نشریه پژوهش‌های علوم و فناوری چوب و جنگل
جلد بیست و هفتم، شماره چهارم، ۱۳۹۹
۵۳-٦٦
http://jwfst.gau.ac.ir
DOI: 10.22069/jwfst.2021.18448.1893

الگوی توزیع زادآوری درختان براساس نظریه فرکتال در جنگل‌های گهواره، استان کرمانشاه

لطیفه سعادت[۱]، *شایسته غلامی[۲] و احسان صیاد[۳]

[۱]دانش‌آموخته کارشناسی‌ارشد گروه جنگلداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران،
[۲]استادیار مرکز تحقیقات محیط‌زیست، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران،
[۳]دانشیار گروه منابع طبیعی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۷/۲۲؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۹/۲۲

چکیده

سابقه و هدف: زادآوری درختان یک فرآیند بسیار مهم در پویایی اکوسیستم جنگل است و اثر مهمی در ترکیب جوامع جنگلی دارد. تحلیل کمی زادآوری درختان، اطلاعات پایه و اساسی برای حفاظت و مدیریت جنگل فراهم می‌کند. در سال‌های اخیر زادآوری، پوشش و ساختار جنگل‌های زاگرس دچار تغییرات شدیدی شده است. این جنگل‌ها دارای اهمیت ملی فراوان هستند. حدود یک‌سوم بارندگی‌های سالانه کشور را دریافت کرده و منشأ چهل درصد منابع آبی کشور هستند. با توجه به اهمیت ملی و منطقه‌ای جنگل‌های زاگرس، ارزیابی زادآوری درختان و الگوی توزیع آن از اولویت‌های مهم برای برنامه‌ریزی، مدیریت و احیای این جنگل‌ها است. از طرفی تخریب اکوسیستم‌ها، دینامیک و الگوی مکانی آن‌ها را تغییر می‌دهد. در این راستا، اکوسیستم‌ها به سمت یک خودتشابهی در الگوهای مکانی برای استفاده بهتر از منابع و مواد غذایی پیش می‌روند که درنتیجه این خودتشابهی الگوی مکانی پوشش گیاهی در مقیاس وسیع، دارای یکنواختی شده و از ساختار اولیه دور خواهد شد. این خودتشابهی در اکوسیستم‌ها یک ویژگی ذاتی سیستم‌های غیرخطی است. برای مطالعه سیستم‌های غیرخطی، تکنیک آماری که می‌تواند استفاده شود و قادر است ساختار مکانی را تفسیر کند یک کمیت ریاضیاتی به اسم بعد فرکتال می‌باشد. درواقع بعد فرکتال، پتانسیلی برای بررسی و مطالعه ساختار مکانی آن دسته از پدیده‌هایی دارد که به سمت خود تشابهی پیش رفته‌اند.

مواد و روش‌ها: پژوهش حاضر در بخشی از جنگل‌های قرق شده گهواره در استان کرمانشاه انجام شد. نمونه‌برداری با استفاده از شبکه آماربرداری به ابعاد ۱۰۰ متر × ۱۰۰ متر و به‌صورت منظم تصادفی انجام گرفت. هم‌چنین در بخشی از منطقه برای برداشت زادآوری در فاصله‌های کوچک‌تر، از ابعاد شبکه با فاصله ۲۰ متر × ۲۰ متر هم استفاده شد. در این پژوهش الگوی توزیع زادآوری دانه زاد درختان در ۱۲٦ قطعه‌نمونه ۱۰۰ مترمربعی با استفاده از تابع خودهمبستگی و نظریه فرکتال بررسی شد.

* مسئول مکاتبه: shaiestegholami@gmail.com

یافته‌ها: ویژگی‌های زادآوری در بسیاری از موارد، خودهمبستگی نداشتند که درواقع تأییدکننده عدم وجود ساختار مکانی مشخص در آن‌هاست. خودهمبستگی بیش‌تر در متغیرهای تراکم زادآوری آلبالوی وحشی (*Prunus microcarpa* (C.A.M) Boiss)، تراکم کل زادآوری، میانگین کل ارتفاع زادآوری و شاخص شانون دیده می‌شود که تأییدکننده وجود همبستگی مکانی بیش‌تر در این متغیرها و واریانس تصادفی کم آن‌ها است. ابعاد فرکتال زیاد در مورد همه متغیرها نشان داد که نوسان‌های شدیدی در منطقه وجود دارد و تغییرات مکانی دارای ساختار و نظام‌مندی مشخصی نیستند.

نتیجه‌گیری: براساس نتایج این پژوهش، زادآوری دانه‌زاد درختان در جنگل‌های این منطقه دارای تنوع است، اما با توجه به بعد فرکتال بالا که نشانگر الگوی مکانی غیرقابل‌پیش‌بینی و تصادفی در اکثر متغیرهای زادآوری است، هنوز ساختار مکانی به ثبات لازم برای استقرار کامل آن نرسیده و حفاظت این جنگل‌ها باید ادامه یابد.

واژه‌های کلیدی: الگوی مکانی، بعد فرکتال، تنوع زیستی، خودهمبستگی، ساختار جنگل

مقدمه

زادآوری یکی از مهم‌ترین پدیده‌های متغیر در اکوسیستم‌های جنگلی و از اصلی‌ترین عوامل توسعه و پایداری آن‌ها به شمار می‌رود. در واقع احیا و توسعه جنگل به زادآوری آن بستگی داشته و در صورت استمرار زادآوری، تولید مستمر جنگل محقق خواهد شد. داشتن اطلاعات دقیق از وضعیت زادآوری و الگوی مکانی آن برای احیای جنگل ضروری است. الگوی مکانی می‌تواند در تعیین روابط اکولوژیکی و ویژگی‌های بیولوژیکی جمعیت‌های گیاهی مفید باشد (۲۲). به همین دلیل در دهه گذشته به آنالیز الگوهای مکانی به عنوان موضوع مرکزی در تحقیقات جنگل، به ویژه در مدیریت و احیا جنگل‌ها توجه شده است و همیشه یک موضوع اصلی در پژوهش‌های اکولوژیکی بوده است.

مدیریت جنگل براساس مجموعه‌ای از نقاط گسسته نمونه‌برداری، امکان‌پذیر نیست و باید این داده‌ها در قالبی پیوسته از اطلاعات تبدیل شوند. بدین‌منظور، به‌کارگیری ابزارهای تجزیه، تحلیل و پردازش ریاضی و آماری که توانایی به‌کارگیری هم‌زمان اطلاعات کمی و عددی متغیر موردنظر و اطلاعات مربوط به موقعیت نسبی جغرافیایی داده‌ها را دارند، ضروری است. مجموعه روش‌های آماری مربوط را آمار مکانی می‌نامند. آمار مکانی، فراهم آورنده چارچوبی نظری و کاربردی به‌منظور تجزیه و تحلیل مکانی داده‌هاست. این شاخه کاربردی از علم آمار، وظیفه توصیف، تخمین و پیش‌بینی، تفسیر و کنترل فرایندها و متغیرهای مکانی را بر عهده دارد (۳۲ و ۳۹). تجزیه و تحلیل الگوی مکانی می‌تواند اطلاعات مفیدی برای پی بردن به عوامل شکل‌گیری فرایندها ارائه دهد (۲۹). بررسی تغییرات مکانی و زمانی متغیرهای محیطی مانند گیاهان نیازمند به‌کارگیری مفاهیم و روش‌های آماری خاص است (۳۱). تحلیل تغییرات مکانی، عامل مهمی برای فهم عملکرد اکوسیستم است (۲۳). تابع نظری خودهمبستگی، یکی از مهم‌ترین ابزارهای تبیین و صورت‌بندی خصوصیات مختلف فرایندهای تصادفی ایستا است. یک فرایند ایستا، هیچ‌گونه تغییرات نظام‌مند و سیستماتیکی در میانگین و واریانس ندارد؛ به عبارت دیگر، ایستایی دلالت بر نظم رفتاری می‌کند (۳۳).

خودهمبستگی در صورتی ایجاد می‌شود که نمونه‌ها دارای همبستگی مکانی باشند (۷). زمانی که در یک متغیر همبستگی مکانی وجود داشته باشد، نمونه‌های نزدیک‌تر شباهت بیش‌تری به هم دارند تا نمونه‌های دورتر، در این حالت، اصطلاحاً گفته می‌شود که این نمونه‌ها دارای خودهمبستگی هستند. چنان‌چه متغیر مورد بررسی فاقد خودهمبستگی و دارای نوسانات شدید کوتاه دامنه باشد، درواقع مشاهدات مجاور هم غیرهمبسته و مستقل از یکدیگر هستند (۳۳).

از طرفی تخریب اکوسیستم‌ها، دینامیک و الگوی مکانی آن‌ها را تغییر می‌دهد (۱۱ و ٤٠) و در این راستا اکوسیستم‌ها به سمت یک خودتشابهی در الگوهای مکانی برای استفاده بهتر از منابع و مواد غذایی پیش می‌روند که درنتیجه این خودتشابهی الگوی مکانی پوشش گیاهی در مقیاس وسیع، دارای یکنواختی شده و درنتیجه از ساختار اولیه دور خواهد شد (۱ و ۳۷). این خودتشابهی در اکوسیستم‌ها یک ویژگی ذاتی سیستم‌های غیرخطی است. برای مطالعه سیستم‌های غیرخطی، تکنیک آماری که می‌تواند استفاده شود و قادر است ساختار مکانی را تفسیر کند یک کمیت ریاضیاتی به اسم بعد فرکتال است (۱۸). درواقع، بعد فرکتال پتانسیلی برای بررسی و مطالعه ساختار مکانی آن دسته از پدیده‌هایی دارد که به‌سمت خودتشابهی پیش رفته‌اند (٢٤).

ماهیت سلسله‌مراتبی بودن تغییرات و نوسانات مکانی یک متغیر ناحیه‌ای را می‌توان با به‌کارگیری مفهوم فرکتال که بیان‌کننده نسبی بودن تغییرات است به‌صورت کمی توصیف کرد (۵). تحلیل فرکتالی، قادر به ارائه راهکار ساده و مؤثر برای اندازه‌گیری اشکال پیچیده و عملکرد آن‌ها است. توصیف بی‌نظمی الگوهای درختان یک چالش در مدل‌سازی ویژگی‌ها و الگوهای درختان محسوب می‌شود. استفاده از نظریه فرکتال در توصیف الگوهای درختان یک فاکتور کلیدی در مدل‌سازی ویژگی‌های آن‌ها در محیط‌زیست است (۲۸). هندسه فرکتال به تازگی توجه زیادی را در علم اکولوژی به خود جلب کرده است. در تجزیه و تحلیل فرکتال، مفهوم اقلیدسی طول به‌عنوان یک فرایند مشاهده می‌شود؛ این فرایند توسط پارامتر ثابت و شناخته‌شده D تحت عنوان بعد فرکتال، توصیف می‌شود (۲۵). بعد فرکتال به‌عنوان یک پارامتر برای تعیین کمیت ساختار مکانی متغیرها، قادر به کمی‌سازی ساختار پیچیده آن‌ها می‌باشد (۱۸). درواقع بعد فرکتال یک تخمین‌گر مناسب برای برآورد اختلالات اکوسیستم، مستقل از مقیاس و درنتیجه ابزار مناسبی برای نظارت بر پویایی و عملکرد اکوسیستم می‌باشد (۱). بسیاری از مطالعات، بعد فرکتال را در علوم اکولوژیکی و جنگلداری برای بررسی توزیع مکانی گونه‌ها، آستانه انقراض تنوع زیستی، تخمین تراکم توده و توصیف شکل درختان به‌کار برده‌اند (۱، ٦، ۸، ۱۳، ۱۸، ٢٤، ٢٦، ۲۷ و ٣٦). اخیراً در یک پژوهش گسترده در مقیاس جهانی توسط گزمان و همکاران (۲۰۲۰) هندسه فرکتال برای تخمین برخی شاخص‌های ساختار توده‌های جنگلی مانند ارتفاع، قطر درختان و تاج پوشش مورد استفاده قرار گرفته است. نتیجه پژوهش بیانگر این است که فرکتال می‌تواند به‌عنوان روشی پرکاربرد برای پیش‌بینی بی‌نظمی و پیچیدگی در ساختار جنگل مورد استفاده قرار گیرد (۱۲). هم‌چنین اندروناش و همکاران (۲۰۱۹) پویایی جنگل، تکه‌تکه شدن و لکه‌های تخریب‌شده و فاقد درخت را براساس نظریه فرکتال در سطح جهانی بررسی کردند. نتایج نشانگر کاهش سطح پوشش درختی، افزایش تکه‌تکه شدن و ناهمگنی در سطح جنگل‌ها بود (۳).

زادآوری و پایداری اکوسیستم جنگل‌های غرب به‌دلیل چرای بی‌رویه دام، قطع بی‌رویه درختان برای تأمین سوخت و هم‌چنین جمع‌آوری بذر درختان

توسط مردم در حال تخریب می‌باشد. در این راستا پژوهش‌های مختلفی برای بررسی وضعیت زادآوری جنگل‌های زاگرس انجام شده است. سلیمانی و همکاران (۱۳۹۱) تیپ‌های مختلف زادآوری را بررسی کردند (۳۸). هم‌چنین علیجانپور و همکاران (۱۳۸۹) وضعیت کمی و کیفی زادآوری را مورد مطالعه قرار دادند (۲). در این پژوهش‌ها به کاهش زادآوری طبیعی و افزایش توده‌های شاخه زاد اشاره شده است. حسینی و حسین‌زاده (۱۳۹۷) نیز به بررسی رفتار زادآوری گونه‌های درختی بنه و کیکم به‌منظور شناخت چگونگی استقرار طبیعی آن در جنگل‌های زاگرس پرداختند و بیش‌ترین میزان استقرار زادآوری بنه و کیکم را در جهت شمالی تاج درختان گزارش کردند (۱۵).

اهمیت جنگل‌های زاگرس بر کسی پوشیده نیست و این نقش مهم و کلیدی به لحاظ ویژگی‌های پوشش نه‌چندان متراکم جنگل‌های بلوط می‌باشد. به دلیل شرایط خاص اجتماعی، اقتصادی و سیاسی منطقه، آسیب‌های شدیدی به این جنگل‌ها واردشده است. با توجه به اهمیتی که زادآوری جنسی در حفظ و تداوم و استمرار جنگل دارد، ضروری به نظر می‌رسد هرچه سریع‌تر با انتخاب فن‌های مناسب استقرار زادآوری، اقدامات لازم در راستای بهبود وضعیت این جنگل‌ها به عمل آید (۳٤). تخریب در این جنگل‌ها باعث تغییر در فرآیندهای اکوسیستم و الگوهای توزیع پوشش گیاهی، تنوع زیستی و خدمات اکوسیستم می‌شود (٤۲). این تغییرات می‌تواند با تعیین بعد فرکتال متغیرها که تعیین‌کننده تغییر در ساختار آن‌ها است بررسی شود (۱).

در فرآیند مدیریت جنگل، آگاهی از وضعیت زادآوری به‌منظور برآورد وضعیت فعلی و طراحی برنامه‌های آینده و هم‌چنین بررسی روند تحولات توده، برنامه‌ریزی دخالت‌های جنگل‌شناسی مانند عملیات پرورشی و برنامه‌ریزی عملیات احیایی اهمیت فراوان دارد. زادآوری طبیعی از مهم‌ترین عوامل مؤثر بر بقاء و پایداری جنگل‌های طبیعی و از مبانی اساسی شکل‌گیری، پایداری و تداوم اکوسیستم جنگل تلقی می‌شود. هدف از انجام این پژوهش، توصیف الگوی توزیع مکانی تراکم و تنوع زادآوری طبیعی درختان در بخشی از جنگل‌های قرق شده گهواره با استفاده از تابع خودهمبستگی و نظریه فرکتال است.

مواد و روش‌ها

پژوهش حاضر در بخشی از جنگل‌های قرق شده گهواره (۳۵ هکتار از این جنگل‌ها) در استان کرمانشاه در حوالی روستای هورو با طول جغرافیایی "٥٦ '۲٥ °٤٦ تا "۲۰/۱ '۲٦ °٤٦ شرقی و عرض جغرافیایی "۱۱/۲ '۱۸ °۳٤ تا "۲۷/٥ '۱۸ °۳٤ شمالی انجام شد. بخش گهواره یکی از بخش‌های غنی از منابع طبیعی در استان کرمانشاه بوده و مرکز اصلی طرح صیانت از جنگل‌های روستا می‌باشد. این منطقه از نظر آب و هوایی در محدوده مدیترانه‌ای قرار دارد. حداکثر دما ۳٥ درجه سانتی‌گراد، حداقل دما ۸- درجه سانتی‌گراد و میانگین بارندگی سالانه ٥٥۰ میلی‌متر در سال است (٤٦).

نمونه‌برداری با استفاده از شبکه آماربرداری و به‌صورت منظم تصادفی با شبکه‌ای به ابعاد ۱۰۰ متر× ۱۰۰ متر انجام شد. هم‌چنین در بخشی از منطقه برای برداشت زادآوری در فاصله‌های کوچک‌تر، از ابعاد شبکه با فاصله ۲۰ متر× ۲۰ متر نیز استفاده شد. درواقع ۹٤ قطعه نمونه با فاصله ۲۰ متر از هم و ۳۲ قطعه نمونه با فاصله ۱۰۰ متر از هم برای این پژوهش در نظر گرفته شدند. درمجموع، ۱۲٦ قطعه نمونه ۱۰ متر× ۱۰ متر نمونه‌برداری شدند. در هرکدام از قطعه نمونه‌ها، همه زادآوری‌های جنسی موجود (پایه‌هایی

با قطر کم‌تر از ۷/۵ سانتی‌متر) (۳۷) به تفکیک گونه ثبت و قطر یقه و ارتفاع آنها اندازه‌گیری شد. لازم به ذکر است ازآن‌جاکه این منطقه چند سالی است قرق شده، زادآوری دانه زاد به تدریج در حال شکل گرفتن بوده و دوباره از سر گرفته شده است.

سپس یکنواختی (شاخص Sheldon)، تنوع (شاخص Shannon H´) و غنا (شاخص Menhinick) برای زادآوری جنسی، با استفاده از نرم‌افزار PAST 1.39 محاسبه شدند. توصیف آماری داده‌ها به‌منظور دست‌یابی به خلاصه اطلاعات آماری با استفاده از SPSS 15 انجام شد. نرمال بودن داده‌ها با استفاده از آزمون کولموگروف اسمیرنوف بررسی گردید. شاخص‌های آماری میانگین، میانه، انحراف معیار، اشتباه معیار و ضریب تغییرات برای هر متغیر تعیین شد. در صورت نرمال نبودن داده‌ها از تبدیل برای نرمال نمودن داده‌ها استفاده شد. تحلیل ساختار مکانی با استفاده از تابع خود همبستگی و بعد فرکتال انجام شد.

تابع خودهمبستگی (Autocorrelation Function): فقدان استقلال بین دو مشاهده را می‌توان به‌صورت عددی و توسط برخی از شاخص‌های آماری مانند همبستگی مورد ارزیابی قرار داد. تابع خودهمبستگی اقدام به سنجش همبستگی بین دو متغیر X(t) و Xt−h می‌کند. مقدار تابع خودهمبستگی بین ۱− و ۱+ در تغییر است؛ بنابراین، اهمیت نسبی مقدار خودهمبستگی برآورد شده را می‌توان از طریق مقایسه با مقادیر کرانه‌ای یادشده مورد ارزیابی قرار داد (۳۳). خودهمبستگی در صورتی ایجاد می‌شود که نمونه‌ها دارای همبستگی مکانی باشند (۹). خود همبستگی مکانی، گرایش تصادفی متغیرها را به‌عنوان تابعی از موقعیت‌هایشان در فضا تعریف می‌کند (۲۰ و ۳۰). تابع خودهمبستگی را می‌توان از طریق نمودارها و شاخص‌های مختلف محاسبه نمود (۷). فرض کنید Xt یا X(t) مقدار سری زمانی را در زمان t نشان دهد. تابع خودهمبستگی برای این سری زمانی، ضرایب همبستگی بین مشاهدات Xt و Xt−h را براساس h=...۱،۲،۳ نشان می‌دهد؛ بنابراین از لحاظ محاسباتی خودهمبستگی بین Xt و Xt−h به صورت زیر قابل‌محاسبه است. در این پژوهش، نمودار خودهمبستگی با استفاده از نرم‌افزار SPSS 17 محاسبه شده است.

$$Var(Xt)/AC\ (Xt,Xt-h)= Cov(Xt,Xt-h) \quad (۱)$$

فرکتال (Fractal): برای اولین بار مندلبروت (۱۹۸۲) نظریه فرکتال‌ها را مطرح کرد. وی هندسه فرکتال را این‌گونه تعریف کرد: مطالعه اشکال هندسی که به نظر می‌رسد در مقایسه با هندسه استاندارد (طول، ارتفاع و...)، دارای هرج‌ومرج و آشفتگی هستند اما نشان از یک نظم شدید دارند، زیرا دارای یک ویژگی تغییرناپذیر، با انقباض یا انبساط مناسب هستند (۲۸). برخلاف ابعاد اقلیدسی که برای تمام خط‌ها و سطح‌ها مشترک می‌باشد، بعد فرکتال برای هر خط، مخصوص خودش می‌باشد (٤٤). از دید هندسی به شیئی فرکتال گویند که دارای سه ویژگی باشد: خاصیت خود همانندی داشته باشد، در مقیاس خرد بسیار پیچیده باشد و بعد آن یک عدد صحیح نباشد (۱۹).

به‌منظور توصیف خودتشابهی در یک پدیده از متغیری به نام بعد فرکتالی استفاده می‌شود. روش‌های مختلفی برای محاسبه بعد فرکتالی پدیده‌های طبیعی وجود دارد (۱۰). بورو (۱۹۸۳) از لگاریتم تابع سمی واریانس به‌عنوان ابزاری برای محاسبه بعد فرکتالی متغیرهای محیطی استفاده کرد. ازآنجاکه مقدار عددی بعد فرکتالی انعکاسی از نوسانات کوتاه‌دامنه و بلنددامنه در فضای مورد مطالعه است؛ بنابراین، مقادیر بزرگ‌تر آن نشان‌دهنده غالب بودن تغییرات کوتاه‌دامنه

و برعکس هستند (۵). در شرایط نویز سفید (زمانی که نمونه‌ها دنباله‌ای از متغیرهای تصادفی ناهمبسته، مستقل و دارای واریانس متناهی هستند)، شیب خط برابر صفر بوده و درنتیجه بعد فرکتال مساوی ۲ خواهد بود. هرچه مقدار بعد فرکتال به ۲ نزدیک شود نشان‌دهنده ساختار فرکتالی و عدم ساختار مکانی متغیرها و وجود ناهمگنی و آشفتگی در منطقه مورد مطالعه می‌باشد (٤۳). این بدان معناست که مقادیر متوالی اندازه‌گیری‌شده برای یک متغیر، تقریباً مستقل از یکدیگر بوده و هیچ‌گونه وابستگی مکانی بین مقادیر مورد نظر نمی‌توان تصور کرد. از دیگر سو، چنان‌چه یک روند خطی ساده در مقادیر اندازه‌گیری‌شده وجود داشته باشد در این صورت، شیب خط برابر ۲ و بعد فرکتالی مساوی یک است. بدین ترتیب، حداقل نوسانات نقطه به نقطه بین مقادیر مشاهداتی وجود داشته و تغییرات به‌طور عمده از نوع بلنددامنه هستند (۳۱ و ۳٦). بعد فرکتال متغیرها، از طریق نرم‌افزار $GS^{+}5.1$ محاسبه شد.

نتایج و بحث

نتایج حاصل از جدول خلاصه آماری و آزمون کولموگروف اسمیرنوف نشان داد که اکثر داده‌ها از توزیع نرمال پیروی نمی‌کنند. تبدیل برای داده‌هایی که نرمال نبودند به‌صورت لگاریتم پایه طبیعی انجام شد. ازآنجاکه در بعضی از نقاط نمونه‌برداری، مشاهدات صفر بودند تبدیل به‌صورت ($Ln(1+x)$) انجام گرفت. خلاصه آماری داده‌ها در جدول ۱ آورده شده است. در منطقه مورد مطالعه زادآوری چهار گونه بلوط مازودار *Quercus infectoria* Oliv، بلوط ایرانی *Quercus brantii* Lindl، زالزالک *Crataegus pontica* C.koch و آلبالو *Prunus microcarpa* (C.A.M) Boiss مشاهده شد. تراکم زادآوری آلبالو بسیار بیش‌تر از سایر گونه‌هاست. هم‌چنین مازودار دارای کم‌ترین زادآوری بود. زادآوری‌های دانه‌زاد موجود دارای ابعاد کوچک از نظر ارتفاع و قطر یقه هستند که درواقع بیانگر مراحل اولیه استقرار مجدد زادآوری دانه‌زاد در منطقه است. براساس نتایج به‌دست‌آمده، فراوانی، غنا، یکنواختی و تنوع زادآوری در این جنگل‌ها چشمگیر نیست. میانگین تعداد کل زادآوری ۱۳/۵ پایه در پلات و ضریب تغییرات برابر ٤۸/۸۹ درصد می‌باشد (جدول ۱).

با توجه به اهمیت تنوع زیستی در پایداری جنگل و فراهم آوردن خدمات و منابع جنگل‌ها برای جوامع بشری، حفظ و نگهداری تنوع زیستی یک موضوع کلیدی در مدیریت جنگل است (٤۱). از طرفی الگوی توزیع مکانی یکی از اجزای اصلی ساختار جنگل است که می‌تواند به شناخت عملکرد فرآیندهای مهم نظیر زادآوری و تنوع زیستی کمک کند (٤ و ۳۵). بر اساس نتایج به‌دست‌آمده در این پژوهش، فراوانی، غنا، یکنواختی و تنوع زادآوری گونه‌های درختی در این جنگل‌ها چشمگیر نیست. جنگل‌های زاگرس مناطقی با پوشش درختی کم تراکم، تخریب فراوان و سیمای سرزمین قطعه‌قطعه شده هستند. در این جنگل‌ها آب و منابع غذایی و بذر برای زادآوری در محدودیت شدید هستند (۱٤). جایاکومار و همکاران (۲۰۱۳)، در پژوهشی بیان کردند که اختلالات انسانی می‌تواند باعث اختلال در ساختار جنگل و تغییر در ترکیب گونه‌ها و درنهایت منجر به کاهش غنای گونه‌ای و فراوانی که از ویژگی‌های اصلی در جنگل است، گردد (۱۷).

جدول ۱- خلاصه آماری داده‌های زادآوری درختان.

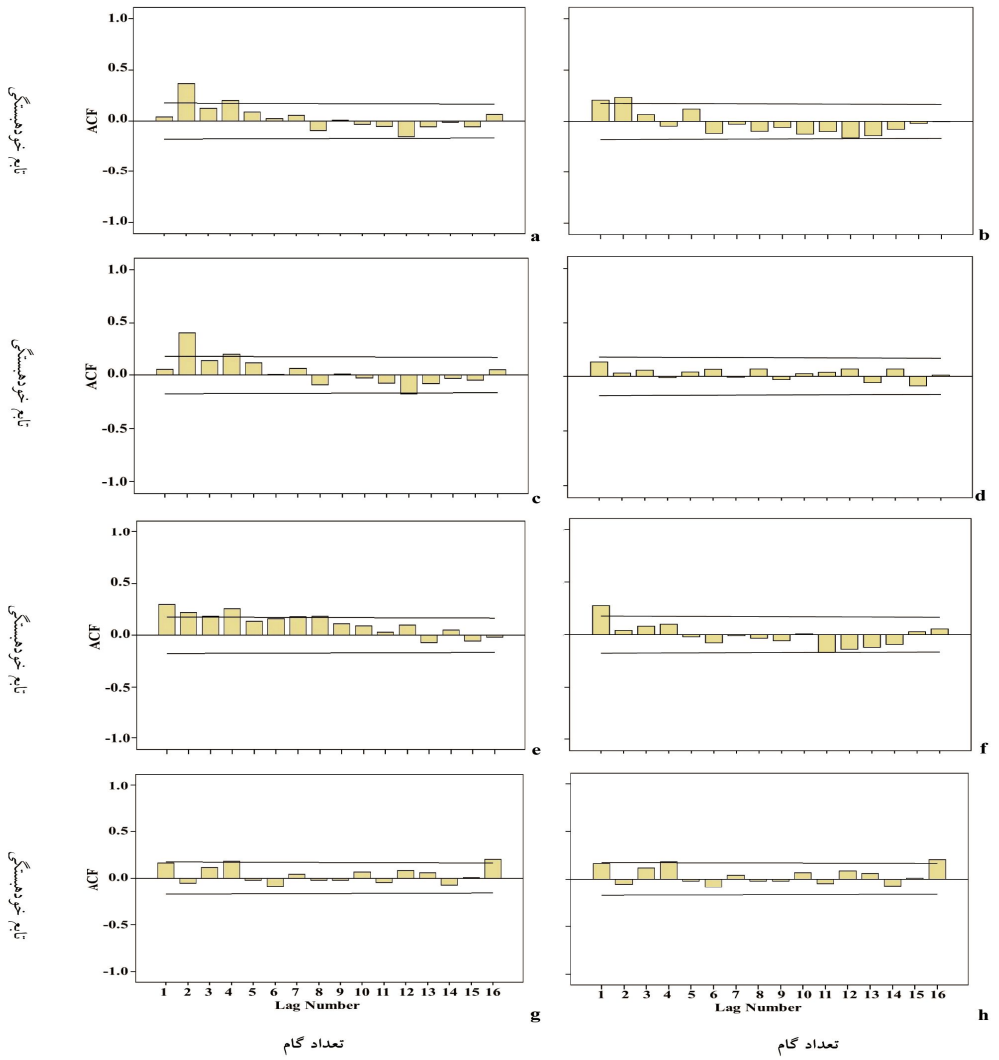
Table 1. Statistical summary of trees regeneration.

ضریب تغییرات CV (%)	اشتباه معیار Standard Error	انحراف معیار Standard. Deviation	میانه Median	میانگین Mean	متغیر Variable
93	0.99	11.39	10	12.24	تراکم زادآوری آلبالو Regeneration density of *P. microcarpa*
1.64	0.89	1.26	76.83	76.83	ارتفاع (cm) Height (cm)
18.6	0.06	0.08	0.43	0.43	قطر یقه (cm) Collar Diameter (cm)
184.72	0.155	1.79	0.00	0.969	تراکم زادآوری بلوط ایرانی Regeneration density of *Q. brantii*
3.46	0.27	0.38	10.98	10.98	میانگین ارتفاع (cm) Height mean (cm)
16.67	0.02	0.02	0.12	0.12	میانگین قطر یقه (cm) Collar diameter (cm)
304	0.07	0.76	0.00	0.25	تراکم زادآوری زالزالک Regeneration density of *C. pontica*
54.4	12.5	17.68	32.5	32.5	میانگین ارتفاع (cm) Height (cm)
45.83	0.08	0.11	0.24	0.24	میانگین قطر یقه (cm) Collar diameter (cm)
485	0.02	0.33	0.00	0.07	تراکم زادآوری مازودار Regeneration density of *Q. infectoria*
62.24	5.5	7.78	12.5	12.5	میانگین ارتفاع (cm) Height (cm)
81.25	0.09	0.13	0.16	0.16	میانگین قطر یقه (cm) Collar diameter (cm)
48.89	1.05	12.08	10	13.5	تراکم زادآوری کل Total regeneration density
16.87	6.49	9.17	54.34	54.34	میانگین ارتفاع (cm) Height (cm)
0.31	0.004	0.001	0.32	0.32	میانگین قطر یقه (cm) Collar diameter (cm)
130.4	0.02	0.3	0.00	0.23	تنوع Diversity
17.98	0.01	0.16	1	0.89	یکنواختی Evenness
58	0.00	1.73	3.87	1.71	غنا Richness

تراکم زادآوری: تعداد در پلات، یکنواختی (شاخص Sheldon)، تنوع (شاخص Shannon H΄) و غنا (شاخص Menhinick).

Regeneration density: (individual/plot), Evenness (Sheldon index), Diversity (Shannon H΄ index), Richness (Menhinick index)

نمودار خودهمبستگی بعضی از متغیرهای مورد بررسی در شکل ۱ آمده است (سایر متغیرها فاقد خودهمبستگی بودند). برای داشتن خودهمبستگی باید مقادیر معینی از آن‌ها خارج از حدود اطمینان واقع گردند (۳۳). بر اساس این نمودارها چنان‌چه گام‌های خودهمبستگی بالاتر از حدود اعتماد قرار گیرند، متغیر مورد بررسی دارای خود همبستگی می‌باشد (۹). با توجه به شکل ۱، بیش‌تر متغیرها دارای خود همبستگی مکانی ضعیفی هستند. این نتایج، تأییدکننده عدم وجود ساختار مکانی مشخص برای متغیرها می‌باشند. خودهمبستگی بیش‌تر در متغیرهای تراکم زادآوری آلبالو، تراکم کل زادآوری، میانگین کل ارتفاع زادآوری و شاخص شانون دیده می‌شود که درواقع تأییدکننده وجود همبستگی مکانی بیش‌تر در این متغیرها و نشان‌دهنده واریانس تصادفی پایین آن‌هاست، به این معنی که نمونه‌های نزدیک به هم بسیار مشابه و نمونه‌های دور از هم مقادیر متفاوت‌تر داشته‌اند (۳۲).



شکل ۱- خودهمبستگی داده‌های: a: تراکم زادآوری آلبالو؛ b: تراکم زادآوری بلوط ایرانی؛ c: تراکم کل زادآوری؛ d: میانگین کل قطر یقه زادآوری؛ e: میانگین کل ارتفاع زادآوری؛ f: شاخص شانون؛ g: شاخص یکنواختی؛ h: شاخص غنا؛ خطوط موازی درون نمودارها بیانگر حدود اطمینان می‌باشند.

Figure 1. Autocorrelation function of a: Regeneration density of *P. microcarpa,* b: Regeneration density of *Q. brantii,* c: Total regeneration density, d: Total mean of regeneration collar diameter, e: Total mean of regeneration height, f: Shannon index, g: Sheldon index, h: Menhinick index; Parallel lines: confidence interval.

بر اساس نتایج به‌دست‌آمده (جدول ۲) و (جدول ۳) مقدار بعد فرکتالی در همه متغیرها بالاست که بیانگر تغییرات کوتاه‌دامنه و نشان‌دهنده وجود ناهمگنی زیاد در منطقه است (۹ و ۳۱). ازآنجاکه بعد فرکتال ابزار مناسبی برای تعیین و تأیید ناهمگنی در ساختار مکانی متغیرها، وجود الگوی پراکنده و تصادفی بودن متغیرهاست (۱ و ۱۶)، بر اساس این نتایج الگوی توزیع زادآوری در این پژوهش نشان‌دهنده الگوی توزیع غیرقابل‌پیش‌بینی و ساختار نامشخص است.

جدول ۲- ابعاد فرکتالی محاسبه‌شده برای شاخص‌های تنوع زادآوری.

Table 2. Fractal dimension calculated for regeneration diversity indices.

متغیر Variable	بعد فرکتالی (D) Fractal dimension
شانون Shannon	1.95
یکنواختی Evenness	1.89
غنا Richness	1.96

جدول ۳- ابعاد فرکتالی محاسبه‌شده برای زادآوری.

Table 3. Fractal dimension calculated for regeneration.

متغیر Variable	بعد فرکتالی (D) Fractal Dimension
تراکم زادآوری آلبالو Regeneration density of *P. microcarpa*	1.87
قطر یقه Collar diameter	1.94
ارتفاع Height	1.93
تراکم زادآوری بلوط ایرانی Regeneration density of *Q. brantii*	1.78
قطر یقه Collar diameter	1.9
ارتفاع Height	1.95
تراکم زادآوری زالزالک Regeneration density of *C. pontica*	1.96
قطر یقه Collar diameter	1.86
ارتفاع Height	1.91
تراکم زادآوری مازودار Regeneration density of *Q. infectoria*	1.83
قطر یقه Collar diameter	1.9
ارتفاع Height	1.62
تراکم کل زادآوری Total density of regeneration	1.94
قطر Collar diameter	1.91
ارتفاع Height	1.87

اگرچه نتایج مشابهی در مورد توصیف فرکتالی متغیرهای زادآوری صورت نگرفته است، اما نتایج حاصل از پژوهش‌های زید (۱۹۹۱) نشان می‌دهد که همه متغیرهای درخت رفتار فرکتالی از خود نشان نمی‌دهند (٤٥). کینت و همکاران (۲۰۰۰) بیان کردند که علاوه بر فرایندهای طبیعی، نحوه دخالت‌های صورت گرفته توده‌ها نیز باعث تغییر در الگوی مکانی درختان می‌شود (۲۱). هم‌چنین گراز (۲۰۰٤) در بررسی خود بر تأثیر نحوه زادآوری درختان بر الگوی مکانی آن‌ها تأکید کرده است (۱۰). براساس مطالعات و مشاهده‌های صورت گرفته در جنگل‌های منطقه مورد مطالعه مهم‌ترین دلیل تغییر موقعیت مکانی درختان، برداشت بی‌رویه درختان بلوط به‌عنوان سوخت، استفاده از میوه آن توسط مردم بومی و چرای بیش از حد دام در این منطقه بود که این موضوع سبب ایجاد فضاهای باز و خالی‌شده است و موقعیت مکانی درختان را تحت‌تأثیر قرار داده است. جانکر و همکاران (۲۰۰٦) در پژوهش خود که به مدل‌سازی مبتنی بر بعد فرکتال، بیان کردند که بعد فرکتال تاج پوشش جنگل تحت‌تأثیر این فضاهای باز و گپ‌ها قرار می‌گیرد (۱۸).

ودیوشکین (۱۹۹٤) بیان کرد که بعد فرکتال ساختار مکانی در اکوسیستم‌ها، در زمینه الگوی سلسله مراتبی در نظر گرفته می‌شود. نتایج به‌دست‌آمده پتانسیل نظریه فرکتال را در اکولوژی تأیید کرد (٤۲). غلامی و صیاد (۲۰۱٥) با بررسی تاج پوشش درختان و چگالی ظاهری خاک در جنگل‌های زاگرس به این نتیجه رسیدند که متغیرهای مورد بررسی دارای ویژگی فرکتالی هستند و بعد فرکتال شاخص مناسبی برای حضور و اهمیت مقیاس‌های تودرتو تغییرات مکانی متغیرهای مورد بررسی است. آن‌ها هم‌چنین با بررسی خودهمبستگی بیان کردند که متغیرها فاقد همبستگی مکانی مشخص بودند که این نتایج بیانگر نوسانات شدید در منطقه می‌باشد (۹). درواقع، بررسی نحوه پراکنش و رفتار فرکتالی متغیرها در پژوهش پیش‌رو، نشان می‌دهد که نوسانات شدیدی در منطقه وجود دارد و تغییرات مکانی دارای ساختار و نظام‌مندی مشخصی نیست. هم‌چنین عدم وجود خودهمبستگی، دلالت بر این موضوع دارند. به‌نظر می‌رسد به‌علت تخریب و فشار بر اکوسیستم، نوسانات شدیدی در پراکنش متغیرها وجود دارد به‌گونه‌ای که مقادیر عددی آن‌ها را می‌توان مستقل از یکدیگر قلمداد کرد.

نتیجه‌گیری

با توجه به نمودارهای خودهمبستگی و کم بودن بعد فرکتال در مورد تراکم زادآوری بلوط ایرانی و آلبالو، می‌توان گفت که ساختار مکانی این متغیرها از قاعده و نظم بیش‌تری پیروی می‌کند و به عبارتی متغیرها دارای ساختار مکانی واضح‌تری می‌باشند؛ بنابراین زادآوری این گونه‌ها می‌توانند به‌عنوان گونه‌های مؤثر در توسعه جنگل‌های گهواره به‌حساب آیند. سایر متغیرها رفتار فرکتالی بیش‌تری از خود نشان می‌دهند و فاقد ساختار مکانی مشخص می‌باشند که نشان‌دهنده تغییرات شدید در الگوی توزیع آن‌هاست. به نظر می‌رسد به علت محدودیت گسترش و انتشار زادآوری و یا آشوب‌های داخل اکوسیستم، الگوی مکانی آن‌ها از حالت طبیعی فاصله گرفته که میزان این تغییر بستگی به‌شدت دخالت‌های انسانی دارد. بر اساس نتایج این پژوهش، حفاظت و قرق باعث حضور و ایجاد تنوع در زادآوری شده است زیرا در مناطق بدون قرق هیچ‌گونه زادآوری مشاهده نمی‌شود؛ اما بر اساس نتایج بعد فرکتال بالا که نشانگر الگوی مکانی غیرقابل‌پیش‌بینی و تصادفی در اکثر متغیرهای زادآوری است، هنوز ساختار مکانی زادآوری به ثبات لازم جهت استقرار کامل آن نرسیده

و عمل حفاظت در این جنگل‌ها باید ادامه یابد. درنهایت با بررسی الگوی مکانی زادآوری گونه‌ها در منطقه می‌توان نقاطی را که دارای زادآوری بالا می‌باشند محافظت یا قرق کرد و هم‌چنین نقاط دارای زادآوری پایین را با بررسی و حذف علت محدودکننده زادآوری، احیا کرد. به‌طورکلی در مطالعات منابع طبیعی به دست آوردن اطلاعات مکانی صریح و دقیق از خصوصیات جنگل و درختان برای استفاده منطقی و پایدار از منابع طبیعی کاربردی و مفید خواهد بود.

منابع

1.Alados, C.L., Pueyo, Y., Navas, D., Cabezudo, B., Gonzalez, A., and Freeman, D.C. 2005. Fractal analysis of plant spatial patterns: a monitoring tool for vegetation transition shifts. Biodiversity and Conservation. 14: 1453-1468.

2.Alijanpour, A., Banj Shafiei, A., and Eshaghi Rad, J. 2010. Investigation of natural regeneration characteristics in west oak forests within different levels of site factors (case study: Piranshahr region). Iranian J. of Forest. 2: 3. 209-219. (In Persian)

3.Andronache, I., Marin, M., fischer, R., Ahammer, H., Radulovic, M., ciobotaru, A.M., Jelinek, H.F., Di Ieva, A., Pintilii, R.D., Drăghici, C.C., Herman, G.V., Nicula, A.S., Simion, A.G., Loghin, V., Diaconu, D.C., and Peptenatu, D. 2019. Dynamics of forest fragmentation and connectivity Using particle and fractal Analysis. Scientific Reports. https://doi.org/10.1038/s41598-019-48277-z.

4.Boyden, S., Binkley, D., and Shepperd, W. 2005. Spatial and temporal patterns in structure, regeneration, and mortality of an old-growth ponderosa pine forest in the Colorado Front Range. Forest Ecology and Management. 219: 43-55.

5.Burrough, P.A. 1983. Multiscale sources of spatial variation in soil. 1. The application of fractal concepts to nested levels of soil variation. J. of Soil Science. 34: 577-597.

6.Despland, E. 2003. Fractal index captures the role of vegetation clumping in locust swarming. Functional Ecology. 17: 315-322.

7.Dormann, C.F., McPherson, J.M., Arau, M.B., Bivand, R., Bolliger, J., Carl, G., Davies, R.G., Hirzel, A., Jetz, W., Kissling, D.W., Kuhn, L., Ohlemuller, R., Peres-Neto, P.R., Reineking, B., Schroder, B., Schurr F.M., and Wilson, R.. 2007. Methods to account for spatial autocorrelation in the nalysis of species distributional data: a review. Ecography. 30: 609-628.

8.Darabi, S., Kooch, Y., and Hosseini, M. 2014. Reaction and fractal description of soil bio-indicator to human disturbance in lowland forests of Iran. Biodiversitas. 1: 60-66.

9.Gholami, Sh., and Sayad, E. 2015. Fractal descriptive of tree canopy and soil bulk density in Zagros forests, case study: Bisotun Protected Area. Applied Ecology. 4: 12. 77-85. (In Persian)

10.Graz, P.F. 2004. The behavior of the species mingling index Msp in relation to species dominance and dispersion. European J. of Forest Research. 123: 87-92.

11.Godin, C. 2000. Representing and encoding plant architecture: a review. Annals of Forest Science. 57: 05. 413-438.

12.Guzman, J.A., Sharp, L., Felipe, A., and Sanchez-Azofelifa, GA. 2020. On the relationship of fractal geometry and tree–stand metrics on point clouds derived from terrestrial laser scanning. Methods in Ecology and Evolution. 11(10): 1309-1318. https://doi.org/10.1111/2041-210X.1343.

13.Halley, J.M., Hartley, S., Kallimanis, A.S., Kunin, W.E., Lennon J.J., and Sgardelis, S.P. 2004. Uses and abuses of fractal methodology in ecology. Ecology Letters. 7: 254-271.

14.Henareh Khalyani, A., and Mayer, A.L. 2013. Spatial and temporal deforestation dynamics of Zagros forests (Iran) from 1972 to 2009. Landscape and Urban Planning. 117: 1-12.
15.Hosseini, A., and Hoseinzadeh, J. 2019. Investigation on regeneration behavior of *Pistacia atlantica* and *Acer cineracens* species to recognize their natural establishment pattern in Zagros forests. J. of Applied Biology. 31: 3. 41-54.
16.Imre, A.R., and Bogaert, J. 2003. The fractal dimension as a measure of the quality of habitats. Acta Boitheoretica. 52: 41-56.
17.Jayakumar, R., and Nair, K.N. 2013. Species diversity and tree regeneration patterns in tropical forests of the Western Ghats, India. International scholarly research notices, vol. 2013, 14p. https://doi.org/10.1155/2013/890862.
18.Jonckheere, I., Nackaerts, K., Muys, B., Van Aardt, J., and Coppin, P. 2006. A fractal dimension-based modeling approach for studying the effect of leaf distribution on LAI retrieval in forest canopies. Ecological Modelling. 197: 179-195.
19.Karam, A. 2010. Chaos theory, fractal & non-linear system in geomorphology. J. of Physical Geography. 3: 8. 67-82. (In Persian)
20.Kent, M., Moyeed, R.A., Reid, C.L., Pakeman, R., and Weaver, R. 2006. Geostatistics, spatial rate of change analysis, and boundary detection in plant ecology and biogeography. J. of Physical Geography. 30: 2. 201-213.
21.Kint, V., Lust, N., Ferris, R., and Olsthoorn, A.F.M. 2000. Quantification of forest stand structure applied to Scots Pine (*Pinus Sylvestris* L.) Forests. Investigación Agraria: Sistemasy Recursos Forestales. 1: 147-163.
22.Kubota, Y. 2006. Spatial pattern and regeneration dynamics in a temperate Abies–Tsuga forest in southwestern Japan. Forest Research. 11: 191-201.
23.Leibhold, A.M., and Gurevitch, J. 2002. Integrating the statistical analysis of spatial data in ecology. Ecography. 25: 553-557.
24.Li, B.L. 2000. Fractal geometry applications in the description and analysis of patch patterns and patch dynamics. Ecological Modelling. 132: 33-50.
25.Li, B.L. 2002. Fractal dimensions. Encyclopedia of Environmetrics. 2: 821-825.
26.Loehle, C., and Li, B.L. 1996. Statistical properties of ecological and geologic fractals. Ecological Modelling. 85: 271-284.
27.Long, C., Zhao, Y., and Jafari, H. 2014. Mathematical models arising in the fractal forest gap via local fractional calculus. Abstract and Applied Analysis, vol. 2014, Article ID 782393, 6p.
28.Mandelbrot, B. 1983. The Fractal Geometry of Nature. W. H. Freeman and Co. San Francisco, 468p.
29.Maestre, F.T., Rodriguez, F., Bautista, S., Cortina, J., and Bellot, J. 2005. Spatial associations and patterns of perennial vegetation in a semi-arid steppe: a multivariate geostatistics approach. Plant Ecology. 179: 133-147.
30.Mohammadi, J. 1999. Study of the spatial variability of soil salinity in Ramhormoz area (Khuzestan) using geostatistical theory 1. Kriging. J. of Water and Soil Sciences. 2: 4. 49-64. (In Persian)
31.Mohammadi, J., and Raeisi Gahrooee, F. 2004. Fractal description of the impact of long-term grazing exclusion on spatial variability of some soil chemical properties. J. of Water and Soil Sciences, 7: 4. 25-37. (In Persian)
32.Mohammadi, J. 2006. Pedometrics: Spatial statistics, geostatistics. Pelk Press. 453p. (In Persian)
33.Mohammadi, J. 2007. Pedometrics: temporal statistics. Pelk Press. 450p. (In Persian)
34.Namiranian, M., Henareh Khalyani, A., Zahedi Amiri, Gh., and Ghazanfari, H. 2007. Study of different restoration and regeneration techniques in northern Zagros (Case study: Armardeh oak forest, Baneh). Iranian J. of Forest and Poplar Researches. 15: 4. 386-397.

35.Ngo Bieng, M.A., Perot, T., de Coligny, F., and Goreaud, F. 2013. Spatial pattern of trees influences species productivity in a mature oak-pine mixed forest. European J. of Forest Research. 132: 841-850.
36.Palmer, M.W. 1988. Fractal geometry: a tool for describing spatial patterns of plant communities. Vegetation. 75: 91-102.
37.Risch, A.C., Heiri, C., and Bugmann, H. 2005. Simulating structural forest patterns with a forest gap model: a model evaluation. Ecological modeling. 181: 2-3. 161-172.
38.Soleymani, S., Dargahi, D., Pourhashemi, M., Amiri, F., and Noori, N. 2012. Investigation on regeneration in different Oak (*Quercus brantiiand* Q. infectoria) forest types and appropriates strategy for their rehabilitation, at Salas Babajani forest, Kermanshah province. J. of Conservation and Utilization of Natural Resources. 1: 1. 65-77. (In Persian)
39.Sun, B., Zhou, SH., and Zhao, Q. 2003. Evaluation of spatial and temporal changes of soil quality based on geostatistical analysis in the hill region of subtropical China. Geoderma. 115: 85-99.
40.Thom, D., and Seidl, R. 2016. Natural disturbance impacts on ecosystem services and biodiversity in temperate and boreal forests. Biological Reviews. 91: 760-781.
41.Tiscar-Oliver, P.A. 2015. Patterns of shrub diversity and tree regeneration across topographic and stand-structural gradients in a Mediterranean forest. Forest Systems. 24: 1. 2171-9845.
42.Vedyushkin, M. 1994. Fractal properties of forest spatial structure. Vegetation. 113: 65-70.
43.Wiens, J.A., and Milne, B.T. 1989. Scaling of 'landscapes' in landscape ecology, or, landscape ecology from a beetle's perspective. Landscape Ecology. 3: 87-96.
44.Zeid, B. 1990. Fractal geometry and forest measurements. P 260-266. In: V.J. LaBau and T. Cunia (eds). the State of the art methodology of forest inventory, US Dep. Agric. For. Serv. PNW-GTR-263.
45.Zeide, B. 1991. Fractal geometry in forestry applications. Forest Ecology and Management. 46: 179-188.
46.www.kermanshahmet.ir. Kermanshah regional meteorology office. Site visited on 5/10/2015.

Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources
J. of Wood & Forest Science and Technology, Vol. 27 (4), 2021
http://jwfst.gau.ac.ir
DOI: 10.22069/jwfst.2021.18448.1893

Spatial distribution of tree regeneration using fractal theory in Gahvareh forests, Kermanshah province

L. Saadat[1], *Sh. Gholami[2] and E. Sayad[3]
[1]M.Sc. Graduate, Dept. of Foresty, Dept. of Natural Resources, Razi University, Kermanshah, Iran,
[2]Assistant Prof. of Environmental Research Center, Razi University, Kermanshah, Iran,
[3]Associate Prof., Natural Resources Department, Razi University, Kermanshah, Iran
Received: 10.13.2020; Accepted: 12.12.2020

Abstract

Background and Objectives: Tree species regeneration is a critical process in the population dynamics of forests and significantly influences the composition of forest communities. Quantitative analysis of tree regeneration may provide baseline information for conservation and management strategies. Zagros oak forests have been subjected to dramatic changes in forest regeneration, cover, and structure in recent decades. Zagros forests have critical national importance. These forests capture over one-third of the country's annual precipitation and are the headwaters for 40% of the country's rivers and streams which provide water to the dry central plateau of Iran. Given the national and regional importance of Zagros forests, it is extremely useful for restoration management to evaluate the spatial distribution of tree regeneration. The disturbing of ecosystems changes the dynamic of species and ecosystem processes. Ecosystems are therefore moving in a self-organizing way towards more efficient use of energy/nutrients to the total energy input. This self-organizing of the ecosystem is an inherent feature of non-linear interacting systems. Techniques used to study non-linear systems could be able to quantify the structure of complex objects and the spatial dynamic of plants.

Materials and Methods: The mathematical features of spatially complex systems are often fractal. Fractal has the potential to expose a new way to understand and analyze such natural spatial phenomena, which are not smooth, but rough and fragmented to self-similarity. We investigated the spatial patterns of tree regeneration density and diversity in 126 plots (100 m^2). The study was conducted in a preserved area (12 years) in the Zagros forest of western Iran. We applied autocorrelation methods to examine the spatial structure in the distribution of regeneration. Fractal analysis was also used to characterize the complexity of the spatial patterns.

Results: We found that preservation favored the density and diversity of tree regeneration in this area. On the whole, the variables have weak autocorrelation but regeneration density of *P. microcarpa*, total regeneration density, regeneration height, and Shannon index are the variables that have the most autocorrelation. On the other hand, the fractal dimension, representing the unpredictability of spatial patterns, is high for trees and regeneration. This implies that although spatial dependence exists, it is generally fairly weak.

Conclusion: These results revealed the scattered and homogeneous spatial distribution of trees and their regeneration. Indeed, our results showed a recovery of regeneration but not the spatial structure of it. It seems that conservation efforts must be continued to complete the recovery of regeneration and their spatial structure.

Keywords: Autocorrelation, Biodiversity, Forest structure, Fractal dimension, Spatial pattern

*Corresponding author: shaiestegholami@gmail.com