

Reacția la stresul termic natural a trei specii de stejar: analiza a cinci indicatori biologici într-un mediu forestier specific

P. Cuza

Cuza P., 2024. Natural heat stress response of three oak species: analysis of five biological indicators in a specific forest environment. *Bucov. For.* 24(1): xx-xx

Abstract. Forest ecosystems in the Republic of Moldova play a significant role in maintaining dynamic ecological balance due to their diverse protective functions. However, edifice forest species, such as oak, exhibit pronounced sensitivity to abiotic stress, considering the prolonged periods of regeneration from shoots and the on-going changes in environmental conditions, particularly heat waves and persistent droughts. Our study focused on pedunculate oak (*Quercus robur*), sessile oak (*Q. petraea*) and downy oak (*Q. pubescens*) trees, situated in close proximity within a stand. The research aimed to assess the responses of these species to natural thermal stress. Following exposure to natural stress characterized by high temperatures and persistent drought, we analysed their responses based on five biological indicators over an eleven-day monitoring period under controlled laboratory conditions. Pedunculate oak exhibited sensitivity to stress, as indicated by elevated catalase activity and reduced coefficients of metabolic intensity and leaf water content, whereas the relative quantum yield of photosystem II in tree leaves recorded moderate values. In contrast, downy oak adjusted its catalase activity to stressful environmental conditions, presenting coefficients of metabolic intensity and leaf water content at high values, suggesting an evolutionary adaptation of the species to arid environmental conditions. Sessile oak occupied an intermediate position in stress response according to these indicators.

Keywords: *Quercus robur*, *Q. petraea*, *Q. pubescens*, leaves, chlorophyll, catalase, KIM index, FS II quantum yield, water content, adaptation.

Author. Petru Cuza (petrucuza@mail.ru), Moldova State University, str. Alexei Mateevici, 60 Chișinău, Moldova.

Manuscript received December 06, 2023; revised January 24, 2024; accepted January 29, 2024; online first April 17, 2024.

Introducere

Schimbările de mediu, inclusiv seceta, canicula și inundațiile, sunt tot mai frecvente în prezent la nivel global ca urmare a schimbărilor climatice (Pereira 2016, Raza et al. 2019). Intensificarea acestor fenomene extreme reprezintă o amenințare semnificativă pentru stabilitatea și

productivitatea pădurilor. Prezența fenomenelor extreme determină apariția diverselor stresuri în rândul speciilor forestiere (Schuldt et al. 2020, Teshome et al. 2020), generând stres oxidativ prin acumularea excesivă a speciilor reactive ale oxigenului (Bita & Gerats 2013). Aceste condiții conduc la diminuarea vitalității plantelor și pot contribui, în anumite cazuri, la

declinul și uscarea prematură a pădurilor (Keenan et al. 2015).

Producția excesivă de specii reactive ale oxigenului poate provoca plantelor leziuni la nivel celular, precum peroxidarea lipidelor, deteriorarea proteinelor și distrugerea membranelor celulare, fapt care poate conduce, în final, la moartea celulelor. Pentru a preveni deteriorarea cauzată de oxidarea moleculelor esențiale precum proteine, ADN, ARN și lipide în interiorul celulei, speciile reactive ale oxigenului sunt neutralizate de molecule speciale, enzime și antioxidanți. Printre enzimele antioxidante se numără superoxid dismutaza, ascorbat peroxidaza, catalaza și peroxidaza, care fac parte din mecanismul de apărare ce are rolul de a elimina speciile reactive ale oxigenului (Bhatla și Lal 2018).

Peroxidul de hidrogen (H_2O_2) este cea mai stabilă specie reactivă a oxigenului (Møller et al. 2007) și are importanță datorită rolului său ca moleculă semnalizatoare în cascadele asociate cu diverse forme de stres abiotic, prezente în exces în mediul plantelor (Apel și Hirt 2004). Această moleculă este esențială în reglarea funcțiilor biologice ale plantelor, inclusiv răspunsul la factorii de stres, prin controlul expresiei genelor implicate în adaptarea plantelor (Chamngpol et al. 1998, Vanderauwera et al. 2005). Totuși, creșterea necontrolată a nivelurilor de H_2O_2 în cazul plantelor expuse la diverși factori de stres determină daune semnificative structurilor celulare prin generarea stresului oxidativ (Hossain și Fujita 2013). Daunele pot afecta integritatea membranelor celulare, structura ADN-ului și funcțiile proteice, punând în pericol echilibrul fiziologic al celulelor plantelor (Anjum et al. 2015).

În plante, se găsesc multiple tipuri de proteine care sunt implicate în metabolismul H_2O_2 , însă catalazele se evidențiază ca enzime peroxidante extrem de active și cu specificitate ridicată față de H_2O_2 în celulele plantelor. Catalaza este una dintre enzimele antioxidante esențiale care atenuează stresul oxidativ într-o măsură considerabilă prin distrugerea peroxidului de hidrogen celular pentru a produce apă și oxigen (Zámocký & Koller 1999). A fost

demonstrat că impactul H_2O_2 asupra plantelor este puternic influențat de nivelul de acumulare a acestuia, care este reglat de enzimele antioxidante, cum ar fi catalaza. Un exemplu concludent care ilustrează acest lucru provine din studiile efectuate asupra *Chlamydomonas reinhardtii*, în care s-a observat că o inactivare parțială și reversibilă a catalazei a fost corelată cu o creștere tranzitorie a nivelului de H_2O_2 în celule (Michelet et al. 2013).

În ultimele decenii, cercetările din domeniul stresului la plante au avansat semnificativ, permițând o evaluare mai precisă a stării acestora (Peakall 1994, Nighat și Iqbal 2000, Lovreškov et al., 2022). Un aspect esențial în această evaluare este prevenirea prematură a daunelor cauzate de expunerea la substanțe pro-oxidante, cunoscute pentru efectele lor nocive asupra plantelor. Pentru a efectua această biomonitorizare, o metodă eficientă este investigarea biologică a expunerii la agenți chimici, care implică analiza substanțelor sau metaboliților lor folosind parametri specifici numiți indicatori biologici (Rhodes 1994).

Un exemplu semnificativ al unui astfel de indicator biologic este enzima catalaza. Activitatea catalazei în celulele plantelor joacă un rol important în aprecierea stării de stres, deoarece această enzimă are capacitatea de a neutraliza sau preveni generarea speciilor reactive ale oxigenului aflate în exces, care pot avea efecte dăunătoare asupra integrității celulelor (Martins et al. 2022). Prin urmare, evaluarea activității catalazei poate oferi informații valoroase cu privire la gradul de stres la care sunt supuse plantele.

Studiile anterioare, cum ar fi cele realizate de H. Willekens et al. (1997), au subliniat importanța catalazei ca biomarker în monitorizarea stării de stres a plantelor. Utilizarea catalazei ca indicator biologic pentru prevenirea sau reducerea efectelor adverse ale expunerii arborilor la agenți pro-oxidanți poate furniza instrumente valoroase în îmbunătățirea managementului pădurilor. Prin înțelegerea modului în care catalaza răspunde la stresul termic și alte condiții de mediu, putem identifica rapid arborii cu vitalitate scăzută, oferind astfel

oportunități de intervenție mai eficientă pentru menținerea sănătății și productivității pădurilor. Prin urmare, biomonitorizarea cu ajutorul catalazei devine o metodă esențială pentru protejarea arborilor împotriva stresului oxidativ și pentru optimizarea practicilor silvice.

În vederea evaluării nivelului de poluare și a stresului abiotic asupra plantelor, au fost dezvoltate bioindicatori complecși. Un astfel de indicator biologic de interes este reprezentat de coeficientul intensității metabolismului (KIM), care se bazează pe procesele de asimilare și dezasimilare a substanțelor organice din țesuturile frunzelor (Sudakov și al. 2008). KIM integrează în analiză conținutul de clorofilă din frunze pentru caracterizarea proceselor de asimilare, oferind astfel o indicație indirectă cu privire la intensitatea acumulării masei organice la plante. În același timp, pentru evaluarea proceselor de descompunere a substanțelor organice în frunze, KIM utilizează catalaza, care are rolul de a cataliza descompunerea compușilor de peroxizi formați în timpul anabolismului, în țesuturile asimilatoare ale frunzelor plantelor.

În prezent, diverse surse de stres abiotic, în special secetele prelungite și canicula, împreună cu fragmentarea excesivă a ecosistemelor forestiere din Republica Moldova, au cauzat slăbirea și uscarea prematură a unor specii edificatoare de o valoare ecologică și economică deosebită, cum ar fi stejarul pedunculat, gorunul și, într-o măsură mai mică, stejarul pufos. Aceste fenomene nefaste de încălzire a climei impun necesitatea unei mai bune înțelegeri a modului în care speciile de arbori reacționează la impactul stresurilor de mediu. Există o cerință în continuă creștere în acest sens, mai ales că în Republica Moldova a fost inițiată o campanie de extindere a fondului forestier prin împădurire, iar utilizarea adecvată a speciilor forestiere în noile condiții de mediu reprezintă o preocupare deosebită. Aceasta este esențială pentru asigurarea rezistenței sporite a speciilor în fața condițiilor de mediu specifice din diferite habitate.

Scopul acestui studiu constă în evaluarea răspunsului la stresul termic natural al speciilor spontane de stejar din Republica Moldova

și analiza în detaliu a strategiilor și mecanismelor lor de adaptare în cadrul unui mediu forestier specific, având ca obiectiv înțelegerea mai profundă a modului în care aceste specii gestionează și se adaptează la condițiile de stres termic.

Material și metode

Din arborii de stejar pedunculat (*Quercus robur*), gorun (*Q. petraea*) și stejar pufos (*Q. pubescens*) care cresc în vecinătate (la o distanță de circa 3 km) în Ocolul silvic Zloți din raionul Cimișlia, la data de 6 august 2023 au fost colectate frunze în timpul unei perioade de secetă îndelungată, când temperaturile au fost caniculare, atingând la umbră circa 34°C timp de multe zile (figura 1).

De la fiecare specie de stejar au fost selectați câte 7 arbori. Din partea de sud și de jos a coroanei fiecărui arbore au fost colectate câte 15 frunze, fără vătămări vizibile, din anumite poziții geografice (tabelul 1). Frunzele au fost plasate în pachete de hârtie separate pentru fiecare arbore și specie, apoi păstrate într-o cameră frigorifică pentru a menține condițiile optime în timpul transportului către laborator.

În laborator, frunzele au fost menținute în condiții favorabile controlate, fiind amplasate

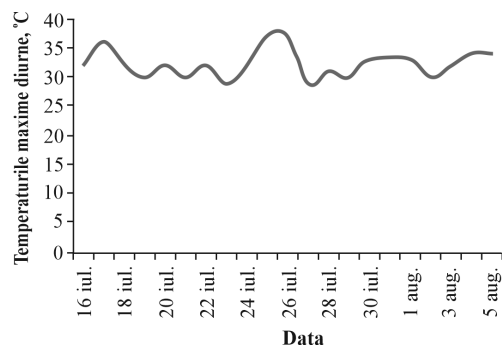


Figura 1 Evoluția temperaturilor maxime diurne în perioada anterioară recoltării frunzelor destinate analizei a cinci indicatori biologici
The variation in maximum daytime temperatures during the period preceding the harvesting of leaves, intended for the analysis of five biological indicators

Table 1 Poziția geografică a arboretelor din care au fost recoltate probele de frunze
Geographic location of forest stands from where were harvested leaf samples

Specia	Latitudine (N)	Longitudine (E)	Altitudine (m)	Orientare
Stejar pedunculat	464116,58	285351,56	258	platou
Gorun	464219,14	285358,10	258	platou
Stejar pufos	464057,16	285328,32	243	sud-estică

în excitație la o temperatură de 25°C, cu o umiditate relativă de 85%, o iluminare de 20 lucși și o fotoperioadă de 16 ore lumină și 8 ore întuneric. În aceste condiții, frunzele speciilor de stejar au fost menținute pe parcursul a unsprezece zile, fiind controlate periodic, după 1 zi, 3 zile, 6 zile și 11 zile, pentru determinarea unui șir de compuși chimici, prin analiza exemplarelor colectate. Aceste analize includ extragerea pigmentilor, cum ar fi clorofila *a* și clorofila *b*, determinându-se concentrația totală de clorofilă, dar și determinarea activității enzimei catalaza. De asemenea, s-a calculat coeficientul intensității metabolismului, s-a efectuat măsurarea fluorescenței clorofilei și s-a calculat randamentul cuantic relativ al fotosistemului II. În final, s-a determinat masa uscată, s-a calculat conținutul procentual de apă pentru 1 g de masă umedă a frunzelor.

Extragerea clorofilei

În perioadele specificate anterior, a fost prelevată câte o frunză din fiecare arbore al unei specii particulare de stejar, acestea fiind colectate într-un eșantion comun, format din mai multe frunze analizate simultan. Din frunzele fiecărei specii de stejar a fost prelevată o cantitate de material vegetal, constând din 0,1 g de frunze, apoi mojarată cu ajutorul unui mojar cu pistil, pentru a asigura o omogenizare adecvată. Materialului vegetal măcinat, a fost omogenizat într-un solvent adecvat, respectiv 10 ml de acetona răcită la 80%. Extracția clorofilei din frunze a fost efectuată în acest solvent, urmând ca extractul rezultat să fie refrigerat la o temperatură constantă de 5°C, timp de 24 de ore. Ulterior, probele au fost supuse unui proces de centrifugare la o viteză de 4000 rotații × g, timp de 10 minute, separându-se astfel supernatantul de reziduurile insolubile din materialul vegetal.

Astfel, s-a obținut o fracție clară a extractului de clorofilă. Măsurarea absorbției extractului de clorofilă s-a realizat cu ajutorul unui spectrofotometru la două lungimi de undă specifice (Perkin-Elmer 124, Waltham, MA), și anume 663 nm și 645 nm. Conținutul de clorofilă *a*, *b* și totală a fost apoi exprimat în miligrame (mg/g) de pigmenti fotosintetici per gram de greutate proaspătă a frunzelor.

Activitatea catalazei

Metoda de determinare a activității catalazei se bazează pe capacitatea peroxidului de hidrogen (H₂O₂) de a forma, în urma reacției cu molidat de amoniu, un complex colorat, caracterizat printr-o absorbție maximă la 410 nm.

În vederea efectuării analizei, pentru fiecare specie de stejar investigată, s-au colectat 100 mg de frunze din trei repetiții separate, ulterior omogenizate într-un mojar cu utilizarea tampoanelor tris-glicină de 0,2 M. Amestecul rezultat a fost supus centrifugării la 15000 × g timp de 15 minute. Un volum de 100 μl de supernatant a fost utilizat pentru reacția biochimică, inițiată prin adăugarea a 0,03% peroxid de hidrogen. Probele au fost incubate într-un termostat la temperatura de 37°C timp de 10 minute. Reacția amestecului de incubație a fost stopată prin adăugarea a 4% molidat de amoniu.

Densitatea optică a fost măsurată la o lungime de undă de 405 nm, utilizând un spectrofotometru (Perkin-Elmer 124, Waltham, MA), în comparație cu proba martor. Activitatea enzimei catalază a fost exprimată în μMol de substrat H₂O₂ descompus în decurs de 1 minut de incubare, pentru fiecare 1 mg de proteină, conform formulei:

$$Cat = \frac{C(H_2O_2)}{t \times C(\text{proteine}) \times V} \quad (1)$$

unde:

Cat – activitatea catalazei în $\text{cm}^3\text{O}_2^{1\text{mg}} \times 1 \text{ min}^{-1}$,
 $C(\text{H}_2\text{O}_2)$ – concentrația peroxidului de hidrogen în μMol ,

T – timpul de incubare a probelor în min,

$C(\text{proteine})$ – concentrația de proteină în probă în mg/ml ,

V – volumul probei în ml.

Coeficientul intensității metabolismului

Evaluarea intensității metabolismului în organele de asimilare a plantelor se bazează pe compararea datelor referitoare la procesele metabolice implicate în acumularea și descompunerea substanțelor organice.

În acest context, un indicator al proceselor de asimilare desfășurate în frunzele speciilor de stejar îl constituie conținutul de clorofilă. Alegerea acestuia se justifică prin capacitatea sa de a indica eficiența procesului de fotosinteză, iar în consecință, de a furniza informații indirecte privind intensitatea acumulării masei organice la plante. Procesele de descompunere a substanțelor organice în frunze au fost estimate prin activitatea enzimelor oxidoreductaze, implicate în aceste procese. În special, a fost folosită catalaza, care este implicată în descompunerea compușilor de peroxizi formați în timpul anabolismului în țesuturile asimilatoare ale frunzelor plantelor.

Determinarea coeficientului intensității metabolismului (KIM) s-a efectuat conform formulei:

$$KIM = \frac{Clr_{tot}}{Cat} \quad (2)$$

unde:

KIM – coeficientul intensității metabolismului,

Clr_{tot} – conținutul total de clorofilă în mg/g ,

Cat – activitatea catalazei în $\text{cm}^3\text{O}_2^{1\text{mg}} \times 1 \text{ min}^{-1}$.

Un coeficient KIM mai mare sugerează procese de asimilare mai intense în țesuturi, reflectând astfel o adaptare eficientă a plantelor la factorii abiotici excesivi. În schimb, un KIM mai mic poate indica o descompunere mai accentuată a substanțelor organice, semnând un

răspuns mai puțin eficient a plantelor la factorii de mediu în schimbare.

Randamentul cuantic relativ al fotosistemului II

La fiecare interval de timp și pentru fiecare specie, a fost selectată câte o frunză din fiecare dintre cei șapte arbori incluși în studiu, în vederea măsurării fluorescenței clorofilei. Înainte de efectuarea măsurătorilor, frunzele au fost expuse la radiația fotosintetică activă (PAR) cu o intensitate de $20 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, timp de 15 minute, la o temperatură de 25°C . Randamentul cuantic al fotosistemului II (Y – yield) a fost analizat la frunzele celor trei specii de stejar investigate, folosind un fluorimetru modulată al clorofilei PAM-2100 (H. Walz, Germania).

$$Y = \frac{Fm' - Ft}{Fm'} \quad (3)$$

În formula de mai sus, Fm' indică randamentul maxim de fluorescență atins în prezența unui impuls de saturație, în timp ce Ft reprezintă randamentul de fluorescență măsurat într-un moment dat în stare de echilibru. Excitarea fluorescenței minime (F_0) a avut loc la 655 nm , cu o frecvență de modulație de 600 Hz , iar măsurarea fluorescenței maxime (Fm') s-a realizat cu o frecvență de modulație de 20 kHz .

Măsurătorile au fost efectuate în prima, a treia, a șasea și a unsprezecea zi după aplicarea stresului termic natural. În fiecare dintre aceste perioade, a fost determinat randamentul cuantic (Y – yield) și calculat randamentul relativ (Fr) conform ecuației:

$$Fr = \frac{Fm'et}{Fm'mt} \quad (4)$$

unde:

Fr – randamentul relativ,

$Fm'et$ – randamentul cuantic apreciat în cele patru zile arătate anterior, după expunerea frunzelor la stresul termic natural,

$Fm'mt$ – randamentul cuantic apreciat în aceleași zile în frunzele care nu au fost expuse stresului termic natural.

Conținutul de apă în frunze

Determinarea masei uscate a fost efectuată pe un număr de 6-8 frunze pentru fiecare specie de stejar investigată, acestea fiind cântărite inițial. Ulterior, au fost deshidratate la 105°C într-o etuvă (Termostat Nr.3) până la atingerea unei mase uscate constante. Verificarea echilibrului masei uscate s-a realizat prin măsurători periodice, asigurându-ne că valorile obținute erau constante în urma a trei măsurători consecutive. În scopul prevenirii acumulării de umiditate, frunzele uscate au fost plasate într-un excicator cu gel de siliciu (concentrație 50/20). Excicatorul, cu capacul pre-tratat cu grăsime, a fost conectat la o pompă de vid, menținându-l astfel la o presiune cu circa trei unități mai mică decât presiunea atmosferică. După ce frunzele au fost trecute la temperatura camerei, au fost cântărite cu o balanță de precizie (Kern 3100), care a fost supusă anterior unui tratament cu unde ultraviolete emise de o lampă PRK-2 (190 și 210 nm). Conținutul de apă în frunze, exprimat în procente, a fost determinat prin raportarea masei verzi a frunzelor (pentru 1 g de masă umedă) la masa lor uscată, conform următoarei expresii:

$$Ca = \frac{Mu - Ms}{Mu} \times 100\% \quad (5)$$

unde:

Ca – conținutul de apă în frunze în %,

Mu – masa umedă a frunzelor,

Ms – masa uscată a frunzelor.

Analize statistice

Analizele statistice au fost efectuate folosind software-ul Statgraphics (versiunea XVI). În procesul de analiză statistică a datelor privind conținutul de clorofilă (a și b) și activitatea catalazei, frunzele pentru fiecare specie au fost amalgamate într-un eșantion comun, efectuat în trei repetiții, iar rezultatele, inclusiv media și abaterea standard, au fost calculate.

Semnificația diferențelor între speciile de stejar analizate a fost estimată prin utilizarea

testului non-parametric Kruskal-Wallis pentru indicatorii: conținutul de clorofilă, activitatea catalazei și conținutul de apă în frunze. Acest test se bazează pe ranguri în ordinea datelor, fiind potrivit pentru seturile de date care nu prezintă o distribuție normală și pentru situațiile în care numărul de valori este redus. A fost ales acest test deoarece se potrivește naturii datelor noastre, având în vedere că numărul de date pentru fiecare specie comparată este mic, iar acestea nu pot forma o distribuție normală pentru evaluarea semnificației diferențelor dintre ele.

Pentru test, au fost utilizate și comparate datele indicatorilor evaluați pentru o perioadă de unsprezece zile, adică datele colectate în cele patru zile (1, 3, 6 și a 11-a zi). O diferență semnificativă între speciile de stejar a fost considerată la nivelul $p < 0,05$, utilizând testul Kruskal-Wallis.

Rezultate

Conținutul de clorofila a , b , și cea *totală*

În tabelul 2 sunt prezentate datele care ilustrează evoluția recuperării conținutului de clorofilă în frunze în decurs de unsprezece zile după ce arborii au fost expuși în mod natural la caniculă, cu scopul de a evidenția impactul stresului termic generat de temperaturile toride asupra plantelor, în funcție de specia de stejar analizată. Se observă variații temporale în conținutul de clorofilă a , b și *totală* la speciile de stejar analizate.

Valorile clorofilei a la stejarul pedunculat variază într-o anumită măsură, situându-se între 0,579 mg/g și 0,650 mg/g, evidențiate pe parcursul a unsprezece zile de răspuns la stresul termic natural. Cu toate acestea, se observă o ușoară tendință de scădere a conținutul de clorofilă a după trei și șase zile de recuperare în raport cu prima zi, sugerând o influență a impactului stresului termic asupra eficienței fotosintezei în frunze. Creșterea ulterioară în ziua a unsprezecea poate să indice o recuperare parțială a plantelor la stres. Totuși, în timpul

Tabel 2a Evoluția conținutului de clorofilă (mg/g) în frunzele stejarului pedunculat, gorunului și stejarului pufos în decursul a 11 zile după expunerea arborilor la stresul termic natural
Evolution of chlorophyll content (mg/g) in the leaves of pedunculate oak, sessile oak, and downy oak during 11 days after exposure of the trees to natural heat stress

Indicatori	Stejar pedunculat				Gorun				Stejar pufos			
	1	3	6	11	1	3	6	11	1	3	6	11
Clorofila a	0,631	0,579	0,603	0,650	0,721	0,629	0,649	0,663	0,718*	0,585	0,592	0,586*
Clorofila b	0,417	0,383	0,399	0,430	0,477	0,417	0,429	0,439	0,476*	0,387	0,392	0,388*
Clorofila tot	1,048	0,962	1,002	1,080	1,198	1,046	1,078	1,102	1,194	0,972	0,984	0,974

Notă: *Steluțele din tabel indică că după prima zi de menținere a frunzelor, conținutul de clorofilă *a* depășește semnificativ ($p < 0,05$) nivelul înregistrat în a unsprezecea zi după stresul termic natural, în timp ce conținutul de clorofilă *b* prezintă aceeași diferență semnificativă ($p < 0,05$), apreciate după testul Kruskal-Wallis.

Tabel 2b Abaterile standard asociate cu evoluția conținutului de clorofilă în frunzele stejarului pedunculat, gorunului și stejarului pufos în decursul a 11 zile după expunerea arborilor la stresul termic natural
Standard deviations in chlorophyll content evolution across pedunculate oak, sessile oak, and downy oak leaves over 11 days of natural heat stress exposure

Indicatori	Stejar pedunculat				Gorun				Stejar pufos			
	1	3	6	11	1	3	6	11	1	3	6	11
Clorofila a	0,050	0,051	0,044	0,062	0,083	0,041	0,007	0,011	0,026	0,016	0,047	0,051
Clorofila b	0,034	0,034	0,029	0,041	0,055	0,028	0,005	0,007	0,017	0,010	0,031	0,034

perioadei de observație, nu s-au evidențiat diferențe semnificative din punct de vedere statistic în conținutul de clorofilă (tabelul 2).

Conținutul de clorofilă *a* în frunzele gorunului denotă o variație mai moderată decât la cele de stejar pedunculat, însă este evidentă o scădere inițială a acestuia după prima zi de recuperare. Creșterea ulterioară ușoară a conținutului de clorofilă până în a unsprezecea zi poate indica o capacitate de adaptare a aparatului fotosintetic la stresul termic natural.

Totuși, există situații în care conținutul de clorofilă are tendința de a scădea în timp cu 81,6%, cum se întâmplă în cazul stejarului pufos, unde clorofila *a* atinge o valoare inițială de 0,718 mg/g în prima zi, dar scade la 0,586 mg/g în a unsprezecea zi de observație. Scăderea inițială a conținutului de clorofilă *a* în frunzele stejarului pufos indică o ajustare la stresul termic, iar valorile relativ constante de-a lungul perioadei de observație denotă o capacitate mai mică de recuperare a pigmentului.

Evoluția conținutului de clorofilă *a* și *b* în frunzele stejarului pufos după stresul termic natural arată o scădere constantă a acestor indicatori în perioada de timp analizată. Această tendință descrescătoare indică diferențe semnificative în conținutul de clorofilă *a* ($p < 0,05$), comparând

valorile înregistrate în prima și a unsprezecea zi, precum și pentru clorofila *b* ($p < 0,05$), unde am evaluat datele în aceleași zile (tabelul 2). Schimbările observate în conținutul de clorofilă *a* și *b* în frunzele arborilor stejarului pufos indică că scăderea conținutului acestor pigmenti în timp este o adaptare activă a aparatului fotosintetic la acțiunea stresului termic natural.

Menționăm că s-a observat un conținut ușor mai ridicat de clorofilă *a*, *b* și *totală* în frunzele arborilor de gorun, în timp ce la stejarul pufos s-a înregistrat un conținut de clorofilă puțin mai scăzut în comparație cu cele două specii de stejar investigate în cadrul studiului (tabelul 2). Cu toate acestea, rezultatele testului Kruskal-Wallis nu au evidențiat diferențe semnificative din punct de vedere statistic în conținutul de clorofilă (*a* și *b*) în decursul a unsprezece zile de la expunerea frunzelor la stresul termic natural între arborii de stejar pedunculat, gorun și stejarul pufos (tabelul 3).

Activitatea catalazei

Un alt indicator biologic examinat se referă la activitatea catalazei. Datele prezentate în figura 2 evidențiază o creștere semnificativă a valorilor catalazei în frunzele stejarului pedun-

Table 3 Rezultatul testului Kruskal-Wallis privind diferențele în conținutul de clorofilă (a și b) între speciile de stejar pe parcursul a unsprezece zile de recuperare a frunzelor
Result of the Kruskal-Wallis test for differences in chlorophyll content (a and b) between oak species during eleven days of leaf recovery

Specii	Dimensiunea eșantionului	Rang mediu
Stejar pedunculat	24	33,167
Gorun	24	42,458
Stejar pufos	24	33,875

Test statistic = 2,9325, Valoarea lui P = 0,2308

Notă: Deoarece valoarea calculată a lui P este mai mare decât 0,05, nu se poate respinge ipoteza nulă, indicând că nu există o diferență semnificativă statistic între mediane la un nivel de încredere de 95,0%

culat, de la 1,46 ($\text{cm}^3\text{O}_2^{1\text{mg}} \times 1 \text{ min}^{-1}$) în prima zi până la 3,29 ($\text{cm}^3\text{O}_2^{1\text{mg}} \times 1 \text{ min}^{-1}$) în a unsprezecea zi după stresul termic natural. Această creștere progresivă a activității catalazei indică intensificarea stresului termic asupra arborilor, determinând o creștere a producției de peroxid de hidrogen. Se remarcă că activitatea catalazei a atins un maxim în a treia zi ($2,94 \text{ cm}^3\text{O}_2^{1\text{mg}} \times 1 \text{ min}^{-1}$), sugerând un răspuns rapid la stresul termic. Acest vârf poate reprezenta o adaptare incipientă a arborilor de stejar pedunculat la

condițiile stresante. După șase zile de păstrare a frunzelor în condiții controlate, activitatea catalazei a scăzut, indicând fie o atenuare a stresului, fie o eventuală „oboseală” a sistemului antioxidant. Creșterea activității catalazei la valoarea maximă după unsprezece zile pare să indice inițierea proceselor de adaptare, reglând răspunsul antioxidant în condiții de mediu aride.

În comparație cu valorile activității catalazei la stejarul pedunculat, gorunul a înregistrat valori mai scăzute, indicând o sensibilitate diferită a celor două specii față de stresul termic natural. La gorun, activitatea catalazei crește inițial, dar nu atinge valori atât de ridicate în comparație cu stejarul pedunculat. Această diferență în răspunsul la stres sugerează că gorunul inițiază procesele de adaptare mai târziu decât stejarul pedunculat, reflectând o rezistență mai mare la stresul termic (figura 2).

Valorile cele mai scăzute ale activității catalazei au fost observate la stejarul pufos, indicând o reacție mai puțin pronunțată a acestei specii termofile în condițiile specifice aride de mediu în care se dezvoltă arborii, în comparație cu celelalte specii. Pe parcursul celor unsprezece zile de observație, stejarul pufos a manifestat o activitate relativ constantă a cata-

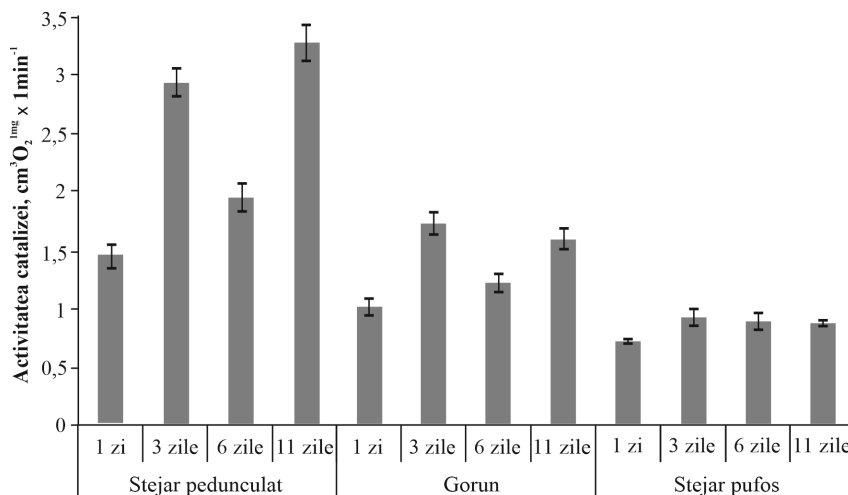


Figura 2 Activitatea catalazei în frunzele speciilor de stejar, după o perioadă de 11 zile de recuperare de la expunerea la șocul termic natural
Catalase activity in the leaves of oak species, after a period of 11 days of recovery from exposure to natural heat shock

Tabel 4 Rezultatul testului Kruskal-Wallis privind diferențele în activitatea catalazei între speciile de stejar în decurs de unsprezece zile de recuperare a frunzelor
Result of the Kruskal-Wallis test for differences in catalase activity between oak species during eleven days of leaf recovery

Specii	Dimensiunea eșantionului	Rang mediu
Stejar pedunculat	4	10,0
Gorun	4	7,0
Stejar pufos	4	2,5

Test statistic = 8,7692, Valoarea lui P = 0,0125

Notă: Datorită faptului că valoarea calculată a lui P este mai mică de 0,05, ipoteza nulă este respinsă. Aceasta indică faptul că există diferențe semnificative statistic între medianele speciilor de stejar, la un nivel de încredere de 95,0%

lazei, fără vârfuri sau schimbări semnificative, evidențiind o capacitate ridicată de adaptare la stresul termic natural.

Cercetările noastre au evidențiat diferențe semnificative în activitatea catalazei în rândul speciilor de stejar care cresc în vecinătate pe teritoriul Ocolului silvic Zloți ($p < 0,05$). Stejarul pedunculat, o specie mezotermă și mezofilă, s-a distins printr-o activitate ridicată a catalazei în frunzele arborilor. În comparație, frunzele stejarului pufos, o specie termofilă și heliofită, au evidențiat o activitate semnificativ mai redusă

a catalazei, cu o scădere cuprinsă între 50,0 și 73,1%. De asemenea, frunzele gorunului, o specie mezotermă și mezofilă, au prezentat o activitate a catalazei cu 30,1 până 51,1% mai mică decât cea a frunzelor stejarului pedunculat. Aceste diferențe statistic semnificative ($p < 0,05$) de activitate în catalază între speciile de stejar (tabelul 4) pot fi atribuite cerințelor ecologice specifice ale fiecăreia (Savill, 2013).

Coefficientul intensității metabolismului

Comparativ cu analiza conținutului de clorofilă și activității catalazei, evaluarea impactului stresului termic asupra speciilor de stejar poate fi realizată într-un mod mai informativ folosind bioindicatori care caracterizează procesele de asimilare și dezasimilare din celulele plantelor. Acești indicatori, reflectând procesele fiziologice viabile ale plantelor, sunt esențiali în înțelegerea răspunsului acestora la stresul termic, iar indicatorul KIM le ia în considerare.

Indicatorul KIM reflectă o creștere a proceselor metabolice în celulele stejarului pufos, cu valori cuprinse între 1,03 și 1,64, așa cum reiese din figura 3. Dimpotrivă, stejarul pedunculat a înregistrat valori mai scăzute ale indicatorului KIM, situându-se între 0,33 și 0,72 în

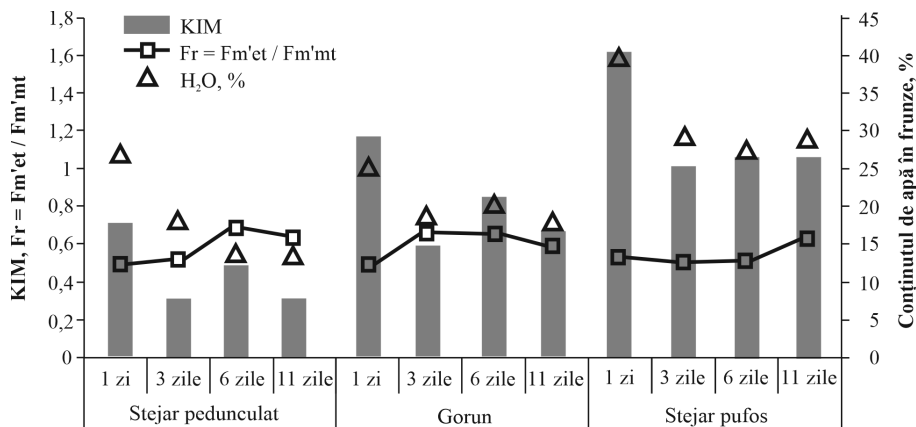


Figura 3 Evoluția valorilor coeficientului intensității metabolismului (KIM), randamentului cuantic relativ al fotosistemului II ($Fr = Fm'et / Fm'mt$) și conținutului de apă în frunze (H_2O , %) la speciile de stejar, după un interval de 11 zile de recuperare de la expunerea la stresul termic natural
The evolution of the values of metabolism coefficient (KIM), relative quantum yield of photosystem ii ($Fr = Fm'et / Fm'mt$), and leaf water content (H_2O , %) in oak species after 11 days of recovery from natural thermal stress exposure

cele unsprezece zile de recuperare a frunzelor după stresul termic natural.

Analiza bioindicatorului KIM a relevat o activitate metabolică crescută în frunzele stejarului pufos, acestea fiind de 2,3-3,3 ori mai active decât în frunzele stejarului pedunculat și de 1,4-1,6 ori mai active decât în frunzele gorunului. Datele prezentate demonstrează că stejarul pufos, evaluat în funcție de activitatea proceselor metabolice din frunze, se evidențiază printr-o capacitate ridicată de adaptare în condițiile de mediu aride, cu temperaturi ridicate. În acest mediu natural, arborii de gorun au evidențiat o adaptare moderată, în timp ce stejarul pedunculat pare să manifeste o sensibilitate crescută în condițiile de mediu caracterizate de temperaturi ridicate, conform modificărilor semnificative în intensitatea proceselor metabolice din frunzele acestuia.

Randamentul cuantic relativ al fotosistemului II

Randamentul cuantic relativ al fotosistemului II, care este un indicator analizat, furnizează informații privind eficiența procesului de fotosinteză. Datele incluse în figura 3 indică o creștere progresivă a activității fotosistemului II în frunzele stejarului pedunculat. În prima zi după stresul termic natural, fotosistemul II a prezentat un randament cuantic moderat (0,503 u.c.). S-a remarcat o creștere în randamentul cuantic, observată în zilele ulterioare, atingând o valoare de 0,648 u.c. după a unsprezecea zi, fapt care denotă inițierea proceselor de recuperare pentru adaptarea arborilor de stejar față de stresul termic natural.

Gorunul, la rândul său, a prezentat inițial un randament cuantic comparabil (0,497 u.c.) cu stejarul pedunculat, înregistrând o creștere până la 0,667 u.c. după a treia zi, menținându-se ulterior la niveluri ridicate pe durata perioadei analizate (figura 3). În frunzele gorunului, s-a observat o activitate crescută a catalazei (figura 2), iar randamentul cuantic ușor ridicat indică faptul că arborii de gorun au inițiat, cu o întârziere minoră față de stejarul pedunculat, procesele de adaptare în diminuarea efectelor

stresului termic natural.

Stejarul pufos a prezentat valori relativ constante, variind între 0,524 u.c. și 0,547 u.c. în primele șase zile după expunerea la stres, înregistrând o creștere ușoară până în ziua a unsprezecea, indicând astfel o stabilizare a randamentului cuantic al fotosistemului II. Se remarcă că conținutul de clorofilă a manifestat valori relativ constante în primele șase zile, însă ulterior s-a înregistrat o tendință descrescătoare, diminuându-se (tabelul 2). În același timp, activitatea catalazei a rămas relativ constantă și scăzută (figura 2). Toți acești indicatori analizați în ansamblu sugerează că arborii de stejar pufos, în ciuda condițiilor persistente de secetă și temperaturi caniculare, își mențin un metabolism normal, dezvoltând o adaptare evolutivă capabilă să facă față unor medii aride.

Conținutul de apă în frunze

În conformitate cu datele prezentate în figura 3, se constată că cel mai mare conținut de apă în frunzele speciilor de stejar analizate a fost înregistrat în prima zi după stresul termic natural. În cazul stejarului pufos, conținutul de apă în frunze, după unsprezece zile de recuperare, a depășit conținutul de apă din frunzele stejarului pedunculat și gorunului în prima zi de la expunerea lor la stresul termic natural (figura 3).

Pentru stejarul pedunculat, se observă o scădere a conținutului de apă pe parcursul perioadei de observație, variind de la 27,4% la început până la 13,8% în ziua a unsprezecea după stresul termic. Această scădere sugerează o sensibilitate a acestei specii la stresul termic, manifestată prin pierderea semnificativă de apă din frunze (figura 3).

În ceea ce privește gorunul, se evidențiază o variație mai redusă a conținutului de apă în frunze, cu o scădere inițială de la 25,5% la 18,3% în ziua a unsprezecea de observație. Datele prezentate indică o adaptare mai eficientă a gorunului la stresul termic în comparație cu stejarul pedunculat.

Stejarul pufos prezintă, de asemenea, o diminuare a conținutului de apă în frunzele sale pe

Tabel 5 Rezultatul testului Kruskal-Wallis privind diferențele după conținutul de apă în frunze între speciile de stejar în decurs de unsprezece zile de recuperare
Result of the Kruskal-Wallis test for differences in leaf water content between oak species during eleven days of recovery

Specii	Dimensiunea eșantionului	Rang mediu
Stejar pedunculat	4	3,5
Gorun	4	5,5
Stejar pufos	4	10,5

Test statistic = 8,0, Valoarea lui P = 0,0183

Notă: Datorită faptului că valoarea calculată a lui P este mai mică de 0,05, ipoteza nulă este respinsă. Aceasta indică faptul că există diferențe semnificative statistic între medianele speciilor de stejar, la un nivel de încredere de 95,0%

parcursul celor unsprezece zile, scăzând de la 40,1% la 29,3%. Totuși, în comparație cu celelalte două specii, stejarul pufos menține un nivel mai ridicat de apă chiar și după expunerea la stresul termic natural.

Rezultatele obținute evidențiază o scădere a conținutului de apă în frunzele celor trei specii de stejar ca răspuns la stresul termic. Cu toate acestea, nivelul și ritmul acestei scăderi variază în funcție de specie. Stejarul pufos s-a distins prin menținerea unui conținut mai ridicat de apă în frunzele sale în comparație cu celelalte specii investigate, sugerând o adaptare specifică a acestei specii pentru retenția apei în timpul stresului termic. La rândul său, stejarul pedunculat a avut un nivel mai redus de apă în frunzele sale, indicând o adaptare mai limitată sau un răspuns diferit la condițiile de stres termic. Diferențele între speciile de stejar analizate ($p < 0,05$) în privința utilizării apei în perioadele de recuperare după stresul termic (tabelul 5) indică existența unor mecanisme adaptive distincte pentru fiecare specie în răspuns la stresul termic natural.

Discuții

Conținutul de clorofilă în frunzele plantelor poate experimenta variații semnificative sub

influența diversilor factori de stres de natură abiotică sau biotică precum: intensitatea și durata stresului (Agathokleous et al., 2020), poluarea atmosferică și a solului (Landi et al., 2019), starea nutrițională a plantelor (Lovreškov et al., 2022).

În cadrul cercetării întreprinse, am observat un conținut relativ constant al clorofilei la speciile de stejar pedunculat și gorun. Cu toate acestea, am identificat o reducere semnificativă a conținutului de clorofilă în frunzele stejarului pufos, care a suferit modificări într-un interval de unsprezece zile, comparativ cu cele din prima zi. Aspectul identificat sugerează o scădere a activității fotosintetice în perioada post-stres termic natural, ceea ce poate fi explicat prin tendința arborilor de a-și ajusta nivelul de clorofilă în funcție de starea lor de stres. Adaptarea activă a nivelului de clorofilă poate reprezenta o strategie fiziologică esențială pentru gestionarea eficientă a condițiilor adverse, în special în contextul studiului nostru privind condițiile de mediu caniculară. Această adaptare contribuie astfel la asigurarea supraviețuirii pe termen lung a speciei în medii caracterizate de temperaturi ridicate și perioade prelungite de secetă.

Un aspect interesant este observația făcută în cadrul experimentelor efectuate cu mai multe specii de arbori edificatori de ecosisteme forestiere din Croația. S-a constatat că arborii de stejar defoliați (defolieri > 25%), precum *Quercus pubescens* și *Quercus ilex*, au prezentat conținuturi semnificativ mai scăzute de clorofilă în comparație cu cei care erau înfrunziți (defolieri ≤ 25%). Dimpotrivă, speciile de pin, cum ar fi *Pinus halepensis* și *Pinus nigra*, au înregistrat un conținut semnificativ mai ridicat de clorofilă la arborii defoliați (Lovreškov et al., 2022).

Se poate argumenta că această diferență se datorează mecanismelor de adaptare la stres. De exemplu, pini își pierd acele ca răspuns la stresul termic și la alte tipuri de stres, conform unor studii (Poyatos et al., 2013; Sicard et al., 2015). Cercetările realizate de Lovreškov et al. (2022) arată că, pentru a compensa pierderea

de suprafață foliară cauzată de defoliere, pînii au alocat energie pentru sinteza clorofilei. Acest comportament poate fi considerat o strategie de adaptare la stresul generat de secetă și alți factori de mediu.

Studiul nostru, în acord cu cele menționate anterior, subliniază importanța diversificării adaptărilor speciilor în fața schimbărilor de mediu și stresurilor, oferind astfel o perspectivă relevantă asupra modului în care plantele dezvoltă strategii variate pentru a se adapta și a face față acestor amenințări.

La nivel celular, stresul termic facilitează generarea și propagarea speciilor reactive ale oxigenului, cunoscute pentru efectele lor extrem de dăunătoare. În acest context, substanțele antioxidante, cu mențiunea specială a catalazei, își îndeplinesc un rol esențial în procesul de detoxificare a acestor specii reactive de oxigen (Zámocký 1999). Prin această acțiune, catalaza contribuie la adaptarea speciilor de stejar la diverse stresuri de mediu (García-Plazaola et al., 1999, Lovreškov et al., 2022), contribuind la menținerea homeostaziei celulare și la protejarea integrității structurale și funcționale a acestora în fața ascensiunii oxidative induse de stresul termic.

Au fost evidențiate diferențe semnificative între diferite nivele a activității catalazei între speciile de stejar analizate. În cazul stejarului pedunculat, în comparație cu celelalte două specii de stejar investigate, s-au înregistrat valori ridicate ale activității catalazei, cu o tendință de creștere de la prima până la a unsprezecea zi după expunerea la stresul termic natural. Această observație este legată de procesul de adaptare al stejarului pedunculat la condițiile persistente de secetă și caniculă. Dimpotrivă, activitatea catalazei la stejarul pufos a înregistrat cele mai scăzute valori, prezentând nivele semnificativ mai reduse ($p < 0,05$) în toate zilele observate după expunerea la stresul termic natural în comparație cu stejarul pedunculat și gorunul.

Nivelul crescut și evoluția progresivă a activității catalazei în frunzele stejarului pedunculat indică intensificarea răspunsului la stresul

termic și posibila creștere a producției de peroxid de hidrogen, având în vedere specificitatea crescută a catalazei pentru H_2O_2 (Zámocký & Koller 1999). Dimpotrivă, stejarul pufos a prezentat o activitate redusă a catalazei, sugerând o adaptare mai eficientă a stresului termic.

Stejarul pedunculat, care se dezvoltă în condiții moderate de temperatură și umiditate, adesea se adaptează la medii reavene și în locurile umede situate în apropierea râurilor, tolerând inundațiile periodice. Activitatea catalazei mai crescută în frunzele acestui stejar poate fi asociată cu adaptarea sa la condițiile de mediu în schimbare. Dimpotrivă, stejarul pufos, o specie heliofită și termofilă, a prezentat o activitate mai redusă a catalazei în comparație cu stejarul pedunculat. Această scădere semnificativă a activității catalazei poate fi legată de adaptarea specifică a acestei specii la condițiile mediului arid și temperaturi caniculare, unde funcționarea normală a metabolismului său nu necesită în mod constant enzime antioxidante pentru a diminua stresul termic, cum ar fi catalaza. Diferențele în activitatea catalazei între cele două specii de stejar ($p < 0,05$) pot fi rezultatul adaptării lor la medii diferite, unde cerințele de protecție antioxidantă variază în funcție de temperaturi și expunerea la soare.

Rezultatele unui studiu privind activitatea catalazei în frunzele colectate de la mai multe specii lemnoase, în condiții naturale din arborete diferite, au evidențiat diferențe semnificative în activitatea catalazei între arborii defoliați (defolieri $> 25\%$) și cei înfrunziți (defolieri $\leq 25\%$), cu excepția speciilor de stejar. Mai specific, pentru *Pinus halepensis* și *Pinus nigra*, s-au observat variații semnificative ale activității catalazei între arborii defoliați și cei înfrunziți. L. Lovreškov et al., (2022) au remarcat o activitate mai ridicată a catalazei în frunzele arborilor defoliați de *Quercus ilex* și *Pinus halepensis*, și invers, activități mai scăzute pentru *Quercus pubescens* și *Pinus nigra*, specii care cresc în condiții naturale. Aceste analize privind indicatorii biologici și examinarea biochimică a stresului oxidativ au permis cercetătorilor să identifice posibilitatea de

determinare a stării de stres a arborilor înainte de apariția unor leziuni și uscări vizibile.

Modul în care activitatea catalazei variază în mugurii speciilor de stejar reprezintă un bio-indicator al echilibrului biodinamic în celule în perioada repausului vegetativ. Cercetările efectuate au relevat că, datorită activității specifice a substanțelor antioxidante și catalazelor în mugurii acestora, stejarul pufos intră mai devreme în starea de repaus și iese mai lent din această fază. Dimpotrivă, la gorun, mugurii intră mai târziu în repaus, dar revin mai rapid din dormanță în sezonul de primăvară. Activitatea catalazei în muguri servește drept indicator al rezistenței speciilor de stejar la temperaturile joase (Dascaluic et al., 2018).

Din cele prezentate, se evidențiază că enzima catalaza este implicată în diferite căi metabolice asociate cu stresul la plante. Variația activității catalazei în frunze furnizează indicii despre reacția speciilor de stejar la stresul termic natural și particularitățile adaptării lor la secetele persistente și valurile de căldură. De asemenea, datorită activității specifice a catalazelor în adaptarea speciilor de stejar în tranziția dintre sezoane, se subliniază rolul lor în reglarea trecerii acestora de la un sezon la altul.

Randamentul cuantic relativ al fotosistemului II în frunzele stejarului pedunculat a evidențiat o tendință de creștere progresivă, fenomen corelat cu intensificarea activității catalazei în decursul celor unsprezece zile de observație. Valorile acestor indicatori, precum și ale coeficientului intensității metabolismului, care sunt relativ scăzute, indică faptul că stejarul pedunculat inițiază progresiv procese de recuperare pentru a se adapta la stresul termic natural.

În ceea ce privește stejarul pufos, în pofida condițiilor persistente de secetă și temperaturi caniculare, acesta a manifestat un randament cuantic relativ constant în primele șase zile, urmat de o ușoară creștere în a unsprezecea zi post-șoc termic natural. Activitatea catalazei la stejarul pufos a fost redusă, iar nivelurile ridicate ale coeficientului intensității metabo-

lismului și conținutul crescut de apă în frunze indică o adaptare evolutivă a acestei specii la condițiile aride.

Privitor la conținutul de apă în frunze, studiul realizat de A. Bolorani et al., (2022) la *Quercus brantii*, specie cu o mare toleranță la secetă, aduce o contribuție în înțelegerea răspunsului acesteia la stresul hidric generat artificial prin irigații cu intensități variabile aplicate puietilor. Modificările semnificative în comportamentul spectral al frunzelor și în caracteristicile geometrice ale acestora, la nivelul absorbției luminii de diverse lungimi de undă, oferă indicii despre răspunsul stejarului persian la condițiile de stres hidric. Rezultatele privind răspunsul comun a stejarului pufos, supus cercetării noastre, și al stejarului persan, ambele specii termofile, la diverse provocări de mediu, reprezintă un exemplu al adaptării lor la anumiți factori de stres.

La gorun, comparativ cu stejarul pedunculat, acesta a prezentat un randament cuantic similar, menținându-se la niveluri ridicate pe durata analizei. Activitatea catalazei a fost mai scăzută în cazul gorunului, iar coeficientul intensității metabolismului și conținutul de apă în frunze au fost semnificativ mai ridicate. Aceste rezultate sugerează că arborii de gorun încep procesul de adaptare la stresul termic cu o ușoară întârziere față de stejarul pedunculat. Conform H. Húdoková et al., (2022) privind răspunsul unui grup de specii din pădurile Europei la stresul termic, activitatea fotosistemului II în frunzele lui *Quercus petraea* a relevat adaptabilitate variabilă la condițiile termice stresante. Datele obținute au evidențiat sporirea termotoleranței fotosistemului II în urma evenimentelor de căldură, sugerând capacitatea acestei specii de a se adapta. În comparație cu alte specii de arbori, precum *Fagus sylvatica*, care au manifestat o sensibilitate variabilă la stresul termic, *Quercus petraea* a evidențiat o mai mare toleranță la temperaturi ridicate.

Aceste rezultate, în concordanță cu datele obținute în această cercetare, demonstrează că termotoleranța speciilor de stejar, cum ar fi gorunul, se modifică în mod specific în func-

ție de condițiile de mediu în care acestea se dezvoltă. Acest aspect subliniază adaptarea și plasticitatea acestor specii în răspunsul lor la schimbările de mediu, evidențind necesitatea unei abordări particulare în gestionarea și conservarea ecosistemelor forestiere în care acești stejari se găsesc.

Concluzii

Analiza indicilor biologici, precum conținutul de clorofilă *a* și *b*, activitatea catalazei, coeficientul intensității metabolismului, randamentul cuantic relativ al fotosistemului II și conținutul de apă în frunze, a scos în evidență diferențe semnificative între speciile de stejar studiate, expuse la stresul termic natural. Evaluarea indicatorilor biochimici a permis să se identifice reacția arborilor la stresul termic și să se evidențieze posibilele mecanisme de adaptare. Rezultatele au relevat că răspunsul la stresul termic variază în funcție de particularitățile ecologice specifice ale speciilor de stejar. Astfel, în condiții similare de mediu, reacția arborilor la stresul termic natural diferă: stejarul pedunculat a manifestat o sensibilitate crescută, inițiind procese adaptive la temperaturile ridicate, în timp ce gorunul a prezentat o sensibilitate moderată, începând adaptarea cu o ușoară întârziere. Stejarul pufos pare să aibă un metabolism normal în condiții stresante, datorită adaptării sale evolutive la medii aride. Monitorizarea pe termen lung, în mediul natural, a variabilelor de mediu și a indicatorilor legați de stres oferă o perspectivă asupra modului în care o specie răspunde condițiilor de mediu extreme.

Bibliografie

- Agathokleous E., Feng Z., Peñuelas J., 2020. Chlorophyll hormesis: Are chlorophylls major components of stress biology in higher plants? *Sci. Total Environ.*, 726: 138637. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138637>
- Anjum N. A., Sofo A., Scopa A., Roychoudhury A., Gill S. S., Iqbal M., 2015. Lipids and proteins-major targets of oxidative modifications in abiotic stressed plants. *Environ. Sci. Pollut. Res.*, 22: 4099-4121. <https://doi.org/10.1007/s11356-014-3917-1>
- Apel K., Hirt H., 2004. Reactive oxygen species: metabolism, oxidative stress, and signal transduction. *Annu. Rev. Plant. Biol.*, 55: 373-399. <https://doi.org/10.1146/annurev.arplant.55.031903.141701>
- Bhatla S. C., Lal M. A., 2018. Plant physiology, development and metabolism. Springer: New Delhi, India, 1237 p. <https://doi.org/10.1007/978-981-13-2023-1>
- Bitá C., Gerats T., 2013. Plant tolerance to high temperature in a changing environment: Scientific fundamentals and production of heat stress-tolerant crops. *Front. Plant Sci.*, 4: 273. <https://doi.org/10.3389/fpls.2013.00273>
- Bolloorani A. D., Ranjbareslamlo S., Mirzaie S., Bahrami H. A., Mirzapour F., Tehrani N. A., 2020. Spectral behavior of persian oak under compound stress of water deficit and dust storm. *Inter. Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 88: 102082. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2020.102082>
- Chamnongpol S., Willekens H., Moeder W., Langebartels C., Sandermann Jr. H., Van M. M., 1998. Defense activation and enhanced pathogen tolerance induced by H₂O₂ in transgenic tobacco. *Proc. Natl. Acad. Sci. U S A.*, 95(10): 5818-5823. <https://doi.org/10.1073/pnas.95.10.5818>
- Dascaliuc A., Cuza P., Florență Gh., 2018. Potențialul redox al extractelor din mugurii arborilor stejjarului pedunculat, gorunului și stejjarului pufos în funcție de anotimp. *Revista pădurilor*, 133(4): 21-36.
- García-Plazaola J. I., Artetxe U., Duñabeitia M. K., Becerril J. M., 1999. Role of photoprotective systems of holm-oak (*Quercus ilex*) in the adaptation to winter conditions. *Journal of Plant Physiology*, 155: 625-630. [https://doi.org/10.1016/S0176-1617\(99\)80064-9](https://doi.org/10.1016/S0176-1617(99)80064-9)
- Hossain M. A., Fujita M., 2013. Hydrogen peroxide priming stimulates drought tolerance in mustard (*Brassica juncea* L.). *Plant Gene Trait.*, 4: 109-123.
- Húdoková H., Petrik P., Petek-Petrik A., Konôpková A., 2022. Heat-stress response of photosystem II in five ecologically important tree species of European temperate forests. *Biologia*, 77(4): 3. <https://doi.org/10.1007/s11756-021-00958-9>
- Keenan R. J., Reams G. A., Achard F., de Freitas J. V., Grainger A., Lindquist E., 2015. Dynamics of global forest area: results from the FAO global forest resources assessment. *For. Ecol. Manag.*, 352: 9-20. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2015.06.014>
- Landi M., Cotrozzi L., Pellegrini E., Remorini D., Tonelli M., Trivellini A., Nali C., Guidi L., Massai R., Vernieri P., 2019. When „Thirsty” means “less able to activate the signalling wave triggered by a pulse of ozone”: A case of study in two mediterranean deciduous oak species with different drought sensitivity. *Sci. Total Environ.*, 657: 379-390. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.12.012>
- Lovreškov L., Redovniković I. R., Limić I., Potočić N., Seletković I., Marušić M., Tušek J. A., Jakovljević T.,

- Butorac L., 2022. Are Foliar nutrition status and indicators of oxidative stress associated with tree defoliation of four mediterranean forest species? *Plants*, 11(24): 3484. <https://doi.org/10.3390/plants11243484>
- Martins M. C., Oliveira A. S., Silva L. A., Primo M. G., Lira V. B., 2022. Biological indicators of oxidative stress [malondialdehyde, catalase, glutathione peroxidase, and superoxide dismutase] and their application in nutrition. *Biomarkers in Nutrition*, 35: 833-856.
- Michelet L., Roach T., Fischer B. B., Bedhomme M., Lemaire S. D., Krieger-Liszky A., 2013. Down-regulation of catalase activity allows transient accumulation of a hydrogen peroxide signal in *Chlamydomonas reinhardtii*. *Plant Cell. Environ.*, 36(6): 1204-1213. <https://doi.org/10.1111/pce.12053>
- Møller I. M., Jensen P. E., Hansson A. Oxidative modifications to cellular components in plants. *Annu. Rev. Plant Biol.*, 2007, 58: 459-81. <https://doi.org/10.1146/annurev.arplant.58.032806.103946>
- Nighat F., Iqbal M., 2000. Stomatal conductance, photosynthetic rate, and pigment content in *Ruellia tuberosa* leaves as affected by coal-smoke pollution. *Biol. Plant.*, 43(2): 263-167. <https://doi.org/10.1023/A:1002712528893>
- Peakall D. B., 1994. The role of biomarkers in environmental assessment. Introduction. *Ecotoxicology*, 3(3): 157-60. <https://doi.org/10.1007/BF00117080>
- Pereira A., 2016. Plant abiotic stress challenges from the changing environment. *Front. Plant Sci.*, 7: 1123. <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.01123>
- Poyatos R., Aguadé D., Galiano L., Mencuccini M., Martínez-Vilalta J., 2013. Drought-induced defoliation and long periods of near-zero gas exchange play a key role in accentuating metabolic decline of scots pine. *New Phytol.*, 200: 388-401. <https://doi.org/10.1111/nph.12278>
- Raza A., Razzaq A., Mehmood S. S., Zou X., Zhang X., Lv Y., Xu J., 2019. Impact of climate change on crops adaptation and strategies to tackle its outcome: A Review. *Plants*, 8: 34. <https://doi.org/10.3390/plants8020034>
- Rhodes M., 1994. Physiological roles for secondary metabolites in plants: some progress, many outstanding problems. *Plant Mol. Biol.*, 24(1): 1-20. <https://doi.org/10.1007/BF00040570>
- Savill P. S., 2013. *The silviculture of trees used in British forestry*. Publisher CABI, 2nd ed., 280 p. <https://doi.org/10.1079/9781780640266.0000>
- Schuldt B., Buras A., Arend M., Vitasse Y., Beierkuhnlein C., Damm A., 2020. A first assessment of the impact of the extreme 2018 summer drought on Central European forests. *Basic Appl. Ecol.*, 45: 86-103. <https://doi.org/10.1016/j.baec.2020.04.003>
- Sicard P., Dalstein-Richier L., 2015. Health and vitality assessment of two common pine species in the context of climate change in southern Europe. *Environ. Res.*, 137: 235-245. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2014.12.025>
- Sudakov V. G., Kovalenko L. A., Lopaeva N. L., 2008. O metodă de evaluare a stării ecologice a agrobiocenozelor în zona de influență antropică. RU2006102842/13A events, Academia Agricolă de Stat din Ural.
- Teshome D. T., Zharare G. E., Naidoo S., 2020. The threat of the combined effect of biotic and abiotic stress factors in forestry under a changing climate. *Front. Plant Sci.*, 11. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.601009>
- Vanderauwera S., Zimmermann P., Rombauts S., Vandenaabeele S., Langebartels C., Gruijssem W., 2005. Genome-wide analysis of hydrogen peroxide-regulated gene expression in *Arabidopsis* reveals a high light-induced transcriptional cluster involved in anthocyanin biosynthesis. *Plant Physiol.*, 139(2): 806-821. <https://doi.org/10.1104/pp.105.065896>
- Willekens H., Chamnongpol S., Davey M., Schraudner M., Langebartels C., Van Montagu M., Inzé D., Van Camp W., 1997. Catalase is a sink for H₂O₂ and is indispensable for stress defense in C3 plants. *EMBO Journal*, 16(16): 4806-4816. <https://doi.org/10.1093/emboj/16.16.4806>
- Zámocký M., Koller F., 1999. Understanding the structure and function of catalases: clues from molecular evolution and in vitro mutagenesis. *Prog. Biophys. Mol. Biol.*, 72(1): 19-66. [https://doi.org/10.1016/S0079-6107\(98\)00058-3](https://doi.org/10.1016/S0079-6107(98)00058-3)