

ارزیابی ساختار مکانی شاخص‌های تنوع گونه‌ای با استفاده از زمین‌آمار در توده‌های بهره‌برداری شده و دست‌نخورده جنگل شصت کلاته گرگان

شهره رهبری^۱، رضا بصیری^{۲*}، هاشم حبشی^۳، ملیحه مزین^۴

چکیده

آمار مکانی یکی از ابزارهای مؤثر در مطالعات اکولوژیک است و زمین‌آمار به‌عنوان شاخه‌ای مبتنی بر نظریه متغیر ناحیه‌ای، از واریوگرام برای بررسی کمی تغییرپذیری مکانی پدیده‌ها استفاده می‌کند. اگرچه پژوهش‌های متعددی درباره تنوع زیستی و تأثیر بهره‌برداری جنگل انجام شده است، اطلاعات مربوط به پراکنش مکانی شاخص‌های تنوع گونه‌ای در جنگل‌ها همچنان محدود است. هدف این پژوهش بررسی ساختار مکانی شاخص‌های تنوع گونه‌های چوبی در دو توده بهره‌برداری شده و دست‌نخورده جنگل علمی پژوهشی شصت کلاته گرگان با استفاده از روش‌های زمین‌آمار است. مطالعه در سری یک جنگل شصت کلاته و در دو توده شامل توده‌ای با ۳۰ سال سابقه بهره‌برداری تک‌گزینی و یک توده دست‌نخورده انجام شد. نمونه‌برداری به روش سیستماتیک تصادفی با شبکه ۱۰۰×۱۵۰ متر انجام گرفت و در مجموع ۲۶۴ قطعه نمونه ۴۰۰ مترمربعی، به‌طور مساوی در دو توده برداشت شد. در هر قطعه نمونه گونه و تعداد پایه‌های گونه‌های چوبی اندازه‌گیری و شاخص‌های تنوع شامل ناهمگنی (شانون و سیمپسون)، یکنواختی (سیمپسون و اسمیت ویلسون) و غنا (مارگالف و منهینیک) محاسبه شد. سپس واریوگرام‌های شاخص‌ها ترسیم و با معیارهای MBE و MSDR اعتبارسنجی شدند. نتایج نشان داد که در هر دو توده، به جز شاخص‌های غنا در توده بهره‌برداری شده، سایر شاخص‌ها دارای ساختار مکانی متوسط بودند. شاخص‌های غنا در توده بهره‌برداری شده دارای اثر قطعه‌ای خالص بودند که نشان‌دهنده نبود ساختار مکانی و استقلال داده‌ها از یکدیگر است. همچنین تأثیر واریوگرام در توده دست‌نخورده بزرگ‌تر به‌دست آمد که بیانگر پیوستگی مکانی بیشتر، پراکنش یکنواخت‌تر و تغییرات تدریجی‌تر شاخص‌های تنوع در این توده نسبت به توده بهره‌برداری شده است. این نتایج نشان می‌دهد که توده دست‌نخورده از ساختار مکانی پایدارتر و همبستگی مکانی قوی‌تری برخوردار است، در حالی که بهره‌برداری جنگل منجر به تضعیف سازماندهی مکانی شاخص‌های تنوع گونه‌ای می‌شود.

واژگان کلیدی:

گونه‌های درختی، زمین‌آمار، واریوگرام، شاخص غنا، توده‌های مدیریتی شده، جنگل‌های هیرکانی.



مقاله پژوهشی

۱. کارشناسی ارشد علوم زیستی جنگل، گروه جنگلداری و صنایع سلولزی، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه صنعتی خاتم الانبیاء (ص) بهبهان، بهبهان، ایران.
shohreh.r88@gmail.com

۲. دانشیار، گروه جنگلداری و صنایع سلولزی، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه صنعتی خاتم الانبیاء (ص) بهبهان، بهبهان، ایران.
basiri52@yahoo.com

*نویسنده مسئول

۳. دانشیار، گروه جنگل‌شناسی و اکولوژی جنگل، دانشکده علوم مهندسی جنگل، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران.
habashi.hashem@gmail.com

۴. استادیار، گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه صنعتی خاتم الانبیاء (ص) بهبهان، بهبهان، ایران.
mmozyayan80@yahoo.com

شماره مقاله: ۲۵۱۱-۱۱۳۹
شماره صفحه پایایی: ۱۰۷۵-۱۰۸۶

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۹/۰۱
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۰/۱۷
انتشار آنلاین: ۱۴۰۴/۱۱/۰۸
زمان پذیرش: ۴۷ روز

استناددهی:

رهبری، ش.، بصیری، ر.، حبشی، ه.، و مزین، م. (۱۴۰۴). ارزیابی ساختار مکانی شاخص‌های تنوع گونه‌ای با استفاده از زمین‌آمار در توده‌های بهره‌برداری شده و دست‌نخورده جنگل شصت کلاته گرگان. مدیریت اکوسیستم‌های طبیعی، ۵(۲)، ۳۲-۴۳.

۱- مقدمه

اکوسیستم‌های جنگلی، که طی زمان‌های طولانی شکل گرفته‌اند، نقش حیاتی در حفظ تعادل و پایداری طبیعت ایفا می‌کنند (Damiti et al., 2025). این اکوسیستم‌ها به‌عنوان ستون فقرات اکولوژیکی عمل کرده و خدمات اکوسیستمی متعددی را ارائه می‌دهند که برای رفاه انسان و سلامت سیاره ضروری هستند (Chen et al., 2022). درختان، به‌عنوان مهم‌ترین اجزای این اکوسیستم‌ها و پوشش‌های گیاهی، نقش اساسی در ساختار و کارکرد آن‌ها دارند (Pan et al., 2018). ساختار پیچیده تاج پوشش جنگل‌ها، که توسط درختان ایجاد می‌شود، بهره‌وری و تنوع زیستی را افزایش می‌دهد (Ishii et al., 2004). تنوع زیستی جنگل، که اساس بسیاری از خدمات اکوسیستمی است، به شدت تحت تأثیر تنوع گونه‌های درختی قرار دارد (Pan et al., 2018). تحقیقات نشان داده‌اند که تنوع گونه‌های درختی بالاتر، به پایداری بیشتر بهره‌وری جنگل کمک می‌کند و خدمات اکوسیستمی متعددی از جمله تولید زیست‌توده و ذخیره کربن خاک را افزایش می‌دهد (Jucker et al., 2014). با این حال، جنگل‌ها تحت تأثیر شدید فعالیت‌های انسانی قرار دارند که می‌تواند منجر به کاهش تنوع زیستی و اختلال در عملکرد اکوسیستم شود (Damiti et al., 2025). مدیریت پایدار جنگل‌ها، با در نظر گرفتن تنوع گونه‌های درختی و ساختار جنگل، برای حفظ خدمات اکوسیستمی و افزایش تاب‌آوری در برابر تغییرات محیطی ضروری است (Wang et al., 2024). جنگل‌های ایران، به‌ویژه جنگل‌های شمال کشور که به‌عنوان مهم‌ترین و با ارزش‌ترین اکوسیستم‌های جنگلی و تنها منبع تولید چوب کشور شناخته می‌شوند، از این تهدیدها در امان نمانده‌اند (Gousheghir et al., 2022).

تنوع زیستی که بیانگر آمیختگی و ترکیب گونه‌هاست، از مهم‌ترین ویژگی‌های جوامع گیاهی محسوب می‌شود و معمولاً برای ارزیابی وضعیت بوم‌شناختی اکوسیستم‌های جنگلی به کار می‌رود (Rupyshev et al., 2025). بنابراین، بررسی تنوع زیستی می‌تواند ابزاری مؤثر برای تصمیم‌گیری‌های مدیریتی در جنگل‌ها باشد (Chen et al., 2020). تنوع گونه‌ای برای حفظ بهره‌وری جامعه در اکوسیستم‌های جنگلی مفید است (Zheng et al., 2024).

پیش‌بینی مکانی و تهیه نقشه‌های پیوسته از ویژگی‌های کمی و کیفی جنگل، ابزاری مهم برای مدیران منابع جنگلی به‌شمار می‌رود (Guo et al., 2024). این امر با هدف مدیریت بهینه، ارزیابی دقیق منابع و شناخت الگوهای مکانی رویش و بهره‌برداری صورت می‌گیرد (Barreras et al., 2023). این هدف با بهره‌گیری از علم آمار مکانی یا زمین‌آمار محقق می‌شود (Minatti et al., 2021). برخلاف آمار کلاسیک که داده‌های مکانی را نادیده می‌گیرد، در زمین‌آمار علاوه بر مقدار متغیر مورد مطالعه، موقعیت مکانی نمونه‌ها نیز در تحلیل‌ها لحاظ می‌شود. از این رو زمین‌آمار ابزاری کارآمد برای مطالعات منابع طبیعی به‌شمار می‌آید (Karahana and Erşahin, 2018). زمین‌آمار به محققان و مدیران منابع جنگلی امکان می‌دهد تا علاوه بر مقادیر کمی و کیفی، ساختار مکانی ویژگی‌های جنگل را نیز ارزیابی کنند (Akhavan et al., 2010). از جمله مزایای این روش می‌توان به توانایی در پیش‌بینی مقادیر در نقاط نمونه‌برداری نشده (Pennino et al., 2019)، شناسایی الگوهای مکانی گونه‌ها و ویژگی‌های زیستی (Almeida et al., 2023) و تهیه نقشه‌های پیوسته برای شاخص‌های مختلف اکولوژیکی اشاره کرد (Olthoff et al., 2018). همچنین، زمین‌آمار امکان برآورد دقیق‌تر موجودی چوب (Levick et al., 2016)، تراکم درختان (Akhavan et al., 2010)، زیست‌توده (Meena et al., 2019) و ویژگی‌های خاک (Osei et al., 2022) را فراهم می‌آورد و می‌تواند در مدیریت پایدار جنگل‌ها و برنامه‌ریزی بهره‌برداری بهینه مورد استفاده قرار گیرد (Stankić et al., 2025).

زمین‌آمار تاکنون در مطالعات متعددی از جمله بررسی خاک‌های مناطق جنگلی (Jayasuriya et al., 2024)، برآورد تعداد درختان در هکتار و تهیه نقشه‌ی موجودی جنگل کاری‌ها (Ter Steege et al., 2023)، بررسی تأثیر تاج درختان بر پراکنش خصوصیات شیمیایی خاک (Tsogbadrakh et al., 2024)، پهنه‌بندی تاج‌پوشش و تراکم (Sismanis, 2024)، مطالعه‌ی آفات و بیماری‌های جنگلی (Garcia et al., 2017)، برآورد موجودی چوب و افزایش قطر (Levick et al., 2016; Akhavan et al., 2010)، مدل‌سازی توزیع مکانی قطر درختان (Fazlollahi Mohammadi et al., 2022)، بررسی زیست‌توده (یوسفوند مفرد و همکاران، ۱۴۰۲) و مدل‌سازی میکروکلیم در جنگل‌های رودخانه‌ای (Eskelson et al., 2011) به کار رفته است. با این حال، مطالعات متعددی در خصوص اثر مدیریت جنگل بر تنوع زیستی در مناطق جنگلی شمال کشور وجود دارد ولی به بحث اثر زمین‌آمار کسی تاکنون نپرداخته است.

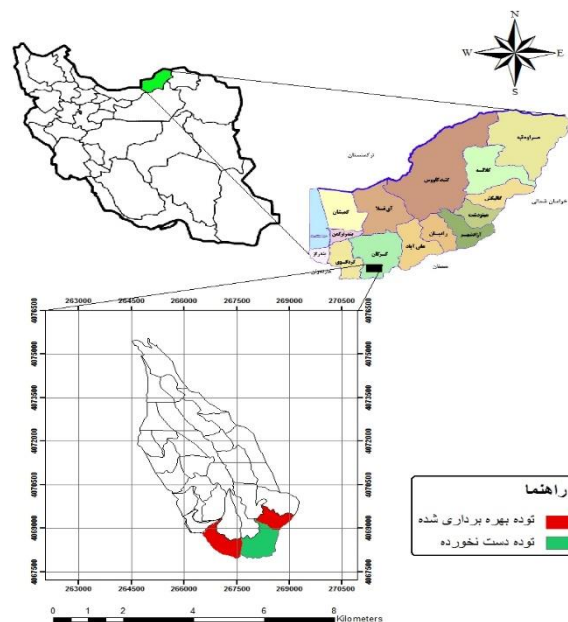
مطالعات پیشین در جنگل شصت کلاته گرگان نشان می‌دهند که بهره‌برداری جنگل می‌تواند بر شاخص‌های تنوع گونه‌ای تأثیر بگذارد. مطالعه صید و همکاران (۱۳۹۲) با مقایسه شاخص‌های غنا، ناهمگنی و یکنواختی در ۱۲ قطعه نمونه در جنگل دست‌نخورده و بهره‌برداری شده نشان داد که غنای گونه‌ها در توده‌های بهره‌برداری شده بهبود یافته، اما ناهمگنی و یکنواختی تفاوت معنی‌داری نداشتند و بهره‌برداری سطحی با حفظ ساختار گونه‌ها امکان‌پذیر است. مطالعه محمدی و شتابی (۱۳۹۵) نیز با نمونه‌برداری منظم تصادفی در قطعات جنگلی ۰/۱ هکتاری نشان داد که شاخص‌های غنا، تنوع و یکنواختی بین توده‌های دست‌نخورده و مدیریت‌شده تفاوت معنی‌داری نداشتند و مدیریت تک‌گزینی به حفظ تنوع گونه‌ای کمک می‌کند. این یافته‌ها اهمیت بررسی دقیق تغییرات مکانی شاخص‌های تنوع گونه‌ای و کاربرد ابزارهای پیشرفته‌ای مانند زمین‌آمار را برای مدیریت پایدار جنگل‌های شمال کشور برجسته می‌کنند.

با توجه به اهمیت تنوع زیستی در پایداری اکوسیستم‌های جنگلی و نقش زمین‌آمار در تحلیل‌های مکانی، پژوهش حاضر با هدف تحلیل الگوی تغییرات مکانی شاخص‌های یکنواختی، غنا و تنوع زیستی گونه‌های چوبی در توده‌های مدیریت‌شده و دست‌نخورده‌ی جنگل شصت کلاته گرگان، با استفاده از روش زمین‌آمار انجام شد. شایان ذکر است که تاکنون از روش زمین‌آمار در بررسی تنوع زیستی جنگل‌های شمال کشور استفاده نشده است.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- منطقه مورد مطالعه

جنگل آموزشی و پژوهشی شصت کلاته در شیب‌های شمالی سلسله جبال البرز در ۱۷ کیلومتری جنوب غربی شهرستان گرگان قرار گرفته است که به‌صورت شرقی غربی در جنوب دریای خزر امتداد دارد و در عرض جغرافیایی ۳۶ درجه و ۴۵ دقیقه تا ۳۶ درجه و ۴۳ دقیقه شمالی و طول جغرافیایی ۵۴ درجه و ۲۴ دقیقه تا ۵۴ درجه و ۲۱ دقیقه شرقی قرار گرفته است و مساحت آن ۱۹۸۶/۶ هکتار می‌باشد (شکل ۱). این تحقیق در قطعه‌های ۳۱، ۳۲ و ۳۳ سری یک جنگل آموزشی و پژوهشی شصت کلاته انجام شده است که مساحت آن‌ها به ترتیب: ۶۶/۷، ۸۹/۷ و ۴۴/۱ هکتار می‌باشد (بی‌نام، ۱۳۷۴). قطعات ۳۱ و ۳۳ تحت مدیریت برداشت تک‌گزینی قرار داشته‌اند (توده بهره‌برداری شده) و قطعه ۳۲ دست‌نخورده بوده است. برای نمونه‌برداری از روش آماربرداری تصادفی سیستماتیک با ابعاد شبکه ۱۰۰×۱۰۰ متر استفاده شد (حسنی‌پاک، ۱۳۸۹). در گام نخست، قطعه نمونه‌ها به‌صورت تصادفی سیستماتیک در منطقه پیاده‌سازی شدند. در مرحله دوم، شبکه‌ای هم‌اندازه میان خطوط برداشت مرحله اول با ابعاد ۵۰ در ۵۰ متر اجرا شد تا تراکم نقاط نمونه‌برداری افزایش یابد. پس از تحلیل مقدماتی ساختار مکانی داده‌ها، تنها در بخش‌هایی که ناهمگنی و تغییرپذیری مکانی بالا بود، نمونه‌های تکمیلی برداشت شد تا دقت برآوردها به سطح قابل قبول برسد (Akhavan et al., 2010). مرحله اول برداشت داده‌ها در پاییز سال ۱۴۰۱ (آبان) و مرحله دوم در بهار سال ۱۴۰۲ (اردیبهشت) انجام گرفت. در مجموع ۲۶۴ قطعه نمونه ۲۰×۲۰ متری در سه توده ثبت شد که سهم توده بهره‌برداری شده دست‌نخورده هر یک ۱۴۰ واحد نمونه‌برداری بود.



شکل (۱): موقعیت رویگاه‌های مورد مطالعه در جنگل آموزشی و پژوهشی شصت کلاته

در هر قطعه نمونه، اطلاعات تمامی گونه‌های چوبی دارای قطر برابر سینه بیشتر از ۲/۵ سانتیمتر برداشت شد. دو قطر عمود برهم تاج و تعداد پایه‌ها جهت محاسبه شاخص‌های تنوع زیستی اندازه‌گیری گردید. همچنین مختصات مکانی تمام قطعات نمونه به کمک موقعیت یاب جهانی و در سیستم مختصات متریک ثبت شد تا امکان تحلیل‌های ژئواستاتیک و تهیه واریوگرام فراهم شود. برای محاسبه شاخص‌های تنوع زیستی معرفی شده در جدول (۱)، از نرم‌افزارهای Ecological Methodology و PAST استفاده گردید (Manjate et al., 2025).

جدول (۱): شاخص‌های تنوع مورد استفاده و روابط آن‌ها

مؤلفه تنوع گونه‌ای	شاخص	فرمول	دامنه	مرجع
غنا	Margalef	$R_1 = \frac{S-1}{\ln(n)}$	صفر تا ∞	(Margalef, 1958)
	Menhinick	$R_2 = \frac{S}{\sqrt{n}}$	صفر تا ∞	(Menhinick, 1964)
	Simpson	$E_1 = \frac{1}{\bar{D}}$	صفر تا ۱	(Simpson, 1949)
یکنواختی	Smith and Wilson	$E_{var} = 1 - \left(\frac{2}{\pi} \left[\arctan \left[\frac{\sum_{i=1}^S (\log_e(n_i) - \frac{\sum_{j=1}^S \log_e(n_j)}{S})^2}{S} \right] \right] \right)$	صفر تا ∞	(Smith and Wilson, 1996)
	Simpson	$1 - D = 1 - \sum_{i=1}^S p_i^2$	صفر تا ۱	Simpson, (1949)
ناهمگنی	Shannon and Weaver	$H' = \sum_{i=1}^S (p_i)(\log_2 p_i)$	صفر تا ۴/۵	(Shannon and Weaver, 1949)

که در این رابطه‌ها S تعداد کل گونه‌ها یا تعداد گونه‌ها در نمونه، N حجم یا اندازه نمونه یا تعداد کل افراد در نمونه، LnN لگاریتم طبیعی، \hat{D} شاخص سیمپسون، P_i سهم افراد در گونه i ام نسبت به کل نمونه (که به صورت $P_i = \frac{n_i}{N}$ تعریف می‌شود) هستند. با استفاده از نرم‌افزار Gs+، برای تمام شاخص‌های تنوع زیستی مورد مطالعه، در هر رویشگاه، به صورت جداگانه آنالیز واریوگرافی انجام شد (Ghorbanzadeh et al., 2019). برازش مدل نظری بر واریوگرام‌های تجربی به دست آمده، با به کارگیری شیوه‌ای ترکیبی شامل استفاده از شکل ظاهری به کمک چشم و شیوه‌های آماری برازش منحنی انجام شد که این رویکرد به صورت خودکار، توسط نرم‌افزار ارائه می‌شود (Soltani-Mohammadi et al., 2016). نهایتاً مدلی انتخاب شد که بیشترین میزان R^2 (ضریب تعیین) و نسبت $\frac{C}{C+CO}$ (نسبت واریانس ساختاردار به حد آستانه) و کمترین میزان مجموع مربعات خطا را دارا باشد (Douzouné et al., 2024).

برای واریوگرام ایده‌آل، سه پارامتر را می‌توان به صورت اثر قطعه‌ای، حد آستانه و دامنه تأثیر بیان کرد. اثر قطعه‌ای بیانگر واریانس مؤلفه غیرساختاری (تصادفی)، حد آستانه بیانگر تقریبی از واریانس کل و دامنه تأثیر تعیین کننده فاصله‌ای است که فراتر از آن هیچ همبستگی مکانی بین مشاهدات وجود ندارد. درجه همبستگی مکانی متغیرها بر اساس تقسیم واریانس ساختاری به حد آستانه (واریانس کل) ضرب در ۱۰۰ به دست آمد (Atkinson, 1997). برای مقایسه میزان همبستگی مکانی بین واریوگرام‌های متغیرهای مورد نظر، از دو پارامتر استفاده شد: (۱) مقدار نسبت $\frac{C}{C+CO}$ که هر چه بیشتر باشد، همبستگی مکانی آن متغیر بیشتر است و به دیگر سخن، تغییرات متغیر در محیط، به صورت تدریجی و پیوسته انجام می‌شود. چنانچه این نسبت کمتر از ۲۵ درصد باشد همبستگی ضعیف، ۲۵-۷۵ درصد همبستگی متوسط و بیشتر از ۷۵ درصد همبستگی قوی خواهد بود (اخوان و همکاران، ۱۳۸۷؛ Nunes et al., 2020) و (۲) دامنه تأثیر واریوگرام که هر چه بیشتر باشد به معنی پیوستگی مکانی بیشتر محیط است و می‌توان در مسافت‌های بیشتری تخمین را انجام داد.

ارزیابی صحت در واقع مقایسه تخمین هر نقطه نمونه برداری شده در یک ناحیه با استفاده از مقادیر نمونه همسایه (بدون در نظر گرفتن خود آن نمونه) به روش کریجینگ با مقدار واقعی آن نقطه می‌باشد. ارزیابی اعتبار مدل و برآوردها با محاسبه آماره‌ای میانگین اریبی اشتباهات و واریانس اشتباه معیاراً انجام شد (Vašát et al., 2013).

$$MBE = \frac{1}{n} \sum_{x=1}^n [\hat{z}(x) - z(x)] \quad \text{رابطه (۱)}$$

$$MSDR = \frac{1}{n} \sum_{x=1}^n \left[\frac{\hat{z}(x) - z(x)}{\sigma(x)} \right]^2 \quad \text{رابطه (۲)}$$

که در این روابط n تعداد نمونه‌ها، $\hat{z}(x)$ مقدار برآورد در نقطه x و $\sigma(x)$ انحراف معیار کریجینگ در نقطه x هستند. مقادیر میانگین اریبی اشتباهات مقدار اریبی را نشان می‌دهند و در حالت ایده‌آل بایستی مساوی صفر باشند. مقادیر مثبت یا منفی قابل توجه آنها به ترتیب نشان دهنده برآورد بیشتر یا کمتر از مقدار واقعی می‌باشند (Sparks et al., 2024). مقدار واریانس اشتباه معیار نسبت بین واریانس تجربی و نظری را نشان می‌دهد. اگر کریجینگ براساس مدل به کار رفته درست برآورد کرده باشد، این آماره باید مساوی ۱ شود. در این حالت واریانس کریجینگ با واریانس برآوردها مساوی خواهد

1. RSS

2. MB

3. MSDR

بود (Vašát et al., 2013).

۳- نتایج

در این پژوهش مجموعاً ۷۳۲۱ پایه درخت ثبت و اندازه‌گیری شد که تعداد ۳۶۵۷ پایه در توده دست‌نخورده و ۳۶۶۴ پایه آن در توده بهره‌برداری شده قرار داشتند؛ این درختان شامل ۱۰ گونه چوبی، متشکل از ۷ گونه درختی شامل: راش (*Fagus orientalis* Lipsky)، انجیلی (*Parrotia persica*)، افرا پلت (*Acer velatinum* Boiss)، ممرز (*Carpinus betulus* L.)، شیردار (*Acer cappadocicum* Gled)، توسکا بیلاقی (*C.A.M*)، افرا پلت (*Acer velatinum* Boiss)، ممرز (*Carpinus betulus* L.)، شیردار (*Acer cappadocicum* Gled)، توسکا بیلاقی (*Alnus*)، افرا پلت (*C.A.M*)، خرمندی (*Diospyros lotus* L.) و ۳ گونه درختچه‌ای شامل: کوله خاس (*Ruscus hyrcanus*)، خاس (*Ilex spinigera*) (Loesn) و سرخه ولیک (*Crataegus microphylla*) بودند که در هر دو توده وجود داشتند. نتایج محاسبات شاخص‌های تنوع زیستی در دو توده مورد بررسی در جدول (۲) نشان داده شده است.

جدول (۲): آمار توصیفی شاخص‌های تنوع زیستی در دو توده مدیریت شده و دست‌نخورده

نوع توده	شاخص	میانگین	انحراف معیار	ضریب تغییرات	بیشترین مقدار	کمترین مقدار
ناهمگنی	شانون	۱/۱۱۶	۰/۶۰۱	۰/۵۳۸	۲/۳۶۴	.
	سیمپسون	۰/۴۲۱	۰/۲۲۲	۰/۵۲۶	۰/۷۸۰	.
مدیریت شده	سیمپسون	۰/۴۷	۰/۱۷۸	۰/۳۷۵	۰/۹۷۲	.
	اسمیت-ویلسون	۰/۲۷	۰/۲۳۹	۰/۸۷۲	۰/۹۸۱	.
غنا	منهینیک	۰/۰۴۲	۰/۰۱۹	۰/۴۵۴	۰/۱۲۶	۰/۰۰۶
	مارگالف	۰/۳۴	۰/۱۴۰	۰/۴۰۶	۰/۶۵۱	.
ناهمگنی	شانون	۱/۰۲۶	۰/۵۰۴	۰/۴۹۱	۲/۰۳۷	۰/۰۰۲
	سیمپسون	۰/۴۱۶	۰/۲۰۹	۰/۵۰۳	۱/۰۳۶	.
دست‌نخورده	سیمپسون	۰/۴۷	۰/۱۷۳	۰/۳۶۱	۰/۹۷۸	۰/۱۸۰
	اسمیت-ویلسون	۰/۲۱	۰/۲۴۵	۰/۱۶۲	۰/۹۸۵	۰/۰۳۱
غنا	منهینیک	۰/۰۳۶	۰/۰۱۱	۰/۳۱۰	۰/۰۶۲	۰/۰۱۲
	مارگالف	۰/۳۲	۰/۱۰۴	۰/۳۱۹	۰/۵۴۷	۰/۰۹۷

بر اساس جدول (۲) مقادیر میانگین شاخص‌های تنوع، یکنواختی و غنا در دو نوع توده، تفاوت قابل توجهی بین توده مدیریت‌شده و دست‌نخورده مشاهده شد. در توده مدیریت‌شده، شاخص‌های ناهمگنی شانون و سیمپسون به ترتیب برابر با ۱/۱۱۶ و ۰/۴۲۱ به دست آمد، در حالی که این مقادیر در توده دست‌نخورده به ترتیب ۱/۰۲۶ و ۰/۴۱۶ برآورد شد. این امر نشان می‌دهد که تفاوت ناچیزی در مقدار تنوع گونه‌ای کلی بین دو توده وجود دارد، هرچند مقدار اندکی افزایش در شاخص شانون توده مدیریت‌شده ممکن است ناشی از تغییر در ترکیب گونه‌ای پس از بهره‌برداری باشد. شاخص‌های یکنواختی در هر دو توده مقادیر نسبتاً مشابهی داشتند میانگین حدود ۰/۴۷ برای شاخص سیمپسون، اما ضریب تغییرات پایین‌تر در توده دست‌نخورده نشان‌دهنده‌ی پایداری و توزیع متعادل‌تر گونه‌ها در این توده است. شاخص اسمیت-ویلسون نیز در توده مدیریت‌شده مقدار بیشتری نشان داد ۰/۲۷ در برابر ۰/۲۱ که می‌تواند حاکی از کاهش تسلط گونه‌های غالب در اثر برداشت باشد.

در مورد شاخص‌های غنا، مقادیر میانگین مارگالف و منهینیک در توده مدیریت‌شده به ترتیب ۰/۳۴ و ۰/۰۴۲ و در توده دست‌نخورده ۰/۳۲ و ۰/۰۳۶ بودند. هرچند این تفاوت‌ها اندک است، اما ضریب تغییرات بالاتر در توده مدیریت‌شده به ترتیب ۰/۴۰۶ و ۰/۴۵۴ نشان می‌دهد که تغییرپذیری غنا در این توده بیشتر بوده و پراکنش گونه‌ها از همگنی کمتری برخوردار است.

به‌منظور بررسی و مطالعه ساختار تغییرات مکانی شاخص‌های مورد مطالعه، پس از محاسبات آماری، مقدار شاخص‌ها در هر پلات و در هر منطقه، به محیط نرم‌افزار Gs+ منتقل شد. واریوگرام‌های تجربی، برای هر شاخص محاسبه و ترسیم شده و مدل مناسب بر هر واریوگرام برازش داده شد. شکل‌های (۲) و (۳) واریوگرام‌های تجربی به همراه مدل‌های برازش شده در دو توده را نشان می‌دهند.

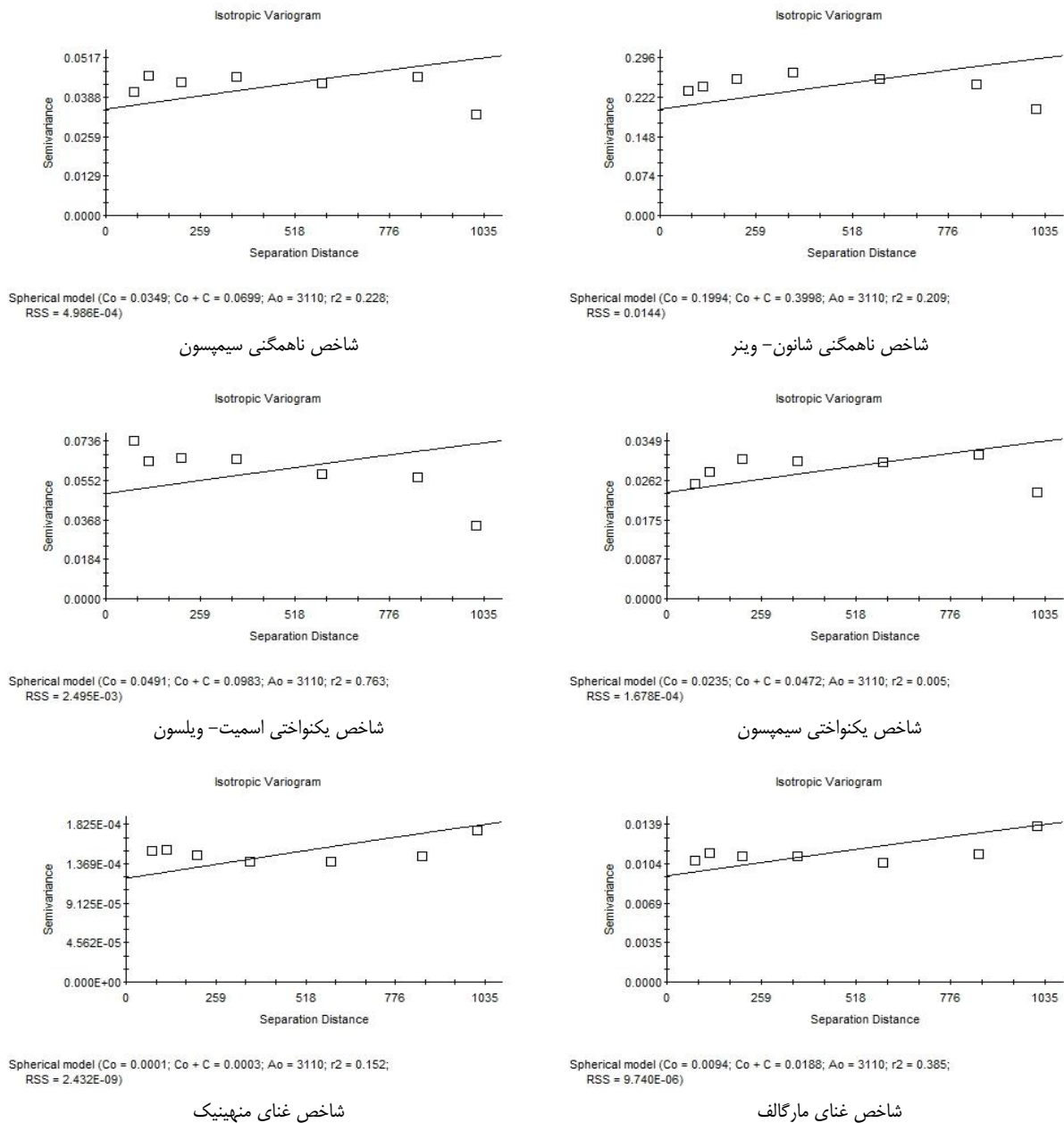
مطالعه این واریوگرام‌ها نشان می‌دهد که توزیع داده‌ها در مورد همه شاخص‌ها به جز شاخص‌های غنای مارگالف و منهینیک در توده مدیریت‌شده، به گونه‌ای است که نشانگر وجود روند در هر شاخص نمی‌باشد و واریوگرام‌ها (به استثنای شاخص‌های غنای در توده مدیریت‌شده)، حضور همبستگی مکانی را نشان می‌دهند. مدل‌های برازش داده شده به کلیه واریوگرام‌ها کروی بودند. واریوگرام‌های کروی دارای سقف معینی هستند، در نتیجه دامنه تأثیر مشخصی دارند و این حاکی از این است که شاخص‌های تنوع، الگوی تصادفی نداشته و دارای پراکنش مکانی می‌باشند. واریوگرام‌های شاخص‌های غنا در توده مدیریت‌شده از نوع واریوگرام‌های خطی دارای اثر قطعه‌ای خالص بودند که دلالت بر غلبه کامل بخش بدون ساختار متغیر، به بخش دارای ساختار آن دارد. نتایج کلی بررسی ساختار مکانی در دو توده، به شرح جدول (۳) می‌باشد:

جدول (۳) نشان می‌دهد که الگوی مکانی اکثر شاخص‌ها در هر دو توده از نوع کروی است. مقدار سقف (C+Co) و دامنه تأثیر آدر توده دست‌نخورده بیشتر از توده مدیریت‌شده بود (به ترتیب حدود ۳۱۱۰ متر در برابر ۱۵۰ متر). شاخص ساختار مکانی (C/(C+Co)) در هر دو توده در بازه‌ی ۵۰ تا ۵۶

1. Spherical

2. Range

درصد قرار گرفت و در طبقه‌ی همبستگی متوسط^۱ دسته‌بندی شد. در توده مدیریت‌شده، شاخص‌های غنا (مارگالف و منهینیک) اثر قطعه‌ای خالص^۲ نشان دادند. در مقابل، همین شاخص‌ها در توده دست‌نخورده با مدل کروی برازش شدند.



شکل (۲): واریوگرام شاخص‌های مورد مطالعه در توده دست‌نخورده

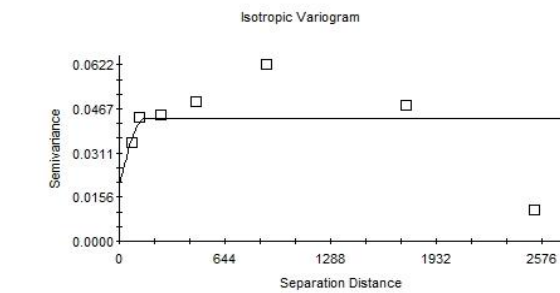
۴- بحث و نتیجه‌گیری

هدف این پژوهش بررسی تأثیر بهره‌برداری جنگل بر شاخص‌های تنوع زیستی و ساختار مکانی گونه‌های درختی بوده که در دو توده جنگلی دست‌نخورده و مدیریت‌شده اجرا و آنها را مقایسه نموده است. این مطالعه با ثبت و اندازه‌گیری ۷۳۲۱ پایه درخت از ۱۰ گونه چوبی (۷ گونه درختی و ۳ گونه درختچه‌ای) در ۲۶۴ قطعه نمونه، داده‌های جامعی را برای تحلیل فراهم آورده است. نتایج نشان‌دهنده تفاوت‌های ظریفی در شاخص‌های تنوع و غنا و تفاوت‌های بارزی در ساختار مکانی بین دو نوع توده هستند. در این مطالعه، شاخص‌های ناهمگنی شانون و سیمپسون در توده مدیریت‌شده به ترتیب ۱/۱۱۶ و ۰/۴۲۱ و در توده دست‌نخورده ۱/۰۲۶ و ۰/۴۱۶ برآورد شد. این تفاوت‌های اندک، به‌ویژه افزایش جزئی در شاخص شانون توده مدیریت‌شده، می‌تواند ناشی از تغییر در ترکیب گونه‌ای پس از بهره‌برداری باشد. برخی مطالعات نشان داده‌اند که فعالیت‌های مدیریتی مانند برداشت انتخابی یا ایجاد

1. Moderate correlation

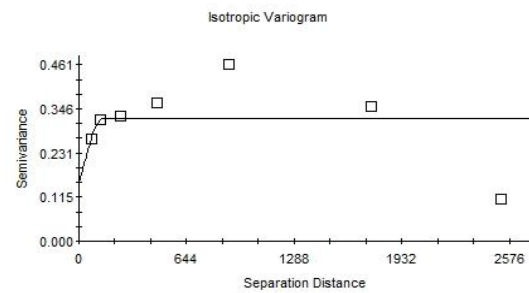
2. Pure nugget effect

شکاف در تاج پوشش، می‌تواند با کاهش تسلط گونه‌های غالب و ایجاد فرصت برای گونه‌های دیگر، به‌طور موقت یا در مقیاس‌های خاص، منجر به افزایش تنوع گونه‌ای شود (Mohammadnezhad-Kiasari et al., 2023؛ صید و همکاران، ۱۳۹۲؛ محمدی و شتابی، ۱۳۹۵).



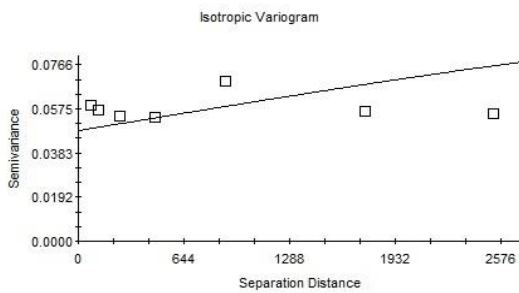
Spherical model (Co = 0.0195; Co + C = 0.0431; Ao = 151; r2 = 0.040; RSS = 1.445E-03)

شاخص ناهمگنی سیمپسون



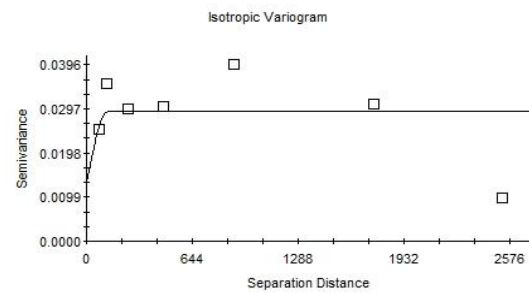
Spherical model (Co = 0.1476; Co + C = 0.3222; Ao = 149; r2 = 0.037; RSS = 0.0663)

شاخص ناهمگنی شانون-وینر



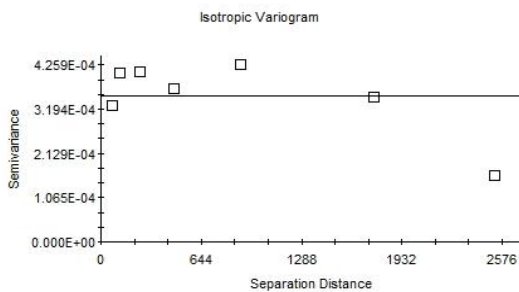
Spherical model (Co = 0.0480; Co + C = 0.0961; Ao = 611; r2 = 0.001; RSS = 8.622E-04)

شاخص یکنواختی اسمیت-ویلسون



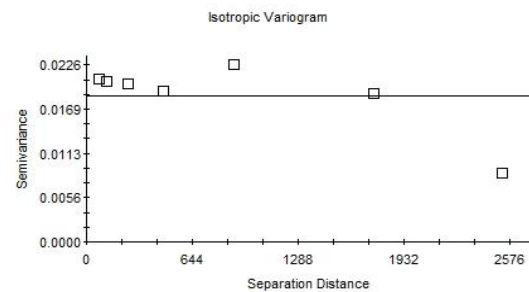
Spherical model (Co = 0.0127; Co + C = 0.0291; Ao = 127; r2 = 0.028; RSS = 5.323E-04)

شاخص یکنواختی سیمپسون



Linear model (Co = 0.0004; Co + C = 0.0004; Ao = 2526; r2 = 0.572; RSS = 5.009E-08)

شاخص غنای منهینیک



Linear model (Co = 0.0187; Co + C = 0.0187; Ao = 2526; r2 = 0.636; RSS = 1.248E-04)

شاخص غنای مارگالف

شکل (۳): واریوگرام شاخص‌های مورد مطالعه در توده بهره‌برداری شده

شاخص اسمیت-ویلسون نیز در توده مدیریت‌شده (۰/۲۷) بیشتر از توده دست‌نخورده (۰/۲۱) بود که می‌تواند حاکی از کاهش تسلط گونه‌های غالب در اثر برداشت باشد (Sheng et al., 2024). با این حال، شاخص‌های یکنواختی در هر دو توده مقادیر نسبتاً مشابهی (حدود ۰/۴۷ برای شاخص سیمپسون) داشتند، اما ضریب تغییرات پایین‌تر در توده دست‌نخورده، نشان‌دهنده پایداری و توزیع متعادل‌تر گونه‌ها در این توده است. این یافته با این ایده که جنگل‌های دست‌نخورده به دلیل فرآیندهای اکولوژیکی طولانی‌مدت، دارای جوامع گونه‌ای پایدارتر و یکنواخت‌تر هستند، همخوانی دارد (Yeboah et al., 2016؛ اسحاقی‌راد و همکاران، ۱۳۸۸؛ امیری و همکاران، ۱۳۸۷). در مورد شاخص‌های غنا (مارگالف و منهینیک)، تفاوت‌های اندکی بین دو توده مشاهده شد، اما ضریب تغییرات بالاتر در توده مدیریت‌شده (به ترتیب ۰/۴۰۶ و ۰/۴۵۴) نشان‌دهنده تغییرپذیری بیشتر غنا و پراکنش کمتر همگن گونه‌ها در این توده است. این نوسانات در غنای گونه‌ای در جنگل‌های مدیریت‌شده می‌تواند به دلیل ماهیت ناهمگن فعالیت‌های برداشت و بازسازی باشد که منجر به توزیع نامنظم‌تر گونه‌ها می‌شود (Martín-Queller et al., 2013؛ پوربابایی و رنج‌آور، ۱۳۸۷). در حالی که برخی مطالعات

نشان می‌دهند که مدیریت جنگل می‌تواند منجر به کاهش تنوع و غنا شود (Huang et al., 2023; Paillet et al., 2010)، نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که تأثیر بر شاخص‌های تنوع و غنا ممکن است پیچیده‌تر باشد و بسته به نوع و شدت مدیریت، می‌تواند متفاوت باشد.

جدول (۳): پارامترهای مدل‌های برازش داده شده بر واریوگرام‌های تجربی شاخص‌های تنوع زیستی در دو توده مورد بررسی

نوع توده	شاخص	مدل واریوگرام (حد سقف)	اثر قطعه‌ای C0	دامنه تأثیر	شاخص ساختار مکانی $\frac{C}{C+C_0}$	کلاس همبستگی	فاصله گام (متر)	MBA	MSDR
ناهمگنی	شانون	کروی	۰/۱۴۷۶	۱۴۹	۵۴/۱۹	متوسط	۲۵۷۶	-۰/۰۰۷۵	۰/۹۹۲۶
	سیمپسون	کروی	۰/۰۴۳۱	۱۵۱	۵۴/۷۵	متوسط	۲۵۷۶	-۰/۰۰۲۲	۰/۹۹۲۵
یکنواختی	سیمپسون	کروی	۰/۰۲۹۲	۱۲۷	۵۶/۱۶	متوسط	۲۵۷۶	-۰/۰۰۰۴	۰/۹۹۲۴
	اسمیت-ویلسون	کروی	۰/۰۹۶۱	۶۱۱	۵۰/۰۵	متوسط	۲۵۷۶	-۰/۰۰۱۳	۰/۹۹۲۴
مدیریت شده	مارگالف	خطی بدون سقف	۰/۰۱۸۷	۰/۰۱۸۷	اثر قطعه‌ای خالص		۲۵۷۶	-۰/۰۰۰۳	۰/۹۹۲۴
	منهینیک	خطی بدون سقف	۰/۰۰۰۴	۰/۰۰۰۴	اثر قطعه‌ای خالص		۲۵۷۶	-۰/۰۰۰۵	۰/۹۹۳۲
ناهمگنی	شانون	کروی	۰/۳۹۹۸	۳۱۱۰	۵۰/۱۲	متوسط	۱۰۳۵	-۰/۰۰۶۸	۰/۹۹۰۷
	سیمپسون	کروی	۰/۰۶۹۹	۳۱۱۰	۵۰/۰۷	متوسط	۱۰۳۵	-۰/۰۰۳۸	۰/۹۹۰۸
دست نخورده	سیمپسون	کروی	۰/۰۴۷۲	۳۱۱۰	۲۱/۵۰	متوسط	۱۰۳۵	-۰/۰۰۴۸	۰/۹۹۱۳
	اسمیت-ویلسون	کروی	۰/۰۹۸۳	۳۱۱۰	۵۰/۰۵	متوسط	۱۰۳۵	-۰/۰۰۸۴	۰/۹۹۱۶
غنا	مارگالف	کروی	۰/۰۱۸۸	۳۱۱۰	۵۰/۰۰	متوسط	۱۰۳۵	-۰/۰۰۱۹	۰/۹۹۰۹
	منهینیک	کروی	۰/۰۰۰۳	۳۱۱۰	۵۲/۰۰	متوسط	۱۰۳۵	-۰/۰۰۰۵	۰/۹۹۰۵

یکی از مهم‌ترین یافته‌های این مطالعه، تفاوت‌های بارز در ساختار مکانی تنوع زیستی بین دو توده است. واریوگرام‌های تجربی نشان دادند که توزیع داده‌ها برای اکثر شاخص‌ها (به جز شاخص‌های غنا در توده مدیریت‌شده) از الگوی کروی پیروی می‌کند که نشان‌دهنده وجود همبستگی مکانی و عدم پراکنش تصادفی است (Bastias et al., 2020; He and Legendre, 2002). این الگوهای مکانی در اکوسیستم‌های طبیعی، تحت تأثیر عوامل محیطی و محدودیت‌های پراکنش، انتظار می‌رود. یافته‌های مشابهی در جنگل‌های شمال ایران نیز مشاهده شده است که مدیریت و برداشت باعث کاهش پیوستگی مکانی گونه‌ها می‌شود (کاظم‌نژاد و همکاران، ۱۳۹۰). در این راستا، نتایج جدول (۳) نشان می‌دهد که الگوی مکانی اکثر شاخص‌ها از نوع کروی بوده که بیانگر وجود ساختار مکانی مشخص در پراکنش گونه‌های چوبی هر دو توده است. دامنه تأثیر و مقدار سقف واریوگرام در توده دست‌نخورده به‌طور محسوسی بزرگ‌تر از توده مدیریت‌شده بود که حاکی از تداوم بیشتر همبستگی مکانی و یکنواختی مکانی بالاتر در تنوع گونه‌ای این توده است. همچنین قرارگیری شاخص ساختار مکانی در طبقه همبستگی متوسط نشان می‌دهد که بین واحدهای نمونه‌برداری، همبستگی مکانی در سطحی قابل توجه برقرار بوده است. مشاهده اثر قطعه‌ای خالص برای شاخص‌های غنای مارگالف و منهینیک در توده مدیریت‌شده بیانگر فقدان ساختار مکانی قابل تشخیص و تصادفی شدن پراکنش گونه‌ها در این توده است، در حالی که وجود مدل کروی برای همین شاخص‌ها در توده دست‌نخورده، نشان‌دهنده الگوی مکانی پیوسته و سازمان‌یافته‌تر در پراکنش گونه‌هاست. این تفاوت‌ها مؤید آن است که فعالیت‌های بهره‌برداری، بیش از آنکه مقدار شاخص‌ها را دگرگون سازد، موجب تضعیف سازمان‌یافتگی و همبستگی مکانی تنوع گونه‌ای می‌شود. مقدار سقف (C+C₀) و دامنه تأثیر در توده دست‌نخورده به‌طور معنی‌داری بیشتر از توده مدیریت‌شده بود (حدود ۳۱۱۰ متر در برابر ۱۵۰ متر). این امر نشان‌دهنده تداوم بیشتر همبستگی مکانی و یکنواختی مکانی بالاتر در تنوع گونه‌ای توده دست‌نخورده است. جنگل‌های دست‌نخورده به دلیل عدم وجود اختلالات انسانی گسترده، اغلب دارای الگوهای مکانی پایدارتر و پیوسته‌تر هستند که ناشی از فرآیندهای اکولوژیکی طولانی‌مدت است (Watson et al., 2018).

شاخص ساختار مکانی (C/(C+C₀)) در هر دو توده در محدوده ۵۰ تا ۵۶ درصد قرار گرفت که نشان‌دهنده همبستگی متوسط مکانی است. این بدان معناست که حتی در توده مدیریت‌شده نیز، تا حدی همبستگی مکانی وجود دارد، اما دامنه آن به شدت کاهش یافته است. یافته قابل توجه دیگر، مربوط به شاخص‌های غنا (مارگالف و منهینیک) در توده مدیریت‌شده است که دارای اثر قطعه‌ای خالص بودند. این پدیده نشان‌دهنده عدم وجود ساختار مکانی قابل تشخیص و پراکنش تصادفی گونه‌ها در این توده است (Bogaert and Russo, 1999; Ambrosio et al., 2004; نوری و همکاران، ۱۳۸۹). اثر قطعه‌ای خالص به این معنی است که تغییرات در فواصل کوچک‌تر از فاصله نمونه‌برداری، به اندازه تغییرات در فواصل بزرگ‌تر است و این نشان‌دهنده از بین رفتن الگوهای مکانی و تصادفی شدن توزیع گونه‌ها است. این از دست دادن ساختار مکانی در جنگل‌های مدیریت‌شده می‌تواند نتیجه مستقیم اختلالات ناشی از بهره‌برداری باشد که الگوهای اکولوژیکی تثبیت‌شده را بر هم می‌زند و منجر به توزیع نامنظم‌تر گونه‌ها می‌شود (Potapov et al., 2017; Brown and Gurevitch, 2004). در مقابل، در توده دست‌نخورده، همین شاخص‌ها دارای مدل کروی بودند که وجود الگوی مکانی معنی‌دار و پیوسته در پراکنش گونه‌ها را تأیید می‌کند.

نتایج این مطالعه نشان داد که شاخص‌های تنوع زیستی در هر دو توده، به جز شاخص‌های غنای منهینیک و مارگالف در توده بهره‌برداری‌شده، از ساختار مکانی معنی‌داری برخوردار بودند. همچنین دامنه تأثیر حاکمی از آن است که میزان ساختار مکانی شاخص‌های تنوع در توده دست‌نخورده بیشتر

از توده بهره‌برداری شده است. این الگو با یافته‌های کوچ و همکاران (۱۳۹۱) هم‌راستا است که بیان می‌کنند آشفستگی در جنگل‌های شمال منجر به افزایش تغییرپذیری و ناپایداری اکوسیستم می‌شود. در این چارچوب، بهره‌برداری جنگل باعث کاهش دامنه تأثیر، کاهش همبستگی مکانی و در نهایت تضعیف ساختار مکانی تنوع گونه‌ای شده است، در حالی که جنگل‌های دست‌نخورده ساختار مکانی پایدارتر و تنوع مکانی منسجم‌تری نشان می‌دهند. این نتایج اهمیت توجه به آرایش مکانی و فرآیندهای اکولوژیکی زیربنایی، علاوه بر تعداد گونه‌ها، را برای مدیریت و حفاظت مؤثر جنگل برجسته می‌کند و نشان می‌دهد که حتی در صورت مشاهده انعطاف‌پذیری برخی شاخص‌های تنوع در توده‌های مدیریت‌شده، پایداری اکولوژیکی بنیادی همچنان در معرض تهدید قرار می‌گیرد (پوربابایی و رنج‌آور، ۱۳۸۷؛ صید و همکاران، ۱۳۹۲).

از منظر کاربردی، نتایج این پژوهش می‌تواند راهنمایی مهم برای برنامه‌ریزی و مدیریت بهره‌برداری جنگل‌های طبیعی فراهم آورد. با توجه به اینکه بهره‌برداری جنگل بیش از آنکه بر مقدار شاخص‌های تنوع اثر بگذارد، موجب تضعیف ساختار و پیوستگی مکانی تنوع گونه‌ای می‌شود، توصیه می‌شود در برنامه‌های مدیریتی، حفظ ساختار مکانی توده‌ها به‌عنوان یکی از اهداف اصلی مدنظر قرار گیرد. اجرای الگوهای برداشت با شدت و پراکنش مکانی کنترل‌شده، پرهیز از تمرکز برداشت در مقیاس‌های مکانی محدود، و حفظ لکه‌های دست‌نخورده در داخل توده‌های مدیریت‌شده می‌تواند به کاهش گسست مکانی و حفظ سازمان‌یافتگی فضایی گونه‌ها کمک کند. همچنین، نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که به‌کارگیری رویکردهای مبتنی بر تنوع مکانی در طراحی عملیات بهره‌برداری، می‌تواند نقش مؤثری در ارتقای پایداری اکولوژیکی توده‌ها و کاهش اثرات بلندمدت اختلالات انسانی داشته باشد. از این‌رو، ترکیب شاخص‌های کلاسیک تنوع با تحلیل‌های زمین‌آمار می‌تواند به‌عنوان ابزاری کارآمد در پایش و تصمیم‌گیری مدیریتی جنگل‌های طبیعی مورد استفاده قرار گیرد.

سپاسگزاری

ار تمام کسانی که در مسیر انجام این تحقیق نهایت همکاری را داشتند تقدیر می‌گردد. همچنین از دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان بابت همکاری در اجرای مطالعات میدانی در جنگل آموزشی شصت کلاته تشکر می‌گردد.

منابع

- اخوان، ر.، زبیری، م.، زاهدی‌امیری، ق.، نمیرانیان، م.، و ماندالاز، د. (۱۳۸۷). بررسی ساختار مکانی و برآورد موجودی حجمی جنگل‌های خزری با استفاده از روش زمین آمار (geostatistics). منابع طبیعی ایران، ۱(۵۹)، ۱۰۲-۸۹.
- اسحاقی‌راد، ج.، سیدی، ن.، و حسن‌زاد ناورودی، ا. (۱۳۸۸). تأثیر اجرای شیوه‌ی تک‌گزینی بر تنوع گیاهان چوبی (مطالعه موردی: سری جنبه سرا- گیلان). جنگل ایران، ۱(۴)، ۲۷۷-۲۸۵.
- امیری، م.، درگاهی، د.، حبشی، ه.، آزادفر، د.، و سلیمانی، ن. (۱۳۸۷). مقایسه تراکم زادآوری و تنوع گونه‌ای در توده‌های طبیعی و مدیریت‌شده جنگل بلوط لوه. علوم کشاورزی و منابع طبیعی، ۱۵(۶)، ۵۳-۴۴.
- بی‌نام. (۱۳۷۴). طرح جنگل‌داری، بخش ۱ جنگل دکتر بهرامنیا، حوضه آبخیز ۸۵، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، ۲۵۲ صفحه.
- پور بابایی، ح.، و رنج‌آور، ع. (۱۳۸۷). تأثیر شیوه تدریجی-پناهی بر تنوع گونه‌های گیاهی در جنگل‌های راش شرقی (مطالعه موردی: جنگل‌های سفارود- گیلان). تحقیقات جنگل و صنوبر ایران، ۱۶(۱)، ۷۳-۶۱.
- حسنی‌پاک، ع. ا. (۱۳۸۹). زمین آمار (ژئواستاتستیک). تهران: انتشارات دانشگاه تهران، ۳۳۰ ص.
- صید، س. ز.، معیری، م. ه.، و محمدی، ج. (۱۳۹۴). مقایسه تنوع گونه‌های درختی در توده‌های جنگلی مدیریت‌شده (قطع‌گزینشی) و مدیریت نشده راش (مطالعه موردی: جنگل شصت کلاته گرگان). پژوهش‌های گیاهی (زیست‌شناسی ایران)، ۲۸(۴)، ۷۹۳-۷۸۴.
- کاظم‌نژاد، ف.، پورمحمدعلی حبیبی، س.، و داستانپور، م. (۱۳۹۰). بررسی تنوع زیستی پوشش گیاهی در توده‌های مدیریت‌شده و مدیریت نشده راش - ممرستان (مطالعه موردی: سری لاروچال - نوشهر). علوم و فنون منابع طبیعی، ۱(۱)، ۶۵-۷۴.
- کوچ، ی.، حسینی، س. م.، محمدی، ج.، و حجتی، س. م. (۱۳۹۱). بررسی ساختار مکانی خصوصیات خاک در یک توده جنگلی راش با استفاده از روش زمین آمار. علوم آب و خاک، ۱۶(۶۰)، ۲۳۹-۲۵۱.
- محمدی، ج.، و شتایی، ش. (۱۳۹۵). ارزیابی وضعیت تنوع گونه‌های درختی در توده‌های طبیعی و مدیریت‌شده طرح جنگلداری شصت کلاته گرگان. پژوهش‌های علوم و فناوری چوب و جنگل، ۲۳(۱)، ۱۳۱-۱۱۳.
- نوری، ز.، فقهی، ج.، زاهدی‌امیری، ق.، زبیری، م.، و رحمانی، ر. (۱۳۸۹). ارزیابی تنوع گونه‌های درختی و درختچه‌ای و اثر آن در مدیریت پایداری جنگل (بررسی موردی: بخش پاتم جنگل خیرود). جنگل و فرآورده‌های چوب (منابع طبیعی ایران)، ۶۳(۲)، ۲۱۴-۲۰۱.
- یوسفوند مفرد، م.، سوسنی، ج.، نقوی، ح.، ابراری واجاری، ک.، و شعبانیان، ن. (۱۴۰۲). تلفیق آمار زمینی و گوگل ارث برای برآورد زیست توده و ذخیره کربن درختان بلوط ایرانی (*Quercus branti* Lindl) (مطالعه موردی: منطقه دادآباد خرم آباد). حفاظت زیست بوم، ۱۱(۲۲)، ۲۴۷-۲۳۸.
- Akhavan, R., Amiri, G.Z., and Zobeiri, M. (2010). Spatial variability of forest growing stock using geostatistics in the Caspian region of Iran. *Caspian Journal of Environmental Sciences*, 8(1), 43-53.
- Almeida, D.D., José Freire, F., Vinícius da Silva, M., do Nascimento Barbosa, U., Monteiro Cavalcante, D., and Araújo Silva, E. (2023). Geospatial distribution of forest species in the botanical garden of recife, pernambuco, Brazil. *Floresta*, 53(2), 145-154.
- Ambrosio, L., Iglesias, L., Marin, C., and Del Monte, J.P. (2004). Evaluation of sampling methods and assessment of the sample size to estimate the weed seedbank in soil, taking into account spatial variability. *Weed Research*, 44(3), 224-236.
- Atkinson, P.M. (1997). Technical note On estimating measurement error in remotely-sensed images with the variogram. *International Journal of Remote Sensing*, 18(14), 3075-3084.

- Barreras, A., Alanís de la Rosa, J.A., Mayorga, R., Cuenca, R., Moreno-G.C., Godínez, C., Delgado, C., Soriano-Luna, M.D.L.Á., George, S., Aldrete-Leal, M. I., Medina, S., Romero, J., Villela, S., Lister, A., Sheridan, R., Flores, R., Crowther, T. W., and Guevara, M. (2023). Spatial predictions of tree density and tree height across Mexico forests using ensemble learning and forest inventory data. *Ecology and Evolution*, 13(5), e10090.
- Bastias, C.C., Truchado, D.A., Valladares, F., Benavides, R., Bouriaud, O., Bruelheide, H., Coppi, A., Finér, L., Gimeno, T.E., Jaroszewicz, B., Scherer-Lorenzen, M., Selvi, F., and De la Cruz, M. (2020). Species richness influences the spatial distribution of trees in European forests. *Oikos*, 129(3), 380-390.
- Bogaert, P., and Russo, D. (1999). Optimal spatial sampling design for the estimation of the variogram based on a least squares approach. *Water Resources Research*, 35(4), 1275-1289.
- Brown, K. A., and Gurevitch, J. (2004). Long-term impacts of logging on forest diversity in Madagascar. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 101(16), 6045-6049.
- Chen, H.L., Lewison, R.L., An, L., Tsai, Y.H., Stow, D., Shi, L., and Yang, S. (2020). Assessing the effects of payments for ecosystem services programs on forest structure and species biodiversity. *Biodiversity and Conservation*, 29(7), 2123-2140.
- Chen, S., Chen, J., Jiang, C., Yao, R.T., Xue, J., Bai, Y., Wang, H., Jiang, C., Wang, S., Zhong, Y., Liu, E., Guo, L., Lv, S., and Wang, S. (2022). Trends in research on forest ecosystem services in the most recent 20 years: A bibliometric analysis. *Forests*, 13(7), 1087.
- Damiti, R. A., Pakaya, P., Prasetyo, M. H., Baderan, D. W. K., & Utina, R. (2025). Stabilitas Ekosistem Hutan Indonesia dalam Menghadapi Deforestasi dan Kerusakan Lingkungan: Tinjauan Literatur. *Botani: Publikasi Ilmu Tanaman dan Agribisnis*, 2(2), 176-188.
- Douzouné, K., Oloukoi, J., Gongnet, E.E., Sèdjro, T., and Affossogbe, A. (2024). Application of ordinary kriging in mapping soil organic carbon in chad using soilgrids data. *South African Journal of Geomatics*, 13(2), 397-408.
- Eskelson, B.N., Anderson, P.D., Hagar, J.C., and Temesgen, H. (2011). Geostatistical modeling of riparian forest microclimate and its implications for sampling. *Canadian Journal of Forest Research*, 41(5), 974-985.
- Fazlollahi Mohammadi, M., Tobin, B., Jalali, S.G., Kooch, Y., and Riemann, R. (2022). Fine-scale topographic influence on the spatial distribution of tree species diameter in old-growth beech (*Fagus orientalis* Lipsky.) forests, northern Iran. *Scientific reports*, 12(1), 7633.
- Garcia, A.G., Araujo, M.R., Uramoto, K., Walder, J.M.M., and Zucchi, R.A. (2017). Geostatistics and Geographic Information System to Analyze the Spatial Distribution of the Diversity of *Anastrepha* Species (Diptera: Tephritidae): the Effect of Forest Fragments in an Urban Area. *Environmental Entomology*, 46(6), 1189-1194.
- Ghorbanzadeh, N., Pourbabaei, H., Salehi, A., and Soltani Toolarood and SJ, A. (2019). Spatial analysis of biodiversity soil macrofauna in *Populus deltoides* plantation of northern forests of Iran. *Caspian Journal of Environmental Sciences*, 17(2), 155-162.
- Gousheghir, Z., Feghhi, J., and Innes, J.L. (2022). Challenges facing the improvement of forest management in the Hyrcanian forests of Iran. *Forests*, 13(12), 2180.
- Guo, L., Zhang, Y., Xu, M., Yan, J., Zhang, H., Zou, Y., and Gao, J. (2024). A Novel Workflow for Mapping Forest Canopy Height by Synergizing ICESat-2 and Multi-Sensor Data. *Forests*, 15(12), 2139.
- He, F., and Legendre, P. (2002). Species diversity patterns derived from Species- Area models. *Ecology*, 83(5), 1185-1198.
- Huang, C., Fu, S., Tong, Y., Ma, X., Yuan, F., Ma, Y., Feng, C., and Liu, H. (2023). Impacts of forest management on the biodiversity and sustainability of *Carya dabieshanensis* forests. *Forests*, 14(7), 1331.
- Ishii, H. T., Tanabe, S.I., and Hiura, T. (2004). Exploring the relationships among canopy structure, stand productivity, and biodiversity of temperate forest ecosystems. *Forest Science*, 50(3), 342-355.
- Jayasuriya, J., Jagadeeswaran, R., Kumaraperumal, R., Balaji, K., and Raju, M. (2025). Geostatistical assessment and mapping of soil spatial variability in Sirumugai, Western Ghats. *Plant Science Today*, 11(4), 1-12.
- Jucker, T., Bouriaud, O., Avacaritei, D., and Coomes, D.A. (2014). Stabilizing effects of diversity on aboveground wood production in forest ecosystems: linking patterns and processes. *Ecology Letters*, 17(12), 1560-1569.
- Karahan, G., and Erşahin, S. (2018). Geostatistical analysis of spatial variation in forest ecosystems. *Eurasian Journal of Forest Science*, 6(1), 9-22.
- Levick, S.R., Hessenmöller, D., and Schulze, E.D. (2016). Scaling wood volume estimates from inventory plots to landscapes with airborne LIDAR in temperate deciduous forest. *Carbon Balance and Management*, 11(1), 7.
- Manjate, A., Zahabu, E., Ilstedt, U., Egas, A., and Goodman, R.C. (2025). Structure and Composition of a Selectively Logged Miombo Woodland in Central Mozambique. *Forests*, 16(4), 569.
- Margalef, R. (1958) Information Theory in Ecology. *General Systems*, 3, 36-71.
- Martín-Queller, E., Diez, J.M., Ibanez, I., and Saura, S. (2013). Effects of silviculture on native tree species richness: interactions between management, landscape context and regional climate. *Journal of Applied Ecology*, 50(3), 775-785.
- Meena, A., Bidalia, A., Hanief, M., Dinakaran, J., and Rao, K.S. (2019). Assessment of above-and belowground carbon pools in a semi-arid forest ecosystem of Delhi, India. *Ecological processes*, 8(1), 8.
- Menhinick, E.F. (1964). A comparison of some species-individuals diversity indices applied to samples of field insects. *Ecology*, 45(4), 859-861.
- Minatti, M., Sanquetta, C.R., Péllico Neto, S., Dalla Corte, A.P., and Cysneiros, V.C. (2021). Geostatistics as a tool to reduce the sampling effort in forest inventories. *Scientia Agraria Paranaensis*, 20(2), 174-179.
- Mohammadnezhad- Kiasari, S., Sagheb- Talebi, K., Rahmani, R., and Ghelichnia, H. (2023). Comparison of plant diversity between managed and unmanaged forests in Haftkhal, Mazandaran Province, North of Iran. *Asian Journal of Forestry*, 7(2), 107-114.
- Nunes, Í.L., Afonso, R.L.C., da Silva, B.A., Rocha, G.C., Minette, L.J., de Lima, N.N., and de Miranda, C.F.M. (2020). Spatial variability of soil physical properties as a result of different tillage systems. *Brazilian Journal of Development*, 6(7), 42619-42631.
- Olthoff, A.E., Gómez, C., Alday, J.G., and Martínez-Ruiz, C. (2018). Mapping forest vegetation patterns in an Atlantic-Mediterranean transitional area by integration of ordination and geostatistical techniques. *Journal of Plant Ecology*, 11(1), 114-122.
- Osei, R., Del Río, M., Ruiz-Peinado, R., Titeux, H., Bielak, K., Bravo, F., Collet, C., Cools, C., Cornelis, J.T., Drössler, L., Heym, M., Korboulewsky, N., Löf, M., Muys, B., Najib, Y., Nothdurft, A., Pretzsch, H., Skrzyszewski, J., and Ponette, Q. (2022). The

- distribution of carbon stocks between tree woody biomass and soil differs between Scots pine and broadleaved species (beech, oak) in European forests. *European Journal of Forest Research*, 141(3), 467-480.
- Paillet, Y., Bergès, L., Hjäältén, J., Ódor, P., Avon, C., Bernhardt-Römermann, M., Bijlsma, R.J., De Bruyn, L., Fuhr, M., Grandin, U., Kanka, R., Lundin, L., Luque, S., Magura, T., Matesanz, S., Mészáros, I., Sebastià, M.T., Schmidt, W., Standovár, T., Tóthmérész, B., Uotila, A., Valladares, F., Vellak, K., and Virtanen, R. (2010). Biodiversity differences between managed and unmanaged forests: Meta-analysis of species richness in Europe. *Conservation biology*, 24(1), 101-112.
- Pan, Y., McCullough, K., and Hollinger, D.Y. (2018). Forest biodiversity, relationships to structural and functional attributes, and stability in New England forests. *Forest Ecosystems*, 5(1), 14.
- Pennino, M.G., Paradinás, I., Illian, J.B., Muñoz, F., Bellido, J.M., López-Quílez, A., and Conesa, D. (2019). Accounting for preferential sampling in species distribution models. *Ecology and Evolution*, 9(1), 653-663.
- Potapov, P., Hansen, M.C., Laestadius, L., Turubanova, S., Yaroshenko, A., Thies, C., Smith, W., Zhuravleva, I., Komarova, A., Minnemeyer, S., and Esipova, E. (2017). The last frontiers of wilderness: Tracking loss of intact forest landscapes from 2000 to 2013. *Science advances*, 3(1), e1600821.
- Rupyshev, Y., Sandag, K., Bazha, S., Danzhalova, E., Drobyshev, Y., Bogdanov, E., and Petukhov, I. (2025). The influence of ecological conditions on the formation of forest communities in the Selbe-Goliin Ekh Nature Reserve (Mongolia). *Historia Naturalis B ulgarica*, 47(10), 325-334.
- Shannon, C.E., and Weaver, W. (1949). *The Mathematical Theory of Communication*. Urbana, IL: The University of Illinois Press, 1-117.
- Sheng, Q., Dong, L., and Liu, Z. (2024). Driving forces of herbaceous species diversity in natural broadleaf forests from in Maershan from Northeast China. *Frontiers in Plant Science*, 15, 1449421.
- Simpson, E.H. (1949). Measurement of diversity. *Nature*, 163(4148), 688-688.
- Sismanis, M., Gitas, I.Z., Georgopoulos, N., Stavrakoudis, D., Gkounti, E., and Antoniadis, K. (2024). A Spectral-Spatial Approach for the Classification of Tree Cover Density in Mediterranean Biomes Using Sentinel-2 Imagery. *Forests*, 15(11), 2025.
- Smith, B., and Wilson, J.B. (1996). A consumer's guide to evenness indices. *Oikos*, 70-82.
- Soltani-Mohammadi, S., and Safa, M. (2016). A Simulated Annealing based Optimization Algorithm for Automatic Variogram Model Fitting. *Archives of Mining Sciences*, 61(3), 635-649.
- Sparks, A.M., Corrao, M.V., Keefe, R.F., Armstrong, R., and Smith, A.M. (2024). An accuracy assessment of field and airborne laser scanning-derived individual tree inventories using felled tree measurements and log scaling data in a mixed conifer forest. *Forest Science*, 70(3), 228-241.
- Stankić, I., Kopljar, A., and Mešić, A. (2025). Designing field routes for data collection during forest inventories to assess wood resources. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 1339, No. 1, p. 012031). IOP Publishing.
- Ter Steege, H., Pitman, N.C., Do Amaral, I.L., de Souza Coelho, L., de Almeida Matos, F.D., de Andrade Lima Filho, D., and Hilário, R.R. (2023). Mapping density, diversity and species-richness of the Amazon tree flora. *Communications Biology*, 6(1), 1130.
- Tsogbadrakh, O., Sukhbaatar, G., Ganbaatar, B., Batchuluun, B., Altanjin, D., Kim, K.W., Seah, K.Y., and Oyuntsetseg, B. (2024). Tree canopy area-dependent changes in soil properties: a comparative study in the southern limit of boreal forest distribution. *Forest Science and Technology*, 20(1), 58-66.
- Vašát, R., Pavlu, L., Boruvka, L., Drabek, O., and Nikodem, A. (2013). Mapping the Topsoil pH and Humus Quality of Forest Soils in the North Bohemian Jizerské hory Mts. Region with Ordinary, Universal, and Regression Kriging: Cross-Validation Comparison. *Soil & Water Research*, 8(3), 97-104
- Wang, Y., Liu, Z., Li, J., Cao, X., and Lv, Y. (2024). Assessing the relationship between tree growth, crown size, and neighboring tree species diversity in mixed coniferous and broad forests using crown size competition indices. *Forests*, 15(4), 633.
- Watson, J.E.M., Evans, T., Venter, O., Williams, B., Tulloch, A., Stewart, C., Thompson, I., Ray, J.C., Murray, K., Salazar, A., McAlpine, C., Potapov, P., Walston, J., Robinson, J.G., Painter, M., Wilkie, D., Filardi, C., Laurance, W.F., and Houghton, R.A., Maxwell, S., Grantham, H., Samper, C., Wang, S., Laestadius, L., Runtig, R.K., Silva-Chávez, G.A., Ervin, J., Lindenmayer, D. (2018). The exceptional value of intact forest ecosystems. *Nature Ecology & Evolution*, 2(4), 599-610.
- Yeboah, D., Chen, H.Y., and Kingston, S. (2016). Tree species richness decreases while species evenness increases with disturbance frequency in a natural boreal forest landscape. *Ecology and Evolution*, 6(3), 842-850.
- Zheng, L., Barry, K.E., Guerrero-Ramírez, N.R., Craven, D., Reich, P.B., Verheyen, K., ... and Hautier, Y. (2024). Effects of plant diversity on productivity strengthen over time due to trait-dependent shifts in species overyielding. *Nature Communications*, 15(1), 2078.

Assessment of the Spatial Structure of Species Diversity Indices Using Geostatistics in Exploited and Undisturbed Stands of the Shast-Kalateh Forest, Gorgan

Shohreh Rahbari¹, Reza Basiri^{*2}, Hashem Habashi³, Maleeha Mozayyan⁴



Research Article

1. M.Sc. Student, Department of forestry and Cellulose industries, Faculty of Natural Resources, Behbahan Khatam Alanbia University of Technology, Behbahan, Iran.

shohreh.r88@gmail.com

2. Associate Professor, Department of forestry and Cellulose industries, Faculty of Natural Resources, Behbahan Khatam Alanbia University of Technology, Behbahan, Iran.

basiri52@yahoo.com

* Corresponding author

3. Associate Professor, Department of Silviculture and Forest Ecology, Faculty of Forest Engineering Sciences, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran.

habashi.hashem@gmail.com

4. Assistant Professor, Department of Rangeland & Watershed Management, Faculty of Natural Resources, Behbahan Khatam Alanbia University of Technology, Behbahan, Iran.

mmozayyan80@yahoo.com

Article Code: 2511-1139

Countinus Pagnation: 1075-1086

Received: 22 November 2025

Accepted: 07 January 2026

Online: 29 January 2026

Review speed: 47 days

Citation:

Rahbari, SH., Basiri, R., Habashi, H., and Mozayyan, M. (2025). Assessment of the Spatial Structure of Species Diversity Indices Using Geostatistics in Exploited and Undisturbed Stands of the Shast-Kalateh Forest, Gorgan, Management of Natural Ecosystems, 5(2), 32-43.

Abstract

Spatial statistics is a powerful tool in ecological studies, and geostatistics, as a branch based on the theory of regionalized variables, employs variograms to quantitatively assess the spatial variability of phenomena. Although numerous studies have done biodiversity and the impacts of forest exploitation, information on the spatial distribution of species diversity indices in forests remains limited. This study aimed to examine the spatial structure of diversity indices of woody species in two forest stands one exploited and one undisturbed of the Shast-Kalateh Research Forest in Gorgan, using geostatistical methods. The study was conducted in Series One of the Shast-Kalateh Forest, involving a stand with 30 years of selective logging history and an undisturbed stand. Sampling was performed using a systematic random design with a 100×150 m grid, and in total of 264 sample plots of 400 m², equally distributed across the two stands. Within each sample plot, were recorded species and the number of individuals per species, and indices of diversity, including heterogeneity (Shannon and Simpson), evenness (Simpson and Smith-Wilson), and richness (Margalef and Menhinick), were calculated. Then, Variograms of the indices were constructed and validated using MBE and MS DR criteria. Results indicated that, in tow stands except richness indices in the exploited stand, other indices exhibited moderate spatial structure. Richness indices in the exploited stand displayed pure nugget effects, that indicating a lack of spatial structure and independence among the data. Furthermore, the variogram range was larger in the undisturbed stand, reflecting greater spatial continuity, more uniform distribution, and more gradual changes in diversity indices compared to the exploited stand. These result showed that the undisturbed stand has a more stable spatial structure and stronger spatial autocorrelation, whereas forest exploitation weakens the spatial organization of species diversity indices.

Key Words:

Tree species, Geostatistics, Variogram, Species richness index, Managed stands, Hyrcanian forests.