۱۰/۶	۵۲۷	۵۰% (متوسط)

۱۰۰* [حد آستانه/ (اثر قطعه‌اي- حد آستانه)] = درصد ساختار مكاني

- کریجینگ

به‌منظور تولید نقشه توزیع مکانی متغیرهای مورد بررسی از روش کریجینگ معمولی با بلوکهای ۱۵×۱۵ متر استفاده شد. نتایج کمّی برآورد به‌روش کریجینگ برای دو متغیر رویه‌زمینی و ارتفاع کل درختان در جدول ۳ ارائه شده است. به‌دلیل این که متغیر تراکم از ساختار مکانی مناسبی برخوردار نبود (ساختار کمتر از ۵۰ درصد) و همانند یک متغیر ناحیه‌ای رفتار نمی‌کرد، در برآورد

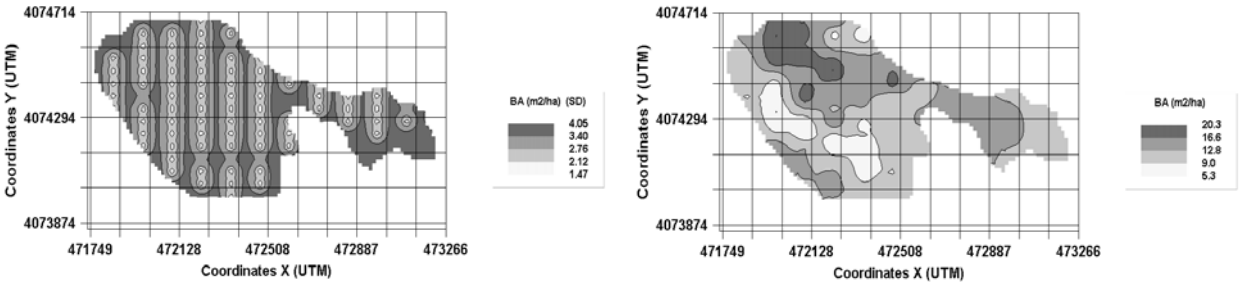
کریجینگ بکار گرفته نشد. به این موضوع در بخش ارزیابی صحت بیشتر پرداخته خواهد شد.

جدول ۳- نتایج کمّی درون‌یابی کریجینگ

متغیر	میانگین	حداقل	حداکثر	انحراف معیار	ضریب تغییرات	دقت برآورد (E%)
رویه‌زمینی (مترمربع در هکتار)	۱۲/۲۱	۵/۵۸	۲۰/۳۲	۲/۹۶	%۲۴/۲۵	%۴/۹۴
ارتفاع کل (متر)	۱۳/۸۷	۱۱/۱۳	۱۸/۴۳	۱/۳۳	%۹/۶۰	%۱/۹۵

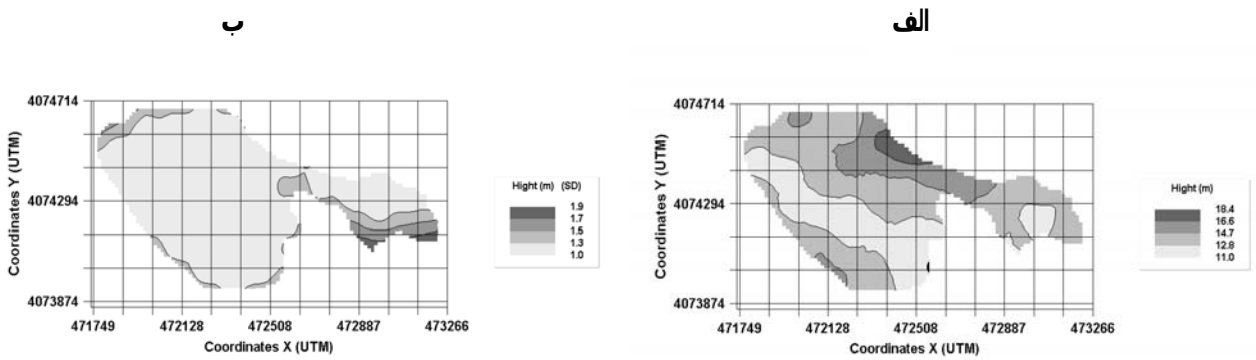
شکلهای ۵ و ٦ نقشه‌های برآورد کریجینگ به‌همراه نقشه خطا (انحراف معیار) مربوط به آنها را برای دو متغیر رویه‌زمینی و ارتفاع کل درختان نشان می‌دهند.

ب **الف**



شکل ۵- نقشه توزیع مکانی (کریجینگ) رویه‌زمینی (الف) به‌همراه نقشه انحراف معیار برآورد آن (ب)

ب **الف**



شکل ٦- نقشه توزیع مکانی (کریجینگ) ارتفاع کل درختان (الف) به‌همراه نقشه انحراف معیار برآورد آن (ب)

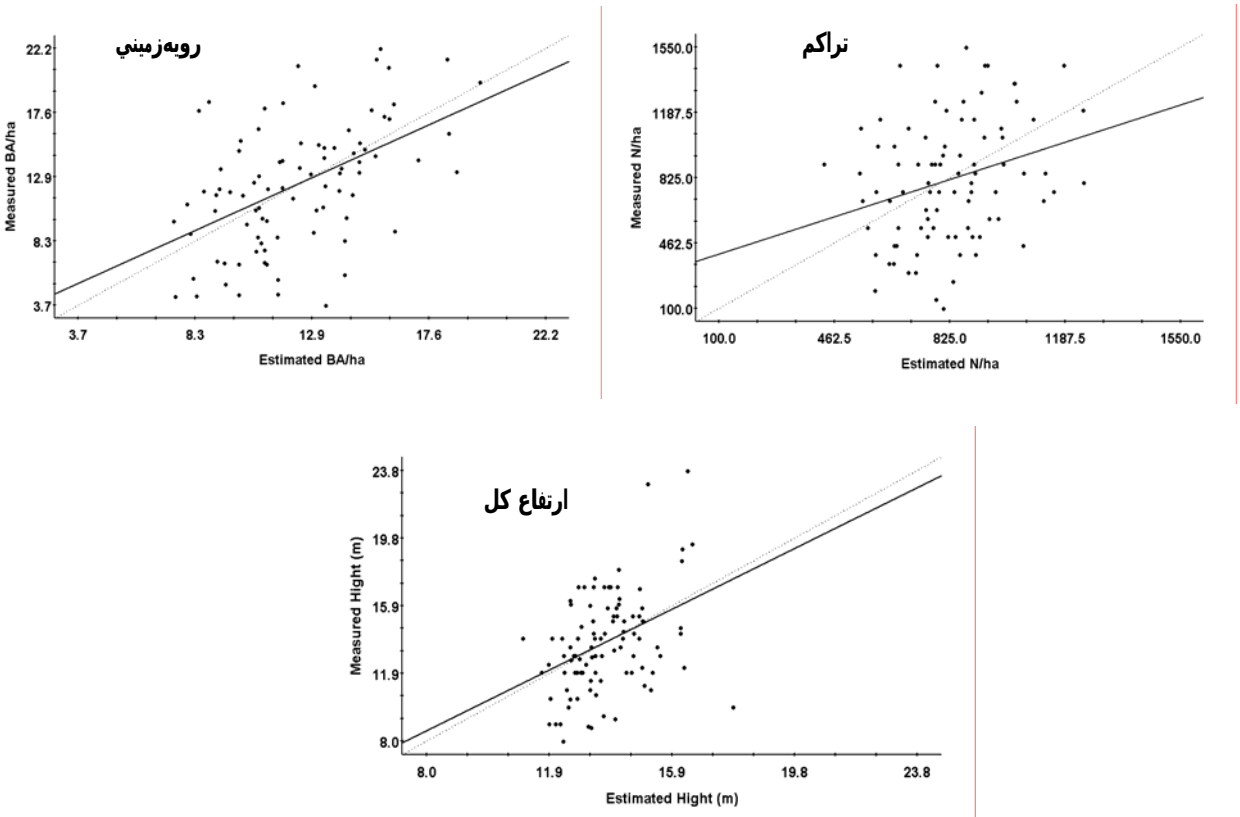
- ارزیابی صحت

با استفاده از روش ارزیابی متقابل (cross-validation)، صحت برآوردهای کریجینگ مورد بررسی قرار گرفت. نتایج ارزیابی صحت برای ۳ متغیر مورد بررسی در جدول ٤ و شکل ۷ ارائه شده است.

جدول ٤- نتایج ارزیابی صحت کریجینگ برای متغیرهای مورد بررسی

متغیر	ME	RMSE
رویه‌زمینی (مترمربع در هکتار)	۰/۰۵	۳/۹۲
تراکم (تعداد در هکتار)	-۱۴/۸۰	۳٦۲
ارتفاع کل (متر)	۰/۰۲	۲/٦۷

ME= میانگین خطا؛ RMSE= خطای برآورد

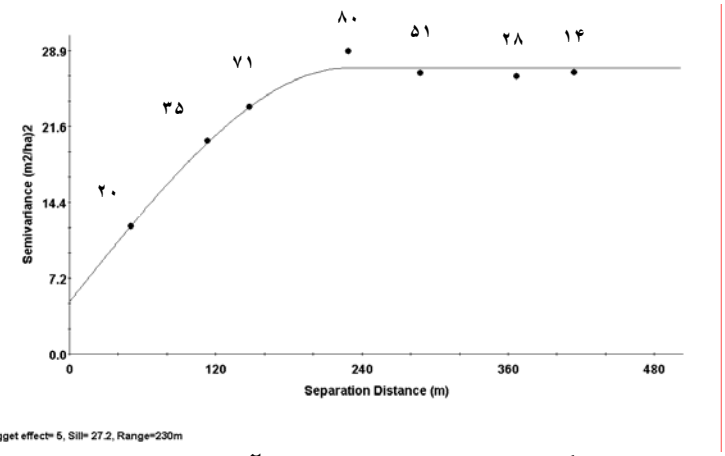


شکل ۷- نمودار وضعیت پراکنش داده‌های اندازه‌گیری شده (محور عمودی) در مقابل داده‌های برآورد شده (محور افقی) برای متغیرهای مورد بررسی

با توجه به جدول ٤ و شکل ۷ مشاهده می‌شود که نتایج ارزیابی صحت کریجینگ برای متغیر تراکم درختان از دقت قابل قبولی برخوردار نمی‌باشد. به‌همین دلیل نقشه کریجینگ مربوط به این متغیر نیز تولید و ارائه نشده است.

- منطقه آماربرداري صددرصد

در محدوده ١٤/٢٥ هکتاری این منطقه، تعداد ١٣٠٣٦ درخت با قطر بیش از ۷/۵ سانتی‌متر در ارتفاع برابر سینه، شمارش و اندازه‌گیری شدند. در نتیجه میانگین تراکم درختان در این منطقه حدود ۹۱۵ اصله در هکتار و میانگین رویه‌زمینی آن ۱۵/۸۲ مترمربع در هکتار محاسبه شد.



شکل ۸- واریوگرام تجربي همسانگرد و مدل کروي برازش شده به آن (به‌همراه تعداد جفت نمونه‌ها در هر گام) براي متغير رويه‌زميني در منطقه آماربرداري صددرصد

ساختار مکانی رویه‌زمینی نیز با استفاده از ۳۲ قطعه نمونه‌ای که در این منطقه واقع شده بود، بررسی شد (شکل ۸).

با توجه به این‌که فقط متغیر رویه‌زمینی در این منطقه ساختار مکانی قوی (۸۲ درصد) از خود نشان داد، برآورد به‌روش کریجینگ معمولی انجام شد تا بتوان نتایج آن را با واقعیت زمینی مقایسه کرد. جدول ۵ مقایسه سه روش صددرصد، نمونه‌برداری و کریجینگ را برای متغیر رویه‌زمینی در این منطقه نشان می‌دهد.

جدول ۵- مقایسه مشخصه‌های آماری سه روش در منطقه آماربرداری صددرصد برای متغیر رویه‌زمینی

روش	میانگین (مترمربع در هکتار)	انحراف معیار (مترمربع در هکتار)	ضریب تغییرات	دقت برآورد (E%)	حدود اعتماد (۹۵%)	
					حد پایین	حد بالا
صددرصد	۱۵/۸۲	۲/۰۱	%۱۲/۷۰	-	-	-
نمونه‌برداري	۱٤/٦۷	٦/۱۳	%٤۱/۷۸	%۱٤/۸۰	۱۲/۵۰	۱۶/۸۴
کریجینگ	۱٤/۸۰	۳/۱۰	%۲۰/۹٤	%۷/٤۱	۱۳/۷۱	۱۵/۹۰

با توجه به جدول ۵ ملاحظه می‌شود که حدود اعتماد هر دو روش نمونه‌برداری و کریجینگ، میانگین واقعی جامعه را در بر می‌گیرد، ولی دقت برآورد کریجینگ دو برابر روش نمونه‌برداری (آمار کلاسیک) است.

بحث

در این بررسی ۳ متغیر کمّی یک جنگل دست‌کاشت ۱۸ ساله از نظر ساختار مکانی و برآورد به‌روش کریجینگ زمین‌آمار مورد بررسی قرار گرفتند. متغیرهای رویه‌زمینی و ارتفاع کل درختان ساختار مکانی همسانگرد و مناسبی (درصد ساختار به‌ترتیب ۷۵ و ۵۰) از خود نشان داده و در نتیجه برای برآورد به‌روش کریجینگ و تولید نقشه توزیع مکانی بکار گرفته شدند. اما رفتار متغیر تراکم درختان (تعداد در هکتار) برخلاف دو متغیر دیگر به‌صورت یک متغیر ناحیه‌ای نبود و ساختار مکانی مناسبی از خود نشان نداد (درصد ساختار کمتر از ۵۰). به‌همین دلیل خطای

برآورد کریجینگ آن زیاد (RMSE= ۳٦۲) و در نتیجه نقشه‌های آن قابل ارائه نبوده است. در توجیه عدم وجود ساختار مکانی مناسب برای متغیر تراکم درختان، باید گفت که این درختان در فواصل منظم کاشته شده و با این که پس از ۱۸ سال، رقابت بین آنها برای کسب نور و مواد غذایی بوجود آمده، ولی شدت این رقابت به اندازه‌ای نبوده است که سبب حذف برخی از پایه‌ها شود تا نظم کاشت اولیه تغییر کند و از آن جایی که در طول مدت کاشت، خشکی و یا طوفان شدید که سبب حذف برخی از پایه‌ها شود نیز در منطقه اتفاق نیفتاده است، بنابراین با حفظ نظم کاشت اولیه، تغییرات تراکم جنگل تابعی از فاصله نمی‌باشد تا به‌صورت یک متغیر ناحیه‌ای رفتار کند. اما با افزایش سن توده و حذف برخی از پایه‌ها تا زمان برداشت که معمولاً برای گونه پلت ۸۰ سال است، انتظار می‌رود که متغیر تراکم جنگل نیز به یک متغیر ناحیه‌ای تبدیل شود.

با محاسبه واریوگرام‌های مربوط به رویه‌زمینی و ارتفاع کل درختان (جدول ۲ و شکل ٤) مشخص شد که متغیر رویه‌زمینی دارای دامنه تأثیر ۲٤٦ متر است، درحالی‌که این فاصله برای متغیر ارتفاع کل درختان ۵۲۷ متر می‌باشد. هرچه دامنه تأثیر واریوگرام یک متغیر بزرگتر باشد، آن متغیر دارای همگنی بیشتری است. بنابراین متغیر ارتفاع کل درختان همگن‌تر از متغیر رویه‌زمینی در این جنگل‌کاری است، یعنی رقابتی یکسان بین پایه‌ها برای کسب نور در جریان است و در نتیجه درختان از نظر ارتفاع کل شباهت زیادی نسبت به‌هم دارند. به‌عبارت دیگر، متغیر ارتفاع کل درختان تا ۵۲۷ متر دارای وابستگی مکانی است و از این فاصله به بعد نمونه‌های ارتفاعی مستقل از هم خواهند بود. بر این اساس می‌توان ابعاد شبکه آماربرداری را مطابق با واریانس جامعه طراحی کرد؛ به‌طوری‌که فاصله نمونه‌برداری برابر با طول دامنه تأثیر باشد (۲٤٦ متر برای نمونه‌برداری و برآورد رویه‌زمینی و ۵۲۷ متر برای ارتفاع کل). اما در عمل توصیه می‌شود که برای کسب اطمینان بیشتر از نتایج نمونه‌برداری، دو سوم طول دامنه تأثیر را به‌عنوان فاصله مناسب نمونه‌برداری در نظر گرفت (حسنی پاک، ۱۳۷۷). بنابراین در این جنگل‌کاری با توجه به همسانگردی مشاهده شده، ابعاد مناسب شبکه نمونه‌برداری برای متغیرهای رویه‌زمینی و ارتفاع کل درختان به‌ترتیب حدود ۱٦۵ متر و ۳۵۰ متر (به‌صورت مربع) پیشنهاد می‌شود.

نظر به وجود ساختار مکانی مناسب برای دو متغیر رویه‌زمینی و ارتفاع کل درختان، نقشه توزیع مکانی آنها با استفاده از روش درون‌یابی کریجینگ تولید شد (شکلهای ۵ و ٦؛ الف) و نتایج ارزیابی صحت نشان داد که این نقشه‌ها دارای دقت قابل قبولی می‌باشند (جدول ٤). یکی از مزایای کریجینگ این است که به‌همراه هر برآوردی، نقشه خطای آن برآورد را نیز به‌صورت کمّی و دقیق ارائه می‌کند (شکلهای ۵ و ٦؛ ب). به‌طوری‌که با استفاده از این دو نقشه (کریجینگ و خطای آن) در هر نقطه از جنگل هم میزان برآورد مشخص است و هم میزان خطای آن. با استفاده از نقشه خطای برآورد کریجینگ می‌توان مناطقی را که در آنها میزان خطا زیاد است، با اندازه‌گیری نمونه‌های اضافی پوشش داد تا میزان خطای برآورد در آن مناطق کاهش یابد. مدیران جنگل می‌توانند از نقشه‌های زمین‌مرجع کریجینگ که نحوه توزیع مکانی موجودی جنگل را در سطح عرصه تحت مدیریت نشان می‌دهند به‌عنوان یک نقشه راهنما در طرحهای جنگل‌داری استفاده کنند تا براساس آن برنامه‌ریزی قطع، جنگل‌کاری، واکاری، جاده‌سازی و عملیات پرورشی را با توجه به وضعیت موجودی جنگل، مکان‌یابی نمایند.

با مقایسه جدولهای ۱ و ۳ مشخص شد که بین میانگینهای برآورد شده برای دو متغیر رویه‌زمینی و ارتفاع کل درختان به دو روش آمار کلاسیک (نمونه‌برداری) و زمین‌آمار (کریجینگ)، تفاوت معنی‌داری در سطح ۵ درصد وجود ندارد. اما واریانس برآورد در روش زمین‌آمار حدود ۷۰ درصد کاهش یافته است که علت آن نیز

خاصیت نرم‌کنندگی تغییرات (smoothing effect) کریجینگ است که فاصله بین حداقل و حداکثر داده‌های برآوردی را نسبت به داده‌های اندازه‌گیری شده، کاهش می‌دهد. در نتیجه دقت برآورد به‌روش کریجینگ حدود دو برابر دقت روش کلاسیک شده است.

برآورد رویه‌زمینی در منطقه آماربرداری صددرصد (۱٤/۲۵ هکتار) نشان داد که در هر دو روش نمونه‌برداری و کریجینگ، مقدار رویه‌زمینی کمتر از مقدار واقعی آن برآورد (under estimate) شده است. اما از نظر آماری این تفاوت در سطح ۵ درصد معنی‌دار نبود. ولی همچنان برآورد به‌روش زمین‌آمار (کریجینگ) دقیق‌تر از برآورد به‌روش آمار کلاسیک (نمونه‌برداری) است (جدول ۵). بنابراین می‌توان استفاده از کریجینگ را به‌منظور برآورد دقیق‌تر متغیرها در طرحهای جنگل‌کاری پیشنهاد داد.

در هر حال، این مطالعه نشان داد که زمین‌آمار (ژئواستاتیستیک) توانایی تبیین تغییرات مکانی متغیرهای رویه‌زمینی و ارتفاع درختان را در چنین جنگل‌کاریهایی دارد. درحالی‌که این نتیجه در تقابل با نتایج بررسی Gunnarson *et al.* (1998) در سوئد است که نشان دادند موجودی حجمی درختان پهن‌برگ دارای ساختار مکانی ضعیفی است. همچنین Tuominen *et al.* (2003) در مطالعه‌ای نشان دادند که استفاده از کریجینگ، صحت برآورد موجودی را در سطح توده‌های جنگلی بورآل فنلاند افزایش نخواهد داد. اخوان (۱۳۸۳) نیز به این نتیجه رسید که در جنگلهای طبیعی و مدیریت شده خزری ایران، استفاده از کریجینگ به‌منظور برآورد موجودی جنگل نمی‌تواند مطرح باشد. اما از سوی دیگر مطالعات برخی از محققان در راستای نتایج تحقیق حاضر می‌باشد. از آن جمله بررسی Biondi *et al.* (1994) است که از رویه‌زمینی در جنگلهای پیش رُسته آمریکا به‌عنوان یک متغیر ناحیه‌ای نام برده است و Montes *et al.* (2005) که از کریجینگ به‌منظور برآورد میزان تولید چوب‌پنبه درختان بلوط در اسپانیا استفاده کرده است. همچنین Kint *et al.* (2003) در تحقیقی در جنگلهای دست‌کاشت کاج جنگلی در بلژیک نشان دادند که متغیر ارتفاع درختان، متغیری با همبستگی مکانی است.

در نهایت تولید و استفاده از نقشه‌های زمین‌مرجع کریجینگ می‌تواند امکان تجزیه و تحلیلهای مکانی را به‌سرعت فراهم آورد که در ترکیب با سامانه‌های اطلاعات جغرافیایی (GIS)، کاربر را قادر می‌سازد که به بررسی تأثیر عوامل مختلف بر موجودی جنگل بپردازد. امروزه استفاده از این نوع اطلاعات مکانی در آماربرداری و مدیریت جنگل در ایران مرسوم نیست، اما براساس نتایج تحقیق حاضر می‌توان استفاده از روش زمین‌آمار را در مدیریت جنگل‌کاریها پیشنهاد داد.

سپاسگزاری

این تحقیق با حمایت مالی بنیاد IFS سوئد (International Foundation for Science) به انجام رسیده است. همچنین مؤسسه DAAD آلمان (Deutscher Akademischer Austausch Dienst) هزینه‌های مربوط به اقامت ۳ ماهه نویسنده اول را در دانشگاه گوتینگن آلمان متقبل شده است. بدین وسیله از حمایتهای مالی بنیاد IFS سوئد و مؤسسه DAAD آلمان، مشاوره آقایان دکتر محمود زبیری و دکتر قوام‌الدین زاهدی امیری، پیشنهادهای سازنده آقای دکتر هادی کیادلیری و نیز همکاریهای آقایان مهندس مجید حسنی، مهندس خسرو میرآخورلو و مهندس حسن رشیدی اصل در اجرا و اتمام این پروژه تشکر و قدردانی می‌گردد.

منابع مورد استفاده

- اخوان، ر.، ۱۳۸۳. بررسی استفاده از روش زمین آمار در برآورد موجودی جنگل در مقایسه با روش کلاسیک در جنگلهای خزری شمال ایران. رساله دکتری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، ٦٤ صفحه.
- بی‌نام، ۱۳٦۵. طرح جامع جنگلهای شمال کشور (مرحله مقدماتی)، حوضه‌های آبخیز ۳۳-۳۲-۳۱. سازمان جنگلها و مراتع کشور، دفتر فنی جنگل‌داری. ۱۲۰ صفحه.

- حسنی پاک، ع.ا.، ۱۳۷۷. زمین‌آمار (ژئواستاتیستیک). انتشارات دانشگاه تهران، ۳۱٤ صفحه.
- زبیری، م.، ۱۳۷۳. آماربرداری در جنگل. انتشارات دانشگاه تهران، ٤۰۱ صفحه.
- قنبری، ف.، ۱۳۸۷. بررسی پیش‌بینی توزیع مکانی برخی خصوصیات آلومتریک جنگل با استفاده از زمین‌آمار و GIS درجنگل آموزشی و پژوهشی دکتر بهرام‌نیا. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان. ۱۵۵ صفحه.
- محمدی، ج.، شتایی جویباری، ش.، حبشی، ه. و یغمایی، ف.، ۱۳۸۷. مقایسه سنجش از دور و زمین‌آمار در برآورد تعداد درختان در هکتار در جنگلهای بلوط لوه گرگان. مجله علوم کشاورزی و منابع طبیعی، ویژه‌نامه منابع طبیعی، ۱۵ (۱): ۲۱-۱۰.
- Bellehumeur, C. and Legendre, P., 1998. Multiscale sources of variation in ecological variables: modeling spatial dispersion, elaborating sampling designs. Landscape Ecology, 13: 15-25.
- Biondi, F., Myers, D.E. and Avery, C.C., 1994. Geostatistically modeling stem size and increment in an old-growth forest. Canadian Journal of Forest Research, 24: 1354-1368.
- Cressie, N.A.C., 1993. Statistics for spatial data. John Willy and Sons, Inc., New York. 900 p.
- Duplat, P. and Peyrotte, G., 1981. Inventaire et accroissement, Annexe 4, Office national des Forèts, Section technique, Paris. 120 p.
- Freeman, E.A. and Moisen, G.G., 2007. Evaluating kriging as a tool to improve moderate resolution maps of forest biomass. Environmental Monitoring and Assessment, 128: 395-410.
- Ganawa, E.S.M. and Mohammad Sharif, A.R., 2003. Spatial variability of total nitrogen and available phosphorus of large rice field in Sawah Sepadan Malaysia. Science Asia Journal, 29: 7-12.
- Goovaerts, P., 1997. Geostatistics for natural resources evaluation. Oxford University Press, New York. 483 p.
- Guibal, D., 1973. L´ estimation des oukoumés du Gabon, note interne 333, Centre de Morphologie Mathématique, Fontainebleau, France. 92 p.
- Gunnarsson, F., Holm, S., Holmgren, P. and Thuresson, T., 1998. On the potential of kriging for forest management planning. Scandinavian Journal of Forest Research, 13: 237- 245.
- Holmgren, P. and Thuresson, T., 1997. Applying objectively estimated and spatially continuous forest parameters in tactical planning to obtain dynamic treatment units. Forest Science, 43: 317-326.
- Houiller, F., 1986. Echantillonnage et modélisation de la dynamique des peuplements forestiers, thèse de doctorat, Université Claude Bernard, Lyon I. 82 p.
- Husch, B., Miller, C.I. and Beers, T.W., 1982. Forest mensuration. 3rd ed. John Wiley & Sons, inc., New York. 443 p.
- Isaaks, E.H. and Srivastava, R.M., 1989. An introduction to applied geostatistics. Oxford University Press, New York. 561p.
- Jost, A., 1993. Geostatistische analyse des Stichprobenfehlers systematischer Stichproben. Ph.D. thesis, academic press, University of Freiburg in Breisgau, Germany, 113 p.
- Kint, V., Meirvenne, M.V., Nachtergale, L., Geudens, G. and Lust, N., 2003. Spatial methods for quantifying forest stand structure development: a comparison between nearest neighbour indices and variogram analysis. Forest science, 49 (1): 36-49.
- Krige, D.G., 1951. A statistical approach to some mine valuation and allied problems on the Witwatersrand. Master's thesis, University of Witwatersrand, 190 p.
- Mandallaz, D., 1993. Geostatistical methods for double sampling schemes: application to combined forest inventory. Technical report, ETH Zürich, chair of forest inventory and planning, 33 p.
- Mandallaz, D., 2000. Estimation of the spatial covariance in universal kriging: Application to forest inventory. Environmental and ecological statistics, 7: 263-284.
- Marbeau, P., 1976. Géostatistique forestière: état actuel et développements nouveaux pour l´ aménagement en forêt tropicale thèse, centre de Morphologie Mathématique, ENSM, Paris. 105 p.
- Matheron, G., 1965. La théorie des variables regionalisées et ses applications, Masson, Paris. 72 p.
- Montes, F., Hernandez, M.J. and Canellas, I., 2005. A geostatistical approach to cork production sampling in *Quercus suber* forests. Canadian Journal of Forest Research, 35: 2787-2796.
- Nanos, N. and Montero, G., 2001. Spatial prediction of diameter distribution models. Forest ecology and management, 161: 147-158.
- Nanos, N., Calama, R., Montero, G. and Gil, L., 2004. Geostatistical prediction of height/diameter models. Forest ecology and management, 195: 221-235.
- Samra, J.S., Gill, H.S. and Bhatia, V.K., 1989. Spatial stochastic modeling of growth and forest resource evaluation. Forest Science, 35: 663-676.
- Tuominen, S., Fish, S. and Poso, S., 2003. Combining remote sensing, data from earlier inventories, and geostatistical interpolation in multi-source forest inventory. Canadian Journal of Forest Research, 33: 624- 634.
- Webster, R. and Oliver, M.A., 2000. Geostatistics for environmental scientists. Wiley press, 271 p.
- Zahedi Amiri, Gh., 1998. Relation between ground vegetation and soil characteristic in a mixed hardwood stand, Ph.D. thesis, academic press, University of Gent, Belgium, 319 p.

On the potential of kriging for estimation and mapping of forest plantation stock (Case study: Beneshki plantation)

R. Akhavan [1*] and C. Kleinn [2]

1*- Corresponding author, Assistant Prof., Research Institute of Forests and Rangelands, Tehran, Iran.
E- mail: akhavan@rifr-ac.ir
2- Professor, Institute of Forest Inventory and Remote Sensing. Georg-August-Universität Göttingen, Germany.

Abstract

This research was conducted to investigate on spatial structure and estimation of tree attributes in a forest plantation in the Caspian region of Iran. Field sampling was performed based on a 50m×125m systematic grid in a maple stand (*Acer velutinum* Boiss.) at age of 18 years using circular samples of 200m^2 area. Overall, 96 sample plots were measured in 63 hectare and 14.25 hectare was inventoried as full census area, as well. Experimental variograms for forest stem basal area, stem density and tree height attributes were calculated and plotted using the geo-referenced inventory plots. The calculated variograms of basal area and height showed a high spatial autocorrelation, which fitted by spherical models. However, stem density showed a large amount of nugget effect. Based on variography results, optimal sampling distance for stem basal area and density obtained 165m and 350m, respectively. Estimations for basal area and height were made by ordinary block (15m×15m) kriging and cross-validation results showed that all the estimations are accurate. Furthermore, the estimated kriged mean of basal area showed no significant difference to the real mean in the full census area, while kriging in term of statistical precision was two times better than sampling. Therefore, geostatistics is able to capture and describe the spatial variability as well as estimates tree attributes (not stem density) in this kind of forest plantation, accurately.

Key words: geostatistics, spatial structure, kriging, mapping, plantation.