

Doktori Értekezés Tézisei

**Az *S*-nitrozoglutation-reduktáz által szabályozott nitrogén-  
monoxid jelátvitel részvétele a strigolaktonok/karrikinek- és a  
cinkhiány által szabályozott gyökérfejlődésben**

**Kondak Dóra**

Témavezető:

**Ördögné Dr. habil. Kolbert Zsuzsanna**

egyetemi docens

Biológia Doktori Iskola

Növénybiológia Tanszék

SZTE TTIK



Szeged

2024

## 1. Bevezetés

A nitrogén-monoxid (NO) poszttranszlációs módosításokon (PTM) keresztül szabályozza a növények élettani folyamataikat stresszmentes valamint abiotikus/biotikus hatásoknak kitett növényekben egyaránt. A PTM-ok során képződő *S*-nitrozotiolok (SNO) és a 3-nitrotirozin jelátviteli folyamatokban és nitro-oxidatív stressz kialakításában vesznek részt. A SNO csoportba tartozó *S*-nitrozoglutation (GSNO) enzimatis lebontását a ciszteinben (Cys) gazdag *S*-nitrozoglutation-reduktáz (GSNOR) enzim végzi, ezáltal szabályozva az SNO/NO szinteket. A NO más növekedésszabályozó molekulákkal mint pl. a strigolaktonnal (SL) és a karrikinnel (KAR) együttműködve alakítja ki a gyökérszerkezetét, a gyökérfejlődés különböző szakaszainak a befolyásolása révén. A SL-kal hasonló szerkezetű, de eltérő eredetű KAR-ek párhuzamos jelátviteli útvonalat követnek. Mindkét molekula az F-box MORE AXILLARY GROWTH 2 (MAX2) fehérjecsaldon keresztül, de különböző transzkripciós represszor családok tagjain keresztül, önállóan vagy együttműködve szabályozzák a növények fejlődését és növekedését. Munkám első felében a NO, a SL és a KAR molekulák közötti jelkölsönhatást tanulmányoztam *Arabidopsis thaliana* gyökérrendszerében GSNOR, SL és KAR mutáns vonalak felhasználásával.

A növények szesszilis életmódjukból adódóan nem képesek kitérni a kedvezőtlen környezeti feltételek elöl, mint például a talajok nem megfelelő tápanyag ellátottsága. A mikroelemek közé tartozó cink (Zn) optimálisnál alacsonyabb talajbéli hozzáférhetősége a növényeken keresztül az emberben is hozzájárul a hiánytünetek kialakulásához. A cinkszegény mezőgazdasági területen termesztett gabonanövények termésének minőségi és mennyiségi romlása legnagyobb gondot a fejlődő országok esetében okoz, ahol a népesség élelmiszer és/vagy tápanyaghiányban szenved. Ez a probléma mára már a világ minden pontján megfigyelhető. Disszertációm második felében betekintést nyerhetünk a szuboptimális cinkellátottságnak kitett *Arabidopsis* csíranövényekben a GSNOR-közvetített jelátvitel hátterében álló folyamatokba, a gyökérmorfológiai válaszokba, a molekuláris, valamint a reaktív nitrogén- és oxigénformák szintjeiben bekövetkező változások mechanizmusába.

Eredményeim a NO/GSNO és a SL-ok valamint a KAR-ek közötti, a gyökérrendszer regulációjában fontos új szabályozó folyamatok és kapcsolatok megértéséhez járulnak hozzá. Emellett további részletekkel gazdagítják a cinkhiány molekuláris mechanizmusáról rendelkezésünkre álló ismereteket.

## 2. Célkitűzés

**Hipotézis 1:** A nitrogén-monoxid, a strigolaktonok és a karrikinek a növényi gyökérfejlődést szabályzó bioaktív szignálmolekulák. Irodalmi adatok alapján feltételeztük szignálkapcsolat meglétét a NO, a SL és a KAR között Arabidopsis gyökerében, ezért kísérleteink ennek vizsgálatára fókuszáltak.

A genetikai és farmakológiai megközelítést alkalmazó kísérleti rendszerrel céлом volt az alábbi kérdések megválaszolása:

1. Stresszmentes körülmények között megfigyelhetők-e különbségek a gyökérzet szerkezetében vad típusú, GSNOR mutáns illetve strigolakton bioszintézisben és jelátvitelben hibás lúdfüben? Van-e eltérés az említett növényvonalak NO és SNO szintjeiben? Ha igen, mi állhat ennek a hátterében?
2. Hogyan hat a SL analóg és SL inhibitor kezelés a vad típusú és GSNOR enzimben mutáns csíranövények gyökérszerkezetére, valamint vad típusban az NO-függő gének expressziójára, és a GSNOR enzim mennyiségére?
3. Milyen változásokat idéz elő a NO donor és a NO gyökfogó kezelés a *max* mutánsok gyökérarchitektúrájában? A fenti kezelések okoznak-e változásokat az SL-függő gének expressziójában Col-0-ban?
4. Hogyan alakul a KAR-specifikus mutáns vonalak NO szintje? Lehetnek-e célpontjai az S-nitrozilációnak KAR jelátviteli fehérjék?

**Hipotézis 2:** A NO jelátvitel kulcsszabályozója a GSNOR enzim, mely Zn-ionokat igényel a katalitikus aktivitásához. Ez alapján a hipotézisünk az, hogy az elégtelen Zn-ellátás hatást gyakorol az enzim működésére.

Kísérleteim során az alábbi kérdésekre kerestem a választ:

1. Kimutatható-e egy hét elteltével a cinkhiány az Arabidopsis vonalakban szövet- és szervszinteken?
2. A korlátozott cinkelés befolyásolja-e a növényvonalak GSNOR enzim mennyiségét, expresszióját és aktivitását?

3. Hogyan módosul a reaktív nitrogén,- és oxigénformák szintje és a fehérjenitráció a Zn-megvonás hatására?
4. Okoz-e változást a gyökérrendszer morfológiájában az optimálisnál alacsonyabb Zn hozzáférés? Ha igen, mi állhat a háttérben?

### 3. Anyagok és módszerek

Kísérleteim első feléhez egyhetes  $\frac{1}{2}$  MS táptalajon nevelt *Arabidopsis thaliana* vad típusát (Col-0) GSNOR hiányos (*gsnor1-3*), ezt az enzimet túltermelő (*35S::FLAG-GSNOR1*), SL bioszintézis (*max1-1*) SL jelátvitel (*max2-1*) és receptor (*d14*) hibás, KAR jelátvitel (*smax1/smx12*) és receptor (*htl-3*) mutáns, valamint KAR és SL receptor dupla mutáns (*htl-3/d14*) vonalait használtam fel. A farmakológiai eljárások során a GSNOR mutáns vonalakat SL analóggal (*rac-GR24*) vagy SL inhibitorral (TIS108), a SL hibás csíranövényeket NO donorral (GSNO) vagy NO gyökfogóval (cPTIO) kezeltem a növénynevelési periódus 4. napján.

Kísérletem második feléhez *Arabidopsis thaliana* vad típusa és *35S::FLAG-GSNOR1* vonala mellett, a hormonszintek kimutatásához  $\beta$ -glükuronidáz (GUS) promóterrel ellátott *ACS8::GUS/GF*, *ARR5::GUS* és *DR5::GUS* transzgenikus vonalakat használtam fel (Col-0 háttérben). *Cycb1::GFP* növényt a sejtosztódás nyomonkövetésére alkalmaztam. A Zn-hiányos állapot kialakításának érdekében a táptalajhoz használt bakterológiai agart 10 mM-os (pH 7,5) etilén-diamin-tetraecetsav (EDTA) oldattal való mosásnak vettem alá, továbbá külön mikroelem, makroelem, vas-EDTA, kalcium-klorid, kálium-jodid és vitamin törzsoldatokat állítottam össze Murashige és Skoog (1962) receptje alapján feles erősségben. Háromféle mikroelem törzsoldatot készítettem el. A kontroll táptalaj elkészítéséhez használt mikroelemtörzs 15  $\mu$ M ZnSO<sub>4</sub>-ot tartalmazott, az enyhe cinkhiányos táptalajhoz (Zn/10) használt mikroelemtörzs 1,5  $\mu$ M ZnSO<sub>4</sub>-ot, a cinkmentes táptalaj (Zn/0) összeállításához használt mikroelemtörzshöz nem adtam ZnSO<sub>4</sub>-ot (0  $\mu$ M). A magokat kontroll (15  $\mu$ M ZnSO<sub>4</sub>) enyhe cinkhiányos (Zn/10, 1,5  $\mu$ M ZnSO<sub>4</sub>) és cinkmentes (Zn0, 0  $\mu$ M ZnSO<sub>4</sub>) feles erősségű MS táptalajra ültettem, és 7 napig neveltem.

Kísérleteim során **gyökérmorfológiai méréseket, fluoreszcens festési technikákat** alkalmaztam a gyökérsejtek életképességének, sejtosztódásának, a Zn szintek valamint a reaktív nitrogén- és oxigénformák, mint a NO, peroxinitrit (ONOO<sup>-</sup>) hidrogén-peroxid (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>), szuperoxid gyökkanion (O<sub>2</sub><sup>-</sup>) detektálására. Az *S*-nitrozoglutation (SNO)

szinteket **kemilumineszcenciás eljárással** kvantifikáltuk. **Western blot** analízissel mutattam ki a GSNOR enzim mennyiségét és a fehérjetirozin-nitrációt. A GSNOR enzim aktivitását **spektrofotometriás módszerrel** határoztam meg. **Immunhisztokémiai  $\beta$ -glükuronidáz (GUS)** festéssel határoztam meg *in situ* az auxin, az etilén és a citokinin szintjeit. **Valós idejű kvantitatív polimeráz láncreakcióval (RT-qPCR)** mutattam ki a NO, SL-, Zn-asszociált gének relatív transzkriptszintjeit. A Zn-tartalom meghatározása **induktív csatolású plazma tömegspektrometriával (ICP-MS)** történt. ***In silico* előrejelzési szoftverek** (GPS-SNO, iSNO-PseAAC, DeepNitro) segítségével mutattam ki az *S*-nitrozilációra alkalmas peptidszekvenciákat.

Egyes adatok statisztikai elemzése Microsoft Excel 2016 program Student-féle T-próbájával történt. Ebben az esetben az eredmények szignifikanciáját az adatok ábrázolásánál következőképpen jelöltem: \* $P \leq 0,05$ ; \*\* $P \leq 0,01$ ; \*\*\* $P \leq 0,001$ ; ns = nem szignifikáns. Más adatsorok esetén a szignifikancia SigmaPlot 12.0 Systat program egyutas variancia analízisével (ANOVA) is megállapításra került Duncan-féle teszttel kombinálva. A szignifikánsan eltérő adatokat ( $P \leq 0,05$ ) különböző betűkkel jelöltem. A standard hiba (SE) feltüntetésével ábrázoltam az átlageredményeket.

#### 4. Eredmények

Az eddigi ismereteink alapján azt már jól tudjuk, hogy külön-külön mindhárom molekula (NO, SL és a KAR) szabályozza növényi növekedés, ezen belül a gyökérrendszer fejlődését. Azáltal, hogy a karrikinek és a strigolaktonok szerkezete hasonlít, valamint közös jelátviteli elemek keresztül fejtik ki hatásukat a növekedésre és fejlődésre nagyszerű lehetőséget biztosít, hogy a NO-dal összefüggésben vizsgáljuk meg ezen molekulák közötti kapcsolatot *Arabidopsis thaliana* gyökerében.

Eredményeim alapján a feltett kérdésekre az alábbi válaszokat tudom megfogalmazni:

1. A csíranövények közül a *gsnor1-3* rendelkezik a legrövidebb főgyökérrel (FGY) és nincsen kifejlett oldalgyökere (OGY). Annak ellenére, hogy vad típushoz képest a *35S::FLAG-GSNOR1* rövidebb FGY-rel és kevesebb OGY-rel rendelkezik OGY denzitása vad típusúhoz. *A GSNOR enzim szükséges a normális gyökérfejlődéshez, hiánya nagyobb problémát okoz, mint túltermelése. Ahogyan*

*a GSNOR úgy a SL megléte is szükséges az optimális gyökérszerkezet kialakításához, hiszen hiánya rövidebb FGY-t és több OGY kialakulását eredményezi. A SL-hiba/hiány emelkedett NO/SNO szinteket eredményez. A SL hiányában a NO-függő gének expressziója nem változik, így ezek a gének valószínűleg nincsenek hatással a NO jelátvitelre SL hiányában. Azonban a GSNOR hiánya a SL bioszintézisben résztvevő gének alulszabályozottságát okozza. A SL hibás növényekben a GSNOR expressziója nem, de abundanciája és aktivitása alacsonyabb a vad típushoz képest, ami az enzim poszttranszkripció gátlására utal (és ami által az NO/SNO szintek növekedtek).*

2. *A gsnor1-3 bizonyult érzékenyebbnek rac-GR24 kezelésre. A SL analóg amellet, hogy gátolta a FGY elongációját az oldalgyökerek számát is 0-ra csökkentette. Col-0 és GSNOR túltermelő vonalakban a rac-GR24 FGY növekedést váltott ki, amiből arra következtethetünk, hogy funkcionális GSNOR szükséges a NO/SNO szint szabályozásához az SL (és/vagy KAR) által kiváltott FGY megnyúlás során. Vad típusban, gsnor1-3-ban és 35S::FLAG-GSNOR1-ben is gátló hatást fejtett ki a SL analóg kezelés, mindhárom növényvonalban lecsökkent a primordiumok vagy a kifejlett OGY-k száma. A TIS108 kezelés hatására vad típusban és gsnor1-3-ban kevesebb, 35S::FLAG-GSNOR1-ben több primordium jelent meg. A GSNOR enzim hiánya és optimális mennyisége az OGY iniciációt gátolja, túltermelése pedig indukálja azt. Vad típusban a rac-GR24 a GLB1 és GLB2 gének relatív transzkriptszintjét csökkentette.*
3. *Míg a NO donor több mint 50%-os gátlást okozott a Col-0 főgyökerének növekedésében, addig az SL mutáns vonalak FGY elongációja kevésbé bizonyult érzékenynek GSNO kezelésre, sőt max1-1 egyáltalán nem váltott ki FGY rövidülést és nem befolyásolta a kifejlett OGY fejlődését. Míg a NO gyökfóga a max mutánsokban az iniciációt gátolta, addig vad típusban a kifejlett OGY-re gyakorolt negatív hatást. Sem a GSNO sem a cPTIO nem okozott génexpressziós változást a SL bioszintézis és jelátviteli génekben.*
4. *A d14, htl-3, htl-3/d14 csíranövények a vad típusnál magasabb NO szinttel rendelkeznek, míg a smax1/smx2 esetén a vad típussal megegyező NO tartalom mutatható ki. A KAR jelátviteli elemek közül a (KAI2=HTL3, SMAX1) esetén volt kimutatható S-nitrozilációra fogékony cisztein aminosav.*

A cinkhiány és az exogén NO közötti kapcsolatra vonatkozóan széleskörű kutatások állnak rendelkezésünkre, azonban az endogén NO vonatkozásában kevés az adat. Munkám során elsőként vizsgáltam az alegységenként egy katalitikus és egy strukturális cinkiont tartalmazó GSNOR enzim funkciójának változásait és a NO által közvetített jelátvitelben való részvételét kontroll (15  $\mu\text{M}$   $\text{ZnSO}_4$ ) enyhe (Zn/10; 1,5  $\mu\text{M}$   $\text{ZnSO}_4$ ) és teljes cinkmegvonás (Zn0; 0  $\mu\text{M}$   $\text{ZnSO}_4$ ) hatására vad típusú (Col-0) és GSNOR enzimet túltermelő 35S::*FLAG-GSNOR1* lúdfűben.

Az elvégzett kísérletek alapján az alábbi eredményeket állapítottam meg:

1. A kísérleti periódus alatt a táptalajban lévő *Zn-korlátozott elérhetősége szignifikánsan csökkentette a lúdfű vonal gyökereinek és hajtásának cink-tartalmát és módosította a Zn-hiány markergének expresszióját*. A Zn kimutatására szolgáló specifikus fluoreszcens próba alkalmazása lehetővé tette a Zn-tartalom szövetspecifikus vizsgálatát. A nem megfelelő cinkellátás a vad típusú és a GSNOR enzimet túltermelő mutáns lúdfű gyökérzetében csökkent szabad Zn-szintet alakított ki. *A gyökércsúcsok érzékenyebbnak bizonyultak a Zn-megvonására mindkét vonalban*, mint a merisztémától távolabbi gyökérrégiók, ami a gyökérszövet specifikus Zn-tartalmára enged következtetni.
2. A szuboptimális Zn-elérhetőség kisebb, de aktívabb GSNOR fehérjekészletet eredményezett *Col-0-ban*, így az elvártakkal ellentétben az *enzim képes kontrollálni a NO-függő jelátviteli folyamatokat*. 35S::*FLAG-GSNOR1*-ben az enzim túltermelése valószínűleg kompenzálja a csökkent Zn-ellátás negatív hatásait, ami *változatlan GSNOR expressziót, fehérje mennyiséget és aktivitást eredményez*.
3. Az optimálistól eltérő cinkmennyiség megváltoztatja a reaktív nitrogén- és oxigénformák (NO, ONOO<sup>-</sup>, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) szintjeit és szembeötlő hatást fejt ki a növényi proteomban, ami a célfehérjék funkciójának elvesztését majd proteaszómális lebomlását okozhatja (Kolbert és Lindermayr, 2021). *Col-0-ban cinkhiány a hatására a nitráció központi molekulájának, a ONOO<sup>-</sup> szintjének az emelkedése hozzájárulhatott a fokozott tirozinnitrációhoz*. Érdekes módon transzgenikus vonalban éppen ellenkezőleg, csökkent a fehérjenitráció cinkmegvonásra.
4. *A gyökérszerkezeti változások a főgyökér rövidülésében és a kifejlett oldalgyökerek számának a csökkenésében nyilvánultak meg*, ami a vad típust

érintette erőteljesebben. Ennek *hátterében a sejtosztódás zavara, valamint az etilénszint emelkedése és a citokininszint csökkenése állhat.*

## 5. Summary

Based on our current knowledge, we already know that each of the three molecules (NO, SL, and KAR) independently regulates plant growth, specifically the development of the root system. The structural similarity between karrikins and strigolactones, as well as their impact on plant growth and development through a common signaling element, provides an excellent opportunity to explore the relationship between these molecules in the roots of *Arabidopsis thaliana*, particularly in connection with NO.

Based on my results, I can formulate the following answers to the posed questions:

1. Among the seedlings, *gsnor1-3* has the shortest primary root (PR) and lacks developed lateral roots (LR). Despite having a shorter PR and fewer LR compared to the wild type, the LR density in *35S::FLAG-GSNOR1* is similar to that of the wild type. *The GSNOR enzyme is essential for normal root development, and its deficiency poses a greater challenge than its overproduction. Similar to GSNOR, the presence of SL is necessary for the optimal formation of the root structure, as its absence results in a shorter PR and more LR. The deficiency or mutation in SL leads to elevated levels of NO/SNO.* In the absence of SL, the expression of NO-dependent genes remains unchanged, indicating that these genes likely do not influence NO signaling in the absence of SL. However, *the lack of GSNOR causes the downregulation of genes involved in SL biosynthesis.* In plants with defective SL, GSNOR expression is unaffected, but its abundance and activity are lower than in the wild type, *suggesting post-transcriptional inhibition of the enzyme, leading to increased levels of NO/SNO.*
2. Similar to the stress-free condition, *gsnor1-3* proved to be more sensitive to *rac-GR24* treatment, the SL analog that not only inhibited PR elongation but also reduced the number of lateral roots to zero. In Col-0 and GSNOR-overproducing lines, *rac-GR24* triggered PR growth, indicating that *functional GSNOR is suspected to be necessary for regulating NO/SNO levels during PR elongation induced by SL (and/or KAR).* In the wild type, *gsnor1-3*, and *35S::FLAG-*



*GSNOR1*, the SL analog treatment had an inhibitory effect in all three plant lines, reducing the number of primordia or mature LR. TIS108 treatment resulted in fewer primordia in the wild type and *gsnor1-3*, while more were observed in *35S::FLAG-GSNOR1*. *The absence of the GSNOR enzyme and its optimal levels either inhibited or induced initiation.* In the wild type, *rac-GR24* reduced the transcript levels of the *GLB1* and *GLB2* genes.

3. The NO donor caused more than a 50% inhibition in Col-0 primary root growth, whereas *SL mutant lines were less sensitive to GSNO treatment, and in fact, max1-1* did not induce primary root shortening at all and did not affect the development of mature LR. *In the max mutants, NO scavenging inhibited initiation,* while in the wild type, it had a negative impact on mature LR. Neither GSNO nor cPTIO caused changes in gene expression in the SL biosynthesis and signaling genes.
4. The mutant lines *d14, htl-3, and htl-3/d14 exhibit higher levels of NO compared to the wild type,* while in the case of *smax1/smxl2*, the NO content is comparable to the wild type. *Among the KAR signaling elements, cysteine amino acids susceptible to S-nitrosylation were detected in the case of KAI2=HTL3, SMAX1.*

Based on the experiments conducted, I have determined the following results:

1. During the experimental period, *the significantly reduced availability of Zn in the medium markedly decreased the zinc content in the roots and shoots of the Arabidopsis thaliana line.* It also altered the expression of Zn-deficiency marker genes. The application of specific fluorescent probes for Zn detection allowed for a tissue-specific examination of Zn content. Inadequate zinc supply induced a decrease in free Zn levels in the root systems of both the wild-type and GSNOR enzyme-overexpressing mutant Arabidopsis lines. *The root tips proved to be more sensitive to Zn deprivation in both lines than root regions farther from the meristem, indicating tissue-specific Zn content in the root tissue*
2. Suboptimal zinc availability resulted in a smaller but more active GSNOR protein pool in Col-0. Contrary to expectations, *this enzyme is capable of maintaining and controlling NO-dependent signaling processes.* In *35S::FLAG-GSNOR1*, enzyme overproduction likely compensates for the negative effects of reduced zinc supply, *resulting in unchanged GSNOR expression, protein quantity, and activity.*

3. Deviations from optimal zinc levels alter the levels of reactive nitrogen and oxygen species (NO, ONOO<sup>-</sup>, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) and have a noticeable impact on the plant proteome, which can lead to functional loss of target proteins followed by proteasomal degradation (Kolbert and Lindermayr, 2021). *In Col-0, zinc deficiency may have contributed to the increased tyrosine nitration due to the elevated levels of ONOO<sup>-</sup>.* Interestingly, in the transgenic line, protein nitration decreased upon zinc deprivation.
4. *The changes in root structure* were manifested in the shortening of the primary root and a reduction in the number of mature lateral roots, which affected the wild type more significantly. *This may be attributed to a disturbance in cell division and the interaction between an increase in ethylene levels and a decrease in cytokinin levels.*

## 6. Publikációs lista

**MTMT azonosító: 10084434**

\*jelölt közlemények közvetlenül kapcsolódnak a PH.D. értekezésemmel

†jelölt publikációban megosztott első szerzőként szerepelek

### **Folyóiratban megjelent közlemények:**

\***Oláh, D.**, Kondak, S., Molnár, Á., Adedokun, O. P., Czékus, Z., Gémes, K., ... & Kolbert, Z. (2023). Suboptimal zinc supply affects the S-nitrosoglutathione reductase enzyme and nitric oxide signaling in Arabidopsis. *Plant Stress*, 10, 100250. IF: 5

Kondak, S., Janovszky, P., Szöllősi, R., Molnár, Á., **Oláh, D.**, Adedokun, O. P., ... & Kolbert, Z. (2023). Nickel oxide nanoparticles induce cell wall modifications, root anatomical changes, and nitrosative signaling in ecotypes of Ni hyperaccumulator *Odontarrhena lesbiaca*. *Environmental Pollution*, 122874. IF: 8,9

Kondak, S., Molnár, Á., **Oláh, D.**, & Kolbert, Z. (2022). The role of nitric oxide (NO) in plant responses to disturbed zinc homeostasis. *Plant Stress*, 4, 100068. IF: 0

Molnár, A., Kondak, S., Benkő, P., Janovszky, P., Kovács, K., Szöllősi, R., **Oláh, D.**,... & Kolbert, Z. (2022). Limited Zn supply affects nutrient distribution, carbon metabolism and causes nitro-oxidative stress in sensitive *Brassica napus*. *Environmental and Experimental Botany*, 202, 105032. IF: 5,7

\***Oláh, D.**, Molnár, Á., Soós, V., & Kolbert, Z. (2021). Nitric oxide is associated with strigolactone and karrikin signal transduction in *Arabidopsis* roots. *Plant Signaling & Behavior*, 16(3), 1868148. IF: 2,9

Molnár, Á., Papp, M., Kovács, D. Z., Bélteky, P., **Oláh, D.**, Feigl, G., ... & Kolbert, Z. (2020). Nitro-oxidative signalling induced by chemically synthesized zinc oxide nanoparticles (ZnO NPs) in *Brassica* species. *Chemosphere*, 251, 126419. IF: 7,086

Vollár, M., Feigl, G., **Oláh, D.**, Horváth, A., Molnár, Á., Kúsz, N., ... & Kolbert, Z. (2020). Nitro-Oleic Acid in Seeds and Differently Developed Seedlings of *Brassica napus* L. *Plants*, 9(3), 406. IF: 3,95

\***Oláh, D.**, Feigl, G., Molnár, Á., Ördög, A., & Kolbert, Z. (2020). Strigolactones interact with nitric oxide in regulating root system architecture of *Arabidopsis thaliana*. *Frontiers in Plant Science*, 11, 1019. IF: 5,753

Molnár, Á., Rónavári, A., Bélteky, P., Szöllősi, R., Valyon, E., **Oláh, D.**, ... & Kolbert, Z. (2020). ZnO nanoparticles induce cell wall remodeling and modify ROS/RNS signalling in roots of *Brassica* seedlings. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 206, 111158. IF: 6,20

\*Kolbert, Z., **Oláh, D.**, Molnár, Á., Szöllősi, R., Erdei, L., & Ördög, A. (2020). Distinct redox signalling and nickel tolerance in *Brassica juncea* and *Arabidopsis thaliana*. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 189, 109989. IF: 6,20

Feigl, G., Horváth, E., Molnár, Á., **Oláh, D.**, Poór, P., & Kolbert, Z. (2019). Ethylene-nitric oxide interplay during selenium-induced lateral root emergence in *Arabidopsis*. *Journal of Plant Growth Regulation*, 38, 1481-1488. IF: 4,8

Kolbert, Z., Molnár, Á., **Oláh, D.**, Feigl, G., Horváth, E., Erdei, L., ... & Lindermayr, C. (2019). S-Nitrosothiol signaling is involved in regulating hydrogen peroxide metabolism of zinc-stressed Arabidopsis. *Plant and Cell Physiology*, 60(11), 2449-2463. IF: 4,062

**Összesített IF: 60,555**

**Könyvfejezetben megjelent közlemények:**

Szóllósi, R., Molnár, Á., **Oláh, D.**, Kondak, S., & Kolbert, Z. (2022). Uptake and metabolism of selenium in plants: Recent progress and future perspectives. *Selenium and nano-selenium in environmental stress management and crop quality improvement*(pp. 79-90). Springer

Szóllósi, R., Molnár, Á., **Oláh, D.**, Kondak, S., & Kolbert, Z. (2022). Selenium toxicity and tolerance in plants: recent progress and future perspectives. *Selenium and nano-selenium in environmental stress management and crop quality improvement* (pp. 311-324). Springer

Szóllósi, R., Molnár, Á., Feigl, G., **Oláh, D.**, Papp, M., & Kolbert, Z. (2021). Physiology of zinc oxide nanoparticles in plants. *Plant responses to nanomaterials: recent interventions, and physiological and biochemical responses*, 95-127.

**Oláh, D.**, Molnár, Á., Feigl, G., Szóllósi, R., Erdei, L., Kolbert Zs. (2020). A növényi nitrogén-monoxid kutatás múltja, jelene és jövője. *Oxidatív Stressz és Antioxidáns Védekezés a Növényvilágtól a Klinikumig* (pp. 41-51).

Feigl, G., Molnár, Á., **Oláh, D.**, & Kolbert, Z. (2020). Role of nitric oxide in plant abiotic stress tolerance. In *Improving abiotic stress tolerance in plants* (pp. 131-154). CRC Press.

**Poszterek:**

Kondak, S., **Oláh, D.**, Molnár, Á., Janovszky, P., Dimitrakopoulos PG., Galbács, G., Kolbert Z. (2022) Uptake and effect of nickel oxide nanoparticles on biomass production and reactive molecule levels in nickel-hiperaccumulator *Odontarrhena lesbiaca* ecotypes.

Fiatal Biotechnológusok V. Országos Konferenciája, Gödöllő, Magyarország, 2022.04.11-12. (pp.87).

Molnár, Á., **Oláh, D.**, Szöllősi, R., Kovács, K., Topolcsányi, P., Kolbert Z. (2021) The role of nitrosative stress response during Zn deficiency. 8th Nitric Oxide International Science, Zoom meeting, Magyarország, 2021.07.7-9. (pp.63).

Kondak, S., **Oláh, D.**, Molnár, Á., Kolbert Z. (2021) Zinc deficiency in *Pisum sativum*: focusing on reactive oxygen, nitrogen and sulphur species. 8th Nitric Oxide International Science, Zoom meeting, Magyarország, 2021.07.7-9. (pp.72).

\***Oláh, D.**, Kondak, S., Molnár, Á., Kolbert Z. (2021) Zinc deficiency effect of nitric oxide (NO) signaling in *Arabidopsis thaliana*. 8th Nitric Oxide International Science, Zoom meeting, Magyarország, 2021.07.7-9. (pp.76).

Kondak, S., **Oláh, D.**, Molnár, Á., Dimitrakopoulos PG., Kolbert Z. (2021) Nickel oxide (NiO) nanoparticles uptake and effect on biomass production and reactive nitrogen species levels in Ni-hyperaccumulator *Odontarrhena lesbiaca* ecotypes. XIII. Magyar Növénybiológiai Kongresszus, Szeged, Magyarország, 2021.08.24-27. (pp.74).

Molnár, Á., **Oláh, D.**, Kovács, D., Szunyog, FM., Rázga, Z., Rónavári, A., Kolbert Z. (2021) A nitro-oxidatív jelátvitel változásai szén nanocső kezelés hatására repce és paradicsom csíranövényekben. XIII. Magyar Növénybiológiai Kongresszus, Szeged, Magyarország, 2021.08.24-27. (pp.77).

\***Oláh, D.**, Molnár, Á., Kondak, S., Kolbert Z. (2021) A cinkhiány hatásainak vizsgálata *S*-nitrozoglutation reduktáz mutáns *Arabidopsis thaliana* gyökérrendszerében. XIII. Magyar Növénybiológiai Kongresszus, Szeged, Magyarország, 2021.08.24-27. (pp.80).

\***Oláh, D.**, Feigl, G., Molnár, Á., Kolbert Z. (2020) Strigolactone- and nitric oxide-mediated changes in root architecture of *Arabidopsis thaliana*. Vienna International Science Conferences and Events Association, Plant Growth & Other Growth Regulators. Bécs, Ausztria, 2020.02.17-18. (pp.21).

Feigl, G., Molnár, Á., **Oláh, D.**, Czifra, Á., Kolbert Z. (2019) Combined heavy metal treatment affects nitro-oxidative status of Rapeseed and Sunflower roots differently. 14th International Conference on reactive oxygen and nitrogen species in plants. München, Németország, 2019.07.10-12. (pp. 97).

Molnár, Á., Feigl, G., Papp, M., **Oláh, D.**, Kolbert Z. (2019) The effect of zinc oxide nanoparticles on ROS and RNS metabolism of Brassica roots. 14th International Conference on reactive oxygen and nitrogen species in plants. München, Németország, 2019.07.10-12. (pp.124).

**Oláh, D.**, Molnár, Á., Szöllősi, R., Feigl, G., Kolbert Z. (2019) Nickel-induced ROS and RNS imbalance in Brassicaceae. 14th International Conference on reactive oxygen and nitrogen species in plants. München, Németország, 2019.07.10-12. (pp. 125).

#### **Konferencia előadások:**

\***Oláh, D.**, Molnár, Á., Kondak, S., Kolbert Z. (2022) Nitric oxide signalling in responses of *Arabidopsis thaliana* to limited zinc supply. Fiatal Biotechnológusok V. Országos Konferenciája, Gödöllő, Magyarország, 2022.04.11-12. (pp.27).

\***Oláh, D.** (2020) A strigolakton és a nitrogén-monoxid közötti jelátvitel hatása *Arabidopsis thaliana* gyökérrendszerére. XXIII. Tavaszi Szél Konferencia, Zoom meeting, 2020.10.16. (pp.137)

## 7. Nyilatkozat

A felsorolt közlemények felelős szerzőjeként igazolom, hogy Kondak (Oláh) Dóra Ph.D. jelölt nagymértékben hozzájárult az alábbi tudományos publikációk elkészítéséhez, a tézisben közölt eredményeket más értekezésben nem használtuk fel.

Oláh, D., Kondak, S., Molnár, Á., Adedokun, O. P., Czékus, Z., Gémes, K., ... & Kolbert, Z. (2023). Suboptimal zinc supply affects the *S*-nitrosoglutathione reductase enzyme and nitric oxide signaling in *Arabidopsis*. *Plant Stress*, 10, 100250. IF: 5

Oláh, D., Molnár, Á., Soós, V., & Kolbert, Z. (2021). Nitric oxide is associated with strigolactone and karrikin signal transduction in *Arabidopsis* roots. *Plant Signaling & Behavior*, 16(3), 1868148. IF: 2,9

Oláh, D., Feigl, G., Molnár, Á., Ördög, A., & Kolbert, Z. (2020). Strigolactones interact with nitric oxide in regulating root system architecture of *Arabidopsis thaliana*. *Frontiers in Plant Science*, 11, 1019. IF: 5,753



.....  
Ördögné Dr. Kolbert Zsuzsanna

egyetemi docens

SZTE TTIK Növénybiológia Tanszék

Szeged, 2024. február 27.