

Research Paper

The Effects of Changes in the Forest Structure's Quantitative Traits on the Leaf Area Index in Hyrcanian Forests, Golestan Province

Seyedeh Zahra Seyed Mousavi¹, Jahangir Mohammadi², Roshanak Darvishzadeh³,
Shaban Shataee Jouibary⁴, Ramin Rahmani⁵, and Khalil Ghorbani⁶

- 1- Ph.D. Student, Department of Forest Management, Faculty of Forest Science, Gorgan University of Agricultural Sciences & Natural Resources, Gorgan, Iran, (Corresponding author: mousavizahra242@yahoo.com)
- 2- Associate Professor, Department of Forest Management, Faculty of Forest Science, Gorgan University of Agricultural Sciences & Natural Resources, Gorgan, Iran
- 3- Professor, Department of Geo-Information Science and Earth Observation (ITC), University of Twente, Netherlands
- 4- Professor, Department of Forest Management, Faculty of Forest Science, Gorgan University of Agricultural Sciences & Natural Resources, Gorgan, Iran
- 5- Associate Professor, Department of Silviculture and Forest Ecology, Faculty of Forest Science, Gorgan University of Agricultural Sciences & Natural Resources, Gorgan, Iran
- 6- Associate Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Water and Soil Engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences & Natural Resources, Gorgan, Iran

Received: 17 April, 2024

Accepted: 25 June, 2024

Extended Abstract

Background: The leaf area index (LAI) is one of the structural indices of forests and a key variable in the state of forest ecosystems. This index is one of the major structural indices of forests that plays an important role in the processes of evaporation and transpiration and in monitoring the growth of trees. The role of LAI is very important in the changes in the structural quantitative characteristics of forest stands. There is a general relationship between the LAI and the quantitative characteristics of the mass. The leaf area of each tree can be estimated using allometric equations of quantitative characteristics. This research focuses on the effects of changes in the quantitative characteristics, such as tree density (n.ha^{-1}), basal area ($\text{m}^2.\text{ha}^{-1}$), volume ($\text{m}^3.\text{ha}^{-1}$), mean height (m), mean diameter at breast height (DBH, cm), crown area ($\text{m}^2.\text{ha}^{-1}$), and crown volume ($\text{m}^3.\text{ha}^{-1}$) on the LAI and preparation of their allometric equations in the broadleaf forests of Golestan province.

Methods: To collect ground information on LAI, 227 circular sample plots with an area of 1000 m^2 with a systematic sampling method and a 100×100 m grid were dismantled in five habitats from west to east (Kordkoy, Shasat Kalathe, Zarrin, Gol, Sorkhdari, and Loveh). In the center of each sample plot, the LAI was measured using a leaf harvesting trap with dimensions of 60×60 cm. The geographic center of each sample was recorded using a Differential Global Positioning System device. The species type, breast diameter greater than 12.5 cm, the height of trees, large diameter, and small crown diameter are measured, then as tree density (n.ha^{-1}), basal area ($\text{m}^2.\text{ha}^{-1}$), volume ($\text{m}^3.\text{ha}^{-1}$), mean height (m), mean DBH (cm), crown area ($\text{m}^2.\text{ha}^{-1}$), and crown volume ($\text{m}^3.\text{ha}^{-1}$) located in each sample plot were calculated in each plot. To calculate the LAI, it is first necessary to measure the specific leaf area of all species in the study area. To calculate the LAI, 20 trees were separated from each tree in each habitat and five leaf samples were separated from each tree in four geographical directions. In total, more than 15,000 leaf samples were analyzed and scanned in five habitats. The area of each leaf was measured using ImageJ software. The wet and dry weight and surface area were measured simultaneously using a digital scale with an accuracy of 0.01 and then scanned with a high-resolution scanner. After scanning, the leaves were dried in an oven at 72 °C for 48 hours to obtain their dry weights. Non-linear rational function, Gaussian, hyperbolic, heat capacity, and exponential models were used to investigate the relationship between LAI and the structural characteristics of the stand.

Results: The results of the analysis of descriptive statistics showed that the minimum, maximum, average, and standard deviation of the LAI were calculated for 227 samples (1.86, 13.45, 6.33, and 2.33), respectively. The results of the analysis of descriptive statistics also showed that the mean and standard deviation for the characteristics of volume ($\text{m}^3.\text{ha}^{-1}$), tree density (n.ha^{-1}), basal area ($\text{m}^2.\text{ha}^{-1}$), crown area ($\text{m}^2.\text{ha}^{-1}$), crown volume ($\text{m}^3.\text{ha}^{-1}$), mean height (m), and mean DBH (cm) were respectively (96.96 298 and 18.205), (24.05 and 12.82), (24.05 and 12.82), (51.148 and 54.155), (2.781 and 05.95), (41.36 and 9.97), and (25.81 and 4.93). The

results of the relationships between the LAI and the quantitative characteristics of the volume ($\text{m}^3.\text{ha}^{-1}$), tree density ($\text{n}.\text{ha}^{-1}$), basal area ($\text{m}^2.\text{ha}^{-1}$), crown area ($\text{m}^2.\text{ha}^{-1}$), crown volume ($\text{m}^3.\text{ha}^{-1}$), mean height (m), and mean DBH (cm) of the coefficients of determination showed (36-0.96) $R^2 = 0.00$ with a mean square error of $\text{MSE} = 0.48\text{-}2.06$. Among the investigated quantitative traits, the average height, crown volume per hectare, and volume per hectare gained the highest R^2 values (0.36-0.96) and the MSE (0.48-2.06) with Gaussian, Richard, and heat capacity allometric models, and the tree density trait ($\text{n}.\text{ha}^{-1}$). The lowest R^2 (0.36) and MSE (2.06) in the study of LAI were obtained with the Gaussian model. The results also showed large changes in the LAI for the crown volume trait up to 400 ($\text{m}^3.\text{ha}^{-1}$), followed by a uniform trend. For the average height of up to 40 (m), many changes were found in the LAI. For the volume trait ($\text{m}^3.\text{ha}^{-1}$), the LAI increased up to 800 ($\text{m}^3.\text{ha}^{-1}$) and then showed a uniform and even downward trend until 1200 ($\text{m}^3.\text{ha}^{-1}$).

Conclusion: The results of this research demonstrate that the three quantitative traits, viz. crown volume ($\text{m}^3.\text{ha}^{-1}$), mean height, and volume ($\text{m}^3.\text{ha}^{-1}$), have the greatest effect on the changes in the LAI. Thus, these three traits can better explain the LAI. The LAI can be estimated using the three crown volume ($\text{m}^3.\text{ha}^{-1}$), mean height, and volume ($\text{m}^3.\text{ha}^{-1}$) traits. Based on these three traits, the LAI can be explained on a large scale, and the estimated results can be used in climate models and the development of appropriate climate change policies.

Keywords: Gaussian, Golestan Province, Heat Capacity, Leaf Area Index, Mean Height, Volume ($\text{m}^3.\text{ha}^{-1}$)

How to Cite This Article: Seyed Mousavi, S. Z., Mohammadi, J., Darvishzadeh, R., Shataee Jouibary, Sh., Rahmani, R & Ghorbani, Kh. (2024). The Effects of Changes in the Forest Structure's Quantitative Traits on the Leaf Area Index in Hyrcanian Forests, Golestan Province. *Ecol Iran For*, 12(2), 59-72.
DOI: [10.61186/ifei.12.2.59](https://doi.org/10.61186/ifei.12.2.59)



مقاله پژوهشی

اثر تغییرات مشخصه‌های کمی ساختار توده‌های جنگلی بر روی شاخص سطح برگ در جنگل‌های هیرکانی، استان گلستان

سیده زهرا سید موسوی^۱، جهانگیر محمدی^۲، روشنگر درویش‌زاده^۳، شعبان شتایی جویباری^۴، رامین رحمانی^۵ و خلیل قربانی^۶

۱- دانشجوی دکتری، گروه مدیریت جنگل، دانشکده علوم جنگل، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران، (نویسنده مسوول: mousavizahra242@yahoo.com)

۲- دانشیار، گروه مدیریت جنگل، دانشکده علوم جنگل، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران

۳- استاد، گروه علوم اطلاعات جغرافیایی و رصد زمین (ITC)، دانشگاه تونته، هلند

۴- استاد، گروه مدیریت جنگل، دانشکده علوم جنگل، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران

۵- دانشیار، گروه جنگل‌شناسی و اکولوژی جنگل، دانشکده علوم جنگل، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران

۶- دانشیار، گروه مهندسی آب، دانشکده مهندسی آب و خاک، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۴/۰۵

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱/۲۹

صفحه: ۵۹ تا ۷۲

چکیده مبسوط

مقدمه و هدف: شاخص سطح برگ در بین شاخص‌های ساختاری توده، به‌عنوان یک متغیر کلیدی در وضعیت اکوسیستم‌های جنگلی می‌باشد این شاخص از مهم‌ترین شاخص‌های ساختاری جنگل است که در فرایندهای تبخیر و تعرق و پایش رشد درختان نقش مهمی دارد. نقش شاخص سطح برگ در بررسی تغییرات مشخصه‌های کمی ساختار توده‌های جنگلی بسیار مهم است. ارتباط کلی بین شاخص سطح برگ با مشخصه‌های کمی توده وجود دارد. سطح برگ هر درخت می‌تواند با استفاده از معادلات آلومتریک مشخصه‌های کمی برآورد شود. این پژوهش اثر تغییرات مشخصه‌های کمی حجم در هکتار، تعداد در هکتار، رویه زمینی در هکتار، مساحت تاج در هکتار، حجم تاج در هکتار و میانگین قطر و ارتفاع بر شاخص سطح برگ و تهیه معادلات آلومتریک آن‌ها در جنگل‌های پهن‌برگ استان گلستان را مورد ارزیابی قرار می‌دهد.

مواد و روش‌ها: در این مطالعه جهت برداشت اطلاعات زمینی شاخص سطح برگ ۲۲۷ قطعه‌نمونه دایره‌ای شکل به مساحت ۱۰۰۰ مترمربع به روش نمونه‌برداری سیستماتیک و شبکه ۱۰×۱۰ متر در پنج رویشگاه از غرب به شرق (کردکوی، شصت کلاته، زرین گل، سرخداری و لوه) پیاده شد. در مرکز هر قطعه‌نمونه تله برداشت برگ با ابعاد ۶۰×۶۰ سانتی‌متر برای اندازه‌گیری شاخص سطح برگ استفاده شد. مرکز جغرافیایی هر قطعه‌نمونه با استفاده از دستگاه سیستم موقعیت‌یاب جهانی تفاضلی ثبت شد. در هر قطعه‌نمونه نوع گونه، قطر برابرسینه بیشتر از ۱۲/۵ سانتی‌متر، ارتفاع درختان، قطر بزرگ و قطر کوچک تاج اندازه‌گیری شد سپس حجم در هکتار، تعداد در هکتار، رویه زمینی در هکتار، مساحت تاج در هکتار، حجم تاج در هکتار و میانگین قطر و ارتفاع واقع در هر قطعه‌نمونه محاسبه شد. برای محاسبه شاخص سطح برگ ابتدا لازم است سطح ویژه برگ تمامی گونه‌ها در منطقه مورد مطالعه اندازه‌گیری شود. برای محاسبه شاخص سطح برگ نیز از هرگونه‌ای درختی در هر رویشگاه ۲۰ درخت و از هر درخت پنج نمونه برگ در چهار جهت جغرافیایی جدا شد. در پنج رویشگاه در مجموع بیش از ۱۵۰۰۰ نمونه برگ آنالیز و اسکن شد. مساحت هر برگ با استفاده از نرم‌افزار ImageJ اندازه‌گیری شد. وزن تر و خشک و مساحت سطح به‌طور هم‌زمان با استفاده از ترازوی دیجیتال با دقت ۰/۰۱ اندازه‌گیری و سپس با اسکنر یا وضوح بالا اسکن شد. برگ‌ها پس از اسکن در دمای ۷۲ درجه سانتی‌گراد به‌مدت ۴۸ ساعت در آون خشک شدند و وزن خشک آن‌ها توزین شدند. جهت بررسی روابط بین شاخص سطح برگ و مشخصه‌های ساختاری توده از مدل‌های غیرخطی رشنال فانکشن، گوسین، هایپر بولیک، هیت کاپاسیتی و نمایی استفاده شد.

یافته‌ها: نتایج آنالیز آماره‌های توصیفی نشان داد که میزان حداقل، حداکثر، میانگین و انحراف معیار شاخص سطح برگ برای ۲۲۷ قطعه‌نمونه به‌ترتیب (۱/۸۶، ۱۲/۴۵، ۶/۳۳ و ۲/۳۳) محاسبه شد. نتایج آنالیز آماره‌های توصیفی همچنین نشان داد که میانگین و انحراف معیار برای مشخصه‌های حجم در هکتار، تعداد در هکتار، رویه زمینی در هکتار، مساحت تاج در هکتار، حجم تاج در هکتار و میانگین قطر و ارتفاع نیز به‌ترتیب (۲۹۸/۹۶ و ۲۰۵/۱۸)، (۲۴/۰۵ و ۱۲/۸۲)، (۱۴۸/۵۱ و ۱۵۵/۵۴)، (۷۸۱/۲ و ۹۵/۰۵)، (۳۶/۴۱ و ۹/۹۷) و (۲۵/۸۱ و ۴/۹۳) محاسبه شد. نتایج بررسی روابط بین شاخص سطح برگ با مشخصه‌های کمی حجم در هکتار، تعداد در هکتار، رویه زمینی در هکتار، مساحت تاج در هکتار، حجم تاج در هکتار و میانگین قطر و ارتفاع میزان ضرایب تبیین را بین (۰/۹۶ - ۰/۳۶) و $R^2 = ۰/۳۶ - ۰/۹۶$ و میزان میانگین مربعات خطا را بین (۲/۰۶ - ۰/۴۸) $MSE = ۰/۴۸ - ۲/۰۶$ نشان داد. نتایج همچنین نشان داد که در بین مشخصه‌های کمی بررسی شده، مشخصه‌های کمی میانگین ارتفاع، حجم تاج در هکتار و حجم در هکتار بیشترین ضریب تبیین ($R^2 = ۰/۹۶ - ۰/۹$) و میانگین مربعات خطا ($MSE = ۰/۴۸ - ۰/۵۶$) محاسبه شد. با مدل‌های آلومتریک گوسین، ریچارد و هیت کاپاسیتی و مشخصه تعداد در هکتار با مدل آلومتریک گوسین کمترین میزان ضریب تبیین ($R^2 = ۰/۳۶$) و میانگین مربعات خطا ($MSE = ۲/۰۶$) را در بررسی با شاخص سطح برگ داشتند. نتایج همچنین نشان داد که برای مشخصه‌های حجم تاج در هکتار تا ۴۰۰ متر مکعب سیر تغییرات شاخص سطح برگ زیاد و سپس بعد از آن سیر یکنواختی دارد. برای مشخصه میانگین ارتفاع تا ۴۰ متر سیر تغییرات شاخص سطح برگ زیاد می‌باشد. برای مشخصه حجم در هکتار نیز تا ۸۰۰ متر مکعب شاخص سطح برگ با سیر صعودی افزایش می‌یابد و سپس بعد از آن تا ۱۲۰۰ متر مکعب سیر یکنواخت و حتی نزولی دارد.

نتیجه‌گیری: نتایج حاصل از این تحقیق نشان داده شد که سه مشخصه کمی حجم تاج در هکتار، میانگین ارتفاع و حجم در هکتار بیشترین تأثیر را بر روی تغییرات شاخص سطح برگ دارند و این سه مشخصه بهتر می‌توانند شاخص سطح برگ را تبیین کنند. با استفاده از این سه مشخصه حجم تاج در هکتار، میانگین ارتفاع و حجم در هکتار می‌توان شاخص سطح برگ را برآورد نمود. نتایج همچنین نشان داد که بر اساس مشخصه‌های مشخصه حجم تاج در هکتار، میانگین ارتفاع و حجم در هکتار می‌توان شاخص سطح برگ را در مقیاس وسیع تبیین کرد و نتایج برآوردی را می‌توان در مدل‌های اقلیمی و تدوین سیاست‌های مناسب تغییرات اقلیمی مورد بررسی قرار داد.

واژه‌های کلیدی: استان گلستان، حجم در هکتار، ریچارد، شاخص سطح برگ، گوسین، میانگین ارتفاع

مقدمه

اقلیمی، گرمایش جهانی و حفاظت خاک دارند. یکی از مهم‌ترین اکوسیستم‌های جنگلی، جنگل‌های هیرکانی است که نقش قابل‌توجهی در کاهش گرمایش جهانی و اثرات منفی

جنگل‌ها حدود یک سوم سطح خشکی‌های کره زمین را تشکیل می‌دهند و نقش مهمی در تنظیم آب و هوا، تغییرات

تبیین کرد. این شاخص برآورد شده می‌تواند در مباحث تغییرات اقلیمی و تهیه مدل‌های اقلیمی در مقیاس‌های منطقه‌ای و جهانی مورد استفاده قرار بگیرد.

در زمینه بررسی شاخص سطح برگ با مشخصه‌های کمی ساختاری توده در ایران می‌توان به مطالعات (Pourhashemi et al., 2012؛ Babaei Kafaki et al., 2009) اشاره نمود. پورهاشمی و همکاران (Pourhashemi et al., 2012) به بررسی سطح برگ با روابط آلومتریک قطر و ارتفاع و سطح تاج درختان داغداغان در جنگل شهری تایلند پرداختند. نتایج نشان داد که قطر برابر سینه تاثیرگذارترین مشخصه کمی در ارتباط با شاخص سطح برگ درختان داغداغان بود. میزان ضریب تبیین برای این متغیر ۰/۷۲ محاسبه شد. بابایی کفاکی و همکاران (Babaei Kafaki et al., 2009) به بررسی شاخص سطح برگ و زی‌توده گونه *Quercus macranthera* در خلخال اردبیل با شرایط فیزیوگرافیک خاک پرداختند. نتایج نشان داد که مشخصه‌های قطر و ارتفاع بیشترین همبستگی را با شاخص سطح برگ دارند. میزان ضریب تبیین برای مشخصه‌های کمی قطر برابر سینه و ارتفاع به ترتیب ۰/۲۸ و ۰/۲۵ محاسبه شد.

در خارج از کشور نیز می‌توان به مطالعات (Zhai et al., 2023؛ Tian et al., 2021؛ Chaturvedi et al., 2017؛ McDowell et al., 2010؛ Vyas et al., 2001؛ Pape et al., 2001؛ Kenefic et al., 1999؛ Tobin et al., 2006؛ Pretzsch & Turner et al., 1999؛ Arias et al., 2007؛ Mette, 2008؛ Li et al., 2005) اشاره نمود. ژای و همکاران (Zhai et al., 2023) به بررسی شاخص سطح برگ موثر بر اساس داده‌های LiDAR در جنگل‌های شمال شرقی چین پرداختند. نتایج نشان می‌دهد که دقت پارامترهای ساختار جنگل مانند تاج پوشش داخلی یا بسته بودن تاج پوشش به‌طور قابل توجهی با شاخص سطح برگ اندازه‌گیری شده ($p < 0/01$) همبستگی داشتند و این همبستگی بین انواع مختلف جنگل معنادار بود. تیان و همکاران (Tian et al., 2021) به بررسی شاخص سطح برگ با متغیرهای مربوط به ارتفاع و تاج پوشش درخت پرداختند. نتایج نشان داد که مشخصه ارتفاع نسبت به تاج پوشش در بررسی شاخص سطح برگ از اهمیت بیشتری برخوردار است. چاتورودی و همکاران (Chaturvedi et al., 2017) به بررسی مدل‌های آلومتریک در برآورد شاخص سطح برگ در طبقات مختلف قطری و ارتفاعی درختان در هندوستان پرداختند. نتایج نشان داد که مدل لجستیک برای مشخصه قطر برابر سینه و مدل گومپرز برای مشخصه ارتفاع بیشترین ضریب تبیین را با شاخص سطح برگ داشتند. میزان ضرایب تبیین برای دو مشخصه قطر برابر سینه و ارتفاع به ترتیب ۰/۶۸ و ۰/۷۰ محاسبه شد. ویاس و همکاران (Vyas et al., 2010) به بررسی سطح تاج پوشش درختان تیک و بامبو با شاخص سطح برگ در هندوستان پرداختند. نتایج نشان داد میزان میانگین مربعات خطا برای مشخصه سطح تاج برای گونه تاج گونه تیک و بامبو ۰/۹ و ۰/۳۸ مترمربع گزارش شد. نتایج همچنین نشان داد که شاخص سطح برگ پارامتر مهم و حساس برای سطح

تغییر اقلیم دارند. تغییر اقلیم و افزایش گرمایش جهانی از مهمترین چالش‌هایی است که توجه پژوهشگران را به‌خود جلب کرده است. به‌همین دلیل افزایش روز افزون نگرانی‌ها در زمینه این دو عامل موجب توجه ویژه و نگرش جهانی به خاک و توانایی آن در ذخیره کربن شده است (Sarvazad et al., 2024). برای بررسی و کمی کردن اثرات و پایش تغییر اقلیم به اطلاعاتی از مشخصه‌های و ارزیابی روند تغییرات آن‌ها مانند زی‌توده و شاخص سطح برگ نیاز می‌باشد تا بتوان میزان این تغییرات را ارزیابی نمود. مشخصه‌های کمی ساختار توده مانند زی‌توده و شاخص سطح برگ از متغیرهای اصلی کنترل کربن و همچنین از متغیرهای اصلی در مدل‌سازی اقلیمی هستند که در مقیاس منطقه و جهانی مدل‌های آب‌وهوا لازم و ضروری می‌باشند. بررسی روابط بین مشخصه‌های اقلیمی و مشخصه‌های کمی ساختار توده مانند شاخص سطح برگ محققان را قادر می‌سازد تا تغییرات بین آن‌ها را در شرایط مختلف پیش‌بینی کنند (Wilby et al., 2013). تغییرات اقلیم باعث تغییر در اندازه (مساحت) درختان و در نتیجه آن باعث تغییر در میزان فتوسنتز، رویش و زی‌توده درختان می‌شود که مجموعه این عوامل باعث تغییر میزان شاخص سطح برگ می‌شود؛ به‌همین دلیل برای بیان تغییرات اقلیمی نیاز به اطلاعات مشخصه‌های کمی ساختار توده مانند شاخص سطح برگ لازم و ضروری می‌باشد. شاخص سطح برگ یک کمیت بدون واحد است و به‌عنوان یک طرف سطح برگ در واحد سطح زمین تعریف شده است (Buchmann and Schulze, 1999). معمولاً شاخص سطح برگ به دو روش مستقیم و غیرمستقیم برآورد می‌شود (Welles, 1990). روش‌های مستقیم (جمع‌آوری برگ با استفاده از تله لاشبرگ) دقیق‌ترین و با اطمینان‌ترین روش اندازه‌گیری شاخص سطح برگ است (Fava et al., 2009). در روش‌های غیرمستقیم نیز مانند ابزارهای اپتیک، داده‌های سنجنش از دوری و دوربین عکس‌برداری با لنز چشم ماهی نیز وجود دارند که شاخص سطح برگ را برآورد می‌نمایند.

با توجه به تغییرات شدید توده‌های جنگلی هیرکانی هم از نظر گونه و هم از نظر مشخصه‌های کمی ساختار توده مانند حجم در هکتار، رویه زمینی در هکتار، تعداد در هکتار، میانگین ارتفاع و میانگین قطر و غیره و همچنین وضعیت توپوگرافی این توده‌ها استفاده از روش‌های مستقیم فرآیند بسیار دشوار، پرهزینه و نیاز به نیروی انسانی زیادی دارد و حتی روش‌های غیرمستقیم این فرآیند نیز دشوار و پرهزینه است. علاوه بر این با توجه به در دسترس بودن مشخصه‌های کمی ساختار توده مانند حجم در هکتار، رویه زمینی در هکتار، تعداد درختان در هکتار، میانگین ارتفاع و قطر در آمربرداری‌های معمول که توسط سازمان جنگل‌ها، مراتع و آبخیزداری کشور یا محققین انجام شده است و همچنین با توجه به ارتباط قوی بین مشخصه‌های کمی ساختار توده با شاخص سطح برگ، درک و آنالیز روابط بین تغییرات شاخص سطح برگ با مشخصه‌های کمی ساختار توده دارای اهمیت بالایی است و بر اساس مشخصه‌های کمی ساختار توده می‌توان تغییرات شاخص سطح برگ را در مقیاس‌های وسیع

تغییرات مشخصه‌های حجم در هکتار، تعداد در هکتار، رویه زمینی در هکتار، مساحت تاج در هکتار، حجم تاج در هکتار و میانگین قطر و ارتفاع با شاخص سطح برگ در جنگل‌های هیرکانی استان گلستان می‌باشد. نتایج این تحقیق می‌تواند اطلاعات ارزشمندی در زمینه تغییرات شاخص سطح برگ به‌ما می‌دهد که می‌تواند در مدیریت پایدار این منابع جنگلی و تدوین سیاست‌های صحیح در زمینه گرمایش جهانی و تغییرات اقلیم به‌ما ارائه دهد.

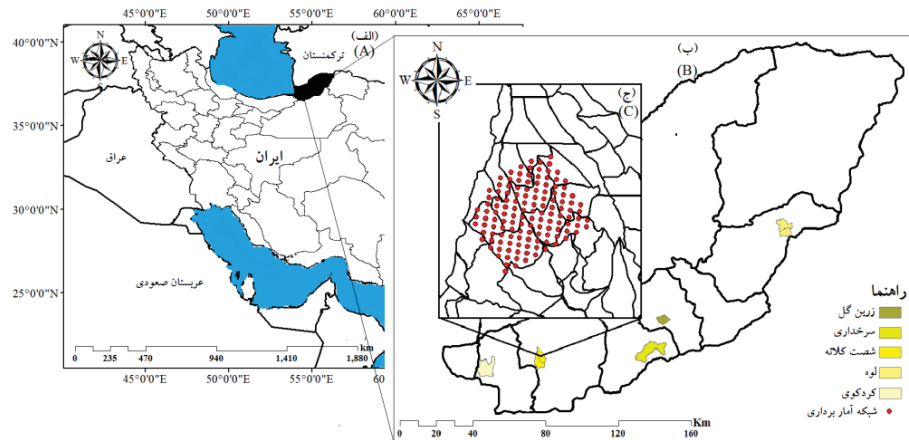
مواد و روش‌ها

به‌منظور دستیابی به پژوهش حاضر در جنگل‌های استان گلستان، واقع در پنج رویشگاه در استان گلستان انجام‌شده است (شکل ۱). هرکدام از این رویشگاه‌ها در ارتفاع از سطح دریاهای مختلف و تیپ‌های جنگلی متفاوتی قرار داشتند. رویشگاه کردکوی نخستین رویشگاه مورد بررسی است. تیپ جنگل مورد مطالعه پهن‌برگ آمیخته و فرم آن غالباً دانه‌زاد ناهمسال و تیپ غالب جنگل *Carpinus Betulus L* و *Fagus Orientalis Lipsky* است. این منطقه در محدوده ارتفاعی ۱۲۰۰ تا ۲۱۰۰ متر از سطح دریا قرار دارد (Kordkoy management of forestry project, 2008). رویشگاه دوم شصت کلاته نام دارد و در جنوب شرقی شهر گرگان می‌باشد. گونه‌های درختی منطقه مورد مطالعه شامل: *Carpinus Betulus L*; *Acer A*; *Fagus Orientalis Lipsky*; *Quercus Castaneifolia*; *Parrotia Persica* است. این منطقه در محدوده ارتفاعی ۳۰۰ تا ۸۰۰ متر از سطح دریا قرار دارد (Doctor Bahramnia Forestry plan (Management, 2009). رویشگاه زرین‌گل سومین رویشگاه مورد مطالعه واقع در علی‌آباد استان گلستان می‌باشد. گونه‌های درختی منطقه مورد مطالعه شامل: *Carpinus Betulus L* و *Quercus Castaneifolia* است این منطقه در محدوده ارتفاعی ۴۰۰ تا ۹۰۰ متر از سطح دریا قرار دارد (Zarrin gol Forestry Plan Booklet, 2000).

رویشگاه سرخداری چهارمین رویشگاه مورد بررسی است که در شمال شهر رامیان قرار دارد. گونه‌های درختی منطقه مورد مطالعه شامل: *Acer*; *Acer Cappadoicicum Gled*; *Velutium Boss*; *Carpinus Betulus L*; *Gaerten* می‌باشد. این منطقه در محدوده ارتفاعی ۱۰۰۰ تا ۱۵۰۰ متر از سطح دریا قرار دارد (Sorkhdary Forest Management Plan, 2007). رویشگاه لوه پنجمین رویشگاه مورد بررسی است که در جنوب شرقی شهر گالیکش قرار دارد. گونه‌های درختی منطقه مورد مطالعه شامل: *Acer Velutium Boss*; *Carpinus*; *Betulus L* و *Quercus Castaneifolia* است. این منطقه در محدوده ارتفاعی ۱۱۰۰ تا ۱۵۰۰ متر از سطح دریا قرار دارد (Loveh Forestry Plan Booklet, 2007) (شکل ۱).

تاج درختان است. آریاس و همکاران (Arias et al., 2007) به بررسی برآورد شاخص سطح برگ و ارزیابی رابطه آن با بهره‌وری توده در شش گونه درختی بومی در کاستاریکا پرداختند. نتایج نشان داد که بین شاخص سطح برگ و ارتفاع غالب و حجم سرپا ارتباط معنی‌داری وجود دارد و اگر آب و مواد غذایی خاک برای رشد درختان در حد مطلوب باشد، بیشترین مقدار شاخص سطح برگ و محصول فراهم می‌شود. توبین و همکاران (Tobin et al., 2006) به تخمین دقیق شاخص سطح برگ توده‌های درختی *Tectona grandis* برای کلاس‌های قطری مختلف با مشخصه‌های کمی قطر برابر سینه، ارتفاع، تراکم و سطح تاج در هندوستان پرداختند. نتایج نشان داد که مشخصه‌های قطر برابر سینه و سطح تاج با ضرایب تبیین ۰/۷۰ و ۰/۶۷ قوی‌ترین ارتباط را با شاخص سطح برگ دارند. مک داول و همکاران (McDowell et al., 2002) به بررسی ارتباط بین شاخص سطح برگ با ارتفاع درخت در توده‌های سوزنی‌برگ در واشنگتون آمریکا پرداختند. نتایج نشان داد که با افزایش ارتفاع درخت، نسبت سطح برگ درختان توده کاهش می‌یابد. به بررسی رابطه قطر، ارتفاع و عرض تاج با سطح برگ درختان شهری در کالیفرنیا آمریکا پرداختند. نتایج نشان داد همبستگی قوی بین سطح برگ با قطر برابر سینه، قطر تاج و ارتفاع درختان شهری وجود داشت. ضرایب تبیین محاسبه شده برای مشخصه‌های قطر برابر سینه، قطر تاج و ارتفاع درختان بین (۰/۹۴ - ۰/۷۰) محاسبه شد. نتایج همچنین نشان داد که ارتفاع درخت، قطر تاج و نرخ رشد قطر برابر سینه با افزایش سن درختان کاهش یافت، اما نرخ رشد سطح برگ برای بیشتر گونه‌ها افزایش یافت. مقایسه سطح برگ درختان نشان می‌دهد که هرس درختان تأثیر قابل‌توجهی بر اندازه درخت و سطح برگ داشت (Pape et al., 2001). به مدل‌سازی سطح برگ گونه *Tsuga Canadensis* در آمریکا با مشخصه‌های کمی ارتفاع، رویه زمینی، قطر برابر سینه، حجم تاج و طول تاج پرداختند. نتایج نشان داد که مشخصه رویه زمینی در مقایسه با سایر مشخصه‌های کمی نتایج بهتری با ضریب تبیین ۰/۶۷ ارائه داد (Kenefic et al., 1999).

با توجه به مرور منابع تاکنون مطالعات کمی در زمینه‌ی بررسی اثر تغییرات مشخصه‌های کمی و ساختار توده‌های جنگلی مانند حجم در هکتار، تعداد در هکتار، رویه زمینی در هکتار، مساحت تاج در هکتار، حجم تاج در هکتار و میانگین قطر و ارتفاع و ارتباط آن‌ها با شاخص سطح برگ انجام شده است. همچنین با توجه به اطلاعات زمینی بسیار کم شاخص سطح برگ از جنگل‌های هیرکانی و تغییرات زیاد این شاخص در فواصل کم و علاوه بر آن نیاز به اطلاعات شاخص سطح برگ در مباحث مختلف از جمله موضوعات تغییر اقلیم و گرمایش جهانی بررسی روابط و اثر تغییرات این مشخصه‌های کمی ساختار توده با شاخص سطح برگ لازم و ضروری به‌نظر می‌رسد. بنابراین هدف از این مطالعه بررسی روابط و اثر



شکل ۱- موقعیت منطقه مورد مطالعه در استان ایران (الف)، استان گلستان (ب)، جنگل شصت کلاته (ج)
Figure 1. Location of study area in Iran (A), Golestan Province (B), Shast-Kalateh forest (C)

بیش از ۱۵۰۰۰ نمونه برگ آنالیز و اسکن شد. مساحت هر برگ با استفاده از نرم افزار ImageJ اندازه‌گیری شد. وزن تر و خشک و مساحت سطح به‌طور هم‌زمان با استفاده از ترازوی دیجیتالی با دقت ۰/۰۱ اندازه‌گیری و سپس با اسکنر با وضوح بالا اسکن شد. برگ‌ها پس از اسکن در دمای ۷۲ درجه سانتی‌گراد به مدت ۴۸ ساعت در آون خشک شدند و وزن خشک آن‌ها توزین شدند. سپس سطح ویژه برگ از رابطه (۶) و از تقسیم مساحت هر برگ به وزن خشک آن محاسبه شد. (Waring et al., 1983). محاسبه میانگین سطح ویژه برگ هرگونه از فرمول زیر استفاده شد (معادله ۶) (Chason et al., 1991; Ermak et al., 1998).

$$SLA_{ts} = \frac{LA_{ts}^{sam}}{WD_{ts}^{sam}} \quad \text{رابطه (۶)}$$

که SLA_{ts} سطح برگ ویژه برای هرگونه درخت در هر رویشگاه برحسب سانتی‌متر مربع بر گرم است، LA_{ts}^{sam} مساحت هر برگ نمونه از هرگونه در هر رویشگاه برحسب سانتی‌متر مربع است و WD_{ts}^{sam} وزن خشک هر برگ نمونه برحسب گرم است (رابطه ۷).

$$SLA_{ts} = \frac{\sum SLA_{ts}}{n} \quad \text{رابطه (۷)}$$

سپس برای هر قطعه نمونه، میزان شاخص سطح برگ با استفاده از معادله (۸) محاسبه شد.

$$LAI_{ts} = WD_{ts}^{sam} \times \frac{SLA_{ts}}{GA} \quad \text{رابطه (۸)}$$

که LAI_{ts} شاخص سطح برگ برای هرگونه درخت در قطعه نمونه است، WD_{ts}^{sam} وزن خشک لاشبرگ هرگونه درخت در هر تله برگ یا قطعه نمونه در هر رویشگاه است و SLA_{ts} سطح برگ ویژه برای هرگونه درخت در هر منطقه است. GA سطح زمین ($60 \times 60 = 3600 \text{ cm}^2$) است. شاخص سطح برگ کل برای هر قطعه نمونه نیز از رابطه زیر محاسبه شد (رابطه ۹):

$$LAI_t = \sum_{i=1}^n LAI_{ti} \quad \text{رابطه (۹)}$$

نمونه‌برداری و جمع‌آوری داده‌ها

جمع‌آوری داده‌های زمینی در تابستان ۱۴۰۱ با نمونه‌برداری منظم با شروع تصادفی با شبکه نمونه‌برداری 100×100 متر و قطعات نمونه دایره‌ای شکل با مساحت 1000 مترمربع در پنج طرح جنگلداری (گردکوی، شصت کلاته، سرخداری، زربین گل و لوه) انجام شد (شکل ۱). در مجموع در 227 قطعه نمونه آماربرداری شد. مرکز جغرافیایی هر قطعه نمونه با استفاده از دستگاه سیستم موقعیت‌یاب جهانی تفاضلی (DGPS) ثبت شد. در هر قطعه نمونه نوع گونه، قطر برابر سینه بیشتر از $12/5$ سانتی‌متر، ارتفاع درختان و قطر بزرگ و قطر کوچک تاج اندازه‌گیری سپس حجم در هکتار، تعداد در هکتار، رویه زمینی در هکتار، مساحت تاج در هکتار، حجم تاج در هکتار و میانگین قطر و ارتفاع در هر قطعه نمونه محاسبه شد (روابط ۱-۵).

$$V = GHf \quad \text{رابطه ۱}$$

$$G = \frac{\pi}{4} d^2 \quad \text{رابطه ۲}$$

$$A = \pi \frac{LD \times SD}{4} \quad \text{رابطه ۳}$$

$$V_c = \pi \frac{\pi D_b^2}{12 W} \quad \text{رابطه ۴}$$

$$Db^2 = (L + \frac{W}{2})^2 \quad \text{رابطه ۵}$$

که در اینجا V حجم در هکتار (متر مکعب در هکتار)، G رویه زمینی در هکتار (مترمربع در هکتار)، A مساحت تاج (مترمربع در هکتار) و V_c حجم تاج (مترمکعب در هکتار) و همچنین H ارتفاع درخت (متر)، f ضریب شکل درخت، d قطر درخت (سانتی‌متر) و L قطر بزرگ و W قطر کوچک درخت می‌باشد.

تعیین شاخص سطح برگ

برای محاسبه شاخص سطح برگ ابتدا لازم است سطح ویژه برگ تمامی گونه‌ها در منطقه مورد مطالعه اندازه‌گیری شود. برای این منظور از هرگونه‌ای درختی در هر رویشگاه ۲۰ درخت انتخاب شد. سپس از هر درخت پنج نمونه برگ در چهار جهت جغرافیایی جدا شد. در پنج رویشگاه در مجموع

هکتار و میانگین قطر و ارتفاع با استفاده از روابط آلومتریک در برآورد شاخص سطح برگ به کار گرفته شده‌اند. بعد از آماده‌سازی داده‌ها و پیش‌پردازش داده‌ها جهت کاهش انحراف معیار از تمامی مشخصه‌های کمی ساختاری به طبقات مختلف تقسیم و میانگین شاخص سطح برگ در هر طبقه محاسبه شد (Chaturvedi & Raghubanshi, 2017; Chaturvedi *et al.*, 2015). جهت بررسی روابط بین شاخص سطح برگ و مشخصه‌های ساختاری توده از مدل‌های غیرخطی رشنال فانکشن، گوسین، هاپیر بولیک، هیت کاپاسیتی و نمایی استفاده شد (جدول ۱).

که LAI_t شاخص سطح برگ کل برای هر قطعه نمونه است و LAI_{ti} شاخص سطح برگ برای هرگونه در قطعه نمونه است. در این تحقیق تعداد ۲۲۷ تله برگ در محل مرکز قطعه نمونه قرار داده شده بودند. در طول دوره اندازه‌گیری ۱ ساله، تله‌های لاشبرگ همراه تخلیه و به آزمایشگاه برای جداسازی هرگونه و تعیین وزن منتقل می‌شدند.

تجزیه و تحلیل داده‌ها

برای تجزیه و تحلیل داده‌ها در گام نخست از آزمون کولموگروف-اسمیرنوف جهت نرمال بودن داده‌ها استفاده شد. از مشخصه‌های کمی توده حجم در هکتار، تعداد در هکتار، رویه زمینی در هکتار، مساحت تاج در هکتار، حجم تاج در

جدول ۱- مدل‌های غیر خطی مورد استفاده در این تحقیق جهت بررسی رابطه شاخص سطح برگ با مشخصه‌های کمی ساختار توده
Table 1 The non-linear models used in this research to investigate the relationship between the LAI and the quantitative characteristics of the mass structure

شماره مدل Model number	مدل Model	فرمول Formol	رفرنس Refrens
1	Exponential fit	$Y = a + b \times \ln x$	(Farr <i>et al.</i> , 1989)
2	گوسین Gussion	$Y = ae^{-\frac{(x-b)^2}{2e^2}}$	(Hung <i>et al.</i> , 1992)
3	هیت کاپاسیتی Heat capacity	$Y = a + b \times x + c/x^2$	(Hung <i>et al.</i> , 1992)
4	رشنال فانکشن Retinal function	$Y = \frac{a + b \times x}{1 + c \times x + d \times (x)^2}$	(Ratkowsky & Reedy, 1986)
5	ریچارد Richard	$Y = \frac{a}{(1 + e^{b-x})^{1/d}}$	(Richard, 1959)

نشان داد که میانگین و انحراف معیار برای مشخصه‌های حجم در هکتار، تعداد در هکتار، رویه زمینی در هکتار، مساحت تاج در هکتار، حجم تاج در هکتار و میانگین قطر و ارتفاع نیز به ترتیب (۲۹۸/۹۶ و ۲۰۵/۱۸)، (۲۴/۰۵ و ۱۲/۸۲)، (۲۴/۰۵ و ۱۲/۸۲)، (۱۴۸/۵۱ و ۱۵۵/۵۴)، (۷۸۱/۲ و ۹۵/۰۵) و (۳۶/۴۱ و ۹/۹۷) و (۲۵/۸۱ و ۴/۹۳) محاسبه شد (جدول ۲).

نتایج حاصل از آماره‌های توصیفی نشان داد که میزان شاخص سطح برگ (۶/۳۳) برآورد شد که با مطالعات (Rahmani *et al.*, 2014; Pourhashemi *et al.*, 2012) و (Kamal *et al.*, 2016 و Tran., 2014) که میزان شاخص سطح برگ را بین (۸ تا ۲) گزارش دادند مطابقت دارد. نتایج بررسی مشخصه‌های کمی توده نیز نشان داد که حجم در هکتار، تعداد در هکتار، رویه زمینی در هکتار، مساحت تاج در هکتار، حجم تاج در هکتار و میانگین قطر و ارتفاع (۲۹۸/۹۶، ۲۴۹/۳۴ و ۲۴/۰۵، ۱۴۸/۵۱، ۷۸۱/۲ و ۳۶/۴۱ و ۲۵/۸۱) محاسبه شد. نتایج محاسبه شده در این پژوهش با مطالعات (Mohammadi & Masoudi, 2020; Ahmadi *et al.*, 2022; Valipour *et al.*, 2014; LeDante *et al.*, 1999 و (Zhu *et al.*, 2021) در برآورد مشخصه‌های کمی ساختار توده مطابقت دارد.

همچنین برای بررسی ارزیابی روابط بین مشخصه‌های کمی ساختار توده با شاخص سطح برگ از ضریب تبیین (رابطه ۱۱) و میانگین مربعات خطا (MSE) استفاده گردید.

$$\text{رابطه ۱۰} \quad \text{MSE} = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)}{n}$$

$$\text{رابطه ۱۱} \quad R^2 = 1 - \frac{\sum (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum (y_i - \bar{y}_1)^2} \times 100$$

به طوری که n تعداد نمونه‌ها، $\hat{y}_i$ مشخصه برآورد شده و y_i مشخصه اندازه‌گیری شده زمینی می‌باشد. همچنین برای بررسی تفاوت معنی‌داری میزان تفاوت مشخصه‌های کمی اندازه‌گیری شده زمینی و برآورد شده‌اند.

نتایج و بحث

نتایج تجزیه واریانس انجام از مجموع ۲۲۷ قطعه نمونه به ترتیب ۳۵ قطعه نمونه در رویشگاه کردکوی، ۸۷ قطعه نمونه در رویشگاه شصت کلاته، ۴۰ قطعه نمونه در رویشگاه زرین گل، ۳۳ قطعه نمونه در رویشگاه سرخداری و ۳۲ قطعه نمونه در رویشگاه لوه استان گلستان قرار داشتند. نتایج آنالیز آماره‌های توصیفی نشان داد که میزان حداقل، حداکثر، میانگین و انحراف معیار LAI برای ۲۲۷ قطعه نمونه به ترتیب (۱/۸۶، ۱۳/۴۵، ۶/۳۳ و ۲/۳۳) محاسبه شد. نتایج همچنین

جدول ۲- مقادیر LAI و مشخصه‌های کمی به‌دست‌آمده از اندازه‌گیری‌های زمینی

مشخصه مورد بررسی Characteristic quantitative	حداقل Minimum	حداکثر Maximum	میانگین Mean	انحراف از معیار St.dev
شاخص سطح برگ LAI	1.86	13.45	6.34	2.32
حجم در هکتار (m ³ . ha ⁻¹) Volume (m ³ . ha ⁻¹)	13.56	1247.22	298.96	205.18
تعداد در هکتار (اصله) Tree density (n.ha ⁻¹)	60	820	249.34	163.66
رویه زمینی در هکتار (m ² . ha ⁻¹) Basal area (m ² .ha ⁻¹)	2.94	98.27	24.05	12.82
حجم تاج در هکتار (m ³ . ha ⁻¹) Volume crown (m ³ .ha ⁻¹)	58.6	1280.6	781.2	95.05
مساحت تاج در هکتار (m ² . ha ⁻¹) Area crown (m ² .ha ⁻¹)	3.35	760.23	148.51	155.54
میانگین قطر (cm) Mean DBH (cm)	13.13	65.28	36.41	9.97
میانگین ارتفاع (m) Height (m)	7.52	39.79	25.81	4.93

جدول ۳ نتایج ضریب‌های به‌دست آمده از بررسی مشخصه‌های کمی توده (حجم در هکتار، تعداد در هکتار، رویه زمینی در هکتار، مساحت تاج در هکتار، حجم تاج در هکتار و میانگین قطر و ارتفاع) در برآورد شاخص سطح برگ

جدول ۳- ضرایب مدل‌های رگرسیونی غیرخطی انتخاب شده

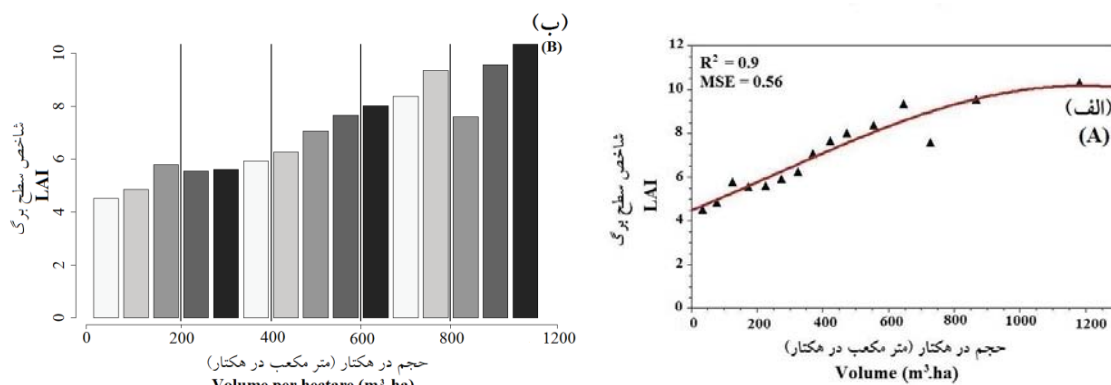
مشخصه مورد بررسی Characteristic	مدل Model	فرمول Formol	ضرایب Model	مدل Coefficients
حجم در هکتار (m ³ . ha ⁻¹) Volume (m ³ . ha ⁻¹)	گوسین Gussion	$LAI = ae^{\frac{-(V-b)^2}{2e^2}}$	a	d
تعداد در هکتار (اصله) Tree density (n.ha ⁻¹)	نمایی Exponential fit	$LAI = a + b \times \ln N$	b	c
رویه زمینی در هکتار (m ² . ha ⁻¹) Basal area (m ² .ha ⁻¹)	نمایی Exponential fit	$LAI = a + b \times \ln BA$	b	c
حجم تاج در هکتار (m ³ . ha ⁻¹) Volume crown (m ³ .ha ⁻¹)	رشنال فانکشن Retinal function	$LAI = \frac{a + b \times AC}{1 + c \times AC + d \times (AC)^2}$	b, a, c, d	
مساحت تاج در هکتار (m ² . ha ⁻¹) Area crown (m ² .ha ⁻¹)	ریچارد Richard	$LAI = \frac{a}{(1 + e^{b-vc})^{1/vc}}$	b, a, c	
میانگین قطر (cm) Mean DBH (cm)	هیت کاپاسیتی Heat capacity	$LAI = a + b \times DBH + c/DBH$	b, a, c	
میانگین ارتفاع (m) Height (m)	هیت کاپاسیتی Heat capacity	$LAI = a + b \times H + c/H$	b, a, c	

LAI شاخص سطح برگ، a، b، c و d ضرایب مدل، e عدد نپر، N تعداد درختان، DBH قطر برابر سینه، H ارتفاع لوری، BA رویه زمینی، V حجم، AC سطح تاج، VC حجم تاج.

تغییرات شاخص سطح برگ را بیان کند (شکل ۲، الف و ب). قطر برابر سینه و ارتفاع تأثیرگذارترین مشخصه کمی در ارتباط با شاخص سطح برگ می‌باشند (Pourhashemi et al., 2012). هرچه میزان قطر برابر سینه و ارتفاع درختان افزایش یابد، میزان حجم نیز افزایش می‌یابد. افزایش هرکدام از این مشخصه‌ها به‌نوبه خود باعث افزایش شاخص سطح برگ می‌شوند (Chaturvedi et al., 2017). این محققین اعلام می‌دارند که تغییرات شاخص سطح برگ به عوامل دیگری چون نیاز حرارتی و پراکنش گونه‌ای نیز بستگی دارد. سرشت نورپسندی گونه‌های درختی موجود در منطقه مورد مطالعه می‌تواند دلیلی بر این مدعا باشد.

بررسی ارتباط بین شاخص سطح برگ و مشخصه حجم در هکتار

نتایج حاصل از ارتباط شاخص سطح برگ با مشخصه حجم در هکتار نشان داد که با افزایش حجم در هکتار شاخص سطح برگ نیز افزایش می‌یابد. روند افزایش شاخص سطح برگ در توده‌های با حجم کمتر از ۸۰۰ متر مکعب با شیب زیادی سیر صعودی دارد و بعد از آن روند یکنواختی تا ۱۲۰۰ متر مکعب دارد. نتایج این پژوهش با مطالعه (Arias et al., 2007) که بیان داشتند حجم درختان عامل مهمی در ارتباط با شاخص سطح برگ است مطابقت دارد. نتایج همچنین نشان داد که مدل گوسین (Gussion) با ضریب تبیین ۰/۹ و میانگین مربعات خطا ۰/۵۶ بهتر توانسته است



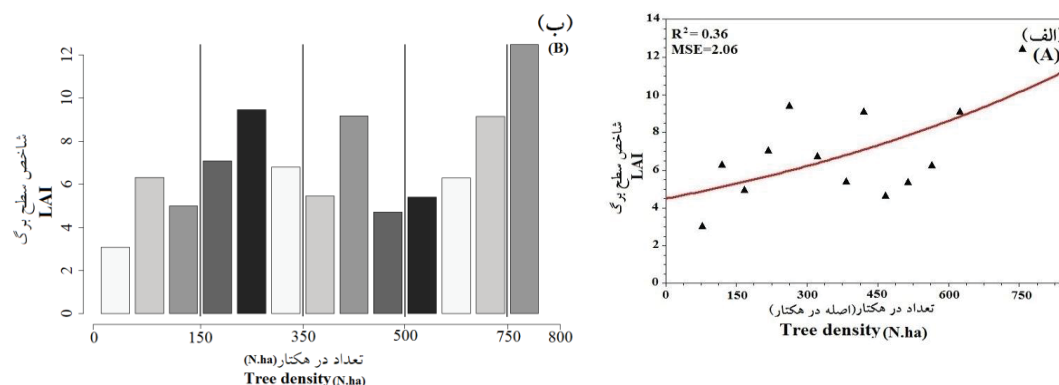
شکل ۲- ابر نقاط مقادیر شاخص سطح برگ در برابر حجم در هکتار ($m^3.ha^{-1}$) (الف)، هیستوگرام شاخص سطح برگ در برابر حجم در هکتار ($m^3.ha^{-1}$) (ب)

Figure 2. Cloud points of leaf area index values against volume ($m^3.ha^{-1}$) (A), histogram of leaf area index against volume ($m^3.ha^{-1}$) (B)

رویه زمینی در ارتباط با تراکم جنگل است. در توده‌هایی که تراکم بالایی دارند میزان شاخص سطح برگ و زی‌توده نیز افزایش می‌یابد افزایش شیب تعداد کل درختان را افزایش می‌دهد و وضعیت را از نظر تراکم مطلوب‌تر می‌کند (Valipouret *al.*, 2013). همچنین جهت جغرافیایی نیز بر تراکم درختان تأثیر بسیار زیادی می‌گذارد، دامنه‌های شمالی دارای بیشترین تراکم درختی می‌باشند (Valipouret *al.*, 2013). تعداد کم درختان در جهت‌های جنوبی و شیب‌های کم به علت ضعف رویشگاه (رطوبت کمتر، خاک ضعیف‌تر) و شرایط مناسب‌تر برای زندگی و مناطق مسکونی بوده و در نتیجه تردد افراد و دام بیشتر در این مناطق متمرکز است. دلیل دیگر آن می‌تواند شرایط ادا فیزیکی خاک در توده جنگل باشد که با توجه به رطوبت مناسب خاک، عرصه برای تجدید حیات شرایط مناسب را فراهم می‌کند.

بررسی ارتباط بین شاخص سطح برگ و مشخصه تعداد در هکتار

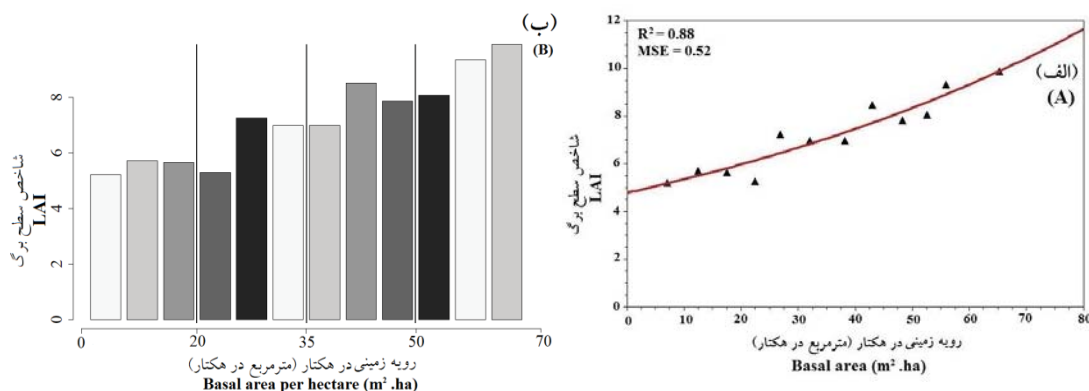
نتایج حاصل از ارتباط شاخص سطح برگ با مشخصه تعداد در هکتار نشان داد که با افزایش تعداد در هکتار میزان شاخص سطح برگ در ابتدا با شیب کمتر و سپس با افزایش تعداد درختان (بیشتر از ۵۰۰) میزان شاخص سطح برگ نیز با شیب بیشتری افزایش پیدا می‌کند (شکل ۲، الف و ب). که این نحوه تغییرات شاخص سطح برگ به تغییرات تراکمی توده و مراحل تحولی آن برمی‌گردد و با افزایش تعداد درختان در هکتار میزان شاخص سطح برگ نیز افزایش می‌یابد اما این افزایش در توده‌های با تراکم بیشتر از ۵۰۰ درخت در هکتار بیشتر است. همچنین نتایج نشان داد که مدل گوسین (Gussion) با ضریب تبیین ۰/۳۶ و میانگین مربعات خطا ۲/۰۶ بهتر توانسته است تغییرات شاخص سطح برگ را بیان کند (شکل ۳، الف و ب). مشخصه تراکم درختان، نقش بسیار مهمی در تغییرات شاخص سطح برگ دارد. مقدار حجم و



شکل ۳- ابر نقاط مقادیر شاخص سطح برگ در برابر تعداد در هکتار ($n.ha^{-1}$) (الف)، هیستوگرام شاخص سطح برگ در برابر تعداد در هکتار ($n.ha^{-1}$) (ب)

Figure 3. Cloud points of leaf area index values against tree density ($n.ha^{-1}$) (A), histogram of leaf area index against tree density ($n.ha^{-1}$) (B)

۴، الف و ب). نتایج این مطالعه نسبت به نتایج (Kenefic et al., 1999) که ضریب تبیین را ۰/۶۷ گزارش نمودند بهتر برآورد شده است. دلیل این امر می‌تواند به نوع توده‌های انتخاب شده از هر رویشگاه مربوط باشد که توده‌های انتخابی مورد مطالعه از نوع ناهمسال آمیخته و چنداشکوبه بودند، در نتیجه به دلیل تاج پوشش متراکم و انبوه درختان حضور دارند، در نتیجه میزان شاخص سطح برگ بیشتری را هم دارند. جهت و دامنه نیز بر میزان رویه زمینی تأثیر زیادی دارند به‌طوری‌که جهت‌های شمالی و شرقی دارای بیشترین میزان رویه زمینی می‌باشند (Tahmasebi; Valipouret al., 2013; et al., 2024). شکل زمین و دامنه ارتفاعی و پراکنش گونه‌ها نیز از عوامل مؤثر دیگر بر تغییرات شاخص سطح برگ و مشخصه رویه زمینی می‌تواند باشد.



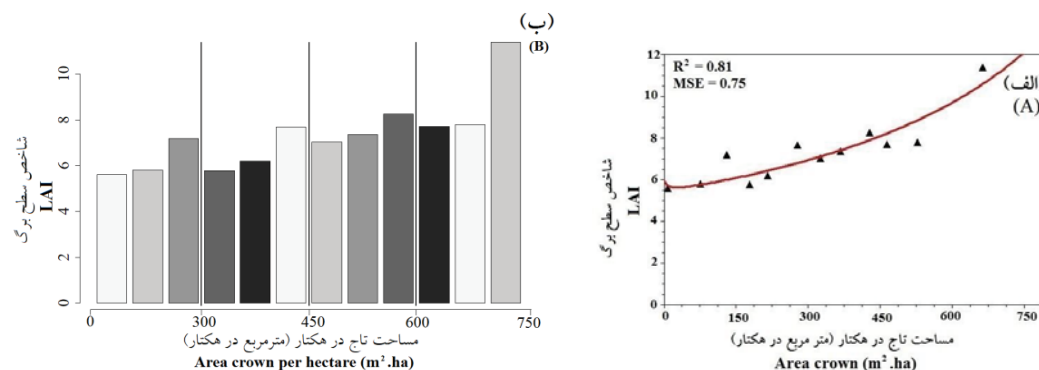
شکل ۴- ابر نقاط مقادیر شاخص سطح برگ در برابر رویه زمینی در هکتار ($m^2.ha^{-1}$) (الف)، هیستوگرام شاخص سطح برگ در برابر رویه زمینی در هکتار ($m^2.ha^{-1}$) (ب)

Figure 4. Cloud points of leaf area index values against basal area ($m^2.ha^{-1}$) (A), histogram of leaf area index against basal area ($m^2.ha^{-1}$) (B)

مربعات خطا ۰/۷۵ بهتر توانسته است تغییرات شاخص سطح برگ را بیان کند (شکل ۵، الف و ب). نتایج این مطالعه نسبت به نتایج (Tobin et al., 2006; Pape et al., 2001) که ضرایب تبیین ۰/۶۷ و ۰/۳۸ را گزارش نمودند بهتر برآورد شده است. دلیل این امر می‌تواند به عواملی چون نوع توده و شرایط مناسب رشد و توپوگرافی و شیب و جهت بستگی داشته باشد. نتایج این مطالعه با نتایج (Valipouret al., 2013) که بیان داشتند عواملی مانند شیب و جهت بر میزان سطح تاج تأثیر زیادی دارد مطابقت دارد؛ زیرا افزایش سطح تاج رابطه مستقیمی با افزایش سطح برگ دارد.

بررسی ارتباط بین شاخص سطح برگ و مشخصه مساحت تاج در هکتار

نتایج حاصل از ارتباط شاخص سطح برگ با مشخصه مساحت تاج در هکتار نشان داد که با افزایش مساحت تاج در هکتار میزان شاخص سطح برگ نیز افزایش می‌یابد. روند افزایش شاخص سطح برگ با افزایش ارتفاع تا ۵۰۰ متر مربع سیر صعودی ملایمی دارد و بعد از آن روند به‌شدت افزایش می‌یابد. نتایج این مطالعه با نتایج مطالعات (Pape et al., 2001; Tobin et al., 2006; Vyas et al., 2010) مطابقت دارد. نتایج همچنین نشان داد که مدل رشنال فانکشن (Retinal function) با ضریب تبیین ۰/۸۱ و میانگین



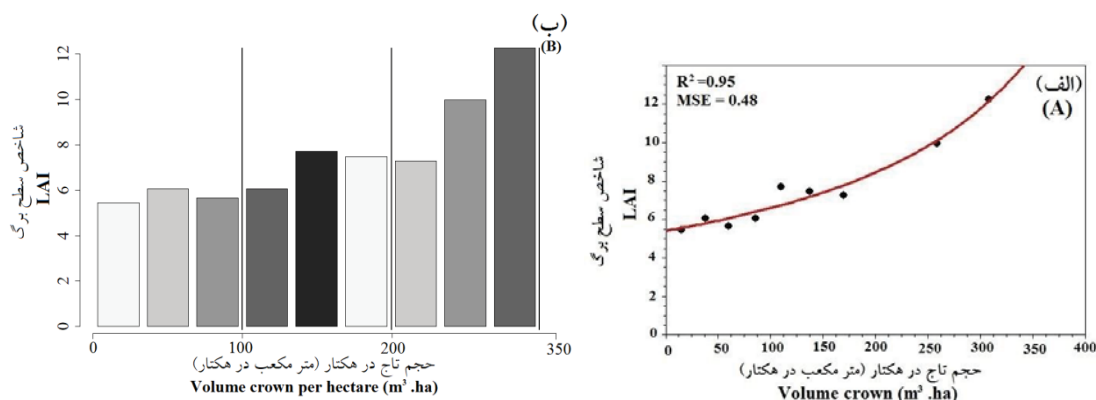
شکل ۵- ابر نقاط مقادیر شاخص سطح برگ در برابر مساحت تاج در هکتار ($m^2.ha^{-1}$) (الف)، هیستوگرام شاخص سطح برگ در برابر مساحت تاج در هکتار ($m^2.ha^{-1}$) (ب)

Figure 5. Cloud points of leaf area index values against crown area ($m^2.ha^{-1}$) (A), histogram of leaf area index against crown area ($m^2.ha^{-1}$) (B)

شاخص سطح برگ را بیان کند (شکل ۶ الف و ب). نتایج این مطالعه نسبت به نتایج مطالعات (Kenefic *et al.*, 1999؛ Zhu *et al.*, 2021) که ضرایب تبیین ۰/۵۷ و ۰/۳۸ را گزارش نمودند بهتر برآورد شده است. حجم تاج به عواملی چون حاصل‌خیزی رویشگاه، پراکنش و توزیع گونه‌های مختلف درختان، نوع آمیختگی تیپ توده، غنای گونه‌ای، میزان رویش حجمی و زی‌توده و زادآوری اشاره نمود. تراکم توده، ناهمسانی درختان و سطح تاج بزرگتر نسبت به مطالعات بیان شده نیز می‌تواند از عوامل مهم و تاثیرگذار دیگر در میزان تغییرات شاخص سطح برگ باشد.

بررسی ارتباط بین شاخص سطح برگ و مشخصه حجم تاج در هکتار

نتایج حاصل از ارتباط شاخص سطح برگ با مشخصه حجم تاج در هکتار نشان داد که با افزایش حجم تاج در هکتار میزان شاخص سطح برگ نیز افزایش می‌یابد. روند افزایش شاخص سطح برگ با افزایش ارتفاع تا ۱۵۰ متر مکعب سیر صعودی ملایمی دارد و بعد از آن روند به‌شدت افزایش می‌یابد. نتایج این مطالعه با نتایج (Kenefic *et al.*, 1999؛ Zhu *et al.*, 2021) که نشان دادند حجم تاج رابطه مؤثری با شاخص سطح برگ دارد، مطابقت دارد. نتایج همچنین نشان داد که مدل ریچارد (Richard) با ضریب تبیین ۰/۹۵ و میانگین مربعات خطا ۰/۴۸ بهتر توانسته است تغییرات



شکل ۶- ابر نقاط مقادیر شاخص سطح برگ در برابر حجم تاج در هکتار ($m^3.ha^{-1}$) (الف)، هیستوگرام شاخص سطح برگ در برابر حجم تاج در هکتار ($m^3.ha^{-1}$) (ب)

Figure 6. Cloud points of leaf area index values against volume crown ($m^3.ha^{-1}$) (A), Histogram of leaf area index against volume crown ($m^3.ha^{-1}$) (B)

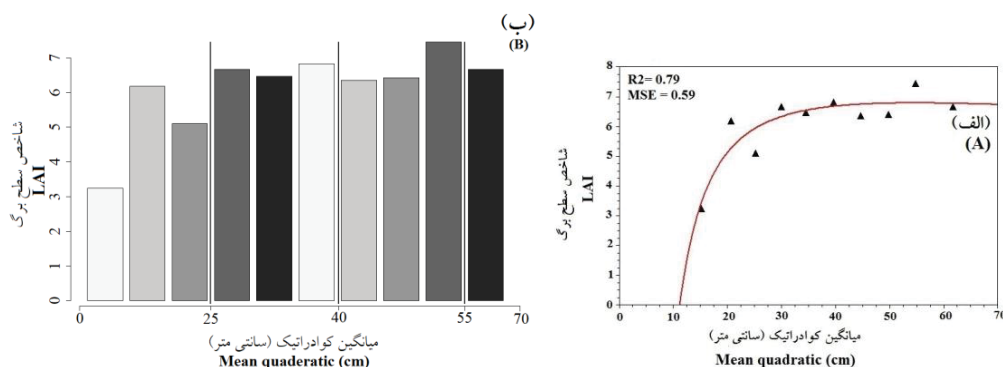
(Tobin *et al.*, 2006؛ Chaturvedi *et al.*, 2017) که بیان داشتند مشخصه قطر برابر سینه عامل تاثیرگذار در ارتباط با شاخص سطح برگ است، مطابقت دارد. نتایج همچنین نشان داد که مدل هیت کاپاسیتی (Heat capacity) با ضریب تبیین ۰/۷۹ و میانگین مربعات خطا ۰/۵۹ بهتر توانسته است تغییرات شاخص سطح برگ را بیان کند (شکل ۷ الف و ب). نتایج این مطالعه نسبت به نتایج (Chaturvedi *et al.*,

بررسی ارتباط بین شاخص سطح برگ و مشخصه میانگین قطر

نتایج حاصل از ارتباط شاخص سطح برگ با مشخصه میانگین قطر نشان داد که با افزایش میانگین قطر میزان شاخص سطح برگ نیز افزایش می‌یابد. روند افزایش شاخص سطح برگ با افزایش ارتفاع تا ۳۰ سانتی‌متر سیر صعودی زیاد و بعد از آن روند ثابتی دارد. نتایج این مطالعه با نتایج

انسانی کمتر در جنگل‌های پهن‌برگ هیرکانی شرایط مناسب را برای افزایش قطر درختان فراهم می‌نماید در نتیجه درختان قطورتری در این مناطق می‌باشد. افزایش قطر به‌نوبه خود باعث افزایش شاخص سطح برگ درختان می‌شود.

۰/۷ و ۰/۶۸ (Tobin et al., 2006; 2017) که ضرایب تبیین را گزارش نمودند بهتر برآورد شده است. عوامل متعددی از جمله مساعد بودن شرایط حرارتی و رطوبتی و خاک حاصلخیزتر جنگل‌های ناهمسال و آمیخته هیرکانی، موجودی منابع مغذی خاک برای رشد بهتر وجود دارد. عدم فعالیت‌های

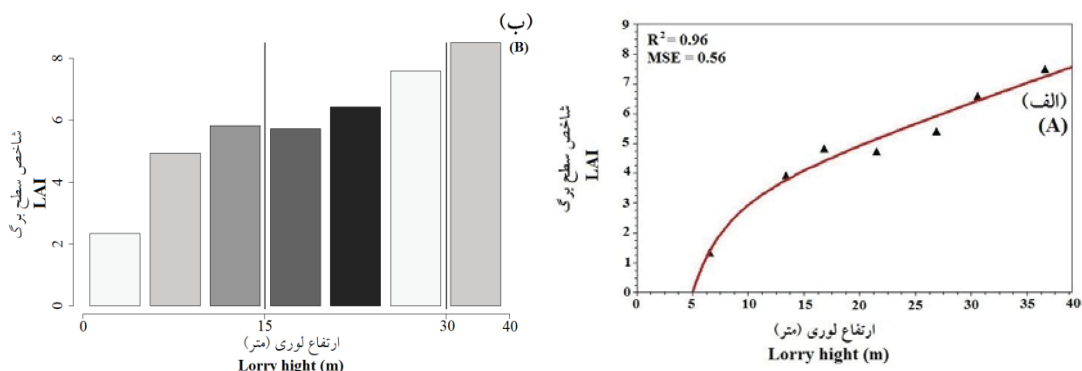


شکل ۷- ابر نقاط مقادیر شاخص سطح برگ در برابر میانگین قطر (cm) (الف)، هیستوگرام شاخص سطح برگ در برابر میانگین قطر (cm) (ب)
Figure 7. Cloud points of leaf area index values against mean DBH (cm) (A), histogram of leaf area index against mean DBH (cm) (B)

نشان داد که مدل هیت کاپاسیتی (Heat capacity) با ضریب تبیین ۰/۹۶ و میانگین مربعات خطا ۰/۵۶ بهتر توانسته است تغییرات شاخص سطح برگ را بیان کند (شکل ۸، الف و ب). نتایج این مطالعه نسبت به نتایج (Chaturvedi et al., 2017; Arias et al., 2007; Pourhashemi et al., 2012; Babaei Kafaki et al., 2009) که ضریب تبیین را بین ۰/۷۲-۰/۷۵ گزارش نمودند بهتر برآورد شده است. از عوامل مؤثر بر ارتفاع درختان نوع توده است. جنگل‌های هیرکانی به‌دلیل مساعد بودن شرایط حرارتی و رطوبتی و خاک حاصلخیزتر و نور فضای رشدی بهتری دارند در نتیجه تراکم پوشش درختی بیشتر وجود دارد. موقعیت درختان در توده جنگلی نیز می‌تواند بر ارتفاع درختان در قطعه‌نمونه تأثیر بگذارد. درختان دارای ارتفاع غالب به‌دلیل چیرگی بر اشکوب پایین تاج پوشش گسترده‌تری دارند در نتیجه میزان شاخ سطح برگ بیشتری نیز دارند.

بررسی ارتباط بین شاخص سطح برگ و مشخصه میانگین ارتفاع

نتایج حاصل از ارتباط شاخص سطح برگ با مشخصه میانگین ارتفاع نشان داد که با افزایش میانگین ارتفاع میزان شاخص سطح برگ نیز افزایش می‌یابد. روند افزایش شاخص سطح برگ با افزایش ارتفاع تا ۴۰ متر سیر صعودی زیادی دارد. نتایج این مطالعه با نتایج (Chaturvedi et al., 2017; Arias et al., 2007; Pourhashemi et al., 2012; Babaei Kafaki et al., 2009) که بیان داشتند، مشخصه ارتفاع مهم‌ترین مشخصه کمی توده برای بررسی شاخص برگ است، مطابقت دارد. اما با مطالعات (Pape et al., 2001; McDowell et al., 2001) که بر روی درختان شهری انجام شده بودند مطابقت نداشت. از دلایل این امر می‌توان به هرس درختان اشاره نمود اما در جنگل طبیعی هرس اتفاق نمی‌افتد بنابراین منطقی است که با افزایش ارتفاع شاخص سطح برگ نیز افزایش یابد. نتایج همچنین



شکل ۸- ابر نقاط مقادیر شاخص سطح برگ در برابر میانگین ارتفاع (m) (الف)، هیستوگرام شاخص سطح برگ در برابر میانگین ارتفاع (m) (ب)
Figure 8. Cloud points of leaf area index values against mean height (m) (A), histogram of leaf area index against mean height (m) (B)

نتیجه‌گیری کلی

شاخص سطح برگ یکی از شاخص‌های تولیدی و بهره‌وری جنگل است. بنابراین اندازه‌گیری و برآورد شاخص سطح برگ در مقیاس بزرگ ضروری و دارای اهمیت بالایی است با توجه به ناهمگنی، چنداشکوبه، آمیخته و ناهمسال بودن توده‌های جنگل‌های هیرکانی، تغییرات شاخص سطح برگ در این جنگل‌ها بسیار زیاد است. بنابراین با در دسترس بودن داده‌های مشخصه‌های کمی ساختار توده می‌توان از این مشخصه‌ها برای برآورد و بررسی ارتباط با شاخص سطح برگ استفاده نمود. تغییرات هرکدام از مشخصه‌های کمی توده تأثیر مستقیم بر شاخص سطح برگ می‌گذارد. به‌طور کلی با افزایش ارتفاع، حجم و حجم در هکتار می‌توان شاخص سطح

برگ را در مقیاس وسیع برآورد نمود و نتایج را به‌کارگیری مدل‌های اقلیمی و تغییرات آب و هوایی مورد استفاده قرار داد. این تحقیق می‌تواند در برنامه‌ریزی، مدیریت پایدار منابع جنگلی و برنامه‌های حفاظتی استفاده کرد و بتوان این نتایج را به‌صورت عملیاتی در برنامه‌ریزی جنگل به‌کار برد.

تشکر و قدردانی

نویسندگان از کارشناسان اداره کل منابع طبیعی استان گلستان (شهرستان‌های کردکوی، گرگان، علی‌آباد، رامیان و گالیکش) به‌علت همکاری در جمع‌آوری داده‌های زمینی کمال تشکر را دارند.

References

- Ahmadi, K., Kalantar, B., Saeidi, V., Harandi, E. K., Janizadeh, S., & Ueda, N. (2020). Comparison of machine learning methods for mapping the stand characteristics of temperate forests using multi-spectral sentinel-2 data. *Remote Sensing*, 12(18), 3019. (In Persian). <https://doi.org/10.3390/rs12183019>
- Anonym. (2007). Loveh Forestry Plan Booklet, Golestan Province General Department of Natural Resources, 262 pp.
- Anonym. (2007). Sorkhdary Forest Management Plan, Forest, Range and Watershed Management organization Press, 253 pp (In Persian).
- Anonym. (2008). Zarrin gol Forestry Plan Booklet, Golestan Province General Department of Natural Resources, 240 pp.
- Babaei Kafaki, S., Khademi, A., & Mataji, A. (2009). Relationship between leaf area index and phisio-graphical and edaphical condition in a *Quercus macranthera* stand (Case study: Andebil's forest, Khalkhal). *Iranian Journal of Forest and Poplar Research*, 17(2), 289-280 (In Persian).
- Bormann, B. T. (1990). Diameter-based biomass regression models ignore large sapwood-related variation in Sitka spruce. *Canadian Journal of Forest Research*, 20(7), 1098-1104. <https://doi.org/10.1139/x90-145>
- Bradshaw, J. D., Rice, M. E., & Hill, J. H. (2007). Digital analysis of leaf surface area: effects of shape, resolution, and size. *Journal of the Kansas Entomological Society*, 80(4), 339-347
- Buchmann, N., & Schulze, E. D. (1999). Net CO₂ and H₂O fluxes of terrestrial ecosystems. *Global Biogeochemical Cycles*, 13(3), 751-760. doi: 0886-6236/99/1999GB900016512.00
- Chason, J., Baldocchi, D., & Hutson, M. (1991). A comparison of direct and indirect methods for estimating forest leaf area. *Agric For Meteorol*, 57, 107-28. [https://doi.org/10.1016/0168-1923\(91\)90081-Z](https://doi.org/10.1016/0168-1923(91)90081-Z)
- Chaturvedi, R. K. & Raghubanshi, A.S. (2015). Allometric models for accurate estimation of aboveground biomass of teak in tropical dry forests of India. *Forest Science*, 61, 938-949.
- Chaturvedi, R. K., Singh, S., Singh, H., & Raghubanshi, A. S. (2017). Assessment of allometric models for leaf area index estimation of *Tectona grandis*. *Tropical Plant Research*, 4(2), 274-285. DOI: 10.22271/tpr.2017.v4.i2.037.
- Doctor Bahramnia Forestry plan Management. (2009). Forest Science Faculty, Gorgan university of Agricultural Sciences and Natural Recourses, 478p (In Persian).
- Eermak, J. (1998). Leaf distribution in large trees and stands of the floodplain forest in southern Moravia. *Tree Physiol*, 18, 727-737. <https://doi.org/10.1093/treephys/18.11.727>
- Fava, F., Colombo, R., Bocchi, S., Meroni, M., Sitzia, M., Fois N., & Zucca, C. (2009). Identification of hyperspectral vegetation indices for mediterranean pasture characterization. *International Journal of Applied Earth a Geoinformation*, 11, 233-243. doi:10.1016/j.jag.2009.02.003
- Kamal, M., Phinn, S., Johansen, K., & Adi, N.S. (2016). Estimation of Mangrove leaf area index from ALOS AVNIR-2 data (A comparison of tropical and sub-tropical mangroves). *Advances of Science and Technology for Society: Proceedings of the 1st International Conference on Science and Technology*, 11-13 November, ogyakarta, Indonesia, 040005-1-040005-6. <https://doi.org/10.1063/1.4958480>.
- Kenefic, L. S., & Seymour, R. S. (1999). Leaf area prediction models for *Tsuga canadensis* in Maine. *Canadian Journal of Forest Research*, 29(10), 1574-1582.
- Kordkoy management of forestry project. (2008). *Forests, Range and Watershed Organization*. 249 pp.
- Le Dantec, V., Epron, D., & Dufrêne, E. (1999). Soil CO₂ efflux in a beech forest: comparison of two closed dynamic systems. *Plant and Soil*, 214, 125-132.
- Li, Y., Johnson, A.D., Su, Y., Cui, J., & Zhang, T. (2005) Specific leaf area and leaf dry matter content of plants growing in sand dunes. *Botanical Bulletin of Academia Sinica*, 46(2), 127-134.

- Marshall, J. D., & Waring, R. H. (1986). Comparison of methods of estimating leaf-area index in old-growth Douglas-fir. *Ecology*, 67, 975–979. doi:10.1093/forestry/cpaa037.
- McDowell, N. G., Phillips, N., Lunch, C., Bond, B. J., & Ryan, M. G. (2002). An investigation of hydraulic limitation and compensation in large, old Douglas-fir trees. *Tree Physiology*, 22(11), 763–774.
- Mohammadi, J., & Masoudi, N. (2022). Estimation beech (*Fagus Orientalis* L) and hornbeam (*Carpinus betulus* L) trees height using nonlinear models and mixed-effects model. *Forest and Wood Products*, 74(4), 433–443. <https://doi.org/10.22059/JFWP.2021.327204.1176>.
- Peper, P. J., McPherson, E. G., & Moriz, S. M. (2001). Equation for predicting diameter, height, crown width, and leaf area of San Joaquin Valley street. *Journal of Arboriculture*, 327, 6.
- Pourhashemi, M., Eskandari, S., Dehghani, M., Najafi, T., Asadi, A., & Panahi, P. (2012). Biomass and leaf area index of Caucasian Hackberry (*Celtis caucasica* Willd.) in Taileh urban forest, Sanandaj, Iran. *Iranian Journal of Forest and Poplar Research*, 19(4), 609–620 (In Persian).
- Pretzsch, H., & Mette, T. (2008). Linking stand-level self-thinning allometry to the tree-level leaf biomass allometry. *Trees*, 22(5), 611–622. <https://doi.org/10.1007/s00468-008-0231-x>
- Rahmani, R., Ghorbani, S., & Naghash Zargar, M. (2014). Measurement and modelling litter biomass and leaf area index using allometry in a Beech-Hornbeam stand in the mid-elevation of the Hyrcanian region, Iran. *Iranian Journal of Forest and Poplar Research*, 22(4), 687–701 (In Persian).
- Sarvazad, A., Fallah, A., & Vadedi, A. A. (2023). Investigation the Effect of Dead Trees on the Trend of Changes in Soil Carbon Storage Across an Altitudinal Gradient of Western Quercus Forests (Case study: Qalajeh Forest). *Ecol Iran For*, 11(22), 130–137 (In Persian). doi:10.61186/ifej.11.22.130
- Tahmasebi, M., Bordbar, S. K., Porhashemi, M., & Najafifar, A. (2023). The Impact of Aspect on Forest Structural Characteristics in Zagros Forests (Case Study: Tangdalab forests of Ilam province). *Ecol Iran For*, 11(22), 32–43 (In Persian). doi:10.61186/ifej.11.22.32
- Tian, L., Qu, Y., & Qi, J. (2021). Estimation of forest LAI using discrete airborne LiDAR: a review. *Remote Sensing*, 13(12), 2408. doi: 10.3390/rs13122408
- Tobin, B., Black, K., Osborne, B., Reidy, B., Bolger, T., & Nieuwenhuis, M. (2006). Assessment of allometric algorithms for estimating leaf biomass, leaf area index and litter fall in different-aged Sitka spruce forests. *Forestry*, 79(4), 453–465. <https://doi.org/10.1093/forestry/cpl030>
- Tran, P. (2014). Allometry, Biomass and litter decomposition of the New Zealand mangrove *Avicennia marina* var. *australasica*. MSc thesis. *School of Applied Sciences. New Zealand*, 63p. <http://dx.doi.org/10.5849/forsci.11-120>
- Turner, D.P., Cohen, W.B., Kennedy, R.E., Fassnacht, K.S., & Briggs, J.M. (1999). Relationships between leaf area index and TM spectral vegetation indices across three temperate zone sites. *Remote Sens. Environ*, 70, 52–68.
- Valipour, A., Namiranian, M., Ghazanfari, H., Heshmatol Vaezin, S. M., Lexer, M. J., & Plieninger, T. (2013). Relationships between forest structure and tree's dimensions with physiographical factors in Armardeh forests (Northern Zagros). *Iranian journal of Forest and Poplar research*, 21(1), 30–47 (In Persian). <https://doi.org/10.22092/IJFPR.2013.3336>
- Vyas, D., Mehta, N., Dinakaran, J., & Krishnayya, N. (2010) Allometric equations for estimating leaf area index (LAI) of two important tropical species (*Tectona grandis* and *Dendrocalamus strictus*). *Journal of Forest Research*, 21, 197–200. DOI: 10.1007/s11676-010-0032-0
- Waring, R. H., (1983). Estimating forest growth and efficiency in relation to canopy leaf area. In: Macfadyen, A., Ford, E.D. (Eds.), *Advances in Ecological Research*, vol. 13. Academic Press, San Diego, 327–354. <https://doi.org/10.1093/treephys/12.10.314>
- Welles, J., & Norman, J. (1991). Instrument for indirect measurement of canopy architecture. *Agron. J.* 83, 818–825. <https://doi.org/10.2134/agronj1991.00021962008300050009x>
- Wilby, R. L., & Dawson, C.W. (2013). "The statistical downscaling model :insights from one decade of application". *International Journal of Climatology*, 33(7), 1707–1719. <https://doi.org/10.1002/joc.3544>
- Zhu, Z., Kleinn, C., & Nölke, N. (2021). Assessing tree crown volume—A review. *Forestry: An International Journal of Forest Research*, 94(1), 18–35.