



## مقایسه توده‌های خالص راش با استفاده از شاخص پیچیدگی ساختار (SCI) در جنگل‌های هیرکانی مازندران

رضا اخوان<sup>۱\*</sup>، مجید حسنی<sup>۲</sup> و محمدحسین صادق‌زاده حلاج<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> دانشیار پژوهش، مؤسسه تحقیقات جنگل‌ها و مراتع کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران  
<sup>۲</sup> کارشناس ارشد پژوهش، مؤسسه تحقیقات جنگل‌ها و مراتع کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۱۱/۱۷؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۲/۲۳)

### چکیده

مدیریت و حفاظت جنگل‌ها به‌منزله سیستم‌های پیچیده، نیازمند تشریح جامع ساختار توده و کمی‌سازی آن است. شاخص پیچیدگی ساختار (SCI) معیار مناسبی برای کمی‌سازی ناهمگنی ساختار توده‌های جنگلی است که می‌توان از آن برای مقایسه توده‌ها از نظر اندازه ناهمگنی ساختاری استفاده کرد. در این بررسی به‌منظور کمی‌سازی ناهمگنی ساختار توده‌های خالص راش در جنگل‌های هیرکانی ایران از این شاخص استفاده شد. آماربرداری با استفاده از یک شبکه ثابت به ابعاد ۱۵۰×۲۰۰ متر و با استفاده از قطعات نمونه ۱۰ آری در سه توده خالص راش در حوضه‌های آبخیز ۴۶، ۴۹ و ۶۶ الف در استان مازندران انجام گرفت که دو توده مدیریت‌شده و یک توده مدیریت‌نشده بود. سپس با استفاده از اطلاعات مختصات مکانی و قطر درختان ۹۰ قطعه نمونه برداشت‌شده در سه توده یادشده، شاخص SCI برای هر قطعه نمونه محاسبه و میانگین آن برای هر منطقه مشخص شد. نتایج نشان داد که حد بالا و پایین این شاخص در سه منطقه تحت بررسی به ترتیب ۲/۷ و ۱۱/۷ است، ولی میانگین آن در هر منطقه در حدود ۶ است که تفاوت آماری معنی‌داری نیز با هم ندارند. همچنین نتایج نشان داد که مقدار این شاخص با متغیرهای رویه زمینی و حجم سرپای توده‌ها همبستگی معنی‌دار دارد، به‌طوری که با افزایش این دو متغیر بر مقدار آن افزوده می‌شود. از شاخص SCI می‌توان در جنگل‌های حفاظتی و با کیفیت اکولوژیکی مطلوب به‌منزله مرجع یا معیاری برای ارزیابی مناسب بودن روش‌های مدیریتی برای حفظ یا افزایش ناهمگنی ساختاری توده‌ها استفاده کرد.

**واژه‌های کلیدی:** بولا، راش خالص، ساختار مکانی توده، کجور، لایوچ.

### مقدمه

دارد که برای حفظ جوامعی که با آن فرایندها تکامل یافته‌اند ضروری است (Lindenmayer & Franklin, 2002). مشخصه‌های ناهمگنی ساختاری هر توده شامل عناصری مانند ترکیب گونه‌ها، موقعیت مکانی، ارتفاع و قطر درختان، خشک‌دارها و مقدار تاج‌پوشش است که هم شامل فراوانی مطلق این مشخصه‌ها و هم فراوانی نسبی آنهاست (McElhinny et al., 2005). ناهمگنی ساختاری رابطه مثبتی با کیفیت اکولوژیکی جنگل دارد

ساختار جنگل عامل مهمی در تجزیه و تحلیل مدیریت اکوسیستم‌های جنگلی است. زمانی که هدف، مدیریت جنگل به‌عنوان سیستمی پیچیده باشد، ناهمگنی ساختاری در توده جنگلی ویژگی بسیار مهمی خواهد بود (Messier et al., 2013). عقیده بر این است که ناهمگنی ساختاری جنگل هم ناشی از فرایندهای طبیعی اکولوژیکی است و هم عملکردهای اکولوژیکی

مختصات  $X$  و  $Y$  دارای یک ارزش به صورت  $Z$  نیز باشد. در این صورت می‌توان اطلاعات موقعیت مکانی درختان را در پیوند با ابعادشان مانند قطر یا ارتفاع تحلیل کرد. شاخص  $SCI$  یا شاخص پیچیدگی ساختار<sup>۱</sup> از جمله شاخص‌های سه‌بعدی در تحلیل ساختار جنگل است که نخستین بار در سال ۱۹۹۸ میلادی در رساله دکتری اریک زنر در دانشگاه آرگون آمریکا معرفی شد (Zenner, 1998). سپس این شاخص در مقاله‌ای که توسط زنر و هیبز در سال ۲۰۰۰ به چاپ رسید به‌طور رسمی معرفی و ارائه شد (Zenner & Hibbs, 2000). همچنین Zenner (2004) از این شاخص در بررسی ناهمگنی ساختاری توده‌های سوزنی‌برگ دوگلاس (*Pseudotsuga menziesii* Mirbel Franco) در آرگون آمریکا استفاده کرد. در ادامه، این شاخص در بررسی ساختار توده‌های بالغ و مدیریت‌شده کاج قرمز (*Pinus resinosa* Ait.) در مینه‌سوتای آمریکا در تعیین سطح مناسب بررسی ساختار توده به‌همراه شاخص  $K$  رایبلی به‌کار گرفته شد که به سطح حداقل نیم هکتار دست یافتند (Zenner & Peck, 2009). Zenner et al. (2011) در پژوهشی در توده‌های نوئل (*Picea abies* L. Karst) در فنلاند، متوسط شاخص  $SCI$  را برای توده‌های همسال برابر ۲/۴۹ و برای توده‌های ناهمسال برابر ۵/۴۹ به‌دست آوردند. Peck et al. (2014) نیز در توده‌های سوزنی‌برگ سوئیس این شاخص را برای توده‌های همسال برابر ۲/۷۷ و برای توده‌های ناهمسال برابر ۵/۵۹ به‌دست آوردند. Zenner et al. (2015) در بررسی خود در توده‌های خالص و دست‌نخورده راش در جنگل‌های کلاردشت و نکا در استان مازندران، شاخص  $SCI$  را برای مراحل تحوّل بلوغ و پوسیدگی بین ۵/۹ تا ۶/۸ تعیین کردند. Parobekova et al. (2018) در ذخیره‌گاهی طبیعی در مرکز اسلورونی و در توده‌های آمیخته نوئل (*Picea abies* L. Karst) - نراد (*Abies alba* Mill.) - راش (*Fagus sylvatica* L.) از

(Seidel et al., 2019). از دست رفتن تنوع ساختاری که روند رایجی در جنگل‌های مدیریت‌شده است، توانایی جنگل‌ها را برای حفظ تنوع زیستی کاهش می‌دهد که می‌تواند تأثیر منفی بر تاب‌آوری اکوسیستم به‌ویژه در زمینه تغییر اقلیم داشته باشد (Bradshaw et al., 2009). تاب‌آوری یا همان ظرفیت جنگل‌ها برای حفظ ویژگی‌های اساسی ترکیب گیاهی، ساختار، عملکرد اکوسیستم و فرایندها در مواجهه با آشفتگی‌ها، وابسته به تنوع زیستی در مقیاس‌های مختلف است (Thompson et al., 2009). مدیریت، چه فعال و چه غیرفعال، می‌تواند آسیب‌پذیری جنگل‌ها را در برابر تغییر اقلیم افزایش یا کاهش دهد (Spathelf et al., 2018). اقلیم با سرعت و دامنه بی‌سابقه‌ای در حال تغییر است و به‌صورت فزاینده‌ای جنگل‌ها را تهدید می‌کند؛ بنابراین، حفظ تاب‌آوری جنگل و مقیاس‌های مختلف تنوع زیستی برای حفاظت از جنگل‌ها و خدماتی که ارائه می‌کنند بسیار مهم است (Gauthier et al., 2015).

تنوع ابعاد درختان در توده از متغیرهای مهم تنوع ساختاری است که سبب ناهمگنی مکانی می‌شود (Pommerening & Särkkä, 2013). درحالی‌که جنبه‌های مختلف تنوع در جنگل‌ها مهم است، ویژگی‌های ساختاری (توزیع سه‌بعدی درختان) از مشخصه‌هایی است که ممکن است به‌طور مستقیم از طریق فعالیت‌های جنگل‌شناسی تغییر یابد (Seidel et al., 2019). بنابراین الگوی مکانی درختان و ابعاد آنها متغیرهای مهمی برای توصیفی جامع از ساختار جنگل هستند (Zenner, 2000) که می‌توان از آنها برای مقایسه کمی توده‌های مختلف یا پویایی توده‌ها استفاده کرد (Zenner & Hibbs, 2000; Peck et al., 2014).

تحلیل ساختار جنگل ممکن است بدون بُعد (بررسی‌های کیفی)، تک‌بعدی (ضریب تغییرات قطر یا ارتفاع)، دو‌بعدی (بررسی الگوی مکانی درختان در جنگل) یا سه‌بعدی باشد (Zenner & Hibbs, 2000). مورد اخیر هنگامی محقق می‌شود که هر درخت با

جنگل‌های ایران است. بنابراین هدف این پژوهش مقایسه توده‌های خالص راش با استفاده از شاخص پیچیدگی ساختار یا SCI به همراه معرفی کاربرد آن در کمی کردن اندازه ناهمگنی ساختاری توده‌های جنگلی براساس قطر برابر سینه درختان است که این بررسی به‌طور اختصاصی در سه توده خالص راش (*Fagus orientalis* Lipsky) در جنگل‌های هیرکانی استان مازندران انجام گرفته است.

### مواد و روش‌ها

#### منطقه پژوهش

مناطق اجرای این تحقیق سه توده خالص راش واقع در جنگل‌های هیرکانی شمال کشور در استان مازندران به شرح جدول ۱ است.

شاخص SCI به‌منظور تعیین اندازه ناهمگنی در مراحل مختلف تحولی توده استفاده کردند. نتایج آنها نشان داد که مقدار این شاخص در مراحل تحولی اولیه، بلوغ و تخریب به ترتیب ۱۰/۲۲، ۹/۹۵ و ۱۱/۲۹ است. (Poldveer et al. (2021) در جنگل‌های نیمه‌بورآل استونی با گونه‌های غالب کاج جنگلی (*Pinus sylvestris* L.)، نوئل (*Picea abies* L.) و توس (*Betula pendula* Roth.)، این شاخص را در توده‌های حفاظت‌شده و مدیریت‌نشده برابر ۷/۴۲ و در توده‌های مدیریت‌شده برابر ۴/۷۴ محاسبه کردند که تفاوت معنی‌داری با هم داشتند. با بررسی منابع مشخص شد که تا کنون از این شاخص برای تعیین ناهمگنی ساختاری توده‌های جنگلی کشور استفاده نشده و ظاهراً این پژوهش نخستین مورد در بررسی کاربرد شاخص SCI در

جدول ۱- مشخصات مناطق پژوهش

Table 1. Characteristics of the studied area

شماره حوضه آبخیز Watershed No.	نام حوضه آبخیز Watershed name	نام شهرستان City name	مختصات مکانی مرکز منطقه (UTM)		شماره سری Seri No.	شماره پارسل Parcel No.	ارتفاع از سطح دریا (متر) Altitude (m)	میانگین دمای سالانه (سانتی‌گراد) Mean annual temperature (°C)	میانگین بارندگی سالانه (میلی‌متر) Mean annual precipitation (mm)	سابقه مدیریت و بهره‌برداری Management and harvesting background
			عرض جغرافیایی Latitude	طول جغرافیایی Longitude						
46	کجور Kojor	نوشهر Noshahr	563000	4043600	4	401-402	1300-1430	15.3	1360	ندارد without
49	لاویج lavig	نور (چمستان) Noor	595850	4018600	2	201-203	1765-2040	9.6	866	دوره 2 2 times
66A	پاردوکولا-بولا Pardokola-Bola	ساری (فریم) Sari	717000	4002250	4	419-422	1800-2025	10.8	858	دوره 3 3 times

### شیوه اجرای پژوهش

#### آماربرداری در جنگل

ابعاد ۱۵۰×۲۰۰ متر و به‌روش منظم- تصادفی در سال ۱۳۹۹ برداشت شد. در هر قطعه نمونه قطر همه درختان قطورتر از ۷/۵ سانتی‌متر در ارتفاع برابر سینه اندازه‌گیری و با تعیین نوع گونه درختی ثبت شد. همچنین در هر قطعه نمونه ارتفاع دو درخت، یکی نزدیک‌ترین به مرکز قطعه نمونه و دیگری قطورترین در داخل قطعه نمونه به‌منظور محاسبه و ترسیم منحنی ارتفاع توده با استفاده از دستگاه Vertex III اندازه‌گیری شد.

در این تحقیق در هریک از مناطق سه‌گانه مندرج در جدول ۱، تعداد ۳۰ قطعه نمونه ۱۰۰۰ متر مربعی دایره‌شکل و در مجموع ۹۰ قطعه نمونه به‌صورت ثابت و دائمی (با ثبت محل و مختصات مرکز قطعه نمونه و همه درختان قرارگرفته در داخل محدوده قطعه نمونه به‌روش فاصله- آزیموت نسبت به مختصات مرکز قطعه نمونه) براساس یک شبکه آماربرداری ثابت به

## محاسبه شاخص SCI

محاسبه دخالت داده می‌شوند، در نتیجه مساحت مثلث‌هایی که دو همسایه نزدیک آنها در خارج از محدوده قطعه نمونه واقع می‌شوند، در محاسبه مقدار  $A_T$  لحاظ نمی‌شوند و بدین ترتیب اثر حاشیه‌ای نیز اصلاح می‌شود (Zenner & Hibbs, 2000).

در این تحقیق مقدار شاخص SCI براساس اطلاعات مختصات مکانی  $(x, y)$  و قطر برابر سینه هر درخت  $(z)$  در داخل هر قطعه نمونه براساس رابطه ۱ محاسبه و سپس مقدار میانگین آن برای هر قطعه نمونه تعیین شد. در مرحله بعد میانگین کل این شاخص در هر یک از مناطق سه‌گانه براساس ۳۰ شاخص SCI محاسبه شده در هر توده به تفکیک محاسبه و تعیین شد. همه محاسبات این بخش در محیط نرم‌افزار R (نسخه ۴،۱) و با استفاده از بسته‌های plotrix، tripack و pracma و تابع برنامه‌نویسی شده توسط Poldveer et al. (2021) انجام گرفت.

برای محاسبه حجم درختان سرپا از رابطه ۳ استفاده شد:

$$V = \frac{\pi d^2}{4} \times H \times f \quad \text{رابطه ۳}$$

$V$  حجم هر درخت سرپا به متر مکعب،  $d$ : قطر برابر سینه به متر،  $H$ : ارتفاع کل درخت به متر که برای درختان هر منطقه با استفاده از منحنی ارتفاع توده به‌روش پرودان برآورد شد و  $f$ : ضریب شکل تنه است که ۰/۵ در نظر گرفته شد.

## نتایج

با پیاده کردن و اندازه‌گیری ۳۰ قطعه نمونه ثابت (دائمی) در هر یک از توده‌های تحت بررسی و ثبت داده‌های قطر برابر سینه، ارتفاع کل و گونه هر درخت و همچنین تعیین مختصات مکانی هر پایه درختی در داخل هر قطعه نمونه در مناطق سه‌گانه، محاسبات مربوط به تعیین شاخص SCI و همچنین اطلاعات کمی توده‌های بررسی شده انجام گرفت (جدول ۲).

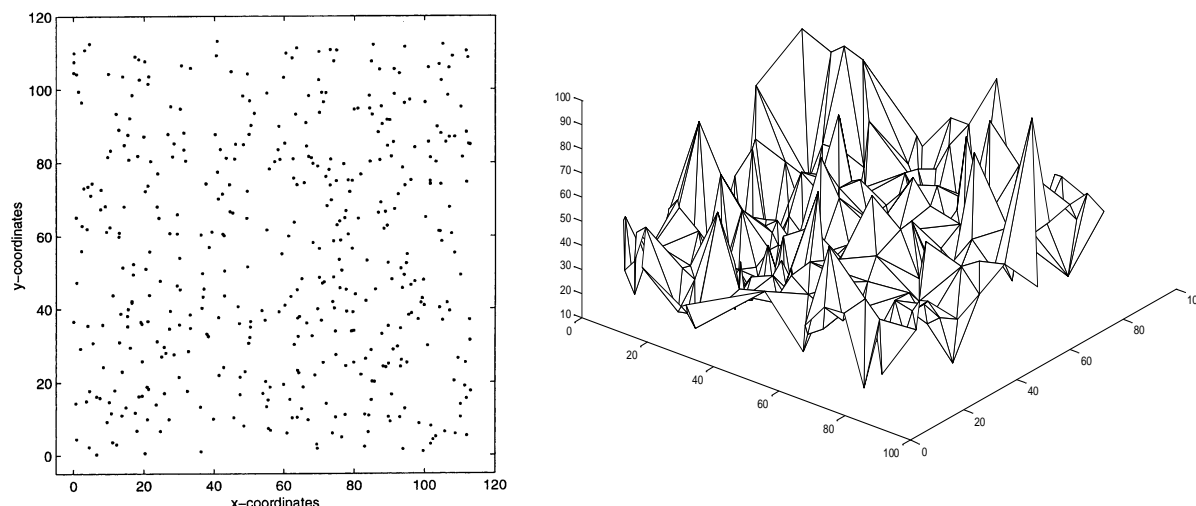
شاخص پیچیدگی ساختار یا SCI مدلی سه‌بعدی است که ناهمگنی ساختاری توده را براساس مختصات و ابعاد درختان (قطر یا ارتفاع) در هر قطعه نمونه تعیین می‌کند. هنگامی که همه درختان در محدوده قطعه نمونه بررسی شده دارای قطر یا ارتفاع برابر باشند، مقدار شاخص SCI برابر ۱ خواهد بود که کمترین مقدار این شاخص است. بنابراین هرچه شاخص SCI بزرگ‌تر باشد، ناهمگنی ساختاری توده بیشتر خواهد بود.

شاخص SCI براساس نسبت «مجموع مساحت مثلث‌های سه‌بعدی ایجادشده به‌وسیله مختصات درختان  $(x$  و  $y)$  و مقدار قطر یا ارتفاع آنها  $(z)$ » که در رابطه‌های ۱ و ۲ با  $SCI^*$  نشان داده شده بر «مجموع سطح همه مثلث‌های دویبعدی غیرهمپوشان محاسبه شده براساس مختصات  $x$  و  $y$  درختان در هر قطعه نمونه» که در رابطه ۱ با  $A_T$  نشان داده شده محاسبه می‌شود (Zenner & Hibbs, 2000):

$$SCI = \frac{SCI^*}{A_T} \quad \text{رابطه ۱}$$

$$SCI^* = \sum_{i=1}^N \frac{1}{2} |a \times b| \quad \text{رابطه ۲}$$

$N$  تعداد مثلث‌ها در سطح یک قطعه نمونه و  $|a \times b|$  مقدار مطلق حاصل ضرب بردار  $AB$  با مختصات  $a = (x_b - x_a, y_b - y_a, z_b - z_a)$  در بردار  $AC$  با مختصات  $b = (x_c - x_a, y_c - y_a, z_c - z_a)$  است. در عمل هر درخت با دو درخت نزدیک همسایه خود یک مثلث دویبعدی تشکیل می‌دهد. با گسترش این کار در سطح کل قطعه نمونه، شبکه‌ای از مثلث‌های نامنظم و غیرهمپوشان براساس اصل مثلث‌بندی دلونی<sup>۱</sup> ایجاد می‌شود که مبنای محاسبه مقدار  $A_T$  است (شکل ۱). براساس اصل دلونی تنها مثلث‌هایی که به دو نقطه در داخل محدوده قطعه نمونه متصل‌اند در



شکل ۱- الگوی نقطه‌ای توزیع مکانی درختان (چپ) و شبکه‌ای از مثلث‌های سه‌بعدی نامنظم (راست)  
Figure 1. Spatial point patterns of trees (left) and a three dimensional triangular irregular network (right)

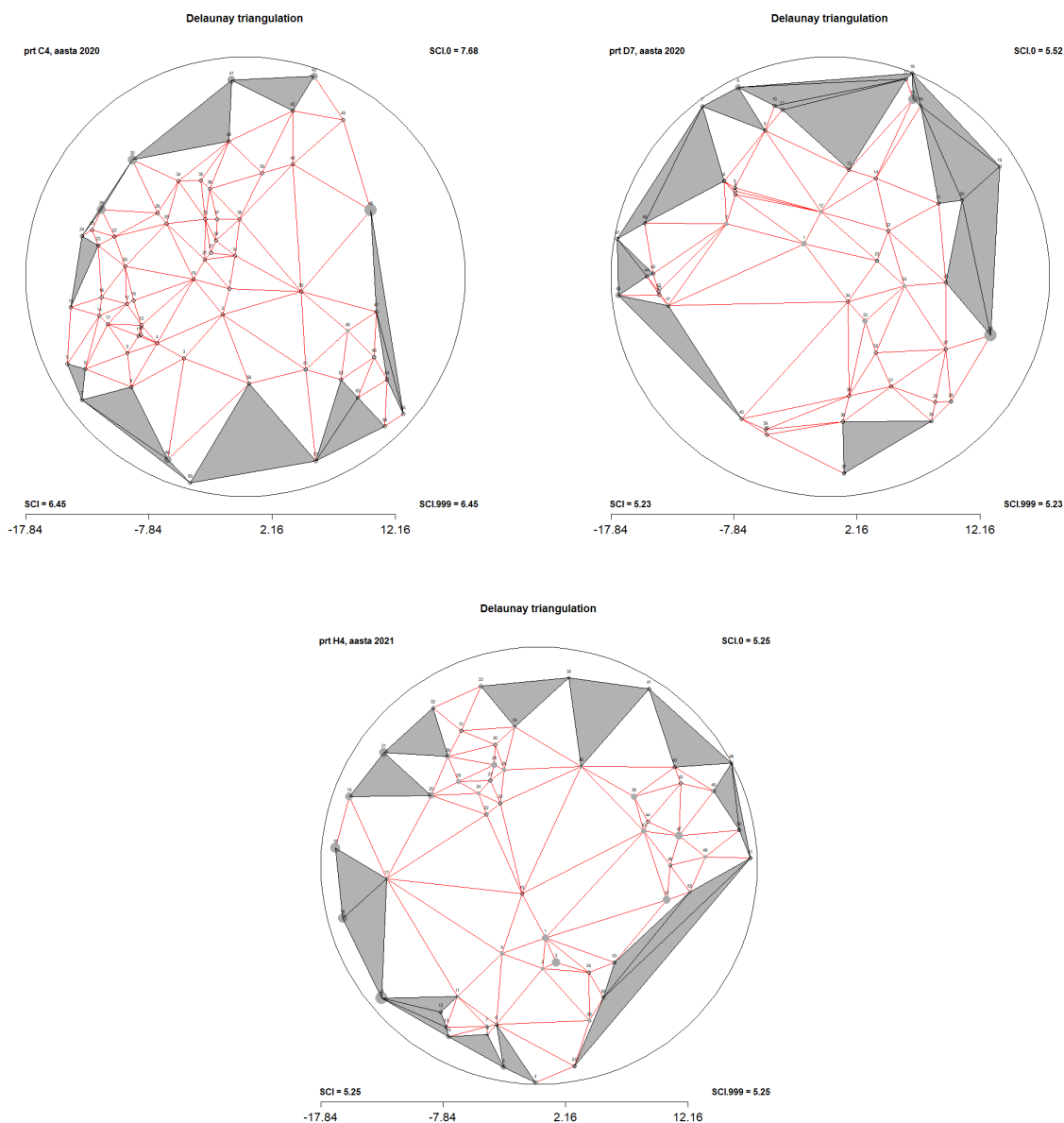
جدول ۲- میانگین شاخص SCI و مشخصات کمی توده‌های بررسی شده براساس ۳۰ قطعه نمونه پیاده شده در هر توده  
Table 2. Mean of SCI and stands' quantitative characteristics based on 30 inventoried sample plots in each stand

دامنه تغییرات SCI Range of SCI	شاخص سیمپسون Simpson index	حجم سرپا (مترمکعب/هکتار) Standing Vol. (m <sup>3</sup> /ha)	تراکم (تعداد/هکتار) Density (N/ha)	رویه زمینی (مترمربع/هکتار) Basal area (m <sup>2</sup> /ha)	قطر سطح مقطع متوسط (سانتی‌متر) QMD (cm)	فراوانی راش Beech frequency	شماره حوضه Watershed No.
4.2-9.8	6.50	635.0	257	36.4	42.4	92.2%	46
2.7-10.9	5.96	539.4	234	32.8	42.4	95.8%	49
3.2-11.7	6.61	520.7	366	32.8	35.3	90.1%	66A

بررسی همبستگی شاخص SCI با مشخصات کمی توده با استفاده از ضریب همبستگی پیرسون نشان داد که همبستگی مثبت و معنی‌داری بین رویه زمینی و حجم سرپای توده با شاخص SCI وجود دارد، به طوری که با افزایش رویه زمینی و حجم سرپا مقدار شاخص SCI افزایش می‌یابد (شکل ۳). اما این رابطه برای تراکم توده و شاخص تنوع گونه‌ای سیمپسون معنی‌دار نبود (جدول ۳).

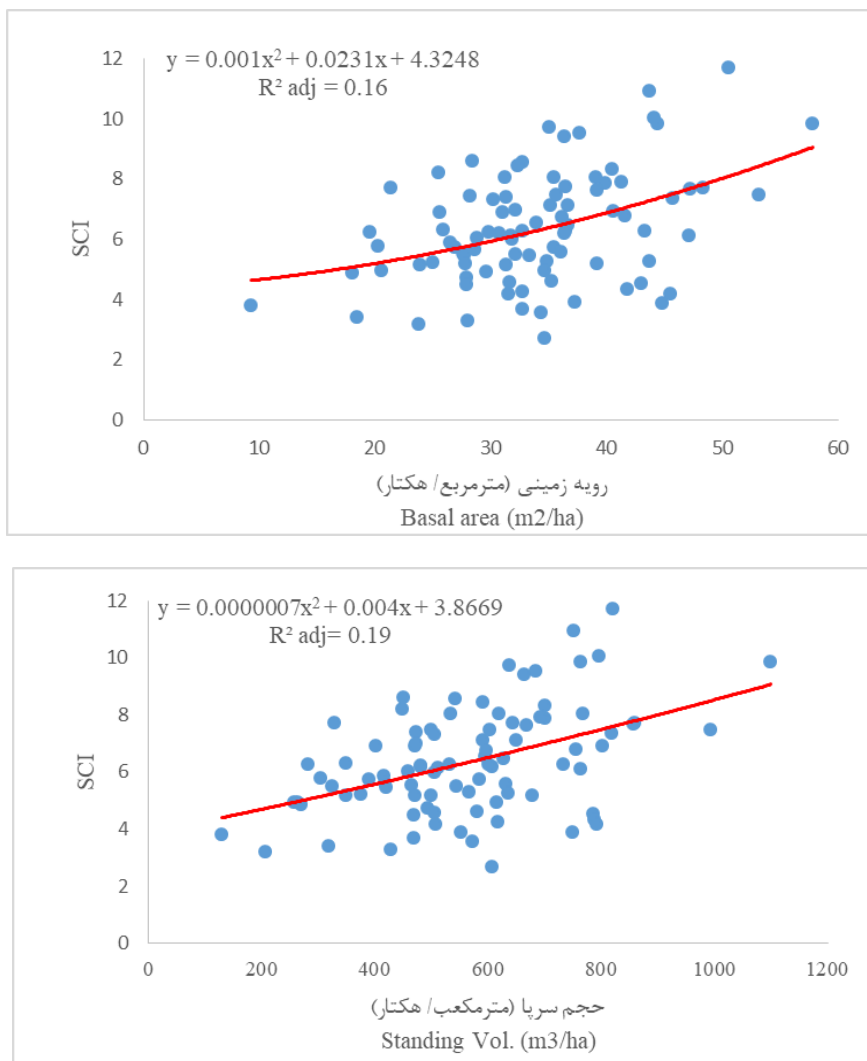
براساس جدول ۲ دامنه تغییرات شاخص SCI در سه منطقه بین دو عدد ۲/۷ و ۱۱/۷ قرار دارد، اما میانگین این شاخص برای هر سه منطقه در حدود عدد ۶ است که تفاوت آماری معنی‌داری نیز بین آنها وجود ندارد ( $p > 0.05$ ).

شکل ۲ خروجی نرم‌افزار R را پس از اجرای روش مثلث‌بندی دلونی در سه قطعه نمونه منتخب نشان می‌دهد.



شکل ۲- سه نمونه از خروجی روش مثلث‌بندی غیرهمپوشان به‌روش دلونی از نرم‌افزار R براساس نقاط (درختان) و دو همسایه نزدیک آنها در هر قطعه نمونه دایره‌ای ۱۰ آری. نواحی خاکستری مثلث‌هایی را نشان می‌دهند که به‌دلیل تصحیح اثر حاشیه‌ای از محاسبه حذف شده‌اند

Figure 2. Three samples of non-overlapping triangulation Delaunay method from R software based on points (trees) and their two nearest neighbors in each circular sample plot of 10000 m<sup>2</sup>. Gray areas indicate triangles that were excluded from the calculation due to edge effect correction



شکل ۳- رابطه رگرسیونی شاخص SCI با رویه زمینی و حجم سرپا در کل توده‌های بررسی شده (هر دو رابطه رگرسیونی بالا در سطح خطای ۵ درصد معنی دارند)

Figure 3. Regressions between SCI with basal area and standing volume in the total studied stands (every regression is significant at  $\alpha=0.05$ )

جدول ۳- ضرایب همبستگی پیرسون بین شاخص SCI با مشخصات کمی توده

Table 3. Pearson correlation coefficient between SCI and stand quantitative characteristics

شاخص سیمپسون	تراکم توده	حجم سرپا	رویه زمینی	ضریب همبستگی پیرسون
Simpson index	Stand density	Standing Vol.	Basal area	Pearson correlation coefficient
0.029 <sup>ns</sup>	0.023 <sup>ns</sup>	0.454**	0.416**	SCI

\*\* : Significant at  $\alpha=0.01$ ; ns: Non significant

\*\* : معنی دار در سطح ۱ درصد؛ ns: غیر معنی دار

واژگان ناهمگنی ساختاری، پیچیدگی ساختاری و تنوع ساختاری اغلب به جای یکدیگر به منظور نشان دادن کیفیت اکولوژیکی جنگل یا طبیعی بودن آن به کار می‌روند (Messier et al., 2013; Poldveer et al., 2021). مدیریت مؤثر جنگل با هدف حفظ

### بحث

در این پژوهش از شاخص مکانی پیچیدگی ساختاری یا SCI به منظور کمی کردن ناهمگنی ساختاری (براساس قطر برابر سینه) توده‌های خالص راش در جنگل‌های هیرکانی شمال کشور استفاده شد.

ناهمگنی ساختاری آن نیازمند یک شاخص است. همه شاخص‌های مربوط به ساختار جنگل (افقی یا عمودی) اطلاعاتی کمی در زمینه ساختار توده جنگل ارائه می‌دهند. این شاخص‌ها یا شامل شاخص‌های مکانی در سطح درخت هستند که براساس رویکرد نزدیک‌ترین همسایه توسعه یافته‌اند یا براساس رویکردهای توسعه یافته تر مانند شاخص SCI هستند. تحقیقات اخیر نشان داده که شاخص SCI افزون‌بر مشخصه‌های عمومی توده (مانند قطر، ارتفاع و حجم) یک معیار امیدوارکننده برای کمی کردن ناهمگنی جنگل است (Poldveer et al., 2021).

در بررسی حاضر مقدار شاخص SCI برای سه توده راش خالص تحت بررسی در حدود عدد ۶ (۶۱/۶) - Poldveer (۲۰۲۱) به دست آمد، در حالی که در بررسی Poldveer et al. (2021) در جنگل‌های حفاظت‌شده و مدیریت‌نشده استونی برابر ۷/۴۲ و در جنگل‌های مدیریت‌شده آن برابر ۴/۷۴ به دست آمد. این موضوع نشان‌دهنده این است که مدیریت و بهره‌برداری جنگل سبب کاهش ناهمگنی قطری جنگل می‌شود و توده‌ها را به سمت قطرهای مشابه‌تر در طول زمان سوق می‌دهد. در پژوهش Peck و همکاران (۲۰۱۴) در توده‌های سوزنی‌برگ سوئیس نیز این شاخص برای توده‌های همسال ۲/۷۷ و برای توده‌های ناهمسال ۵/۵۹ به دست آمد. بنابراین ملاحظه می‌شود که هرچه توده ناهمسال‌تر باشد، مقدار شاخص SCI نیز بیشتر خواهد شد. همچنین در پژوهش Zenner et al. (2011) در توده‌های نوئل در فنلاند متوسط شاخص SCI برای توده‌های همسال ۲/۴۹ و برای توده‌های ناهمسال ۵/۴۹ به دست آمد.

در بررسی حاضر مقدار شاخص SCI با تعداد گونه‌ها و تنوع گونه‌ای رابطه معنی‌داری نداشت (جدول ۳)، اما Poldveer et al. (2021) در پژوهش خود در جنگل‌های استونی به رابطه معنی‌داری بین مقدار این شاخص با تعداد گونه‌های چوبی و علفی رسیدند؛ شاید به دلیل اینکه آنها در محاسبه تنوع گونه‌ای مجموع تعداد گونه‌های چوبی و علفی را با هم در نظر گرفتند، اما در مورد متغیرهای روبه زمینی و حجم سرپا نتایج آنها همسو با نتایج تحقیق حاضر بوده است.

اینکه اندازه ناهمگنی ساختاری دو توده راش مدیریت‌شده در حوضه‌های ۴۹ و ۶۶ الف براساس شاخص SCI با حوضه ۴۶ که فاقد طرح مدیریت بوده است (شاهد)، تفاوت معنی‌داری ( $p > 0.05$ ) نداشته، نشان می‌دهد که فارغ از متفاوت بودن شرایط محیطی توده‌ها از نظر مقدار بارندگی، خاک، ارتفاع از سطح دریا، شیب و جهت، احتمالاً نوع مدیریت و دخالت در این دو توده تقریباً همگام با طبیعت است، به طوری که اندازه ناهمگنی ساختاری قطری آنها را در مقایسه با توده شاهد کاهش نداده است. بنابراین می‌توان از شاخص SCI در جنگل‌های حفاظتی و با کیفیت اکولوژیکی مطلوب، به منزله مرجع یا معیاری برای ارزیابی مناسب بودن روش‌های مدیریتی برای حفظ یا افزایش ناهمگنی ساختاری توده‌ها استفاده کرد.

در بررسی حاضر مقدار شاخص SCI برای سه توده راش خالص تحت بررسی در حدود عدد ۶ (۶۱/۶) - Poldveer (۲۰۲۱) به دست آمد، در حالی که در بررسی Poldveer et al. (2021) در جنگل‌های حفاظت‌شده و مدیریت‌نشده استونی برابر ۷/۴۲ و در جنگل‌های مدیریت‌شده آن برابر ۴/۷۴ به دست آمد. این موضوع نشان‌دهنده این است که مدیریت و بهره‌برداری جنگل سبب کاهش ناهمگنی قطری جنگل می‌شود و توده‌ها را به سمت قطرهای مشابه‌تر در طول زمان سوق می‌دهد. در پژوهش Peck و همکاران (۲۰۱۴) در توده‌های سوزنی‌برگ سوئیس نیز این شاخص برای توده‌های همسال ۲/۷۷ و برای توده‌های ناهمسال ۵/۵۹ به دست آمد. بنابراین ملاحظه می‌شود که هرچه توده ناهمسال‌تر باشد، مقدار شاخص SCI نیز بیشتر خواهد شد. همچنین در پژوهش Zenner et al. (2011) در توده‌های نوئل در فنلاند متوسط شاخص SCI برای توده‌های همسال ۲/۴۹ و برای توده‌های ناهمسال ۵/۴۹ به دست آمد.

شاخص SCI براساس الگوی مکانی درختان و تفاوت قطری بین درختان همسایه محاسبه و تولید می‌شود، اما به مشخصات کمی توده مانند روبه زمینی و حجم سرپا نیز وابسته است (جدول ۳)، به طوری که با افزایش روبه زمینی و حجم سرپا مقدار شاخص SCI افزایش می‌یابد (شکل ۳) (Zenner, 2004; Zenner et al., )

براساس الگوی مکانی درختان و تفاوت قطری بین درختان همسایه محاسبه و تولید می‌شود، اما به مشخصات کمی توده مانند روبه زمینی و حجم سرپا نیز وابسته است (جدول ۳)، به طوری که با افزایش روبه زمینی و حجم سرپا مقدار شاخص SCI افزایش می‌یابد (شکل ۳) (Zenner, 2004; Zenner et al., )



منابع طبیعی و آبخیزداری کشور با تعداد تکرار کافی (حداقل ۳۰ قطعه نمونه) استفاده کرد تا به نتیجه یکسانی در مقایسه با قطعات یک هکتاری دست یافت. محاسبه شاخص SCI به راحتی محاسبه دیگر شاخص‌های ساختاری جنگل نیست، زیرا این شاخص افزون بر ابعاد درختان به مختصات مکانی آنها نیز نیاز دارد که در آماربرداری‌های مرسوم جنگل به‌طور معمول اندازه‌گیری نمی‌شوند. اما در هر حال برای تشریح کامل ساختار جنگل و در نظر گرفتن ماهیت مکانی آن باید از شاخص‌هایی استفاده شود که جنبه‌های مکانی ساختار جنگل را نیز در نظر می‌گیرند (Zenner & Hibbs, 2000).

به همان ترتیب که داده‌های بزرگ‌مقیاس در سطح درخت، حاصل از اطلاعات سنجش از دوری با وضوح زیاد مکانی و زمانی، بیشتر در دسترس قرار می‌گیرند، شاخص‌های مکانی ساختار توده به‌صورت گسترده‌تری استفاده خواهند شد (Poldveer et al., 2021). بنابراین حداقل تا زمانی که داده‌های سنجش از دور با دقت کافی در تعیین موقعیت مکانی درختان (مانند LiDAR) در دسترس نباشد، می‌توان از نقشه‌های پراکنش مکانی درختان برای برخی از این اهداف با وجود هزینه‌های نسبی بیشتر استفاده کرد.

### نتیجه‌گیری

با توجه به موارد استفاده شاخص SCI در تعیین اندازه ناهمگنی توده‌های جنگلی که می‌تواند در برنامه‌ریزی‌های آینده‌نگر برای توده‌های موردنظر کاربرد داشته و همچنین برای مقایسه توده‌ها از نظر اندازه ناهمگنی ساختاری با توده‌های شاهد استفاده شود، پیشنهاد می‌شود که در آماربرداری‌های آینده در جنگل، مختصات قطبی درختان واقع در محدوده هر قطعه نمونه (فاصله و آزیموت نسبت به مرکز هر قطعه نمونه) نیز برداشت شود تا با به‌دست آوردن مختصات مکانی آنها بتوان این شاخص را برای هر قطعه نمونه و در نتیجه برای کل توده مورد بررسی محاسبه و تعیین کرد.

هرچه ابعاد قطعات نمونه به‌کاررفته در محاسبه شاخص SCI بزرگ‌تر باشد، تعداد درختان بیشتری در آن قرار می‌گیرند و در نتیجه تعداد مثلث‌های غیرهمپوشان ناشی از اتصال سه درخت مجاور در محاسبه این شاخص بیشتر می‌شود که احتمالاً سبب ایجاد تغییر در مقدار این شاخص خواهد شد. براساس نتایج برخی پژوهش‌ها هرچه توده مسن‌تر و پیش‌رسته‌تر باشد باید از قطعات نمونه بزرگ‌تری برای محاسبه این شاخص استفاده کرد (Zenner & Peck, 2009). چون برخی از مشخصه‌های جنگل‌های پیش‌رسته مانند تعداد درختان خشک سرپا<sup>۱</sup> و همچنین تعداد درختان قطور به‌شدت به ابعاد قطعه نمونه وابسته‌اند، درحالی که دیگر متغیرها مانند میانگین قطر درختان یا رویه زمینی جنگل وابستگی کمتری به ابعاد قطعه نمونه دارند (Zenner & Peck, 2009). برای مثال Zenner & Peck (2009) در توده‌های بالغ و مدیریت‌شده کاج قرمز در مینه‌سوتای آمریکا برای محاسبه دقیق شاخص SCI به سطح قطعه نمونه برابر نیم هکتار دست یافتند. در پژوهش حاضر به‌منظور پیروی از الگوی دستگاه اجرایی (سازمان منابع طبیعی و آبخیزداری کشور) در آماربرداری از جنگل‌های هیرکانی شمال کشور و افزایش تعداد قطعات نمونه در هر منطقه بررسی به حداقل ۳۰ قطعه نمونه، از قطعات نمونه ۱۰ آری دایره‌ای به‌منظور محاسبه و بررسی شاخص SCI استفاده شد که نتایج آن با نتایج پژوهش Zenner et al. (2015) که در توده‌های خالص و دست‌نخورده راش در جنگل‌های کلاردشت و نکا در استان مازندران با استفاده از قطعات یک هکتاری، شاخص SCI را برای مراحل تحولی بلوغ و پوسیدگی بین ۵/۹ تا ۶/۸ تعیین کردند، مطابقت دارد. بنابراین می‌توان نتیجه‌گیری کرد که برای محاسبه این شاخص می‌توان از همان قطعات ۰/۱ هکتاری مرسوم سازمان

1. old growth  
2. Snag

## سیاسگزاری

است که در «مؤسسه تحقیقات جنگل‌ها و مراتع کشور» در حال اجراست. بدین وسیله از حمایت و پشتیبانی مؤسسه در اجرای این طرح ملی تشکر و قدردانی می‌شود.

این مقاله و داده‌های آن مستخرج از طرح ملی «پایش رویش و موجودی جنگل‌های هیرکانی با استفاده از قطعات نمونه دائمی» به شماره ثبت ۶۶۶۶

## References

- Bradshaw, C.J.A., Warkentin, I.G., & Sodhi, N.S. (2009). Urgent preservation of boreal carbon stocks and biodiversity. *Trends in Ecology & Evolution*, 24, 541- 548. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2009.03.019>
- Gauthier, S., Bernier, P., Kuuluvainen, T., Shvidenko, A.Z., & Schepaschenko, D.G. (2015). Boreal forest health and global change. *Science*, 349(6250), 819- 822. <https://doi.org/10.1126/science.aaa9092>
- Lindenmayer, D.B., & Franklin, J.F. (2002). *Conserving Forest Biodiversity: A Comprehensive Multi-scaled Approach*. Island Press, Washington, DC.
- 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- 24. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2005.08.034>
- Messier, C., Puettmann, K.J., & Coates, K.D. (2013). *Managing Forests as Complex Adaptive Systems: Building Resilience to the Challenge of Global Change*. Routledge, London/New York. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2005.08.034>
- Parobekova, Z., Pittner, J., Kucbel, S., Saniga, M., Filipek, M., Sedmakova, D., Vencurik, J., & Jaloviari, P. (2018). Structural Diversity in a Mixed Spruce-Fir-Beech Old-Growth Forest Remnant of the Western Carpathians. *Forests*, 9(379), 1-19. <https://doi.org/10.3390/f9070379>
- Peck, J.E., Zenner, E.K., Brang, P., & Zingg, A. (2014). Tree size distribution and abundance explain structural complexity differentially within stands of even-aged and uneven-aged structure types. *European Journal of Forest Research*, 133, 335- 346. <https://doi.org/10.1007/s10342-013-0765-3>
- Poldveer, E., Potapov, A., Kurjus, H., Kiviste, A., Stanturf, J.A., Arumäe, T., Kangur, A., & Laarmann, D. (2021). The structural complexity index SCI is useful for quantifying structural diversity of Estonian hemi boreal forests. *Forest Ecology and Management*, 490, 1- 8. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2021.119093>
- Pommerening, A., & Särkkä, A. (2013). What mark variograms tell about spatial plant interactions? *Ecological Modeling*, 251, 64- 72. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2012.12.009>
- Seidel, D., Ehbrecht, M., Annighöfer, P., & Ammer, C. (2019). From tree to stand-level structural complexity – which properties make a forest stand complex?. *Agricultural and Forest Meteorology*, 278, 107699. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.>
- Spathelf, P., Stanturf, J., Kleine, M., Jandl, R., Chiatante, D., & Bolte, A. (2018). Adaptive measures: integrating adaptive forest management and forest landscape restoration. *Annals of Forest Science*, 75, 55. <https://doi.org/10.1007/s13595-13018-10736-13594>.
- Thompson, I., Mackey, B., McNulty, S., & Mosseler, A. (2009). *Forest resilience, biodiversity, and climate change*. In: *Secretariat of the Convention on Biological Diversity, Montreal*. Technical Series no. 43, 1- 67.
- Zenner, E.K. (1998). *A New Index for Describing the Structural Complexity of Forests*. Doctoral dissertation. Oregon, Oregon State University.
- Zenner, E.K. (2000). Do residual trees increase structural heterogeneity in Pacific Northwest coniferous forests? *Ecological Applications*, 10, 800- 810.

- Zenner, E.K. (2004). Does old-growth condition imply high live-tree structural complexity? *Forest Ecology and Management*, 195, 243- 258. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2004.03.026>
- Zenner, E.K., & Hibbs, D.E. (2000). A new method for modeling the heterogeneity of forest structure. *Forest Ecology and Management*, 129, 75- 87. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(99\)00140-1](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(99)00140-1)
- Zenner, E.K., & Peck, J.E. (2009). Characterizing structural conditions in mature managed red pine: Spatial dependency of metrics and adequacy of plot size. *Forest Ecology and Management*, 257, 311-320. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2008.09.006>
- Zenner, E.K., Lähde, E., & Laiho, O. (2011). Contrasting the temporal dynamics of stand structure in even-and uneven-sized *Picea abies* dominated stands. *Canadian Journal of Forest Research*, 41(2), 289- 299. <https://doi.org/10.1139/X10-205>
- Zenner, E.K., Peck, J.E., Lähde, E., & Laiho, O. (2012). Decomposing small scale structural complexity in even- and uneven-sized Norway spruce dominated forests in southern Finland. *Forestry*, 85, 41- 49. <https://doi.org/10.1093/forestry/cpr052>
- 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 multi-gap scale. *Forest Ecology and Management*, 335, 26- 36. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2014.09.023>



*Research Article*

## The comparison of pure beech stands using SCI index in the Hyrcanian forests of Iran (Mazandaran province)

R. Akhavan<sup>1</sup>, M. Hassani<sup>2</sup>, and M.H. Sadeghzadeh Halaj<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Corresponding author, Associate Prof., Research Institute of Forests and Rangelands, Agricultural Research Education and Extension Organization (AREEO), Tehran, Iran

<sup>2</sup> Senior research expert, Research Institute of Forests and Rangelands, Agricultural Research Education and Extension Organization (AREEO), Tehran, Iran

(Received: 6 February 2022; Accepted: 13 May 2022)

### Abstract

Comprehensive description and quantification of stand structure are needed for managing or maintaining forests as complex systems. The Structural Complexity Index (SCI) is a suitable criterion for quantifying the structural heterogeneity of forest stands, which can be used to compare the structural heterogeneity of stands. In this study, we used this index to quantify the structural heterogeneity of three pure beech stands in the Hyrcanian forests of Iran. Forest inventory was performed using a fixed grid of 150×200 m dimension and sample plots of 1000 m<sup>2</sup> in watersheds of 46, 49, and 66a in Mazandaran province, where two stands were managed, and one was unmanaged. Using the spatial coordinates and diameters of trees in 90 measured sample plots in the three stands, we calculated the SCI index for each sample plot as well as its average for each stand. The results showed that the rate of this index in these three stands fluctuated between 2.7 to 11.7. However, its average in each region is approximately 6, without any statistically significant difference between them. The results also showed that the amount of this index was positively correlated with the variables of basal area and standing volume of the stands. The SCI index in protected forests with high ecological quality can be used as a reference or baseline for assessing the suitability of management techniques to maintain or enhance the structural heterogeneity of stands.

**Keywords:** stand spatial structure, pure beech stand, Kojor, Lavij, Bola.