CZU: 582.632.2:581.4:581.1(478) **https://doi.org/10.59295/sum1(181)2025_24**

EVALUAREA DINAMICII RECUPERĂRII INDICATORILOR FIZIOLOGICI ȘI BIOCHIMII ÎN FRUNZELE PROVENIENȚELOR DE STEJAR PEDUNCULAT (*QUERCUS ROBUR*) DUPĂ ȘOCUL TERMIC

Petru CUZA, Nina ZDIORUC, Nicolai PLATOVSCHII,
Universitatea de Stat din Moldova

Frunzele stejarului pedunculat *(Quercus robur L.*) au fost prelevate din rezervația „Plaiul Fagului”, reprezentând trei proveniențe distincte: Edineț (nord), Hârjauca (centru) și Baimaclia (sud). Studiul a evaluat dinamica recuperării indicelui de clorofilă, randamentului maxim relativ al FSII, conținutului de fenoli, taninuri și apă din frunze, după expunerea acestora la șocul termic (50°C, timp de 20 și 40 de minute). Pe parcursul celor zece zile de recuperare, indicele de clorofilă a prezentat valori scăzute și variabile, cu o tendință de sporire pe gradientul sud-nord, sugerând procese mai intense de senescență în frunzele provenind din Baimaclia. Proveniența Edineț s-a evidențiat printr-un indice de clorofilă semnificativ mai mare și niveluri ușor crescute ale randamentului maxim relativ al FSII, compușilor fenolici, taninurilor și conținutului de apă în frunze, indicând o adaptare mai eficientă la șocul termic. Proveniențele îndepărtate, Edineț și Baimaclia, au manifestat adaptări mai pronunțate în comparație cu Hârjauca, situată în proximitatea locului de cultivare.

Cuvinte-cheie**:** *Quercus robur, frunze, provenienţe, şoc termic, recuperare, indice de clorofilă, randament maxim relativ al FSII, fenoli, taninuri, conţinut de apă*.

ASSESSMENT OF RECOVERY DYNAMICS OF PHYSIOLOGICAL AND BIOCHEMICAL INDICATORS IN LEAVES OF PEDUNCULATE OAK (*QUERCUS ROBUR)* FOLLOWING HEAT SHOCK

The leaves of pedunculate oak (*Quercus robur L.*) were collected from the *Plaiul Fagului* Reserve, representing provenances from Edineț (north), Hârjauca (center), and Baimaclia (south). The study assessed the recovery dynamics of the chlorophyll index, the maximum relative yield of PSII, and the levels of phenols, tannins, and water in the leaves following thermal shock (50°C for 20 and 40 minutes). Over the ten-day recovery period, the chlorophyll index displayed low and variable values, with an increasing trend along the south-to-north gradient, suggesting more pronounced senescence processes in the leaves from Baimaclia. The Edineț provenance stood out with a significantly higher chlorophyll index and slightly elevated levels of the maximum relative yield of PSII, phenolic compounds, tannins, and leaf water content compared to the other provenances, indicating a more effective adaptation to thermal shock. Distant provenances, Edineț and Baimaclia, exhibited more pronounced adaptive responses compared to Hârjauca, which is geographically closer to the cultivation site.

Keywords**:** *Quercus robur*, *leaves, provenance, heat shock, recovery, chlorophyll index, maximum relative yield of PSII, phenols, tannins, water content.*

Introducere

În decursul evoluției, plantele superioare au dobândit fotosinteza, un proces esențial prin care cloroplastele captează lumina solară și o transformă în energie fotochimică. Funcția fotosintetică este extrem de sensibilă la stresurile de mediu, iar temperaturile ridicate, care induc stresul termic, pot afecta semnificativ funcțiile metabolice ale plantelor, activând mecanisme de adaptare sau declanșând moartea celulară. Procesele asociate fotosintezei, inclusiv menținerea fluidității membranei tilacoide, transportul electronilor prin aceasta, reacțiile fotochimice, biosinteza clorofilei și fixarea CO_2 în ciclul Calvin, sunt sensibile la stresul termic [1, 2].

Temperaturile ridicate accelerează degradarea clorofilei, afectând astfel eficiența fotosintezei [3]. Degra-

darea clorofilei este strâns legată de daunele aduse membranelor celulare [4] și de senescența frunzelor [5], proces care poate oferi protecție împotriva pigmenților fototoxici [6]. În condiții normale, sinteza și degradarea clorofilei sunt în echilibru, menținând niveluri constante ale acestui pigment [7]. Cu toate acestea, sub acţiunea stresului termic, conținutul de clorofilă scade, ducând la senescență și cloroză, afectând negativ creșterea și dezvoltarea plantelor [8, 9].

Expunerea prelungită la temperaturi ridicate poate compromite integritatea celulară [10, 11] și inhiba procesele metabolice, afectând supraviețuirea plantelor în condiții de stres climatic sever [12]. Degradarea aparatului fotosintetic în astfel de condiții poate duce la o reducere semnificativă a productivității ecosistemelor forestiere și la pierderea biodiversității [13].

Stresul termic induce o producție rapidă și excesivă de specii reactive ale oxigenului (ROS), care perturbă funcționarea aparatului fotosintetic, ducând la inactivarea fotosistemelor I și II și provocând degradarea proteinelor și pigmenților esențiali, precum clorofila. Acumularea de ROS afectează membranele celulare, lipidele și acizii nucleici, reducând capacitatea plantelor de a se adapta la condiții de stres.

Pentru a proteja integritatea celulară, plantele sintetizează substanțe antioxidante care contribuie la detoxifierea ROS. Zaharurile, proteinele solubile și prolina acționează ca osmoliți și mențin echilibrul hidric al celulelor, protejând biomoleculele și membranele lipidice de deshidratare şi inhibă producția de ROS. În plus, activarea unor factori de transcripție responsabili de răspunsul la stres este esențială pentru aceste mecanisme de adaptare [14, 15].

Compușii fenolici, cel mai mare grup de metaboliți secundari din plante, care variază de la structuri simple cu inele aromatice la molecule complexe (de exemplu, lignine), sunt implicați, de asemenea, în toleranța la stres. Acești compuși joacă un rol esențial în diverse mecanisme fiziologice ce contribuie la creșterea adaptării plantelor. Capacitatea lor antioxidantă puternică este esenţială pentru captarea și neutralizarea speciilor ROS, precum peroxidul de hidrogen (H_2O_2), radicalul hidroxil (OH*), superoxidul (O_2^{*-}) și oxigenul singlet ($^1O_2$) [16]. Precursorii majorității compușilor fenolici din plante sunt sintetizate prin calea acidului shikimic, aceasta fiind etapa inițială a biosintezei fenolilor.

Schimbările climatice și stresul termic reprezintă provocări majore pentru ecosistemele forestiere. În acest context, scopul acestui studiu este de a evalua efectele șocului termic controlat, de intensități variate, asupra proceselor de recuperare a indicelui de clorofilă, randamentului cuantic relativ al fotosistemului II și conținutului de compuși fenolici în frunzele stejarului pedunculat (*Quercus robur*) provenite din culturi de proveniență diferită, situate în Rezervația „Plaiul Fagului.” În plus, acest studiu subliniază importanța înțelegerii răspunsurilor diferitelor provenienţe de stejar pedunculat la stresul termic, în contextul schimbărilor climatice și al gestionării durabile a pădurilor.

Material şi metode

În septembrie 2024, au fost recoltate probe de frunze de stejar pedunculat (*Quercus robur* L.) din provenienţele Baimaclia, Hârjauca și Edineț, situate în rezervația „Plaiul Fagului.” Din fiecare proveniență, s-au colectat frunze din partea inferioară și vestică a unui arbore reprezentativ, cu coroana luminată și dezvoltată, aflat într-o stare bună de sănătate. În total, pentru fiecare proveniență, au fost analizate între 6 și 10 frunze, în funcție de parametrii specifici. Analizele au inclus determinarea indicelui de clorofilă, valorii relative a randamentului cuantic relativ al fotosistemului II (randamentul maxim relativ al FSII), conținutului total de compuși fenolici și taninuri, precum și masei uscate a frunzelor.

În laborator, frunzele au fost plasate în interiorul ultratermostatului cu apă (Universal ultrathermostat „UTU4”, Ungaria)) și supuse șocului termic la 50°C, timp de 20 și 40 de minute. După tratamentul termic, frunzele au fost transferate în exsicatoare și menținute în condiții controlate (temperatură de 25°C, umiditate relativă de 85%, iluminare de 200 lux, fotoperioadă de 16 ore de lumină și 8 ore de întuneric) timp de zece zile. La intervale de 1, 3, 7 și 10 zile de recuperare, au fost prelevate probe pentru a evalua parametrii specifici.

Indicele de clorofilă. Măsurătorile indicelui de clorofilă au fost realizate pe frunze selectate, utilizând un clorofilometru (model CCM-200 plus). Fiecărei frunze i s-au efectuat 3-4 măsurători consecutive pentru fiecare interval de recuperare.

Valoarea relativă a randamentului maxim al fotosistemului II

Fluorescența clorofilei a fost măsurată după adaptarea probelor la condițiile de lumină, utilizând parametrii Ft (fluorescenţa în echilibru) şi Fm′ (fluorescenţa maximă). Determinările au fost realizate la fiecare interval de recuperare, după expunerea probelor la o radiație fotosintetică în stare de echilibru (Ft). Pentru determinarea fluorescenței maxime (Fm′), probele au fost expuse unui impuls de lumină de saturație, utilizând fluorimetrul PAM-2100 (H. Walz, Germania).

După aplicarea șocului termic controlat și în perioadele de recuperare specificate, randamentul maxim relativ al FSII (Fr) a fost calculat conform ecuației:

$Fr = Fm'et / Fm'mt$

unde:

Fr – randamentul maxim relativ al FSII,

Fm'et – fluorescența maximă a fotosistemului II măsurată în perioadele de recuperare pentru frunzele supuse șocului termic,

Fm'mt – fluorescența maximă a fotosistemului II al probelor martor.

Conţinutul total al compuşilor fenolici

Frunzele au fost uscate la o temperatură controlată de aproximativ 40°C pentru a preveni degradarea compușilor bioactivi. După uscare, frunzele au fost cântărite (20 mg pentru fiecare eșantion), fiecare analiză fiind realizată în trei repetiții pentru fiecare proveniență.

Frunzele uscate au fost apoi mărunțite și măcinate într-un mojar cu pistil, în prezența a 2 ml de etanol 80%, obținându-se un extract omogen. Suspensia rezultată a fost incubată într-o baie de apă la 80°C timp de 30 de minute pentru a facilita extracția compușilor fenolici. După această etapă de incubare, amestecul a fost centrifugat la 15.000 g (Sigma 3K30) timp de 15 minute. Supernatantul rezultat a fost colectat și distribuit în câte trei eprubete pentru fiecare proveniență.

Pentru determinarea compușilor fenolici, la supernatant s-au adăugat 2,5 ml de reactiv Folin-Ciocalteu, urmat de o reacție de 3 minute la temperatura camerei. Ulterior, s-a adăugat 2 ml de soluție de carbonat de sodiu 7,5% pentru a asigura mediul alcalin necesar reacției. Eprubetele au fost apoi incubate la temperatura camerei timp de 2 ore, timp în care s-au format complexe de culoare albastră, specifice compușilor fenolici.

Complexele albastre formate au fost măsurate prin spectrofotometrie, utilizând un spectrofotometrul (model СФ-46) la lungimea de undă de 765 nm. Concentrația compușilor fenolici din probe a fost calculată utilizând o curbă de calibrare bazată pe un standard de acid galic.

Conţinutul total al taninurilor

Inițial, s-au cântărit 0,5 g de probe de frunze absolut uscate și mărunțite, în trei repetiții pentru fiecare proveniență. Probele au fost transferate într-un volum de 50 ml de apă distilată și supuse unui proces de extracție pe o baie de apă la 100°C, timp de 45 de minute, pentru a facilita extragerea completă a taninurilor din țesuturile vegetale.

După finalizarea extracției, soluția obținută a fost răcită și filtrată printr-o pâlnie Schott pentru a îndepărta eventualele impurități mecanice. Soluția filtrată a fost diluată cu apă distilată până la un volum final de 50 ml, pentru a obține concentrația necesară a extractului pentru titrare.

Pentru determinarea concentrației de taninuri, s-a pregătit amestecul de reacție, care a inclus 750 ml de apă distilată, 10 ml din extractul obținut și 25 ml de soluție de indigo-carmine, utilizat ca indicator. Amestecul a fost titrat cu o soluție standardizată de permanganat de potasiu 0,1N, adăugată treptat, prin agitare continuă (utilizând agitatorul Type MM-6). Pe măsură ce titrarea avansa, culoarea soluției se modifică de la albastru (datorită indigo-carminei) la verde și, în final, la galben, semnalizând finalul reacției de oxidare completă a taninurilor.

Calculul conținutului de taninuri în proba testată s-a realizat pe baza formulei de mai jos, care exprimă concentrația de taninuri în procente:

$T = ((a - a_1) \times 0{,}004157 \times v \times 100) / (v_1 \times m)$

unde:
T – conţinutul de taninuri, %,
a – volumul soluției de permanganat de potasiu 0,1N utilizat pentru oxidarea taninurilor (proba),
a_1 – volumul de permanganat de potasiu utilizat pentru titrarea apei și a indigo-carminei (martor),
v – volumul total al soluției obținute din proba testată,
v_1 – volumul de extract prelevat pentru testare,
m – masa probei absolut uscate, g,
0,004157 – coeficientul de conversie al volumului soluției de permanganat de potasiu 0,1N pentru oxidarea taninurilor, g.

Conţinutul de apă în frunze

Frunzele au fost cântărite inițial, apoi deshidratate într-o etuvă (Termostat Nr.3) la 105°C până la atingerea unei mase uscate constante. Stabilitatea masei uscate a fost confirmată prin cântăriri repetate, considerate constante după obținerea aceleași valori în urma a trei cântăriri consecutive.

Pentru a preveni reabsorbția umidității, frunzele uscate au fost plasate într-un exsicator cu gel de siliciu (concentrație 50/20), conectat la o pompă de vid care a menținut presiunea cu circa trei unități mai mică decât cea atmosferică. După revenirea frunzelor la temperatura camerei, acestea au fost cântărite utilizând o balanță de precizie (Kern 3100), calibrată anterior prin expunerea la radiații ultraviolete emise de o lampă PRK-2 (190 și 210 nm).

Conținutul de apă în frunze (Ca, %) a fost calculat pe baza masei umede (Mu) și a masei uscate (Ms) ale frunzelor, conform formulei:

$Ca = (Mu - Ms) / (Mu \times 100\%)$

unde:
Ca – conţinutul de apă în frunze, %,
Mu – masa umedă a frunzelor, g,
Ms – masa uscată a frunzelor, g.

Analize statistice

Pentru fiecare indicator descris anterior, au fost calculate valorile medii și abaterile standard pentru proba martor și pentru perioadele de recuperare, utilizând programul Excel. De asemenea, s-au calculat valorile medii cumulate pentru toate perioadele de recuperare, pe baza cărora au fost realizate histograme. Pentru a evalua semnificația diferențelor între proveniențe în funcție de indicatorii precum indicele de clorofilă, conținutul de compuși fenolici și de taninuri, a fost aplicat testul *Levene* pentru omogenitatea varianțelor, utilizând software-ul Statgraphics (versiunea XVI).

Rezultate şi discuţii

Indicele de clorofilă

Indicele de clorofilă este un indicator al cantității de clorofilă prezentă în frunzele diferitelor proveniențe de stejar pedunculat. Datele din figura 1 arată că, pentru toate cele trei proveniențe analizate, valorile acestui indice sunt foarte apropiate pentru anumite doze termice și perioade de recuperare. Acest fapt ne-a determinat să calculăm valorile medii ale indicelui de clorofilă după perioade de recuperare de 1, 3, 7 și 10 zile.

După 10 zile de recuperare în urma șocului termic aplicat la 50°C timp de 20 de minute, indicele de clorofilă a înregistrat valoare medie de 6,8 ur, iar după 40 de minute de 7,1 ur, în frunzele provenienței Baimaclia (zona de sud), comparativ cu 7,1 ur în proba martor. În cazul provenienței Hârjauca (zona de centru), valorile medii au fost de 9,4 ur după 20 de minute și 9,6 ur după 40 de minute, față de 10,9 ur în proba martor, indicând o scădere evidentă a indicelui după șocul termic. Frunzele din proveniența Evineț (zona de nord) au prezentat valori de 10,1 ur după 20 de minute și 10,2 ur după 40 de minute de șoc termic, comparativ cu 12,4 ur în proba martor.

Aplicarea testului *Levene* a demonstrat că proveniența Baimaclia diferă semnificativ de celelalte două proveniențe analizate (Hârjauca și Edineț), atât după 20 de minute, cât și după 40 de minute de expunere

la șocul termic. Totodată, nu au fost găsite diferențe statistice semnificative între provenienţele Hârjauca și Edineț (figura 1). Rezultatul obținut denotă că diferențele în indicele de clorofilă între aceste provenienţe sunt influențate de adaptări epigenetice specifice fiecărei zone, sugerând că proveniența Baimaclia poate prezenta caracteristici de adaptare diferite față de celelalte provenienţe.

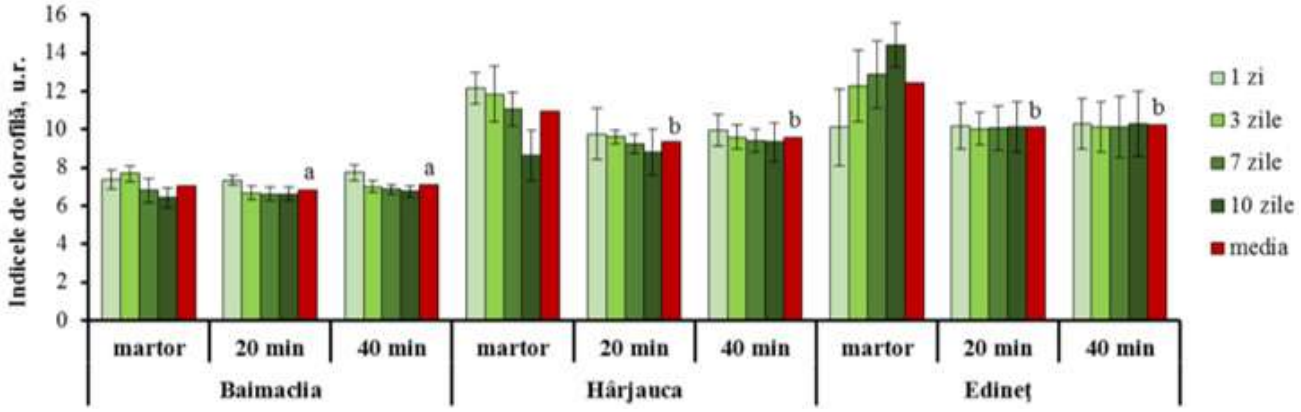


Figura 1. Dinamica recuperării în decurs de 10 zile a indicelui de clorofilă după șocul termic la 50°C, pe o durată de 20 și 40 de minute, în diferite provenienţe

Notă: *Rezultatele testului Levene sunt reprezentate pe histogramă prin literele „a” și „b”. Litera „a” indică diferenţe semnificative între proveniența Baimaclia și celelalte provenienţe (Hârjauca și Edineț), în timp ce litera „b” arată că nu există diferenţe semnificative între provenienţele Hârjauca și Edineț*

Aplicarea testului *Levene* a demonstrat că proveniența Baimaclia diferă semnificativ de celelalte două provenienţe analizate (Hârjauca și Edineț), atât după 20 de minute, cât și după 40 de minute de expunere la șocul termic. Totodată, nu au fost găsite diferenţe statistice semnificative între provenienţele Hârjauca și Edineț (figura 1). Rezultatul obținut denotă că diferențele în indicele de clorofilă între aceste provenienţe sunt influențate de adaptări epigenetice specifice fiecărei zone, sugerând că proveniența Baimaclia poate prezenta caracteristici de adaptare diferite față de celelalte provenienţe.

Datele prezentate indică faptul că proveniența Baimaclia a înregistrat cele mai scăzute valori ale indicelui de clorofilă, ceea ce indică o sensibilitate ridicată la șocul termic și o capacitate redusă de a menține sau reface clorofila în frunze după perioadele de recuperare, în comparație cu celelalte două provenienţe investigate. În schimb, provenienţele Hârjauca și Evineț au avut valori mai ridicate ale indicelui de clorofilă, indicând un răspuns mai eficient la socul termic controlat şi o rezistență mai accentuată în urma proceselor de recuperare. Această tendință de creștere a indicelui de clorofilă de la sud spre nord reflecta o rezilienţă superioară a arborilor proveniți din zona de nord.

Durata recuperată a influențat diferit valorile indicelui de clorofilă în funcție de proveniență. După 10 zile de recuperare, arborii din zona de nord au avut un indice mediu de clorofilă de 9,4 u.r., comparativ cu 6,8 u.r. în zona de sud. Aceasta sugerează o capacitate mai bună de adaptare și recuperare a frunzelor din zona de nord, care au reușit să mențină o cantitate mai mare de clorofilă, în ciuda socului termic suferit. În schimb, frunzele din zona de sud au avut o reacție mai lentă și incompletă, evidențiind o sensibilitate crescută și o capacitate mai redusă de refacere a clorofilei după expunerea la șocul termic.

Datele prezentate demonstrează că indicele de clorofilă al stejarului pedunculat variază în funcție de originea acestora, pe un gradient de latitudine de la sud la nord. Variația observată indică o tendință evidentă de creștere a indicelui de clorofilă de la sud spre nord. Se ştie că în zona de sud procesele de senescență a frunzelor încep să se manifeste mai devreme decât în zona de nord, ceea ce poate diminua cantitatea de clorofilă prezentă în frunze. Această diferență ar putea reflecta variabilitatea ecologică şi adaptările epigenetice specifice ale arborilor stejarului pedunculat din fiecare proveniență, cu cele mai scăzute valori ale indicelui de clorofilă înregistrate provenienţa sudică și cele mai ridicate în cea nordică.

S-a demonstrat că conținutul de clorofilă al unei frunze individuale poate fluctua atât în sus, cât și în jos în timpul toamnei, datorită faptului că clorofila este atât sintetizată, cât și degradată într-o frunză activă.

Fluctuaţia clorofilei este parţial asociată cu ciclul de reparare al fotosistemului II, un mecanism esenţial pentru menţinerea eficienţei fotosintetice [17]. Aceste procese sunt bine corelate cu observaţia că rata de rotaţie a clorofilei creşte la expunerea unei lumini puternice [18]. Totuşi, raportul clorofila *a/b* a rămas constant în frunzele senescente ale tuturor speciilor lemnoase investigate, până când clorofila *a* fost degradată la mai puţin de 10 µg Chl cm^{-2}, ceea ce indică o menţinere a funcţionalităţii fotosistemului II în etapele avansate ale senescenţei [19].

În contextul nostru, variaţia indicelui de clorofilă între provenienţele investigate poate fi explicată atât prin declanşarea timpurie a senescenţei în proveniența Biamaclia (de origine sudică), cât şi capacităţi diferite de menţinere a funcţionalităţii fotosistemului II. Această capacitate a clorofilei este esenţială pentru fotosinteză, chiar şi la începutul toamnei (20 septembrie), în perioada senescenţei, aşa cum se observă în proveniența din nord, unde indicele de clorofilă este semnificativ mai ridicat. Rezultatele indică faptul că frunzele provenienţei din nord păstrează o activitate fotosintetică mai mare, posibil datorată fluctuaţiei mai eficiente a clorofilei şi adaptărilor specifice la condiţiile locale.

Valoarea relativă a randamentului maxim al fotosistemului II

Randamentul maxim relativ al FSII este un indicator al eficienţei utilizării energiei luminoase în procesele fotosintetice din frunzele stejarului pedunculat de proveniență diferită. În figura 2 este prezentată dinamica recuperării frunzelor detaşate de la arborii din trei provenienţe distincte, expuse şocului termic de 50°C timp de 20 de minute. Datele obţinute indică o scădere rapidă a randamentului maxim relativ al FSII la 50 minute după expunere, observată în toate provenienţele analizate. În prima zi, în cazul provenienţei Edineţ, a fost observată cea mai accelerată scădere a randamentului maxim relativ al FSII, atingând o valoare minimă de 0,26 comparativ cu proba martor. Recuperarea în această proveniență a fost lentă şi incompletă faţă de martor, atingând un nivel de 0,39 abia în ziua a zecea.

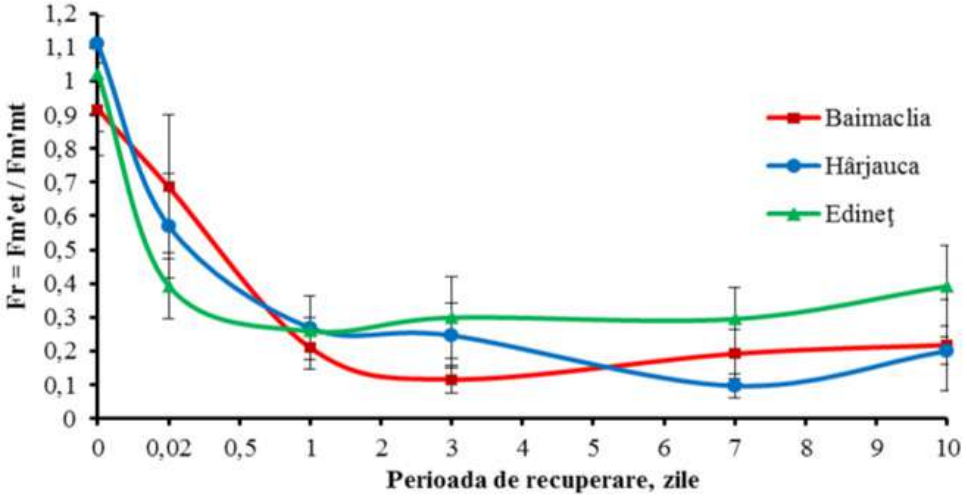


Figura 2. Randamentul maxim relativ al FSII în frunzele stejarului pedunculat de proveniență diferită, supuse recuperării după şocul termic cu 50°C timp de 20 de minute

Pentru proveniența Hârjauca, diminuarea randamentului maxim relativ al FSII a continuat până în ziua a şaptea, urmată de o recuperare uşoară. În schimb, în cazul provenienţei Baimaclia, randamentului maxim relativ al FSII a scăzut brusc în primele două zile, după care s-a observat o recuperare lentă până la finalul celor zece zile de observaţie.

La finalul perioadei de observaţie, proveniența Edineţ a demonstrat cea mai mare capacitate de recuperare, având un randament maxim relativ al FSII semnificativ mai ridicat comparativ cu celelalte două provenienţe. Proveniența Hârjauca a menţinut cel mai scăzut nivel de recuperare în ziua a şaptea, dar a continuat să îşi refacă capacitatea fotosintetică, atingând un nivel similar cu cel al provenienţei Baimaclia.

După expunerea la şocul termic mai intens (50°C timp de 40 de minute), activitatea fotosintetică a fost sever afectată, iar randamentului maxim relativ al FSII a scăzut drastic în cazul provenienţelor Hârjauca şi

Baimaclia, atingând valori de 0,19 şi 0,22 în primele 50 de minute după șoc (figura 3). În continuare, randamentului maxim relativ al FSII a scăzut lent până în ziua a șaptea, când s-a observat anihilarea completă a activității fotosintetice. În ciuda acestui declin, în proveniența Baimaclia s-a observat o ușoară recuperare, a randamentului maxim relativ al FSII ajungând la 0,1 în ziua a zecea. În cazul provenienței Edineț, scăderea randamentului maxim relativ al FSII a fost rapidă în primele 50 de minute și a continuat până în ziua a doua, urmată de o recuperare lentă, atingând o valoare de 0,29 în ultima zi de observație.

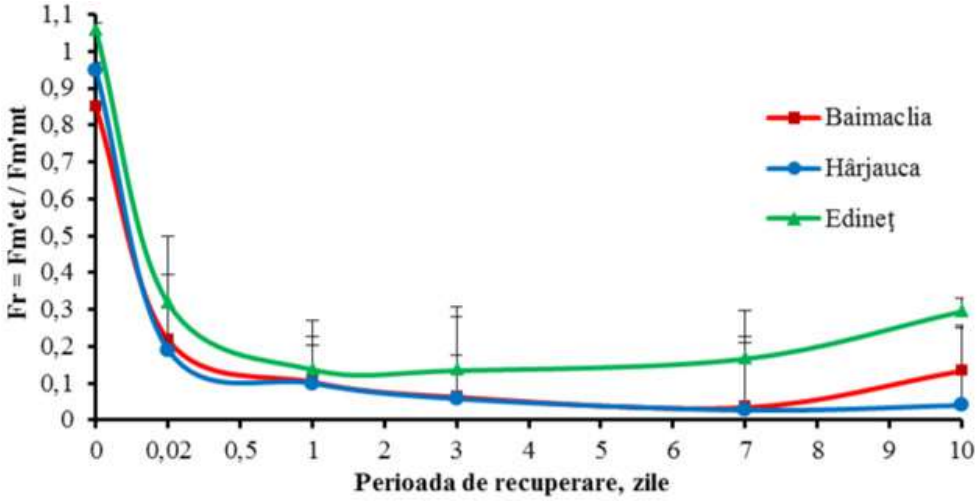


Figura 3. Randamentului maxim relativ al FSII în frunzele stejarului pedunculat de proveniență diferită, supuse recuperării după şocul termic cu 50°C timp de 40 de minute

Rezultate prezentate indică că, în perioada de toamnă, când probele de frunze au fost recoltate (20.09.24), șocul termic aplicat a fost prea drastic pentru a declanșa procese eficiente de recuperare a randamentului maxim relativ al FSII în toate provenienţele investigate. Observațiile indică o toleranță redusă a frunzelor la temperaturi ridicate în această perioadă, sugerând o adaptare sezonieră a stejarilor la condițiile de mediu. Totuși, proveniența Edineț a demonstrat o rezistență ușor superioară, ceea ce indică o reziliență mai accentuată la temperaturile înalte. Un posibil mecanism pentru toleranța redusă observată la șocul termic ar putea fi legat de pregătirea fiziologică a frunzelor pentru senescență, specifică toamnei. În această fază, reducerea activității metabolice și resursele energetice limitate contribuie la o capacitate scăzută de recuperare a fotosistemului II, iar degradarea clorofilei, care are loc relativ devreme în senescență [20], poate exacerba această stare. Diferențele observate între provenienţe, în special în cazul Edineț, pot fi explicate prin mecanisme adaptive locale sau variații genetice, favorizând reziliența la stresul termic controlat. Aceste rezultate subliniază necesitatea unor studii suplimentare pentru a explora variabilitatea sezonieră și potențialele mecanisme epigenetice în răspunsul provenienţelor de stejar pedunculat la stresul termic, contribuind la o mai bună înțelegere a rezilienței arborilor în condițiile schimbărilor climatice.

Literatura de specialitate arată că senescența, fie că este cauzată de stresuri estivale sau de stadiul de dezvoltare, poate afecta semnificativ metabolismul plantelor. Procesele celulare din fazele incipiente ale senescenței sunt foarte dependente de factorii declanșatori, dar în etapele finale, degradarea este similară [21, 22, 23]. În timpul senescenței de toamnă, se observă schimbări semnificative în expresia genelor [24], multe gene legate de fotosinteză fiind reglate în jos, în timp ce genele asociate stresului și degradării sunt reglate în sus sau rămân constante. Totuși, un număr redus de cloroplaste rămân funcționale, iar puține centre ai fotosistemului II continuă să funcţioneze până în fazele târzii ale senescenței [25, 26]. În cazul nostru, este plauzibil ca valurile de căldură și arșița din vara anului 2024, care au contribuit la degradarea clorofilei în frunzele de stejar, împreună cu perioada de toamnă în care au fost recoltate probele, au fost factorii principali care au determinat senescența timpurie și au redus eficiența fotosistemului II în provenienţele investigate. Astfel, se poate concluziona că efectele combinate ale acestor factori au influențat negativ capacitatea de recuperare a fotosistemului II în frunze după șocul termic aplicat.

Conţinutul total de compuşi fenolici

Conținutul total de compuși fenolici este un indicator al capacității frunzelor diferitelor proveniențe de stejar pedunculat de a se proteja împotriva stresului oxidativ cauzat de șocul termic controlat. Datele prezentate în figura 4 indică că, în toate proveniențele analizate, conținutul total de compuși fenolici din proba martor a fost mai ridicat comparativ cu cel prelevat după perioada de recuperare de zece zile, **în urma expunerii şoc**ului termic la 50°C timp de 20 și 40 de minute. Acest rezultat sugerează că frunzele supuse șocului termic au suferit daune în funcțiile metabolice care au compromis capacitatea de a menține niveluri ridicate de compuși fenolici.

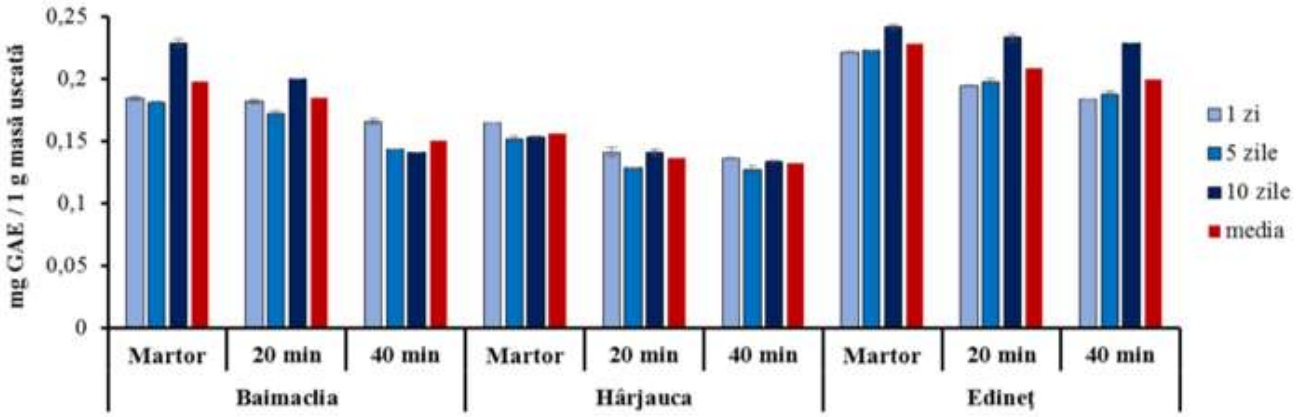


Figura 4. Dinamica recuperării în 10 zile a conţinutului compuşilor fenolici în frunzele stejarului pedunculat din diferite proveniențe, după şocul termic cu 50°C timp de 20 şi 40 de minute

Proveniența Baimaclia (zona de sud) a evidenţiat o variabilitate a conținutului de compuși fenolici după expunerea la șocul termic. De exemplu, în prima zi de recuperare, conținutul a fost de 0,18 mg GAE / 1 g masă uscată, un nivel comparabil cu proba martor. După trei zile, acest conținut s-a diminuat ușor la 0,17 mg GAE / 1 g masă uscată, iar în a zecea zi s-a observat o observat o creștere la 0,20 mg GAE / 1 g masă uscată. Dinamica conținutului compușilor fenolici indică un proces de recuperare treptată, reflectând refacerea parțială a capacității antioxidante a frunzelor pe măsură ce timpul avansează. Totuși, variabilitatea din primele zile de recuperare indică un impact al socului termic asupra metabolismului secundar, afectând sinteza compușilor fenolici. Creșterea ușoară observată după 10 zile reflectă un răspuns adaptiv, sugerând recuperarea parţială a mecanismelor antioxidante.

În cazul șocului termic prelungit (40 de minute), conținutul compușilor fenolici a scăzut treptat pe durata celor zece zile de recuperare, comparativ cu proba martor. Reducerea a fost mai evidentă în primele zile, indicând posibile perturbări ale sintezei sau o degradare mai intensă a acestor compuși în urma socului termic. Aceste schimbări reflectă disfuncții la nivel celular, care au compromis mecanismele de protecție. Rezultatele sugerează că socul termic prelungit a avut un efect negativ asupra mecanismelor antioxidante, ducând la o recuperare incompletă pe durata perioadei de observație.

În proveniența Hârjauca, după expunerea la 50°C timp de 20 de minute, conținutul total de compuși fenolici a înregistrat o scădere la trei zile după șocul termic, comparativ cu prima zi de recuperare. Cu toate acestea, până în ziua a zecea, conținutul de compuși fenolici a revenit la nivelul înregistrat în prima zi. Această dinamică sugerează că, deși expunerea inițială la șocul termic a cauzat o reducere temporară a sintezei compușilor fenolici, procesele de recuperare celulară au permis o refacere treptată a acestora până la finalul perioadei de monitorizare.

După expunerea la o doză termică mai intensă, de 40 de minute, au fost observate procese similare celor sesizate la expunerea de 20 de minute. În prima zi după șocul termic, conținutul compușilor fenolici a scăzut comparativ cu proba martor, continuând să scadă până în a treia zi.

Cu toate acestea, în perioada următoare, până în ziua a zecea, conținutul compușilor fenolici s-a refăcut treptat, atingând din nou nivelul înregistrat în prima zi. Această tendință sugerează că, în ciuda expunerii mai îndelungate la stresul termic, mecanismele de recuperare celulară au reușit să restabilească sinteza

compușilor fenolici, indicând o anumită capacitate de adaptare la stresul oxidativ indus de temperaturi ridicate.

În frunzele provenienței Edineț, au fost observate tendințe similare în procesul de recuperare după expunerea la doze de 50°C, atât în decurs de 20 de minute, cât și de 40 de minute. În ziua a treia, conținutul compușilor fenolici a crescut ușor în comparație cu prima zi, iar în perioada următoare, până în ziua a zecea, s-a înregistrat o creștere semnificativă, atingând o valoare apropiată de cea a probei martor. Datele obţinute indică că proveniența Edineț prezintă o capacitate sporită de adaptare la socul termic controlat, evidențiind o rezistență crescută la condiții adverse. Această adaptare poate fi asociată cu procesele fiziologice și biochimice care permit sinteza compensatorie a compușilor fenolici, esențiali pentru protecția împotriva stresului oxidativ.

Analiza efectuată relevă că cele trei provenienţe investigate manifestă procese distincte de recuperare, atât în ceea ce privește valorile conținutului de compuși fenolici, cât și dinamica acestora pe parcursul unei perioade de zece zile. Cea mai scăzută valoare medie a conținutului total de compuși fenolici (0,14 mg GAE / 1 g masă uscată după 20 de minute de șoc termic și 0,13 mg GAE / 1 g masă uscată după 40 de minute) a fost observată în frunzele provenienței Hârjauca (zona de centru), aflată la o distanță mică de proveniența locală din rezervația „Plaiul Fagului”. În schimb, celelalte două provenienţe, Baimaclia și Edineț, au prezentat un conținut de compuși fenolici evident mai ridicat, cu o valoare medie de 0,21 mg GAE / 1 g masă uscată după 20 de minute de șoc și 0,20 mg GAE / 1 g masă uscată după 40 de minute (în cazul provenienței Edineț). Totuși, aceste procese se manifestă doar ca tendințe, deoarece testul *Levene* nu a evidențiat diferențe semnificative între provenienţe.

Rezultatele prezentate indică în mod clar că provenienţele din zonele de nord și sud, situate la distanțe considerabile față de locul de instalare a culturilor din zona de centru a rezervației „Plaiul Fagului”, prezintă o capacitate de adaptare mai intensă la condițiile de mediu. În schimb, proveniența Hârjauca, situată la o distanță mică și instalată în condiții de mediu apropiate cu cele ale provenienței locale, demonstrează un proces de adaptare mai lent. Această observație sugerează că diversitatea genetică și adaptarea epigenetică a stejarului pedunculat, derivată din condiții de mediu specifice, influențează semnificativ capacitatea de reacție și adaptare la socul termic.

Studiile anterioare subliniază că compușii fenolici sunt metaboliți secundari cu un potențial antioxidant considerabil, capabili să interacţioneze cu ROS. Stresurile de mediu pot influența sinteza acestor compuși, fie prin creșterea, fie prin scăderea producției lor în celule.

De asemenea, compușii fenolici au capacitatea de a elimina ROS, de a forma un complex cu metalele și de a stimula activitatea enzimelor oxidative [27]. O activitate crescută a enzimelor antioxidante este esențială pentru creșterea rezistenței plantelor la factorii de stres, ceea ce înseamnă că variațiile observate în conținutul de compuși fenolici în frunzele diferitelor provenienţe pot fi direct corelate cu capacitatea lor de a face față stresului termic.

Conţinutul total al taninurilor

Conținutul total de taninuri reflectă capacitatea frunzelor de stejar pedunculat din diferite provenienţe de a se proteja împotriva stresului oxidativ indus de șocul termic controlat. Din diagrama prezentată în figura 5, rezultă că, în proveniența Baimaclia, după expunerea la șocul termic de 50°C timp de 20 de minute, conținutul total de taninuri în probele de frunze a fost de 4,3% în prima zi, în timp ce în proba martor, conținutul a fost puțin mai scăzut, de 3,4% din total. Diferențele observate denotă că expunerea frunzelor șocului termic a determinat o creștere inițială a producției de taninuri, ca reacție de neutralizare a ROS acumulate în celule, în scopul atenuării stresului oxidativ. După 10 zile de recuperare, conținutul taninurilor sa diminuat la 3,1%, în timp ce în proba martor a crescut la 4,1%. Dinamica observată indică faptul că, pe măsură ce procesul de recuperare a evoluat, frunzele supuse șocului termic și-au epuizat rezervele de taninuri sau și-au redus activitatea antioxidantă, în timp ce frunzele din proba martor au reușit să mențină sau chiar să-și îmbunătățească capacitatea de protecție antioxidantă. Acest fapt sugerează existența unor strategii diferite de recuperare post-stres între probele tratate și cele martor.

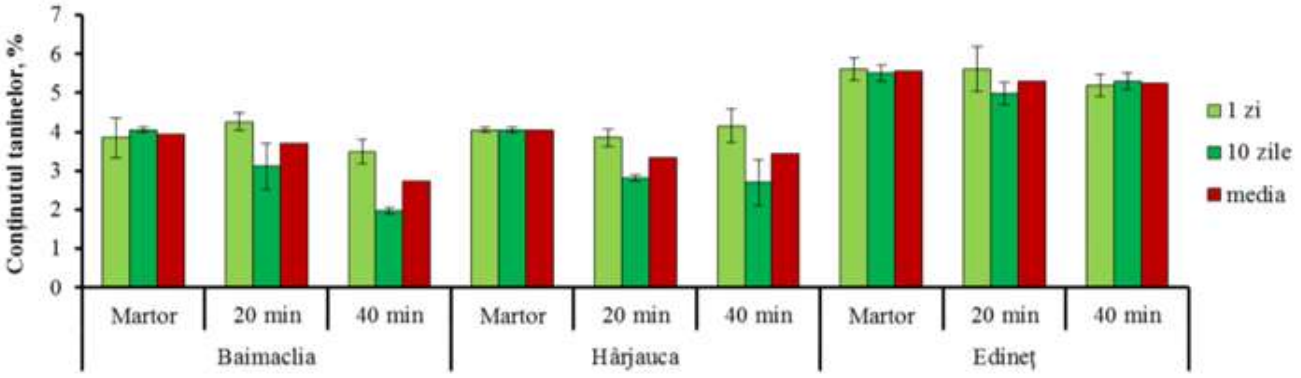


Figura 5. Conținutul total de tanin̆uri în diferite proveniențe de stejar pedunculat apreciat în zece zile de recuperare după șocul termic la 50°C timp de 20 și 40 de minute

După expunerea la șocul termic de 40 de minute, conținutul total de tanin̆uri a scăzut comparativ cu cel înregistrat după 20 de minute. Astfel, la o zi după șocul termic, conținutul de tanin̆uri a fost de 3,5%, iar după zece zile de recuperare a scăzut la 2,0%, ambele valori fiind inferioare celor observate în proba martor (figura 5). Datele analizate indică faptul că expunerea prelungită la șocul termic determină la o diminuare a eficacității tanin̆urilor, ceea ce poate indica o limită a capacităților lor de funcționare antioxidantă în condiții de stres termic.

Frunzele din proveniența Hârjauca (zona de centru), după expunerea la șocul termic de 50°C timp de 20 de minute, au prezentat un conținut total de tanin̆uri mai scăzut atât în prima zi, cât și după zece zile de recuperare, în comparație cu cele din proveniența Baimaclia (zona de sud). Rezultatele obținute indică faptul că arborii din zona de sud au o capacitate mai mare de rezistență la șocul termic decât cei din zona de centru. Totuși, când durata expunerii la șocul termic a fost extinsă la 40 de minute, frunzele din Hârjauca au menţinut un conținut total de tanin̆uri mai ridicat pe întreaga perioadă de recuperare, în comparație cu cele din Baimaclia. Aceste observații subliniază că expunerea prelungită la șocul termic stimulează creșterea conținutului de tanin̆uri la arborii din Hârjauca, sugerând un rol potențial al acestora în neutralizarea ROS. În schimb, arborii din Baimaclia au înregistrat o scădere a eficienței antioxidante în condițiile stresului termic prelungit, ceea ce indică o capacitate redusă de adaptare la expunerea prelungită la temperaturi ridicate.

Analiza efectelor șocului termic asupra procesului de recuperare a conținutului total de tanin̆uri a relevat tendințe interesante între arborii diferitelor proveniențe. În comparație cu cele două proveniențe analizate anterior, proveniența din Edineț se remarcă prin cel mai înalt nivel al conținutului total de tanin̆uri, atât după șocul termic de 20 de minute, cât și după cel de 40 de minute. De exemplu, conținutul de tanin̆uri înregistrat în proveniența Edineț, în prima zi de recuperare, a fost de 5,6% după 20 de minute și de 5,2% după 40 de minute de șoc termic. În ambele cazuri, acest conținut a fost mai mare decât cel observat în proveniența Baimaclia, cea mai sudică, unde conținutul de tanin̆uri a fost de 4,3% după 20 de minute și de 3,1% 40 de minute. Totuși, diferențele între proveniențele investigate nu au fost semnificative conform testului *Levene*, ceea ce sugerează că variațiile observate în conținutul de tanin̆uri sunt în principal tendențiale.

Deși diferențele observate în conținutul de tanin̆uri între proveniențele studiate nu au fost statistic semnificative, acestea sugerează că variațiile observate sunt în principal tendințe, indicând o capacitate variabilă de răspuns la acţiunea şocului termic. În plus, literatura de specialitate susține că activitatea antioxidantă a tanin̆urilor este strâns legată de greutatea moleculară relativă; cu cât aceasta este mai mare, cu atât mai puternică este activitatea antioxidantă [28]. Capacitatea tanin̆urilor de a neutraliza radicalii liberi este influențată de numărul și gradul de polimerizare al grupărilor hidroxil, iar o concentrație mai mare de grupări hidroxil facilitează oxidarea acestora, sporindu-le astfel activitatea [29, 30]. Activitatea antioxidantă a tanin̆urilor poate juca un rol esenţial în procesul de recuperare post-stres termic, oferind o explicație suplimentară pentru variațiile observate în conținutul compuşilor fenolici între diferite proveniențe studiate.

Conţinutul de apă în frunze

În prima zi de recuperare după șocul termic, la provenienţele investigate se observă o tendință de sporire a conținutului de apă de la cele de origine sudică către cele nordice. Astfel, frunzele prelevate din proveniența Baimaclia (zona de sud) au înregistrat un conținut de apă comparativ mai scăzut (36,3%), în timp ce cele din proveniența Edineț (zona de nord) au avut un conținut vizibil mai ridicat (41,9%) (figura 6). Rezultatul obținut indică faptul că frunzele provenienței Edineț, în comparație cu cele din alte zone, dispun de o capacitate mai mare de a menține apa în perioada de toamnă, semnalizând o adaptare ecologică superioară.

După zece zile de recuperare, tendința de reținere a apei în frunze s-a modificat. Provenienţele din Baimaclia și Hârjauca au demonstrat conținuturi de apă foarte asemănătoare, de 41,7% și, respectiv, 41,4%. În schimb, frunzele din proveniența Edineț au avut un conținut de apă evident mai mare (45,5%). Aceste observații demonstrează că, după o perioadă prelungită de recuperare, comparativ cu prima zi, conținutul de apă a crescut vizibil în provenienţele de origine îndepărtată, cultivate pe teritoriul rezervației „Plaiul Fagului”. Cele prezentate arată că provenienţele de origine îndepărtată manifestă o capacitate mai ridicată de adaptare la noile condiții de mediu, ceea ce le conferă un avantaj competitiv în fața celor din zonele mai apropiate.

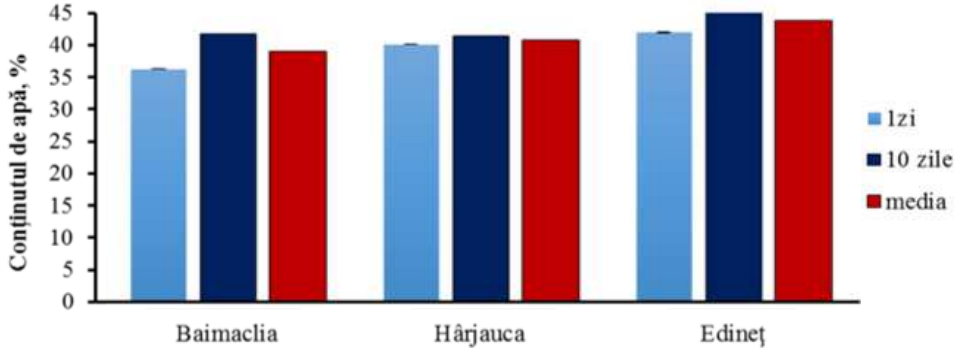


Figura 6. Evoluția conținutului de apă în frunze, estimată după zece zile de recuperare a frunzelor din diferite provenienţe de stejar pedunculat

Frunzele joacă un rol esențial în interacțiunile plantă-mediu, având o asociere directă cu procesele fundamentale de fotosinteză și transpirație [31]. Conținutul de apă din frunze s-a dovedit a fi un indicator semnificativ al stresului hidric şi termic, având o corelație strânsă cu ariditatea atmosferică, disponibilitatea apei în sol, toleranța plantelor la secetă și temperaturi ridicate [32, 33, 34]. Mai multe cercetări au evidențiat impactul secetei asupra stării apei în plante, subliniind necesitatea monitorizării conținutului de apă în frunze în contextul schimbărilor climatice [35, 36].

Cu toate acestea, studiile dedicate proceselor de recuperare a conținutului de apă după șocul termic, controlat pe diferite durate, sunt insuficient dezvoltate. Investigarea dinamicii acestor procese în culturile de proveniență diferită de stejar pedunculat este esențială pentru a înțelege mecanismele prin care plantele de origini variate se adaptează la condițiile de mediu în care sunt cultivate. În studiile noastre efectuate în rezervația „Plaiul Fagului”, am observat că frunzele provenite din surse îndepărtate demonstrează o capacitate superioară de a menține conținutul de apă, sugerând o adaptare mai eficientă la condițiile generate de șocul termic. Această constatare evidențiază importanța conținutului de apă nu doar ca un indicator al stresului termic, ci și ca un parametru cheie în evaluarea adaptării plantelor în funcție de originea lor.

Concluzii

În perioada de toamnă, senescența influențează fluctuația conținutului clorofilă și reduce capacitatea fotosintetică a frunzelor, diminuând astfel toleranța plantelor în condiții de stres. În cercetările noastre, cu frunze prelevate la 20 septembrie 2024, am observat un indice de clorofilă variabil și scăzut, care, după zece zile de recuperare post-șoc termic, a prezentat diferențe semnificative între proveniența de origine nordică și cele din centrul și sudul republicii. S-a remarcat tendința de creștere a indicelui de clo-

rofilă pe gradientul sud-nord, ceea ce sugerează un debut mai timpuriu al senescenței la provenienţa Baimaclia, de origine sudică. În toate provenienţele, indicele redus de clorofilă a fost corelat cu o recuperare scăzută a randamentului maxim relativ al FSII după șocul termic, diminuând capacitatea de toleranță a frunzelor la șocul termic controlat de durată variabilă, probabil din cauza proceselor de senescență. Dintre provenienţele analizate, cea din Edineț, de origine nordică, a arătat o rezistență superioară, evidențiată prin menținerea unui indice de clorofilă semnificativ mai mare și prin valori ușor crescute ale randamentului maxim relativ al FSII, fenolilor, taninurilor și apei în frunze, după zece zile de recuperare. Aceste rezultate sugerează o adaptare mai eficientă a acestei provenienţe la șocul termic controlat, conferindu-i astfel o reziliență crescută la începutul toamnei. De asemenea, se observă o capacitate de adaptare mai pronunțată la provenienţele mai îndepărtate, precum Edineț și Baimaclia, comparativ cu Hârjauca, care are o origine mai apropiată de cea locală. Diferenţele de răspuns observate între provenienţe pot fi explicate prin adaptări epigenetice potenţial distincte la condiţiile specifice ale mediului din rezervaţia „Plaiul Fagului”.

Bibliografie:

1. CAI Y. Q., TARIN M. W. K., FAN L. L., XIE D. J., RONG J. D., HE T. Y., CHEN L. G., ZHENG Y. S. *Responses of photosynthesis, chloroplast ultrastructure, and antioxidant system of Morinda officinalis how. to exogenous 2, 4-epibrassinolide treatments under high temperature stress.* In: *Appl. Ecol. Environ. Res*., 2020, vol. 8(3), p. 3981-4004.
2. CHEN J.-H., CHEN S.-T., HE N.-Y., WANG Q.-L., ZHAO Y., GAO W., GUO F.-Q. *Nuclear-encoded synthesis of the D1 subunit of photosystem II increases photosynthetic efficiency and crop yield*. In: *Nat. Plants*, 2020, vol. 6(5), p. 570-580.
3. TIWARI A.K., TRIPATHY B. C. *Temperature Stress Induced Impairment of Chlorophyll Biosynthetic Reactions in Cucumber and Wheat*. In: *Plant Physiol*., 2012, vol. 117, p. 3851-3858.
4. RISTIC Z., BUKOVNIK U., PRASAD P. V. V. *Correlation between heat stability of thylakoid membranes and loss of chlorophyll in winter wheat under heat stress.* In: *Crop Sci*., 2007, vol. 47, p. 2067-2073.
5. AL-KHATIB K., PAULSEN G. M. *Mode of high-temperature injury to wheat during grain development*. In: *Plant Phy*., 1984, vol. 61, p. 363-368.
6. HÖRTENSTEINER S. *Stay-green regulates chlorophyll and chlorophyll-binding protein degradation during senescence.* In: *Trends Plant Sci*., 2009, vol. 14, p. 155-162.
7. WANG Q. L., CHEN J.-H., HE N. Y., GUO F. Q. *Metabolic reprogramming in chloroplasts under heat stress in plants.* In: *Int. J. Mol. Sci*., 2018, vol,19, p.849.
8. ALLAKHVERDIEV S. I., KRESLAVSKI V. D., KLIMOV V. V., LOS D. A., CARPENTIER R., MOHANTY P. *Heat stress: an overview of molecular responses in photosynthesis.* In: *Photosynth. Res*., 2008, vol. 98, p. 541-550.
9. ROSSI S., BURGESS P., JESPERSEN D., HUANG B. *Heat-induced leaf senescence associated with chlorophyll metabolism in bentgrass lines differing in heat tolerance.* In: *Crop Sci*., 2017, vol. 57, p. 169-178.
10. DASCALIUC A., CUZA P. *Aprecierea capacităţii adaptive a frunzelor de gorun (Quercus petraea Liebl.) faţă de temperaturile ridicate prin metoda de fracţionare a dozei termice*. În: *Mediul ambiant*, 2009, nr. 3(45), p. 15-18.
11. CUZA P. *Influenţa temperaturii şi duratei ei de acţiune asupra adaptării frunzelor de Quercus robur la şocul termic.* În: *Buletinul Academiei de Ştiinţe a Moldovei. Ştiinţele vieţii*, 2016, nr. 3(330), p. 88-95.
12. WAHID A., GELANI S., ASHRAF M., FOOLAD M. R. *Heat tolerance in plants: an overview. Environ*. In: *Exp. Bot*., 2007, vol. 61, p. 199-223.
13. AUGUSTO L., BOČA A. *Tree functional traits, forest biomass, and tree species diversity interact with site properties to drive forest soil carbon.* In: *Nat. Commun*., 2022, vol. 13(1), 1097.
14. OSÓRIO M. L., OSÓRIO J., ROMANO A. *Photosynthesis, energy partitioning, and metabolic adjustments of the endangered cistaceae species tuberaria major under high temperature and drought*. In: *Photosynthetica*, 2013, vol. 1, p. 75-84.

15. PUNIRAN-HARTLEY N., HARTLEY J., SHABALA L., SHABALA S. *Salinity-induced accumulation of organic osmolytes in barley and wheat leaves correlates with increased oxidative stress tolerance*. In: *Plant Physiol. Biochem.*, 2014, vol. 83, p. 32-39.
16. MELLACHERUVU S., TALAKAYALA A., GARLADINNE M. *Crop Improvement of cereals through manipulation of signaling pathways in response to drought stress.* In: *Plant Signaling Molecules*; Khan M. I. R., Reddy P. S., Ferrante A., Khan N. A., Eds.; Woodhead Publishing: Cambridge, 2019, p. 125-139.
17. LIN Y. P., LEE T. Y., TANAKA A., CHARNG Y. Y. *Analysis of an Arabidopsis heat-sensitive mutant reveals that chlorophyll synthase is involved in reutilization of chlorophyllide during chlorophyll turnover*. In: *The Plant Journal*, 2014, vol. 80, p. 14-26.
18. BEISEL K. G., JAHNKE S., HOFMANN D., KÖPPCHEN S., SCHURR U., MATSUBARA S. *Continuous turnover of carotenes and chlorophyll a in mature leaves of Arabidopsis revealed by 14CO_2 pulse-chase labeling*. In: *Plant Physiology*, 2010, vol. 152, p. 2188-2199.
19. KESKITALO J., BERGQUIST G., GARDESTRÖM P., JANSSON S. *A cellular timetable of autumn senescence.* In: *Plant Physiology*, 2005, vol. 139, p. 1635-1648.
20. HORTENSTEINER S. *Chlorophyll degradation during senescence*. In: *Annual Review of Plant Biology*, 2006, vol. 57, p. 55-77.
21. FISCHER A. M. *The complex regulation of senescence*. In: *Critical Reviews in Plant Sciences*, 2012, vol. 31, p. 124-147.
22. GUO Y., GAN S. S. *Convergence and divergence in gene expression profiles induced by leaf senescence and 27 senescence-promoting hormonal, pathological and environmental stress treatments*. In: *Plant, Cell & Environment*, 2012, vol. 35, p. 644-655.
23. SPRINGER A., ACKER G., BARTSCH S., BAUERSCHMITT H., REINBOTHE S., REINBOTHE C. *Differences in gene expression between natural and artificially induced leaf senescence in barley.* In: *Journal of Plant Physiology*, 2015, vol. 176, p. 180-191.
24. Andersson A., Keskitalo J., Sjödin A. , Bhalerao R., Sterky F., Wissel K., Tandre K., Aspeborg H. et al. *A transcriptional timetable of autumn senescence*. In: *Genome Biol*., 2004, vol. 5(4), R24.
25. KESKITALO J., BERGQUIST G., GARDESTRÖM P., JANSSON S. *A cellular timetable of autumn senescence.* In: *Plant Physiology*, 2005, vol. 139, p. 1635-1648.
26. MOY A., LE S., VERHOEVEN A. *Different strategies for photoprotection during autumn senescence in maple and oak.* In: *Physiologia Plantarum*, 2015, vol. 155, p. 205-216.
27. AMAROWICZ R., STANISLAW WEIDNER S., WÓJTOWICZ I., KARAMAĆ M., KOSINSKA A., RYBARCZYK A. *Influence of low-temperature stress on changes in the composition of grapevine leaf phenolic compounds and their antioxidant properties.* In: *Functional Plant Science and Biotechnology*, 2010, vol. 4, p. 90-96.
28. GÜLÇIN L., HUYUT Z., ELMASTA M., ABOUL-ENEIN H. Y. *Radical scavenging and antioxidant activity of tannic acid.* In: *Arabian Journal of Chemistry*, 2010, vol. 3, p. 43-53.
29. TOSHIAKI A., KOSHIYAMA I., FUKUSHIMA D. *Antioxidative properties of procyanidins B-1 and B-3 from azuki beans in aqueous systems*. In: *Agricultural and Biological Chemistry*, 1988, vol. 52, p. 2717-2722.
30. OLEJAR K. J., RAY S., KILMARTIN P. A. *Enhanced antioxidant activity of polyolefin films integrated with grape tannins.* In: *J Sci Food Agric*., 2016, vol. 96, p. 2825-2831.
31. BOWMAN W. D. *The relationship between leaf water status, gas exchange, and spectral reflectance in cotton leaves.* In: *Remote Sens. Environ*., 1989, vol. 30(3), p. 249-255.
32. CAO Z., WANG Q., ZHENG C. *Best hyperspectral indices for tracing leaf water status as determined from leaf dehydration experiments.* In: *Ecol. Indic*., 2015, vol. 54, p. 96-107.
33. DASCALIUC A., RALEA T., ZDIORUC N., CUZA P. *The influence of heat shock and desiccation on boxwood (Buxus sempervirens L.) leaves' photosystem II and antioxidant systems activity.* In: *Contribuții botanice*, 2022, vol. 57, p. 109-120.
34. CUZA P. *Reacția la stresul termic natural a trei specii de stejar: analiza a cinci indicatori biologici într-un mediu forestier specific*. În: *Bucovina forestieră*, 2024, nr. 24(1), p. 7-21.

35. FAROOQ M., WAHID A., KOBAYASHI N., FUJITA D., BASRA S. M. A. *Plant drought stress: Effects, mechanisms and managemen*t. In: *Agron. Sustain. Develop*., 2009, vol. 29(1), p. 185-212.
36. DAMM A., PAUL-LIMOGES E., HAGHIGHI E., SIMMER C., MORSDORF F., SCHNEIDER F. D., VAN DER TOL C., MIGLIAVACCA M., RASCHER U. *Remote sensing of plant-water relations: An overview and future perspectives.* In: *J. Plant Physiol*., 2018, vol. 227, p. 3-19.

Date despre autori:
Petru CUZA, profesor universitar Universitatea de Stat din Moldova, Departamentul de Geoştiinţe şi Silvicultură.
ORCID: 0000-0003-0192-4427
Email: petrucuza@mail.ru

Nina ZDIORUC**,** cercetător științific, Universitatea de Stat din Moldova, Institutul de Genetică, Fiziologie și Protecție a Plantelor.
ORCID: 0009-0000-8879-3954
Email: nina.zdioruk@sti.usm.md

Nicolai PLATOVSCHII, cercetător științific, Universitatea de Stat din Moldova, Institutul de Genetică, Fiziologie și Protecție a Plantelor.
ORCID: 0000-0001-6747-8226
Email: nik.plat@hotmail.com

Prezentat: 05.12.2024