

Ph.D. értekezés tézisei

A szeléntoxicitás és nitro-oxidatív stressz kapcsolatának vizsgálata különböző növényfajokban

Molnár Árpád



Témavezető:

Ördögné Dr. Kolbert Zsuzsanna

Egyetemi docens

Biológia Doktori Iskola

Szegedi Tudományegyetem

Természettudományi és Informatikai Kar

Növénybiológiai Tanszék

2020

Bevezetés

Az elmúlt évtizedekben a különböző antropogén tevékenységek, mint az ipar, mezőgazdaság vagy közlekedés nagymértékben megnövelték a környezetbe kikerülő nehézfémek és más elemek mennyiségét. A felszíni vizek és talaj ilyen szennyezése eddig kevésbé vizsgált környezeti problémákhoz vezet, melyek jelentős hatással lehetnek az élő szervezetekre. Ilyen ritkább elemek közé tartozik a szelén is, mely bár hazánkban a talajokban kis mennyiségben fordul csak elő, de a fent említett hatások gyorsan megváltoztathatják a mennyiségét a környezetben, ami káros hatással van az élő szervezetekre.

A szelén egy nemfémes elem, mely a magasabbrendű növényeken és néhány baktériumon kívül esszenciális az élőlények számára. A szelén a környezet minden közegében megtalálható, s habár nem esszenciális, a növényekben mégis megtalálható. Felvétele a kén és foszfor transzportereken keresztül történik, s a kén metabolizmus útvonalán épül be szerves molekulákba. A szelén kis mennyiségben pozitív hatással bír a növények fejlődésére s növekedésére, dokumentált stresszenyhítő és antiszenescens hatással bír. Nagy mennyiségben káros hatással rendelkezik, melyeknek a legfőbb háttérfolyamatai a nem specifikus szelenoproteinek keletkezése, a szénmetabolizmus felborulása, hormonháztartás zavarai, képes befolyásolni más tápanyagok mennyiségét és újabban a nitro-oxidatív stresszel is kapcsolatba hozták.

A nitro-oxidatív stressz a reaktív oxidénformák (ROF) és reaktív nitrogénformák (RNF) hatásait összesítő fogalom. A legtöbb abiotikus és biotikus stressz befolyásolja a két molekulacsalád keletkezését és kioltását, mely felborult metabolizmushoz vezet. A másodlagos stresszfolyamatok legtöbbször makromolekula módosításon keresztül hatnak, mely az ROF esetében a lipid peroxidáció, míg a nitrozatív jelátvitel a makromolekulák nitrációját és nitrozilációját okozhatja. A proteintirozin-nitráció az egyik legfőbb biomarkere a nitro-oxidatív stressznek, mely legtöbbször inaktiválja a fehérjét így befolyásolva a protein poolt. Előző kutatások már kimutatták a nitro-oxidatív stressz létrejöttét szelén többlet hatására, de a kapcsolata a szelén toxicitással és az RNF-metabolizmus mélyebb feltérképezése még feltáratlan területek.

Célkitűzés

Az előzetes kutatási eredményekben felmerült, hogy a szelén toxicitás és a nitro-oxidatív jelátvitel egymással kapcsolt folyamatok. A vizsgálatok kezdetekor ellenben még ismeretlen volt a nitro-oxidatív stressz és szelén kapcsolatának háttere, valamint a RNF-metabolizmusának változásai. Ebből adódóan a kutatás során a szelén terhelés hatását vizsgáltam három eltérő nevelési rendszerben. A kísérleti rendszerekben összehasonlítottam a különböző szelénformák toxicitását eltérő szeléntoleranciájú növényfajok esetében. A vizsgált növényfajok a modellnövény lúdfű (*Arabidopsis thaliana*), a fitoremediációs és mezőgazdasági szempontból jelentős indiai mustár (*Brassica juncea*), a gyógyászatban használt kínai csüdfű (*Astragalus membranaceus*) és a szelén hiperakkumuláló *Astragalus bisulcatus* voltak.

Munkám során a következő kérdésekre kerestem a választ:

1. Milyen mértékű az eltérő szelén toleranciájú növények szelénfelvétele, ez hogy oszlik el a különböző szervek között és létrejön-e jelentős akkumuláció a vizsgált növényfajokban?
2. A különböző dózisu szelénkezelés hogyan hat a növények fejlődésére és növekedésére?
3. Milyen a vizsgált növényfajok szelén tűrése, és milyen tolerancia mechanizmusok aktiválódnak a szelénkezelés hatására?
4. Változik-e a ROF- és RNF- metabolizmus a kezelt növények esetében, létrejön-e a nitro-oxidatív stressz?
5. Létezik-e összefüggés a szelén tolerancia vagy toxicitás és a nitro-oxidatív stressz között a vizsgált növényfajokban?

Anyagok és módszerek

A növényi anyag és nevelési körülmények:

Vizsgálataimat három kísérleti rendszerben folytattam, melyek különböző szemszögből vizsgálták az szelén terhelés hatásait.

Az első kísérleti rendszerben a vizsgált növényfaj az indiai mustár (*Brassica juncea* L. Czern. cv. Negro Caballo), itt a növények nevelése levegőztetett Hoagland tápoldaton történt, a kezelés pedig 0 (kontroll), 20, 50 vagy 100 μM nátrium-szelenitet (Na_2SeO_3) vagy nátrium-szelenátot (Na_2SeO_4) volt.

A második kísérleti rendszerben a nehézfém-toleráns indiai mustár (*Brassica juncea* L. Czern, cv. Negro Caballo) és a növénybiológia legfontosabb modellnövénye, a lúdfű (*Arabidopsis thaliana* L. Heynh, Columbia-0) került összehasonlításra, az előző rendszerhez hasonlóan a nevelés Hoagland tápoldaton történt. A kezelés 0 (kontroll), 20, 50 vagy 100 μM nátrium-szelenittel történt (Na_2SeO_3), melyet a tápoldaton keresztül juttattunk a rendszerbe.

A harmadik nevelési rendszerben a szelénérzékeny *Astragalus membranaceus* L. Fisch, Bunge és a szelén-hiperakkumuláló *Astragalus bisulcatus* L. Hook, A. Gray volt a vizsgálat tárgya. A növények nevelése 0,8 % agart tartalmazó feles Murashige-Skoog táptalajon történt steril körülmények között, a kezelés pedig 0 (kontroll), 50 vagy 100 μM nátrium-szelenát (Na_2SeO_4) volt.

A növények ellenőrzött körülmények között nevelkedtek minden kísérleti rendszerben: 150 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ fényintenzitás, 12 órás nappali és 12 órás sötét periódus, 55-60% páratartalom, 25 ± 2 °C hőmérséklet.

Csírázás biomassza produkció és sztómaműködés vizsgálata:

A növények növekedésének és fejlődésének becsléséhez megállapítottuk a növények friss és száraz tömegét, a főgyökérhosszt és oldalgyökérszámot. Csüdfüvek esetében vizsgálat tárgyát képezte a csírázási százalék, valamint a keresztmetszeteken a gyökér és szövetcsoportok szélessége is. A sztómák sűrűsége és nyitottsága mikroszkóppal lett vizsgálva.

Elemtartalom analízis:

A növények által felvett szelén és más mikroelemek mennyiségét ICP-MS (Agilent 7700 Series, Santa Clara, USA vagy Thermo Scientific XSeries II, Asheville, USA) állapítottuk meg.

Mikroszkópos technikák:

A gyökércsúcsok vizsgálata minden esetben ~0,5 cm hosszú gyökérszegmenseken történt, amelyekből módszerenként legalább 10 került festésre. Az immunjelölések és az Auramin O festés gyökérkeresztmetszeteken történt, mely 4%-os paraformaldehidben fixált 100 µm vastagságú vibratómmal készült metszeteken történt. A mikroszkópos vizsgálatok minden esetben Zeiss Axiowert 200M inverz mikroszkóppal (Carl Zeiss, Jena, Németország) történtek, amihez egy digitális kamera csatlakozik (AxioCam HR, HQ CCD, Carl Zeiss, Jena, Németország). A fluoreszcens képek értékelése AxioVision Rel. 4.8 szoftverrel történt, a mérést pedig 100 µm átmérőjű körökben a gyökérmerisztémán végeztük. Az alkalmazott festékeket és hozzá tartozó filtereket a következő táblázat foglalja össze:

Vizsgált molekula	Festékanyag	Puffer	Mikroszkópos filter
Pektin	Ruténium vörös	Desztillált víz	fénymikroszkópia
Sejtfali peroxidázok	Pirogallol	10 mM foszfát puffer	fénymikroszkópia
Lipid peroxidáció	Schiff reagens	K ₂ S ₂ O ₅	fénymikroszkópia
Életképesség	FDA	10/50 mM MES/KCl	Zeiss Filter 10
Kallóz	Anilinkék	Desztillált víz	Zeiss Filter 49
Lignin és szuberin	Auramin O	10 mM Tris-HCl	Zeiss Filter 9
NO	DAF-FM DA	10 mM Tris-HCl	Zeiss Filter 10
ONOO ⁻	DHR 123	10 mM Tris-HCl	Zeiss Filter 10
O ₂ ⁻	DHE	10 mM Tris-HCl	Zeiss Filter 9
H ₂ O ₂	Amplex Red	50 mM Na-foszfát puffer	Zeiss Filter 20
Glutation	MBB	Desztillált víz	Zeiss Filter 49
GSNO	Antitest	TBSA-BSAT	Zeiss Filter 10
3-nitrotirozin	Antitest	TBSA-BSAT	Zeiss Filter 10

Western blot és natív gélelektroforézishez kapcsolt módszerek:

A növényi proteinkivonat készítéséhez a növényi biomasza kétszeres mennyiségű extrakciós pufferrel lett homogenizálva, majd a felülúszót proteázinhibitor-koktéllal kezeltük, s ezt használtuk fel a további módszerekhez.

A proteintirozin-nitráció vizsgálatához a proteinkivonat 12% SDS gélelektroforézissel került elválasztásra, majd a fehérjéket PVDF membránra transzfereltük. A blokkolást követően a proteintirozin-nitráció kimutatása 3-nitrotirozin (nyúlban termelt, 1:2000) elleni antitesttel történt. A detektáláshoz alkalikus-foszfátáz kapcsolt másodlagos antitesttel (kecskében termelt, 1:10000) jelöltük a membránt, majd NBT/BCIP előhívási reakcióval tettük láthatóvá a fehérjéket.

A NADPH-oxidáz enzim aktivitását a növényi proteinkivonat 10%-os natív poliakrilamid gélelektroforézissel történő szétválasztását követően vizsgáltuk. Az elválasztott gél NBT és NADPH tartalmú reakció pufferbe helyeztük, így az enzim aktivitása lila szín formájában jelent meg a gélen.

A SOD izoformáit és aktivitását szintén hasonló módon futtattuk meg, majd a gél először egy NBT, majd egy riboflavin és TEMED tartalmú oldatban inkubálódott, sötétben. Az enzim aktivitása fény hatására lett látható a gélen.

A GSNOR enzim aktivitásának vizsgálatához az elválasztott gél először NADH majd GSNO oldatba került. A NADH autofluoreszcencia eltűnése jelezte az enzim aktivitását UV fényben.

Spektrofotometriai vizsgálatok:

Spektrofotometriával vizsgáltuk a levelek antocián tartalmát. A pigmentek acetonnal kerültek kivonásra, s az abszorpciót 534, 634 és 661 nanométeren mértük. A kapott értékekből kiszámolásra került az antocián tartalom.

A SOD enzim aktivitását az NBT fotokémiai redukciójának gátlásával mértük, ahol az ahol egy enzimatis egység az NBT fotokémiai redukciójának felét akadályozza meg.

Statisztikai analízis:

Az eredmények statisztikai elemzése Microsoft Excel 2010, Systat Sigmaplot 12 és Statistica 9 programokkal történt. A szignifikancia megállapítására Student-féle T próba, Duncant teszt, Kruskal-Wallis ANOVA és Mann-Whitney U-teszt lett felhasználva.

Eredmények összefoglalása

Kísérleteink során a különböző érzékenyséű növényeket vetettük alá szelén kezelésnek, hogy felderítsük a tolerancia háttérben álló folyamatokat. A vizsgálatok során összehasonlítottuk az *Brassica juncea*, *Arabidopsis thaliana*, *Astragalus bisulcatus* és *Astragalus membranaceus* növényfajokat. A növények kezelése történhetett szelenittel vagy szelenáttal a kísérleti rendszertől függően. Alkalmazott módszereink közé tartozott a növények növekedésének, biomasszájának és morfológiájának monitorozása, az életképesség, sejtfalváltozások és sztómaválasz tanulmányozása, a ROF és RNF metabolizmus változásainak valamint a proteintirozin nitrációnak a kimutatása.

Kísérleti eredményeink alapján a következő megállapítások születtek:

I. Bár nem esszenciális nyomelem számukra, **minden vizsgált növényfaj képes volt nagy mennyiségű szelén akkumulációjára**. A két szelénforma közül a szelenát rendelkezett magasabb transzlokációs rátával, mely mindhárom kezelt növényfajban megfigyelhető. A felvett szelén hatással volt az érzékeny *Astragalus* faj növények mikroelem-háztartására, hiszen a fontos tápelemek metabolizmusa, mint a vas, a cink, a mangán, a bór és a molibdén megváltozott.

II. A felvett szelén koncentrációtól függően kihatással volt a növények növekedésére és biomassza-produkciójára. A kisebb kezelési koncentráció több kísérleti rendszerben is pozitív hatású volt. Összességében elmondható, hogy a **szelénérzékeny növények** (*Arabidopsis thaliana* és *Astragalus membranaceus*) **növekedését jelentősen gátolta a kezelés**, melyhez számottevően csökkent toleranciaindex és gyökérmerisztéma-életképesség is társult. A **toleráns és/vagy hiperakkumuláló növények** (*Brassica juncea* és *Astragalus bisulcatus*) **növekedése csupán a nagyobb szeléndózis hatására változott**, melyhez egy bár csökkent, de az érzékeny növényfajokénál magasabb életképesség társult. A hajtásban a szelén akkumulációja nem változtatta meg jelentősen a levelek morfológiáját, nem jelentek meg nekrotikus vagy sárgulós foltok.

III. A gyökérnövekedés csökkenésének háttérben részben a toleranciamechanizmusok közé tartozó sejtfalmódosulások is állhattak, hiszen a sejtfal összetételbeli változásai megnövelhetik a rigiditását. A **szelénérzékenyebb növények sejtfalában kallózsintézis történt** a kezelések hatására, melyet a

toleráns növényfajok nem mutattak. Ezekben a növényfajokban **a sejtfalba lignin épült be és megváltozott a pektineloszlás**, mely elősegíthette a növények toleranciáját. A szelén-kezelt indiai mustár levelei nagyszámú, nyitott sztómát tartalmaztak, mely a szelénvolatilizációval történő detoxifikációjára enged következtetni.

IV. A szelén prooxidánsként viselkedett a legtöbb kísérleti rendszerben, de ennek mértéke a növényfajok között eltérő volt. **A kezelés megváltoztatta a O_2^- és H_2O_2 szinteket**, de a változások az érzékeny növényfajokban jelentősebbek voltak, mint a toleránsaknál. Az oxidatív károsodások közül a lipidperoxidáció is ezt bizonyította. A különbség hátterében az ROF metabolizmusához köthető enzimek és antioxidánsok eltérő viselkedése állhat. **A O_2^- -termelő NADPH-oxidáz aktivitása az érzékenyebb növényekben számottevően változott, valamint új izoenzimek is aktiválódtak.** A kioltásért felelős SOD enzim aktivitását szintén befolyásolta a szelén, valamint az izoformái eltérő mértékben aktiválódtak. Összességében **a SOD-aktivitás a toleráns növényfajokban volt magasabb** a kísérletek folyamán. A sejtfali peroxidázok aktivitása is jelentősebb volt a tűró növények gyökerében. A glutationtartalom növényfajonként eltérő választ mutatott: lúdfüben kissé megemelkedett, majd a legnagyobb kezelés csökkentette a szintet, míg az indiai mustárban a koncentráció-függően csökkent, de ennek mértéke kisebb volt, mint a lúdfüben.

V. A RNF homeosztázisa szintén megváltozott a szelénkezelés hatására. **A NO-szint nem változott jelentősen** sem a szelénformákat összehasonlító kísérletben sem a keresztesvirágúak családjában. A csüdfüveket vizsgáló kísérletben az érzékenyebb *A. membranaceus* mindkét szervében megnövelte a NO-szintet, míg a hiperakkumuláló *A. bisulcatus* csak a hajtásában. Az ebből keletkező **ONOO⁻-szint szorosan kapcsolódott a szeléntoxicitáshoz.** Minden szelénérzékeny növényfajban emelkedett a szintje, valamint a toxikusabb szelénforma, a szelenit is jelentősen növelte. **A GSNO-szintje és metabolizmusa szintén változott.** A csüdfüvek családjában minden kezelési koncentráció jelentősen csökkentette a szintjét, kivéve az *A. membranaceus* sziklevelet, ahol ezzel ellentétesen, egy koncentráció-függő növekedés volt megfigyelhető. A bontásában szerepet játszó enzim, a GSNOR aktivitás csökkent az *A. bisulcatus*-ban, míg *A. membranaceus*-ban az aktivitás enyhén nőtt levélben.

VI. A peroxinitrit képes megváltoztatni a fehérjék aktivitását tirozinnitráción keresztül, melyet a nitrozatív stressz biomarkereként is alkalmaznak. A **szelenit jelentősen megváltoztatta a növények nitrációs mintázatát** a szelenáttal összehasonlítva, hajtásban maga a mintázat is változott az újonnan megjelent és csökkenő nitrációjú sávokkal, míg gyökérben csupán egy összesített nitrációs mintázat erősödés figyelhető meg. A **lúdfű és indiai mustár kísérleti rendszerben mindkét növényfajban megnövekedett a nitráció intenzitása**, de új nitrált fehérjesávok nem jelentek meg. A csüdfüvek családjában az *A. membranaceus*-ban **jelentős nitrációs változások keletkeztek, számos új sáv jelent meg a gyökerekben**, míg ezzel ellenétben az *A. bisulcatus*-ban inkább a nitráció csökkenéséről beszélhetünk, mivel egyes fehérjesávok nitrációja jelentősen csökken. Az eredmények alapján feltételezhető, hogy a fehérjék nitrációja és a szelén toxicitás között szoros kapcsolat van, valamint a tolerancia egyik mechanizmusa a módosított fehérjék lebontása.

Kísérleteink során sikerült fényt deríteni a szeléntoxicitás egy kevésbé vizsgált háttérfolyamatára, a nitro-oxidatív stresszre. A különböző növényfajokon és szelénformákkal végzett kísérletek több szempontból is bizonyították a folyamat jelentőségét stressz során, az eredmények pedig betekintést nyújtanak az igen összetett abiotikus stressz védelmi reakciókba, valamint a ROF és RNF homeosztázisába is.

Mivel az irodalom számára új eredményekről van szó, így véleményem szerint a munkám elősegítette a nitro-oxidatív stresszfolyamatok jobb megértését. Nem szabad azonban elfeledni, hogy más RNF-függő makromolekula módosítások (pl. lipid és nukleinsav nitráció) is történhetnek, így a jövőben ezek vizsgálata is megalapozott.

Publikációs lista

mtmt azonosító: 10055282

Az értekezés alapjául szolgáló publikációk:

- Árpád Molnár, Gábor Feigl, Vanda Trifán, Attila Ördög, Réka Szöllősi, László Erdei, Zsuzsanna Kolbert (2018) The intensity of tyrosine nitration is associated with selenite and selenate toxicity in *Brassica juncea* L.
Ecotoxicology and Environmental Safety, 147: 93–101, IF: 4,527
- Árpád Molnár, Zsuzsanna Kolbert, Krisztina Kéri, Gábor Feigl, Attila Ördög, Réka Szöllősi, László Erdei (2018) Selenite-induced nitro-oxidative stress processes in *Arabidopsis thaliana* and *Brassica juncea*
Ecotoxicology and Environmental Safety, 148: 664–674, IF: 4,527
- Zsuzsanna Kolbert, Árpád Molnár, Réka Szöllősi, Gábor Feigl, László Erdei, Attila Ördög (2018) Nitro-Oxidative Stress Correlates with Se Tolerance of *Astragalus* Species
Plant and Cell Physiology, pcy099, 59 : 9 pp. 1827-1843, IF: 3.929

Más tudományos közlemények:

- Gábor Feigl, Devanand Kumar, Nóra Lehotai, Nóra Tugyi, **Árpád Molnár**, Attila Ördög, Ágnes Szepesi, Katalin Gémes, Gábor Laskay, László Erdei, Zsuzsanna Kolbert (2013) Physiological and morphological responses of the root system of Indian mustard (*Brassica juncea* L. Czern.) and rapeseed (*Brassica napus* L.) to copper stress.
Ecotoxicology and Environmental Safety, 94 179–189
- Gábor Feigl, Nóra Lehotai, **Árpád Molnár**, Attila Ördög, Marta Rodríguez-Ruiz, José M. Palma, Francisco J. Corpas László Erdei, Zsuzsanna Kolbert (2015) Zinc induces distinct changes in the metabolism of reactive oxygen and nitrogen species (ROS and RNS) in the roots of two *Brassica* species with different sensitivity to zinc stress,
Annals of Botany, 116: 613-625
- Gábor Feigl, Devanand Kumar, Nóra Lehotai, **Árpád Molnár**, Éva Rácz, Attila Ördög, László Erdei, Zsuzsanna Kolbert, Gábor Laskay (2015) Comparing the effects of excess copper in the leaves of *Brassica juncea* (L. Czern) and *Brassica napus* (L.) seedlings: growth inhibition, oxidative stress and photosynthetic damage,
Acta Biologica Hungarica,66 (2): 205-221
- Gábor Feigl, Zsuzsanna Kolbert, Nóra Lehotai, **Árpád Molnár**, Attila Ördög, Ádám Bordé, Gábor Laskay, László Erdei (2016) Different zinc sensitivity of *Brassica* organs is accompanied by distinct responses in protein nitration level and pattern
Ecotoxicology and Environmental Safety, 125: 141–152
- Kolbert Zsuzsanna, Lehotai Nóra, **Molnár Árpád**, Feigl Gábor (2016) "The roots" of selenium toxicity: a new concept.
Plant Signaling and Behavior 11:(10) Paper e1241935.
- Lehotai Nóra, Feigl Gábor, Koós Ágnes, **Molnár Árpád**, Ördög Attila, Petó Andrea, Erdei László, Kolbert Zsuzsanna (2016) Nitric oxide-cytokinin interplay influences selenite sensitivity in *Arabidopsis*.
Plant Cell Reports 35:(10) pp. 2181-2195
- Zsuzsanna Kolbert, Gábor Feigl, Ádám Bordé, **Árpád Molnár**, László Erdei (2017) Protein tyrosine nitration in plants: Present knowledge, computational prediction and future perspectives.
Plant Physiology and Biochemistry 113 pp. 56-63
- Gábor Feigl, Ádám Bordé, **Árpád Molnár**, Zsuzsanna Kolbert (2018) Exogenous ascorbic acid is a pro-nitrant in *Arabidopsis thaliana*.
ACTA BIOLOGICA SZEGEDIENSIS 62 : 2 pp. 115-122.
- Gábor Feigl, Edit Horváth, **Árpád Molnár**, Dóra Oláh, Péter Poór, Zsuzsanna Kolbert (2019) Ethylene-Nitric Oxide Interplay During Selenium-induced Lateral Root Emergence in *Arabidopsis*
Journal of Plant Growth Regulation 38 pp. 1481-1488

- Kolbert Zsuzsanna, **Molnár Árpád**, Feigl Gábor, van Hoewyk Doug (2019) Plant selenium toxicity: Proteome in the crosshairs
JOURNAL OF PLANT PHYSIOLOGY 232 pp. 291-300.
- Feigl Gábor, **Molnár Árpád**, Szöllösi Réka, Ördög Attila, Töröcsik Kitti, Oláh Dóra, Bodor Attila, Perei Katalin, Kolbert Zsuzsanna (2019) Zinc-induced root architectural changes of rhizotron-grown *B. napus* correlate with a differential nitro-oxidative response
NITRIC OXIDE-BIOLOGY AND CHEMISTRY 90 pp. 55-65.
- Kolbert Zsuzsanna, **Molnár Árpád**, Oláh Dóra, Feigl Gábor, Horváth Edit, Erdei László, Ördög Attila, Rudolf Eva, Barth Teresa, Lindermayr Christian (2019) S-Nitrosothiol Signalling Is Involved In Regulating Hydrogen Peroxide Metabolism Of Zinc-Stressed *Arabidopsis*
PLANT AND CELL PHYSIOLOGY 60: 11 pp. 2449-2463.
- **Molnár Árpád**, Papp Márk, Zoltán Kovács Dávid, Béteky Péter, Oláh Dóra, Feigl Gábor, Szöllösi Réka, Rázga Zsolt, Ördög Attila, Erdei László, Rónavári Andrea, Kónya Zoltán, Kolbert Zsuzsanna (2020) Nitro-oxidative signalling induced by chemically synthesized zinc oxide nanoparticles (ZnO NPs) in *Brassica* species
CHEMOSPHERE 251 Paper: 126419
- Vollár Martin, Feigl Gábor, Oláh Dóra, Horváth Attila, **Molnár Árpád**, Kúsz Norbert, Ördög Attila, Csupor Dezső, Kolbert Zsuzsanna (2020) Nitro-Oleic Acid in Seeds and Differently Developed Seedlings of *Brassica napus* L.
Plants 9:406.

Konferencia-előadások:

1. Gábor Feigl, Devanand Kumar, Andrea Pető, Nóra Lehotai, Attila Ördög, **Árpád Molnár**, Zsuzsanna Kolbert, László Erdei (2012) The effect of zinc on the microelement homeostasis and the metabolism of reactive signal molecules in *Brassica juncea* and *Brassica napus*.

Third Annual Workshop of COST Action FA 0905 – Mineral improved crop production for healthy food and feed, Lisbon, Portugal, 23-26 October 2012

2. Lehotai Nóra, Pető Andrea, Feigl Gábor, Ördög Attila, Tugyi Nóra, **Molnár Árpád**, Lyubenova L, Schröder Peter, Kolbert Zsuzsanna, Erdei László (2013) Selenium induced stress responses in *Arabidopsis thaliana* and *Pisum sativum* plants: the possibilities of biofortification.

Societas Biologiae Plantarum Hungarica, Conference of Young Biologists, Szeged, Hungary. 25 January 2013

3. Ördögné Dr. Kolbert Zsuzsanna, Feigl Gábor, **Molnár Árpád**, Prof Dr. Erdei László (2015) Growth responses induced by microelement excess: the role of reactive nitrogen species.

Joint development of higher education and training programmes in plant biology in support of knowledge-based society opening conference, Szeged, Hungary, 20-21 April 2015

4. **Molnár Árpád**, Feigl Gábor, Bordé Ádám, Erdei László, Kolbert Zsuzsanna (2015),

Különböző *Brassica* szervek cinkérzékenységének és eltérő protein nitrációjának kapcsolata.

A Magyar Szabadgyök-Kutató Társaság VIII. Kongresszusa, Budapest, 2015. november 5-6.

5. Gábor Feigl, Ádám Bordé, **Árpád Molnár**, Zsuzsanna Kolbert (2016) Disturbance in RNS or ascorbate metabolism affects protein tyrosine nitration in *Arabidopsis*

6th Plant Nitric Oxide International Meeting. 78 p. Granada, Spanyolország, 2016 szeptember 14-16.

6. **Molnár Árpád**, Feigl Gábor, Szöllösi Réka, Erdei László, Kolbert Zsuzsanna (2017) Fehérje tirozin nitráció, mint a növényi szelénérzékenység markere

Magyar Növénybiológiai Társaság Fiatal Növénybiológusok Előadássorozata, Debrecen, Magyarország, 2017. június 9.

7. **Molnár Árpád**, Feigl Gábor, Ördög Attila, Szöllösi Réka, Erdei László, Kolbert Zsuzsanna (2017) A fehérje nitráció szerepe a növényi szelén-érzékenységben

12th Congress of the Hungarian Society of Plant Biology, Szeged, Hungary, 30. August-1. September 2017

8. **Molnár Árpád** (2018) A szelén fitotoxicitás háttér folyamatai különböző szeléntoleranciájú növényekben
XXI. Tavasz Szél Konferencia, Győr, Magyarország, 2018. május 4-6.
9. Zsuzsanna Kolbert, **Árpád Molnár**, Dóra Oláh, Attila Ördög, Eva Rudolf, Christian Lindermayr, Gábor Feigl (2018) Exogenous zinc modifies reactive nitrogen species metabolism in *Arabidopsis*
7th Plant Nitric Oxide International Meeting, Nice, France, 24-26 October 2018
10. **Molnár Árpád** (2019) Cink oxid nanopartikulumok hatása keresztesvirágú növényekre
XXII. Tavasz Szél Konferencia, Debrecen, Magyarország, 2018. május 3-5.
11. Feigl Gábor, **Molnár Árpád**, Oláh Dóra, Kolbert Zsuzsanna (2019) A fehérje tirozin nitráció mint az elemtöbblet által indukált nitro-oxidatív stressz indikátora növényekben
Magyar Szabadgyök-Kutató Társaság X. Kongresszusa, Szeged, Magyarország, 2019. augusztus 29-30.
12. **Molnár Árpád**, Feigl Gábor, Papp Márk, Béteky Péter, Rónavári Andrea, Kolbert Zsuzsanna (2019) Cink-oxid nanopartikulum-indukált nitro-oxidatív stressz Brassica növényekben
Magyar Szabadgyök-Kutató Társaság X. Kongresszusa, Szeged, Magyarország, 2019. augusztus 29-30.

Konferencia-poszterek:

1. Feigl G, Pető A, Lehotai N, **Molnár Á**, Erdei L, Kolbert Zs (2013) Comparison of the effect of copper and zinc in Brassica juncea and Brassica napus roots: Microelement homeostasis, metabolism of reactive signal molecules and morphological adaptation.
Biomedica Miniconference, 13 December 2013, Szeged, Hungary.
2. Feigl Gábor, Lehotai Nóra, **Molnár Árpád**, Erdei László, Kolbert Zsuzsanna (2014) Detection of protein tyrosine nitration in zinc-treated Brassica plants.
11th Congress of the Hungarian Society of Plant Biology, 27-29. August 2014, Szeged, Hungary
3. **Molnár Árpád**, Feigl Gábor, Lehotai Nóra, Erdei László, Kolbert Zsuzsanna (2014) Microscopic study of zinc localization in Brassica roots.
11th Congress of the Hungarian Society of Plant Biology, 27-29. August 2014, Szeged, Hungary
4. **Molnár Árpád**, Trifán Vanda, Feigl Gábor, Erdei László, Kolbert Zsuzsanna (2016) Selenite treatment induces nitro-oxidative stress and decreases viability in indian mustard
22nd International Symposium on Analytical and Environmental Problems, Szeged, Hungary 2016. október 10.
5. Zsuzsanna Kolbert, **Árpád Molnár**, Gábor Feigl (2017) Selenium-influenced root growth: the involvement of ethylene
VISCEA International Conference: Plant Nutrition, Growth & Environment Interactions III., Bécs, Ausztria, 2017. február.20-21.
6. **Molnár Árpád**, Szöllősi Réka, Ördög Attila, Feigl Gábor, Kolbert Zsuzsanna (2017) In vivo fehérje tirozin nitráció szelén-kezelt Astragalus fajokban.
XV. Magyar Növényanatómiai Szimpózium, Budapest, Magyarország, 2017. szeptember 7.
7. Szöllősi Réka, Ördög Attila, **Molnár Árpád**, Feigl Gábor, Kolbert Zsuzsanna (2017) Anatómiai változások szelén-kezelt Astragalus fajok gyökerében.
XV. Magyar Növényanatómiai Szimpózium, Budapest, Magyarország, 2017. szeptember 7.
8. Feigl Gábor, **Molnár Árpád**, Krajner Jolán, Töröcsik Kitti, Kolbert Zsuzsanna (2017) Adaptation or inhibition – a rhizotron study on zinc-affected root growth of Brassica napus L.
12th Congress of the Hungarian Society of Plant Biology, Szeged, Hungary, 30. August-1. September 2017
9. Kolbert Zsuzsanna, **Molnár Árpád**, Poór Péter, Szöllősi Réka, Feigl Gábor (2017) The involvement of ethylene, stigolactones and nitric oxide in selenium-induced root morphogenic response (SIMR)
12th Congress of the Hungarian Society of Plant Biology, Szeged, Hungary, 30. August-1. September 2017

10. Véseiné Szöllősi Réka, Ördög Attila, **Molnár Árpád**, Feigl Gábor, Kolbert Zsuzsanna (2017) Szelénkezelés okozta anatómiai változások *Astragalus* fajok gyökerében
12th Congress of the Hungarian Society of Plant Biology, Szeged, Hungary, 30. August-1. September 2017
11. Gábor Feigl, Nóra Lehotai, **Árpád Molnár**, Ádám Bordé, Zsuzsanna Kolbert (2017) Excess element-induced protein tyrosine nitration as the marker of nitrosative stress in plants
8th International Symposium on Root Development, Umeå, Svédország, 29. May-01. June 2017
12. Gábor Feigl, **Árpád Molnár**, Jolán Krajner, Dóra Oláh, Zsuzsanna Kolbert (2018) The effect of different vertical zinc distribution on the early root development and zinc accumulation of *Brassica napus*
24th International Symposium on Analytical and Environmental Problems, Szeged, Hungary
October 8-9, 2018
13. **Árpád Molnár**, Gábor Feigl, Réka Szöllősi, Dóra Oláh, Attila Ördög, Zsuzsanna Kolbert (2018) The background processes of selenium-induced protein tyrosine nitration in *Astragalus* roots
7th Plant Nitric Oxide International Meeting, Nice, France, 24-26 October 2018
14. Gábor Feigl, **Árpád Molnár**, Réka Szöllősi, Kitti Törőcsik, Dóra Oláh, Zsuzsanna Kolbert (2018) Distinct nitrosative response behind zinc-induced root architectural changes in *Brassica napus* L.
7th Plant Nitric Oxide International Meeting, Nice, France, 24-26 October 2018
13. **Árpád Molnár**, Gábor Feigl, Márk Papp, Dóra Oláh, Zsuzsanna Kolbert (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. július 10-12.
14. Dóra Oláh, **Árpád Molnár**, Réka Szöllősi, Gábor Feigl, Zsuzsanna Kolbert (2019) NICKEL-INDUCED ROS AND RNS IMBALANCE IN BRASSICACEAE
14th International Conference on Reactive Oxygen and Nitrogen Species in Plants, München, Németország
2019. július 10-12.
15. Gábor Feigl, **Árpád Molnár**, Dóra Oláh, Ádám Czifra, Zsuzsanna Kolbert (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. július 10-12.
16. Zsuzsanna Kolbert, **Árpád Molnár**, Dalma Ménesi, Ildikó Valkai, Taras Pasternak, Attila Fehér (2019) SIGNAL INTERACTION BETWEEN NITRIC OXIDE (NO) AND RHO GTPASES DURING ROOT GROWTH
14th International Conference on Reactive Oxygen and Nitrogen Species in Plants, München, Németország
2019. július 10-12.
17. Varga Viktória, **Molnár Árpád**, Kolbert Zsuzsanna, Feigl Gábor (2019) Két *Alyssum lesbiacum* populáció nikkelle adott válaszainak összehasonlítása nitrozatív paraméterek felhasználásával
Magyar Szabadgyök-Kutató Társaság X. Kongresszusa, Szeged, Magyarország, 2019. augusztus 29-30.

Nyilatkozat

Mint az alábbi tudományos közlemények felelős szerzője igazolom, hogy Molnár Árpád doktorjelölt jelentős mértékben hozzájárult a tudományos publikáció létrejöttéhez és tézisében felhasznált eredményeit más Ph.D. értekezésben nem használjuk fel.

Árpád Molnár, Gábor Feigl, Vanda Trifán, Attila Ördög, Réka Szöllősi, László Erdei, Zsuzsanna Kolbert (2018) The intensity of tyrosine nitration is associated with selenite and selenate toxicity in *Brassica juncea* L.

Ecotoxicology and Environmental Safety, 147: 93–101, IF: 4,527

Szeged, 2020. augusztus 4.

Ördögné Dr. Kolbert Zsuzsanna
Egyetemi docens
SZTE TTIK Növénybiológiai Tanszék

Árpád Molnár, Zsuzsanna Kolbert, Krisztina Kéri, Gábor Feigl, Attila Ördög, Réka Szöllősi, László Erdei (2018) Selenite-induced nitro-oxidative stress processes in *Arabidopsis thaliana* and *Brassica juncea*

Ecotoxicology and Environmental Safety, 148: 664–674, IF: 4,527

Szeged, 2020. augusztus 4.

Ördögné Dr. Kolbert Zsuzsanna
Egyetemi docens
SZTE TTIK Növénybiológiai Tanszék

Zsuzsanna Kolbert, **Árpád Molnár**, Réka Szöllősi, Gábor Feigl, László Erdei, Attila Ördög (2018) Nitro-Oxidative Stress Correlates with Se Tolerance of *Astragalus* Species
Plant and Cell Physiology, pcy099, 59 : 9 pp. 1827-1843, IF: 3.929

Szeged, 2020. augusztus 4.

Ördögné Dr. Kolbert Zsuzsanna
Egyetemi docens
SZTE TTIK Növénybiológiai Tanszék