مجلهٔ جنگل ایران، انجمن جنگلبانی ایران
سال چهاردهم، شمارهٔ ۴، زمستان ۱۴۰۱
ص ۳۸۹-۴۰۵
مقاله پژوهشی

شناسه دیجیتال (DOI):10.22034/ijf.2022.327756.1845
شناسه دیجیتال (DOR):20.1001.1.20086113.1401.14.4.3.5

مقایسهٔ شاخص پیچیدگی ساختار (SCI) در مراحل تحولی جنگل‌های آمیختهٔ راش هیرکانی

کیومرث سفیدی*

استاد گروه علوم و مهندسی جنگل، دانشکدهٔ کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۱۱/۱۷؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۱۲/۲۳)

چکیده

یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های جنگل‌های طبیعی، پیچیدگی ساختار توده‌های جنگلی است. در طی فرایند تحول، تغییر در ساختار توده به پیچیدگی ساختار جنگل می‌انجامد. این پژوهش به‌منظور برآورد شاخص پیچیدگی ساختار در توده‌های راش در مراحل سه‌گانهٔ تحولی راش شرقی انجام گرفت. سه قطعهٔ یک هکتاری در مراحل سه‌گانهٔ تحولی راش (در مجموع ۱۲ هکتار) انتخاب و پس از اندازه‌گیری ویژگی‌های ساختاری، شاخص چندمتغیرهٔ پیچیدگی در هر یک از مراحل تعیین شد. برای برآورد شاخص از ۱۰ متغیر منفرد شامل تعداد درختان در واحد سطح، میانگین قطر، ضریب تغییرات قطر، ضریب جینی قطر، تعداد درختان قطورتر از ۱۰۰ سانتی‌متر، نسبت تعداد درختان در اشکوب‌ها، نسبت روشنه، تعداد و حجم خشک‌دارها و تغییرات اندازه‌ای درختان استفاده شد. میانگین و میانه شاخص پیچیدگی به‌ترتیب ۶۵/۴۶ و ۶۶/۱۵ به‌دست آمد که بیشترین مقدار آن در مرحلهٔ نهایی برابر با ۸۴/۱۷ و کمترین مقدار آن برابر با ۴۹/۳ درصد در مرحلهٔ اولیه محاسبه شد. شاخص پیچیدگی در مرحلهٔ نهایی به‌شکل معنی‌داری بیشتر از دو مرحلهٔ دیگر بود، با این‌حال براساس آزمون توکی اختلاف معنی‌داری بین میانگین شاخص در دو مرحلهٔ تحولی اولیه (۴/۲۳± ۶۱/۳۹) و میانی (۳/۳۳± ۵۸/۸۵) مشاهده نشد. با توجه به تأثیر تنوع و پیچیدگی ساختار جنگل در کارکردهای اکولوژیک جنگل‌ها مانند حفظ تنوع زیستی، پرورشی تغییرات باید در همهٔ دخالت‌ها و عملیات پیچیدگی ساختار مدنظر قرار گیرد. افزون‌بر حفاظت از تنوع زیستی، افزایش پیچیدگی ساختار توده‌های جنگلی را نیز باید از مهم‌ترین اهداف طرح‌های مدیریت جنگل لحاظ کرد.

واژه‌های کلیدی: پویایی توده‌های جنگلی، تنوع اندازه‌ای درختان، حفاظت از طبیعت، ضریب جینی، همگام با طبیعت.

مقدمه

تغییر در نگرش و انتظارات ذی‌نفعان جنگل‌ها و چالش‌های محیط زیستی پیش روی بشر در سال‌های اخیر به اقدامات عملی متعدد برای کاستن از شدت دخالت در جنگل‌های طبیعی انجامیده است. از این‌رو جنگل‌شناسی نزدیک به طبیعت به‌منزلهٔ یکی از شیوه‌های مدیریت کم اثر، می‌تواند انتخاب مناسبی برای مدیریت جنگل‌های طبیعی باشد. این شیوه برای اعمال دخالت‌ها و برنامه‌ریزی‌های پرورشی به اطلاعات اساسی از تحول توده‌های جنگلی نیاز دارد. تغییر ساختار و ترکیب توده‌های جنگلی با گذشت زمان به شکل‌گیری وضعیت‌های ساختاری متفاوتی منجر می‌شود که مراحل و فازهای تحولی نامیده می‌شوند (Leibundgut, 1993). در عین‌حال، ساختار متنوع و پیچیده در جنگل‌های طبیعی سبب شکل‌گیری و توسعه فازهای تحولی متفاوتی می‌شود. آگاهی از تغییرات ویژگی‌های ساختاری و حد پیچیدگی ساختاری در توده‌های کمتر دست‌خورده می‌تواند

* نویسندهٔ مسئول شمارهٔ تماس: ۰۹۱۲۷۲۶۴۰۶۶ ایمیل: kiomarssefidi@gmail.com

مبنای تصمیمات و مدیریت جنگل‌های طبیعی برای رسیدن به پایداری در مقیاس توده و سیمای سرزمین باشد. کمّی‌سازی ساختار در جنگل‌ها اغلب توسط شاخص‌های منفرد و برمبنای اندازه‌گیری گروه‌های درختی انجام گرفته است. پیچیدگی ساختار توده‌های جنگلی[1] شاخصی چندمتغیره است که برمبنای اندازه‌گیری‌های انجام‌گرفته در مقیاس توده محاسبه می‌شود و شاخص مناسبی برای مقایسهٔ جنگل‌ها در مراحل و فازهای تحولی مختلف به شمار می‌رود.

در سال‌های اخیر پرورش جنگل‌های دارای پیچیدگی زیاد و افزایش پیچیدگی ساختار جنگل‌های تحت مدیریت از مهم‌ترین اهداف مدیریت جنگل در جنگل‌های پهن‌برگ اروپا بوده است (Brang et al., 2014). چراکه جنگل‌های دارای پیچیدگی زیاد، در ساختار اغلب تاب‌آوری مناسبی در مواجهه با آشفتگی‌های محیطی مانند تغییرات اقلیمی دارند. افزون‌بر این، پیچیدگی ساختار توده‌های جنگلی تأثیر مثبتی بر اغلب کارکردهای بوم‌سازگان جنگل (Gadow et al., 2012)، نگهداشت تنوع زیستی در بوم‌سازگان جنگل (Gustafsson et al., 2012)، چرخهٔ عناصر تغذیه‌ای (Ellison et al., 2005)، ناهمگنی در رویشگاه‌ها و زیستگاه‌ها (Franklin & Van Pelt, 2004) دارد و حتی سبب افزایش محصول‌دهی و رویش سالیانه (Dănescu et al., 2016) در توده‌ها می‌شود. وجود جنگل‌های واقع در مرحلهٔ انتهایی توالی و شکل‌گیری مراحل تحولی گوناگون در جنگل‌های هیرکانی شرایط مناسبی برای بررسی حد پیچیدگی در ساختار جنگل را فراهم کرده است. مدیریت همگام با طبیعت که شیوهٔ مناسب پرورش جنگل در جنگل‌های راش شرقی (*Fagus orientalis* Lipsky) است، مستلزم برخورداری از اطلاعات مناسب کمّی از حد پیچیدگی ساختار است. در جنگل‌های طبیعی ساختار توده‌های جنگلی با گذشت زمان و تحت تأثیر آشوب‌های محلی دچار دگرگونی می‌شود که تغییرات مشهود در چیدمان مکانی درختان و در نتیجه پیچیدگی ساختار آنها را در پی دارد. افزایش ناهمگنی در ساختار افقی و عمودی توده با تنوع زیاد گونه‌ای توده مرتبط است (Pommerening, 2002) و از فعالیت‌های مدیریتی و انسانی حاکم بر آن تأثیر می‌پذیرد. نتایج این فعالیت‌ها را در ساختار توده‌های جنگلی در سه قالب شکل، اندازه و توزیع مکانی درختان می‌توان بررسی کرد (Sefidi et al., 2014).

چرخه‌های تحولی در جنگل‌ها نخستین بار در جنگل‌های اروپای مرکزی و توسط Watt معرفی شد (1947) و در ادامه Korpel (1995) سه مرحلهٔ تحولی برای جنگل‌های آمیختهٔ راش اروپایی (*Fagus sylvatica* L.) و نراد (*Abies alba* Mill.) معرفی کرد. پس از آن براساس تحقیقات Leibundgut (1993) و Meyer (1995) فازهای تحولی برای جنگل‌های راش در اروپا معرفی شد. در جنگل‌های شمال ایران نیز پژوهش‌های متعددی در زمینهٔ تحول و پویایی توده‌های جنگلی انجام گرفته است. این پژوهش‌ها از سال ۱۳۸۷ و با تحقیق دربارهٔ قطعات دائمی توسط Sagheb-Talebi et al. (2020) در قالب طرح مطالعات قطعات نمونهٔ دائمی و نیز مطالعهٔ قطعهٔ ۷۵ هکتاری در جنگل‌های گرازبن در سال ۱۳۸۵ توسط Sefidi et al. (2014) آغاز شد. در عین‌حال پژوهش‌ها در جنگل‌های هیرکانی در دو گروه براساس دو دیدگاه از مراحل تحولی در جنگل‌های راش و نراد در اسلوونی (Korpel, 1982) و فازهای تحولی جنگل‌های آمیختهٔ راش هیرکانی (Sefidi et al., 2014) پایه‌گذاری شده است.

پژوهش‌های متعددی در جنگل‌های هیرکانی به تحلیل کمّی تفاوت‌های سه مرحلهٔ تحولی پرداخته‌اند. نتایج اولیهٔ ارزیابی ساختار توده در قطعه‌های بررسی دائمی راشستان‌های دست‌نخورده در جنگل‌های هیرکانی نشان داد که تعداد درخت زنده بین ۱۸۸ اصله در مرحلهٔ تخریب و ۴۷۵ اصله در مرحلهٔ اولیه و تعداد

1. Forest stand structural complexity index

کل خشک‌دار بین ۷ و ۳۰ اصله در هکتار نوسان داشت، درحالی که متوسط تعداد خشک‌دار بالغ، ۳ اصله در هکتار بود. متوسط رویهٔ زمینی، حجم کل و حجم خشک‌دار به‌ترتیب ۶۵/۴۰ متر مربع، ۶/۵۹۲ متر مکعب و ۸/۵۵ متر مکعب در هکتار محاسبه شد. توده‌ها در مرحلهٔ بلوغ دواشکوبه بودند، اما در دو مرحلهٔ دیگر سه اشکوب مشاهده شد (Sagheb-Talebi et al., 2020). همچنین تحقیق در سه قطعهٔ ۲۵ هکتاری دست‌نخورده در جنگل‌های مازندران توسط Sefidi et al. (2014) نشان داد که فرایند پویایی توده‌های راش، در سه مرحله و هشت فاز تحولی انجام می‌گیرد. سه مرحلهٔ اولیه (افزایش حجم)، مرحلهٔ بلوغ (انباشت حجم) و مرحلهٔ نهایی (دگرگونی حجم) در توده‌های راش شناسایی شد که در یک چرخه شامل فازهای متوالی تشکیل روشنه، حجم‌کاهی، کهن‌رست، کاهش پایه‌ها، نورافزایی، بلوغ، تشکیل زیراشکوب و زادآوری است. بر این اساس روند پویایی توده‌های راش اغلب با تشکیل روشنه‌هایی در اندازه‌های کوچک و افتادن یک درخت روشنه‌ساز آغاز می‌شود. پژوهش‌های متعدد دیگری نیز به آشکارسازی تفاوت‌های ساختاری این مراحل برپایهٔ دیدگاه Korpel (1995) پرداخته‌اند برای نمونه Amini et al. (2018) بیان کردند که شاخص‌های نسبت درختان خیلی قطور به قطور، قطر و ارتفاع درختان توده، قطر و ارتفاع درختان اشکوب بالا، شاخص سطح برگ، شدت نور نسبی، نسبت رویهٔ زمینی، شاخص تغییریافته Frelich-Lorimer در بین مراحل تحولی اختلاف معنی‌داری دارند. Amanzadeh et al. (2013) به تغییر در الگوی مکانی و حجم خشک‌دارها در مراحل تحولی پرداختند. افزون‌بر این در برخی پژوهش‌ها، مبنای طبقه‌بندی مراحل و فازهای شناسایی‌شده در جنگل‌های راش هیرکانی بوده است. Sefidi et al. (2020a) با تأکید بر اهمیت تعداد درختان در طبقات کم‌قطر و نیز قطور در تفکیک مراحل تحولی توده نشان دادند که اگرچه در هر سه مرحلهٔ توزیع درختان دارای الگوی مشابه و به شکل کاهنده است، اختلاف معنی‌داری بین سه مرحله از لحاظ تعداد درختان در طبقات کم قطر (کوچک‌تر از ۲۵ سانتی‌متر) و تعداد درختان قطور (بیش از ۱۰۰ سانتی‌متر) وجود دارد. با تحلیل کمّی ساختار جنگل و الگوی پراکنش درختان در مراحل تحولی در جنگل‌های خیرود نوشهر در مرحلهٔ افزایش حجم (بلوغ) مشخص شد که در این مرحله، الگوی مکانی درختان کپه‌ای متمایل به تصادفی بوده و تمایل درختان راش به آمیختگی با گونه‌های دیگر کم است (Moridi et al., 2021).

بررسی فاز تحولی کهن‌رست توسط Nobahar et al. (2018) نشان داد که در این فاز، متوسط حجم و رویهٔ زمینی توده به‌ترتیب ۵۴۷ متر مکعب و ۳۷ متر مربع بوده و توده‌های راش ساختار به‌نسبت همگنی دارند و تمایل این گونه به آمیختگی با گونه‌های دیگر کم است. Moridi et al (2015) به بررسی فاز کاهش پایه‌ها پرداختند و نشان دادند که در این فاز تعداد درختان ۴۱۲ اصله در هکتار و حجم سرپا حدود ۵۱۴ متر مکعب است. بر این اساس در این فاز راش با ممرز آمیخته و وارد رقابت برای کسب نور می‌شود. Sefidi et al (2018) نیز فاز تشکیل روشنه را به‌شکل کمی تحلیل و بیان کردند که در این فاز ساختار به نسبت ناهمگن است؛ اگرچه تمایز ارتفاعی کمی بین درختان دیده می‌شود. تعداد درختان در واحد سطح و حجم سرپا در این فاز به‌ترتیب ۳۷۹ اصله و ۵۱۴ متر مکعب گزارش شده است.

اگرچه در جنگل‌های هیرکانی کمّی‌سازی تعدادی از مشخصه‌های ساختاری در برخی از فازها و سه مرحلهٔ تحولی انجام گرفته است، اما تحلیل پیچیدگی ساختار تا کنون انجام نگرفته است، این در حالی است که در سال‌های اخیر پژوهش‌های متعددی در مناطق مختلف جهان به کمّی‌سازی پیچیدگی ساختار پرداخته‌اند. Willim et al. (2020) با تحقیق دربارهٔ جنگل‌های راش در آلمان، اوکراین و اسلواکی به تحلیل الگوی مکانی پیچیدگی در ساختار جنگل‌ها در مناطق

تحت مدیریت و جنگل‌های فاقد مدیریت پرداختند و نشان دادند که پیچیدگی ساختار جنگل در مناطق با سابقهٔ مدیریتی متفاوت در اشکوب‌های درختی مختلف ممکن است متفاوت باشد. همچنین اختلاف معنی‌داری بین جنگل‌های طبیعی و کهن‌رست با جنگل‌های طبیعی مدیریت‌شده مشاهده نشد که بر این اساس شیوهٔ برش گزینشی بهترین شیوه برای حفظ پیچیدگی ساختار در این جنگل‌ها معرفی شد..al et Parobeková (2018) با بررسی پیچیدگی ساختار در جنگل‌های کهن‌رست و آمیختهٔ راش، نراد و نوئل (*Picea abies* L.) در ارتفاعات کارپات در اسلواکی نشان دادند که مراحل تحولی اختلافاتی از نظر تعداد درختان در واحد سطح، میانگین قطر و حجم سرپا و خشک دارند، اگرچه در هر سه مرحلهٔ تحولی منحنی توزیع درختان در طبقات قطری به‌شکل نمایی کاهنده مشاهده می‌شود. در پژوهش دیگری .Seidel et al (2019) به تأثیر اساسی وجود درختان قطور در توده در ایجاد پیچیدگی در ساختار توده اشاره کردند و اظهار داشتند که این موضوع نه به‌علت قطر زیاد، بلکه به‌دلیل معماری پیچیده درختان قطور در جنگل‌هاست. بر این اساس بهترین شاخص‌ها برای تعیین پیچیدگی در ساختار شاخص‌های مرتبط با ساختار افقی و عمودی مانند تعداد درختان در اشکوب‌ها و ساختار افقی نظیر تمایز در قطر درختان است. تولید اولیهٔ جنگل نیز توسط متأثر از پیچیدگی ساختار است .Gough et al (2019) نیز با تأکید بر تأثیر پیچیدگی ساختار جنگل بر تولید اولیه در بوم‌سازگان‌های جنگلی بیان کردند که ساختار متنوع، سبب ویژگی‌های متفاوتی در بخش دریافت‌کنندهٔ نور می‌شود و تولید خالص اولیه در بوم‌سازگان افزایش می‌یابد.

بیان کمّی پیچیدگی ساختار در جنگل‌های کمتردست‌خورده در مراحل تحول طبیعی توده‌ها می‌تواند پایه و اساس بازسازی رویشگاه‌های دست‌خورده در مناطق مختلف و همچنین تدوین برنامه‌های پرورشی نزدیک به طبیعت در این جنگل‌ها باشد. بررسی منابع نشان می‌دهد که دربارهٔ ساختار توده‌های جنگلی در سال‌های اخیر در مراحل مختلف تحولی جنگل‌های هیرکانی تحقیق شده است، اما دربارهٔ برآورد شاخص پیچیدگی به‌منزلهٔ شاخصی چندمتغیره تا کنون پژوهش نشده است. نتایج این بررسی می‌تواند اطلاعات مناسبی از وضعیت پیچیدگی ساختار در مراحل مختلف تحولی جنگل‌های هیرکانی ارائه دهد. این تحقیق با هدف برآورد این شاخص و آشکارسازی تفاوت‌های سه مرحله براساس شاخص پیچیدگی جنگل انجام گرفت.

مواد و روش‌ها

منطقهٔ پژوهش

این پژوهش در پارسل ۳۱۸ بخش گرازبن از جنگل خیرود انجام گرفت. داده‌های پژوهش بخشی از داده‌های مرحلهٔ نخست آماربرداری قطعات دائمی ۲۵ هکتاری است که پیش از اجرای طرح مدیریت جنگل اندازه‌گیری شده است. رویشگاه‌های بررسی‌شده در جنگل خیرود در ۷ کیلومتری شرق نوشهر و در غرب استان مازندران بین ′۲۷ °۳۶ و ′۴۰ °۳۶ عرض شمالی و ′۳۲ °۵۱ و ′۴۳ °۵۱ طول شرقی واقع است. مساحت کل جنگل خیرود حدود ۸۰۰۰ هکتار است. این جنگل از شمال به نوار ساحلی و روستای خیرودکنار و از جنوب به ییلاقات و روستای کلیک محدود می‌شود. این رویشگاه‌ها با توجه به سابقهٔ مدیریتی و نبود نشانه‌گذاری و بهره‌برداری صنعتی، تشابه تیپ و شرایط رویشگاهی از بخش گرازبن این جنگل انتخاب شد. در این بخش از جنگل خیرود حجم متوسط درختان براساس آماربرداری صد در صد، ۳۳۸ سیلو گزارش شده است (Moridi et al., 2015).

شیوهٔ اجرای پژوهش

براساس اطلاعات و داده‌های موجود و مبنای مطالعهٔ سیر تحولی توده‌های راش شرقی در جنگل‌های هیرکانی (Sefidi et al., 2014) و دستاوردهای مطالعات قطعات دائمی در مناطق مختلف از جنگل‌های

هیرکانی (Sagheb-Talebi, 2013) و جنگل‌های راش و نراد در اروپا (Korpel, 1982) چهار قطعهٔ یک هکتاری در هر یک از مراحل سه‌گانهٔ تحولی (در مجموع ۱۲ هکتار) که پیشتر تعلق قطعات به این مراحل مشخص شده است (Sefidi et al., 2014)، انتخاب و مشخصه‌های کمی ساختار توده به‌منظور برآورد مقدار کمّی شاخص پیچیدگی در جنگل اندازه‌گیری شد. بر این اساس در قطعات یک‌هکتاری قطر برابرسینهٔ همهٔ درختان با قطر بیش از ۷/۵ سانتی‌متر با خط‌کش دو بازو اندازه‌گیری و تعداد پایه‌های درختان با قطر کمتر شمارش و ثبت شد.

روش تحلیل

برای کمّی‌سازی مقدار عددی شاخص پیچیدگی ساختار از مجموعه‌ای از متغیرهای منفرد مرتبط با مهم‌ترین ویژگی‌های ساختاری توده‌های جنگلی استفاده شد. شاخص پیچیدگی ساختار توده‌های جنگلی براساس روش معرفی‌شده توسط McElhinny et al. (2005) تعیین شد. بر این اساس شاخص‌های منفرد انتخاب و شاخص چندمتغیره پیچیدگی در چهار مرحله محاسبه شد. در مرحلهٔ اول تعدادی از متغیرهای معمول در اندازه‌گیری‌های ساختار در جنگل‌ها براساس منابع و پژوهش‌های پیشین در زمینهٔ کمّی‌سازی ساختار توده‌های جنگلی در توده‌های با شرایط رویشگاهی مشابه (Sagheb-Talebi et al., 2014; Javanmiri pour et al., 2019; Ehbrecht et al., 2017) شامل بیش از ۳۵ شاخص تعیین شد. افزون‌بر این در جنگل‌های هیرکانی پژوهش‌های Amini et al. (2018) و در جنگل‌های راش اروپا Seidel et al. (2017) گروهی از متغیرهای مرتبط با ساختار توده را به‌عنوان مهم‌ترین متغیرها در تعیین مراحل تحولی معرفی کرده‌اند که در این مرحله مدنظر قرار گرفت. در مرحلهٔ دوم شاخص‌های مرتبط در گروه‌های مشخص به‌عنوان منابع ایجاد تنوع در ساختار جنگل‌های کهن‌رست دسته‌بندی شد. بر این اساس متغیرها ممکن است در چند گروه شامل متغیرهای مرتبط با ۱. ساختار عمودی جنگل (مانند تعداد اشکوب‌ها و ارتفاع هر اشکوب)؛ ۲. ویژگی‌های ابعادی درختان (قطر، ارتفاع و متغیرهای وابسته به آنها)؛ ۳. پوشش تاجی (میانگین مساحت روشنه یا نسبت روشنه به سطح جنگل)؛ ۴. ویژگی‌های توده (تراکم، سطح رویهٔ زمینی و نسبت درختان قطور در توده)؛ و ۵. خشک‌دارها و درختان زیستگاهی (فراوانی، حجم یا قطر آنها) باشند. در مرحلهٔ سوم پس از تعیین متغیرهای مؤثر بر پیچیدگی، مهم‌ترین متغیرها براساس داده‌های در دسترس، سهولت در اندازه‌گیری (مانند ارجحیت و انتخاب قطر برابرسینه در برابر ارتفاع) و نیز حذف داده‌های با همبستگی زیاد (انتخاب میانگین قطر در برابر سطح مقطع برابرسینه) از بین متغیرهای منفرد انتخاب شد. در انتخاب متغیرهای با همبستگی زیاد اولویت با متغیرهای دارای سهولت در اندازه‌گیری بود. در نهایت در مرحلهٔ چهارم از ترکیب ده متغیر منتخب در مرحلهٔ قبل (جدول ۱)، شاخص ترکیبی پیچیدگی ساختار برای هر یک از قطعات نمونه محاسبه شد که به‌شکل درصد نشان داده می‌شود. در این مرحله برای تعیین ارزش متغیرها بین صفر تا ۱۰ از آزمون رگرسیون خطی ساده استفاده شد. به این منظور مقادیر عددی ۲/۵، ۵، ۷/۵ و ۱۰ متناظر با مقادیر میانهٔ چارک‌های ۱۲/۵، ۶۲/۳۷،۵/۵ و ۸۷/۵ در نظر گرفته شد (McElhinny et al., 2005; Sabatini et al., 2015). بر این اساس و با مدل‌سازی براساس رگرسیون خطی ساده برای هر متغیر مقدار متناظر آن بین صفر تا ۱۰ تعیین شد. در نهایت با جمع هر یک از متغیرهای شاخص پیچیدگی ساختار بین صفر و ۱۰۰ تعیین شد. بر این اساس مقدار عددی شاخص در توده‌های جنگلی با بیشترین پیچیدگی نزدیک به ۱۰۰ و در توده‌های با کمترین پیچیدگی در ساختار مقدار عددی نزدیک به صفر خواهد بود (Sefidi et al., 2020b).

قطر درختان از مهم‌ترین ویژگی‌های ابعادی درختان است که ممکن است بر پیچیدگی ساختار در جنگل‌ها اثرگذار باشد بر این اساس افزون‌بر میانگین قطر درختان، ضریب تغییرات قطر از رابطهٔ ۱ برآورد شد:

$$CV_{DBH} = \frac{SDD}{D_m}$$ رابطهٔ ۱

که در آن CV_{DBH} ضریب تغییرات قطر درختان، SDD، انحراف معیار قطر و Dm میانگین قطر درختان است.

افزون‌بر این، از شاخص تنوع اندازه‌ای درختان (Tree size diversity index) براساس شاخص شانون (رابطهٔ ۲) استفاده شد.

$$H' = -\sum_{i=1}^{S} p_i \ln(p_i)$$ رابطهٔ ۲

که در آن H` شاخص تنوع اندازه‌ای درختان، S تعداد طبقات قطر و P_i نسبت تعداد درختان در طبقهٔ قطری i به تعداد کل درختان است.

همچنین به‌منظور تعیین ناهمگنی در پراکنش درختان در طبقات قطری از شاخص ضریب جینی قطر درختان (رابطهٔ ۳) استفاده شد.

$$GC = \frac{\sum_{j=1}^{n}(2j-1-n)ba_j}{\sum_{j=1}^{n} ba_j(n-1)}$$ رابطهٔ ۳

که در آن GC ضریب جینی، n تعداد درختان در قطعه نمونه، j عدد طبقات قطری در ترتیب صعودی قطر برابرسینه و baj رویهٔ زمینی مربوط به هر درخت یا طبقهٔ قطری است.

با توجه به اهمیت روشنه‌ها و خشکدارها در افزایش پیچیدگی در ساختار، این دو متغیر نیز بررسی شدند. روشنه‌ها به‌شکل باز شدن تاج‌پوشش با حداقل مساحت ۱۵ متر مربع که در اثر پوسیدگی طبیعی درختان اتفاق می‌افتند تعریف شد. زمانی که ارتفاع درختان و نهال‌های پرکنندهٔ روشنه‌ها به نصف ارتفاع درختان جانبی رسید، روشنه‌ها بسته فرض شد. برای برداشت مساحت واقعی روشنه‌ها، دو قطر بزرگ با تعریف بزرگ‌ترین قطر روشنه و نیز قطر کوچک با تعریف کوچک‌ترین قطر عمود بر قطر بزرگ در هر روشنه با استفاده از متر نواری برداشت و با استفاده از فرمول ریاضی بیضی به‌عنوان شکل غالب در روشنه‌ها مساحت هر یک از روشنه‌ها اندازه‌گیری شد (Mohammadi et al., 2020). در این تحقیق، خشکدارها با قطر بیش از ۱۰ سانتی‌متر گونه، نوع (افتاده، سرپا و یا کنده)، درجهٔ پوسیدگی، طول یا ارتفاع و قطر در سه نقطهٔ ابتدایی، میانی و انتهایی از تنه اندازه‌گیری شد. در این بررسی برای اندازه‌گیری حجم خشکدارهای افتاده از رابطهٔ نیوتن از رابطهٔ ۴ استفاده شد (Sefidi et al., 2013).

$$V = \frac{L\left(A_b + 4A_m + A_t\right)}{6}$$ رابطهٔ ۴

که در آن V حجم به مترمکعب، L طول به متر، Ab، Am و At به‌ترتیب قطر ابتدا، میانه و انتهای خشک‌دار به سانتی‌متر است. برای محاسبهٔ حجم خشک دارهای سرپا و کنده‌ها از رابطهٔ ۵ استفاده شد:

$$V = A_m * L$$ رابطهٔ ۵

که در آن V حجم کنده به متر مکعب، L طول به متر و Am قطر میانهٔ کنده و خشک‌دار است. همچنین شمار نهال‌های با قطر برابرسینهٔ کوچک‌تر از ۷/۵ سانتی‌متر که ارتفاع آنها برابر یا بیشتر از ۱۳۰ سانتی‌متر بود به‌منزلهٔ تعداد درختان زیراشکوب در این بررسی ثبت شد.

در این پژوهش، برای بررسی وجود یا نبود اختلاف بین مراحل تحولی مختلف از لحاظ شاخص پیچیدگی ساختار و متغیرهایی مانند ضریب جینی قطر درختان، نسبت روشنه و تنوع اندازه‌ای درختان از آزمون تحلیل واریانس یکطرفهٔ داده‌ها و برای تعیین اختلافات بین گروه‌ها نیز از آزمون آماری توکی استفاده شد. همچنین برای تعیین متغیرهای مرتبط از همبستگی پیرسون در مرحلهٔ انتخاب متغیرها استفاده شد. پیش از آن نرمال بودن توزیع داده‌ها با آزمون کولموگروف-اسمیرنوف و بررسی برابری واریانس با آزمون لون انجام گرفت و در صورت نیاز، نرمال‌سازی داده‌ها و تصحیح چولگی زیاد در توزیع داده‌ها از طریق تصحیح ریشهٔ دوم داده‌ها صورت گرفت. از بسته ggplot2 برای نمایش داده‌ها به‌شکل نمودار استفاده شد. همهٔ

آزمون‌های آماری در سطح معنی‌داری ۰/۰۵ و در محیط نرم‌افزاری R نسخهٔ ۳.۵.۳ انجام گرفت.

نتایج

در این بررسی در مجموع ۱۰۵۱ اصله درخت در مساحت ۱۲ هکتاری و در سه مرحلهٔ تحولی بررسی شد. بر این اساس بیشترین تعداد درختان در واحد سطح در مرحلهٔ اولیه (افزایش حجم) با ۲۴۸ اصله در هکتار، بیشترین میانگین قطر درختان و بیشترین حجم سرپا در مرحلهٔ نهایی (دگرگونی حجم) با قطر متوسط ۲/۴ ± ۴۷/۱ سانتی‌متر و ۶۰۷ مترمکعب حجم سرپا محاسبه شد (جدول ۲).

جدول ۱- رابطهٔ رگرسیونی استفاده‌شده برای تعیین مقدار متناظر هر یک از متغیرهای شاخص بین صفر تا ۱۰

Table 1. Regression equations used to assign a score to the quantitative values of indices on a scale of 0-10

ضریب بتا β	ضریب R^2 R^2	رابطهٔ رگرسیونی Regression equation	متغیرها Variables
0.97	0.95	Score = -1.463 + X · 0.045	تعداد درختان در هر هکتار Stem per hectare
0.96	0.95	Score = -5.858+ X · 0.326	میانگین قطر درختان Mean of DBH
0.98	0.98	Score = -1.432 + X · 30. 751	ضریب جینی قطر درختان Gini coefficient
0.97	0.95	Score = 1.725 + X · 0.761	تعداد درختان قطورتر از ۱۰۰ سانتی‌متر Number of large trees (DBH> 100 cm)
0.99	0.99	Score = 0.652 + X · 1.431	نسبت سطح روشنه جنگل Gap fraction
0.98	0.98	Score = -2.023 + X · 0.362	تعداد خشک‌دار در هر هکتار Dead wood Number
0.96	0.92	Score = 2.757 + X · 0. 134	حجم خشک‌دار در هر هکتار Dead wood Volume
0.94	0.89	Score =-3.799 + X · 4. 313	تنوع اندازه‌ای درختان (شاخص شانون) Tree size variation index (Shanon)
0.88	0.78	Score =- 12.567 + X · 22. 369	شاخص یکنواختی اندازه‌ای درختان Tree size variation index (Pielou)
0.88	0.78	Score = 3.702 + X · 1. 963	نسبت فراوانی زیراشکوب به اشکوب بالا Canopy to understory layer density

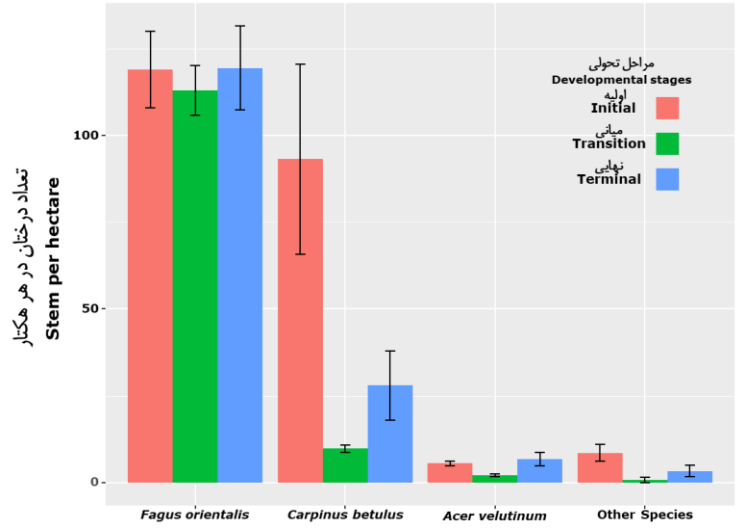
جدول ۲- میانگین برخی از مشخصه‌های اندازه‌ای درختان در منطقه به تفکیک مراحل تحولی

Table 2. Mean of some Tree size variation related characteristics in different developmental stages

مرحلهٔ نهایی Terminal stage	مرحلهٔ میانی Transition stage	مرحلهٔ اولیه Initial stage	مشخصه‌ها Characteristics
163	168	248	تعداد در هکتار (اصله) Stem per hectare
47.1 ± 2.4	42.1 ± 1.2	25.1 ± 1.2	میانگین قطر ± خطای معیار (سانتی‌متر) Mean of DBH (cm)
1.53	1.14	1.39	ضریب تغییرات قطر درختان Coefficient of variation
0.215	0.284	0.336	شاخص ضریب جینی قطر درختان Gini coefficient
205	195	203	بیشینه قطر (سانتی‌متر) Maximum of DBH (cm)
7.5	7.5	7.5	کمینه قطر (سانتی‌متر) Minimum of DBH (cm)

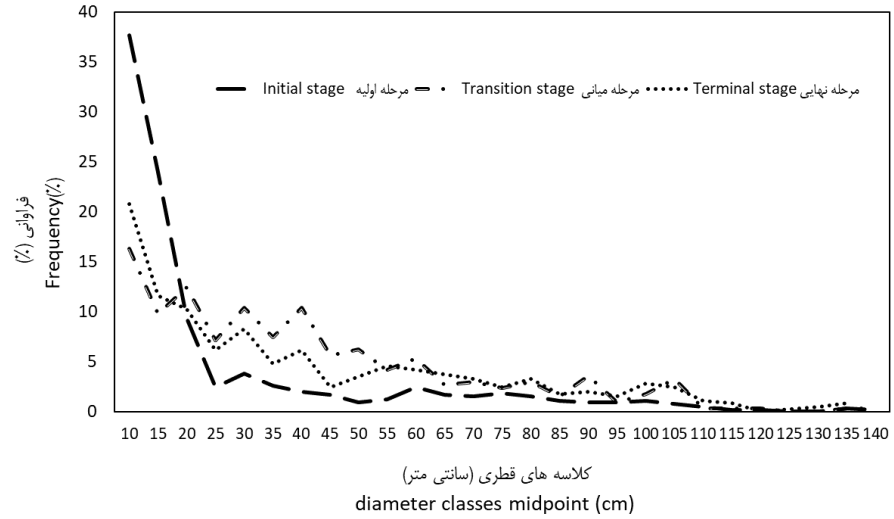
راش شرقی مطابق انتظار فراوان‌ترین گونهٔ درختی در هر سه مرحلهٔ تحولی است. اگرچه در مرحلهٔ اولیه ممرز (*Carpinus betulus* L.) فراوانی زیادی دارد، اما در مرحلهٔ میانی (انباشت حجم) با حذف درختان ممرز، راش غلبه کامل دارد و در مرحلهٔ نهایی افزایش مجدد فراوانی ممرز همراه با بقیهٔ گونه‌ها مانند پلت (*Acer velutinum* Boiss.) مشاهده می‌شود (شکل ۱).

منحنی توزیع فراوانی درختان در طبقات قطری مختلف نیز اگرچه روند کاهنده و مبتنی بر یک توزیع نمایی کاهنده است، اما تفاوت‌هایی بین مراحل در طبقات قطری مختلف مشاهده می‌شود (شکل ۲). در مرحلهٔ اولیه بیشترین فراوانی درختان در طبقات کم‌قطر است. در این مرحله بیش از ۵۰ درصد از فراوانی درختان در طبقات ۱۵ و ۱۰ سانتی‌متری مشاهده می‌شود. در مرحلهٔ میانی و انتهایی به‌ترتیب ۲۱ و ۲۹ درصد از درختان در این دو طبقهٔ قطری قرار می‌گیرند. همچنین در طبقات درختان قطور و بسیار قطور (قطر برابرسینهٔ بیش از ۱۰۰ سانتی‌متر) بیشترین فراوانی به مرحلهٔ تحولی انتهایی (۱۸ درصد) تعلق دارد.



شکل۱- مقایسهٔ فراوانی مهم‌ترین گونه‌های درختی در مراحل تحولی در جنگل‌های آمیختهٔ راش

Figure1. Comparison of density of main tree species in developmental stages

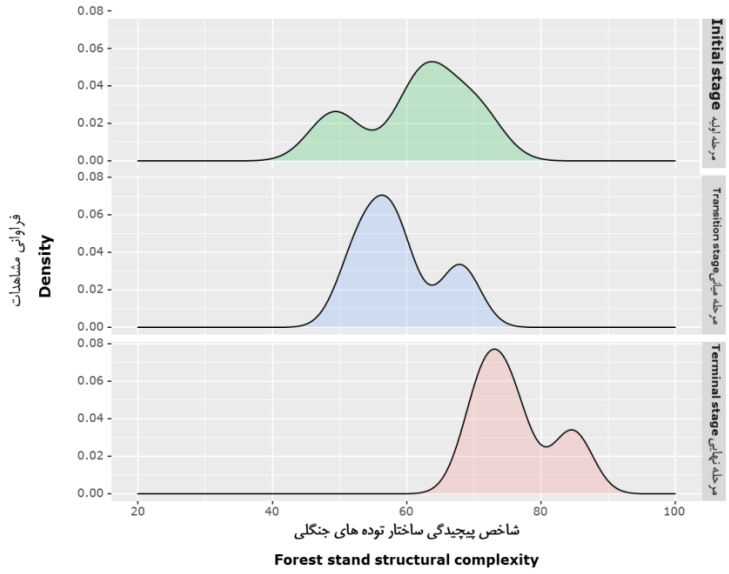


شکل۲- مقایسهٔ پراکنش درختان در طبقات قطری در سه مرحلهٔ تحولی

Figure2. Comparison of diameter class distribution of trees in developmental stages

پیچیدگی ساختار توده‌ها در مراحل تحولی مختلف

مطابق انتظار شاخص پیچیدگی ساختار مقادیر متفاوتی را در مراحل تحولی نشان می‌دهد. بیشترین فراوانی مشاهدات در مرحلهٔ نهایی (دگرگونی حجم) و در محدودهٔ ۶۰ تا ۸۵ درصد مشاهده می‌شود (شکل ۳). به‌شکل مشابهی تفاوت‌هایی بین برخی از متغیرها در مراحل سه‌گانهٔ تحولی وجود دارد. میانگین شاخص حجم درختان خشک و نسبت مساحت روشنه به سطح جنگل، دو متغیر مهم در تفکیک مراحل‌اند که تفاوت‌هایی را نشان می‌دهند (شکل ۴). بر این اساس، شاخص نسبت روشنه به‌شکل معنی‌داری در مرحلهٔ نهایی بیشتر از دو مرحلهٔ دیگر است (جدول ۳)، اگرچه اختلاف معنی‌داری بین مرحلهٔ اولیه و میانی مشاهده نمی‌شود.



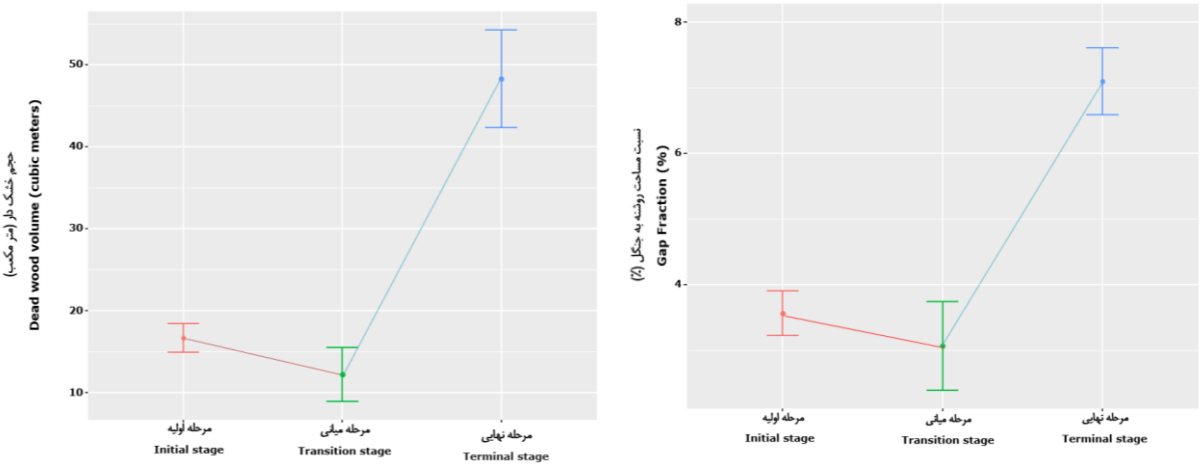
شکل ۳- مقایسهٔ فراوانی مقادیر عددی شاخص پیچیدگی ساختار در سه مرحلهٔ تحولی

Figure. 3. Comparison of density of structural complexity in developmental stages

جدول ۳- مقایسهٔ میانگین مقدار عددی شاخص‌های مرتبط با پیچیدگی در مراحل تحولی

Table3. The results of ANOVA complexity related characteristics in developmental stages

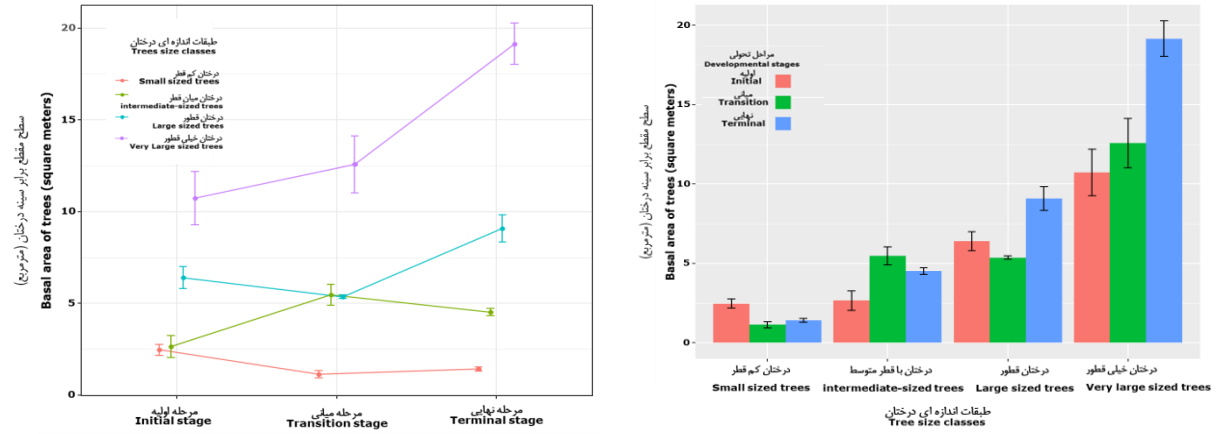
Sig.	آمارهٔ F F value	میانگین مربعات Sum of square	درجهٔ آزادی df	ویژگی ساختاری توده Stand structural properties
0.015	6.973	978.03	9	تعداد درختان در هر هکتار Stem per hectare
0.001>	5.240	5.240	9	میانگین قطر درختان Mean of DBH
0.158	2.271	0.15	9	ضریب تغییرات قطر درختان Coefficient of variation
0.021	6.139	33.08	9	تعداد درختان قطورتر از ۱۰۰ سانتی‌متر Density of large trees
0.001>	17.361	19.03	9	نسبت سطح روشنهٔ جنگل (٪) Gap fraction
0.369	1.118	44.33	9	تعداد خشک‌دار در هر هکتار Dead wood Number
0.001>	23.709	4.623	9	حجم خشک‌دار در هر هکتار Dead wood Volume
0.019	4.795	6.376	9	تنوع اندازه‌ای درختان (شاخص شانون) Tree size variation index (Shanon)
0.002	12.77	0.114	9	شاخص یکنواختی اندازه‌ای درختان Tree size variation index (Pielou)
0.048	4.431	0.525	9	نسبت فراوانی زیراشکوب به اشکوب بالا Canopy to understory layer density



شکل ۴- مقایسهٔ تغییرات حجم خشک دارها و مساحت روشنه به سطح جنگل در سه مرحلهٔ تحولی

Figure 4. Comparison of dead volume and canopy gap fraction in the developmental stages.

در بین شاخص‌های اندازه‌ای، میانگین شاخص ضریب جینی قطر درختان به‌عنوان شاخص بیان‌کنندهٔ ناهمگنی در توزیع درختان در طبقات مختلف قطری اختلاف معنی‌داری بین سه مرحلهٔ تحولی نشان نمی‌دهد (F=۲/۲۷, sig=۰/۱۵) اگرچه مقایسهٔ بین مراحل نشان می‌دهد که این شاخص در مرحلهٔ اولیه (۰/۳۳ ±۰/۰۴) بیشتر از مرحلهٔ انتهایی (۰/۰۱± ۰/۲۱) است. اما شاخص‌های ضریب تغییرات قطر درختان (F =۵۱/۰۱, sig <۰/۰۰۱) و شاخص تغییرات اندازه‌ای درختان (شانون) اختلاف معنی‌داری (۰/۰۱۹, F =۴/۷۹sig=) بین مراحل نشان می‌دهد. اگرچه مطابق انتظار و براساس آزمون توکی، ضریب تغییرات قطر درختان اختلاف معنی‌داری بین دو مرحلهٔ میانی و نهایی نشان نمی‌دهد.



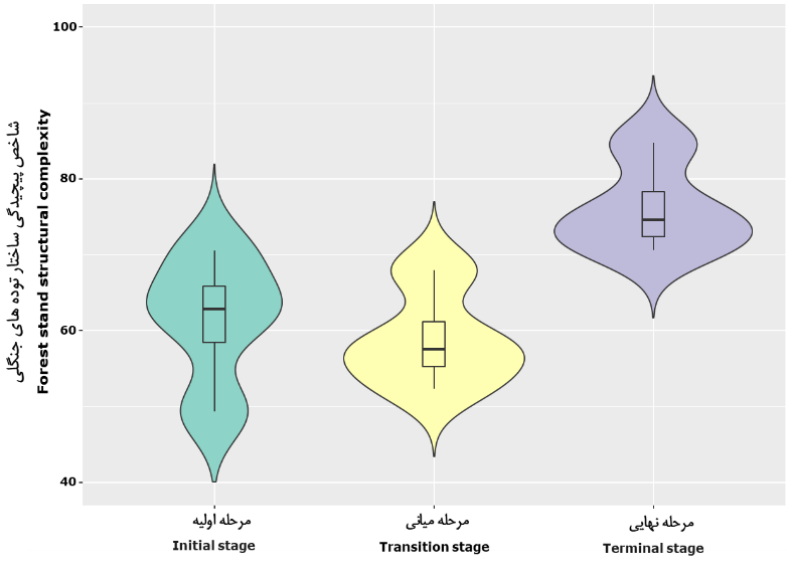
شکل ۵- مقایسهٔ تغییرات سطح رویهٔ زمینی درختان با ابعاد متفاوت در مراحل تحولی

Figure5. Comparison of basal area of trees with the different dimensions in the developmental stages

همچنین مقایسهٔ توزیع درختان در اندازه‌های مختلف براساس رویهٔ زمینی درختان اختلافاتی بین سه مرحله نشان می‌دهد و بر این اساس و مطابق انتظار در هر سه مرحله، درختان بسیار قطور بیشترین سهم را در رویهٔ زمینی توده دارند. در عین‌حال درختان میان قطر (۲۵ تا ۵۰ سانتی‌متر) در مرحلهٔ میانی و درختان کم‌قطر (کمتر از ۲۵ سانتی‌متر) در مرحلهٔ آغازین تحول سهم بیشتری از سطح مقطع توده را در قیاس با بقیهٔ مراحل نشان می‌دهند (شکل ۵).

شاخص پیچیدگی ساختار در مراحل تحولی

مقدار میانگین شاخص پیچیدگی در تودهٔ آمیخته راش در منطقه (۲/۹± ۴۶/ ۶۵) محاسبه شد. در بین قطعات نمونهٔ یک هکتاری بیشترین مقدار در مرحلهٔ نهایی برابر با ۸۴/۱۷ به‌دست آمد و کمترین مقدار شاخص برابر با ۴۹/۳ درصد در مراحل اولیه از تحول توده محاسبه شد (شکل ۶). در مقایسهٔ بین سه مرحلهٔ تحولی، بیشترین مقدار عددی برای میانگین شاخص پیچیدگی ساختار در مرحلهٔ نهایی از تحول تودهٔ انتهایی (۳/۱۳± ۷۶/۱۹) به‌دست آمد که به‌شکل معنی‌داری بیشتر از دو مرحلهٔ دیگر بود (F =۶/۴۶, sig= ۰/۰۱۸). با این‌حال براساس آزمون توکی اختلاف معنی‌داری بین مرحلهٔ تحولی اولیه (۴/۲۳± ۶۱/۳۹) و میانی (۳/۳۳± ۵۸/۸۵) از لحاظ این شاخص ترکیبی مشاهده نشد.



شکل ۶- نمودار ویولونی (Violon plot) شاخص پیچیدگی ساختار در سه مرحلهٔ تحولی در جنگل‌های آمیختهٔ راش
Figure6. The Violon plot of Structural complexity index in developmental stages

بحث

حفاظت و مدیریت از جنگل‌ها بدون توجه به حفظ درجهٔ طبیعی بودن و پیچیدگی ساختار جنگل‌ها می‌تواند به تغییر در ساختار طبیعی جنگل و دور شدن آن از مسیر تحول طبیعی توده بینجامد. در عین‌حال هر گونه دخالت در ساختار جنگل و اجرای عملیات پرورشی با اهداف زیستی یا اقتصادی، مستلزم در نظر گرفتن موقعیت توده در مراحل تحولی به‌عنوان راهنمای مسیر توسعهٔ توده‌های جنگلی است (Sagheb-Talebi et al., 2014). بر این اساس، آگاهی و شناخت کافی از حد پیچیدگی ساختار و تلاش به‌منظور کمّی‌سازی آن، می‌تواند اطلاعات پایه‌ای لازم را برای برنامه‌ریزی‌های مرتبط با احیا و پرورش توده در جنگل‌ها فراهم کند. همچنین از شاخص پیچیدگی ساختار توده‌های جنگلی در کنار دیگر شاخص‌ها مانند شاخص درجهٔ طبیعی بودن[1] می‌توان برای ارزیابی وضعیت جنگل استفاده کرد (Sabatini et al., 2015).

پیچیدگی ساختار توده‌های جنگلی نتیجه برهمکنش تعدادی از عوامل منفرد مانند تعداد درختان در واحد سطح است. در این بررسی مرحلهٔ اولیه (افزایش حجم)، بیشترین تعداد درختان را به خود اختصاص داد که همسو با نتایج ارزیابی ساختار جنگل در منطقهٔ نکا (Sagheb-Talebi et al., 2020) و جنگل خیرود نوشهر (Moridi et al., 2021) است. رشد ارتفاعی نهال‌ها و درختان مستقرشده سبب ورود تعداد زیادی از این درختان به حد شمارش در نتیجهٔ عبور از

1. Naturalness index

ارتفاع ۱۳۰ سانتی‌متری می‌شود که انتظار می‌رود در فازهای تحولی بعدی تعداد زیادی از این درختان در نتیجه رقابت با بقیهٔ پایه‌ها حذف شود (Moridi et al., 2015) و با ورود توده به مرحلهٔ میانی تعداد پایه‌ها افت ناگهانی داشته باشد که به کاهش تعداد درختان در قیاس به مرحلهٔ تحولی قبلی می‌انجامد. این موضوع توسط Sagheb-Talebi et al. (2020) نیز گزارش شده است. تعداد کم درختان در هر واحد سطح در جنگل‌های کهن‌رست در منابع مختلف ذکر شده است (Reiniger, 1992). در عین‌حال حذف درختان کم‌قطر ممرز در مرحلهٔ اولیه سبب غلبهٔ کامل گونهٔ راش شرقی در مرحلهٔ میانی نیز می‌شود که به این دلیل انباشت حجم سرپا در مرحلهٔ میانی مشاهده می‌شود (Sefidi et al., 2014). فراوانی بقیهٔ گونه‌های همراه با راش مانند پلت و ممرز و دیگر گونه‌های باارزش نسبی اکولوژیک کمتر در مراحل مختلف تفاوت‌هایی را نشان داد که ممکن است سبب اختلاف در شاخص پیچیدگی ساختار جنگل شود. براساس پژوهش‌های پیشین راش شرقی اجتماع‌پذیری متفاوتی در مراحل تحولی نشان می‌دهد (Kazempour Larsary et al., 2017) در عین‌حال آمیختگی توده‌های جنگلی و داشتن ترکیب متفاوت از گونه‌های درختی سبب تغییر در مقدار عددی شاخص پیچیدگی ساختار می‌شود (Juchheim et al., 2020). این موضوع ممکن است با نحوهٔ رشد و استقرار گونه‌های مختلف درختی و حتی معماری متفاوت تاج در بین گونه‌های درختی مختلف مرتبط باشد (Seidel et al., 2019).

همچنین تعداد نهال‌ها در زیراشکوب و نسبت فراوانی درختان اشکوب پایین به درختان اشکوب تاج‌پوشش منجر به افزایش پیچیدگی در ساختار جنگل در مرحلهٔ اولیه می‌شود. در این مرحله وجود تعداد زیادی از درختان کم‌قطر در طبقات کم‌قطر، سبب افزایش میانگین مقدار عددی شاخص ضریب جینی قطر درختان (۰/۳۱۲) و شاخص تنوع اندازه‌ای درختان (۲/۱۲) در مرحلهٔ اولیه تحول توده می‌شود. افزایش مقدار عددی این دو شاخص به‌معنای توزیع مناسب درختان در طبقات مختلف است که در مراحل بعد با حذف درختان جوان در نتیجهٔ تنک شدن طبیعی توده به تعادل در طبقات قطری منجر می‌شود. این شاخص در طی روند بازسازی طبیعی ساختار تودهٔ روند افزایشی را نشان می‌دهد (Esmaeilpour & Sefidi, 2020). توزیع قطری درختان در طبقات قطری نیز این موضوع را تأیید می‌کند. در مرحلهٔ اولیه بیش از نیمی از درختان در طبقات کم‌قطر (۱۵ و ۱۰ سانتی‌متری) قرار دارند که در مرحلهٔ میانی و انتهایی از تحول به‌ترتیب به ۲۱ و ۲۹ درصد از فراوانی درختان کاهش می‌یابد که به کاهش تنوع در توزیع درختان در طبقات قطری و در نتیجه کاهش شاخص‌هایی مانند ضریب جینی و تنوع اندازه‌ای درختان می‌انجامد. با این‌حال در مرحلهٔ پیشرفته از توسعهٔ توده، حضور درختان قطور در طبقهٔ درختان بسیار قطور (بزرگ‌تر از ۱۰۰ سانتی‌متر) تا حدودی به افزایش این دو شاخص و ایجاد تنوع در ساختار توده‌های جنگلی منجر می‌شود.

مقایسهٔ سه مرحلهٔ تحولی، نشان می‌دهد که بیشترین مقدار عددی برای شاخص پیچیدگی ساختار در مرحلهٔ نهایی از تحول تودهٔ انتهایی (۸۴/۷۱) شکل می‌گیرد و اختلاف معنی‌داری بین سه مرحلهٔ تحولی از لحاظ این شاخص ترکیبی پیچیدگی مشاهده می‌شود. در پژوهش‌های Zenner et al. (2015) نیز اختلاف بین مراحل از لحاظ شاخص پیچیدگی گزارش شده است. این مقدار در مقایسه با مقادیر گزارش‌شده از جنگل‌های راش در اروپا قدری بیشتر است. در جنگل‌های راش پارکی ملی در جنوب ایتالیا این شاخص بین ۳۸ تا ۷۹ است (Sabatini et al., 2015). با این‌حال مراحل اولیه و میانی از تحول اختلاف معنی‌داری از لحاظ شاخص پیچیدگی نشان ندادند که همسو با پژوهش Amini et al. (2018) است. در پژوهش مذکور اختلاف معنی‌داری بین مراحل از نظر شاخص کاکس مشاهده نشد. باید متذکر شد که مقدار

شاخص افزون‌بر ویژگی‌های ساختاری توده‌ها در مراحل مختلف متأثر از عوامل منفرد انتخاب‌شده برای تعیین شاخص ترکیبی است. از بین ده متغیر انتخاب‌شده، تعداد سه شاخص اختلافی را بین سه مرحله نشان ندادند. دسترسی به اطلاعات کافی براساس پژوهش‌های پیشین، بهره‌مندی از تجربه و مهارت در انتخاب شاخص‌ها در هر ناحیه ممکن است سبب تغییر در مقدار عددی شاخص شود. همچنین حضور به‌نسبت فراوان درختان جوان در طبقه‌های کم‌قطر از یک‌سو و همچنین وجود زیراشکوب انبوه از سوی دیگر در هر سه مرحله، موجب شباهت ساختاری مراحل تحولی می‌شود. این موضوع می‌تواند به‌علت طبیعی بودن و دست‌خوردگی کمتر جنگل‌های منطقه در مقیاس بزرگ‌تر از توده باشد.

برخلاف انتظار و نتایج برخی از پژوهش‌های پیشین (Sefidi & Marvie Mohadjer, 2010) تعداد درختان خشک در واحد سطح نیز در سه مرحله اختلاف معنی‌داری نشان نداد که به همگنی ساختار از این حیث منجر شد. با این‌حال به نظر می‌رسد در مقیاس توده اختلافات بیشتری بین مراحل مشاهده شود، اگرچه در پژوهش‌های پیشین به وجود همگنی و شکل‌گیری فازهای تحولی در مقیاس‌های بزرگ‌تر از توده نیز اشاره شده است (Sefidi et al., 2014). تکرار پژوهش‌های مشابه در سال‌های آینده در توده‌های راش مناطق مختلف امکان قیاس توده‌ها را فراهم خواهد کرد. در این بررسی میانگین قطر برابرسینهٔ درختان، فراوانی درختان قطورتر از ۱۰۰ سانتی‌متر و نسبت مساحت روشنهٔ پوشش تاجی اختلاف معنی‌داری را بین قطعات نشان می‌دهد. افتادن درختان در نتیجهٔ آشفتگی‌های طبیعی در مرحلهٔ نهایی به باز شدن پوشش تاجی در مراحل نهایی و اولیه منجر می‌شود. این موضوع سبب تغییر رژیم نوری جنگل می‌شود (Parhizkar et al., 2011) و فرصت مناسبی برای افزایش رشد طولی نهالی گونه‌های مستعد به رشد در روشنه‌ها فراهم می‌آورد. این حد باز شدن تاج با رشد درختان به‌سمت کناره‌ها و با رشد ارتفاعی نهال‌های پرکنندهٔ روشنه به‌تدریج با رسیدن مرحلهٔ میانی تحول بسته می‌شود (Moridi et al., 2015) پژوهش‌های پیشین بر بسته و متراکم بودن تاج درختان در مرحلهٔ میانی (بلوغ) تأکید دارند و شاخص سطح برگ را تا سه برابر دیگر مراحل گزارش کرده‌اند (Sagheb-Talebi et al., 2012) براساس پژوهشی در حاجی‌کلای ساری نیز شاخص سطح برگ درختان و شدت نور نسبی اختلاف معنی‌داری بین مراحل تحولی نشان داده است (Amini et al., 2018). دربارهٔ این دو منطقه می‌توان گفت ویژگی‌های روشنه‌های پوشش تاجی از مهم‌ترین عوامل مؤثر بر شکل‌گیری پیچیدگی در ساختار جنگل است.

با توجه به حد مداخلهٔ انجام‌گرفته در جنگل‌های هیرکانی در دهه‌های پیشین و اثرهای انکارناپذیر تغییرات اقلیمی بر دامنهٔ انتشار گونهٔ راش شرقی در این جنگل‌ها (Taleshi et al., 2018)، اصلاح ساختار براساس مراحل تحولی می‌تواند تاب‌آوری این بوم‌سازگان‌های باارزش جنگلی را افزایش دهد. در یک نتیجه‌گیری کلی می‌توان گفت برخی عوامل منفرد تفاوت‌هایی بین سه مرحلهٔ تحولی را نشان نمی‌دهند، اما شاخص پیچیدگی به‌شکل معنی‌داری در مرحلهٔ نهایی بیشتر از دو مرحلهٔ پیشین است. با توجه به امکان کمّی‌سازی شاخص ترکیبی پیچیدگی با استفاده از روش معرفی‌شده و تأثیر بسیار زیاد تنوع و پیچیدگی ساختار جنگل در کارکردهای اکولوژیک جنگل‌ها مانند حفظ تنوع زیستی و نیز تغییر رویکرد مدیریت جنگل در طرح‌های نوین مدیریت جنگل، باید در همهٔ دخالت‌ها و عملیات پرورشی شاخص پیچیدگی ساختار مدنظر قرار گیرد.

سهولت در محاسبهٔ شاخص ترکیبی و استفاده از متغیرهای اندازه‌گیری‌شده در آماربرداری‌های مرسوم در جنگل‌ها از مزایای محاسبهٔ پیچیدگی ساختار با این روش است. با این‌حال این شیوه نیز معایبی دارد که آگاهی از آنها می‌تواند به تفسیر بهتر نتایج منجر شود. برای مثال با توجه به تأثیر آشفتگی‌های انسانی

بر مقدار عددی شاخص توصیه می‌شود که طبقه‌بندی جنگل‌ها با استفاده از این شاخص همراه با در نظر گرفتن حد طبیعی بودن جنگل باشد. حضور گونه‌های مهاجم در زیراشکوب ممکن است سبب تخمین غیرمعمول شاخص در جنگل‌های دست‌خورده شود. در عین‌حال این شاخص به‌دلیل استفاده از عملگر جمع مشمول قاعدهٔ جبران است که ضعف دیگری برای این شاخص است. به‌عبارت دیگر، برآورد عدد یکسان از پیچیدگی ساختار در دو منطقه به‌معنای نبود تفاوت‌های ساختاری نیست و اختلافات موجود توسط شاخص‌های دیگر جبران می‌شود. با این‌حال در پژوهش‌هایی با اهداف متفاوت، وزن‌دهی متغیرها تا حدی جبران‌کنندهٔ این ضعف خواهد بود.

به‌منظور کاربرد این شاخص در مدیریت اکولوژیک جنگل می‌توان در مرحلهٔ آماربرداری و پیش از تدوین برنامهٔ جنگل‌شناسی توده، شاخص را برآورد و براساس آن با دخالت در توده، حد پیچیدگی را کنترل کرد. به این منظور باید با بازنگری شاخص‌های مدنظر در آماربرداری، متغیرهای ساختاری جانشین برخی از متغیرهای پیشین شود که با هدف برآورد تولید چوب تدوین شده بودند. در عین‌حال در هدایت توده‌های دست‌کاشت و جنگلکاری‌ها به‌سمت جنگل‌های چندسنی باید دخالت‌ها در اندازه‌ای باشد که پیچیدگی توده افزایش یابد و به حد مقبول در جنگل‌های طبیعی نزدیک شود. بر این اساس توصیه می‌شود برای حفظ همهٔ کارکردهای بوم‌سازگان‌های جنگلی، در کنار حفاظت از تنوع زیستی، افزایش پیچیدگی ساختار توده‌های جنگلی از مهم‌ترین اهداف طرح‌های مدیریت جنگل در نظر گرفته شود.

References

Amini, R., Rahmani, R., & Parhizkar, P. (2018). Comparison of developmental stages in Beech Hornbeam stands using non-spatial indices of stand structure. *Iranian Journal of Forest and Poplar Research, 26*(2),156-167 (In Persian).

Amanzadeh, B., Sagheb-Talebi, K., Foumani, B.S., Fadaie, F., Camarero, J.J., & Linares, J.C. (2013). Spatial distribution and volume of dead wood in unmanaged Caspian beech (*Fagus orientalis*) forests from northern Iran. *Forests, 4*(4),751-765.

Brang, P., Spathelf, P., Larsen, J.B., Bauhus, J., Boncčina, A., Chauvin, C., Drössler, L., García-Güemes, C., Heiri, C., Kerr, G., & Lexer, M.J. (2014). Suitability of close-to-nature silviculture for adapting temperate European forests to climate change. *Forestry, An International Journal of Forest Research, 87*(4), 492-503.

Dănescu, A., Albrecht, A.T., & Bauhus, J. (2016). Structural diversity promotes productivity of mixed, uneven-aged forests in southwestern Germany. *Oecologia, 182*(2), 319-333.

Ehbrecht, M., Schall, P., Ammer, C., & Seidel, D. (2017). Quantifying stand structural complexity and its relationship with forest management, tree species diversity and microclimate. *Agricultural and Forest Meteorology, 242*, 1-9.

Ellison, A.M., Bank, M.S., Clinton, B.D., Colburn, E.A., Elliott, K., Ford, C.R., Foster, D.R., Kloeppel, B.D., Knoepp, J.D., Lovett, G.M., & Mohan, J. (2005). Loss of foundation species: consequences for the structure and dynamics of forested ecosystems. *Frontiers in Ecology and the Environment, 3*(9), 479-486.

Esmaeilpour, M., & Sefidi, K. (2020). The Natural Reconstruction of Beech Stands Structure under the Traditional Management (Case Study: Eshkevarat, Roodsar). *Iranian Journal of Forest, 12*(3), 435-448 (In Persian).

Franklin, J.F. and Van Pelt, R. (2004). Spatial aspects of structural complexity in old-growth forests. *Journal of Forestry, 102*(3), 22-28.

Gadow, K.V., Zhang, C.Y., Wehenkel, C., Pommerening, A., Corral-Rivas, J., Korol, M., Myklush, S., Hui, G.Y., Kiviste, A., & Zhao, X.H. (2012). Forest structure and diversity. In Continuous cover forestry (pp. 29-83). Springer, Dordrecht.

Gough, C.M., Atkins, J.W., Fahey, R.T., & Hardiman, B.S.(2019). High rates of primary production in structurally complex forests. *Ecology, 100*(10),1-6. 10.1002/ecy.2864

Gustafsson, L., Baker, S.C., Bauhus, J., Beese, W.J., Brodie, A., Kouki, J., Lindenmayer, D.B., Lõhmus, A., Pastur, G.M., Messier, C. & Neyland, M. (2012). Retention forestry to maintain multifunctional forests, a world perspective. *BioScience, 62*(7), 633-645.

Javanmiri pour, M., Mohadjer, M.R.M., Etemad, V., & Jourgholami, M. (2019). Determining structural variation in a managed mixed stand in an old-growth forest, northern Iran. *Journal of Forestry Research, 30*(5), 1859-1871.

Juchheim, J., Ehbrecht, M., Schall, P., Ammer, C., & Seidel, D. (2020). Effect of tree species mixing on stand structural complexity. *Forestry: An International Journal of Forest Research, 93*(1), 75-83.

Kazempour Larsary, M. (2017). Spatial patterns, competition and spatial association of trees from different development stages in mixed beech (*Fagus orientalis* Lipsky) stands. *Forest and Wood Products, 70*(2), 303-314 (In Persian).

Korpel, Š. (1995). Die Urwälder der Westkarpaten; Gustav Fischer Verlag: New York, NY, USA.

Korpel, S. (1982). Degree of equilibrium and dynamic change of the forest an example of natural forest of Slovakia, *Act Faculties Forestails, Zvolen,Cezchoslovakia, 24*, 9-30.

Leibundgut, H. (1993). Europäische Urwälder: Wegweiser zur Naturnahen Waldwirtschaft; Verlag Paul Haupt: Bern und Stuttgart, Germany.

McElhinny, C., Gibbons, P., Brack, C., & Bauhus, J. (2005). Forest and woodland stand structural complexity: its definition and measurement. *Forest Ecology and Management, 218*(1-3), 1-24.

Meyer, P. (1999). Determination of development phases and diversity of forest texture. *Allgemeine Forst-und Jagdzeitun*. (Germany), *170*, 203–211.

Mohammadi, L., Mohadjer, M.R., Etemad, V., Sefidi, K., & Nasiri, N. (2020). Natural regeneration within natural and man-made canopy gaps in Caspian natural beech (*Fagus orientalis* Lipsky) Forest, Northern Iran. J*ournal of Sustainable Forestry, 39*(1), 61-75.

Moridi, M., Sefidi, K., & Etemad, V. (2015). Stand characteristics of mixed oriental beech (*Fagus orientalis* Lipsky) stands in the stem exclusion phase, northern Iran. *European journal of forest research*, 134(4), 693-703.

Moridi, M., Fallah, A., Pourmajidian, M.R., & Sefidi, K. (2021). Quantitative Analysis of Forest Structure at Growing Up Volume Stage in the Evaluation of Natural Beech Stands (Case Study: Kheyroud Forest). *Iranian Journal of Forest, 13*(2), 115-128 (In Persian).

Nobahar, S., Sefidi, K., & Sagheb, T.K. (2018). Quantifying the structure of beech stands at old growth phase (Case study: Asalem forests, northern Iran). *Forest research and development, 13*(2), 115-124.

Parhizkar, P., Sagheb-Talebi, Kh., Mattaji, A,.Namiranian, M., Hasani, M., & Mortazavi, M. (2011). Tree and regeneration conditions within development stages in Kelardasht beech forest (Case study: reserve area-Langa). *Iranian Journal of Forest and Poplar Research, 19*(1), 141-153 (In Persian).

Parobeková, Z., Pittner, J., Kucbel, S., Saniga, M., Filípek, M., Sedmáková, D. ., Vencurik, J. & Jaloviar, P. (2018). Structural diversity in a mixed spruce-fir-beech old-growth forest remnant of the Western Carpathians. *Forests, 9*(7), 379.

Pommerening, A. (2002). Approaches to quantifying forest structures. Forestry: An International *Journal of Forest Research, 75*(3), 305-324.

Reiniger, H. (1992). Das Plenterprinzip und seine Anwendung im Altersklassenwald. *Forst und Holz, 47*(9), 235-237.

Sabatini, F. M., Burrascano, S., Lombardi, F., Chirici, G., & Blasi, C. (2015). An index of structural complexity for Apennine beech forests. *iForest-Biogeosciences and Forestry, 8*(3), 314.

Sagheb-Talebi, Kh. (2013). *Appropriate characteristics of beech stands for application of close to nature silviculture (selection system).* Annual Report of Research Project, Published by Research Institute of Forests and Rangelands, Tehran, 120p (In Persian).

Sagheb-Talebi, Kh., Parhizkar, P., Hassani, M., Amanzadeh, B., Hemmati, A., Khanjani-Shiraz, B., Amini, M., Mohammadnejad Kiasari, S., Mirkazemi, S.Z., Karimidoost, A., & Maghsoudlou, M.K., (2020). Preliminary results of survey on stand structure in permanent research plots of Hyrcanian intact beech (*Fagus orientalis* Lipsky) forests. *Iranian Journal of Forest and Poplar Research, 28*(2), 163-179 (In Persian).

Seidel, D., Ehbrecht, M., Dorji, Y., Jambay, J., Ammer, C., & Annighöfer, P. (2019). Identifying architectural characteristics that determine tree structural complexity. *Trees, 33*(3), 911-919.

Sefidi, K., Mohadjer, M.M., Etemad, V., & Mosandl, R. (2014). Late successional stage dynamics in natural Oriental beech (*Fagus orientalis* Lipsky) stands in northern Iran (case study: Gorazbon district of Kheiroud-Kenar experimental forest). *Iranian Journal of Forest and Poplar Research, 22*(2), 270-283 (In Persian).

Sefidi, K., Pourgoli, Z., Sagheb-Talebi, K., & Behjou, F.K. (2018). Stand characteristics of gap formation phase through the development of oriental beech (*Fagus orientalis* Lipsky) stands in the Hyrcanian Forests, northern Iran. *Austrian Journal of Forest Science, 2*, 137-158.

Sefidi, K., Etemad, V., & Sadeghi, S.M.M. (2020a). Diameter class distibution of trees in three developmental stage of oriental beech forests. *Proceeding of National Confrence on Forest Management Prespectives, 2*, 38-46 (In Persian).

Sefidi, K., Copenheaver, C. A., & Sadeghi, S. M. M. (2022b). Anthropogenic pressures decrease structural complexity in Caucasian forests of Iran. *Écoscience, 29*(3), 199-209.

Taleshi, H., Jalali, S.G., Alavi, J., Hosseini, S.M., & Naimi, B. (2018). Climate change impacts on the distribution of oriental beech (Fagus orientalis Lipski) in the Hyrcanian forests of Iran. *Iranian Journal of Forest, 10*(2), 251-266. (In Persian).

Watt, A. S. (1947). Pattern and process in the plant community. *Journal of ecology, 35*(1/2), 1-22.

Willim, K., Stiers, M., Annighöfer, P., Ehbrecht, M., Ammer, C., & Seidel, D. (2020). Spatial patterns of structural complexity in differently managed and unmanaged beech-dominated forests in Central Europe. *Remote Sensing, 12*(12), 1907.

Zenner, E.K., Sagheb-Talebi, Kh., Akhavan, R., & Peck, J.E. (2015). Integration of small-scale canopy dynamics smoothes live-tree structural complexity across development stages in old-growth Oriental beech (*Fagus orientalis* Lipsky) forests at the multigap scale. *Forest Ecology and Management*, 335, 26-36.

Iranian Journal of Forest
Vol. 14, No. 4, Winter 2023
pp. 389-405

Research Article

Comparison of structural complexity index (SCI) in the developmental stages of Hyrcanian mixed beech forests

K. Sefidi*

Prof., Faculty of Agriculture and Natural resources, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, I. R. Iran

Abstract

The structural complexity of forest stands is one of the most important characteristics of natural forests. Changes in the forest stand structure through the development of stands cause complexity in the stand structure. We conducted this research to quantitative analysis of structural complexity in the three stages of stand development in the Hyrcanian forests. Three one-hectare study areas were selected within developmental stages (Totally 12 hectares) and after forest inventory, the structure complexity index was calculated for each stage. We employed ten variables including stem per hectare, mean of diameter at breast height (DBH), coefficient of variation of DBH, diameter Gini coefficient, number of trees with a diameter larger than 100 cm at breast height, the ratio of the number of trees in different stories, the faction of canopy gaps, amount and volume of dead woods and tree size variation to calculate this index. The mean and median complexity index was 65.46 and 66.15. the highest value obtained in the terminal (transition) stage was equal to 84.17 and the lowest was 49.3 in the initial stage. The structure complexity significantly was higher in the terminal stage, meanwhile based on the Tukey test, the difference between the initial (58.85±3.33) and optimal stage (61.39±4.23) was not significant. Considering the role of diversity and complexity of forests structure on forest ecological functions like maintaining biological diversity, it is necessary to consider complexity in all interventions and forest tending operations. Also, we proposed the forest complexity enhancement besides maintaining biodiversity should consider as the most important goal of forest management plans.

Keywords: Closer to nature, Gini coefficient, Nature conservation, Stand dynamics, Tree size variations.

*Corresponding author Tel: +989127264066 Email: kiomarssefidi@gmail.com