

## تحلیل الگوی پراکنش مکانی گونه راش شرقی (*Fagus orientalis* Lipsky) در جنگل‌های هیرکانی با استفاده از شاخص‌های زاویه‌ای (مطالعه موردی: جنگل‌های ناو اسالم گیلان)

پیمان فرهادی<sup>۱\*</sup>، جواد سوسنی<sup>۱</sup> و سید یوسف عرفانی فرد<sup>۲</sup>

(تاریخ دریافت: ۹۵/۸/۱؛ تاریخ پذیرش: ۹۶/۲/۱۲)

### چکیده

در مدیریت جنگل، آگاهی از ویژگی‌های بوم‌شناختی درختان در یک توده از اهمیت بالایی برخوردار است. نخستین گام در کسب این آگاهی، شناخت الگوی مکانی درختان است. بنابراین با توجه به اهمیت اقتصادی و زیست‌محیطی گونه راش در ناحیه رویشی هیرکانی، در این پژوهش الگوی مکانی این گونه مورد بررسی قرار گرفت. در این تحقیق پنج قطعه نمونه یک هکتاری در تپ راش جنگل‌های ناو اسالم استان گیلان که از لحاظ شرایط محیطی همگن بودند، به‌طور تصادفی آماربرداری شدند. سپس با اندازه‌گیری زاویه بین درختان راش و با استفاده از شاخص‌های زاویه یکنواخت، میانگین جهت، میانگین زاویه‌ها و کلارک و اوانز به تحلیل الگوی پراکنش مکانی درختان راش پرداخته شد. نتایج نشان داد که الگوی پراکنش راش در این پژوهش به‌صورت کپه‌ای متمایل به تصادفی است و استفاده از سه شاخص زاویه یکنواخت، میانگین جهت و کلارک و اوانز در کنار یکدیگر نتایج بهتری را جهت تعیین الگوی مکانی درختان ارائه می‌کنند. همچنین استفاده از شاخص‌های زاویه‌ای علاوه بر دقت بالا، با توجه به عدم نیاز به اندازه‌گیری فواصل بین درختان منجر به بالا بردن سرعت تعیین الگوی مکانی توده‌های جنگلی می‌شود.

واژه‌های کلیدی: الگوی مکانی، راش شرقی، شاخص زاویه یکنواخت، شاخص میانگین جهت، استان گیلان

۱. گروه جنگلداری، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه لرستان

۲. گروه منابع طبیعی و محیط زیست، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز

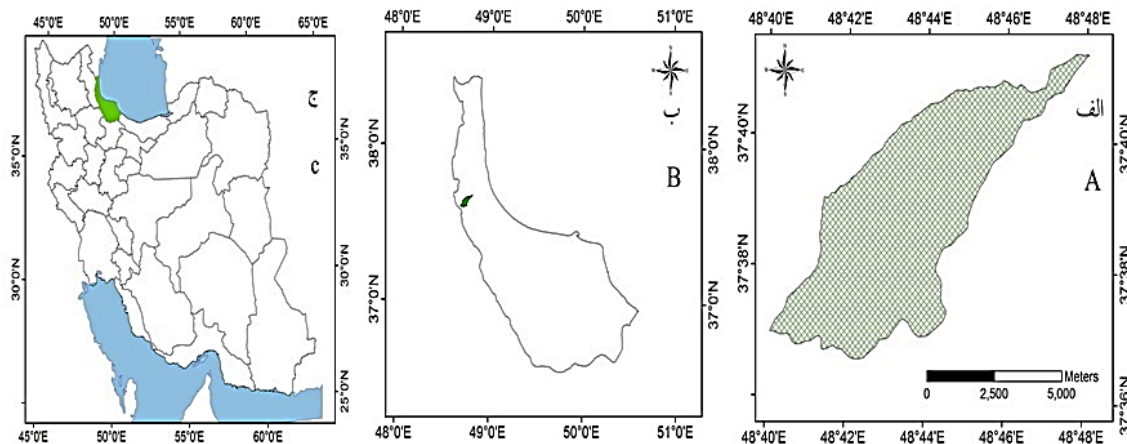
\*: مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: farhadi.pe@fa.lu.ac.ir

## مقدمه

الگوی مکانی یکی از مهم‌ترین موضوع‌های بوم‌شناسی است که مطالعه آن در جوامع طبیعی همواره مورد علاقه بوم‌شناسان است، زیرا اطلاعاتی را در مورد رخداد‌های گذشته و آینده جامعه ارائه می‌دهند (۳۶). الگوی مکانی بر نحوه اختصاص مکان یا توزیع افراد دلالت دارد که گویای نحوه قرارگیری افراد در فضای افقی است. این الگو پیامد پاسخ‌های چندگانه زیستی جمعیت‌ها، روابط بین گونه‌ای، روابط درون گونه‌ای و شرایط محیطی است (۲۸). در واقع الگوی مکانی موقعیت مکانی درختان در ارتباط با یکدیگر است که به صورت یک طیف پیوسته از الگوی پراکنده (عدم همبستگی بین موقعیت درختان)، تصادفی (فرایند پواسون Poisson) و کپه‌ای (همبستگی بین موقعیت درختان) و یا ترکیبی از آنها تعریف می‌شود (۴۱). فرایندهای پراکنش درختان در جنگل تأثیر عمیقی بر بقای آنها در محیط‌های با شرایط گوناگون دارد. همچنین الگوهای متفاوت مکانی درختان که از این فرایندها ناشی می‌شود، بیانگر مقدار موفقیت گونه‌های درختی در رقابت‌های درون و بین گونه‌ای مراحل مختلف توالی است (۳۶). شناخت این الگوهای مختلف مهم‌ترین بخش در بررسی نحوه عملکرد بوم‌شناختی یک توده جنگلی محسوب می‌شود. زیرا تحلیل الگوی مکانی عناصر جنگل موجب می‌شود؛ که شناخت عمیق‌تری از ساختار و رشد افراد به دست آمده و مشکلات نحوه تخصیص مکان به جنگل کاری و بهره‌برداری از جنگل حل شود (۲۸). برای تعیین الگوی مکانی درختان در جنگل، تنها مشاهده عینی کافی نیست بلکه باید با استفاده از روش‌های مناسب آماری به آن دست یافت، زیرا توزیع مکانی درختان یک ویژگی کیفی بوده و برای تحلیل آن باید کمی شود (۵۵). الگوی مکانی فقط یک ویژگی مکانی جمعیت نیست، بلکه یکی از شاخص‌های کمی اساسی جمعیت‌ها است و مهم‌ترین شاخص برای تشریح ساختار توده‌های جنگلی است، زیرا ممکن است دو توده مقادیر متوسط، تجمعی و توزیع فراوانی مشابهی داشته باشند، اما به دلیل اختلاف در الگوهای مکانی خیلی متفاوت به نظر برسند (۲۳). شناخت

الگوی مکانی درختان به عنوان یک ابزار کلیدی در درک عمیق ساختار جمعیت، رویش و برداشت درختان در جنگل کاری‌ها کمک می‌کند و در اظهارنظر درباره قوانین پراکنش درختان، فرایندهای تکاملی و پیش‌بینی تغییرات توده نیز بسیار مهم است (۳۰). به منظور مطالعه الگوی مکانی درختان روش‌های مختلفی وجود دارد که معمول‌ترین آنها روش‌های نمونه‌برداری فاصله‌ای و قطعه نمونه با مساحت ثابت است (۴۵). اما عیب این شاخص‌ها برخلاف سادگی آنها این است که نتایج این شاخص‌ها در روش قطعه نمونه تحت تأثیر مساحت قطعه نمونه قرار می‌گیرند (۵۳). همچنین تعیین درختان و اندازه‌گیری فواصل بین آنها در روش‌های فاصله‌ای در مناطق شیب‌دار برای مطالعه الگوی مکانی نیز تا حدی مشکل است (۱۸) و هریک از شاخص‌های فاصله‌ای توانایی متفاوتی در تعیین دقیق الگوی مکانی در شکل خاص و مشخصی از الگو دارا می‌باشند (۶). امروزه به منظور بررسی الگوی مکانی از زاویه بین درختان استفاده می‌کنند. این روش، روشی ساده همراه با دقت بالا به منظور بررسی الگوی مکانی توده‌های جنگلی محسوب می‌شود که رویکرد آن براساس اندازه‌گیری زاویه بین درختان همسایه است (۲۱). در این روش نیازی به اندازه‌گیری فواصل بین درختان نیست و شاخص‌های این روش براساس موقعیت قرار گرفتن درختان همسایه در اطراف درخت مرجع، به تحلیل الگوی مکانی درختان می‌پردازند. این شاخص‌ها شامل شاخص زاویه یکنواخت، شاخص میانگین جهت و شاخص میانگین زاویه‌ها می‌باشد.

با توجه به اهمیت الگوی مکانی درختان جنگلی، پژوهش‌های متعددی در این زمینه با استفاده از روش‌های مختلف در داخل و خارج از کشور انجام شده است. در مورد توده راش حبشی و همکاران (۵) با استفاده از شاخص کلارک و اوانز در جنگل شصت کلاته گرگان به الگوهای متفاوتی برای گونه‌های مختلف در توده‌های آمیخته راش دست یافتند. اخوان و همکاران (۲) الگوی مکانی گونه راش را با استفاده از تابع K راپلی در مراحل اولیه، بلوغ و پوسیدگی به ترتیب خوشه‌ای



شکل ۱. منطقه مورد مطالعه در سری شماره سه ناو اسالم (الف)، استان گیلان (ب) و ایران (ج)

یکی از با ارزش ترین گونه های تولید کننده چوب می باشد (۱۵). در بوم شناسی کمی شاخص هایی وجود دارند که با استفاده از زاویه بین درختان، روابط درختان را مورد بررسی قرار می دهند. آشنایی با این شاخص ها و نحوه کاربرد هر کدام در استفاده بهینه از آنها در مطالعات مختلف بسیار مؤثر است. همچنین با توجه به اهمیت الگوی مکانی به عنوان یک ابزار مدیریتی مهم در حفظ، شناخت و مدیریت توده های جنگلی این تحقیق سعی دارد با معرفی الگوی مکانی و روابط بوم شناختی درختان راش طبیعی و دست نخورده، گامی به منظور احیا ساختار توده های راش تخریب یافته (به عنوان یکی از مهم ترین گونه های تجاری جنگل های شمال ایران) بردارد.

### مواد و روش ها

#### منطقه مورد مطالعه

سری شماره سه ناو، که یکی از سری های حوزه هفت ناو در استان گیلان و شهرستان تالش به شمار می آید، بین عرض جغرافیایی  $37^{\circ}41'22''$  تا  $37^{\circ}36'28''$  شمالی و طول های جغرافیایی  $48^{\circ}40'22''$  تا  $48^{\circ}48'04''$  شرقی با مساحت  $3770$  هکتار واقع شده است. این سری از شمال به رودخانه ناو (کوه رود)، از جنوب به یال سیلین خونی و اولسه پشت، از شرق به جنگل های سری یک ناو و از غرب به رودخانه سوکله و مراتع

شدید، تصادفی و خوشه ای ضعیف تشخیص دادند. کرمی و همکاران (۱۴) توسط آنالیز سنجه های سیمای سرزمین در ترکیب یا روش آنالیز گرادیان در محیط Fragstats، الگوی مکانی لکه های زادآوری راش را در پارسل های مختلف جنگل خیرود بیشتر به صورت کپه ای و تصادفی تعیین کردند. نوری و همکاران (۱۶) با استفاده از شاخص های K راپیلی و نزدیک ترین همسایه به الگوی مکانی کپه ای برای درختان موجود در راشستان های طبیعی جنگل خیرود رسیدند. پومریننگ (۴۲) با استفاده از شاخص های کلارک و اوانز و زاویه یکنواخت ( $W_i$ ) الگوی مکانی توده های راش در جنگل های آلمان به صورت پراکنده گزارش کرد. پومریننگ و استویان (۴۳) روش جدیدی (Nearest neighbor summary statistics) را به منظور بازسازی الگوی مکانی درختان جنگلی ارائه دادند. اسمیت (۴۸) الگوی پراکنش توده های راش مدیریت شده در جنگل های جنوب غربی لهستان را با به کارگیری شاخص کلارک و اوانز به صورت پراکنده معرفی کرد.

جنگل های هیرکانی همانند نوار سبزی بر روی دامنه شمالی رشته کوه های البرز قرار گرفته اند و جزء جنگل های غنی دنیا محسوب می شوند. این جنگل ها به عنوان منبع مهم تولید چوب و سایر خدمات جنگلی مطرح می باشند که در آن گونه راش

قطعات نمونه با مساحت ثابت (۳ و ۶)، اندازه‌گیری فواصل درخت تا درختان همسایه (۲، ۶ و ۸) و اندازه‌گیری زاویه‌های بین درختان (۷، ۲۰، ۲۱، ۳۵ و ۵۲). روش پراکنش تعداد درختان در داخل قطعات نمونه با مساحت ثابت، به دلیل دقت کم به ندرت مورد استفاده قرار می‌گیرد (۵۴). روش اندازه‌گیری فواصل درخت تا درختان همسایه نیز به دلیل استفاده از فواصل بین تمامی درختان و تابع K راپیلی به آماربرداری صد درصد نیاز دارد (۴۶). استفاده از تابع K راپیلی نیز نیازمند آماربرداری صد درصد بوده که مستلزم صرف زمان و هزینه‌های زیاد است (۷). اما روشی که براساس اندازه‌گیری زاویه بین درختان است در چند سال اخیر توسعه یافته است و معایب روش‌های ذکر شده را ندارد. در این پژوهش به منظور به‌کارگیری این روش از شاخص‌های  $W_i$ ، MDI و MoA استفاده شد. همچنین در این مطالعه به منظور بررسی نتایج به دست آمده از هر یک از شاخص‌های زاویه‌ای، از شاخص کلارک و اوانز به صورت مکمل استفاده شد.

#### شاخص زاویه یکنواخت ( $W_i$ Uniform Angle Index)

این شاخص به بررسی درجه منظم بودن موقعیت مکانی درختان در گروه‌های ساختاری می‌پردازد (۲۹ و ۵۰). هر گروه ساختاری شامل یک درخت مرجع و چندین همسایه آن است. اندازه‌گیری شاخص زاویه یکنواخت نیازمند تعیین زاویه بین درختان است. بدین منظور فاصله درخت مرجع تا درختان همسایه با متر اندازه‌گیری شد و با استفاده از قطب‌نما آزمون بین درختان تعیین گردید. سپس براساس فاصله و آزمون بین درختان، زاویه بین آنها محاسبه شد (۴). اساس کار شاخص زاویه یکنواخت بر مبنای مقایسه زاویه بین درختان همسایه ( $\alpha_i$ ) نسبت به زاویه استاندارد ( $\alpha_0$ ) است. مقدار زاویه استاندارد ( $\alpha_0$ ) و شاخص زاویه یکنواخت ( $W_i$ ) به ترتیب از روابط ۱ و ۲ قابل محاسبه است:

$$\alpha_0 = \frac{360}{1 + \text{Number of neighbors}} \quad [1]$$

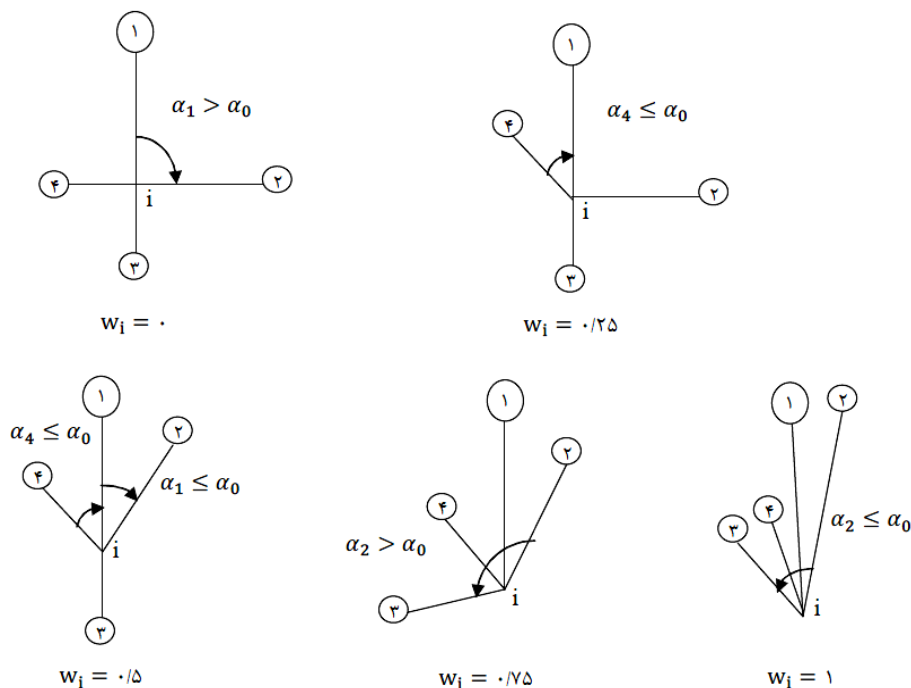
$$W_i = \frac{1}{4} \sum_{j=1}^4 v_{ij} \quad v_{ij} = \begin{cases} 1 \rightarrow \alpha_j < \alpha_0 \\ 0 \rightarrow \alpha_j \geq \alpha_0 \end{cases} \quad [2]$$

بیلابقی محدود می‌گردد. این سری در حدود ارتفاعی ۴۵۰ تا ۲۱۵۰ متر از سطح دریا واقع شده است (شکل ۱). جنگل‌های این منطقه از نظر زمین‌شناسی متعلق به دوران سوم زمین‌شناسی و از نظر خاکشناسی، تیپ خاک هوموسی واریزی است. همچنین سنگ مادر منطقه بیشتر از نوع سنگ آهک ناخالص همراه با ماسه سنگ-گرانیت-شیست می‌باشد. متوسط بارش سالانه منطقه، حدود ۹۴۵ میلی‌متر و متوسط درجه حرارت سالیانه منطقه ۱۲/۴ درجه سانتی‌گراد بوده و نوع اقلیم منطقه براساس روش آمبرژه، از نوع مرطوب سرد می‌باشد. در این منطقه از عمده‌ترین گونه‌های موجود به همراه راش درختان ممرز، بلوط، توسکا، افرا، شیردار، ملج، ون، خرمندی و گیلاس وحشی می‌باشد (۱۳).

#### روش پژوهش

با توجه به اینکه بررسی روابط بوم‌شناختی بین درختان باید در محدوده‌ای همگن صورت گیرد (۳۱)، با توجه به نقشه‌های ویژگی‌های فیزیوگرافیک منطقه و پس از انجام جنگل‌گردشی‌های متعدد و شناخت وضعیت جنگل‌های اسالم، تعداد ۵ قطعه نمونه یک هکتاری در تیپ راش جنگل‌های منطقه مورد مطالعه به صورت تصادفی پیاده و مورد آماربرداری قرار گرفت که از جنبه‌های فیزیوگرافیک (شیب، جهت و ارتفاع) و نوع خاک یکسان بود. به طوری که این قطعات نمونه در شیب متوسط ۳۰ تا ۴۰ درصد، در جهت شمالی و ارتفاع ۱۲۰۰ متر از سطح دریا قرار گرفته بود. در چنین شرایطی تنها عامل تأثیرگذار بر روی وضعیت ساختاری درختان، روابط متقابل آنها با یکدیگر است (۴۷). سپس موقعیت مکانی درختان راش موجود در هر یک از قطعات نمونه از طریق روش اندازه‌گیری فاصله و آزمون بین درختان استفاده از متر لیزری و قطب‌نمای سونتو ثبت و قطر برابر سینه درختان بیش از ۷/۵ سانتی‌متر با استفاده از دستگاه کالیپر اندازه‌گیری شد.

به منظور بررسی الگوی مکانی درختان روش‌های مختلفی وجود دارد که عبارتند از: پراکنش تعداد درختان در داخل



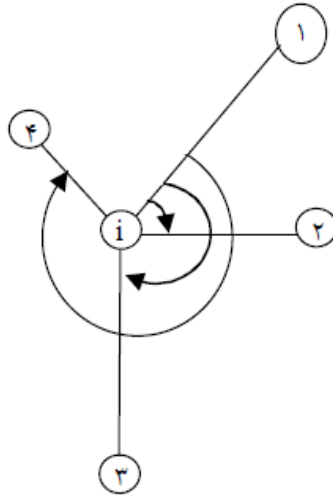
شکل ۲. ارزش‌های شاخص زاویه یکنواخت در وضعیت‌های مختلف برای گروه‌های ساختاری چهار درختی در اطراف درخت مرجع (۲۹) (بر گرفته از اسمیت (۵۰))

درختان نیست و از موقعیت قراگیری درختان همسایه در اطراف درخت مرجع استفاده می‌شود (۲۰). به عبارت دیگر زاویه بین درختان همسایه در اطراف درخت مرجع در نظر گرفته می‌شود. نحوه اندازه‌گیری زاویه در این شاخص به این صورت است که محوری (پاره‌خطی) که درخت مرجع را به اولین همسایه در جهت شمالی خود، در یک گروه ساختاری مرتبط می‌کند به عنوان مبنایی برای تشکیل زاویه بین سایر درختان همسایه در نظر گرفته می‌شود (۳۵ و ۴۰) و زاویه بین این محور و تک تک درختان موجود در هر گروه ساختاری در نظر گرفته می‌شود (شکل ۳). ارزش‌های این شاخص شباهت زیادی به شاخص زاویه یکنواخت دارد به این صورت که ارزش‌های صفر نشان‌دهنده الگوی پراکنده می‌باشد و با افزایش مقدار این شاخص الگوی کپه‌ای در توده ظاهر می‌شود. زمانی که مقدار این شاخص نزدیک به ارزش ۱/۷۷۹ باشد؛ نشان‌دهنده الگوی تصادفی در توده مورد بررسی می‌باشد (۵۰). در این شاخص نیز مانند شاخص زاویه یکنواخت با استفاده از فاصله و

در واقع شاخص زاویه یکنواخت، براساس زوایای بین درخت مرجع و نزدیک‌ترین همسایه‌های آن به ارزش‌های مختلف تقسیم‌بندی می‌شود (۱۷، ۲۱ و ۴۲). در هنگام استفاده از چهار درخت همسایه، مقدار این شاخص با توجه به رابطه ۲، یکی از پنج ارزش صفر، ۰/۲۵، ۰/۵، ۰/۷۵ و ۱ می‌تواند در نظر گرفته شود (شکل ۲). با میانگین‌گیری از این ارزش‌ها مقدار متوسط تجمع ( $\bar{w}_i$ ) برای کل توده قابل محاسبه است. به منظور به دست آوردن اطلاعات دقیق‌تری از تنوع موقعیت مکانی درختان لازم است از نمودار توزیع ارزش‌های این شاخص استفاده شود (۱۷). مقادیر بین صفر تا ۰/۴۷۵ نشان‌دهنده الگوی پراکنده، مقادیر ۰/۴۷۵ تا ۰/۵۱۷ نشان‌دهنده الگوی تصادفی و مقادیر بیشتر از ۰/۵۱۷ برای این شاخص نشان‌دهنده الگوی کپه‌ای می‌باشد (۲۶).

### شاخص میانگین جهت ( $R_i$ Mean Directional Index)

برای محاسبه مقدار این شاخص نیازی به اندازه‌گیری فاصله بین



شکل ۳. نحوه اندازه‌گیری زاویه بین درختان برای محاسبه شاخص میانگین جهت در یک گروه ساختاری چهار درختی در اطراف درخت مرجع  $i$  را نشان می‌دهد (جهت تشکیل زوایا در جهت عقربه‌های ساعت) (۲۰ و ۲۱)

(درخت مرجع)، زاویه بین دو درخت نزدیک به نقطه نمونه برداری اندازه‌گیری می‌شود ( $50^\circ$ ). به‌منظور محاسبه مقدار این شاخص تمام درختان راش موجود در هر پلات یک‌بار به‌عنوان نقطه نمونه‌برداری (درخت مرجع) در نظر گرفته شد و زوایای بین دو درخت نزدیک به نقطه نمونه‌برداری اندازه‌گیری شد (شکل ۴). زاویه بین دو درخت نزدیک به نقطه نمونه‌برداری با توجه به فاصله و آزیموت آنها نسبت به درخت مرجع (نقطه نمونه برداری) محاسبه شد. پس از اندازه‌گیری زوایای تمام نقاط نمونه‌برداری با استفاده از رابطه ۴ مقدار متوسط این شاخص قابل محاسبه می‌باشد (۲۲ و  $50^\circ$ ):

$$\theta = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \alpha_i \quad [4]$$

در این رابطه  $n$ : تعداد نقاط نمونه‌برداری و  $\alpha_i$ : زاویه‌های اندازه‌گیری شده در هر نقطه نمونه‌برداری است. مقدار این شاخص می‌تواند بین مقادیر  $0^\circ$  تا  $180^\circ$  درجه متغیر باشد (۲۲). زمانی که میانگین این شاخص به‌صورت  $\bar{\theta} \approx 90^\circ$  باشد، چیدمان تصادفی درختان را در توده مورد بررسی نشان می‌دهد اما در توده‌هایی با چیدمان کپه‌ای یا پراکنده مقدار این شاخص به ترتیب  $\bar{\theta} < 90^\circ$  یا  $\bar{\theta} > 90^\circ$  می‌باشد (۲۲ و  $50^\circ$ ).

آزیموت بین درختان در هر گروه ساختاری مقدار زوایای بین درختان محاسبه شد. مقدار این شاخص از رابطه ۳ قابل محاسبه می‌باشد (۲۲ و ۳۵):

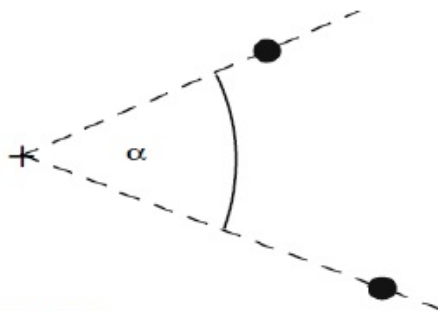
$$R_i = \sqrt{1 + \left( \sum_{j=2}^n \cos(\alpha_{ij}) \right)^2 + \left( \sum_{j=2}^n \sin(\alpha_{ij}) \right)^2} \quad [3]$$

در رابطه ۳،  $\alpha_{ij}$  زاویه بین درختان نسبت به درخت مرجع می‌باشد. شاخص میانگین جهت دارای مقادیر مابین صفر تا ۴ می‌باشد (۳۵). با میانگین‌گیری از مقادیر شاخص میانگین جهت برای هر گروه ساختاری، مقدار متوسط این شاخص برای تمام درختان موجود در توده‌های جنگلی قابل محاسبه می‌باشد. براساس مطالعات گذشته مشخص شده است که بررسی چهار درخت برای توصیف ساختار مکانی توده دارای دقت بالایی است (۲۱، ۳۲ و ۵۱). در کل می‌توان حالت‌های مختلف این شاخص را به‌صورت زیر نشان داد:

$$\bar{R}_{\text{کپه‌ای}} < \bar{R}_{\text{تصادفی}} < \bar{R}_{\text{پراکنده}}$$

#### شاخص میانگین زاویه‌ها (MoA: Mean of Angles)

این شاخص از شاخص‌های زاویه‌ای محسوب می‌شود. برای محاسبه شاخص میانگین زاویه‌ها پس از تعیین نقطه تصادفی



+ نقطه نمونه برداری

● نزدیکترین درختان به نقطه نمونه برداری

شکل ۴. نحوه اندازه‌گیری زاویه بین دو درخت نزدیک‌ترین همسایه به نقطه نمونه برداری به منظور محاسبه شاخص میانگین زاویه‌ها (۵۲)

پراکنده درختان است (۴۹).

#### شاخص کلارک و اوانز (CE: Clark-Evans index)

این شاخص قادر است نحوه توزیع افقی جمعیت‌های مورد مطالعه را براساس فاصله بین نزدیک‌ترین همسایه‌های درختان مرجع در توده مورد بررسی قرار دهد (۱۹ و ۳۴). این روش براساس مقایسه میانگین فاصله بین درختان در توده مورد مطالعه نسبت به میانگین فاصله مورد انتظار بین آنها در صورت توزیع تصادفی می‌باشد (۴۹). به عبارت دیگر این شاخص میزان انحراف جمعیت مورد مطالعه را از جمعیتی که به صورت تصادفی پراکنده شده‌اند؛ بیان می‌کند (۲۱) این شاخص از رابطه ۵ قابل محاسبه می‌باشد:

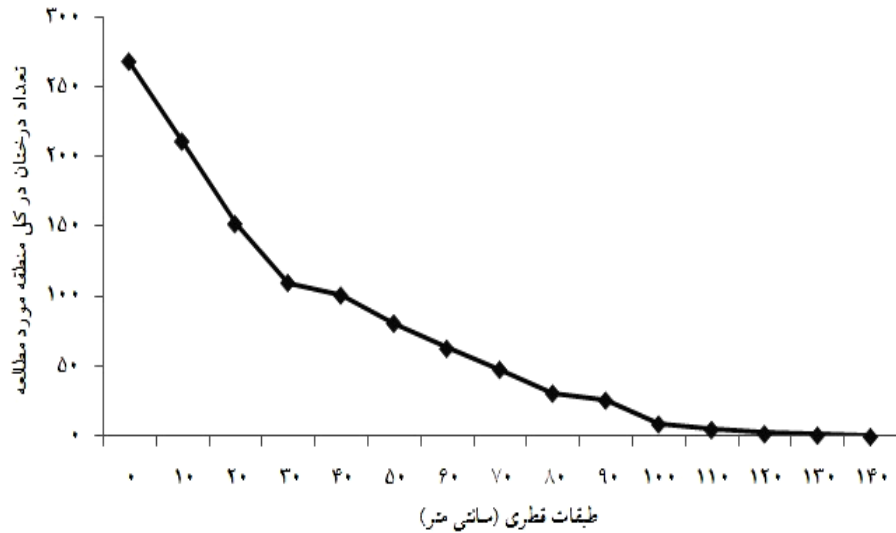
$$CE = \frac{r_A}{r_E} = \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N r_i}{\frac{0.5 \times \left(\frac{A}{N}\right)^{0.5}}{+0.514 \times \frac{P}{N} + 0.41 \times \frac{P}{N^{3/4}}} \quad [5]$$

در رابطه فوق،  $r_A$  میانگین فاصله بین درختان همسایه؛  $r_E$  میانگین فاصله مورد انتظار بین درختان همسایه؛  $r_i$  عبارت است از فاصله بین درخت  $i$  و نزدیکترین همسایه آن به متر؛  $N$  نشان‌دهنده تعداد کل درختان در داخل قطعه نمونه؛  $A$  سطح قطعه نمونه به متر مربع؛  $P$  محیط قطعه نمونه به متر است (۳۲ و ۵۰). در توده‌های با الگوی تصادفی مقدار این شاخص برابر با یک می‌باشد. درحالی که CE کمتر از ۱ نشان‌دهنده حالت کپه‌ای؛ و CE بیشتر از ۱ بیان‌کننده موقعیت

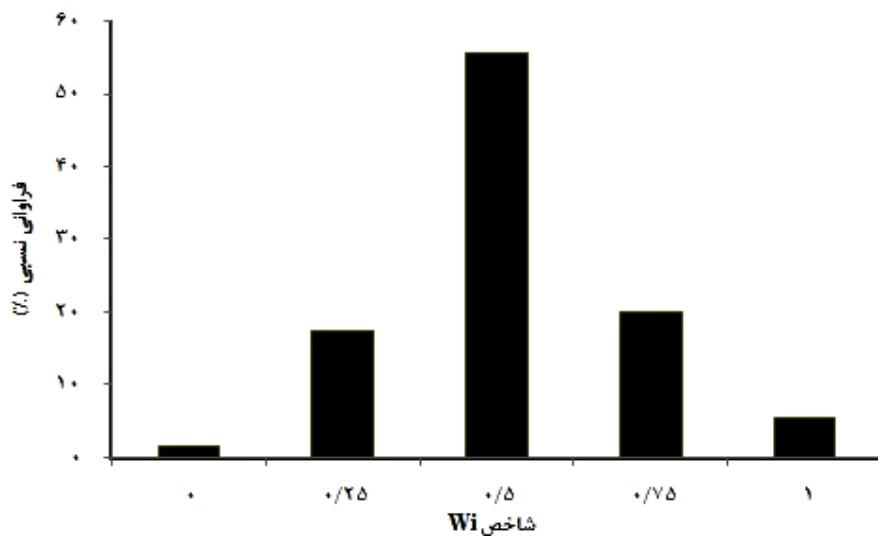
#### نتایج

در تمام قطعات نمونه مورد مطالعه در مجموع ۱۱۰۸ پایه درخت راش ثبت و الگوی مکانی آنها مورد بررسی قرار گرفت. به این صورت که در پلات شماره یک ۲۰۷ اصله، در پلات شماره دو ۲۳۶ اصله، در پلات شماره سه ۲۴۵ اصله، در پلات شماره چهار ۲۱۲ اصله و در پلات شماره پنج ۲۰۸ اصله درخت راش مورد بررسی قرار گرفت. همان‌طور که در شکل ۵ ملاحظه می‌گردد توزیع پراکنش قطری گونه راش در منطقه مورد مطالعه به صورت کم‌شونده می‌باشد.

مقدار شاخص  $W_i$  برای گونه راش، ۰/۵۴ محاسبه شد. با توجه به اینکه مقدار به دست آمده از این شاخص بین ۰/۵۱۷ تا ۱ قرار دارد؛ نشان‌دهنده الگوی مکانی کپه‌ای متمایل به تصادفی برای راش است. در شکل ۶ طبقات مختلف توزیع ارزش‌های شاخص زاویه یکنواخت برای گونه راش ترسیم شده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود بیشترین فراوانی (بیش از ۱/۵۵) مربوط به طبقه سوم (ارزش ۰/۵) می‌باشد. نتایج این نمودار نیز الگوی کپه‌ای متمایل به تصادفی را برای راش نشان می‌دهد. مقدار شاخص  $R_i$  برای



شکل ۵. منحنی پراکنش قطری درختان راش در منطقه مورد مطالعه



شکل ۶. نمودار توزیع ارزش‌های شاخص  $W_i$

اوانز برای گونه راش در محدوده مورد مطالعه برابر با ۰/۶۵ به دست آمد. با توجه به اینکه مقدار به‌دست آمده برای این شاخص کمتر از یک می‌باشد؛ نشان‌دهنده الگوی کپه‌ای برای این گونه در منطقه مورد مطالعه می‌باشد. به‌منظور درک بهتر نتایج به‌دست آمده در جدول ۱ خلاصه‌ای از مقادیر به‌دست آمده از هر یک از شاخص‌ها ارائه شده است.

گونه راش، عدد ۱/۹۷ محاسبه شد. این مقدار نیز بیانگر الگوی مابین کپه‌ای تا تصادفی برای این گونه در منطقه مورد مطالعه است. مقدار شاخص MoA برای گونه راش برابر با ۹۶ درجه محاسبه شد. با توجه به اینکه مقدار این شاخص به ۹۰ درجه نزدیک است؛ بیانگر الگوی مکانی پراکنده متمایل به تصادفی برای راش است. همچنین مقدار میانگین شاخص کلارک و



جدول ۱. نتایج به دست آمده از هر یک از شاخص‌های به کار گرفته شده در این تحقیق

نام شاخص	دامنه شاخص	مقدار به دست آمده	نوع الگو
زاویه یکنواخت	$W_i \in [0, 1]$	۰/۵۴	کپه‌ای متمایل به تصادفی
میانگین جهت	$MDI \in [0, 2]$	۱/۹۷	کپه‌ای متمایل به تصادفی
میانگین زاویه‌ها	$MoA \hat{A} [0; 180]$	۹۶°	پراکنده متمایل به تصادفی
کلارک و اوانز	$CE \in [0, 2/1491]$	۰/۶۵	کپه‌ای

## بحث و نتیجه‌گیری

در این پژوهش ساختار گونه راش در منطقه مورد مطالعه به شکل نمودار نزولی به دست آمد. در واقع منحنی پراکنش تعداد درختان در طبقات قطری توده‌های جنگلی ناهمسال با توجه به تعداد بیشتر درختان کم قطر نسبت به درختان قطور، تابع منحنی زنگوله‌ای شکل (پراکنش نرمال) نیست بلکه حالت کم شونده دارد. در حقیقت ساختار جنگل‌های طبیعی که کمتر تحت تأثیر مداخلات انسانی قرار گرفته‌اند و توانسته‌اند حالت طبیعی خود را حفظ کنند؛ همانند منطقه مورد مطالعه در این پژوهش حالت ناهمسالی دارند (۱۰).

نخستین گام در مطالعه بوم‌شناسی مکانی یک جامعه گیاهی، بررسی الگوی مکانی درختان در یک محدوده همگن است (۲۴). یکی از مهم‌ترین ابزارها به منظور دستیابی به مدیریت پایدار در جنگل‌های مختلف داشتن شاخص‌های مکانی هستند که با کمترین هزینه به توصیف، ارزیابی و مقایسه ساختار جنگل و تأثیر فعالیت‌های پرورشی می‌پردازد (۲۷). همچنین کاربرد زاویه بین درختان و شاخص‌هایی که در این زمینه ارائه شده‌اند در مطالعه الگوی مکانی درختان از اهمیت بالایی برخوردار بوده و در مطالعات مختلف مورد استفاده قرار گرفته‌اند (۲۱، ۲۲ و ۵۰). بنابراین هدف از این پژوهش معرفی شاخص‌های مهمی بود که بر پایه زاویه بین درختان استوار هستند و امکان استفاده از آنها در شرایط یکسان فراهم گردید. همچنین این شاخص‌ها در مطالعه روابط بوم‌شناختی درختان راش با یکدیگر در جنگل‌های هیرکانی به کار رفتند تا الگوی

مکانی این درختان و تأثیر آنها بر یکدیگر مورد بررسی قرار گیرد.

از آنجایی که مطالعه الگوی مکانی درختان در یک توده باید در شرایط همگن انجام گیرد (۴۷)، منطقه مورد مطالعه به گونه‌ای انتخاب شد که از جنبه‌های محیطی (عوامل فیزیوگرافیک و خاک) همگن باشد. در این محدوده پنج قطعه نمونه یک هکتاری در تپ راش به گونه‌ای مورد آماربرداری قرار گرفت که درختان راش موجود در هر پلات به صورت خالص پراکنده شده بودند. این موضوع در کنار سایر شرایط همگن محیط ارزیابی دقیق‌تر روابط بین این درختان را امکان‌پذیر نمود.

یکی از شاخص‌های پرکاربرد که امروزه در اکثر مطالعات داخلی و خارجی به منظور تعیین الگوی مکانی درختان مورد استفاده قرار می‌گیرد، شاخص  $W_i$  می‌باشد (۱۲، ۴۳ و ۵۱). مقدار این شاخص بیانگر الگوی کپه‌ای مابین تصادفی برای گونه راش در منطقه مورد مطالعه بود. شاخص  $R_i$  نوع دیگری از شاخص‌های زاویه‌ای درختان است و خیلی کاربردی‌تر از سایر شاخص‌های مربوط به تعیین الگوی مکانی می‌باشد و به عنوان روش‌های آماری کلاسیک مرتبط با نحوه قرارگیری درختان و موقعیت آنها شناخته می‌شود (۲۰)؛ این شاخص نیز مانند شاخص  $W_i$  نشان‌دهنده الگوی کپه‌ای مابین تصادفی برای گونه راش در منطقه مورد مطالعه می‌باشد. اما نتایج به دست آمده از شاخص  $MoA$  بیانگر الگوی مکانی مابین پراکنده و تصادفی برای راش می‌باشد. شاخص  $W_i$  و شاخص  $R_i$  به منظور

عدم کارایی این شاخص تأکید کردند.

هنگامی که با استفاده از شاخص‌های  $W_i$  و  $R_i$  به بررسی الگوی مکانی درختان جنگلی پرداخته می‌شود؛ نیازی به اندازه‌گیری فاصله بین درختان و یا ثبت مختصات درختان نیست. بنابراین استفاده از این دو شاخص در مقایسه با سایر روش‌های ارزیابی الگوی مکانی درختان از جمله تابع  $K$  رایلی و تابع  $L$  که نیاز به ثبت مختصات درختان دارد، بسیار کاراتر و آسان‌تر است (۲۱). همچنین دقت و کارایی شاخص‌های  $W_i$  و  $R_i$  به شکل پلات وابسته نیست (۵۰) و در مطالعات مختلف به‌منظور بررسی الگوی مکانی درختان می‌توانند مورد استفاده قرار گیرند. از طرف دیگر با بررسی تغییر ارزش‌های این شاخص‌ها در طول دوره زمانی کوتاه، می‌توان اطلاعاتی در مورد اثرات مدیریت و یا رقابت بر روی ساختار توده به‌دست آورد (۳۳).

یکی دیگر از شاخص‌هایی که به‌منظور تعیین الگوی مکانی درختان دارای کاربرد فراوان می‌باشد، شاخص  $CE$  می‌باشد (۹، ۵ و ۴۸) که در این مطالعه به‌صورت مکمل همراه با سایر شاخص‌ها مورد استفاده قرار گرفت و الگوی کپه‌ای را برای درختان راش مورد مطالعه نشان داد. شاخص  $CE$  علاوه بر تعیین نزدیک‌ترین همسایه هر درخت در درون توده مورد بررسی، به اطلاعاتی درباره میزان فاصله آن درخت تا همسایه خود نیاز دارد (۲۶).

در جوامع جنگلی الگوی مکانی بسیاری از گونه‌ها به‌صورت کپه‌ای است (۲۱). اغلب مطالعات در داخل کشور بیانگر الگوی مکانی کپه‌ای برای گونه راش در جنگل‌های هیرکانی است (۱، ۲، ۵ و ۱۶). با توجه به سنگین بودن بذر راش و ریزش آنها به زیر درختان، فاصله انتشار برای پراکنش بذر کم شده و انتظار می‌رود الگوی این گونه به‌صورت کپه‌ای باشد. در واقع نوع توزیع بذرها مهم‌ترین عامل تأثیرگذار بر الگوی مکانی درختان است (۳۹). همچنین ناهمگنی رویشگاه در ایجاد الگوی مکانی کپه‌ای، نقش مهمی دارد (۴۴). نتایج به‌دست آمده از این مطالعه الگوی مکانی راش را کپه‌ای متمایل

بررسی الگوی مکانی درختان به ترتیب از چهار زاویه و سه زاویه در هر نقطه نمونه برداری استفاده می‌کند. اما شاخص  $MoA$  تنها از یک زاویه در هر نقطه نمونه برداری استفاده می‌کند. بنابراین انتظار می‌رود شاخص‌های  $W_i$  و  $R_i$  نتایج دقیق‌تری را از الگوی مکانی آشکار سازند. کرسنته-کامپو و همکاران (۲۲) به‌منظور بررسی تأثیر تنک کردن بر روی ساختار، نحوه رشد و ریسک آتش‌سوزی تاجی در توده‌های دست کاشت کاج جنگلی در شمال اسپانیا از شاخص  $R_i$  استفاده کردند. آنها اظهار کردند که این شاخص علاوه بر کاربرد در زمینه تعیین الگوی مکانی درختان، در به‌کارگیری به‌عنوان شاخص‌های ساختاری مدل‌های رشد تک درختی دارای قابلیت زیادی می‌باشد. همچنین اسمیت (۵۰) با توجه به مطالعه‌ای که بر روی شاخص‌ها و توابع مورد استفاده در آمار مکانی جهت بررسی در آنالیزهای اکولوژیکی انجام داد به این نتیجه رسید که شاخص  $R_i$  دقت بالایی در تشخیص الگوی مکانی درختان دارا می‌باشد. هوی و همکاران (۳۰) با استفاده از داده‌های جمع‌آوری شده از جنگل‌های طبیعی و داده‌های شبیه‌سازی شده؛ بیان کردند که شاخص  $W_i$  به‌منظور تعیین الگوی مکانی درختان دارای دقت بسیار بالایی می‌باشد. اسمیت و کورزنویچ (۵۱) ضمن بررسی شاخص‌های مختلفی که به بررسی الگوی مکانی درختان می‌پردازند، بیان کردند زمانی که تعداد درختان در هر پلات ۱۰۰ پایه یا بیشتر باشد، شاخص  $W_i$  ابزاری قدرتمند در تعیین الگوی مکانی درختان محسوب می‌شود. با بررسی مطالعات صورت گرفته در زمینه کارایی و دقت شاخص‌های  $W_i$  و  $R_i$  و با استفاده از نتایج این تحقیق می‌توان نتیجه گرفت که شاخص  $MoA$  نمی‌تواند به‌درستی الگوی مکانی درختان را تعیین کند. تریفکوویک و یاماموتو (۵۲) اظهار کردند که شاخص  $MoA$  به‌منظور تعیین الگوی مکانی درختان دارای دقت مناسب نیست و مطالعات آنها کارا نبودن این شاخص را تأیید کرد. همچنین صفری و همکاران (۷) بیان کردند که شاخص  $MoA$  نمی‌تواند به‌درستی الگوی مکانی درختان را در جنگل‌های غرب (جنگل‌های جانورود کرمانشاه) تعیین کند و بر دقت پایین و

درختان را با دقت بالایی تعیین می‌کنند. نتایج این مطالعه، قابلیت استفاده از شاخص‌های زاویه یکنواخت، میانگین جهت و کلارک و اوانز را در بررسی الگوی پراکنش مکانی گونه راش شرقی نشان می‌دهد. یکی از مزیت‌های مهم استفاده از این سه شاخص در کنار یکدیگر این است که این شاخص‌ها می‌توانند به صورت پیوسته بررسی اثرات روش‌های مختلف مدیریتی جنگل را تسهیل نمایند و همچنین در برنامه‌ریزی و پایش سیمای سرزمین کاربرد دارند (۲۱). بنابراین پیشنهاد می‌شود با به‌کارگیری شاخص‌های ذکر شده تغییرات ایجاد شده بر اثر نحوه مدیریت‌های مختلف و عملیات بهره‌برداری را در توده‌های جنگلی مشخص کرد و به مدیران جنگل در برنامه‌ریزی‌ها و اتخاذ تصمیم‌های مناسب و مهم کمک کرد. همچنین با توجه به مطالعات قبلی و نتایج این پژوهش پیشنهاد می‌شود به منظور بررسی بوم‌شناسی مکانی درختان جنگلی از هر سه شاخص  $CE$ ،  $W_i$  و  $R_i$  در کنار یکدیگر در مطالعات آتی استفاده شود.

به تصادفی معرفی کرد. نکته مهمی که در این زمینه باید به آن توجه نمود این است که در جنگل‌های طبیعی الگوی مکانی درختان علاوه بر موارد ذکر شده تحت تأثیر مقیاس مطالعه، آشفتگی منطقه، روابط متقابل رقابتی و حضور گونه‌های مهاجم قرار دارد (۲۵). علی‌جانی و همکاران (۱۱) الگوی مکانی درختان را در تیپ ممرز-راش جنگل خیرود با توجه به نحوه مدیریت و تنک کردن خوشه‌های زادآوری به نفع درختان مرغوب به صورت کپه‌ای مایل به تصادفی معرفی کردند. همچنین لویس و همکاران (۳۸) علت تغییر الگو از شکل کپه‌ای به تصادفی را نتیجه عدم استقرار زادآوری به صورت گروهی عنوان کردند.

استفاده از شاخص  $CE$  در کنار شاخص‌های  $W_i$  و  $R_i$  به منظور تعیین الگوی مکانی درختان دارای اهمیت زیادی است، زیرا این شاخص‌ها حساسیت بالایی به کوچکترین تغییرات در جنبه‌های مختلف الگوی مکانی دارند و با در نظر گرفتن ویژگی‌های توده مورد بررسی از جنبه‌های مختلف، الگوی مکانی

## منابع مورد استفاده

۱. ابراهیمی، س. و ح. پوربابایی. ۱۳۹۲. تأثیر حفاظت بر الگوی پراکنش مکانی درختان غالب در جوامع راش (مطالعه موردی: ماسال، گیلان). مجله بوم‌شناسی کاربردی ۲(۴): ۲۳-۱۳.
۲. اخوان، ر.، خ. ثاقب طالبی، م. حسنی و پ. پرهیزکار. ۱۳۸۹. بررسی الگوی مکانی درختان طی مراحل تحولی در توده‌های دست نخورده راش (*Fagus orientalis* Lipsky) در کلاردشت. تحقیقات جنگل و صنوبر ایران ۱۸(۲): ۳۳۶-۳۲۲.
۳. بصیری، ر.، ه. سهرابی و م. مزین. ۱۳۸۵. تحلیل آماری الگوی پراکنش مکانی گونه‌های درختی در منطقه قامیشه مریوان. منابع طبیعی ایران ۳: ۵۷۹-۵۸۸.
۴. پيله‌ور، ب.، ز. میرآزادی، و. علی‌جانی و ح. جعفری سرایی. ۱۳۹۳. کاربرد شاخص‌های مبتنی بر نزدیک‌ترین همسایه در بررسی ساختار گونه‌های زالزالک و کیکم در جنگل‌های زاگرس. تحقیقات جنگل‌های زاگرس ۱(۲): ۱۴-۱.
۵. حبشی، ه.، م. حسینی، ج. محمدی و ر. رحمانی. ۱۳۸۶. تعیین الگوی پراکنش و ساختار در جنگل آمیخته راش شصت کلاته گرگان. تحقیقات جنگل و صنوبر ایران ۱۵(۱): ۶۴-۵۵.
۶. صفری، ا.، ن. شعبانیان، ر. ح. حیدری، س. ی. عرفانی‌فرد و م. پوررضا. ۱۳۸۹. بررسی الگوی مکانی درختان بلوط ایرانی (*Quercus brantii* Lindl.) در جنگل‌های باینگان کرمانشاه. تحقیقات جنگل و صنوبر ایران ۱۸(۴): ۶۰۸-۵۹۶.
۷. صفری، ا.، ر. ح. حیدری، ن. شعبانیان و م. کریمی. ۱۳۹۳. بررسی الگوی مکانی بنه با استفاده از زاویه بین درختان در جنگل‌های جوانرود کرمانشاه. تحقیقات جنگل و صنوبر ایران ۲۲(۲): ۳۵۹-۳۴۹.

۸. عرفانی فرد، س. ی. و ف. مهدیان. ۱۳۹۱. بررسی مقایسه‌ای روش‌های تعیین الگوی مکانی مطلق درختان در جنگل (مطالعه موردی: جنگل تحقیقاتی بنه استان فارس). *تحقیقات جنگل و صنوبر ایران* ۲۰(۱): ۶۲-۷۳.
۹. عرفانی فرد، س. ی.، ل. زارع و ج. فقهی. ۱۳۹۲. کاربرد شاخص‌های نزدیکترین همسایه در شاخه‌زاده‌های بلوط ایرانی (*Quercus branii* var. *Persica*) جنگل‌های زاگرس. *بوم‌شناسی کاربردی* ۲۵(۲): ۱۵-۲۴.
۱۰. علوی، س. ج.، ق. زاهدی امیری، ز. نوری و م. ر. مروی مهاجر. ۱۳۹۲. کاربرد تابع K رایلی در آشکارسازی الگوی پراکنش مکانی گونه ملج در جنگل آموزشی و پژوهشی خیرود نوشهر. *نشریه پژوهش‌های علوم و فناوری چوب و جنگل* ۲۰(۴): ۲۱-۳۰.
۱۱. علی‌جانی، و.، ج. فقهی، م. زبیری و م. ر. مروی مهاجر. ۱۳۹۱. کمی‌سازی ساختار مکانی جنگل‌های میان بند شمال ایران (مطالعه موردی: بخش گرازبن جنگل خیرود). *محیط زیست طبیعی* ۶۵(۱): ۱۱۱-۱۲۵.
۱۲. فرهادی، پ.، ج. سوسنی، ک. عادل، و. و. علی‌جانی. ۱۳۹۲. بررسی تغییرات موقعیت مکانی و تنوع گونه‌ای جنگل‌های زاگرس بر اثر تخریب جوامع محلی (مطالعه موردی: جنگل‌های قلعه گل خرم آباد). *نشریه پژوهش‌های علوم و فناوری چوب و جنگل* ۲۰(۴): ۶۱-۸۰.
۱۳. فلاح چای، م. م.، خ. کلانتری چروده و ح. پیام. ۱۳۹۰. مقایسه مشخصات کمی توده‌های طبیعی جنگل در دو منطقه حفاظت شده و غیرحفاظتی (مطالعه موردی: جنگل‌های ناو اسالم). *مجله علوم زیستی واحد لاهیجان* ۱(۴): ۱۱۳-۱۲۱.
۱۴. کرمی، ا.، ج. فقهی، م. ر. مروی مهاجر و م. نمیرانیان. ۱۳۹۱. بررسی الگوی مکانی لکه‌های زادآوری در جنگل‌های طبیعی راش (*Fagus orientalis* Lipsky) (مطالعه موردی: بخش گرازبن، جنگل خیرود). *مجله جنگل ایران* ۴(۱): ۷۷-۸۷.
۱۵. مروی مهاجر، م. ر. ۱۳۸۴. جنگل‌شناسی و پرورش جنگل. انتشارات دانشگاه تهران، ۳۸۷ ص.
۱۶. نوری، ز.، م. زبیری، ج. فقهی و م. ر. مروی مهاجر. ۱۳۹۲. بررسی الگوی پراکنش مکانی درختان و ساختار در راشستان‌های طبیعی شمال ایران (مطالعه موردی: بخش گرازبن جنگل خیرود). *نشریه محیط زیست طبیعی* ۶۶(۱): ۱۱۳-۱۲۵.
17. Aguirre, O., G. Hui, K. V. Gadow and J. Jimenez. 2003. An analysis of forest structure using neighborhood-based variables. *Forest Ecology and Management* 183: 137-145.
18. Assuncao, R. 1994. Testing spatial randomness by means of angles. *Biometrics* 50: 531-537.
19. Brzeziecki, B. 2002. Wskaźniki zróżnicowania struktury drzewostanu [Indices of stand structural diversity]. *Sylwan* 4: 69-79.
20. Corral-Rivas, J. J., A. Pommerening, K. Gadow and D. Stoyan. 2006. An analysis of two directional indices for characterizing the spatial distribution of forest trees. In: *Models of tree growth and spatial structure for multi-species, uneven-aged forests in Durango (Mexico)*. PhD dissertation. Faculty of Forest Science and Forest Ecology, Georg-August University of Göttingen.
21. Corral-Rivas, J. J., Ch. Wehenkel, H. A. Castellanos-Bocaz, B. Vargas-Laretta and U. Dieguez- Aranda. 2010. A permutation test of spatial randomness: application to nearest neighbor indices in forest stands. *Journal of Forestry Research* 15: 218-225.
22. Crecente-Campo, F., A. Pommerening and R. Rodriguez-Soalleiro. 2009. Impacts of thinning on structure, growth and risk of crown fire in a *Pinus sylvestris* L. plantation in northern Spain. *Forest Ecology and Management* 257: 1945-1954.
23. Dagley, C. M. 2008. Spatial pattern of coast redwood in three alluvial flat old-growth forests in Northern California. *Forest Science* 54(3): 294-302.
24. Diggle, P. J. 2003. Statistical analysis of spatial point patterns. Arnold Pub., UK, 159 p. *Ecography* 29: 671-682.
25. Frelich, L. E., R. L. Calcote, M. B. Davis and J. Pastor. 1993. Patch formation and maintenance in an old-growth hemlock-hardwood forest. *Journal of Ecology* 72: 2. 513-527.
26. Fucai, X., Zh. Xiuhai, P. Chunfang, J. Yuzhen and W. Jinsong. 2010. Stand structure of broadleaved and Korean pine (*Pinus koraiensis*) mixed forest in the Changbai Mountains, China. *Journal of Applied Environmental Biology* 16(4): 529-534.
27. Gadow, Kv and P. Pogoda. 2000. Assessing forest structure and diversity. *Man For* 1:1-8.
28. Gangying, H., L. Li, Z. Zhonghua and D. Puxing. 2007. Comparison of methods in analysis of the tree spatial

- distribution pattern. *Acta Ecologica Sinica* 2(11): 4717-4728.
29. Hui, G. and K. Gadow. 2002. Das Winkelmaß-Herleitung des optimalen standardwinkels. *Allgemeine Forst-Jagdzeitung (AFJZ)* 10: 173-177.
  30. Hui, G., L. Li, Zh. Zhao and P. Dang. 2007. Comparison of methods in analysis of the tree spatial distribution pattern. *Acta Ecologica Sinica* 27(11): 4717-4728.
  31. Illian, J., A. Penttinen, H. Stoyan and D. Stoyan. 2008. Statistical Analysis and Modelling of Spatial Point Patterns. John Wiley & Sons Pub UK, 557 p.
  32. Kint, V., N. Lust, R. Ferris and A. F. M. Olsthoorn. 2000. Quantification of forest stand structure applied to Scots Pine (*Pinus Sylvestris* L.) Forests. *Investigación Agraria: Sistemasy Recursos Forestales* 1: 147-163.
  33. Kint, V., Mv. Marc, N. Lieven, G. Guy and L. Noel. 2003. Spatial methods for quantifying forest stand structure development: a comparison between nearest-neighbor indices and variogram analysis. *Forest Science* 49:36-49.
  34. Kint, V. 2004. SIAFOR 1.0 - user guide. Laboratory of Forestry, Ghent University.
  35. Kuehne, C., A. R. Weiskittel, S. Fraver and K. J. Puettmann. 2015. Effects of thinning-induced changes in structural heterogeneity on growth, ingrowth, and mortality in secondary coastal Douglas-fir forests. *Canadian Journal of Forest Research* 45: 1448-1461.
  36. Law, R., J. Llian, D. F. R. P. Burslem, G. Gratzler, C. V. S. Gunatilleke and I. A. U. N. Gunatilleke. 2009. Ecological information from spatial patterns of plants: insights from point process theory (Essay Review). *Journal of Ecology* 97: 616-628.
  37. Li, L., W. Ye, Zh. Huang, H. Cao, Sh. Wei, Zh. Wang, J. Lian, I. Sun, K. Ma and F. He. 2009. Spatial distributions of tree species in a subtropical forest of China. *Oikos* 118: 495-502.
  38. Luis, M. D., J. Raventos, T. Wiegand and C. H. Hidalgo. 2008. Temporal and spatial differentiation in seedling emergence may promote species coexistence in Mediterranean fire-prone ecosystems. *Ecography* 31: 620-629.
  39. Marin, A., D. M. Carrer and D. S. Lamdica. 2011. Spatial analysis of a mixed beech, spruce and fir stand in the eastern Alps. M.Sc. Thesis, Department of Land, Environment, Agriculture and Forestry, College of Agricultural Sciences, University of Padua.
  40. Motz, K., H. Sterba and A. Pommerening. 2010. Sampling measures of tree diversity. *Forest Ecology and Management* 260: 1985-1996.
  41. Packalenab, P., J. Vauhkonenc, E. Kallioa, J. Peuhkurinend, J. Pitkänene and I. Pip. 2013. Predicting the spatial pattern of trees by airborne laser scanning. *International Journal of Remote Sensing* 34(14): 5154-5156.
  42. Pommerening, A. 2002. Approaches to quantifying forest structures. *Forestry* 3: 305-324.
  43. Pommerening, A. and D. Stoyan. 2006. Edge-correction needs in estimating indices of spatial forest structure. *Canadian Journal of Forest Research* 36: 1723-1739.
  44. Reyburn, A. P. 2011. Causes and consequences of plant spatial patterns in natural and experimental Great Basin (USA) plant communities. Ph.D Thesis, Department of Wildland Resources, Utah State University.
  45. Stamatellos, G. and G. panourgias. 2005. Simulating spatial distribution of forest trees by using data from fixed area plots. *Forestry* 78(3): 305-312.
  46. Stoyan, D. and H. Stoyan. 1992. *Fraktale Formenpunkt Feldermethoden der Geometriestatistik* Berlin: Akademie-Verlag, 394 p.
  47. Stoyan, D. and H. Stoyan. 1994. *Fractals, Random Shapes and Point Fields*. John Wiley & Sons, UK, 399 p.
  48. Szmyt, J. 2012. Spatial structure of managed beech-dominated forest: applicability of nearest neighbors indices. *Dendrobiology* 68: 69-76.
  49. Szmyt, J. and R. Korzeniewicz. 2012. Spatial diversity of planted and untended silver birch (*Betula pendula* L.) stands. *Forest Research Paper* 73(4): 323-330.
  50. Szmyt, J. 2014. Spatial statistics in ecological analysis: from indices to functions. *Silva Fennica* 38: 1-31.
  51. Szmyt, J. and R. Korzeniewicz. 2014. Do natural processes at the juvenile stage of stand development differentiate the spatial structure of trees in artificially established forest stands? *Forest Research* 75: 2. 171-179.
  52. Trifković, S. and H. Yamamoto. 2008. Indexing of spatial pattern of trees using a mean of angels. *Journal of Forest Researches* 3: 117- 121.
  53. Trifković, S. 2013. Spatial distribution and composition of trees in an aging coppice forest in Japan. *Formath* 12(1): 35-53.
  54. Wang, T. X., Y. L. Ding and Y. J. Liu. 2005. The spatial pattern of *Arundinaria fargesii* clone population. *Journal of Nanjing Forestry University (Natural Science Edition)* 29(3): 37-40.
  55. Wang, J., B. D. Sharma, Y. Li and G. W. Miller. 2009. Modeling and validating spatial patterns of a 3D stand generator for central Appalachian hardwood forests. *Journal of Computers and Electronics in Agriculture* 68: 141-149.