

(OPEN ACCESS)

Climatic diversity and morphological responses of Brant's oak (*Quercus brantii* Lindl.) leaves: A comparative study in five different climatic zones of Iran

Forough Soheili¹, Hamid Reza Naji^{*2}

1. Ph.D. Student of Forest Biological Sciences, Ilam University, Ilam, Iran. E-mail: foroughsoheili@gmail.com

2. Corresponding Author, Associate Prof., Dept. of Forest Sciences, Ilam University, Ilam, Iran. E-mail: h.naji@ilam.ac.ir

Article Info

Article type:

Full Length Research Paper

Article history:

Received: 09.04.2025

Revised: 10.20.2025

Accepted: 10.28.2025

Keywords:

Climatic variability,
Leaf structural traits,
Persian oak,
Plant adaptation

ABSTRACT

Background and Objectives: Understanding the variation patterns in leaf morphological traits under different climatic conditions is essential for predicting plant adaptation and performance. This study aimed to examine the quantitative variation of leaf traits and their interrelationships across five distinct climatic zones of Iran: semi-arid, arid, Mediterranean, semi-humid, and very humid.

Materials and Methods: The Zagros forests in western and southwestern Iran, characterized by diverse climatic conditions and the dominance of Brant's oak (*Quercus brantii*), provide a suitable setting for ecophysiological studies. The research was carried out in Ilam and Kurdistan provinces, which exhibit pronounced differences in temperature and precipitation. Climatic data were collected from 14 meteorological stations, and the de Martonne aridity index was calculated to classify the region into the five climatic zones mentioned above. Leaf sampling was conducted during the summer of 2023, at the peak of the growing season, across 15 sites representing distinct climatic conditions. At each site, five healthy mature trees were selected, and 15 leaves were sampled per tree. Morphological traits, including leaf length, width, fresh and dry weights, leaf area, and water-related indices, were measured using standard instruments and protocols. Data normality was assessed using the Kolmogorov–Smirnov test. Analysis of variance (ANOVA) was performed in SPSS, followed by Duncan's multiple range test for mean comparisons. Pearson correlation was used to examine trait interrelationships, and principal component analysis (PCA) was conducted in R software to identify overall variation patterns.

Results: Leaf length was highest in the very humid zone (8.52 mm) and lowest in the semi-humid zone (7.22 mm). Leaf width peaked in the very humid (4.17 mm) and arid (4.11 mm) zones, while petiole length reached its maximum in the sub-humid zone (1.34 mm). Leaf area was greatest in the Mediterranean (29.85 cm²) and very humid (28.44 cm²) zones. Maximum fresh leaf weight occurred in the very humid zone (0.62 g), whereas maximum dry leaf weight was found in the semi-arid zone (0.41 g). Specific leaf dry weight was highest in the semi-arid zone (0.167

g cm⁻²) and lowest in the Mediterranean zone (0.092 g cm⁻²). Leaf moisture content reached its maximum in the Mediterranean (46.39%) and very humid (44.36%) zones and its minimum in the semi-arid zone (25.54%). Leaf water content (0.28%) and relative leaf water content (36.95%) were both highest in the very humid zone. Correlation analysis showed that most traits were positively and significantly correlated across climatic zones, except petiole length in the semi-arid zone, which displayed no significant association.

Conclusion: The results demonstrate that climatic variation significantly affects leaf morphological traits. Moreover, the close interrelationships among these traits suggest that they operate as part of a coordinated adaptive network, reflecting plant strategies for coping with diverse environmental conditions.

Cite this article: Soheili, Forough, Naji, Hamid Reza. 2025. Climatic diversity and morphological responses of Brant's oak (*Quercus brantii* Lindl.) leaves: A comparative study in five different climatic zones of Iran. *Journal of Wood and Forest Science and Technology*, 32 (3), 1-20.



© The Author(s).

DOI: 10.22069/jwfst.2025.24034.2126

Publisher: Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources

تنوع اقلیمی و پاسخ ریخت‌شناسی برگ بلوط ایرانی (*Quercus brantii* Lindl.): مطالعه تطبیقی در پنج اقلیم متفاوت ایران

فروغ سهیلی¹، حمیدرضا ناجی^{2*}

1. دانشجوی دکتری علوم زیستی جنگل، دانشگاه ایلام، ایلام، ایران. رایانامه: foroughsoheili@gmail.com

2. نویسنده مسئول، دانشیار گروه علوم جنگل، دانشگاه ایلام، ایلام، ایران. رایانامه: h.naji@ilam.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله کامل علمی - پژوهشی	سابقه و هدف: درک الگوهای تغییرات صفات ریخت‌شناسی برگ در شرایط اقلیمی مختلف نقش مهمی در پیش‌بینی سازگاری و عملکرد گیاهان ایفا می‌کند. این پژوهش با هدف بررسی تنوع کمی صفات برگ و همبستگی بین آن‌ها در پنج اقلیم مختلف ایران (نیمه‌خشک، خشک، مدیترانه‌ای، نیمه‌مرطوب و خیلی مرطوب) انجام شد.
تاریخ دریافت: 1404/06/13	
تاریخ ویرایش: 1404/07/28	مواد و روش‌ها: جنگل‌های زاگرس به دلیل تنوع اقلیمی و حضور گونه شاخص بلوط ایرانی (<i>Quercus brantii</i> Lindl.) بستر مناسبی برای مطالعات اکوفیزیولوژیک فراهم می‌آورند. این پژوهش در استان‌های ایلام و کردستان که تفاوت‌های آشکاری در دما و بارندگی دارند انجام شد. داده‌های اقلیمی از 14 ایستگاه هواشناسی گردآوری و شاخص خشکی دومارتن محاسبه شد که منجر به تفکیک منطقه به پنج طبقه اقلیمی شامل خشک، نیمه‌خشک، مدیترانه‌ای، نیمه‌مرطوب و بسیار مرطوب شد. نمونه‌برداری از برگ‌ها در تابستان 1402 و در اوج فصل رشد از 15 منطقه با شرایط اقلیمی متفاوت انجام شد و از هر منطقه پنج درخت بالغ و سالم انتخاب و از هر درخت 15 برگ برداشت شد. صفات ریخت‌شناسی شامل طول، عرض، وزن تر و خشک، مساحت و شاخص‌های مرتبط با آب برگ با دستگاه و محاسبات استاندارد اندازه‌گیری شدند. داده‌ها پس از بررسی نرمال بودن با آزمون کولموگروف-اسمیرنوف، در نرم‌افزار SPSS تحلیل شدند و مقایسه میانگین‌ها با آزمون دانکن انجام گرفت. علاوه بر آن، برای بررسی ارتباط بین صفات، همبستگی پیرسون و برای شناسایی الگوهای کلی، تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA) در محیط R اجرا شد.
واژه‌های کلیدی: بلوط ایرانی، تنوع اقلیمی، سازگاری گیاهان، صفات ساختاری برگ	
	یافته‌ها: طول برگ در اقلیم خیلی مرطوب بیش‌ترین مقدار (8/52 میلی‌متر) و در اقلیم نیمه‌مرطوب کم‌ترین مقدار (7/22) را داشت. عرض برگ در اقلیم خیلی مرطوب (4/17 میلی‌متر) و خشک (4/11) بیش‌ترین و طول دم‌برگ در اقلیم نیمه‌مرطوب (1/34 میلی‌متر)

بالاترین میانگین را نشان داد. بیشترین مساحت برگ در اقلیم‌های مدیترانه‌ای (۲۹/۸۵ سانتی‌مترمربع) و خیلی مرطوب (۲۸/۴۴ سانتی‌مترمربع) ثبت شد. بیشترین وزن تر برگ در اقلیم خیلی مرطوب (۰/۶۲ گرم) و بیشترین وزن خشک برگ در اقلیم نیمه‌خشک (۰/۴۱ گرم) ثبت شد. وزن مخصوص خشک برگ در اقلیم نیمه‌خشک بالاترین (۰/۰۱۶۷ گرم بر سانتی‌مترمربع) و در مدیترانه‌ای کم‌ترین (۰/۰۰۹۲ گرم بر سانتی‌مترمربع) مقدار را داشت. درصد رطوبت وزنی برگ در مدیترانه‌ای (۴۶/۳۹٪) و خیلی مرطوب (۴۴/۳۶٪) بیشترین و در نیمه‌خشک کم‌ترین (۲۵/۵۴٪) مقدار را نشان داد. بیشترین میزان آب برگ (۰/۲۸٪) و بیشترین میزان نسبی آب برگ (۳۶/۹۵٪) در اقلیم خیلی مرطوب ثبت شد. تحلیل همبستگی نشان داد که بیش‌تر صفات در همه اقلیم‌ها به غیر از طول دم‌برگ در اقلیم نیمه‌خشک با یکدیگر همبستگی مثبت و معنادار دارند.

نتیجه‌گیری: یافته‌ها نشان دادند که تفاوت‌های اقلیمی منجر به تغییرات معنی‌دار در صفات ریخت‌شناسی برگ می‌شود و اغلب این صفات به‌صورت یک شبکه عملکردی هماهنگ با یکدیگر تغییر می‌کنند که می‌تواند بیانگر استراتژی‌های سازگاری گیاهان در پاسخ به شرایط محیطی متفاوت باشد.

استناد: سهیلی، فروغ، ناجی، حمیدرضا (۱۴۰۴). تنوع اقلیمی و پاسخ ریخت‌شناسی برگ بلوط ایرانی (*Quercus brantii* Lindl.): مطالعه تطبیقی در پنج اقلیم متفاوت ایران. نشریه پژوهش‌های علوم و فناوری چوب و جنگل، ۳۲ (۳)، ۲۰-۱.

DOI: 10.22069/jwfst.2025.24034.2126



© نویسندگان.

ناشر: دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

مقدمه

صفات ریخت‌شناسی برگ می‌توانند نشان‌دهنده سازگاری گیاه و راهبردهای بهینه‌سازی بهره‌وری با محیط در حال تغییر باشند (1) که ارتباط نزدیکی با رشد گیاه دارند و تأثیرات مهمی بر ساختار و عملکرد اکوسیستم‌ها دارند (2). تغییر در صفات ریخت‌شناسی برگ می‌تواند پایداری ترمودینامیکی، تعادل آب و میزان فتوسنتز گیاهان را تغییر دهد (3)؛ بنابراین، تغییر در صفات ریخت‌شناسی برگ می‌تواند نقش اساسی در مقابله گیاهان با تغییرات محیطی داشته باشد و به‌شدت با تغییرات دما، بارش، تابش و مواد مغذی خاک مرتبط است (4). درک بهتر چگونگی تأثیر تغییرات آب‌وهوا بر صفات ریخت‌شناسی برگ برای پیش‌بینی توزیع گیاهان در اکوسیستم‌ها بسیار مهم است. بررسی مکانیسم‌ها و عوامل محیطی زیربنایی الگوهای مکانی صفات ریخت‌شناسی برگ می‌تواند در درک راهبردهای اکولوژیکی گیاهان کمک کند (5). شواهد متعددی نشان داده‌اند که اندازه برگ تحت تأثیر تغییرات دما در اثر گرمایش جهانی قرار می‌گیرد (6 و 7). همچنین، روابط اندازه برگ با سایر عوامل محیطی مانند بارندگی و نور خورشیدی ممکن است وابسته به مقیاس‌های مکانی و زمانی متفاوت باشد (8). با این حال، گیاهان می‌توانند از نظر ریخت‌شناسی و فیزیولوژیکی به تغییرات در محیط خود پاسخ دهند که ممکن است به آنها اجازه دهد با تغییرات مداوم اقلیمی سازگار شوند (9). به‌عنوان نمونه، ویژگی‌های برگ، به‌صورت درون‌گونه‌ای و بین‌گونه‌ای در گرادیان‌های جغرافیایی متفاوت هستند (10) و در پژوهش‌های گلخانه‌ای و نهالستانی در پاسخ به دما و بارندگی تغییر کرده‌اند (11).

اندازه و شکل برگ بر تعادل انرژی برگ تأثیر می‌گذارد و با شدت باز و بسته شدن روزنه (12)،

نرخ جذب کربن و بهره‌وری (4) همبستگی دارد. برگ‌های کوچک و باریک به دلیل سطح کم‌تر گرما را سریع‌تر از دست می‌دهند و منجر به کاهش دمای برگ و تنش گرما در شرایط آفتابی و گرم می‌شود (13). برگ‌های بزرگ در محیط‌های مرطوب و گرم حوالی خط استوا یافت می‌شوند، درحالی‌که برگ‌های کوچک در محیط‌های خشک و گرم با هم ترکیب می‌شوند و در عرض‌های جغرافیایی و ارتفاعات بالا پراکنش دارند (14). به‌طورکلی، کاهش در اندازه برگ ناشی از تغییر در میزان بارش و دما است که تأثیر دما نمود بیش‌تری دارد (6). علاوه بر این، الگوهای مکانی قابل‌توجهی در شکل برگ وجود دارد. به‌عنوان نمونه، برگ‌ها به‌سمت آب‌وهوای سردتر کوچک‌تر و گردتر می‌شوند (15). اطلاعات مربوط به روابط بین آب‌وهوا و اندازه برگ و تشریح آن در یک زمینه کاربردی خاص برای بازسازی آب‌وهوای گذشته براساس ریخت‌شناسی برگ گیاهان از اهمیت زیادی برخوردار است (16 و 17).

گونه‌های درختی، به‌ویژه آن‌هایی که در زیست‌بوم‌های طبیعی با تنوع اقلیمی گسترده حضور دارند، مدل‌های ارزشمندی برای بررسی پاسخ‌های ریخت‌شناسی برگ به محیط به شمار می‌روند. در این زمینه، بلوط ایرانی (*Quercus brantii* Lindl.) گونه‌ای بومی در ایران، عراق، سوریه، ترکیه و غرب آسیا، مهم‌ترین گونه درختی در منطقه جنگلی زاگرس است (18). این گونه تحت تأثیر تفاوت‌های اقلیمی از نظر دما، بارش و ارتفاع، ممکن است تنوع گسترده‌ای در صفات برگ از خود نشان دهد (19). شرایط اقلیمی به‌عنوان یکی از مهم‌ترین عوامل تعیین‌کننده در شکل‌گیری ویژگی‌های ریخت‌شناسی گیاهان شناخته می‌شود، به‌ویژه صفات برگ که مستقیماً با فرآیندهای فیزیولوژیکی مانند فتوسنتز، تعرق و تبادل

گازها مرتبط هستند. درک تغییرپذیری صفات ریخت‌شناسی برگ در پاسخ به گرادان‌های اقلیمی، نه تنها به شناخت سازوکارهای تطابق گیاهان با تنش‌های محیطی کمک می‌کند، بلکه می‌تواند در برنامه‌ریزی‌های حفاظتی و مدیریت منابع طبیعی نیز مؤثر باشد. با وجود مطالعات گسترده در زمینه اکوفیزیولوژی گیاهان (20، 21 و 22)، داده‌های کمی در مورد تنوع بین‌اقلیمی صفات ریخت‌شناسی برگ در گونه‌های چوبی بومی ایران وجود دارد. در این راستا، سؤال‌های اساسی پژوهش پیش‌رو عبارتند از: آیا صفات ریخت‌شناسی برگ بلوط ایرانی تحت تأثیر اقلیم‌های مختلف تغییر می‌کنند؟ کدام یک از صفات برگ بیش‌ترین حساسیت را نسبت به تغییرات اقلیمی نشان می‌دهد؟ و آیا می‌توان الگوهای مشخصی از سازگاری برگ‌ها را در پاسخ به تنوع اقلیمی استخراج کرد؟

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه: جنگل‌های زاگرس یکی از مهم‌ترین و وسیع‌ترین نواحی جنگلی ایران به شمار می‌آیند که از شمال‌غرب تا جنوب‌غرب کشور امتداد یافته‌اند و نقشی اساسی در تعادل اکولوژیکی، حفاظت خاک، تغذیه آب‌های زیرزمینی و تنوع زیستی ایفا می‌کنند. این ناحیه بر اساس تقسیم‌بندی اقلیمی دومارتون (1926) با ترکیب اقلیم‌های مدیترانه‌ای، مرطوب، نیمه‌مرطوب و نیمه‌خشک (23)، تنوع قابل‌توجهی از گونه‌های گیاهی را در خود جای داده است (24). در میان گونه‌های چوبی، بلوط ایرانی گونه غالب و شاخص این جنگل‌هاست که در شرایط مختلف ارتفاعی، خاکی و اقلیمی گسترش یافته و به‌عنوان گونه‌ای سازگار به تغییرات محیطی، شاخص مناسبی برای مطالعات اکوفیزیولوژیکی

محسوب می‌شود. پژوهش پیش‌رو در استان‌های ایلام و کردستان به‌عنوان دو استان کلیدی به‌ترتیب در زاگرس جنوبی و شمالی که از نظر تنوع توپوگرافی، اقلیمی و پوشش گیاهی تفاوت‌های قابل‌توجهی دارند، انجام شد. استان ایلام دارای اقلیم گرم‌تر و خشک‌تر با میانگین بارندگی کم‌تر نسبت به کردستان است، درحالی‌که استان کردستان دارای زمستان‌های سردتر و بارندگی بیش‌تری است (25). این تفاوت‌ها بستری مناسب برای مطالعه تأثیر تنوع اقلیمی بر ویژگی‌های ریخت‌شناسی برگ بلوط ایرانی فراهم می‌آورد.

تفکیک اقلیمی: در این مطالعه، داده‌های بارش و دمای سالانه از 14 ایستگاه هواشناسی واقع در استان‌های ایلام و کردستان جمع‌آوری شدند (شکل 1). برای طبقه‌بندی شرایط اقلیمی منطقه، شاخص خشکی دومارتن (IdM) با استفاده از رابطه 1 محاسبه شد (23).

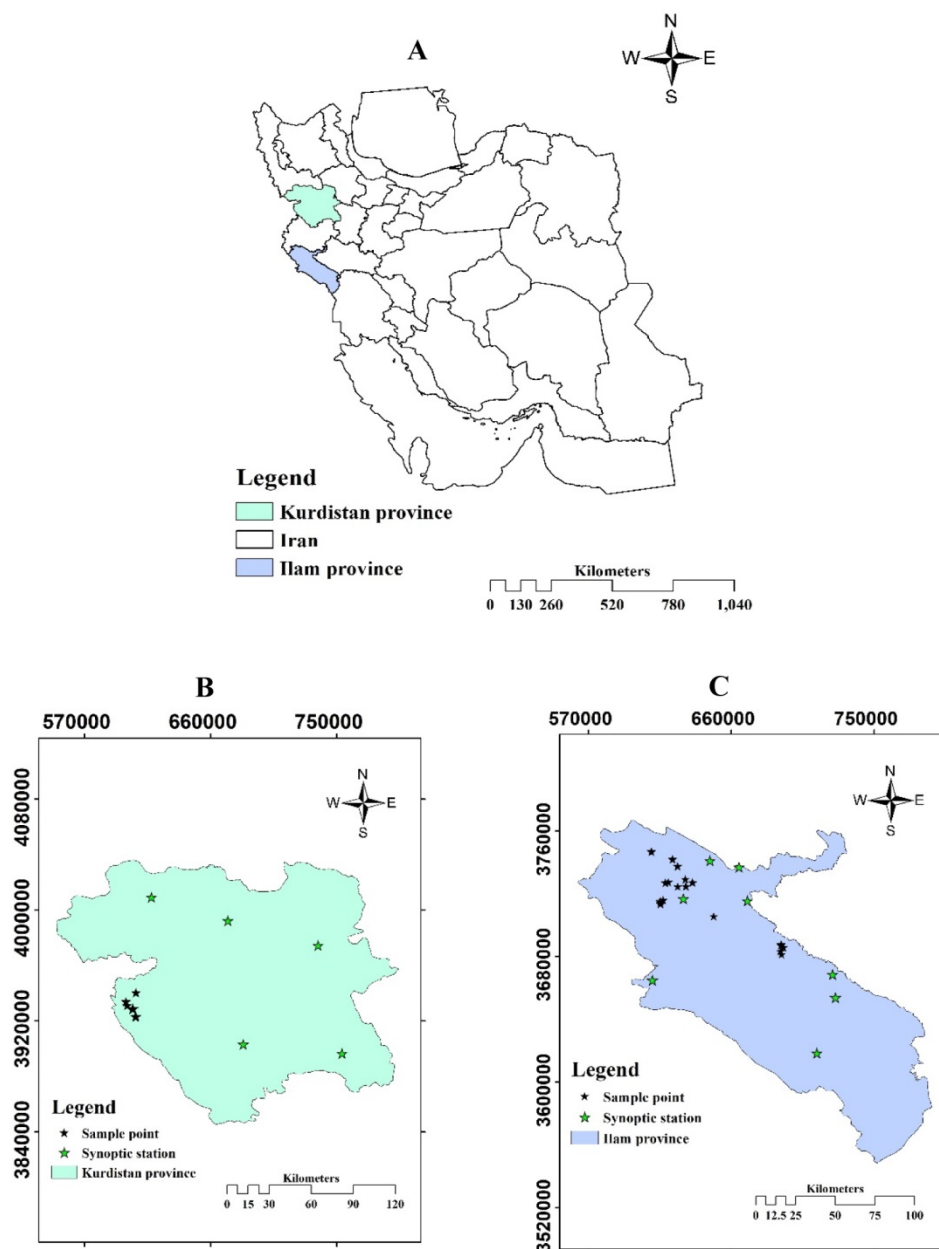
$$\text{IdM} = P / (T + 10) \quad (1)$$

که در آن، P میانگین بارش سالانه برحسب میلی‌متر و T میانگین دمای سالانه برحسب سانتی‌گراد است.

پنج طبقه اقلیمی مجزا بر اساس تقسیم‌بندی زیر مشخص شدند: خشک ($5 < \text{IdM} \leq 10$)، نیمه‌خشک ($10 < \text{IdM} \leq 20$)، مدیترانه‌ای ($20 < \text{IdM} \leq 24$)، نیمه مرطوب ($24 < \text{IdM} \leq 28$)، بسیار مرطوب ($28 < \text{IdM} \leq 35$) (26). نقشه‌های توزیع مکانی برای بارش، دما و شاخص خشکی با استفاده از تکنیک درون‌یابی وزن‌دهی معکوس فاصله (IDW) با پارامتر توانی سه ایجاد شدند که قبلاً به دلیل دقت زیاد آن در مناطق نیمه‌خشک مشابه مانند ترکیه (27) و سایر محیط‌های قابل‌مقایسه (28) اعتبارسنجی

بیش‌تری دارند. ویژگی‌های اقلیمی در هر محل نمونه‌برداری از نقشه‌های درون‌یابی شده استخراج شد (جدول 1 و شکل 1).

شده است. الگوریتم IDW مقادیر را در مکان‌های نمونه‌برداری نشده با وزن‌دهی تأثیر عوامل محیطی تخمین می‌زند. نقاط داده شناخته‌شده نزدیک بر اساس فاصله آن‌ها (29) وزن بیش‌تری می‌گیرند و تأثیر



شکل 1- مناطق مورد مطالعه (ستاره‌های مشکی) و موقعیت ایستگاه‌های هواشناسی (ستاره‌های سبز): نقشه ایران (A)، استان کردستان (B)، استان ایلام (C).

Figure 1. Study areas and the location of meteorological stations; Maps of Iran (A), Kurdistan Province (B), and Ilam Province (C).

جدول 1- ویژگی‌های رویشگاه‌ها و طبقه‌بندی‌های اقلیمی پنج منطقه مورد مطالعه.

Table 1. Characteristics of Sampling sites and climatic classifications of the five study regions.

سایت نمونه‌برداری	استان	ارتفاع از سطح دریا	موقعیت جغرافیایی	طبقه‌بندی اقلیمی	بارش سالانه MAP (mm)	دمای ماهانه MAT (°C)	شاخص خشکی AI
Sampling Site	Province	Altitude (m)	Location	Climate Classification			
سراب ایوان	ایلام	1229	626373 3724526	نیمه مرطوب Semi-humid	675.6	17.3	24.75
Sarab Eyvan	Ilam						
چالانچی ایوان	ایلام	1276	622981 3741849				
Chalanchi Eyvan	Ilam						
خوران ایوان	ایلام	1205	623045 3741868				
Khoran Eyvan	Ilam						
دالاب	ایلام	1668	648987 3705545	مدیترانه‌ای Mediterranean	574	17	21.26
Dalab	Ilam						
ششدار	ایلام	1144	620395 3727248				
Sheshdar	Ilam						
گجان	ایلام	1792	631560 3724586				
Gachan	Ilam						
ریکا صالح‌آباد	ایلام	1008	615204 3714801	خشک Arid	217.2	25.2	6.17
Rika Saleh Abad	Ilam						
تخت خان صالح‌آباد	ایلام	1029	615457 3713701				
Takht-e Khan Saleh Abad	Ilam						
بانروشان صالح‌آباد	ایلام	1091	617053 3715918				
Banroshan Saleh Abad	Ilam						
پشته بدره	ایلام	1050	691791 3681233	نیمه خشک Semi-arid	469.3	22	14.67
Peshteh Badreh	Ilam						
آبهر بدره	ایلام	1010	692990 3685752				
Aabhar Badreh	Ilam						
بدره	ایلام	1041	691350 3687000				
Badreh	Ilam						
کال مریوان	کردستان	1309	606244 3922848	خیلی مرطوب Very humid	886.3	13.40	37.87
Kaal Marivan	Kurdistan						
دره تفی	کردستان	1300	600356 3930949				
Dareh Tafi Marivan	Kurdistan						
سیف مریوان	کردستان	1580	606732 3940264				
Seif Marivan	Kurdistan						

MAT (°C): Mean annual temperature; MAP (mm): Mean annual precipitation; AI: Aridity Index

روش نمونه‌برداری: در این پژوهش، نمونه‌برداری از برگ‌های بلوط ایرانی در تابستان سال 1402 و در فصل رشد، از 15 منطقه مختلف با شرایط اقلیمی متفاوت در استان‌های ایلام و کردستان انجام شد (شکل 1 و جدول 1). انتخاب مناطق بر اساس تفاوت‌های مشخص اقلیمی (دما، بارندگی و ارتفاع) و پراکنش طبیعی و یکدست درختان بلوط انجام شد. در هر منطقه، سه رویشگاه

طبیعی با ترکیب گونه‌ای مشابه، تراکم یکسان و وضعیت تاج پوشش هم‌سطح انتخاب شدند. در هر رویشگاه، 5 درخت سالم، بالغ و بدون علائم تنش، آفات، درون پوسیدگی دور از جاده‌های دسترسی و عبور و مرور مردم و عشایر به‌صورت گزینشی در نظر گرفته شدند. از هر درخت، 15 برگ بالغ و سالم از شاخه‌های میانی در جهت‌های مختلف تاج برداشت

هر یک از اقلیم‌های مورد مطالعه اندازه‌گیری شدند (جدول 2). مساحت برگ (cm^2) با استفاده از دستگاه سطح برگ‌سنج اندازه‌گیری شد (جدول 2). وزن خشک مخصوص برگ (g/cm^2)، رطوبت وزنی برگ (%، میزان آب برگ (% و میزان نسبی آب برگ (% نیز با روش‌های محاسباتی مندرج در جدول 2 محاسبه شدند (30 و 31).

شد تا اثر نورگیری و موقعیت فضایی درون تاج کاهش یابد. پس از جمع‌آوری، شاخ و برگ‌ها در کیسه‌های پلاستیکی برچسب‌دار بسته‌بندی و برای انتقال به آزمایشگاه در جعبه سرد نگهداری شدند.

روش اندازه‌گیری صفات ریخت‌شناسی: طول برگ (mm)، عرض برگ (mm)، طول دم‌برگ (mm)، وزن تر برگ (g) و وزن خشک برگ (g) برای 15 برگ بالغ، سالم و کاملاً توسعه‌یافته از هر درخت در

جدول 2- مشخصات صفات ریخت‌شناسی، واحدهای اندازه‌گیری، روابط و نقش و اهمیت ویژگی مورد مطالعه از برگ درختان بلوط ایرانی (*Quercus brantii*).

Table 2. Morphological characteristics, measuring units, formula and the roles and importance of the features of Brant's oak (*Quercus brantii*) leaves.

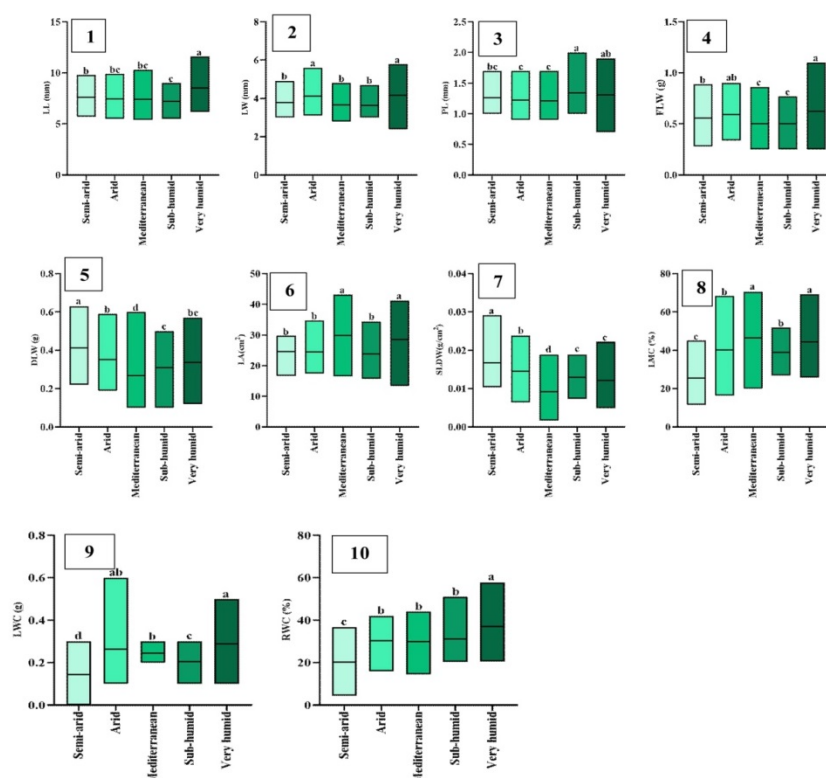
نقش و اهمیت	روش اندازه‌گیری/ رابطه	واحد	صفت
Role and importance	Measurement method/ Formula	Unit	Trait name
نشان‌دهنده اندازه و سطح فتوسنتزی برگ	اندازه‌گیری مستقیم با کولیس	میلی‌متر	طول برگ
Indicates leaf size and photosynthetic surface	Direct measurement with digital calipers (INSIZE) with 0.02 mm accuracy	(mm)	Leaf Length (LL)
تعیین‌کننده ظرفیت تبادل گاز و تعرق	اندازه‌گیری مستقیم با کولیس	میلی‌متر	عرض برگ
Determines gas exchange capacity and transpiration	Direct measurement with digital calipers (INSIZE) with 0.02 mm accuracy	(mm)	Leaf Width (LW)
تأثیرگذار بر موقعیت برگ و نورگیری	اندازه‌گیری مستقیم با کولیس	میلی‌متر	طول دم‌برگ
Affects leaf position and light interception	Direct measurement with digital calipers (INSIZE) with 0.02 mm accuracy	(mm)	Petiole Length (PL)
نمایانگر میزان آب موجود و شادابی برگ	توزین برگ تازه پس از برداشت با ترازو	گرم	وزن تازه برگ
Indicates water content and leaf turgidity	Weighing fresh leaves using A&C-320.3 balance (3Accu LAB, Germany) with 0.0001 g accuracy	(g)	Fresh Leaf Weight (FLW)
شاخص ماده خشک و توانایی تولید فتوستز	توزین برگ پس از خشک‌کردن با ترازو	گرم	وزن خشک برگ
Index of dry matter and photosynthetic capacity	Weighing dried leaves using A&C-320.3 balance (3Accu LAB, Germany) with 0.0001 g accuracy	(g)	Dry Leaf Weight (DLW)
ارتباط با توان تبخیر و ظرفیت جذب نور	اندازه‌گیری با دستگاه شاخص سطح برگ	سانتی‌مترمربع	مساحت برگ
Related to transpiration capacity and light capture	Measured using leaf area meter CL-203 CA Conveyor Attachment	(cm^2)	Leaf Area (LA)
نشان‌دهنده تراکم ماده خشک و استراتژی سازگاری گیاه	وزن خشک برگ / سطح برگ	گرم/سانتی‌مترمربع	وزن خشک مخصوص برگ
Indicates dry matter density and plant adaptation strategy	Calculated as dry leaf weight divided by leaf area	g/cm^2	Special Leaf Dry Weight (SLDW)
معیار میزان آب نسبی برگ و حساسیت به تنش‌های آبی	((وزن تر - وزن خشک) / وزن تر) $\times 100$	درصد	رطوبت وزنی برگ
Measures relative water content and sensitivity to water stress	Calculated using ((Fresh weight - Dry weight) / Fresh weight) $\times 100$	(%)	Leaf Moisture Content (LMC)
مقدار مطلق آب موجود در برگ و نشان‌دهنده وضعیت آب گیاه	وزن تر - وزن خشک	گرم	میزان آب برگ
Absolute water content in the leaf; indicates plant water status	Calculated as Fresh weight - Dry weight	(g)	Leaf Water Content (LWC)
شاخص وضعیت آب برگ؛ نشان‌دهنده ظرفیت نگهداری آب و تحمل به خشکی	وزن تازه - وزن خشک / وزن اشباع - وزن خشک	درصد	میزان آب نسبی برگ
Indicator of leaf water status; shows water retention capacity and drought tolerance	وزن خشک $\times 100$	(%)	Relative Water Content (RWC)
	Calculated using (Fresh weight - Dry weight) / (Saturated weight - Dry weight) $\times 100$		

تجزیه و تحلیل داده‌ها: به منظور بررسی صفات ریخت‌شناسی برگ درختان بلوط ایرانی در پنج اقلیم مختلف: نیمه‌خشک، خشک، مدیترانه‌ای، نیمه‌مرطوب و خیلی‌مرطوب، ابتدا نرمال بودن همه داده‌های حاصل از اندازه‌گیری‌ها با استفاده از آزمون کولموگروف-اسمیرنوف بررسی شدند. تجزیه و تحلیل واریانس داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار SPSS نسخه (27) انجام شد و برای مقایسه میانگین‌ها بین اقلیم‌ها از آزمون دانکن در سطح احتمال 1٪ استفاده گردید. نتایج مقایسه میانگین‌ها به صورت نمودارهای ستونی همراه با حروف معنی‌دار برای هر صفت ارائه شده‌اند. برای بررسی روابط بین صفات ریخت‌شناسی، تحلیل همبستگی پیرسون با استفاده از نرم‌افزار R نسخه (4,2,2) و در هر یک از پنج اقلیم به صورت جداگانه پیاده‌سازی شد. همچنین، برای بررسی الگوی کلی پراکنش صفات و نحوه گروه‌بندی اقلیم‌ها بر اساس ویژگی‌های برگ، از تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA) استفاده شد. این تحلیل نیز در محیط نرم‌افزار R نسخه (4,2,2) انجام شده است.

نتایج

نتایج مقایسه میانگین‌ها (شکل 2) نشان داد که طول برگ در اقلیم خیلی‌مرطوب به‌طور معنی‌داری بیش‌تر (8/52) و در اقلیم نیمه‌مرطوب به‌طور معنی‌داری کمتر (7/22) از سایر اقلیم‌ها بود. عرض برگ به ترتیب در اقلیم‌های خیلی‌مرطوب و خشک به‌طور معنی‌داری بیش‌تر (4/17 و 4/11) از اقلیم‌های نیمه‌خشک، مدیترانه‌ای و نیمه‌مرطوب بود. اقلیم

نیمه‌مرطوب دارای بیش‌ترین میانگین طول دم‌برگ بود (1/34) و تفاوت معنی‌داری با اقلیم‌های نیمه‌خشک، خشک و مدیترانه‌ای نشان داد. بیش‌ترین میانگین وزن تر برگ در اقلیم خیلی‌مرطوب (0/62) مشاهده شد که تفاوت معنی‌داری با اقلیم‌های نیمه‌خشک، نیمه‌مرطوب و مدیترانه‌ای داشت. میانگین وزن خشک برگ در اقلیم نیمه‌خشک به‌طور معنی‌داری بیش‌تر (0/41) از سایر اقلیم‌ها بود و اقلیم مدیترانه‌ای کم‌ترین مقدار را نشان داد (0/26). در اقلیم‌های مدیترانه‌ای و خیلی‌مرطوب به ترتیب میانگین مساحت برگ به‌طور معنی‌داری بیش‌تر (29/85 و 28/44) از اقلیم‌های نیمه‌خشک، خشک و نیمه‌مرطوب بود. میانگین وزن خشک مخصوص برگ در اقلیم نیمه‌خشک به‌طور معنی‌داری بیش‌تر از سایر اقلیم‌ها بود (0/0167) و کم‌ترین مقدار وزن خشک مخصوص برگ در اقلیم مدیترانه‌ای مشاهده شد (0/0092). میانگین درصد رطوبت وزنی برگ به ترتیب در اقلیم‌های مدیترانه‌ای و خیلی‌مرطوب به‌طور معنی‌داری بیش‌تر بود (46/39 و 44/36). همچنین، این مقدار در اقلیم نیمه‌خشک به‌طور معنی‌داری کم‌تر از سایر اقلیم‌ها بود (25/54). بیش‌ترین و کم‌ترین میزان آب برگ به ترتیب در اقلیم‌های خیلی‌مرطوب و نیمه‌خشک مشاهده شد (0/28 و 0/14). در اقلیم خیلی‌مرطوب میانگین میزان نسبی آب برگ بیش‌ترین مقدار را داشت و به‌طور معنی‌داری بیش‌تر از سایر اقلیم‌ها بود (36/95). اقلیم نیمه‌خشک کم‌ترین مقدار را از خود نشان داد که تفاوت معنی‌داری با سایر اقلیم‌ها داشت (20/32).



شکل 2- مقایسه صفات ریخت‌شناسی برگ درختان بلوط ایرانی (*Quercus brantii*) در پنج اقلیم مختلف: نیمه‌خشک (Semi-arid)، خشک (Arid)، مدیترانه‌ای (Mediterranean)، نیمه‌مرطوب (Sub-humid) و خیلی‌مرطوب (Very humid). طول برگ (LL)، عرض برگ (LW)، طول دم‌برگ (PL)، وزن تر برگ (FLW)، وزن خشک برگ (DLW)، سطح برگ (LA)، وزن خشک ویژه برگ (SLDW)، درصد رطوبت برگ (LMC)، محتوای آب برگ (LWC) و ظرفیت نگهداری نسبی آب برگ (RWC). حروف متفاوت روی ستون‌ها نشان‌دهنده تفاوت معنی‌دار بین اقلیم‌ها در سطح احتمال 1٪ بر اساس آزمون دانکن است.

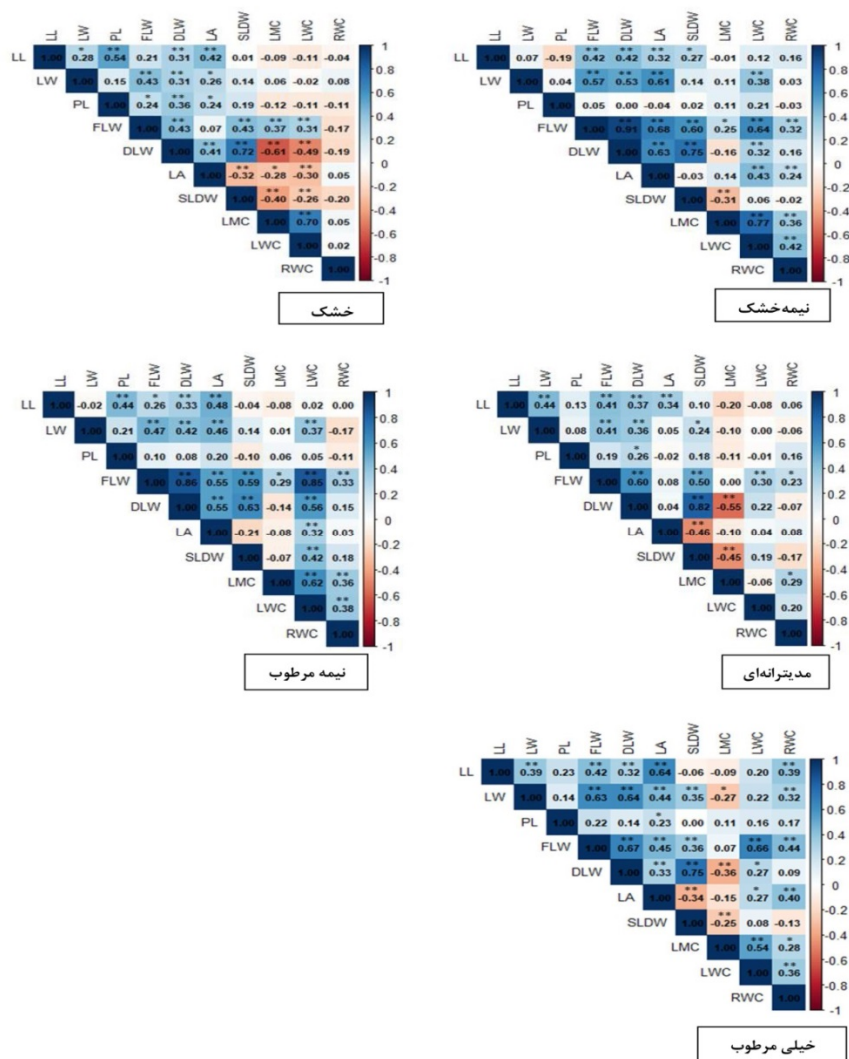
Figure 2. Comparison of morphological traits of Persian oak (*Quercus brantii*) leaves in five different climates: semi-arid, arid, Mediterranean, sub-humid and very humid. Leaf length (LL), leaf width (LW), petiole length (PL), leaf fresh weight (FLW), leaf dry weight (DLW), leaf area (LA), specific leaf dry weight (SLDW), leaf moisture content (LMC), leaf water content (LWC) and leaf relative water holding capacity (RWC). Different letters on the columns indicate significant differences between climates at the 1% probability level based on Duncan's test.

برگ را حفظ کرده بود. وزن خشک برگ نیز در همه اقلیم‌ها با صفات مهم دیگر از جمله وزن تر برگ، طول و عرض برگ و مساحت برگ همبستگی مثبت و معنی‌دار نشان دادند (شکل 3). مساحت برگ در تمامی اقلیم‌ها با صفات وزنی و ابعادی برگ ارتباط مثبت و معنی‌داری داشت. وزن خشک مخصوص برگ در تمامی اقلیم‌ها همبستگی مثبت و معنی‌داری با وزن تر و خشک برگ و مساحت برگ نشان داد. درصد رطوبت وزنی برگ در همه اقلیم‌ها به‌استثنای برخی اختلافات جزئی (مانند همبستگی منفی با وزن خشک برگ در اقلیم مدیترانه) ارتباط معنی‌دار با

نتایج همبستگی صفات ریخت‌شناسی برگ در اقلیم‌های مختلف: طول برگ در همه اقلیم‌های مورد مطالعه (نیمه‌خشک، خشک، مدیترانه، نیمه‌مرطوب و خیلی‌مرطوب) همبستگی مثبت و معنادار با سایر صفات ریخت‌شناسی نشان داد. عرض برگ نیز در تمام اقلیم‌ها به‌طور مداوم با صفات مختلفی مانند طول برگ، وزن تر و خشک برگ و مساحت برگ، همبستگی مثبت و معنی‌دار داشت. وزن تر برگ به‌عنوان یک صفت کلیدی، در تمامی اقلیم‌ها رابطه مثبت و معنی‌دار با طول و عرض برگ، وزن خشک برگ، مساحت برگ، درصد رطوبت وزنی و میزان آب

صفات ریخت‌شناسی ارتباط مثبت و معنی‌دار داشت. صفت طول دم‌برگ در اقلیم‌های خشک، مدیترانه، نیمه‌مرطوب و خیلی‌مرطوب دارای همبستگی معنی‌دار با صفات دیگر بود، اما در اقلیم نیمه‌خشک همبستگی معنی‌داری مشاهده نشد (شکل 3).

صفات وزنی و مساحتی برگ داشت. میزان آب برگ در تمامی اقلیم‌ها با صفات وزنی، ابعادی و درصد رطوبت برگ همبستگی مثبت و معنی‌دار نشان داده (شکل 3). میزان نسبی آب برگ نیز در همه اقلیم‌ها با وزن تر برگ، درصد رطوبت وزنی، مساحت و سایر

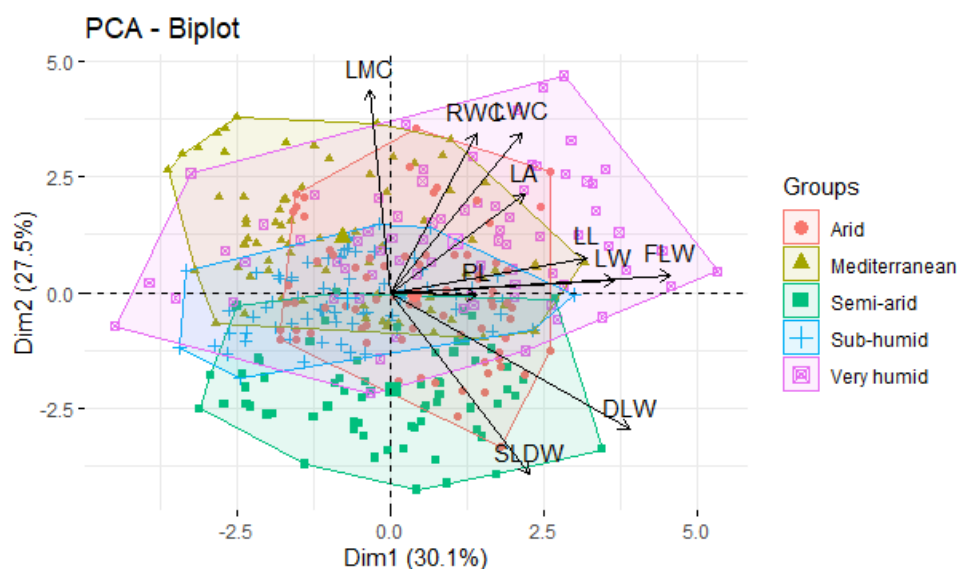


شکل 3- ماتریس همبستگی بین صفات ریخت‌شناسی برگ درختان بلوط ایرانی (*Quercus brantii*) در پنج اقلیم مختلف شامل نیمه‌خشک (Semi-arid)، خشک (Arid)، مدیترانه‌ای (Mediterranean)، نیمه‌مرطوب (Sub-humid) و خیلی‌مرطوب (Very humid). طول برگ (LL)، عرض برگ (LW)، طول دم‌برگ (PL)، وزن تر برگ (FLW)، وزن خشک برگ (DLW)، سطح برگ (LA)، ویژه برگ (SLDW)، درصد رطوبت برگ (LMC)، محتوای آب برگ (LWC) و ظرفیت نگهداری نسبی آب برگ (RWC). علائم * و ** نشان‌دهنده همبستگی معنی‌دار در سطح احتمال 5٪ و علامت ** نشان‌دهنده همبستگی معنی‌دار در سطح احتمال 1٪ می‌باشد.

Figure 3. Correlation matrix between morphological traits of Persian oak (*Quercus brantii*) leaves in five different climates: semi-arid, arid, Mediterranean, sub-humid and very humid. Leaf length (LL), leaf width (LW), petiole length (PL), leaf fresh weight (FLW), leaf dry weight (DLW), leaf area (LA), specific leaf dry weight (SLDW), leaf moisture content (LMC), leaf water content (LWC) and leaf relative water holding capacity (RWC). The symbols * and ** indicate significant correlations at the 5% and 1% probability levels.

صفات نسبت به تغییرات اقلیمی همگرایی نشان می‌دهد. باین‌حال، جهت‌گیری نسبی بردارها نشان داد که صفات مرتبط با ابعاد برگ (LA, FLW, LW) و نیز صفات مرتبط با رطوبت و میزان آب برگ (LL) و نیز صفات مرتبط با رطوبت به سمت خوشه‌های (RWC, LMC, LWC) اقلیم‌های بسیار مرطوب متمایل‌اند، درحالی‌که صفات مرتبط با جرم خشک (DLW, SLDW) تمایل بیشتری به سمت نیمه‌خشک‌ها داشته و طول دم‌برگ (PL) بیش‌تر در اقلیم‌های نیمه‌مرطوب جهت‌گیری داشته است (شکل 4).

همپوشانی و جهت‌گیری صفات ریخت‌شناسی برگ در اقلیم‌های مختلف بر اساس تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA): نتایج حاصل از تحلیل مؤلفه‌های اصلی (Dim 1=30/1%؛ Dim 2=27/5%) نشان داد که بردارهای مربوط به تمامی صفات ریخت‌شناسی برگ، همپوشانی قابل‌توجهی در فضای دو مؤلفه نخست دارند و مرزبندی واضحی میان اقلیم‌ها از نظر این صفات مشاهده نشد. این همپوشانی بیانگر آن است که بسیاری از گونه‌ها دارای ترکیب مشابهی از صفات در اقلیم‌های مختلف هستند، یا دامنه تغییرات



شکل 4- تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA) صفات ریخت‌شناسی برگ درختان بلوط ایرانی (*Quercus brantii*) در پنج اقلیم مختلف: نیمه‌خشک (Semi-arid)، خشک (Arid)، مدیترانه‌ای (Mediterranean)، نیمه‌مرطوب (Sub-humid) و خیلی مرطوب (Very humid). طول برگ (LL)، عرض برگ (LW)، طول دم‌برگ (PL)، وزن تر برگ (FLW)، وزن خشک برگ (DLW)، سطح برگ (LA)، وزن خشک ویژه برگ (SLDW)، درصد رطوبت برگ (LMC)، محتوای آب برگ (LWC) و ظرفیت نگهداری نسبی آب برگ (RWC).

Figure 4. Principal component analysis (PCA) of morphological traits of Persian oak (*Quercus brantii*) leaves in five different climates: semi-arid, arid, Mediterranean, sub-humid and very humid. Leaf length (LL), leaf width (LW), petiole length (PL), leaf fresh weight (FLW), leaf dry weight (DLW), leaf area (LA), specific leaf dry weight (SLDW), leaf moisture content (LMC), leaf water content (LWC) and relative leaf water holding capacity (RWC).

می‌دهند و به‌سرعت راهبردهای خود را برای کسب، استفاده و ذخیره منابع تغییر می‌دهند (32). انعطاف‌پذیری صفات برگ به این معنی است که صفات برگ یک گیاه می‌تواند با محیط سازگار شود که این سازگاری

بحث

برگ‌ها که به‌عنوان اندام‌های اصلی برای جذب انرژی خورشیدی و جذب کربوهیدرات در نظر گرفته می‌شوند، حساسیت بیش‌تری به شرایط محیطی نشان

توسط تعاملات بین گیاه و محیط رشد آن در طول یک تاریخ طولانی مدت تنظیم می‌شود (33).

نتایج مقایسه میانگین‌ها و تجزیه مؤلفه‌های اصلی (شکل‌های 2 و 4) نشان داد که تغییرات صفات ریخت‌شناسی برگ در اقلیم‌های مختلف بیانگر سازگاری‌های اکولوژیکی گیاهان به شرایط دما و بارندگی است. برگ اندامی است که بیش‌ترین سطح تماس را با محیط هوایی داشته و نسبت به بسیاری از تغییرات محیطی حساس‌ترین اندام است. به‌طورکلی، اندازه برگ یک ویژگی ریخت‌شناسی کلیدی در نظر گرفته می‌شود، زیرا اندازه سطح فتوسنتزی و در نتیجه ظرفیت برگ برای جذب نور و حفظ پایداری ترمودینامیکی و تعادل آب را تعیین می‌کند؛ بنابراین، اندازه برگ یک ویژگی حیاتی هنگام بررسی مکانیسم‌های سازگاری گیاه و بهینه‌سازی بهره‌وری در مقیاس‌های مختلف است (34). فیلترینگ محیطی یک فرآیند کلیدی است که ترکیب گونه‌ها را در جوامع طبیعی تعیین می‌کند (35). ویژگی‌های برگ، مانند اندازه برگ، گونه‌های ترکیبی، نتیجه پاسخ و سازگاری گیاهان به مجموعه‌ای از عوامل محیطی در یک بیوم مشخص است.

برگ‌های بلندتر در شرایط مرطوب‌تر معمولاً با افزایش سطح فتوسنتزی و بهره‌برداری بهینه از نور در محیط‌های با تراکم پوشش گیاهی زیاد مرتبط هستند. رابطه بین اندازه برگ و بارش یا سایر عوامل محیطی ممکن است الگوهای متفاوتی را در مقیاس‌های منطقه‌ای یا محلی نشان دهد (36 و 37). عرض برگ نیز در اقلیم‌های بسیار مرطوب و خشک بیش‌ترین مقدار را نشان داد. میچالتز و همکاران (2016) نشان داد که برگ‌های بزرگ باید سریع‌تر از برگ‌های کوچک‌تر به دمای مطلوب برای فتوسنتز برسند؛ اما از آنجایی که این مکانیسم باید در محیط‌های خنک بیش‌ترین مزیت را داشته باشد، به‌نظر می‌رسد قادر به

توضیح رابطه مثبت اندازه برگ با دما در محیط‌هایی که آب به‌شدت محدودکننده نیست، نباشد (38). نتایج عرض برگ در اقلیم خشک با نتایج داده‌های مقیاس جهانی (14) مطابقت داشت. طول دم‌برگ در اقلیم نیمه‌مرطوب بیش‌ترین مقدار را داشت که ممکن است با نیاز به بهینه‌سازی زاویه قرارگیری برگ‌ها و افزایش تهویه در شرایط با رطوبت متوسط و تابش شدیدتر نور مرتبط باشد (39).

اندازه، ویژگی‌های عملکردی و ظرفیت فتوسنتزی برگ تا حد زیادی با اندازه گیاه و توانایی‌های رقابتی در جوامع جنگلی مرتبط هستند (40). وزن و مساحت برگ معیارهای مختلفی برای اندازه برگ هستند و نشان داده شده است که این دو معیار از یک رابطه توانی پیروی می‌کنند (41). وزن تر برگ در اقلیم بسیار مرطوب بیش‌ترین مقدار را داشت. مساحت برگ در اقلیم‌های مدیترانه‌ای و بسیار مرطوب به‌طور معنی‌داری بیش‌تر بود. نتایج مطالعه حاضر با نتایج پن و همکاران (2013) و سان و همکاران (2017) که گزارش دادند توان‌های مقیاس‌بندی برای جرم و مساحت برگ به‌طور قابل‌توجهی افزایش یافته است، مطابقت داشت (42 و 43). مطالعه در منطقه‌ای با آب‌وهوای خشک تا مرطوب در جنوب‌شرقی استرالیا نشان داد که سطح برگ گیاه می‌تواند با بارندگی بیش‌تر افزایش یابد (44). ودوارد (1987) و کرگوت (1998) پیشنهاد کردند که پوشش گیاهی با دستیابی به یک سطح برگ تعادلی که جذب تابش بالاتر را تضمین می‌کند و در عین حال از تخلیه بیش‌ازحد آب خاک به دلیل تبخیر و تعرق بالاتر جلوگیری می‌کند و با محیط محلی خودسازگار می‌شود. این «نظریه تعادل هیدرولوژیکی» پیش‌بینی می‌کند که شاخص سطح برگ یک اکوسیستم که فتوسنتز آن محدود به نور نیست، باید با در دسترس بودن آب آن ارتباط مثبتی داشته باشد (45 و 46). در مقابل، وزن خشک برگ و وزن خشک مخصوص برگ در اقلیم نیمه‌خشک

نتایج همبستگی نشان داد (شکل 3) که در تمامی اقلیم‌های بررسی شده (نیمه‌خشک، خشک، مدیترانه‌ای، نیمه‌مرطوب و بسیار مرطوب)، بین اغلب صفات ریخت‌شناسی برگ همبستگی مثبت و معناداری وجود دارد. این همبستگی‌های پایدار، حتی در شرایط اقلیمی متفاوت، بیانگر آن است که صفات ریخت‌شناسی برگ به صورت یک شبکه عملکردی به هم پیوسته عمل می‌کنند و تغییر در یک صفت، معمولاً با تغییر متناسب در سایر صفات همراه است. این موضوع هم‌راستا با دیدگاه مربوط به صفات عملکردی است که به عنوان پیش‌بینی‌کننده‌های عملکرد گونه‌های مختلف شناخته می‌شوند و معمولاً برای ارزیابی تعاملات گیاه - محیط یا تعیین کمیت پاسخ‌های خاص گیاهان به فرآیندهای اکوسیستم استفاده می‌شوند (54). برای مثال، همبستگی مکرر بین صفات ابعادی برگ (طول و عرض) و صفات وزنی (وزن تر و خشک) در همه اقلیم‌ها نشان‌دهنده نقش اساسی اندازه برگ در تعیین ظرفیت فتوسنتزی، ذخیره و مصرف آب است. صفات عملکردی برگ، مکانیسم‌هایی را که گیاهان به افزایش منابع را پاسخ می‌دهند را روشن می‌کنند. گیاهان با ویژگی‌های مختلف، راهبردهای متفاوتی را در پاسخ به تغییرات محیطی توسعه می‌دهند (55). با این وجود، حتی اگر گیاهان یکسانی در زیستگاه‌های مختلف باشند، ساختار و ویژگی‌های آن‌ها نیز تفاوت‌هایی را نشان می‌دهد که منعکس‌کننده سازگاری گیاهان با زیستگاه خاص است (56). پژوهش‌ها نشان داده است که گیاهان نه تنها در تنظیم صفات عملکردی تکی یا جزئی مانند ریخت‌شناسی برگ، فتوسنتز و مواد مغذی، بلکه در ادغام صفات نیز به تغییرات محیط خارجی پاسخ می‌دهند (57 و 58).

بیش‌ترین مقادیر را نشان دادند. به طور کلی، تحت سرمایه‌گذاری مداوم زیست‌توده در یک برگ، سطح آن بزرگ‌تر می‌شود، ناحیه تماس را برای دریافت نور افزایش می‌دهد که بدون شک پتانسیل فتوسنتز را افزایش می‌دهد (47). افزایش وزن خشک به طور قطع مهم‌ترین راهبرد برای سازگاری با کمبود آب است. افزایش ضخامت برگ و بافت فتوسنتزی در هر مترمربع با استحکام برگ ارتباط مثبت دارد و به تحمل بیش‌تر در برابر شرایط خشکسالی کمک می‌کند (48). وزن خشک نسبتاً بالا در آب‌وهوای مدیترانه‌ای ممکن است نشان‌دهنده تحمل بالای گیاهان در برابر افزایش خشکی باشد. الگوی مشابهی در بوته‌زارهای مدیترانه‌ای (49) و جنگل‌های خشک گرمسیری در شرایط خشکی در سطح وسیع یافت شد. درصد رطوبت وزنی برگ، میزان آب برگ و میزان نسبی آب برگ به ترتیب در اقلیم‌های مدیترانه‌ای و بسیار مرطوب بالاتر بود که بیانگر توانایی این گیاهان در ذخیره آب بیش‌تر در بافت‌ها است. موارد مطرح شده درباره تغییر در ویژگی‌های مختلف برگ بلوط ایرانی مرتبط با شکل 2 را می‌توان در شکل 4 که در واقع تحلیل به مؤلفه‌های اصلی برگ در پنج اقلیم مختلف است را مشاهده کرد. رطوبت برگ‌ها که ناشی از عوامل اقلیمی از جمله بارندگی است، ارتباط نزدیکی با عملکرد گیاه دارد (50). برگ‌های بزرگ می‌توانند راندمان استفاده از نور را بهبود بخشند، اما برای افزایش سطح برگ به زی‌توده بیش‌تری نیز نیاز دارند. با این حال، محتوای آب برگ (که برابر با تفاوت بین وزن تازه و وزن خشک برگ است) نقش مهمی در فتوسنتز ایفا می‌کند. این مقدار با افزایش وزن خشک برگ به طور متناسب افزایش نمی‌یابد (41). محتوای آب برگ با فتوسنتز و راندمان جذب نور مرتبط است. بسیاری از مطالعات این موضوع را برای گونه‌های گیاهی مختلف نشان داده‌اند (51، 52 و 53).

می‌دهد که الگوهای همبستگی صفات ریخت‌شناسی برگ، حتی در شرایط اقلیمی متفاوت، از یک ساختار عملکردی مشترک تبعیت می‌کنند که می‌تواند برای پیش‌بینی پاسخ گونه‌ها به تغییرات اقلیمی مفید باشد.

نتیجه‌گیری کلی

یافته‌های این پژوهش نشان داد که تغییرات اقلیمی تأثیر قابل‌توجهی بر صفات ریخت‌شناسی برگ گیاهان دارد و باعث ایجاد تفاوت‌های معنادار در ویژگی‌هایی مانند طول، عرض، مساحت، وزن تر و خشک و میزان رطوبت برگ می‌شود. همچنین، وجود همبستگی مثبت و معنادار بین بیش‌تر این صفات در اقلیم‌های مختلف، نمایانگر یک شبکه عملکردی هماهنگ است که احتمالاً به‌عنوان راهبردهای سازگاری گیاهان در مواجهه با شرایط محیطی متنوع عمل می‌کند. به‌عبارت دیگر، این تغییرات ریخت‌شناسی برگ می‌تواند نقش کلیدی در بهبود سازگاری و بقای گیاهان در اقلیم‌های متفاوت ایفا کند؛ بنابراین، درک دقیق‌تر این الگوها می‌تواند در مدیریت بهتر منابع طبیعی و حفاظت از گونه‌ها در مواجهه با تغییرات اقلیمی کمک‌کننده باشد.

کمبود رطوبت و تنش آبی سبب کاهش در ویژگی‌های ریخت‌شناسی برگ همانند طول و عرض برگ، مساحت برگ و شاخص سطح برگ می‌شود (59). ثبات روابط بین صفات وزنی (وزن تر، وزن خشک و وزن خشک مخصوص) و شاخص‌های آبی برگ (درصد رطوبت وزنی، میزان آب برگ و میزان نسبی آب برگ) نیز نشان می‌دهد که راهبردهای تخصیص زیست‌توده و مدیریت منابع آبی در برگ‌ها، حتی در طیف گسترده‌ای از شرایط اقلیمی، ساختاری هماهنگ دارند. چنین الگوهایی می‌تواند بازتابی از طیف اقتصادی برگ باشد که در آن صفات ریختی، وزنی و آبی به‌طور هم‌زمان و هم‌جهت در پاسخ به محدودیت‌های محیطی تغییر می‌کنند (60). نتایج این پژوهش نشان داد که طول دم‌برگ تنها در یک اقلیم (نیمه‌خشک) فاقد همبستگی معنادار با سایر صفات ریخت‌شناسی برگ است. این نتایج با یافته‌های پژوهش گونزالس - رودریگز و همکاران (2016) که بر اهمیت نقش مکانیکی و هیدرولیکی دم‌برگ در کاهش خطر مسدود شدن آوندها و بهبود کارایی مصرف آب تحت تنش آبی تأکید داشته‌اند، مغایرت داشت (61). به‌طورکلی، نتایج این پژوهش نشان

منابع

1. Wright, I., Reich, P., Westoby, M., Ackerly, D., Baruch, Z., and Bongers, F., et al. (2004). The worldwide leaf economics spectrum. *Nature*. 428, 821-827.
2. Bjorkman, A., Myers-Smith, I., Elmendorf, S., Normand, S., Rüger, N., & Beck, P., et al. (2018). Plant functional trait change across a warming tundra biome. *Nature*. 562, 57-62.
3. Yang, L., Zhao, H., Zuo, Z., Li, X., Yu, D., & Wang, Z. (2021). Generality and shifts in leaf trait relationships between alpine aquatic and terrestrial herbaceous plants on the Tibetan Plateau. *Frontiers in Ecology and Evolution*. 9, 706237.
4. Li, Y., Zou, D., Shrestha, N., Xu, X., Wang, Q., & Jia, W. (2020). Spatiotemporal variation in leaf size and shape in response to climate. *J. of Plant Ecology*. 13, 87-96.
5. Song, L. L., Tian, Q., Li, G., Li, Z. X., Liu, X., & Gui, J., et al. (2022). Variation in characteristics of leaf functional traits of alpine vegetation in the Three-River headwaters region. *Chinese Ecological Indicators*. 145, 109557.
6. Li, Y., Reich, P. B., Schmid, B., Shrestha, N., Feng, X., Lyu, T., Maitner, B. S., Xu, X., Li, Y., & Zou, D., et al. (2020). Leaf size of woody dicots predicts ecosystem

- primary productivity. *Ecology Letters*. 23, 1003-1013.
7. Li, X., Song, X., Zhao, J., Lu, H., Qian, C., & Zhao, X. (2021). Shifts and plasticity of plant leaf mass per area and leaf size among slope aspects in a subalpine meadow. *Ecology and Evolution*. 11, 14042-14055.
8. Zhang, Z., Sun, J., Liu, M., Shang, H., Wang, J., & Wang, J., et al. (2022). Context-dependency in relationships between herbaceous plant leaf traits and abiotic factors. *Frontiers in Plant Science*. 13, 757077.
9. Everingham, S. E., Offord, C. A., Sabot, M. E. B., & Moles, A. T. (2021). Time-traveling seeds reveal that plant regeneration and growth traits are responding to climate change. *Ecology*. 102 (3), e03272.
10. Moles, A. T., et al. (2014). Which is a better predictor of plant traits: Temperature or precipitation? *J. of Vegetation Science*. 25 (5), 1167-1180.
11. Henn, J. J., Buzzard, V., Enquist, B. J., Halbritter, A. H., Klanderud, K., Maitner, B. S., Michaletz, S. T., Pötsch, C., Seltzer, L., Telford, R. J., Yang, Y., Zhang, L., & Vandvik, V. (2018). Intraspecific trait variation and phenotypic plasticity mediate alpine plant species response to climate change. *Frontiers in Plant Science*. 9, 1548.
12. Tserej, O., & Feeley, K. J. (2021). Variation in leaf temperatures of tropical and subtropical trees are related to leaf thermoregulatory traits and not geographic distributions. *Biotropica*. 53, 868-878.
13. Bhusal, N., Lee, M., Han, A. R., Han, A., & Kim, H. S. (2020). Responses to drought stress in *Prunus sargentii* and *Larix kaempferi* seedlings using morphological and physiological parameters. *Forest Ecology and Management*. 465, 118099.
14. Wright, I. J., Dong, N., Maire, V., Prentice, I. C., Westoby, M., Diaz, S., Gallagher, R. V., Jacobs, B. F., Kooyman, R., Law, E. A., Leishman, M. R., Niinemets, Ü., Reich, P. B., Sack, L., Villar, R., Wang, H., & Wilf, P. (2017). Global climatic drivers of leaf size. *Science*. 357 (6354), 917-921.
15. Peppe, D. J., Royer, D. L., Cariglino, B., Oliver, S. Y., Newman, S., Leight, E., Enikolopov, G., Fernandez-Burgos, M., Herrera, F., & Adams, J. M., et al. (2011). Sensitivity of leaf size and shape to climate: Global patterns and paleoclimatic applications. *New Phytologist*. 190, 724-739.
16. Chen, W. Y., Su, T., Jia, L. B., & Zhou, Z. K. (2019). The relationship between leaf physiognomy and climate based on a large modern dataset: Implications for palaeoclimate reconstructions in China. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*. 527, 1-13.
17. Li, Y., Wang, Z., Xu, X., Han, W., Wang, Q., & Zou, D. (2016). Leaf margin analysis of Chinese woody plants and the constraints on its application to palaeoclimatic reconstruction. *Global Ecology and Biogeography*. 25, 1401-1415.
18. Hassanzad-Navroodi, I., Zarkami, R., Basati, M., & Mohammadi-Limaiei, S. (2015). Quantitative and qualitative characteristics of Persian oak along altitudinal gradation and gradient (Case study: Ilam province, Iran). *J. of Forest Science*. 61 (7), 297-305.
19. Azizi, K., Naji, H., Hosseini Khoshroo, H., & Heidari, M. (2020). Effects of altitude and season on physiological characteristics of Persian oak (*Quercus brantii* Lindl.) leaves in the Zagros forests (Case study: Ilam). *Plant Process and Function*. 9 (35), 101-114.
20. Everingham, S. E., Offord, C. A., Sabot, M. E. B., & Moles, A. T. (2023). Leaf morphological traits show greater responses to changes in climate than leaf physiological traits and gas exchange variables. *Ecology and Evolution*. 14, e10941.
21. Soheili, F., Heydari, M., Woodward, S., & Naji, H. R. (2023a). Adaptive

- mechanism in *Quercus brantii* Lindl. leaves under climatic differentiation: Morphological and anatomical traits. *Scientific Reports*. 13, 3580.
22. Soheili, F., Heydari, M., Woodward, S., Abdul-Hamid, H., & Naji, H. R. (2023b). Adaptive plasticity of morphological and anatomical traits of Brant's oak (*Quercus brantii* Lindl.) leaves under different climates and elevation gradients. *Forest Science and Technology*. <https://doi.org/10.1080/21580103.2023.2182369>.
 23. de Martonne, E. (1926). L'indice d'aridité. *Bulletin de l'Association de Géographes Français*. 3 (9), 3-5.
 24. Sagheb Talebi, K., Sajedi, T., & Pourhashemi, M. (2013). Forests of Iran. *Springer*. <https://doi.org/10.1007/978-94-007-7371-4>.
 25. Kiani, M., Hasan Lashkari, H., & Ghaemi, H. (2019). The effect of Zagros Mountains on rainfall changes of Sudanese low-pressure system in western Iran. *Modeling Earth Systems and Environment*. 5, 1769-1779.
 26. Gebremedhin, M. A., Kahsay, G. H., & Fanta, H. G. (2018). Assessment of spatial distribution of aridity indices in Raya Valley, northern Ethiopia. *Applied Water Science*. 8 (8), 1-8.
 27. Hadi, S. J., & Tombul, M. (2018). Comparison of spatial interpolation methods of precipitation and temperature using multiple integration periods. *J. of the Indian Society of Remote Sensing*. 46 (7), 1187-1199.
 28. Lam, K. C., Bryant, R. G., & Wainright, J. (2015). Application of spatial interpolation method for estimating the spatial variability of rainfall in semiarid New Mexico, USA. *Mediterranean J. of Social Sciences*. 6 (4), 108.
 29. Cooper, R. T. (2019). Projection of future precipitation extremes across the Bangkok metropolitan region. *Heliyon*. 5 (5), e01678.
 30. Garnier, E., & Laurent, G. (1994). Leaf anatomy, specific mass and water content in congeneric annual and perennial grass species. *New Phytologist*. 128 (4), 725-736.
 31. Barr, H. D., & Weatherley, P. E. (1962). A reexamination of the relative turgidity technique for estimating water deficit in leaves. *Australian J. of Biological Sciences*. 15, 413-428.
 32. Tor-ngern, P., Chart-asa, C., Chanthorn, W., Rodtassana, C., Yampum, S., Unawong, W., Nathalang, A., Brockelman, W., Srinoppawan, K., & Chen, Y., et al. (2021). Variation of leaf-level gas exchange rates and leaf functional traits of dominant trees across three successional stages in a Southeast Asian tropical forest. *Forest Ecology and Management*. 489, 119101.
 33. Brooker, R., Brown, L. K., George, T. S., Pakeman, R. J., Palmer, S., Ramsay, L., Schöb, C., Schurch, N., & Wilkinson, M. J. (2022). Active and adaptive plasticity in a changing climate. *Trends in Plant Science*. 27 (7), 717-728.
 34. Li, Y., Reich, P. B., Schmid, B., Shrestha, N., Feng, X., Lyu, T., Maitner, B. S., Xu, X., Li, Y., Zou, D., Tan, Z. H., Su, X., Tang, Z., Guo, Q., Feng, X., Enquist, B. J., Wang, Z., & Morin, X. (2020b). Leaf size of woody dicots predicts ecosystem primary productivity. *Ecology Letters*. 23 (6), 1003-1013.
 35. Diaz, S., Cabido, M., & Casanoves, F. (1998). Plant functional traits and environmental filters at a regional scale. *J. of Vegetation Science*. 9, 113-122.
 36. Costa-Saura, J. M., Martínez-Vilalta, J., Trabucco, A., Spano, D., & Mereu, S. (2016). Specific leaf area and hydraulic traits explain niche segregation along an aridity gradient in Mediterranean woody species. *Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics*. 21, 23-30.
 37. Guittar, J., Goldberg, D., Klanderud, K., Telford, R. J., & Vandvik, V. (2016). Can trait patterns along gradients predict plant community responses to climate change? *Ecology*. 97 (10), 2791-2801.
 38. Michaletz, S. T., Weiser, M. D., McDowell, N. G., Zhou, J., Kaspari, M., Helliker, B. R., & Enquist, B. J. (2016).

- The energetic and carbon economic origins of leaf thermoregulation. *Nature Plants*. 2, 1-9.
39. Niinemets, Ü., & Fleck, S. (2002). Petiole mechanics, leaf inclination, morphology, and investment in support in relation to light availability in the canopy of *Liriodendron tulipifera*. *Oecologia*. 132, 21-33.
 40. Puglielli, G., Crescente, M. F., Frattaroli, A. R., & Gratani, L. (2015). Leaf mass per area (LMA) as a possible predictor of adaptive strategies in two species of *Sesleria* (Poaceae): Analysis of morphological, anatomical and physiological leaf traits. *Annales Botanici Fennici*. 52, 135-143.
 41. Niklas, K. J., Cobb, E. D., Niinemets, Ü., Reich, P. B., Sellin, A., Shipley, B., & Wright, I. J. (2007). 'Diminishing returns' in the scaling of functional leaf traits across and within species groups. *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*. 104, 8891-8896.
 42. Pan, S., Liu, C., Zhang, W. P., Xu, S. S., Wang, N., & Li, Y., et al. (2013). The scaling relationships between leaf mass and leaf area of vascular plant species change with altitude. *PLoS ONE*. 8, e76872.
 43. Sun, J., Fan, R. R., Niklas, K. J., Zhong, Q. L., Yang, F. C., & Li, M., et al. (2017). "Diminishing returns" in the scaling of leaf area vs. dry mass in Wuyi Mountain bamboos. Southeast China. *American J. of Botany*. 104, 993-998.
 44. Mclean, E. H., Prober, S. M., Stock, W. D., Steane, D. A., Potts, B. M., Vaillancourt, R. E., & Byrne, M. (2014). Plasticity of functional traits varies clinally along a rainfall gradient in *Eucalyptus tricarpa*. *Plant, Cell & Environment*. 37, 1440-1451.
 45. Woodward, F. I. (1987). *Climate and Plant Distribution*. Cambridge University Press.
 46. Kergoat, L. (1998). A model for hydrological equilibrium of leaf area index on a global scale. *J. of Hydrology*. 212, 268-286.
 47. Smith, W. K., Vogelmann, T. C., DeLucia, E. H., Bell, D. T., & Shepherd, K. A. (1997). Leaf form and photosynthesis: Do leaf structure and orientation interact to regulate internal light and carbon dioxide? *BioScience*. 47, 785-793.
 48. von Arx, G., Archer, S. R., & Hughes, M. K. (2012). Long-term functional plasticity in plant hydraulic architecture in response to supplemental moisture. *Annals of Botany*. 109, 1091-1100.
 49. de la Riva, E. G., Olmo, M., Poorter, H., Ubera, J. L., & Villar, R. (2016). Leaf mass per area (LMA) and its relationship with leaf structure and anatomy in 34 Mediterranean woody species along a water availability gradient. *PLoS ONE*. 11 (2), e0148788.
 50. Dawson, T. E., & Goldsmith, G. R. (2018). The value of wet leaves. *New Phytol*. 219, 1156-1169.
 51. Huang, W. W., Ratkowsky, D. A., Hui, C., Wang, P., Su, J. L., & Shi, P. J. (2019a). Leaf fresh weight versus dry weight: which is better for describing scaling relationship between leaf biomass and leaf area for broad-leaved plants? *Forests*. 10, 256.
 52. Huang, W. W., Reddy, G. V. P., Li, Y. Y., Larsen, J. B., & Shi, P. J. (2020). Increase in absolute leaf water content tends to keep pace with that of leaf dry mass: Evidence from bamboo plants. *Symmetry*. 12, 1345.
 53. Wang, R. M., He, N. P., Li, S. G., Xu, L., & Li, M. X. (2021). Spatial variation and mechanisms of leaf water content in grassland plants at the biome scale: Evidence from three comparative transects. *Scientific Reports*. 11, 9281.
 54. Damián, X., Fornoni, J., Domínguez, C. A., & Boege, K. (2018). Ontogenetic changes in the phenotypic integration and modularity of leaf functional traits. *Functional Ecology*, 32, 234-246.
 55. Zhu, K., Wang, A., Wu, J., Yuan, F., Guan, D., Jin, C., Zhang, Y., & Gong, C. (2020). Effects of nitrogen additions on mesophyll and stomatal conductance in

- Manchurian ash and Mongolian oak. *Scientific Reports*. 10, 10038.
56. Mao, Q., Lu, X., Mo, H., Gundersen, P., & Mo, J. (2018). Effects of simulated N deposition on foliar nutrient status, N metabolism and photosynthetic capacity of three dominant understory plant species in a mature tropical forest. *Science of the Total Environment*. Pp: 610-611, Pp: 555-562.
57. Liu, N., Zhang, S., Huang, Y., Wang, J., & Cai, H. (2020). Canopy and understory additions of nitrogen change the chemical composition, construction cost, and payback time of dominant woody species in an evergreen broadleaved forest. *Science of the Total Environment*. 727, 138738.
58. Haghighatdoust, A., Azadfar, D., & Shahriyari, B. (2023). Changes in the geometrical morphology of *Fagus orientalis* leaves in the altitudinal gradient. *J. of Wood and Forest Science and Technology*. 30 (1), 45-65. doi: 10.22069/jwfst.2023.20740.1990.
59. Farokhi, N., Azadfar, D., & Saeedi, Z. (2024). A comparison of physiological and morphological responses of *Populus deltoides* clones to different Watering Regimes. *J. of Wood and Forest Science and Technology*. 31 (1), 63-93. doi: 10.22069/jwfst.2024.22026.2051.
60. Gorné, L. D., Díaz, S., Minden, V., Onoda, Y., Kramer, K., Muir, C., Michaletz, S. T., Lavorel, S., Sharpe, J., Jansen, S., Slot, M., Chacon, E., & Boenisch, G. (2022). The acquisitive-conservative axis of leaf trait variation emerges even in homogeneous environments. *Annals of Botany*. 129, 709-722.
61. Gonzalez-Rodriguez, D., Cournède, P. H., & de Langre, E. (2016). Turgidity-dependent petiole flexibility enables efficient water use by a tree subjected to water stress. *J. of Theoretical Biology*. 398 (7), 20-31.