

DOKTORI ÉRTEKEZÉS TÉZISEI

A paradicsom glutation transzferáz enzimek szerepe a gyökerek
abiotikus stresszválaszában és a Théta osztályú GST enzimek
funkciójának bioinformatikai vizsgálata

Hajnal Ádám Barnabás

Témavezető:

Dr. Mainé Dr. Csiszár Jolán

habil. egyetemi docens

Biológia Doktori Iskola

Szegedi Tudományegyetem

Növénybiológiai Tanszék, Biológia Intézet



2025.

Bevezetés

A paradicsom (*Solanum lycopersicum* L.) globálisan jelentős gazdasági növény, amelynek termesztését a klímaváltozáshoz kapcsolódó stresszforrások fenyegetik, mint például a szárazság és a talaj szikesedése. Ezek a stressztényezők zavart idéznek elő a növények vízháztartásában, illetve negatív hatással vannak a fotoszintézisre, a gázcserére és az ásványianyag-felvételre, ami reaktív oxigénfajták és más káros vegyületek (például lipid-peroxidok) fokozott termelődéséhez, így oxidatív stressz kialakulásához vezet. Az oxidatív károsodás ellen a növényi sejteket antioxidáns rendszerek védik. Az oxidatív ágensek és az antioxidáns rendszerek együttesen alakítják a sejtek redukált-oxidált (redox) állapotát. Mind antioxidánsként, mind a sejtek, szövetek redox állapotának meghatározásában kiemelkedő jelentőséggel bír a glutation (redukált forma: GSH, oxidált forma: GSSG) és a kapcsolódó enzimek, köztük a glutation transzferázok (GST-k). A heterogén GST fehérje család tagjai közül a Fí, Théta és Tau osztályokba tartozók glutation-függő peroxidáz (GPOX) aktivitással is rendelkeznek, amely kulcsfontosságú a stressz-indukált sejtkárosító metabolitok eltávolításában. A GPOX aktivitást mutató GST-k szoros kapcsolata a glutation-rendszerrel kitüntetett szerepet kölcsönöz ezeknek az enzimeknek a sejtek redox állapotának és a növények stresszre adott válaszának meghatározásában. Kutatásaink során a paradicsom GST-enzimek (SlGST) funkcióját vizsgáltuk só- és ozmotikus stressz alkalmazásával, elsősorban a gyökérrendszerben zajló folyamatokra összpontosítva. A vizsgálatokba több, nemzetközileg ismert és hazai fajtát (Ailsa Craig, Elán, Mobil, Moneymaker) is bevontunk, és a fiziológiai és molekuláris elemzések mellett bioinformatikai módszerekkel is feltérképeztük egyes SlGST-enzimek fehérje-szubsztrát kölcsönhatásait, hogy megismerjük azok eddig ismeretlen potenciális funkcióit.

Célkitűzés

Irodalmi adatok alapján ismert, hogy különféle stresszhatások számos *SlGST* gén expresszióját indukálják, és egyes *SlGST* fehérjék túltermeltetése fokozza a növények stressztoleranciáját. Azonban a paradicsom GST-k részletesebb jellemzése (mind osztályok szintjén mind individuális izoenzimek esetén) további vizsgálatokat igényel. A dolgozatban az *SlGST* enzimek stresszválaszban betöltött szerepét vizsgáltuk, különös tekintettel az ozmotikus és sóstressz kezelések gyökérre kifejtett hatásaira. Több paradicsom fajta bevonásával vizsgáltuk a GST enzimek működésében meghatározó glutation-rendszer és redox állapot változásait különböző időtartamú stresszkezelések során, valamint célul tűztük ki különböző a fajták stressz-tűrőhatárának összehasonlítását molekuláris markerek alapján. Bár az egyes GST osztályok általános enzimatisma tulajdonságai jól ismertek, az individuális izoenzimek specifikus biológiai szerepe és szabályozása még tisztázatlan. Ezért kiemelt figyelmet fordítottunk az abiotikus stressz alatt kiemelkedő szerepet játszó paradicsom GST-k azonosítására, illetve funkciójuk prediktálására.

Munkám során az alábbi fő kérdésre kerestem választ:

1. Hogyan jellemezhető a stressz hatása a vizsgált paradicsom fajták gyökerében a különböző ozmotikus- és sóstressz kezelések során, különös tekintettel a glutation-rendszerre, valamint a redox potenciálra?
2. Milyen fajta-specifikus mintázatok azonosíthatók a molekuláris markerek, illetve a GST-k specifikus enzimaktivitása és génexpressziója szerint? A tapasztaltak alapján mely paradicsom GST-k bírhatnak általánosan kiemelkedő szereppel?
3. Milyen funkciókra lehet következtetni eredményeink alapján kiválasztott *SlGST* fehérjék esetében bioinformatikai módszerek alkalmazásával?

Anyagok és módszerek

Laboratóriumi kísérleteink során összesen négy paradicsom fajtával dolgoztunk: *Solanum lycopersicum* L. cv. Moneymaker, Ailsa Craig, Mobil és Elán. A növényeket négy hetes korukig neveltük hidropónikus rendszerben, paradicsom növények számára optimalizált Hoagland tápoldatban, $200 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ fényintenzitáson, átlagosan 60%-os relatív páratartalom mellett. A tápoldat összetétele: 2 mM $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$, 1 mM MgSO_4 , 0,5 mM KH_2PO_4 , 0,5 mM Na_2HPO_4 , 0,5 mM KCl, 0,001 mM MnSO_4 , 0,005 mM ZnSO_4 , 0,0001 mM $(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24}$, 0,01 mM H_3BO_4 , 0,02 mM Fe(III)-EDTA. A kezelések során a szárazság szimulálására ozmotikus stresszt idéztünk elő mannitol és polietilén-glikol (PEG 6000) alkalmazásával, és a sóstressz hatásának vizsgálatához NaCl-t alkalmaztunk.

A munkánk során három kísérleti rendszerben dolgoztunk. Az I. kísérleti rendszerben egynapos (24 órás) só- és ozmotikus stresszt alkalmaztunk Moneymaker és Ailsa Craig fajták két eltérő koncentrációjú NaCl (100 és 150 mM és mannitol (200 és 300 mM) kezelésével. A II. és III. kísérleti rendszerben a növényeket hosszabb idejű, egyhetes stresszkezeléseknek tettük ki: a II. kísérleti rendszerben Moneymaker, Mobil és Elán fajták 7 napos 100 mM NaCl kezelése, illetve a III. kísérleti rendszerben Moneymaker és Mobil fajták 7 napos emelkedő koncentrációjú PEG kezelése történt (27. napon 2,5%, 29. napon 5%, 32. napon 7% (m/V) PEG-6000 oldattal).

Kísérleteink során a növények gyökerében vizsgáltuk az oxidatív károsodás mértékét a H_2O_2 és malondialdehid (MDA) mennyiségének kimutatásával. Meghatároztuk a gyökerek glutation tartalmát és a glutation redox potenciál (E_{HC}) változásait, amik a stressz mértékének és a stresszhez történő adaptáció indikátorai. A GST-k közül a Fí (SIGSTF), Théta (SIGSTT) és Tau (SIGSTU) osztályú GST-k működésére koncentráltunk: specifikus GST és GPOX aktivitások meghatározása mellett vizsgáltuk az *SIGSTF*, *SIGSTT* és *SIGSTU* gének kifejeződésének változásait, illetve kiválasztott GST gének 5' szabályozó régiójában azonosítottunk abiotikus stresszválaszban fontos *cis*-szabályozó szekvencia elemeket (ABRE (ACGTG), a W-Box (TGAC) és a TCACG motívum).

Kísérleti eredményeink alapján választottuk ki a paradicsom Théta osztályú GST-eket bioinformatikai vizsgálatokhoz. Elvégeztük az SIGSTT-k szekvencia-analízisét és összehasonlítottuk ismert aktivitású és szekvenciájú orthológ (*Arabidopsis thaliana*) GST-ekkel is. A mesterséges intelligencia (MI) nyújtotta lehetőségeket kihasználva, az AlphaFold2

segítségével modelleztük a 4 ismert SLGSTT-t, és molekuláris dokkolást alkalmazva számos lehetséges lipid-peroxidációból származó szubsztrát kötését elemeztük a fehérjéken.

A statisztikai elemzés során egyutas ANOVA-t követően Duncan-féle tesztet alkalmaztunk a SigmaPlot (12.0 verzió, Systat Software Inc., USA) program segítségével. A különbségeket $P \leq 0,05$ esetén tekintettük szignifikánsnak.

Eredmények

Kísérleteink során különböző fajtájú paradicsom növények gyökerét vizsgálva, rövid- és hosszútávú só- és ozmotikus stresszkezeléssel kerestük a növények abiotikus stresszválaszában jelentős GST-eket, és néhány kiválasztott izoenzim funkcióját vizsgáltuk bioinformatikai eszközökkel. A következő főbb megállapításokat tettük:

1. Az I. kísérleti rendszerben, a 24 órás NaCl- és mannitol-kezelések eredményei alapján a Moneymaker fajta hatékonyabb stresszválaszát azonosítottuk. A Moneymaker az alacsonyabb só- és ozmotikus kezelésekre (enyhébb stresszre) is gyorsan reagált az antioxidáns rendszer aktiválásával, ami az oxidatív stresszmarkerek alacsonyabb szintjében, a glutation-rendszer és a kötődő enzimrendszerek aktivitásának változásaiban nyilvánult meg (emelkedő glutation tartalom, negatívabb redox potenciál, fokozódó enzimaktivitás, megváltozott *SIGST* génexpressziós mintázat). Ezzel szemben az Ailsa Craig fajta védekezése, a kiválasztott molekuláris markerek alapján, kevésbé tűnt hatékonynak annak ellenére, hogy ebben a fajtában és ebben a kísérleti rendszerben detektáltuk a legnagyobb számú fokozott expressziójú *SIGST* gént. Az E_{HC} , azaz a redukált és oxidált glutation mennyiségéből és arányából számított glutation félcella redukációs potenciál értékek alapján felmérhető volt, hogy a kezelések mennyire befolyásolták a növények általános állapotát, vagyis azok milyen stressz-tűrőképességgel rendelkeznek. A 24 órás só- és ozmotikus stresszkezelések után a Moneymaker fajtában a glutation mennyisége nőtt, az E_{HC} értékek redukáltabbá váltak minden vizsgált esetben, jelezve az ún. túlkompenzációt. Az Ailsa Craig fajtában ugyanezek a kezelések jelentősebb stresszhatásnak bizonyultak, ami csökkent GSH tartalomban, oxidáltabb redox állapotban is megnyilvánult. A vizsgált paradicsom fajták 100 mM NaCl jelenlétében 7 nap után is negatívabb E_{HC} értéket tartottak fenn, ami a megemelkedett GSH szintek stresszadaptációban játszott szerepét is mutatja. Az egyhetes PEG kezelést követően azonban csökkenő glutation tartalmat és az E_{HC} jelentősen pozitívabb (oxidáltabb) irányba történő elmozdulását tapasztaltuk. Ez jelezte, hogy ez a stressz átlépte a növények stressz-tűrőképességének határát. A vizsgált molekuláris markerek szerint súlyos oxidatív károsodás volt megfigyelhető a gyökerekben. Fontos kiemelni, hogy egyező E_{HC} értékek mellett is az adott fajták védekezési stratégiái eltérőek lehetnek, ahogy azt a GST és GPOX enzimaktivitás mérési eredmények is mutatták a III. kísérleti rendszerben. A hosszú távú ozmotikus stresszkezelés után a Mobil fajtában

mért magasabb GST aktivitás, illetve a Moneymaker fajtában tapasztalt fokozottabb GPOX aktivitás a stressz-kapcsolt enzimrendszerek fajta-specifikusan eltérő működését mutatják.

2. A különböző hosszúságú abiotikus stresszkezelések eredményei alapján megállapítottuk, hogy egyes GST izoenzimek mind a korai stresszválaszban, mind a hosszabb ideig (7 nap) tartó stressz esetén fontos szerepet tölthetnek be. Az előidézett fajta-specifikus tendenciákat figyelembe véve a génexpressziós változások alapján három olyan SIGST gént tudtunk kiválasztani, amelyek vélhetően általánosan jelentős szereppel bírnak a paradicsom növények stresszválaszában: *SIGSTT2*, *SIGSTU15* és *SIGSTU47*.
3. A kísérleti eredményeink alapján a jelentős glutation-függő peroxidáz aktivitással rendelkező Théta GST osztályt kiválasztottuk további, bioinformatikai vizsgálatokhoz. A GSTT-k funkciója a növényekben még mindig kevésbé ismert, de az irodalom már felvetette potenciálisan fontos szerepüket a különféle lipid-peroxidok redukciójában. Az ismert enzimatis aktivitású lúdfű GSTT enzimek bevonásával végzett szekvenanciaanalízis során megállapítottuk, hogy az enzimek aminosav szekvenciája, különösen az szubsztrát-kötőhely régió, erősen konzervált, ami funkcióbeli egyezésre utal a vizsgált enzimek között. Továbbá azonosítottunk peroxisomális lokalizációs szignálokat az SIGSTT2 és SIGSTT3 fehérjéken. A funkcionális hasonlóságot több MI-alapú program bevonásával, például fehérje-modellezéssel és molekuláris dokkolási szimulációkkal is igazoltuk az AtGSTT-k több ismert szubsztrátjával (elsősorban lipid-peroxidációs termékekre fókuszálva). Prediktív jelleggel felfedtük a Théta GST-k általános GPOX aktivitásának szerkezeti viszonyait is, ami fontos eredményt jelent az enzimek aktivitásának mélyebb megértése szempontjából. Összességében sikeresen prediktáltuk a paradicsom GSTT-k lehetséges szerepét, miszerint az SIGSTT2 és SIGSTT3 izoenzimeket peroxisomális, az SIGSTT4-t pedig vélhetően citoszolikus lokalizációjú lipid-peroxidációs termékek kioltásában részt vevő enzimekként azonosítottuk. Ezen enzimek bioinformatikai eszközökkel történő funkcionális jellemzése kapcsolatba hozható a paradicsom növények abiotikus stresszre adott fiziológiai és molekuláris szintű válaszaival.

Summary

In our experiments, we examined the roots of tomato plants of different varieties, using short- and long-term salt and osmotic stress treatments to identify significant GSTs in the plants' abiotic stress response, and we investigated the function of selected isoenzymes using bioinformatics tools.

In our study, we examined changes in oxidative stress markers, the state of the glutathione system, and alterations in gene expression and enzyme activity of glutathione transferases in the roots of tomato plants across three experimental systems. We identified several variety-specific changes, and the E_{HC} (glutathione half-cell reduction potential) values allowed us to assess how the treatments influenced the overall condition of the plants, specifically their stress tolerance. We determined that certain GST isoenzymes play a crucial role in both the early stress response (1 day) and prolonged stress (7 days). During our work, we identified three *SlGST* genes (*SlGSTT2*, *SlGSTU15*, and *SlGSTU47*) that likely have a significant general role in the stress response of tomato plants.

Bioinformatics analysis of the Theta GST class (notable for glutathione-dependent peroxidase activity) revealed conserved substrate-binding regions and peroxisomal localization signals in *SlGSTT2* and *SlGSTT3*. AI-based modeling confirmed their role in quenching lipid peroxidation products, with *SlGSTT4* likely cytosolic. These findings connect GSTT function to tomato plants' molecular/physiological abiotic stress responses.

Publikációs lista

MTMT azonosító: 10074138

A *-gal jelölt közlemények közvetlenül kapcsolódnak a doktori értekezéshez.

Folyóiratban megjelent közlemények:

- ***Hajnal, Á.**, Gallé, Á., Gaál, M., Tompa, B., Pelsőczy, A., Csiszár, J., & Horváth, E. (2025). Exploring the variety-specific roles of glutathione transferases in tomato osmotic stress response. *Plant Science*, 112645. **IF: 4,1**
- Bela, K., Tompa, B., Riyazuddin, R., Horváth, E., Jász, K., **Hajnal, Á.**, Bangash, S. A., Gallé, Á., & Csiszár, J. (2025). The Manifestation of the Dual ROS-Processing and Redox Signaling Roles of Glutathione Peroxidase-like Enzymes in Development of Arabidopsis Seedlings. *Antioxidants*, 14(5), 518. **IF: 6,6**
- ***Horváth, E.**, Kulman, K., Tompa, B., **Hajnal, Á. B.**, Pelsőczy, A., Bela, K., Gallé, Á., & Csiszár, J. (2023). Glutathione transferases are involved in the genotype-specific salt-stress response of tomato plants. *Antioxidants*, 12(9), 1682. **IF: 6,0**
- ***Gallé, Á.**, Bela, K., **Hajnal, Á.**, Faragó, N., Horváth, E., Horváth, M., Puskás, L., & Csiszár, J. (2021). Crosstalk between the redox signalling and the detoxification: GSTs under redox control?. *Plant Physiology and Biochemistry*, 169, 149-159. **IF: 5,437**
- Horváth, E., Bela, K., Holinka, B., Riyazuddin, R., Gallé, Á., **Hajnal, Á.**, Hurton, Á., Fehér, A., & Csiszár, J. (2019). The Arabidopsis glutathione transferases, AtGSTF8 and AtGSTU19 are involved in the maintenance of root redox homeostasis affecting meristem size and salt stress sensitivity. *Plant Science*, 283, 366-374. **IF: 3,591**

Összesített IF: 25,728

Könyvfejezetben megjelent közlemények:

- Pelsőczy, A., **Hajnal, Á.**, Gallé, Á., & Poór, P. (2024). Glutation transzferázok szerepe kalászfuzáriózis során. A reaktív oxigénformákkal és az antioxidáns védekezéssel kapcsolatos újdonságok. (pp 89-98)

- Bela, K., Riyazuddin, R., **Hajnal, Á.**, Gallé, Á., Bangash, S. A., & Csiszár, J. (2020). A növényi glutation-peroxidáz-szerű enzimek szerepe az oxidatív stresszválaszban. Oxidatív stressz és antioxidáns védekezés a növényvilágtól a klinikumig. (pp 12-19)

Poszterek:

- Jász, K. S., Lőrincz, V., Tompa, B., **Hajnal, Á.**, Gallé, Á., Horváth, E., & Csiszár, J. (2025). A hőstressz hatására megjelenő ferroptózis vizsgálata *Arabidopsis thaliana* csíranövényeken. A Magyar Szabadgyök-Kutató Társaság XIII. Kongresszusa, Debrecen, Magyarország. 2025.08.28.-2025.08.29. (pp 47)
- **Hajnal, Á. B.**, Gallé, Á., & Csiszár, J. (2025). Computational modelling of auxin, cytokinin, and salicylic acid binding by tomato Phi class glutathione transferases. Plant Biology Europe 2025, Budapest, Magyarország. 2025.06.25.-2025.06.28. (pp 163)
- Csiszár, J., Tompa, B., **Hajnal, Á. B.**, Horváth, E., Bela, K., Jász, K. S., Ayaydin, F., Szabados, L., & Rigó, G. (2025). *Agrobacterium tumefaciens* versus *Rhizobium rhizogenes*: A comparison of two transformation techniques to introduce roGFP2 redox probe for monitoring redox potential in *Arabidopsis* roots. Plant Biology Europe 2025, Budapest, Magyarország. 2025.06.25.-2025.06.28. (pp 273-274)
- Tompa, B., **Hajnal, Á. B.**, Horváth, E., Bela, K., Jász, K. S., Szabados, L., Rigó, G., Ayaydin, F., Fodorpatiki, L., & Csiszár, J. (2025). Hairy root transformation using *Rhizobium rhizogenes* as a tool for exploring redox-specific gene expression and function in *Arabidopsis*. Plant Biology Europe 2025, Budapest, Magyarország. 2025.06.25.-2025.06.28. (pp 277-278)
- Jász, K. S., Lőrincz, V., Tompa, B., **Hajnal, Á.**, Gallé, Á., Horváth, E., & Csiszár J. (2025). A hőstresszel előidézett ferroptózis vizsgálata *Arabidopsis thaliana* növényeken. 25. Kolozsvári Biológus Napok, Kolozsvár, Románia. 2025.04.11.-2025.04.13. (pp 113)
- Tompa, B., **Hajnal, Á. B.**, Horváth, E., Bela, K., Jász, K. S., Ayaydin, F., Szabados, L., Rigó, G., & Csiszár, J. (2024). An Improved *In Vivo* Protocol for Monitoring Redox Homeostasis of *Arabidopsis* Using *Rhizobium rhizogenes* Mediated Root Transformation and Hairy Root Cultures. 2nd Student Conference of Plant Biology, Bécs, Ausztria. 2024.02.22.-2024.02.23. (pp 46)
- **Hajnal, Á.**, Csiszár, J., Gallé, Á., & Horváth, E. (2024). Investigation of the Role of Theta-Class Glutathione Transferases under Severe Stress Conditions Using Molecular Biological and *In Silico* Methods. 2nd Student Conference of Plant Biology, Bécs, Ausztria. 2024.02.22.-2024.02.23. (pp 35)

- Horváth, E., **Hajnal, Á.**, Tompa, B., Pelsőczi, A., Gallé, Á., & Csiszár, J. (2024). Glutation transzferáz gének szabályozása paradicsom fajtákban ozmotikus stresszválasz során. XIV. Magyar Növénybiológiai Kongresszus, Szeged, Magyarország. 2024.08.28.-2024.08.30. (pp 72)
- **Hajnal, Á.**, Gallé, Á., Horváth, E., & Csiszár, J. (2024). The development of an *in silico* modeling-based method for predicting the functions of various plant glutathione transferases (GSTs). XIV. Magyar Növénybiológiai Kongresszus, Szeged, Magyarország. 2024.08.28.-2024.08.30. (pp 70)
- **Hajnal, Á.**, Tompa, B., Horváth, E., Bela, K., Dobai, D., Ayaydin, F., Szabados, L., Rigó, G., & Csiszár, J. (2023). Egy gyors *in vivo* redox vizsgálati módszer a gyökerekben: a roGFP2 bejuttatása *Rhizobium rhizogenes*-közvetítette transzformációval. A Magyar Szabadgyök kutató Társaság XII. Kongresszusa, Martonvásár, Magyarország. 2023.08.24.-2023.08.25. (pp 28)
- **Hajnal, Á.**, Dobai, D., Horváth, E., Tompa, B., Szabados, L., Rigó, G., & Csiszár, J. (2022). Using mCherry marker to follow the *A. rhizogenes*-mediated transformation process in tomato roots. Fiala Biotechnológusok V. Országos Konferenciája, Gödöllő, Magyarország. 2022.04.11.-2022.04.12. (pp 50)
- Horváth, E., Kulman, K., Gaál, M., Bela, K., **Hajnal, Á.**, & Csiszár, J. (2021). Salt stress response of tomato cultivars: focussing on glutathione and related processes. Plant Biology Europe 2021, Torino, Olaszország. 2021.06.28.-2021.07.01. (pp 156)
- Csiszár, J., Bela, K., **Hajnal, Á.**, Horváth, E., Faragó, N., Puskás, L., & Gallé, Á. (2021). Glutathione transferases in roots as antioxidants and redox modulators. Plant Biology Europe 2021, Torino, Olaszország. 2021.06.28.-2021.07.01. (pp 278)
- **Hajnal, Á.**, Csiszár, J., Bela, K., Horváth, E., Faragó, N., Puskás, L., & Gallé, Á. (2021). The connection between glutathione transferases and redox state – a comparative analysis of two tomato cultivars. Plant Biology Europe 2021, Torino, Olaszország. 2021.06.28.-2021.07.01. (pp 288)
- Horváth, E., Bela, K., **Hajnal, Á.**, Feigl, G., Kulman, K., Gaál, M., & Csiszár, J. (2021). Paradicsom fajták sóstressz válaszána összehasonlító vizsgálata. XIII. Magyar Növénybiológiai Kongresszus, Szeged, Magyarország. 2021.08.24.-2021.08.27. (pp 65)
- Riyazuddin, R., Bela, K., Horváth, E., Hurton, Á., Gallé, Á., **Hajnal, Á. B.**, & Csiszár, J. (2017). Role of Arabidopsis glutathione peroxidase-like 4 (GPXL4) enzyme in roots under salt stress. A Magyar Növénybiológiai Társaság XII. Kongresszusa, Szeged, Magyarország. 2017.08.30.-2017.09.01. (pp 63)

Konferencia előadások:

- Tompa B., **Hajnal, Á. B.**, Horváth, E., Bela, K., Jász, K. S., Ayaydin, F., Szabados, L., Rigó, G., & Csiszár, J. (2025). A *Rhizobium rhizogenes*-közvetítette Transzformációs Rendszer Alkalmazása Redox Szabályozott Gének Funkcionális Vizsgálatára *Arabidopsis*-ban. A Magyar Szabadgyök-Kutató Társaság XIII. Kongresszusa, Debrecen, Magyarország. 2025.08.28. - 2025.08.29. (pp 42)
- Tompa, B., **Hajnal, Á. B.**, Horváth, E., Bela, K., Jász, K. S., Ayaydin, F., Szabados, L., Rigó, G., & Csiszár, J. (2025). Application of the *Rhizobium rhizogenes*-mediated transformation system in functional genomic and redox regulation research in *Arabidopsis* plants. 25. Kolozsvári Biológus Napok, Kolozsvár, Románia. 2025.04.11.-2025.04.13. (p 105).
- Tompa, B., **Hajnal, Á. B.**, Horváth, E., Bela, K., Jász, K. S., Ayaydin, F., Szabados, L., Rigó, G., & Csiszár, J. (2024). *Agrobacterium tumefaciens* versus *Rhizobium rhizogenes*: Az *Arabidopsis thaliana* redox homeosztázisának megfigyelésére szolgáló két transzformációs technika összehasonlítása. 24. Kolozsvári Biológus Napok, Kolozsvár, Románia. 2024.04.19.-2024.04.20. (pp 64)
- Tompa, B., **Hajnal, Á. B.**, Horváth, E., Bela, K., Jász, K. S., Szabados, L., Rigó, G., Ayaydin, F., & Csiszár, J. (2024). *Agrobacterium tumefaciens* versus *Rhizobium rhizogenes*: Két transzformációs módszer összehasonlítása az *Arabidopsis thaliana* redox homeosztázisának vizsgálatára. XIV. Magyar Növénybiológiai Kongresszus, Szeged, Magyarország. 2024.08.28.-2024.08.30. (pp 13)
- Csiszár, J., Bela, K., Horváth, E., Gallé, Á., **Hajnal, Á.**, Tompa, B., Dobai, D., Riyazuddin, R., Ayaydin, F., Rigó, G., Szabados, L., & Fehér, A. (2023). A stresszélettantól a molekuláris növénybiológiáig: A glutation és kapcsolódó enzimek antioxidáns és jelátviteli szerepe. 23. Kolozsvári Biológus Napok, Kolozsvár, Románia. 2023.03.31.-2023.04.01.
- Tompa, B., **Hajnal, Á.**, Horváth, E., Bela, K., Jász, K., Fodorpataki, L., Ayaydin, F., Szabados, L., Rigó, G., & Csiszár, J. (2023). A *Rhizobium rhizogenes* hajszálgökeresedést kiváltó transzformációs módszer alkalmazása az *Arabidopsis* redox homeosztázis vizsgálatára. A Magyar Szabadgyökkutató Társaság XII. Kongresszusa, Martonvásár, Magyarország. 2023.08.24.-2023.08.25. (pp 64)
- Tompa, P., **Hajnal, Á. B.**, Horváth, E., Bela, K., Jász, K. S., Fodorpataki, L., Ayaydin, F., Szabados, L., Rigó, G., & Csiszár, J. (2023). *Rhizobium rhizogenes* közvetítette

transzformáció, mint molekuláris növénynemesítést szolgáló módszer alkalmazása a redox-kapcsolt génfunkciók tanulmányozására stressz esetén XIX. Agrártudományi Konferencia, Sepsiszentgyörgy, Románia. 2023.12.08.

- Horváth, E., Kulman, K., Gaál, M., Bela, K., Feigl, G., **Hajnal, Á.**, Tompa, B., Gallé, Á., Csiszár, J. (2022). Focusing on the role of glutathione and related processes in salt stress response of tomato cultivars. 8th International Symposium on Structure and Function of Roots, Felsőtátrafüred, Szlovákia. 2022.06.12.-2022.06.16. (pp 26)
- **Hajnal, Á.**, Csiszár, J., Bela, K., Horváth, E., Faragó, N., Puskás, L., & Gallé, Á. (2021). Két paradicsomfajta redox folyamatainak és redox regulációjának összehasonlító vizsgálata. XIII. Magyar Növénybiológiai Kongresszus, Szeged, Magyarország. 2021.08.24.-2021.08.27. (pp 29)
- Csiszár, J., Gallé, Á., Horváth, E., Bela, K., **Hajnal Á. B.**, Erdei, L., Tari, I., & Fehér, A. (2021). A stresszválaszok és redox folyamatok fiziológiai és molekuláris vizsgálatai az SZTE Növénybiológiai Tanszéken. XIII. Magyar Növénybiológiai Kongresszus, Szeged, Magyarország. 2021.08.24.-2021.08.27. (pp 40)
- Csiszár, J., **Hajnal, Á.**, Bela, K., Faragó, N., Horváth, E., Horváth, M., Puskás, L., & Gallé, Á. (2021). Glutathione transferases and glutathione redox status in tomato roots under stress. The 7th International Conference on Agricultural and Biological Sciences (ABS 2021) and (ABB 2021) The 4th International Conference on Applied Biochemistry and Biotechnology. Online konferencia. (pp 5)
- Bela, K., Riyazuddin, R., Milodanovic, D., Horváth, E., **Hajnal, Á.**, Gallé, Á., Csiszár, & J. (2020). Detection of the in vivo redox state of Atgpxl2 and -3 mutant seedlings, using roGFP2 redox probe. Baltic redox workshop Greifswald, Greifswald, Németország. 2020.09.18.-2020.09.20. (pp 60)
- Bela, K., Riyazuddin, R., Horváth, E., **Hajnal, Á.**, Gallé, Á., Bagnash, S. A., & Csiszár, J. (2019). Sóstressz hatása lúdfű glutation-peroxidáz-szerű enzim mutáns gyökök redox potenciáljára. Magyar Szabadgyök-Kutató Társaság X. Kongresszusa, Szeged, Magyarország. 2019.08.29.-2019.08.30. (pp 13)

Nyilatkozat

A felsorolt közlemények felelős szerzőjeként igazolom, hogy Hajnal Ádám Barnabás Ph.D. jelöl nagymértékben hozzájárult az alábbi tudományos publikációk elkészítéséhez, illetve a tézisben közölt eredményeket más értekezésben nem használjuk fel.

Hajnal, Á., Gallé, Á., Gaál, M., Tompa, B., Pelsőczy, A., Csiszár, J., és Horváth, E. (2025). Exploring the variety-specific roles of glutathione transferases in tomato osmotic stress response. *Plant Science*, 112645.

Horváth, E., Kulman, K., Tompa, B., **Hajnal, Á. B.**, Pelsőczy, A., Bela, K., Gallé, Á., és Csiszár, J. (2023). Glutathione transferases are involved in the genotype-specific salt-stress response of tomato plants. *Antioxidants*, 12(9), 1682.

Gallé, Á., Bela, K., **Hajnal, Á.**, Faragó, N., Horváth, E., Horváth, M., Puskás, L., és Csiszár, J. (2021). Crosstalk between the redox signalling and the detoxification: GSTs under redox control?. *Plant Physiology and Biochemistry*, 169, 149-159.



Dr. Horváth Edit
egyetemi adjunktus

SZTE TTIK Növénybiológiai Tanszék



Dr. Mainé Dr. Csiszár Jolán
egyetemi docens

SZTE TTIK Növénybiológiai Tanszék