

See discussions, stats, and author profiles for this publication at: <https://www.researchgate.net/publication/395296316>

2025 06 418au

Article *in* Sylwan · September 2025

DOI: 10.26202/sylwan.2025032

CITATIONS

0

READS

13

3 authors:



Gullu Aliyeva

Azerbaijan National Academy of Sciences

19 PUBLICATIONS 19 CITATIONS

SEE PROFILE



Javid Ojaghi

Khazar University

35 PUBLICATIONS 341 CITATIONS

SEE PROFILE



Zumrud Mammadova

Azerbaijan National Academy of Sciences

8 PUBLICATIONS 3 CITATIONS

SEE PROFILE

ORIGINAL PAPER

Analysis of the functional traits of some *Quercus* species under different ecological conditions in Azerbaijan

Gullu Aliyeva^{(1)✉}, Javid Ojaghi⁽²⁾, Zumrud Mammadova⁽¹⁾, Vusala Badalova⁽¹⁾, Vusala Ismayilova⁽¹⁾, Saleh Maharramov⁽¹⁾, Minara Hasanova⁽¹⁾

⁽¹⁾ Ministry of Science and Education of the Republic of Azerbaijan, Institute of Dendrology Azerbaijan, Baku, Mardakan, Sharg 29, Azerbaijan

⁽²⁾ Khazar University, Department of Life Sciences, Baku, Mahsati 41, Azerbaijan

ABSTRACT

Given the ecological importance of forests in combating global warming, there has been increasing attention in recent years to researching *Quercus* species for their ability to withstand drought. The study presented here was conducted to assess the impacts of various water conditions on the functional aspects and genetic diversity of oak species. We compared four *Quercus* species [*Quercus petraea* ssp. *iberica* (Stev.), *Q. macranthera* ssp. *macranthera* (K.Koch) Menitsky, *Q. castaneifolia* C.A.Mey., *Q. robur* ssp. *pedunculiflora* (K.Koch) Menitsky] in different sites of Azerbaijan. Thus, five functional traits (relative water content (RWC), water content (WC), leaf mass per unit area (LMA), specific leaf area (SLA), and succulence (S) related to drought tolerance were measured. Then, cluster analysis based on these functional traits was conducted, and the Euclidean genetic distance index was determined. As the temperature increases and the amount of precipitation decreases, plants are exposed to drought stress, which is accompanied by a decrease in RWC, WC, SLA and S. In contrast, an increase in LMA was observed. This response of the plant to changing environmental conditions reflects the activation of a protective mechanism; the plant is fighting for survival. The conducted analyses reveal significant genetic diversity among oak genotypes, which is formed under the influence of ecological adaptation, geographical distribution, and evolutionary processes.

KEY WORDS

adaptation ability, forest, functional traits, drought, Relative Water Content

Introduction

Drought and heat impose significant stress on trees, impairing their physiological functions. One of the most immediate effects of elevated atmospheric temperatures and increased soil dryness is the disruption of mesophyll integrity and stomatal conductance in leaves, which consequently weaken carbon absorption (Marchin *et al.*, 2022). Drought also disrupts the water balance in trees, leading to their death (Choat *et al.*, 2022). The increasing density and intensity of drought are predicted to contribute to global warming in the future (Rico *et al.*, 1996; Nardini and Pitt, 1999). Heat and drought stresses make plants more liable to other abiotic stress factors.

✉e-mail: bio890@mail.ru

Received: 16 June 2025; Revised: 13 August 2025; Accepted: 18 August 2025; Available online: 5 September 2025

 Open access

©2025 The Author(s). <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>

Therefore, increased sensitivity leads to higher tree mortality, increased wildfire risk, and a decline in biodiversity among plants and animals. Such conditions also change phenology and plant evolution, causing turbulence effects on the ecosystem (Seidl *et al.*, 2017; Gharun *et al.*, 2024). The spatial extent and severity of drought events vary, and their impacts depend on local ecological characteristics of the forests, species-specific temperature and moisture thresholds that limit tree functioning, and adaptation strategies and acclimation of trees to more frequent and intense extreme conditions (Gessler *et al.*, 2020; Eslamdoust *et al.*, 2023).

Given the ecological significance of forests in mitigating global warming, there is a growing attention to studying *Quercus* species to withstand drought (Seneviratne *et al.*, 2021; Röthlisberger and Papritz, 2023). *Quercus* (Fagaceae) is a dominant genus in a large part of Azerbaijan's forests. *Quercus* has high economic significance and rich resources in Azerbaijan. The depiction of oak leaves on the national emblem of Azerbaijan emphasises their importance and highlights their significance to Azerbaijani nature (Mammadov, 2016). In Azerbaijan, which is bordered to the north by the Greater Caucasus Mountains, to the south by the Lesser Caucasus Mountains, and opens to the east onto the Caspian Sea, various climate types predominate, including semi-desert, dry subtropical, temperate, and frigid. In the territory of Hirkan National Park (HNP) *Quercus castaneifolia* C.A.Mey. (chestnut-leaved oak) form pure and mixed forest communities with *Parrotia persica* (DC.) C.A.Mey. and *Carpinus* up to an altitude of 400-500 m above sea level. *Q. castaneifolia* is endemic and valuable species for Hyrcanian Forest (Mammadov and Khalilov, 2002; Menitsky, 2005). *Q. macranthera* ssp. *macranthera* (K.Koch) Menitsky (oriental oak) is found generally at 800-2750 m in the Greater Caucasus (Goygol National Park), Lesser Caucasus (Shaki-Zagatala), Talysh and Nakhchivan geographical regions. *Q. macranthera* forming pure and mixed forests with *Corylus avellana* L., *Sorbus caucasigena* Kom. ex Gatsch., *Acer trautvetteri* Medw., *Carpinus caucasica* Grossh., and *Ulmus* sp. *Q. macranthera* is one of the most drought- and cold-resistant oaks in Southwest Asia. We can see *Q. petraea* ssp. *iberica* (Stev.) (Georgian oak) between 600 and 1800 m altitude. It is a highly drought-resistant species. Georgian oak grows in 2 types of forest belts in the Greater Caucasus (Ismayilli, Gabala) and the Lesser Caucasus: mixed type (with *Ulmus*, *Carpinus*, *Rubus*, *Crataegus*, *Rosa*, *Lonicera*, *Berberis*, *Prunus divaricate* Ledeb., *Fagus*) and oak forest covered with *Vicia*. Natural distribution of *Q. robur* ssp. *pedunculiflora* (K.Koch) Menitsky (pedunculate oak) extends from South-Eastern Europe, in the Balkan Peninsula and Peloponnesos, through Thrace and Anatolia, to Western Asia in the Caucasian Region (Carella, 2013). But in Azerbaijan *Q. robur* ssp. *pedunculiflora* is distributed in the Greater Caucasus and Talysh geographical region at an altitude of 400-700 m above sea level. *Q. robur* subs. *pedunculiflora* is typically found with *Carpinus*, *Fraxinus*, *Alder*, *Tilia*, and *Pistacia* in a large ecosystem (Mammadov and Khalilov, 2002; Menitsky, 2005). Oak wood is characterized by its hardness, aesthetic grain, and resistance to weathering and decay, it is resistant to weathering and rotting. Oak wood is used as a high-quality building material and for household purposes (Sun, 2021). The oak tree plays an important role in soil and water protection and ecological balance (Yang *et al.*, 2018). The bark of oak trees can be used for extracting tannins, and the leaves can be used to support sericulture (Silva *et al.*, 2016; Marc *et al.*, 2021).

Leaves exhibited different morphological and functional traits in different climates and environmental conditions. They are sensitive to changes in environmental conditions (air pollution, soil conditions, drought, direction of wind, temperature, *etc.*). By monitoring plant functions, changes in environmental conditions can be detected at an early stage, and the influence of climate change on biotic systems can be assessed. Studying these differences helps us understand how plants adapt to their environments. RWC estimating the degree of water stress caused by

drought can be physiologically quantified by either the leaf water potential or the relative leaf area (Donovan *et al.*, 2009; Rybníček *et al.*, 2016). The morphological features (specific leaf area, leaf thickness and stomatal density) and physiological traits (RWC, WC, S, antioxidant system and osmotic solutes) of leaves are usually used as important indicators in drought research (Medina *et al.*, 1990, Kruskopf and Flynn 2006; Li *et al.*, 2006, Quaranta *et al.*, 2022)

Specifically, the given paper aimed to evaluate the response and adaptation ability of oak trees to different ecological conditions, analyse functional traits and determine the genetic affinity of the studied samples by these traits. Subsequently, cluster analysis based on these functional traits was conducted and the Euclidean genetic distance index was determined.

Materials and methods

The study was conducted on four *Quercus* species across multiple ecological regions in Azerbaijan (Fig. 1). The study areas are quite different from each other for ecological features (Fig. 2, 3; Table 1).

Geographical information of the sampled sites are given in Table 1. Five of the study areas are natural forests (Shaki, Gabala, Ismayilli, Lankaran) and one of them is a botanical garden (Baku).

Leaf samples were collected from adult trees (average age fluctuating between 55 and 100 years). From each population, 10 trees were selected, and one healthy leaf was collected from each tree. Chestnut-leaved oak leaf samples for the study were collected from Baku and Lankaran,



Fig. 1.

Location of the six study areas in Azerbaijan

The study areas were highlighted in the figure by encircling them.

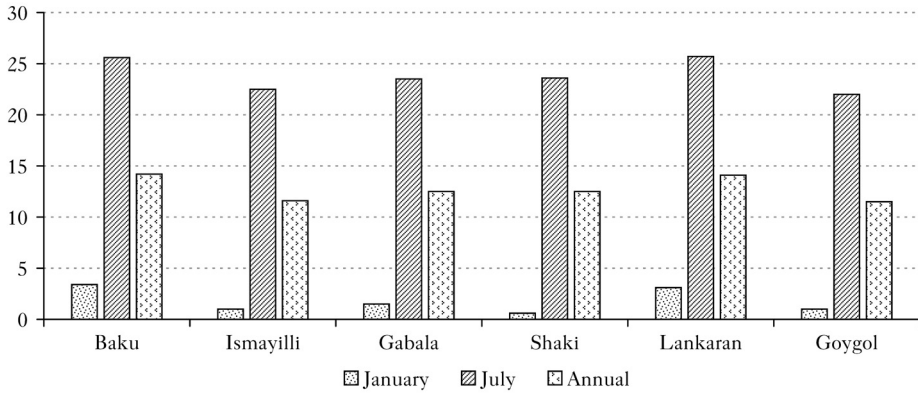


Fig. 2.

Air temperature distribution in the study area

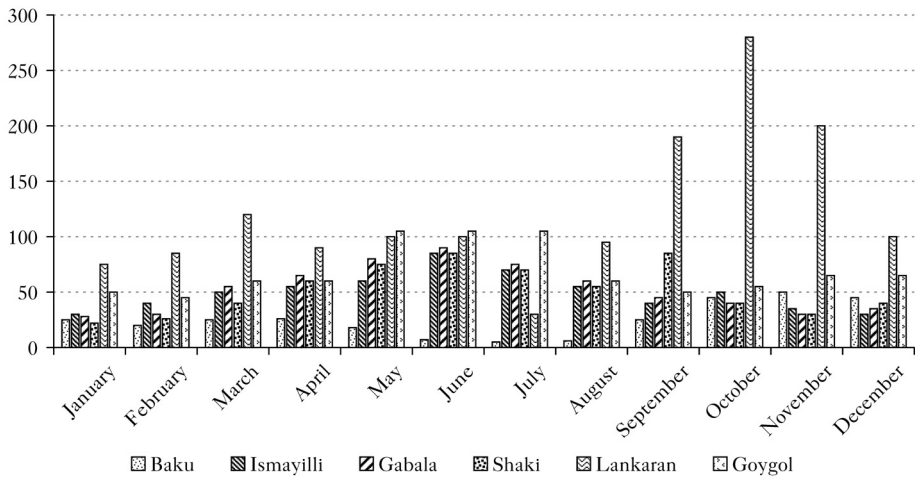
average January, average July, average annual (Mammadov *et al.*, 2009)

Fig. 3.

Monthly averages of rainfall

(Mammadov *et al.*, 2009)

Georgian oak from Ismayilli, Gabala, Sheki and Baku, oriental oak from Goygol and Sheki, and pedunculate oak from Gabala and Baku. Ten individual trees of each species were chosen randomly from each site, and ten leaves were collected for further analysis.

Leaves were washed with tap water and then distilled water, dried with filter paper. The area of fresh leaves (LA) was measured using CI-202 Laser Area Meter (Bio-Scienc Inc., WA, USA). Then leaves were weighed using an electronic compact balance EK-610i (A&D Company, Limited, Tokyo, Japan) with an accuracy of 0.01 g. This weight was taken as fresh weight (FW). Leaves were soaked in distilled water for 24 hours in the dark, after which their saturated weight (SW) was recorded. The leaves were dried at 70°C for 24 h in a thermostat (Termostat TS-1/20 SPU, Russia) these weight was taken as dry weight (DW). In conclusion, the leaf variables of relative water content (RWC), water content (WC), leaf mass per unit area (LMA), specific leaf area (SLA), Succulence (S) were calculated with these data. The sclerophylly indices were estimated by Bussotti *et al.* 2002 (Table 2).

Table 1.

Ecological features of study areas (Museyibov, 1998; Mammadov *et al.*, 2009)

Locality	Study area	Coordinate	Altitude [m]	Substrate
Shaki	Kish	41°11'31"N 47°10'14"E	636	mountain-forest brown, typical
Gabala	Little Pirali	40°58'53"N 47°50'45"E	900	mountain-forest brown, typical
İsmayilli	Basgal	40°47'24"N 48°09'07"E	500-800	flood-plain alluvial meadow
Goygol	Goygol National Park	40°58'95"N 46°32'71"E	2470	mountain-gray-cinnamon dark and ordinary
Lankaran	Hirkan National Park	38°45'13"N 48°51'04"E	1280	yellow-podzol-gley
Baku	Botanical garden	40°23'43"N 49°52'56"E	-28	partially alkaline and salty

Table 2.

Measured leaf functional traits for *Quercus* species

LFTs	Abbreviation	Unit	Formula
Leaf Mass Per Area	LMA	mg·cm ⁻²	LMA=DW/LA
Fresh Weight	FW	mg	
Saturated Weight	SW	mg	
Dry Weight	DW	mg	
Water Content:	WC	%	WC=[1-(DW/FW)]100%
Relative Water Content	RWC	%	RWC=[(FW-DW)/(SW-DW)]100%
Succulence	S	mg·cm ⁻²	S=(FW-DW)/LA
Specific leaf area	SLA	cm ² /mg	SLA=LA/DW
Leaf area	LA	cm ²	

Cluster analysis of oak was performed and a dendrogram was constructed using SPSS program and UPGMA (unweighted pair group with arithmetic average) based on Euclidean genetic distance index according to functional traits.

Results and discussion

Although the physiological parameters of oak leaves and their genetic diversity have been studied in different populations in Azerbaijan (Aliyeva, 2021; Aliyeva *et al.*, 2021a, b), an interspecies comparative analysis of physiological parameters and determination of interspecies genetic distance based on physiological analysis have not been conducted. The results of the study (by Bussotti *et al.*, 2002 method) are presented in Table 3. Populations differ sharply from each other in terms of annual precipitation and annual temperature (Fig. 2, 3).

Foliar moisture parameters of Georgian oak. As seen from Table 3, the highest result of relative water content (86.45%) was observed in the Shaki population, but the lowest result (37.46%) was observed in the Baku population. The noticeable lowest result of water content (8.41%) also was recorded in the Baku population, and the highest result (65.60%) was recorded in the Shaki population. Although the RWC showed a high result in the İsmayilli population (83.38%), we observed the lowest result for LMA, as in the Baku population (1.46 mg·cm⁻²). The highest results according to other functional parameters (LMA, SLA, S) were recorded in the Shaki pop-

Table 3.

Foliar moisture parameters of studied *Quercus* species under different ecological conditions

Species	Population	RWC	WC	LMA	SLA	S
Georgian oak	Ismayilli	83.38 ±10.23	54.26 ±1.45	6.81 ±0.92	92.23 ±15.23	8.08 ±1.32
	Gabala	84.15 ±9.52	62.23 ±6.23	7.16 ±1.35	67.26 ±11.21	8.24 ±0.95
	Shaki	86.45 ±9.81	65.60 ±6.32	7.55 ±1.52	98.27 ±12.30	8.38 ±0.89
	Baku	37.46 ±10.36	8.41 ±2.31	1.46 ±0.90	42.23 ±9.32	6.13 ±1.25
Chestnut-leaved oak	Baku	70.39 ±9.85	40.32 ±9.01	3.77 ±1.21	69.10 ±5.98	5.85 ±1.30
	Lankaran	71.39 ±8.15	58.03 ±8.96	7.42 ±2.01	55.66 ±4.25	7.79 ±1.23
Oriental oak	Goygol	72.54 ±8.60	52.38 ±7.16	6.44 ±1.62	78.10 ±11.23	7.09 ±1.56
	Sheki	85.65 ±11.23	56.23 ±8.21	6.35 ±1.42	80.50 ±12.60	6.52 ±0.95
Pedunculate oak	Gabala	72.54 ±7.52	52.38 ±8.16	6.44 ±1.35	78.10 ±9.63	7.09 ±0.92
	Baku	45.75 ±5.26	16.43 ±3.59	12.48 ±2.48	48.87 ±6.35	2.45 ±0.96

RWC – Relative Water Content, WC – Water Content, LMA – Leaf Mass Per Area, SLA – Specific Leaf Area, S – Succulence, '±' – standard deviation

ulation, too. The slight impact for SLA and S was also shown in the Baku population (Table 3). It can be concluded from the results of the analysis that Georgian oak in the Baku population was exposed to drought stress and water shortage. In the remaining three populations (Ismayilli, Gabala and Sheki) there was a normal water supply for the development of the species. Likewise, foliar moisture parameters of leaves in these populations were almost similar. Leaf variables of RWC, LMA, and S were not significantly different between Ismayilli, Gabala and Sheki populations for Georgian oak, although WC and S were slightly lower in the Ismayilli population than in the other three research sites.

Foliar moisture parameters of chestnut-leaved oak. An analysis was conducted on chestnut-leaved oak trees grown in Baku and Lankaran conditions. Although the monthly averages of rainfall of two populations fluctuate widely, there is not a significant difference in terms of annual temperature (Fig. 2, 3). Although RWC shows approximately the same results in both populations, differences were detected in other physiological parameters. WC, LMA and S parameters rose slightly in the Lankaran population compared to the Baku population. But SLA of Lankaran (55.66 mg·cm⁻²) oak leaves was gradually lower than Baku oak leaves (69.1 mg·cm⁻²). According to other studies, water is a key determining factor of leaf size, whereas temperature is considered less critical in comparison (Peppe *et al.*, 2011; Rybníček, 2016; Eslamdoust *et al.*, 2023). As for our results, the SLA of chestnut oak leaves in Lankaran was lower than in Baku.

Foliar moisture parameters of oriental oak. The values of RWC and WC in the oriental oak population from Shaki were consistently higher compared to the Goygol population. However, the LMA values of oriental oaks were nearly the same, and the values of SLA and S showed very little variation. SLA and S were slightly higher in Shaki than in Goygol (Table 3).

Foliar moisture parameters of pedunculate oak. The ecological conditions of the study areas for pedunculate oak differ gradually. As a result, physiological parameters vary significantly. Most foliar parameters of leaves in the Qabala population were dramatically higher than those in the Baku population. Only the LMA of leaves in the Baku population (12.48 mg/cm²) was noticeably higher than in the Qabala population (6.44 mg/cm²). Pedunculate oak in Baku was exposed to severe drought stress. A decreased water content of plants is a sign of stress conditions (Mukherjee and Agrawal, 2018). We observed a significant negative correlation between the RWC and LMA.

The gradually highest value of all physiological traits was recorded in the Georgian oak (Shaki) sample (RWC – 86.45%, WC – 65.60%, LMA – 7.55 mg·cm⁻², SLA – 98.27 cm², S – 8.38 mg·cm⁻²),

but the sharply lowest value of all physiological traits was recorded in the Georgian oak (Baku) sample (RWC – 37.46%, WC – 8.41%, LMA – 1.46 mg·cm⁻², SLA – 42.23 cm², S – 6.13 mg·cm⁻²).

Climate is one of the main abiotic factors that influence the natural system (Ramírez-Valiente *et al.*, 2015). Differences in physiological traits and signs of the correlation across environments provide evidence for the adaptive significance of a given trait under specific environmental conditions (Danovan, 2009; Shifa *et al.*, 2022).

Based on our data, RWC declined by 49% in the Georgian oak population from Baku. This may be because of the bigger leaves of Georgian oak Shaki, Ismayilli and Gabala compared to Georgian oak Baku. Typically, high RWC is beneficial for regulating cellular turgor pressure and osmotic potential in plants (Mukherjee and Agrawal, 2018). These analyses indicated that reducing specific leaf area (SLA) and increasing leaf size in mesic areas or during drought stress is physically valuable, these traits are key factors for oaks to cope with different water availabilities (Ramírez-Valiente *et al.*, 2015). In our research, LMA was significantly different among populations for all species. LMA reflects the partitioning of value between leaf mass and leaf area. There is a negative correlation between LMA and leaf size. A higher LMA of leaves protects the plant from physical damage and stress (Bilgin *et al.*, 2004; Yalçın, 2018). At the same time, a high LMA is accompanied by reduced photosynthetic rates and water losses by transpiration (Hultine and Marshall, 2000).

Cluster analysis. All studied *Quercus* samples were divided into four main groups based on the Euclidean genetic distance index as a result of cluster analysis (Fig. 4). The first cluster consists of only the Georgian oak (Baku). This genotype was found to be genetically distinct from all other *Quercus* samples in the study.

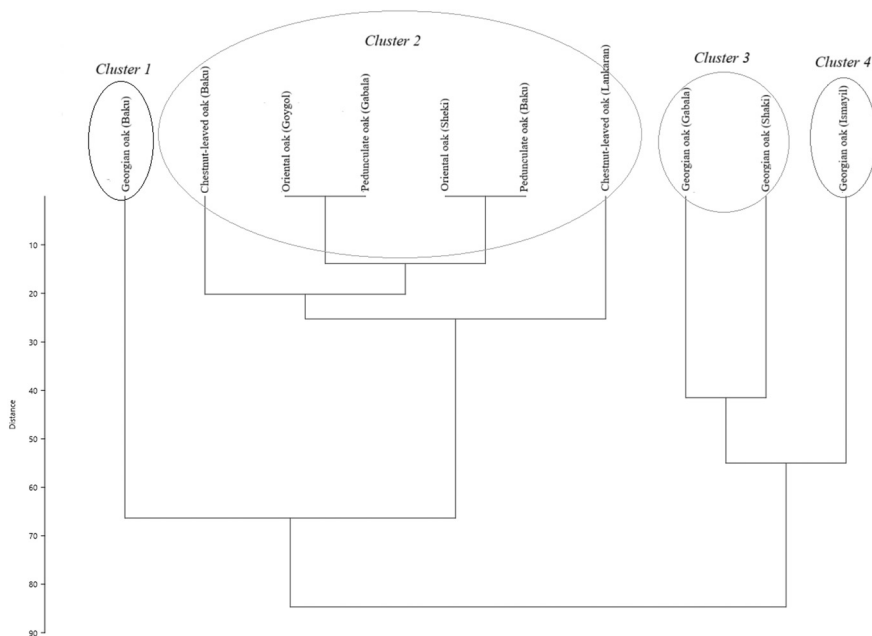


Fig. 4.

Cluster analysis

Q. petraea ssp. *iberica* (Stev.) – Georgian oak, *Q. macranthera* ssp. *macranthera* (K.Koch) Menitsky – oriental oak, *Q. castaneifolia* C.A.Mey. – chestnut-leaved oak, *Q. robur* ssp. *pedunculiflora* (K.Koch) Menitsky – pedunculate oak.

Table 4.
Euclidean genetic distance between studied oak genotype

	Georgian oak (Ismayilli)	Georgian oak (Gabala)	Georgian oak (Shaki)	Georgian oak (Baku)	Chestnut -leaved oak (Baku)	Chestnut -leaved oak (Lankaran)	Oriental oak (Goygol)	Oriental oak (Sheki)	Pedunculate oak (Gabala)	Pedunculate oak (Baku)
Georgian oak Ismayilli)	0	59.36143	50.65341	96.46610	96.73131	98.55655	93.53336	99.37149	93.53336	99.37149
Georgian oak (Gabala)		0	41.51758	64.67362	66.74917	62.06260	63.01006	62.47841	63.01006	62.47841
Georgian oak (Shaki)			0	95.89640	98.14094	98.12630	91.80043	90.31440	91.80043	90.31440
Georgian oak (Baku)				0	56.90190	63.30801	67.80224	71.10284	67.80224	71.10284
Chestnut-leaved oak (Baku)					0	22.63545	15.48330	24.96119	15.48330	24.96119
Chestnut-leaved oak (Lankaran)						0	23.20019	28.74667	23.20019	28.74667
Oriental oak (Goygol)							0	13.88480	0	13.88480
Oriental oak (Sheki)								0	13.88480	0
Pedunculate oak (Gabala)									0	13.88480
Pedunculate oak (Baku)										0

Q. petraea ssp. *iberica* (Stev.) - Georgian oak, *Q. macranthera* ssp. *macranthera* (K.Koch) Menitsky - Oriental oak, *Q. castaneifolia* C.A.Mey. - Chestnut-leaved oak, *Q. robur* ssp. *pedunculiflora* (K.Koch) Menitsky - Pedunculate oak

The second cluster consisted of chestnut-leaved oak (Baku), oriental oak (Goygol), pedunculate oak (Gabala), oriental oak (Sheki), Pedunculate oak (Baku) and chestnut-leaved oak (Lankaran). The second cluster was formed as the largest cluster. It combined the oak genotypes chestnut-leaved oak (Baku), oriental oak (Goygol), pedunculate oak (Gabala), oriental oak (Sheki), pedunculate oak (Baku) and chestnut-leaved oak (Lankaran). Several interesting observations were recorded in this cluster. The genetic distance ($GM=0$) was not detected between the oriental oak (Goygol) and pedunculate oak (Gabala) genotypes, as well as between the oriental oak (Sheki) and pedunculate oak (Baku) genotypes (Table 4). This suggests high physiological similarity, potentially indicating genetic identity or convergence. The maximum genetic distance within this cluster was recorded between chestnut-leaved oak (Lankaran) and other genotypes – pedunculate oak (Baku) and Oriental oak (Sheki), and this distance was $GM=28.74$.

Cluster 3 contains the Georgian oak (Gabala) and Georgian oak (Shaki) genotypes. The genetic distance index $GM=41.51$ was determined between these two genotypes. Only the genotype of Georgian oak (Ismayilli) is in cluster 4. This result proves that the current genotype is significantly different from other oak genotypes by genetic distance. The farthest distance index between the samples was determined between Georgian oak (Ismayilli) and oriental oak (Sheki) with a value of $GM=99.37$, and the same distance was determined between Georgian oak (Ismayilli) and pedunculate oak (Baku) oak samples. Also, a long genetic distance $GM=98.56$ was recorded between the Georgian oak (Ismayil) and chestnut-leaved oak (Lankaran) genotypes. The third cluster included the Georgian oak (Gabala) and Georgian oak (Sheki) genotypes. The genetic distance determined between these two genotypes was $GM=41.51$. This result shows that although they belong to the same species, there are significant genetic differences between these two genotypes.

Only the Georgian oak (Ismayilli) genotype was in the fourth cluster. This fact proves that this genotype is quite different from other oak samples in terms of genetic distance.

In general, the greatest genetic distance between oak genotypes was recorded between Georgian oak (Ismayilli) and oriental oak (Sheki) – $GM=99.37$, Georgian oak (Ismayilli) and Pedunculate oak (Baku) $GM=99.37$ samples. Also, a high genetic distance was observed between Georgian oak (Ismayilli) and Chestnut-leaved oak (Lankaran) genotypes – $GM=98.56$.

These results indicate that Georgian oak (Ismayilli) is the most genetically distinct specimen from other oak genotypes, and its genetic characteristics differ sharply from other oak species. In general, the conducted analyses show that there is significant genetic diversity among oak genotypes and that this diversity is formed under the influence of ecological adaptation, geographical distribution and evolutionary processes. These results constitute an important scientific basis for the protection of oak genetic resources and the development of future breeding programs.

Conclusion

As a result of the study, it can be concluded that environmental factors, particularly water and temperature, have a significant impact on the physiological parameters of leaves. As the temperature increases and the amount of precipitation decreases, plants are exposed to drought stress, which is accompanied by a decrease in RWC, WC, SLA and S. In contrast, an increase in LMA was observed. This response of the plant to changing environmental conditions reflects the activation of a protective mechanism, the plant is fighting for survival. The conducted analyses reveal significant genetic diversity among oak genotypes, which is formed under the influence of ecological adaptation, geographical distribution, and evolutionary processes.

Authors' contributions

G.A. – author of idea, search of suitable references, choosing a method, implementation of the experiment, analysis of results, writing of manuscript; J.O. – cluster analysis, analysis of results; Z.M. – author of idea, consultant; V.B. – collecting leaf samples, conducting experiments, financial sponsor; V.I. – collecting leaf samples, conducting experiments; S.M. – consultant, financial sponsor of field experience; M.H. – organization of field experience

Conflicts of interest

Each of the authors are familiar with the article, and there are not conflicts of interest.

Funding

The research was funded by the Institute of Dendrology in Azerbaijan.

References

- Aliyeva, G., 2021. Variations in leaf morphological and functional traits of *Quercus castaneifolia* C.A.Mey. (*Fagaceae*) in Azerbaijan. *Skvortsovia*, 7 (2): 41-53. DOI: https://doi.org/10.51776/2309-6500_2021_7_2_41.
- Aliyeva, G., Mammadova, Z., Ojaghi, J., 2021. Morphometric leaf variation in *Quercus* of Azerbaijan. *Journal of Bartin Faculty of Forestry*, 23 (2): 579-585. DOI: <https://doi.org/10.24011/barofd.866505>.
- Aliyeva, G., Ojaghi, J., Rustamova, S., 2021. Molecular diversity and phylogeny analysis of Azerbaijan oaks (*Quercus* spp.) revealed by RAPD markers. *Caspian Journal of Environmental Sciences*, 19 (3): 457-468. DOI: <https://doi.org/10.22124/CJES.2021.4932>.
- Bilgin, A., Yalçın, E., Kutbay, H.G., Kök, T., 2004. Foliar N and P dynamics of *Heracleum platytaenium* (Apiaceae) in relation to edaphic characteristics along an elevation gradient in northern Turkey. *Annales Botanici Fennici*, 41 (2): 85-93.
- Bussotti, F., Bettini, D., Grossoni, P., Mansuino, S., Nibbi, R., Soda, C., Tani, C., 2002. Structural and functional traits of *Quercus ilex* in response to water availability. *Environmental and Experimental Botany*, 47 (1): 11-23. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0098-8472\(01\)00111-3](https://doi.org/10.1016/S0098-8472(01)00111-3).
- Carella, R., 2013. First observation of *Quercus pedunculiflora* C. Koch in the Italian Peninsula. *Journal Forest Science*, 59 (3): 130-135. DOI: <https://doi.org/10.17221/58/2012-JFS>.
- Choat, B., Brodribb, T.J., Brodersen, C.R., Duursma, R.A., López, R., Medlyn, B.E., 2022. Triggers of tree mortality under conductance and drought-induced mortality risk in vulnerable plant species. *Global Change Biology*, 28: 1133-1146. DOI: <https://doi.org/10.1111/gcb.15976>.
- Donovan, L.A., Ludwig, F., Rosenthal, D.M., Rieseberg, L.H., Dudley, S.A., 2009. Phenotypic selection on leaf ecophysiological traits in *Helianthus*. *New Phytologist*, 183: 868-879 DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2009.02916.x>.
- Eslamdoust, J., Hosseini, S., Kardel, F., 2023. Responses in leaf water status of *Quercus castaneifolia* C.A.Mey and *Carpinus betulus* L. exposed to cement dust pollution in Northern Iran. *Journal of Forest Science*, 69 (8): 325-333. DOI: <https://doi.org/10.17221/14/2023-JFS>.
- Gessler, A., Bottero, A., Marshall, J., Arend, M., 2020. The way back: Recovery of trees from drought and its implication for acclimation. *New Phytologist*, 228 (6): 1704-1709. DOI: <https://doi.org/10.1111/nph.16703>.
- Gharun, M., Shekhar, A., Jingfeng, X., Xing, L., Buchman, N., 2024. Effect of the 2022 summer drought across forest types in Europe. *Biogeosciences*, 21: 5481-5494. DOI: <https://doi.org/10.5194/bg-21-5481-2024>.
- Kruskopf, M., Flynn, K., 2006. Chlorophyll content and fluorescence responses cannot be used to gauge reliably phytoplankton biomass, nutrient status or growth rate. *New Phytologist*, 169: 525-536. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2005.01601.x>.
- Li, R., Guo, P., Baum, M., Grando, S., Ceccarelli, S., 2006. Evaluation of chlorophyll content and fluorescence parameters as indicators of drought tolerance in barley. *Agricultural Sciences in China*, 5 (10): 751-757. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1671-2927\(06\)60120-X](https://doi.org/10.1016/S1671-2927(06)60120-X).
- Mammadov, T., 2016. Dendroflora of Azerbaijan. Baku: Elm, 400 pp.
- Mammadov, Q., Khalilov, M., 2002. Forests of Azerbaijan. Baku: Elm, 472 pp.
- Mammadov, G.Sh., Khalilov, M.Yu., Mammadova, S.Z., 2009. Ecological atlas of the Azerbaijan Republic. Baku: Baku Cartographic Factory, 156 pp.
- Marc, R., Niculae, M., Páll, E., Mureşan, V., Mureşan, A., Tanislav, A., Puşcaş, A., Mureşan, C.C., Cerbu, C., 2021. Red oak (*Quercus rubra* L.) fruits as potential alternative for cocoa powder: Optimization of roasting conditions, antioxidant, and biological properties. *Forests*, 12 (8): 1088. DOI: <https://doi.org/10.3390/f12081088>.

- Marchin, R., Backes, D., Ossola, A., Leishman, M., Tjoelker, M., Ellsworth, D., 2022. Extreme heat increases stomatal conductance and drought-induced mortality risk in vulnerable plant species. *Global Change Biology*, 28 (3): 1133-1146. DOI: <https://doi.org/10.1111/gcb.15976>.
- Medina, E., Garcia, V., Cuevas, E., 1990. Sclerophylly and oligotrophic environments: Relationships between leaf structure, mineral nutrient content, and drought resistance in tropical rain forests of the Upper Rio Negro Region. *Biotropica*, 22 (1): 51-64. DOI: <https://doi.org/10.2307/2388719>.
- Menitsky, Y., 2005. Oaks of Asia. USA: Science Publishers of Enfield Press, 549 pp.
- Mukherjee, A., Agrawal, M., 2018. Use of GLM approach to assess the responses of tropical trees to urban air pollution in relation to leaf functional traits and tree characteristics. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 152: 42-54. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2018.01.038>.
- Museyibov, M., 1998. Physical geography of Azerbaijan. Baku: Maarif, 440 pp.
- Nardini, A., Pitt, F., 1999. Drought resistance of *Quercus pubescens* as a function of root hydraulic conductance, xylem embolism and hydraulic architecture. *New Phytologist*, 143: 485-493. DOI: <https://doi.org/10.1046/j.1469-8137.1999.00476.x>.
- Peppe, D.J., Royer, D.L., Cariglino, B., Oliver, S.Y., Newman, S., Leight, E., Wright, I.J., 2011. Sensitivity of leaf size and shape to climate: Global patterns and paleoclimatic applications. *New Phytologist*, 190 (3): 724-739. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2010.03615.x>.
- Quaranta, L., Di Marzio, P., Di Pietro, R., Ferretti, F., Di Salvatore, U., Fortini, P., 2022. Analysis of the functional traits of *Quercus cerris* L. seedlings in the Molise region (southern Italy) *Plant Sociology*, 59 (1): 11-24. DOI: <https://doi.org/10.3897/pls2022591/02>.
- Ramírez-Valiente, J.A., Valladares, F., Delgado, A., Nicotra, A.B., Aranda, I., 2015. Understanding the importance of intrapopulation functional variability and phenotypic plasticity in *Quercus suber*. *Tree Genetics & Genomes*, 11: 35. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11295-015-0856-z>.
- Rico, M., Gallego, H., Moreno, G., Santa Regina, I., 1996. Stomatal response of *Quercus pyrenaica* Willd to environmental factors in two sites differing in their annual rainfall (Sierra de Gata, Spain). *Annales des Sciences Forestières*, 53: 221-234. DOI: <https://doi.org/10.1051/forest:19960205>.
- Röthlisberger, M., Papritz, L., 2023. Quantifying the physical processes leading to atmospheric hot extremes at a global scale. *Nature Geoscience*, 16: 210-216 DOI: <https://doi.org/10.1038/s41561-023-01126-1>.
- Rybníček, M., Čermák, P., Prokop, O., Žid, T., Trnka, M., Kolář, T., 2016. Oak (*Quercus* spp.) response to climate differs more among sites than among species in central Czech Republic. *Dendrobiology*, 75: 55-65. DOI: <http://dx.doi.org/10.12657/denbio.075.006>.
- Seidl, R., Thom, D., Kautz, M., Martin-Benito, D., Peltoniemi, M., Vacchiano, G., Wild, J., Ascoli, D., Petr, M., Honkaniemi, J., Lexer, M.J., Trotsiuk, V., Mairota, P., Svoboda, M., Fabrika, M., Nagel, T.A., Reyser, C.P.O., 2017. Forest disturbances under climate change. *Nature Climate Change*, 7: 395-402. DOI: <https://doi.org/10.1038/nclimate3303>.
- Seneviratne, S.I., Zhang, X., Adnan, M. *et al.*, 2021. Weather and climate extreme events in a changing climate. In: V. Masson-Delmotte *et al.*, eds. *Climate change 2021: The physical science basis, contribution of working group to the sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change*. Cambridge, United Kingdom and New York: Cambridge University Press, pp. 1513-1766. DOI: <https://doi.org/10.1017/9781009157896.013>.
- Shifa, X., Yangdong, W., Yicun, C., Ming, G., Yunxiao, Z., Liwen, W., 2022. Effects of drought stress and rehydration on physiological and biochemical properties of four oak species in China. *Plants*, 11 (5): 679. DOI: <https://doi.org/10.3390/plants11050679>.
- Silva, S., Costa, E., Borges, A., Carvalho, A., Monteiro, M., Pintado, M., 2016. Nutritional characterization of acorn flour (a traditional component of the Mediterranean gastronomic folklore). *Journal of Food Measurement and Characterization*, 10: 584-588. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11694-016-9340-1>.
- Sun, J., Shi, W., Wu, Y., Ji, J., Feng, J., Zhao, J., Shi, X., Du, C., Chen, W., Liu, J., 2021. Variations in acorn traits in two Oak species: *Quercus mongolica* Fisch. ex Ledeb. and *Quercus variabilis* Blume. *Forests*, 12 (12): 1755. DOI: <https://doi.org/10.3390/f12121755>.
- Yalçın, E., 2018. Ekosistemlerde yaprädin ekolojik fonksiyonlari. [Leaf ecological functions in ecosystems]. *Black Sea Journal of Engineering and Science*, 1 (2): 68-82.
- Yang, J., Vázquez, L., Feng, L., Liu, Z., Zhao, G., 2018. Climatic and soil factors shape the demographical history and genetic diversity of a deciduous Oak (*Quercus liaotungensis*) in Northern China. *Frontiers Plant Science*, 9: 1534. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.01534>.

STRESZCZENIE

Analiza cech funkcjonalnych kilku gatunków dębów w różnych warunkach ekologicznych w Azerbejdżanie

Susza i upały wywierają niekorzystny wpływ na drzewa. Natychmiastowym skutkiem wzrostu temperatury powietrza i spadku wilgotności gleby jest uszkodzenie mezofilu i przewodności szparkowej liści, co w konsekwencji osłabia absorpcję węgla (Marchin i in., 2022). Susza zaburza również gospodarkę wodną drzew, prowadząc do ich obumierania (Choat i in., 2022). Przewiduje się, że rosnący zakres przestrzenny i intensywność susz przyczynią się w przyszłości do nasilenia zjawiska globalnego ocieplenia (Rico i in., 1996; Nardini i Pitt, 1999). Stres związany z upałami i suszą zwiększa podatność roślin na inne abiotyczne czynniki stresowe. W związku z tym zwiększona wrażliwość prowadzi do wyższej śmiertelności drzew, rosnącego ryzyka pożarów lasów oraz spadku bioróżnorodności roślin i zwierząt. Takie warunki zmieniają również fenologię i ewolucję roślin, powodując zaburzenia w ekosystemie (Seidl i in., 2017; Gharun i in., 2024). Zakres przestrzenny i nasilenie zjawiska suszy są różne, a skutki zależą od lokalnych cech ekologicznych lasów, specyficznych dla gatunków wartości progowych temperatury i wilgotności, które ograniczają funkcjonowanie osobników, a także strategii adaptacyjnych i aklimatyzacji drzew do częstszych i intensywniejszych warunków ekstremalnych (Gessler i in., 2020; Eslamdoust i in., 2023).

Zrozumienie ekologicznego znaczenia lasów w walce z globalnym ociepleniem w przyszłości zwiększa zainteresowanie badaniami nad gatunkami z rodzaju *Quercus* pod kątem ich odporności na suszę (Seneviratne i in., 2021; Röthlisberger i Papritz, 2023). *Quercus* (*Fagaceae*) jest dominującym rodzajem w dużej części lasów Azerbejdżanu. Ma on duże znaczenie gospodarcze i bogate zasoby w tym kraju. Liście dębu widnieją w godle państwowym Azerbejdżanu, co podkreśla jego znaczenie dla azerbejdżańskiej przyrody (Mammadov, 2016). Kraj ten graniczy od północy z Wielkim Kaukazem, od południa z Małym Kaukazem, a od wschodu z Morzem Kaspijskim. Dominuje tu klimat półpustynny, suchy subtropikalny, umiarkowany i mroźny. Na terenie Parku Narodowego Hirkan (HNP) dąb kasztanolistny *Q. castaneifolia* tworzy jednogatunkowe lub mieszane zbiorowiska leśne wraz z parocją perską *Parrotia persica* (DC.) C.A.Mey oraz grabem *Carpinus* rosnące do wysokości 400-500 m n.p.m. *Q. castaneifolia* jest gatunkiem endemicznym i cennym dla Lasu Hyrkańskiego (Mammadov i Khalilov, 2002; Menitsky, 2005). Inny gatunek, dąb kaukaski *Q. macranthera*, występuje na ogół na wysokości 800-2750 m w regionach geograficznych Wielkiego Kaukazu (Park Narodowy Goygol), Małego Kaukazu (Shaki-Zagatala), Tałyszu oraz Nachiczewania. *Q. macranthera* tworzy jednogatunkowe lub mieszane drzewostany z jarzębem pospolitym *Sorbus caucasigena* (*Sorbus aucuparia*), klonem Trautvettera *Acer trautvetteri*, grabem kaukaskim *Carpinus caucasica*, wiązami *Ulmus* oraz leszczyną *Corylus avellana*. *Q. macranthera* to jeden z najbardziej odpornych na suszę i zimno gatunków dębów w Azji Południowo-Zachodniej. Na wysokości 600-1800 m n.p.m. rośnie natomiast dąb gruziński *Q. petraea* ssp. *iberica*. Jest to gatunek wysoce odporny na suszę. Dąb gruziński rośnie w 2 typach pasów leśnych na Wielkim Kaukazie (Ismayilli, Gabala) i Małym Kaukazie: w drzewostanach mieszanych (z gatunkami z rodzajów *Ulmus*, *Carpinus*, *Rubus*, *Crataegus*, *Rosa*, *Lonicera*, *Berberis* i *Fagus* oraz *Prunus divaricata*), a także w drzewostanach dębowych porośniętych różnymi gatunkami wyki *Vicia*. Naturalny zasięg występowania dębu szypułkowego *Q. robur* ssp. *pedunculiflora* rozciąga się z kolei od Europy Południowo-Wschodniej, na Półwyspie Bałkańskim i Peloponezie, poprzez Trację i Anatolię, aż po Azję Zachodnią w regionie Kaukazu (Carella, 2013). W Azerbejdżanie *Q. robur* ssp. *pedunculiflora*

występuje w rejonie Wielkiego Kaukazu i Tałyszu na wysokości 400-700 m n.p.m. Tworzy wielkopowierzchniowe drzewostany wraz z gatunkami z rodzajów *Carpinus*, *Fraxinus*, *Alder*, *Tilia* i *Pistasia* (Mammadov i Khalilov, 2002; Menitsky, 2005). Drewno dębowe ma twardą i piękną fakturę oraz jest odporne na warunki atmosferyczne i gnicie, więc jest wykorzystywane jako wysokiej jakości materiał budowlany, a także na potrzeby gospodarstw domowych (Sun, 2021). Dęby odgrywają ważną rolę w ochronie gleby i wody oraz zachowaniu równowagi ekologicznej (Yang i in., 2018). Kora tych drzew może być stosowana do ekstrakcji garbników, a liści używa się w jedwabnictwie (Silva i in., 2016; Marc i in., 2021).

Liście dębów wykazują zróżnicowane cechy morfologiczne i funkcjonalne w różnych klimatach i warunkach środowiskowych. Są wrażliwe na zmiany warunków środowiskowych (zanieczyszczenie powietrza, warunki glebowe, susza, kierunek wiatru, temperatura itp.). Monitorując funkcje roślin, można wykryć zmiany warunków środowiskowych na wczesnym etapie i ocenić wpływ zmian klimatu na systemy biotyczne. Badanie tych różnic pomaga zrozumieć, w jaki sposób rośliny adaptują się do otaczającego je środowiska. Względna zawartość wody można określić fizjologicznie na podstawie potencjału wodnego liści lub względnej powierzchni liścia (metoda RWC) (Donovan, 2009; Rybníček i in., 2016). Cechy morfologiczne liści (powierzchnia, grubość, gęstość aparatów szparkowych) oraz ich cechy fizjologiczne (RWC, WC, S, układ antyoksydacyjny i zawartość substancji osmotycznych) są zazwyczaj wykorzystywane jako ważne wskaźniki w badaniach nad suszą (Medina i in., 1990; Kruskopf i Flynn, 2006; Li i in., 2006; Quaranta i in., 2022).

Celem niniejszej pracy była ocena reakcji i zdolności adaptacyjnych dębów do zróżnicowanych warunków ekologicznych, analiza ich cech funkcjonalnych oraz określenie powinowactwa genetycznego badanych okazów pod względem tych cech. Następnie przeprowadzono analizę skupień opartą na tych cechach funkcjonalnych i wyznaczono euklidesowy wskaźnik dystansu genetycznego.

Badania przeprowadzono na 4 gatunkach dębów występujących w różnych częściach Azerbejdżanu (ryc. 1). Badane obszary znacznie różnią się od siebie pod względem cech ekologicznych (ryc. 2 i 3; tab. 1). Dane geograficzne badanych miejsc przedstawiono w tabeli 1. Obszarami badawczymi były lasy naturalne (Shaki, Gabala, Ismayilli, Goygol, Lankaran), a także ogród botaniczny (Baku). Próbkę liści do badania pobrano z drzew dojrzałych (średni wiek wahał się od 55 do 100 lat). Próbkę liści dębu kasztanolistnego pobrano z Baku i Lankaran, dębu gruzińskiego z Ismayilli, Gabali, Shaki i Baku, dębu kaukaskiego z Goygol i Shaki, a dębu szypułkowego z Gabali i Baku. W każdej lokalizacji wybrano losowo 10 osobników danego gatunku, z których następnie pobrano 10 liści do dalszej analizy. Liście umyto wodą z kranu, a następnie wodą destylowaną, po czym wysuszone bibułą filtracyjną. Powierzchnię świeżych liści (LA) mierzono za pomocą miernika powierzchni CI-202 LESER (USA). Następnie liście zważono za pomocą wagi elektronicznej (EK-610i) z dokładnością do 0,01 g – masę tę przyjęto jako świeżą (FW). Liście moczone w wodzie destylowanej przez 24 godziny w ciemności, po czym uzyskaną po tym czasie masę przyjęto jako masę nasyczoną (SW). Następnie liście suszono w temperaturze 70°C przez 24 godziny w termostacie, po czym ich masę przyjęto jako suchą masę (DW). Na podstawie tych danych obliczono zmienne dotyczące liści: względną zawartość wody (RWC), masę liści na jednostkę powierzchni (LMA), powierzchnię właściwą liści (SLA) oraz zawartość wody w liściach na jednostkę powierzchni (LWA). Wskaźniki sklerofilności oszacowano według Bussotti i in. (2002) (tab. 2). Przeprowadzono również analizę skupień osobników dębów i skonstruowano dendrogram przy użyciu programu SPSS i UPGMA (nieważona grupa par ze średnią arytmetyczną) w oparciu o euklidesowy indeks odległości genetycznej według cech funkcjonalnych.

Chociaż parametry fizjologiczne liści dębu i ich różnorodność genetyczna były już badane w różnych populacjach w Azerbejdżanie (Aliyeva i in., 2021 a,b; Aliyeva, 2021), do tej pory nie przeprowadzono międzygatunkowej analizy porównawczej parametrów fizjologicznych ani określenia międzygatunkowego dystansu genetycznego na podstawie analizy fizjologicznej. Wyniki badania metodą Bussotti i in., (2002) przedstawiono w tabeli 3. Warunki środowiskowe dla populacji różniły się między sobą znacząco pod względem rocznych opadów i rocznej temperatury (ryc. 2 i 3).

PARAMETRY WILGOTNOŚCI LIŚCI DĘBU GRUZIŃSKIEGO. Jak pokazuje tabela 3, najwyższy wynik względnej zawartości wody ($86,45\% \pm 9,81$) zaobserwowano w populacji Shaki, a najniższy wynik ($37,46\% \pm 10,36$) w populacji Baku. Zauważalnie najniższy wynik zawartości wody ($8,41\% \pm 2,31$) odnotowano również w populacji Baku, a najwyższy wynik ($65,60\% \pm 6,32$) w populacji Shaki. Chociaż wartości RWC w populacji Ismayilli był wysokie ($83,38 \pm 10,23$), zaobserwowano najniższy wynik dla LMA, podobnie jak w populacji Baku ($1,46 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,92$). Najwyższe wyniki według innych parametrów funkcjonalnych (LMA, SLA, S) odnotowano także w populacji Shaki. Niewielki wpływ SLA i S wykazano również w populacji z Baku (tab. 3). Zgodnie z wynikami analizy dębów gruziński w populacji z Baku był narażony na stres powodowany suszą i niedoborem wody. W pozostałych 3 populacjach (Ismayilli, Gabala i Shaki) występował normalny poziom zaopatrzenia w wodę potrzebny dla rozwoju gatunku. Parametry wilgotności liści w tych populacjach były bardzo zbliżone. Zmienne RWC, LMA i S w liściach dębu gruzińskiego nie różniły się istotnie między populacjami Ismayilli, Gabala i Sheki, chociaż WC i S były nieco niższe w populacji Ismayilli niż w pozostałych 3 miejscach badań.

PARAMETRY WILGOTNOŚCI LIŚCI DĘBU KASZTANOLISTNEGO. Analizę liści dębów kasztanowcolistnych przeprowadzono dla osobników rosnących w warunkach Baku i Lankaran. Chociaż średnie miesięczne opady deszczu obu populacji wykazywały duże wahania, nie stwierdzono istotnej różnicy pod względem temperatury rocznej (ryc. 2 i 3). Mimo że RWC wykazało podobne wyniki w obu populacjach, wykryto różnice w innych parametrach fizjologicznych. Parametry WC, LMA i S były nieznacznie wyższe w populacji Lankaran w porównaniu z populacją Baku. Jednak SLA liści dębów Lankaran ($55,66 \text{ mg/cm}^2 \pm 4,25$) było niższe niż liści dębów Baku ($69,1 \text{ mg/cm}^2 \pm 5,98$). Według badań woda jest kluczowym czynnikiem decydującym o wielkości liści, podczas gdy temperatura jest uznawana za mniej istotną (Rybníček *et al.*, 2016; Peppe i in., 2011; Eslamdoust i in., 2023). Wyniki niniejszej pracy wskazują, że zawartość SLA w liściach dębów w Lankaran była niższa niż w Baku.

PARAMETRY WILGOTNOŚCI LIŚCI DĘBU KAUKASKIEGO. Wartości RWC i WC w populacji dębów z Shaki były wyższe w porównaniu z populacją Goygol. Jednak wartości LMA były prawie takie same, a wartości SLA i S wykazywały bardzo niewielkie wahania. SLA i S były nieznacznie wyższe w populacji Shaki niż w populacji Goygol (tab. 3).

PARAMETRY WILGOTNOŚCI LIŚCI DĘBU SZYPUŁKOWEGO. Warunki ekologiczne dębu szypułkowego na badanych obszarach znacząco się różniły, co sprawiło, że parametry fizjologiczne także wykazały istotne zróżnicowanie. Większość parametrów liści w populacji dębów z Qabala była znacznie wyższa niż w populacji z Baku. Jedynie wartość LMA liści w populacji z Baku ($12,48 \text{ mg/cm}^2$) była zauważalnie wyższa niż w populacji Qabala ($6,44 \pm 1,35 \text{ mg/cm}^2$). Dęby w Baku były narażone na silny stres związany z suszą. Obniżona zawartość wody w roślinach jest oznaką warunków stresowych (Mukherjee i Agrawal, 2018). Zaobserwowano również istotną ujemną korelację między wartościami RWC a LMA.

Najwyższe wartości wszystkich cech fizjologicznych odnotowano w próbkach pochodzących z dębu gruzińskiego (Shaki) (RWC: $86,45\% \pm 9,81$, WC: $65,60\% \pm 6,32$, LMA: $7,55 \text{ mg/cm}^2 \pm 1,52$, SLA: $98,27 \text{ cm}^2 \pm 12,30$, S: $8,38 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,89$). Dla dębu gruzińskiego (Baku) odnotowano także zdecydowanie najniższe wartości (RW: $37,46\% \pm 10,36$, WC: $8,41\% \pm 2,31$, LMA $1,46 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,90$, SLA: $42,23 \text{ cm}^2 \pm 9,32$, S: $6,13 \text{ mg/cm}^2 \pm 1,25$).

Klimat jest jednym z głównych czynników abiotycznych wpływających na systemy naturalne (Ramírez-Valiente i in., 2015). Różnice w cechach fizjologicznych i oznaki korelacji między środowiskami dostarczają dowodów na adaptacyjne znaczenie danej cechy w określonych warunkach środowiskowych (Danovan, 2009; Shifa i in., 2022). W niniejszych badaniach zaobserwowano drastyczny spadek RWC o 49% w próbkach pochodzących od dębu gruzińskiego (Baku). Mogło to być spowodowane większymi liśćmi osobników tego gatunku na stanowiskach w Shaki, Ismayilli i Gabala w porównaniu z ze stanowiskiem w Baku. Zazwyczaj wysoki RWC jest przydatny do regulacji turgoru komórkowego i potencjału osmotycznego u roślin (Mukherjee i Agrawal, 2018). Analizy wskazały, że zmniejszenie powierzchni liści (SLA), a także zwiększenie ich rozmiaru na obszarach o umiarkowanych warunkach lub podczas stresu wynikającego z wystąpieniem suszy jest fizycznie cenne, a te cechy są kluczowymi czynnikami dla dębów, aby poradzić sobie z różną dostępnością wody (Ramírez-Valiente i in., 2015). W niniejszych badaniach LMA istotnie różniło się między populacjami wszystkich gatunków. LMA odzwierciedla podział wartości między masą liścia a jego powierzchnią. Istnieje ujemna korelacja między stosunkiem suchej masy liścia do jego powierzchni (LMA) a jego rozmiarem. Wyższy poziom LMA liści chroni roślinę przed uszkodzeniami fizycznymi i stresem (Yalçın, 2018; Bilgin i in., 2004). Jednocześnie wysoki poziom LMA wiąże się ze zmniejszoną intensywnością fotosyntezy i utratą wody przez transpirację (Hultine i Marshall, 2000).

ANALIZA SKUPIEŃ. Wszystkie badane próbki dębów podzielono na 4 główne grupy na podstawie euklidesowego indeksu odległości genetycznej uzyskanego w wyniku analizy skupień (ryc. 4). Pierwszy klasterek składał się wyłącznie z dębu gruzińskiego (Baku). W rezultacie genotyp ten był znacząco odległy od innych genotypów dębów pod względem podobieństwa genetycznego.

Drugi klasterek był największy i składał się z dębu kasztanolistnego (Baku), dębu kaukaskiego (Goygol), dębu szypułkowego (Gabala), dębu kaukaskiego (Sheki), dębu szypułkowego (Baku) i dębu kasztanolistnego (Lankaran). W tym klastrze odnotowano kilka interesujących obserwacji. Nie wykryto dystansu genetycznego ($GM=0$) między genotypami dębu kaukaskiego (Goygol) i dębu szypułkowego (Gabala), jak również między genotypami dębu kaukaskiego (Sheki) i dębu szypułkowego (Baku) (tab. 4). Wskazywało to całkowitą identyczność tych genotypów. Maksymalny dystans genetyczny w obrębie tego klastra odnotowano między dębem kasztanolistnym (Lankaran) a genotypami dębu szypułkowego (Baku) i dębu kaukaskiego (Sheki) ($GM=28,74$). Trzeci klasterek zawierał genotypy dębu gruzińskiego z Gabala i z Shaki. Między tymi dwoma genotypami indeks odległości genetycznej wynosił $GM=41,51$. Jedynie genotyp dębu gruzińskiego (Ismayilli) znajdował się w czwartym klastrze. Wynik ten pokazuje, że obecny genotyp tego gatunku istotnie różnił się od innych genotypów dębu pod względem odległości genetycznej. Największą wartość indeksu odległości między próbkami ($GM=99,37$) odnotowano między dębem gruzińskim (Ismayilli) a dębem kaukaskim (Sheki). Taką samą odległość genetyczną określono między próbkami pochodzącymi z dębu gruzińskiego (Ismayilli) i dębu szypułkowego (Baku). Ponadto odnotowano długą odległość genetyczną ($GM=98,56$) między genotypami dębu gruzińskiego (Ismayilli) a dębem kasztanolistnego (Lankaran). Trzeci klasterek obejmował również genotypy dębu gruzińskiego z Gabala z Sheki. Odległość genetyczna między tymi dwoma genotypami wyniosła $GM=41,51$. Wynik ten wskazuje, że pomimo przynależności do tego samego

gatunku, istnieją między nimi istotne różnice genetyczne. W czwartym klastrze znalazł się tylko genotyp dębu gruzińskiego (Ismayilli). Fakt ten dowodzi, że ten genotyp znacznie różnił się od genotypów innych dębów pod względem odległości genetycznej. Podsumowując: największą odległość genetyczną między genotypami dębów odnotowano między próbkami dębu gruzińskiego (Ismayilli) a dębu kaukaskiego (Sheki) ($GM=99,37$) oraz dębu gruzińskiego (Ismayilli) i dębu szypułkowego (Baku) ($GM=99,37$). Zaobserwowano również dużą odległość genetyczną między genotypami dębu gruzińskiego (Ismayilli) a dębu kasztanolistnego (Lankaran) ($GM=98,56$). Wyniki te wskazują, że dąb gruziński (Ismayilli) był najbardziej odrębnym genetycznie spośród innych genotypów dębów, a jego cechy genetyczne wyraźnie różniły się od innych gatunków. Przeprowadzone analizy wskazują na znaczną różnorodność genetyczną dębów, która kształtuje się pod wpływem adaptacji ekologicznej, rozmieszczenia geograficznego oraz procesów ewolucyjnych. Wyniki te stanowią ważną podstawę naukową dla ochrony zasobów genetycznych dębów i rozwoju przyszłych programów hodowlanych.

Na potrzeby niniejszej pracy oceniono parametry liści (względną zawartość wody (RWC), masę liści na jednostkę powierzchni (LMA), specyficzną powierzchnię liści (SLA) oraz zawartość wody (WC) i soczystość (S) dla 4 gatunków dębów: *Q. petraea* ssp. *iberica*, *Q. macranthera* ssp. *macranthera*, *Q. castaneifolia* i *Q. robur* ssp. *pedunculiflora* w miejscach o różnych warunkach ekologicznych. Następnie przeprowadzono analizę skupień opartą na tych cechach funkcjonalnych i określono euklidesowy indeks odległości genetycznej. Na podstawie uzyskanych wyników można stwierdzić, że czynniki środowiskowe, zwłaszcza czynniki wodne i temperaturowe, mają silny wpływ na parametry fizjologiczne liści. Wraz ze wzrostem temperatury i spadkiem ilości opadów rośliny są narażone na stres wynikający ze zjawiska suszy, któremu towarzyszy spadek RWC, WC, SLA i S. Zaobserwowano natomiast wzrost LMA. Ta reakcja rośliny na zmieniające się warunki środowiskowe odzwierciedla aktywację mechanizmu ochronnego, ponieważ roślina walczy o przetrwanie. Przeprowadzone analizy wskazują zatem na znaczną różnorodność genetyczną genotypów dębów, która kształtuje się pod wpływem adaptacji ekologicznej, rozmieszczenia geograficznego, a także procesów ewolucyjnych.