University of Tehran

Journal of Forest and Wood Products

Online ISSN: 2383-0530

Home Page: https://jfwp.ut.ac.ir

Dynamics of the slenderness coefficient in the Hyrcanian habitat of the National Botanical Garden of Iran: Evidence of structural duality

Parisa Panahi[1*] | Abolfazl Jaafari[2] | Maryam Hasaninejad[3]

1. Corresponding Author, Botany Research Division, Research Institute of Forests and Rangelands, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Tehran, Iran. Email: panahi@rifr-ac.ir
2. Forest Research Division, Research Institute of Forests and Rangelands, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Tehran, Iran. Email: jaafari@rifr-ac.ir
3. Botany Research Division, Research Institute of Forests and Rangelands, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Tehran, Iran. Email: hasaninejad@rifr-ac.ir

ARTICLE INFO

Article type:
Research Article

Article History:
Received: 02 September 2026
Revised: 26 October 2026
Accepted: 08 November 2026
Published online: 20 November 2026

Keywords:
Ex-situ collection,
Hyrcanian habitat,
Mechanical stability,
Slenderness coefficient,
Stand density,
Structural duality.

ABSTRACT

Introduction: The slenderness coefficient (height-to-diameter ratio, h/d), a key indicator of the mechanical stability of trees, is influenced by factors such as tree age, stand density, light competition, and species characteristics. *Ex*-situ collections, as genetic reservoirs of forest species, require continuous monitoring of their structural stability. This study aimed to assess the structural stability of the Hyrcanian habitat of the National Botanical Garden of Iran using the slenderness ratio over two inventory periods (2006 and 2025).

Method: In 2006, 43 permanent circular sample plots, each covering an area of 200 m^2, were established within the 8-ha Hyrcanian habitat using a systematic-random sampling method. During the initial inventory, both quantitative and qualitative variables of woody species were recorded. These plots were subsequently re-inventoried in 2025, following a 19-year interval. The slenderness Coefficient was calculated for each individual and categorized into four stability classes: highly unstable, unstable, stable, and highly stable. Statistical analyses were conducted in R using specialized packages.

Results: Stand density increased from 990 stems ha^{-1} in the initial inventory to 1,693 stems ha^{-1} in the second (+71%), primarily driven by the massive recruitment of *Cornus australis* C.A.Mey., which rose from 152 to 579 stems ha^{-1}. Although the mean slenderness coefficient of the entire stand increased slightly from 89.5 to 93.5, this change was not statistically significant. However, the proportion of unstable stems (slenderness coefficient > 80) rose from 59% to 64%. At the species level, significant variations were observed: the slenderness coefficient of *Diospyros lotus* L., *Fraxinus excelsior* L., *Acer velutinum* Boiss., and *Parrotia persica* (DC.) C.A.Mey. decreased significantly, indicating improved stability, whereas those of *Ulmus carpinifolia* G.Suckow and *Morus alba* L. increased significantly, denoting reduced stability.

Conclusion: The Hyrcanian habitat exhibits a distinct structural duality: while certain species (e.g., *D. lotus* and *F. excelsior*) demonstrate enhanced stability as they reach maturity, others (e.g., *U. carpinifolia* and *M. alba*) become increasingly slender and unstable due to accelerated vertical growth. This divergence is primarily driven by the sharp increase in stand density and intensified light competition. Our findings suggest that relying exclusively on the stand's mean slenderness coefficient is inadequate for a robust stability assessment; rather, species-specific responses must be prioritized. Consequently, density management through species-targeted thinning is recommended as a primary strategy to mitigate light competition and enhance the overall mechanical stability of the stand.

Cite this article: Panahi, P., Jaafari, A., Hasaninejad, M. (2026). Dynamics of the slenderness coefficient in the Hyrcanian habitat of the National Botanical Garden of Iran: Evidence of structural duality. *Journal of Forest and Wood Products*, 79 (3), 337-348. DOI: http//doi.org/10.22059/jfwp.2026.424317.1416

© The Author(s) **Publisher:** University of Tehran Press.
DOI: http//doi.org/10.22059/jfwp.2026.424317.1416

نشریهٔ جنگل و فرآورده‌های چوب
سایت نشریه: https://jfwp.ut.ac.ir
شاپا الکترونیکی: ۲۳۸۳-۰۵۳۰
دانشگاه تهران

پویایی ضریب قدکشیدگی در رویشگاه هیرکانی باغ گیاه‌شناسی ملی ایران: شواهدی از دوگانگی ساختاری

پریسا پناهی[1*] | ابوالفضل جعفری[2] | مریم حسنی‌نژاد[3]

۱. نویسندهٔ مسئول، بخش تحقیقات گیاه‌شناسی، مؤسسهٔ تحقیقات جنگل‌ها و مراتع کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران. رایانامه: panahi@rifr-ac.ir
۲. بخش تحقیقات جنگل، مؤسسهٔ تحقیقات جنگلها و مراتع کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران. رایانامه: jaafari@rifr-ac.ir
۳. بخش تحقیقات گیاه‌شناسی، مؤسسهٔ تحقیقات جنگلها و مراتع کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران. رایانامه: hasaninejad@rifr-ac.ir

اطلاعات مقاله

نوع مقاله:
پژوهشی

تاریخ‌های مقاله:
تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۶/۱۱
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۰۸/۰۴
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۸/۱۷
تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۸/۲۹

کلیدواژه:
پایداری مکانیکی، تراکم توده، دوگانگی ساختاری، رویشگاه هیرکانی، ضریب قدکشیدگی، کلکسیون خارج از رویشگاه.

چکیده

مقدمه: ضریب قدکشیدگی (نسبت ارتفاع به قطر) به‌عنوان شاخص کلیدی پایداری مکانیکی درختان، تحت تأثیر عواملی مانند سن، تراکم توده، رقابت نوری و سرشت گونه قرار می‌گیرد. کلکسیون‌های خارج از رویشگاه (*Ex-situ* collections) به‌عنوان مخازن ژنتیکی گونه‌های جنگلی، نیازمند پایش مستمر پایداری ساختاری هستند. این پژوهش با هدف ارزیابی پایداری ساختاری رویشگاه هیرکانی باغ گیاه‌شناسی ملی ایران با استفاده از ضریب قدکشیدگی در دو مقطع زمانی آماربرداری (۱۳۸۵ و ۱۴۰۴) انجام شد.

روش پژوهش: در سال ۱۳۸۵، ۴۳ قطعه‌نمونهٔ دائمی دایره‌ای‌شکل با مساحت ۲ آر به روش منظم–تصادفی در رویشگاه هیرکانی با مساحت ۸ هکتار پیاده و متغیرهای کمی و کیفی گونه‌های چوبی ثبت شد. در سال ۱۴۰۴، پس از ۱۹ سال، پایش دوبارهٔ این قطعات انجام شد. ضریب قدکشیدگی برای هر پایه محاسبه و در چهار طبقه (کاملاً ناپایدار، ناپایدار، پایدار و کاملاً پایدار) طبقه‌بندی شد. تحلیل داده‌ها در نرم‌افزار R با استفاده از بسته‌های تخصصی انجام شد.

یافته‌ها: تراکم توده از ۹۹۰ پایه در هکتار در آماربرداری اول به ۱۶۹۳ پایه در هکتار در آماربرداری دوم افزایش یافت (۷۱+ درصد). این افزایش عمدتاً ناشی از ورود انبوه گونهٔ سیاه‌ال (*Cornus australis* C.A.Mey) بود که جمعیت آن از ۱۵۲ به ۵۷۹ پایه در هکتار رسید. میانگین ضریب قدکشیدگی کل توده از ۸۹/۵ به ۹۳/۵ افزایش یافت، اما این تغییر از نظر آماری معنی‌دار نبود. سهم پایه‌های ناپایدار (ضریب قدکشیدگی بیشتر از ۸۰) از ۵۹ به ۶۴ درصد افزایش یافت. در سطح گونه، تفاوت‌های معنی‌داری مشاهده شد، به‌طوری‌که ضریب قدکشیدگی در گونه‌های اوجا (*Ulmus carpinifolia* G.Suckow) و توت (*Morus alba* L.) به‌طور معنی‌داری افزایش یافت (کاهش پایداری)، در حالی‌که در گونه‌های خرمندی (*Diospyrus lotus* L.)، ون (*Fraxinus excelsior* L.)، پلت (*Acer velutinum* Boiss.) و انجیلی (*Parrotia persica* (DC.) C.A.Mey.) به‌طور معنی‌دار کاهش یافت (افزایش پایداری).

نتیجه‌گیری: رویشگاه هیرکانی در حال تجربهٔ یک دوگانگی ساختاری است؛ برخی گونه‌ها (مانند خرمندی و ون) با افزایش سن و بلوغ، پایدارتر شده‌اند، در حالی‌که گونه‌های دیگر (مانند اوجا و توت) با رشد سریع طولی، لاغرتر و ناپایدارتر شده‌اند. عامل اصلی این واگرایی، افزایش شدید تراکم و رقابت نوری است. نتایج نشان می‌دهد که تکیهٔ صرف بر میانگین کل ضریب قدکشیدگی توده برای ارزیابی پایداری کافی نیست و باید تفاوت‌های پاسخ گونه‌ها جدی گرفته شود. پیشنهاد می‌شود مدیریت تراکم از طریق اجرای عملیات پرورشی به‌ویژه تنک کردن گونه‌محور، به‌عنوان ابزار اصلی کاهش رقابت نوری و بهبود پایداری مکانیکی توده درنظر گرفته شود.

استناد: پناهی؛ پریسا، جعفری؛ ابوالفضل، حسنی‌نژاد؛ مریم (۱۴۰۵). پویایی ضریب قدکشیدگی در رویشگاه هیرکانی باغ گیاه‌شناسی ملی ایران: شواهدی از دوگانگی ساختاری. *نشریهٔ جنگل و فرآورده‌های چوب*، ۷۹ (۳)، ۳۴۸-۳۳۷. DOI: https://10.22059/jfwp.2026.424317.1416

© نویسندگان.
ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.
https://doi.org/10.22059/jfwp.2026.424317.1416

۱. مقدمه

پایداری ساختاری توده‌های جنگلی، یکی از ارکان اساسی مدیریت پایدار و حفاظت از اکوسیستم‌های جنگلی محسوب می‌شود. در میان شاخص‌های متعدد کمی که برای ارزیابی این پایداری به‌کار می‌روند، ضریب قدکشیدگی یا ضریب لاغری[1] به‌عنوان یک شاخص کلیدی و کارآمد شناخته شده است که بیانگر مقاومت درخت در برابر عوامل نامساعد محیطی مانند باد، برف و طوفان است [۱]. این ضریب نه‌تنها وضعیت پایداری مکانیکی تک‌درخت را نشان می‌دهد، بلکه به‌عنوان ابزاری مدیریتی برای برنامه‌ریزی عملیات پرورشی و تعیین سلامت توده نیز به‌کار می‌رود [۲]. ضریب قدکشیدگی از رابطهٔ ساده‌ای به‌دست می‌آید که در آن ارتفاع کل درخت بر قطر برابر سینه (h/d) تقسیم می‌شود [۳، ۴]. هرچه این نسبت کمتر باشد، درخت قطورتر و پایدارتر است و درمقابل، مقادیر زیاد این ضریب نشان‌دهندهٔ لاغری بیش‌ازحد و آسیب‌پذیری درخت در برابر بادافتادگی و شکستگی است.

اهمیت ضریب قدکشیدگی در مدیریت جنگل، از آنجا ناشی می‌شود که این شاخص به‌طور مستقیم تحت تأثیر عواملی مانند سن درخت، تراکم توده، رقابت نوری، حاصل‌خیزی رویشگاه، دخالت‌های فنی و سرشت گونه (نورپسند یا سایه‌پسند) قرار می‌گیرد [۵]. در توده‌های ناهمسال، درختان جوان واقع در اشکوب‌های پایین به‌دلیل رقابت شدید نوری، رشد ارتفاعی سریع و رویش قطری کندی دارند که منجر به افزایش ضریب قدکشیدگی و کاهش پایداری آنها می‌شود. درمقابل، با افزایش سن و قطر درخت، رشد ارتفاعی کاهش یافته و رویش قطری ادامه می‌یابد که به کاهش تدریجی این ضریب و بهبود پایداری مکانیکی منجر می‌شود [۱]. بنابراین، بررسی روند تغییرات ضریب قدکشیدگی در طول زمان می‌تواند تصویری روشن از تحول ساختاری توده و کارآمدی عملیات پرورشی یا شرایط رویشگاهی ارائه دهد.

رویشگاه هیرکانی باغ گیاه‌شناسی ملی ایران، به‌عنوان یکی از مهم‌ترین کلکسیون‌های جنگلی خارج از رویشگاه[2] در کشور، از سال ۱۳۵۱ شمسی احداث شده و مجموعه‌ای ارزشمند از گونه‌های چوبی (درخت و درختچه) جنگل‌های هیرکانی را در خود جای داده است [۶]. این رویشگاه با مساحتی معادل ۸ هکتار، شرایطی فراهم کرده است که گونه‌های چوبی بومی هیرکانی در کنار یکدیگر رشد کرده و مراحل مختلف تحول ساختاری را تجربه کنند. در سال ۱۳۸۵، نخستین آماربرداری از این رویشگاه با استفاده از ۴۳ قطعه‌نمونهٔ دائمی انجام شد و متغیرهای کمی و کیفی گونه‌های چوبی ثبت شد [۷]. پس از گذشت ۱۹ سال، در سال ۱۴۰۴، پایش دوبارهٔ این قطعات انجام شد و داده‌های جدیدی از وضعیت کنونی توده به‌دست آمد. این فاصلهٔ زمانی قابل‌توجه، فرصت منحصربه‌فردی را برای بررسی روند تغییرات ساختاری توده، ازجمله تحولات ضریب قدکشیدگی، فراهم آورد.

مرور منابع داخلی و خارجی نشان می‌دهد که ضریب قدکشیدگی در جنگل‌های هیرکانی و سایر اکوسیستم‌های جنگلی ایران مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است. در مطالعهٔ فرم درختان راش (*Fagus orientalis* Lipsky) در مراحل مختلف رویشی در جنگل لومیر گیلان مشخص شد که درختان راش در مرحلهٔ تیرک با میانگین ضریب قدکشیدگی ۱۰۰/۵ در ناپایدارترین وضعیت و در مرحلهٔ پیردار با مقدار ۳۳/۱۳ در پایدارترین وضعیت قرار داشتند. این یافته‌ها اهمیت مرحلهٔ رویشی را در تفسیر ضریب قدکشیدگی برجسته می‌کند [۸]. در پژوهشی دیگر در راشستان‌های طبیعی جنگل وطنای استان گلستان، مقدار ۶۹/۳۸ برای این ضریب به‌دست آمد که پایداری زیاد این توده‌ها را تأیید می‌کند [۹]. در بررسی ضریب قدکشیدگی تودهٔ آمیختهٔ راش در منطقهٔ حاجی‌کلا تیرانکلی ساری نیز مقدار میانگین ۳۴/۵۸ گزارش شد که حاکی از پایداری مطلوب توده بود [۱۰]. در ارزیابی ضریب قدکشیدگی دو گونهٔ زربین (*Cupressus sempervirens* L. var. *horizontalis*) و کاج بروسیا (*Pinus brutia* Ten.) در جنگلکاری‌های شهرستان رامیان، کمترین میانگین ضریب قدکشیدگی (۵۹/۴) مربوط به کاج بروسیا و بیشترین آن (۶۸/۴) مربوط به زربین بود [۱۱]. در مطالعهٔ ۵۰۰ پایه از چهار گونهٔ غالب اوری (*Quercus macranthera* Fish. et Mey.)، ممرز (*Carpinus betulus* L.)، کرب (*Acer campestre* L.) و زبان‌گنجشک (*Fraxinus excelsior*) در تودهٔ جنگلی طبیعی حفاظت‌شدهٔ منطقهٔ مکیدی ارسباران، میانگین ضریب قدکشیدگی کل توده ۵۴/۳۱ و به‌ترتیب برای ممرز ۵۵/۰۴، کرب ۵۴/۹۳، زبان‌گنجشک ۵۴/۶۳ و اوری ۵۲/۶۴ محاسبه شد [۱۲].

[1] Slenderness coefficient
[2] *Ex-situ* collections

در پژوهش‌های بین‌المللی نیز ضریب قدکشیدگی به‌طور گسترده در مدل‌سازی خطر آسیب‌های باد و برف در جنگل‌های اروپایی و آمریکای شمالی استفاده شده است. به‌عنوان نمونه، با مدل‌سازی نسبت ارتفاع به قطر نوئل (*Picea abies* (L.) Karsten) در کشور اسلواکی مشخص شد که این نسبت می‌تواند به‌عنوان ابزاری برای افزایش پایداری توده در مدیریت جنگل به‌کار رود. در این پژوهش تأکید شد که ضریب قدکشیدگی تحت تأثیر عواملی مانند سن، تراکم و کیفیت رویشگاه قرار دارد [۲]. در پژوهشی دیگر، با استفاده از داده‌های سال ۲۰۱۰، ضریب قدکشیدگی سه تودهٔ جنگلکاری‌شدهٔ ۵۰ ساله نوئل در مناطق مرکزی کرواسی محاسبه شد. از این سه توده، دو توده در سال ۲۰۱۳ بر اثر طوفان کاملاً از بین رفته بودند. مقادیر ضریب قدکشیدگی دو تودهٔ کاملاً آسیب‌دیده بیشتر از ۸۰ بود، در حالی‌که این مقدار در توده‌های آسیب‌دیده کمتر بود. در این پژوهش نتیجه‌گیری شد که ضریب قدکشیدگی و تحلیل ساختار توده می‌توانند پیش‌بینی‌های مناسبی برای خسارت ناشی از باد باشند و ذکر شد ارزیابی مقاومت درختان در برابر باد باید به‌عنوان یک هدف پرورشی، از اولین تنک کردن درنظر گرفته شود [۱۳]. در مطالعه‌ای مروری، ذکر شد که درختان با ضریب قدکشیدگی بیشتر (درختان لاغر) بسیار مستعدتر به آسیب باد و برف هستند، زیرا مرکز ثقل بالاتری دارند و سیستم ریشه‌ای آنها به‌دلیل فضای رشد محدودتر، کمتر توسعه یافته است. درمقابل، درختان با ضریب قدکشیدگی کم، تاج‌های طویل‌تر، مرکز ثقل پایین‌تر و سیستم ریشه‌ای بهتر توسعه‌یافته‌ای دارند که مقاومت آنها را در برابر باد و برف افزایش می‌دهد [۴]. با بررسی اثر اقلیم، ویژگی‌های خاک و رقابت بر ضریب قدکشیدگی در جنگل‌های آمیختهٔ شمال شرق چین، چنین نتیجه‌گیری شد که این شاخص تحت تأثیر ترکیبی از عوامل محیطی و رقابتی قرار دارد [۱۴]. مطالعهٔ دیگری در مورد *Araucaria angustifolia* (Bertol.) Kuntze در جنگل‌های ثانویهٔ جنوب برزیل، ضریب قدکشیدگی ۸۰ را به‌عنوان آستانهٔ بحرانی پایداری معرفی کرد [۱۵].

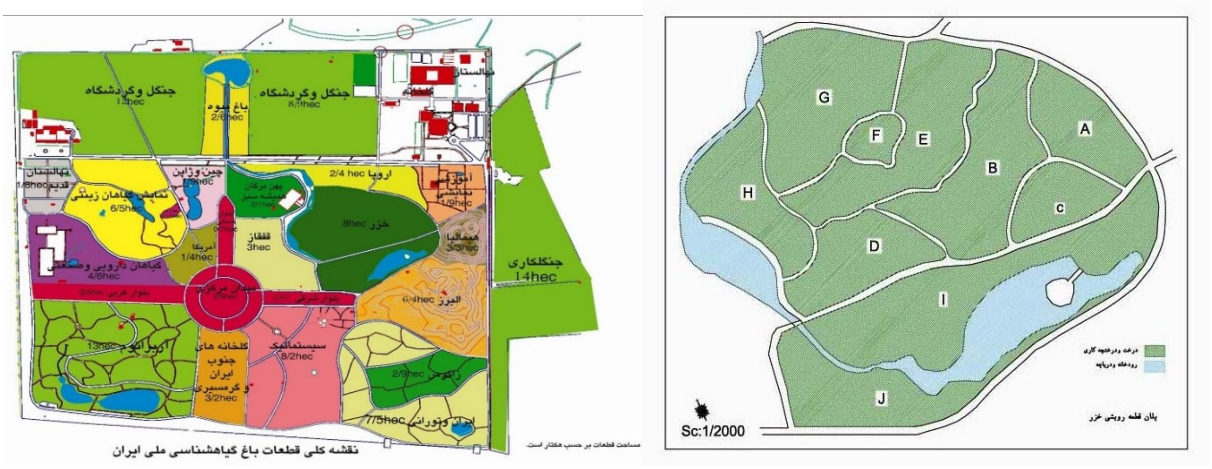
با وجود این مطالعات، بررسی پویایی ضریب قدکشیدگی در کلکسیون‌های خارج از رویشگاه و به‌ویژه در باغ‌های گیاه‌شناسی، کمتر مورد توجه قرار گرفته است. چنین بررسی‌هایی از آن جهت حائز اهمیت هستند که این رویشگاه‌ها به‌عنوان مخازن ژنتیکی گونه‌های جنگلی عمل می‌کنند و پایش پایداری آنها می‌تواند به شناسایی گونه‌های سازگار و برنامه‌ریزی حفاظتی کمک کند. با توجه به موارد فوق، هدف اصلی این پژوهش، ارزیابی پایداری گونه‌های چوبی رویشگاه هیرکانی باغ گیاه‌شناسی ملی ایران با استفاده از ضریب قدکشیدگی در دو مقطع زمانی آماربرداری (۱۳۸۵ و ۱۴۰۴) است. به‌طور مشخص، این مطالعه به‌دنبال پاسخ به پرسش‌های زیر است: (۱) ضریب قدکشیدگی گونه‌های چوبی رویشگاه هیرکانی باغ گیاه‌شناسی ملی ایران در دو مقطع زمانی آماربرداری چه تغییراتی داشته است؟ (۲) آیا تغییرات ضریب قدکشیدگی بین گونه‌های مختلف متفاوت است؟ و (۳) سهم طبقات مختلف پایداری (کاملاً ناپایدار، ناپایدار، پایدار و خیلی پایدار) در دو مقطع زمانی چگونه تغییر کرده است؟ نتایج این پژوهش می‌تواند به درک بهتر پویایی ساختاری رویشگاه‌های خارج از رویشگاه و ارائه توصیه‌های مدیریتی برای حفظ پایداری مکانیکی این ذخایر ژنتیکی کمک کند.

۲. روش‌شناسی پژوهش

۲-۱. منطقهٔ مورد پژوهش

پژوهش پیش‌رو در رویشگاه هیرکانی باغ گیاه‌شناسی ملی ایران انجام شد. این باغ به وسعت ۱۴۵ هکتار در دامنهٔ جنوبی رشته‌کوه البرز مرکزی در اراضی چیتگر، در شمال غربی تهران (در محدودهٔ شهرداری منطقه ۲۲) و در عرض جغرافیایی ۳۵ درجه و ۴۱ دقیقهٔ شمالی و طول جغرافیایی ۵۱ درجه و ۱۹ دقیقهٔ شرقی در ارتفاع ۱۳۲۰ متری بالاتر از سطح دریا واقع شده است (شکل ۱). رویشگاه هیرکانی یکی از مهم‌ترین و قدیمی‌ترین کلکسیون‌های جنگلی باغ است که عملیات اجرایی احداث آن از سال ۱۳۵۱ آغاز شده است. در این رویشگاه سعی شده گونه‌های چوبی و علفی جنگل‌های هیرکانی کاشته و مراقبت شوند، به‌نحوی‌که تناسب بین جوامع جنگلی و گونه‌های همراه آنها رعایت شود. مساحت رویشگاه هیرکانی ۸ هکتار است که در ۶/۵۹ هکتار آن گونه‌های مختلف گیاهی (علفی و چوبی) کاشته شده‌اند. این رویشگاه از ۱۱ زیرقطعه تشکیل شده است (شکل ۱) که مرز آنها توسط پیاده‌روهایی که در طرفین آنها با استفاده از گونهٔ شمشاد (*Buxus hyrcana* Pojark) پرچین درست شده است،

مشخص می‌باشد. باتوجه به سابقهٔ احداث این رویشگاه (بیش از ۵ دهه) برخی پایه‌های درختی مانند توسکای ییلاقی (*Alnus subcordata* C.A.Mey.)، بلندمازو (*Q. castaneifolia* C.A.Mey.)، توت (*Morus alba* L.) و اوجا (*Ulmus carpinifolia* G.Suckow) که از همان سال‌های ابتدایی ساخت در این رویشگاه کاشته شده‌اند، امروزه سنی حدود ۵۰ سال و قطرهایی بیش از ۵۰ سانتی‌متر دارند. امروزه، اکثر گونه‌های موجود در این رویشگاه تجدیدحیات طبیعی کرده و پایه‌های کم‌قطرتر و جوان‌تر آنها نیز در رویشگاه مشاهده می‌شود. همچنین، هرچند تلاش شد تا حد امکان تمام گونه‌های چوبی جنگل‌های هیرکانی به این رویشگاه منتقل و کاشته شوند، اما متأسفانه برخی از آنها مانند راش و شاه‌بلوط به‌رغم تلاش‌های مکرر و فراوان، فقط چند سال استقرار پیدا کرده و پس از آن خشک شده و از بین رفتند. درخصوص تیمارهای جنگل‌شناسی نیز، تنها اقدامی که در طول این سال‌ها در توده انجام شده، قطع درختانی بوده که بنا به دلایل مختلف مانند بادافتادگی، شکستگی و خسارت شدید آفات و بیماری‌ها الزام به خروج آنها از رویشگاه بوده است [۷].



شکل ۱. نقشهٔ باغ گیاه‌شناسی ملی ایران (راست) و رویشگاه هیرکانی (چپ)

۲-۲. روش پژوهش

در سال ۱۳۸۵، ۴۳ قطعه‌نمونهٔ دائمی دایره‌ای‌شکل با مساحت ۲ آر با استفاده از یک شبکهٔ نمونه‌برداری با ابعاد ۴۰×۴۰ متر به روش منظم-تصادفی در این رویشگاه پیاده شد و قطر برابر سینه و ارتفاع گونه‌های چوبی اندازه‌گیری شد [۷]. پژوهش پیش‌رو پس از گذشت ۱۹ سال در سال ۱۴۰۴ در همان قطعه‌نمونه‌ها انجام شد و متغیرهای فوق دوباره اندازه‌گیری شدند. برای اندازه‌گیری قطر برابر سینه از خط‌کش دوبازو و برای اندازه‌گیری ارتفاع از بلندیاب ورتکس استفاده شد. حد شمارش قطری نیز ۵ سانتی‌متر درنظر گرفته شد. سپس، ضریب قدکشیدگی پایه‌های چوبی محاسبه و در طبقه‌های زیر قرار گرفت [۳]:

الف) خیلی ناپایدار ($h/d \geq ۱۰۰$)

ب) ناپایدار ($۸۰ \leq h/d < ۱۰۰$)

ج) پایدار ($۴۵ \leq h/d < ۸۰$)

د) خیلی پایدار ($h/d < ۴۵$)

۲-۳. تحلیل داده‌ها

کلیهٔ تحلیل‌ها در نرم‌افزار RStudio و با استفاده از بسته‌های تخصصی rio (برای ورود داده‌ها و نیز تهیهٔ خروجی)، tidyverse و dplyr برای پاک‌سازی، سازمان‌دهی و مدیریت داده‌ها در قالب داده‌های مرتب و zoo برای مدیریت داده‌های سری زمانی و اجرای عملیات آماری انجام شد.

۳. یافته‌های پژوهش و بحث

۳–۱. ترکیب گونه‌ای

به استناد نتایج، در آماربرداری اول (سال ۱۳۸۵)، ۳۱ گونهٔ درختی و درختچه‌ای و در آماربرداری دوم (سال ۱۴۰۴)، ۳۳ گونهٔ درختی و درختچه‌ای در قطعه‌نمونه‌ها ثبت شدند. گونه‌های پلاخور (*Lonicera Iberica* M.B.)، گردو (*Juglans regia* L.)، شب‌خسب (*Albizzia julibrissin* Durazz.) و اشنگور (*Rhamnus cathartica* L.) که در آماربرداری دوم ثبت شدند، در آماربرداری اول وجود نداشتند. برعکس، گونه‌های جل (*Laurocerasus officinalis* Roemer) و هلو (*Prunus persica* (L.) Batsch) در آماربرداری اول در قطعه‌نمونه‌ها ثبت شدند، اما در آماربرداری دوم مشاهده نشدند (شکل‌های ۱ و ۲).

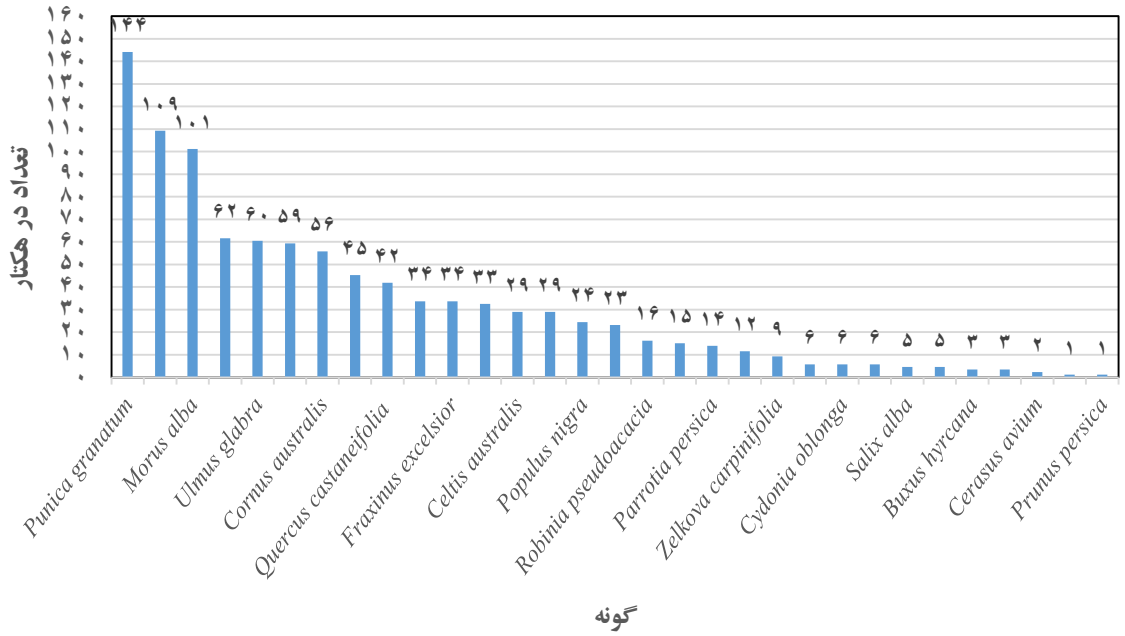
۳–۲. تراکم (تعداد در هکتار)

در آماربرداری اول، ۸۵۱ پایهٔ چوبی در قطعه‌نمونه‌ها اندازه‌گیری شد که معادل ۹۹۰ پایه در هکتار است. این مقادیر در آماربرداری دوم ۱۴۵۶ پایه بود که معادل۱۶۹۳ پایه در هکتار است. بنابراین، تراکم (تعداد در هکتار) گونه‌های چوبی رویشگاه هیرکانی در سال ۱۴۰۴ به مقدار قابل‌توجهی افزایش یافته است. افزایش ۷۱ درصدی تراکم در طول ۱۹ سال، یک تغییر ساختاری بنیادین در توده است. در آماربرداری اول، بیشترین تراکم مربوط به گونه‌های انار (*Punica granatum* L.)، اوجا و توت به‌ترتیب با مقادیر ۱۴۴، ۱۰۹ و ۱۰۱ پایه در هکتار بود، در حالی‌که در آماربرداری دوم، پس از سیاه‌ال (*Cornus australis* C.A.Mey.)، گونه‌های انار وحشی (۲۳۱ اصله در هکتار) و اوجا (۱۵۲ اصله در هکتار) همچنان در رتبه‌های بعدی هستند، در حالی‌که فراوانی توت به ۴۴ اصله در هکتار کاهش یافته است. در آماربرداری دوم، فراوانی برخی گونه‌ها به‌طور قابل‌توجهی افزایش یافته است. به‌عنوان نمونه، فراوانی سیاه‌ال از ۵۶ اصله در هکتار در آماربرداری اول به ۵۷۹ اصله در هکتار در آماربرداری دوم رسیده است که نشان‌دهندهٔ غالبیت شدید این گونه در سال‌های اخیر است. البته، در نقطه مقابل، فراوانی گونهٔ توسکای ییلاقی کاهش شدیدی را تجربه کرده و از ۶۲ اصله در هکتار در سال ۱۳۸۵ به ۳ اصله در هکتار در سال ۱۴۰۴ رسیده بود. مهم‌ترین تغییر ترکیب گونه‌ای بین دو مقطع زمانی آماربرداری، انفجار جمعیتی سیاه‌ال است که به‌تنهایی حدود ۶۰ درصد از افزایش کل تراکم، ناشی از ورود این گونه بوده است. سیاه‌ال در آماربرداری دوم به گونهٔ غالب مطلق تبدیل شده و تقریباً ۳۴ درصد از کل پایه‌های چوبی را تشکیل می‌دهد. به‌دلیل ورود تعداد زیادی از پایه‌های این گونه به مرحلهٔ بلوغ (پایه‌هایی که از مرحلهٔ تجدیدحیات گذر کرده و قطر برابر سینهٔ آنها بیشتر از حد شمارش شده است)، تراکم توده به‌طور قابل ملاحظه‌ای افزایش یافته است. سیاه‌ال توانایی زیادی در تولید پاجوش دارد. همچنین، یک گونهٔ نیمه‌سایه‌پسند است که در زیراشکوب توده‌های متراکم به‌خوبی رشد می‌کند. این ویژگی‌ها در افزایش سهم این گونه در ترکیب توده بسیار مؤثر بوده‌اند.

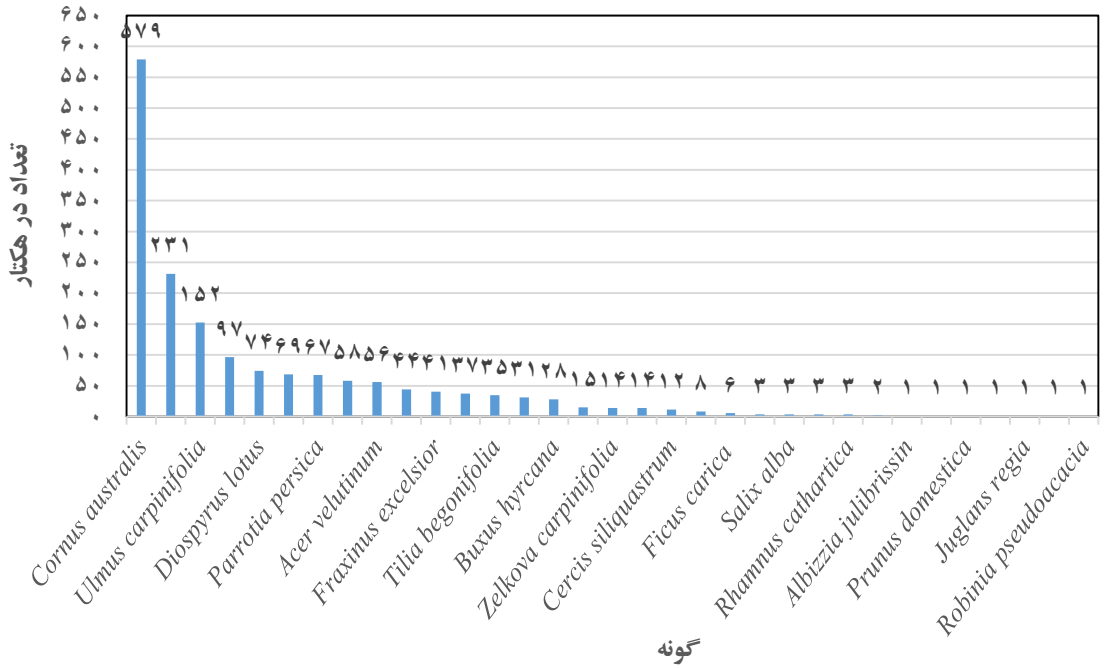
در آماربرداری اول، گونه‌های جل و هلو هرکدام با یک پایه در هکتار، کمترین تراکم را داشتند. همان‌طور که پیشتر اشاره شد، دو گونهٔ مذکور در آماربرداری دوم وجود نداشتند، اما به‌جای آنها، گونه‌های پلاخور، آلوچه جنگلی (*Prunus domestica* L.)، سفیدپلت (*Populus capsica* Bornm.)، گردو، شب‌خسب، گیلاس وحشی (*Cerasus avium* (L.) Moench) و اقاقیا (*Robinia pseudoacacia* L.) هرکدام با یک پایه در هکتار، کمترین تراکم را داشتند (شکل‌های ۲ و ۳).

۳–۳. مقایسهٔ ضریب قدکشیدگی کل بین دو مقطع زمانی آماربرداری

میانگین ضریب قدکشیدگی کل توده در آماربرداری‌های اول و دوم به‌ترتیب ۸۹/۵ و ۹۳/۵ به‌دست آمد. مقدار این ضریب در آماربرداری دوم اندکی بیشتر از آماربرداری اول بود، اما از نظر آماری اختلاف معنی‌داری (P = ۰/۷۹۳) نداشت. سهم پایه‌های چوبی در طبقه‌های مختلف ضریب قدکشیدگی در دو مقطع زمانی آماربرداری در شکل ۴ ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در آماربرداری اول، حدود ۵۹ درصد درختان وضعیت ناپایداری (ضریب قدکشیدگی بیشتر از ۸۰) داشتند که در آماربرداری دوم این مقدار به حدود ۶۴ درصد افزایش یافته بود. درمقابل، در آماربرداری‌های اول و دوم به‌ترتیب ۴۱ و ۳۵/۹ درصد پایه‌ها وضعیت پایداری داشتند (ضریب قدکشیدگی کمتر از ۸۰). سهم پایه‌ها در طبقه‌های ضریب قدکشیدگی بین دو مقطع زمانی آماربرداری اختلاف آماری معنی‌داری نشان نداد.



شکل ۲. تراکم (تعداد در هکتار) گونه‌های چوبی در رویشگاه هیرکانی باغ گیاه‌شناسی ملی ایران در آماربرداری اول (۱۳۸۵)



شکل ۳. تراکم (تعداد در هکتار) گونه‌های چوبی در رویشگاه هیرکانی باغ گیاه‌شناسی ملی ایران در آماربرداری دوم (۱۴۰۴)



شکل ٤. سهم (درصد) پایه‌های چوبی در طبقه‌های مختلف ضریب قدکشیدگی در رویشگاه هیرکانی باغ گیاه‌شناسی ملی ایران در دو مقطع زمانی آماربرداری (۱۳۸۵ و ۱۴۰۴) حروف انگلیسی مشابه در هر طبقهٔ ضریب قدکشیدگی، بیانگر عدم اختلاف معنی‌داری آماری در سطح اطمینان ۹۵ درصد بین دو مقطع زمانی آماربرداری است.

در پژوهشی در یک تودهٔ طبیعی ون در بخش چلیر جنگل خیرودکنار نوشهر، با استفاده از آماربرداری صددرصد در سال‌های ۱۳۸۴ و ۱۳۹۱، مشخص شد که ضریب قدکشیدگی توده در طول دورهٔ هشت‌ساله کاهش یافته است [۱۶] که با نتایج پژوهش پیش‌رو هم‌راستا نیست. کاهش ضریب قدکشیدگی در پژوهش ذکرشده ناشی از بلوغ طبیعی توده و افزایش قطر نسبت به ارتفاع است که در جنگل‌های طبیعی امری بدیهی است. این تفاوت نشان می‌دهد که در باغ گیاه‌شناسی، عوامل دیگری نقش مهم‌تری در تحول ساختار توده ایفا می‌کنند. دلیل اصلی، تفاوت بنیادین در دینامیک تراکم توده و همین‌طور تنوع گونه‌ای و تنوع فرم‌های رویشی در رویشگاه هیرکانی باغ گیاه‌شناسی ملی ایران است. در جنگل‌های طبیعی به‌طور معمول با افزایش سن توده، تراکم کاهش می‌یابد [۱۶]، در حالی‌که در رویشگاه هیرکانی باغ گیاه‌شناسی ملی ایران، تراکم توده از ۹۹۰ پایه در هکتار در آماربرداری اول به ۱۶۹۳ پایه در هکتار در آماربرداری دوم افزایش یافته است. همان‌طور که اشاره شد، این افزایش تراکم قابل ملاحظه به‌دلیل ورود تعداد زیادی پایه‌های کم‌قطر به‌ویژه گونهٔ سیاه‌ال به تودهٔ اصلی است. تراکم زیاد منجر به رقابت شدید نوری بین پایه‌ها شده که خود باعث افزایش ضریب قدکشیدگی در آماربرداری دوم شده است. عوامل دیگری مانند تنک‌کردن و اقلیم نیز در این تفاوت دخیل هستند که نیاز به پژوهش‌های بیشتر و عمیق‌تر دارد. در پژوهش‌های دیگری نیز تراکم توده به‌عنوان مهم‌ترین عامل تأثیرگذار بر ضریب قدکشیدگی معرفی شده است [۱ و ۱۷] که با نتیجهٔ پژوهش پیش‌رو مطابقت دارد.

ازجمله سایر پژوهش‌های مشابه می‌توان به اندازه‌گیری میانگین ضریب قدکشیدگی در یک تودهٔ دست‌کاشت پلت (*Acer velutinum* Boiss.) در منطقهٔ پهنه‌کلا ساری اشاره کرد. میانگین ضریب قدکشیدگی در این پژوهش ۱۰۷ محاسبه شد [۱۸] که بیشتر از پژوهش پیش‌رو است. این تفاوت را می‌توان به ترکیب آمیخته و تنوع گونه‌ای بیشتر در رویشگاه هیرکانی باغ گیاه‌شناسی ملی ایران نسبت داد که منجر به پاسخ‌های متفاوت گونه‌ها به شرایط محیطی شده است. Skrzyszewski و Pach (۲۰۲۰) گزارش کرده‌اند که درختان با ضریب قدکشیدگی زیاد (لاغر) بسیار مستعد خسارت باد هستند، زیرا مرکز ثقل بالاتری داشته و سیستم ریشه‌ای ضعیف‌تری دارند. همچنین، تراکم توده و رقابت نوری به‌عنوان عوامل کلیدی در افزایش ضریب قدکشیدگی ذکر شدند. پژوهش یادشده بر آستانهٔ بحرانی ضریب قدکشیدگی برای پایداری مکانیکی تأکید دارد [۴]. در پژوهش پیش‌رو، هم سهم پایه‌هایی که در طبقهٔ ناپایدار قرار می‌گیرند و هم میانگین کلی ضریب قدکشیدگی توده، در آماربرداری دوم اندکی بیشتر از آماربرداری اول بود، بنابراین می‌توان گفت توده در منطقهٔ پرخطر قرار گرفته و نیاز به پایش و مدیریت هدفمند دارد.

۳-۴. مقایسهٔ ضریب قدکشیدگی گونه‌ها بین دو مقطع زمانی آماربرداری

تفاوت میانگین ضریب قدکشیدگی به‌تفکیک گونه بین دو مقطع زمانی آماربرداری در جدول ۱ ارائه شده است. همان‌طور که

مشاهده می‌شود گونه‌ها رفتارهای کاملاً متفاوتی در تغییر ضریب قدکشیدگی داشته‌اند. در دو گونهٔ اوجا و توت، افزایش معنی‌داری در ضریب قدکشیدگی مشاهده می‌شود که در سطح اطمینان ۹۹ درصد معنی‌دار است، در حالی‌که در دو گونهٔ داغداغان (*Celtis australis* L.) و ارغوان (*Cercis siliquastrum* L.) نیز این افزایش مشاهده می‌شود، اما اختلاف در سطح اطمینان ۹۵ درصد معنی‌دار است. در نقطه مقابل، میانگین ضریب قدکشیدگی چهار گونهٔ خرمندی (*Diospyrus lotus* L.)، ون، پلت و انجیلی (*Parrotia persica* (DC.) C.A.Mey.) در آماربرداری دوم به‌طور معنی‌داری کمتر از آماربرداری اول بود. مقدار کاهش برای سه گونهٔ اول در سطح اطمینان ۹۹ درصد و برای گونهٔ انجیلی در سطح اطمینان ۹۵ درصد معنی‌دار بود. میانگین ضریب قدکشیدگی سایر گونه‌ها بین دو مقطع زمانی اختلاف آماری معنی‌داری نداشت. البته، داده‌های گونه‌های پلاخور، گردو، شب‌خسب، اشنگور، جل، هلو و سفیدپلت برای مقایسهٔ آماری ناکافی بود.

جدول ۱. مقایسهٔ ضریب قدکشیدگی گونه‌های چوبی رویشگاه هیرکانی باغ گیاه‌شناسی ملی ایران بین دو مقطع زمانی آماربرداری (۱۳۸۵ و ۱۴۰۴)

گونه	اندازه تغییر ضریب قدکشیدگی بین دو مقطع زمانی آماربرداری	سطح معنی‌داری
توت	+۲۶/۴۷	<۰/۰۰۱
اوجا	+۲۲/۹۷	<۰/۰۰۱
داغداغان	+۲۱/۱۴	۰/۰۰۳
ارغوان	+۲۸/۰۳	۰/۰۲۴
افرای زینتی	+۱۵/۷۴	۰/۳۰۹
ممرز	+۱۰/۲۸	۰/۱۳۹
سیاه‌ال	+۲/۶۰	۰/۵۶۹
لیلکی	+۱۲	۰/۱۴
تبریزی	+۳۷/۱۹	۰/۲۱۴
انار وحشی	+۰/۷۷	۰/۸۲۷
بلندمازو	+۲/۶۵	۰/۶۸۱
اقاقیا	+۳۱/۶۳	۰/۲۹۵
بید	+۲۶/۲۶	۰/۲۳۷
ملج	+۰/۴۳	۰/۹۳۶
خرمندی	-۳۴/۳۷	<۰/۰۰۱
ون	-۲۸/۰۷	<۰/۰۰۱
انجیلی	-۱۸/۵۴	۰/۰۵
پلت	-۱۶/۴۷	۰/۰۰۶
شیردار	-۳/۴۵	۰/۷۹۳
توسکای ییلاقی	-۱۵/۰۲	۰/۳۹۱
شمشاد	-۱۹/۳۷	۰/۲۹
گیلاس وحشی	-۳۰/۸۰	۰/۳۸۹
زربین	-۱۸/۱۰	۰/۳۲
انجیر	-۱۷/۰۸	۰/۴۲۸
آلوچه جنگلی	-۵/۲۵	۰/۸۶۲
نمدار	-۷/۸۵	۰/۳۰۶
آزاد	-۲۰/۸۲	۰/۱۱۷

علامت‌های مثبت و منفی در ستون وسط به‌ترتیب به‌معنای بیشتر و کمتر بودن مقدار ضریب قدکشیدگی در آماربرداری دوم نسبت به آماربرداری اول است.

ویژگی «تفاوت در پاسخ گونه‌ها» در پژوهش‌های مشابه دیگری نیز گزارش شده است. به‌عنوان نمونه، در بررسی ضریب قدکشیدگی تودهٔ آمیخته راش در منطقهٔ حاجی‌کلا تیرانکلی ساری [۱۰]، رفتار گونه‌های همراه راش کاملاً متفاوت از گونهٔ اصلی بود. همچنین، در مطالعهٔ پایداری گونه‌ها در جنگل ارسباران با استفاده از ضریب قدکشیدگی [۱۲]، مشخص شد که گونه‌های مختلف در برابر عوامل محیطی و رقابت، پاسخ‌های متفاوتی از خود نشان می‌دهند که به تفاوت در سرشت گونه (نورپسند یا

سایه‌پسند) و استراتژی رشد آنها مربوط می‌شود. در پژوهش‌های دیگری درمورد چهار گونهٔ *Pinus ponderosa* Dougl.، *P. contorta* Loud. var. *latifolia*، *Larix occidentalis* Nutt. و *Pseudotsuga menziesii* (Mirbl.) Franco. var. *glauca* در کوهستان‌های راکی آمریکا [۱۹] و گونه‌های نراد (*Abies alba* Mill.)، نوئل، راش اروپایی (*F. sylvatica* L.)، افرای شبه‌چناری (*Acer pseudoplatanus* L.)، بارانک (*Sorbus aucuparia* L.) و ممرز در دو پارک جنگلی در جنوب لهستان [۲۰] نیز تفاوت بین ضریب قدکشیدگی گونه‌های موجود در یک رویشگاه مشترک تأیید شد. لازم به‌ذکر است که Díaz-Yáñez و همکاران (۲۰۱۹) با مروری جامع بر ۳۱۳ مدل پیش‌بینی خسارت باد در جنگل‌های مختلف نتیجه گرفتند که ارتفاع غالب توده، قطر متوسط و تراکم مهم‌ترین متغیرهای پیش‌بینی‌کننده خسارت باد هستند، در حالی‌که ضریب قدکشیدگی سهم محدودی (کمتر از ۱۰ درصد) در توضیح احتمال خسارت دارد. پژوهشگران استدلال کردند که ضریب قدکشیدگی اطلاعات پایداری را در سطح درخت فراهم می‌کند نه در سطح توده، که ممکن است دلیل تأثیر محدود آن در مدل‌ها باشد [۲۱]. این موضوع نشان می‌دهد که برای درک کامل پویایی ساختار توده، باید عوامل دیگری مانند ترکیب گونه‌ای، شرایط خردزیستگاه و مدیریت نیز درنظر گرفته شوند. در پژوهش حاضر نیز اگرچه ضریب قدکشیدگی در سطح کل توده تغییر معنی‌داری بین دو مقطع زمانی آماربرداری نشان نداد، اما عامل تراکم به‌عنوان محرک اصلی افزایش ضریب قدکشیدگی در بسیاری از گونه‌ها شناسایی شد. این موضوع با تأکید پژوهشگران فوق بر اهمیت تراکم به‌عنوان متغیر پیش‌بینی‌کننده همخوانی کامل دارد. با این‌حال، در پژوهش پیش‌رو، ضریب قدکشیدگی در سطح گونه (مانند اوجا، توت، خرمندی، ون) تغییرات معنی‌داری نشان داد. این بدان معناست که در شرایط خاص (مانند یک کلکسیون خارج از رویشگاه با تراکم زیاد)، ضریب قدکشیدگی در سطح گونه یا تک‌درخت همچنان می‌تواند ابزار تشخیصی ارزشمندی باشد، هرچند در سطح کل توده قدرت پیش‌بینی‌کنندگی محدودی دارد. این یافته دقیقاً تأییدکننده استدلال پژوهشگران فوق درباره محدودیت مقیاس ضریب قدکشیدگی (ارزش این ضریب بیشتر در سطح فرد یا گونه است، نه در پیش‌بینی احتمال خسارت در سطح کل توده) است.

۴. نتیجه‌گیری

پایش مستمر و دوره‌ای رویشگاه هیرکانی باغ گیاه‌شناسی ملی ایران، به‌عنوان یکی از مهم‌ترین کلکسیون‌های خارج از رویشگاهی گونه‌های چوبی جنگل‌های هیرکانی، نه‌تنها برای ارزیابی پایداری توده ضروری است، بلکه به‌عنوان ابزاری راهبردی برای حفاظت ژنتیکی و مدیریت پایدار این ذخایر ارزشمند به‌شمار می‌رود. این رویشگاه با در اختیار داشتن مجموعه‌ای متنوع از گونه‌های بومی هیرکانی در کنار یکدیگر، فرصتی کم‌نظیر برای مطالعهٔ پاسخ‌های گونه‌ای به تغییرات تراکم، رقابت نوری و شرایط محیطی فراهم می‌آورد. درکل، رویشگاه هیرکانی در حال تجربهٔ یک دوگانگی ساختاری است که با پایش ضریب قدکشیدگی، این دوگانگی ساختاری پنهان در توده آشکار شد. برخی گونه‌های اصلی توده مانند اوجا و توت با افزایش سن و بلوغ، لاغرتر شده که آنها را در معرض خطر شکستن و مخاطرات طبیعی مانند شکستگی تنه قرار می‌دهد. در مقابل، ضریب قدکشیدگی گونه‌هایی مانند خرمندی و ون کاهش پیدا کرده، بدین‌مفهوم که پایداری مکانیکی آنها بیشتر شده است. جهت و شدت تغییرات ضریب قدکشیدگی به‌شدت به مرحلهٔ رویشی توده، دینامیک تراکم و مداخلات مدیریتی وابسته است. بنابراین، تداوم پایش دوره‌ای این رویشگاه، ثبت داده‌های دقیق در سطح گونه و تک‌درخت و به‌کارگیری شاخص‌های مکمل در سطح توده، برای پیش‌بینی خطرات آینده و اتخاذ تصمیمات مدیریتی مبتنی بر شواهد، امری اجتناب‌ناپذیر است. بدون چنین پایشی، ممکن است تغییرات تدریجی اما خطرناک در ساختار توده، مانند افزایش بیش‌ازحد ضریب قدکشیدگی در گونه‌های خاص، تا مرحله بروز خسارت گسترده ناشناخته باقی بماند. درمجموع، داده‌های این پژوهش نشان می‌دهد که ۱) باید تفاوت‌های پاسخ گونه‌ها را جدی گرفت (بهبود وضعیت خرمندی و ون درمقابل خطر بالقوه برای اوجا و توت)؛ ۲) تنظیم تراکم را به‌عنوان ابزار اصلی مدیریتی برای کاهش رقابت نوری و جلوگیری از افزایش بیش‌ازحد ضریب قدکشیدگی درنظر گرفت و ۳) در ارزیابی پایداری توده دربرابر خطر باد، از متغیرهای مؤثرتر در سطح توده مانند ارتفاع غالب، قطر متوسط و تراکم استفاده کرد و ضریب قدکشیدگی را بیشتر به‌عنوان شاخص مکمل در سطح گونه به‌کار برد. همچنین، پیشنهاد می‌شود برای تکمیل پژوهش حاضر در آینده به موضوعاتی مانند تحلیل اثر عواملی مانند خردزیستگاه، خاک و اقلیم بر رویشگاه

هیرکانی و پویایی تجدیدحیات نیز پرداخته شود.

ملاحظات اخلاقی

پیروی از اصول اخلاق پژوهش

نویسندگان اصول اخلاقی را در انجام و انتشار این پژوهش علمی رعایت کرده و این موضوع مورد تأیید همهٔ آنها است.

تعارض منافع

بنابر اظهار نویسندگان این مقاله تعارض منافع ندارد.

حمایت مالی

این پژوهش با استفاده از اعتبارات بنیاد ملی علم ایران (کد طرح: ۴۰۴۷۳۵۹) انجام شده است.

مشارکت نویسندگان

نویسندهٔ اول: مجری پروژه، طراحی پژوهش، نظارت بر مراحل انجام پژوهش، تجزیه و تحلیل داده‌ها، نگارش، اصلاح و نهایی‌سازی مقاله

نویسندهٔ دوم: همکار پروژه، انجام محاسبات آماری، تحلیل و تفسیر اطلاعات و نتایج

نویسندهٔ سوم: همکار پروژه، همکاری در برداشت‌های میدانی

بیانیه دسترسی به داده‌ها

داده‌های پژوهش حاضر از طریق درخواست از نویسندگان قابل دسترسی است.

سپاسگزاری

از مؤسسهٔ تحقیقات جنگل‌ها و مراتع کشور به‌خاطر حمایت مالی، حمایت معنوی و در اختیار قرار دادن امکانات و تجهیزات لازم برای اجرای پژوهش سپاسگزاری می‌شود.

References

[1] Watt, M.S. & Moore, J.R. (2023). Modeling spatial variation in radiata pine slenderness (height/diameter ratio) and vulnerability to wind damage under current and future climate in New Zealand. *Frontiers in Forests and Global Change*, 6, 1188094. https://doi.org/10.3389/ffgc.2023.1188094

[2] Bošeľa, M., Konôpka, B., Šebeň, V., Vladovič, J. & Tobin, B. (2014). Modelling height to diameter ratio – an opportunity to increase Norway spruce stand stability in the Western Carpathians. *Central European Forestry Journal*, 60(2), 71-80. https://doi.org/10.2478/forj-2014-0008

[3] Burschel, P. & Huss, J. (1997). *Grundriss des Waldbaus.* Parey Publication, Berlin.

[4] Skrzyszewski, J. & Pach, M. (2020). The use of the slenderness coefficient in diagnosing wind damage risks. *Acta Silvestria*, LVII: 7-24. https://doi.org/10.15576/actasilvestria/2020.lvii.7

[5] Bošeľa, M., Konôpka, B., Šebeň, V., Vladovič, J. & Tobin, B. (2016). Modelling individual tree height to diameter ratio for Norway spruce and European beech in Czech Republic. *Trees - Structure and Function*, 30(6), 1969-1982. https://doi.org/10.1007/s00468-016-1424-3

[6] Panahi, P., Jamzad, Z., Jalili, A., Sagheb Talebi, K. & Pourhashemi, M. (2021). The role of the National Botanical Garden of Iran in *ex situ* conservation of *Buxus hyrcana* Pojark.; An endangered species. *Urban Forestry & Urban Greening*, 57, 126951. https://doi.org/10.1016/j.ufug.2020.126951

[7] Panahi, P., Jamzad, Z., Pourhashemi, M., Hosseininejad, M. & Ehsani, M. (2008). *Quantitative and qualitative study of the Hyrcanian section of the National Botanical Garden of Iran for its optimum management*. Final Report of Research Project, Research Institute of Forests and Rangelands, 81p.[In Persian]

[8] Mirabdollahi, M., Bonyad, A.E., Torkaman, J. & Bakhshandeh, B. (2011). Study on tree form of Oriental Beech (*Fagus orientalis* Lipsky) in different growth stages (Case study: Lomir forest). *Iranian Journal of Forest,* 3(3), 177-187. [In Persian]

[9] Mohajer, N. & Mirkazemi, S.Z. (2012). Investigation on qualitative and quantitative characteristics and succession of oriental beech natural stands in Vatan forest (Golestan Province). *Journal of Wood and Forest Science and Technology*, 19(2), 43-58. (In Persian) https://doi.org/20.1001.1.23222077.1391.19.2.3.6

[10] Bozorgi, K. & Sheykholeslami, A. (2016). Survey slenderness coefficient of beech mixed trees in Hajikola Tirankoli area- Sari. *Journal of Renewable Natural Resources Research*, 7(1), 1-9. [In Persian]

[11] Charkazi, A., Amiri, M., Ravanbakhsh, H. & Moghadasi, D. (2022). A comparison of the stability of Italian cypress (*Cupressus sempervirens* var. *horizontalis*) and Brutia Pine (*Pinus brutia* Ten) plantations in Ramian, Golestan Province of Iran. *Journal of Environmental Sciences and Technology*, 23(11): 247-258. (In Persian) https://doi.org/10.30495/jest.2018.21819.3087

[12] Abedi R. & Ostad Hashemi R. (2023). The stability of trees species in terms of height-diameter ratio and the relationship of stand quantitative characteristics in natural forest stands (Case study: Arasbaran Forest). *Ecology of Iranian Forests*, 11(22), 48-61. (In Persian) https://doi.org/10.61186/ifej.11.22.44

[13] Đodan, M. & Perić, S. (2019). Windthrow resistance of Norway spruce (*Picea abies* /L./ Karst.) forest cultures - preliminary results. *South-East European Forestry*, 10(1), 77-88. https://doi.org/10.15177/ seefor.19-09

[14] Tian, D., Jiang, L. & Wang, S. (2023). The influence of climate, soil physicochemical properties and tree size inequality on tree slenderness in mixed forests of Northeastern China. *Forest Ecology and Management*, 529, 120719. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2022.120719

[15] Cysneiros, V.C., Souza, E.L., Pinho, L.C., Vuolo, A.F. & Pereira, I.R.S. (2025). Tree slenderness and stability of Brazilian pine in a secondary forest. *Floresta e Ambiente*, 32(3), e20240040. https://doi.org/10.1590/2179-8087-FLORAM-2024-0040

[16] Sasanifar, S., Namiranian, M. & Zargham, N. (2015). Evaluation of variation trend in qualitative measures in natural even-aged stand in Kheyroud Forest. *Journal of Forest and Wood Products (Iranian Journal of Natural Resources),* 68(3), 655-665. https://doi.org/10.22059/jfwp.2015.55596 [In Persian]

[17] Sharma, R.P., Vacek, Z., Vacek, S. & Kučera, M. (2019). Modelling individual tree height–diameter relationships for multi-layered and multi-species forests in central Europe. *Trees - Structure and Function*, 33(1), 103-119. https://doi.org/10.1007/s00468-018-1762-4

[18] Vatani, L., Rafiei, A.A. & Shamsi, S.S. (2021). Determination of the slenderness ratio of *Acer velutinum* plantation for tending operations (Pahneh-Kola Forestry Plan – Sari County). *Sustainable Management of Hyrcanian Forests*, 3(1), 45-50

[19] Wonn, H.T. & O'Hara, K.L. (2001). Height:diameter ratios and stability relationships for four Northern Rocky Mountain tree species. *Western Journal of Applied Forestry*, 16(2), 87-94. https://doi.org/10.1093/wjaf/16.2.87

[20] Cacciatori, C., Gazda, A., Bodziarczyk, J., Foremnik, K., Madalcho, A.B., Maciejewski, Z., Pielech, R., Tomski, A., Zięba, A., Zwijacz-Kozica, T. & Szwagrzyk, J. (2025). Deer browsing increases stem slenderness and crown irregularity and modifies the effects of light gradients on architecture of forest tree saplings. *Ecology and Evolution*, 15, e70837. https://doi.org/10.1002/ece3.70837

[21] Díaz-Yáñez, O., Mola-Yudego, B. & González-Olabarria, J.R. (2019). Modelling damage occurrence by snow and wind in forest ecosystem. *Ecological Modelling*, 408, 108741. https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2019.108741