

DEBRECENI EGYETEM

**KERPÉLY KÁLMÁN NÖVÉNYTERMESZTÉSI ÉS KERTÉSZETI
TUDOMÁNYOK DOKTORI ISKOLA**

Doktori Iskola vezető:

Dr. Nagy János

egyetemi tanár, MTA doktora

Témavezető:

Dr. Kovács Béla

egyetemi tanár

**ELTÉRŐ ARZÉNFORMÁK HATÁSA NÉHÁNY SZÁNTÓFÖLDI
NÖVÉNY NÖVEKEDÉSI PARAMÉTEREIRE ÉS
ELEMFELVÉTELÉRE A FEJLŐDÉS KORAI STÁDIUMÁBAN**

Készítette:

Várallyay Szilvia

doktorjelölt

Debrecen

2017

**ELTÉRŐ ARZÉNFORMÁK HATÁSA NÉHÁNY SZÁNTÓFÖLDI NÖVÉNY
NÖVEKEDÉSI PARAMÉTEREIRE ÉS ELEMFELVÉTELÉRE A FEJLŐDÉS
KORAI STÁDIUMÁBAN**

Értekezés a doktori (PhD) fokozat megszerzése érdekében
a növénytermesztési és kertészeti tudományok tudományágban

Írta: Várallyay Szilvia, okleveles élelmiszerbiztonsági és -minőségi mérnök

Készült a Debreceni Egyetem, Kerpely Kálmán Doktori Iskolája
(Növénytermesztési és kertészeti tudományok doktori programja) keretében

Témavezető: Dr. Kovács Béla, egyetemi tanár

A doktori szigorlati bizottság:

	név	fokozat	aláírás
elnök:			
tagok:			
			

A doktori szigorlat időpontja: 20...

Az értekezés bírálói:

név	fokozat	aláírás
.....		
.....		

A bírálóbizottság:

	név	fokozat	aláírás
elnök:			
tagok:			
			
			
titkár:			

Az értekezés védésének időpontja: 20...

TARTALOMJEGYZÉK

BEVEZETÉS.....	4
1. CÉLKITŰZÉSEK.....	6
2. SZAKIRODALMI ÁTTEKINTÉS	8
2.1. Az arzén általános jellemzése	8
2.2. Az arzén előfordulása a talajban, valamint a felszín alatti vizekben	8
2.3. Az arzén mobilitását és biológiai hozzáférhetőségét befolyásoló tényezők... 11	
2.4. A növények arzén felvétele és az arzén növényen belüli transzlokációja	14
2.5. Az arzén-kezelés hatása a növények megjelenésére	17
2.6. Az arzén-kezelés hatása a növények által felvett arzén mennyiségére.....	18
2.7. Az arzén-kezelés hatása a növények ásványi anyag felvételére	19
2.8. Az arzén hatása a növényélettani folyamatokra	22
2.9. A növények arzén toleranciája.....	22
2.10. Az arzén növényekre gyakorolt toxikus hatását csökkentő tényezők	23
2.11. Arzénnal szennyezett területek fitoremediációja	24
2.12. Az arzén hatása az emberi szervezetre.....	25
3. ANYAG ÉS MÓDSZER.....	29
3.1. Tápoldatos kísérlet.....	29
3.2. Rizoboxos kísérlet.....	30
3.3. Tenyészedényes kísérlet	32
3.4. Alkalmazott mintaelőkészítési és mérési módszerek	35
3.4.1. Szárazanyag-tartalom meghatározása	35
3.4.2. Talaj vizsgálatok.....	35
3.4.2.1. A talaj „oldható” As-tartalma	36
3.4.2.2. A talaj „összes” As-tartalma	36
3.4.3. Növényi minták vizsgálata	36
3.5. Elemanalitikai vizsgálatok során alkalmazott készülékek bemutatása	37
3.5.1. Az ICP-OES készülék bemutatása	37
3.5.2. Az ICP-MS készülék bemutatása	38
3.6. Statisztikai módszer	39
4. EREDMÉNYEK ÉS ÉRTÉKELESLÉSÜK	40
4.1. A TÁPOLDATOS KÍSÉRLET EREDMÉNYEI	40
4.1.1. Kukorica teszt növényvel végzett tápoldatos kísérlet eredményei	40
4.1.1.1. Növekvő koncentrációjú As(III)- és As(V)-kezelések hatása a tápoldaton nevelt kukorica csíranövények szárazanyag-produktumára	40

4.1.1.2. Növekvő koncentrációjú As(III)- és As(V)-kezelések hatása a tápoldaton nevelt kukorica csíranövények As-tartalmára.....	41
4.1.1.3. Növekvő koncentrációjú As(III)- és As(V)-kezelések hatása a tápoldaton nevelt kukorica csíranövények makroelem felvételére.....	44
4.1.1.4. Növekvő koncentrációjú As(III)- és As(V)-kezelések hatása a tápoldaton nevelt kukorica csíranövények mikroelem felvételére	45
4.1.2. Napraforgó teszt növényrel végzett tápoldatos kísérlet eredményei	46
4.1.2.1. Növekvő koncentrációjú As(III)- és As(V)-kezelések hatása a napraforgó csíranövények szárazanyag-termékumára	46
4.1.2.2. Növekvő koncentrációjú As(III)- és As(V)-kezelések hatása a tápoldaton nevelt napraforgó csíranövények As-tartalmára	48
4.1.2.3. Növekvő koncentrációjú As(III)- és As(V)-kezelések hatása a tápoldaton nevelt napraforgó csíranövények makroelem felvételére	51
4.1.2.4. Növekvő koncentrációjú As(III)- és As(V)-kezelések hatása a tápoldaton nevelt napraforgó csíranövények mikroelem felvételére.....	52
4.2. A RIZOBOXOS ÉS TENYÉSZEDÉNYES KÍSÉRLET TALAJEREDMÉNYEI	53
4.3. A RIZOBOXOS KÍSÉRLET EREDMÉNYEI	56
4.3.1. Kukorica teszt növényrel végzett rizoboxos kísérlet eredményei	56
4.3.1.1. Növekvő koncentrációjú As(III)- és As(V)-kezelések hatása a rizoboxban nevelt kukorica csíranövények szárazanyag-termékumára	56
4.3.1.2. Növekvő koncentrációjú As(III)- és As(V)-kezelések hatása a rizoboxban nevelt kukorica csíranövények gyökérnövekedésére.....	56
4.3.1.3. Növekvő koncentrációjú As(III)- és As(V)-kezelések hatása a rizoboxban nevelt kukorica csíranövények As-tartalmára.....	58
4.3.1.4. Növekvő koncentrációjú As(III)- és As(V)-kezelések hatása a rizoboxban nevelt kukorica csíranövény makroelem felvételére	61
4.3.1.5. Növekvő koncentrációjú As(III)- és As(V)-kezelések hatása a rizoboxban nevelt kukorica csíranövény mikroelem felvételére	62
4.3.2. Napraforgó teszt növényrel végzett rizoboxos kísérlet.....	64
4.3.2.1. Növekvő koncentrációjú As(III)- és As(V)-kezelések hatása a rizoboxban nevelt napraforgó csíranövények szárazanyag-termékumára.....	64
4.3.2.2. Növekvő koncentrációjú As(III)- és As(V)-kezelések hatása a rizoboxban nevelt napraforgó csíranövények gyökérnövekedésére	65
4.3.2.3. Növekvő koncentrációjú As(III)- és As(V)-kezelések hatása a rizoboxban nevelt napraforgó csíranövények As-tartalmára	67
4.3.2.4. Növekvő koncentrációjú As(III)- és As(V)-kezelések hatása a rizoboxban nevelt napraforgó csíranövények makroelem felvételére	69
4.3.2.5. Növekvő koncentrációjú As(III)- és As(V)-kezelések hatása a rizoboxban nevelt napraforgó csíranövények mikroelem felvételére.....	71

4.4. A TENYÉSZEDÉNYES KÍSÉRLET EREDMÉNYEI.....	73
4.4.1. Növekvő koncentrációjú As(III)- és As(V)-kezelések hatása a tenyészedényben nevelt zöldborsó szárazanyag-termékumára	73
4.4.2. Növekvő koncentrációjú As(III)- és As(V)-kezelések hatása a tenyészedényben nevelt zöldborsó As-tartalmára	78
4.4.3. Növekvő koncentrációjú As(III)- és As(V)-kezelések hatása a tenyészedényben nevelt zöldborsó makroelem felvételére	93
4.4.4. Növekvő koncentrációjú As(III)- és As(V)-kezelések hatása a tenyészedényben nevelt zöldborsó mikroelem felvételére	96
5. KÖVETKEZTETÉSEK.....	104
5.1. Talajvizsgálati eredményekből levont következtetések	104
5.2. Növényminták vizsgálati eredményeiből levont következtetések	105
6. ÖSSZEFOGLALÁS.....	114
7. SUMMARY	119
8. ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK	124
9. GYAKORLATBAN HASZNOSÍTHATÓ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK.....	126
IRODALOMJEGYZÉK	127
KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS	143
PUBLIKÁCIÓK AZ ÉRTEKEZÉS TÉMAKÖRÉBEN.....	144
NYILATKOZAT	151

BEVEZETÉS

A talaj – mint a szárazföldi ökoszisztémák alapvető és meghatározó közege –, valamint a felszíni és a felszín alatti vízkészlet szennyeződése súlyos környezeti problémát jelent. Az arzén (As) egyike azon szennyező elemeknek, melyek e tekintetben a világ valamennyi részére kiterjedő globális problémát okoznak. A mezőgazdasági művelés alatt álló területek, valamint a felszín alatti vízkészlet arzén szennyezettsége jelen van többek közt az Amerikai Egyesült Államok, Argentína, Ausztria, Banglades, Chile, Kína, India, valamint Magyarország egyes részein is (Mandal és Suzuki, 2002). E tekintetben hazánk területén elsősorban az Alföld térsége érintett, ahol az arzén jelenti a felszín alatti vizek egyik legjelentősebb problémáját (Rowland et al., 2011).

Az arzén a talajban, valamint a talajvízben elsősorban szerves formában van jelen, mely sokkalta toxikusabb, mint az arzén szerves kötésű formája. Jól szellőzött talajokban, oxidatív körülmények között az arzenát [As(V)], anaerob körülmények között, azaz vízzel borított, levegőtlen, tömörödött talajok esetén az arzenit [As(III)] a jellemző szerves arzénforma (Mandal és Suzuki, 2002).

A szennyezőanyagok jelenléte a talajban, valamint a vizekben hosszabb ideig rejtve maradhat előttünk. A talaj puffer kapacitása egy határig ugyanis mérsékelheti a toxikus elemek káros hatásait. A talaj szűrőkapacitása azonban véges, ezt túllépve a talaj hirtelen áteresztővé válik, és maga is szennyező forrássá alakul át, melynek következtében a toxikus elemek megjelennek a vizekben, növényekben. A táplálékláncba való bekerülésük pedig súlyos élelmiszer- és takarmánybiztonsági probléma kialakulásához vezethet, hiszen az ember, valamint a szárazföldi állatok nagy része elsősorban a talajból származó, növényi eredetű élelemre/takarmányra szorul (Kádár, 1995). Az arzén azonban beépül a növényi szervezetbe (Shaibur et al., 2009), így a betakarított növények élelmiszerként/takarmányként való felhasználása az állati és az emberi szervezet egészségét egyaránt veszélyezteti (Zehnalek et al., 2004).

Az arzén nemcsak az emberre és az állatra, hanem a magasabb rendű növényekre nézve is mérgező. A növényi szervezetbe bejutva számos metabolikus folyamatot képes gátolni (Zhao et al., 2009), bizonyos koncentráció értékig a növények védekező mechanizmusuknak köszönhetően azonban képesek túlélni az ilyen jellegű abiotikus stresszt. Növények esetén az arzén toxicitás tünete lehet: a magvak csírázó képességének csökkenése, a levelek elszíneződése, valamint elhervadása, illetve a sejtek plazmolizise is (Mokgalaka-Matlala et al., 2008; Tu és Ma, 2002). A növények megfelelő fejlődéséhez ugyanis sokféle tápelemre van szükség, melyet döntően a

talajoldatból vízben oldott formában vesznek fel. A talajoldatban ionos formában jelenlévő tápelemek nemcsak a talajkolloidokkal, de egymással is kölcsönhatásban vannak. Ezek közül a kölcsönhatások közül az egyik legfontosabb az ionantagonizmus jelensége. Vannak olyan elempárok, amelyek közül, ha az egyik túl nagy mennyiségben fordul elő a talajban, korlátozza a másik tápelem felvehetőségét (Szalay, 2010). Előfordulhat tehát, hogy a talajban egy adott tápelem megfelelő mennyiségben van jelen, azonban a növények számára optimális mennyiségben nem felvehető. A növények mérsékelt tápelem hiány esetén nem mutatják a hiánytüneteket, ez a látens tápanyaghiány jelensége. Jelentős tápelemhiány azonban morfológiai változások, valamint hiánytünetek kialakulását indukálja (Pethő, 1993). A hiányos tápanyagellátás a termés minőségét rontja, kedvezőtlen környezeti feltételek mellett, továbbá csökken a növény szervesanyag felhalmozása, ezzel együtt pedig a termés mennyisége is (Stoeva et al., 2003).

A felszíni és a felszín alatti vizek, valamint a talaj megtisztítása a szennyező elemektől csak részben lehetséges, ráadásul sok energiát vesz igénybe, és akár további szennyeződéseket is indukálhat.

A talajban a természetes folyamatok, valamint az antropogén hatások eredményeként akkumulálódott szennyező elemek általában stabilak, melynek következtében az ilyen jellegű szennyeződések jelenléte nemcsak a jelenkor, hanem a jövő problémája is (Kádár, 1995; Kádár, 2012).

1. CÉLKITŰZÉSEK

Doktori munkám során növekvő koncentrációjú As(III)-, valamint As(V)-kezelések hatását vizsgáltam tápoldat-növény, valamint talaj-növény rendszerben. Ehhez háromféle kísérlet típust állítottam be, melyek a következők voltak: tápoldatos, rizoboxos és tenyészedenyes kísérletek. Vizsgálataim tárgyát e kísérletekből származó növény- és talajminták képezték.

A talajvizsgálatok során célkitűzésem volt annak meghatározása, hogy a talaj összes arzén-tartalmának hány százaléka hozzáférhető a növények számára (oldható arzén-tartalom), valamint, hogy a talaj összes, illetve oldható arzén-tartalmának arányát nézve milyen mértékű különbség figyelhető meg az alkalmazott As(III)- és As(V)-kezelések hatása között?

A növényi minták vizsgálata során pedig az alábbi kérdések megválaszolását tűztem ki célul:

- Az egyes növényi részek szárazanyag-produktumára milyen hatást gyakorolnak a különböző szervesetlen arzénformák [As(III) és As(V)]?
- Van-e kedvező hatása az arzenitnek [As(III)], illetve az arzenátnak [As(V)] a vizsgált koncentráció tartományban?
- A vizsgált koncentráció tartományon belül milyen As(III)-, illetve As(V)-koncentráció értékeknél jelentkeznek az As-toxicitás látható tünetei?
- Mennyi az az As(III)-, illetve As(V)-mennyiség, amely már oly mértékben toxikus, hogy a növények pusztulását indukálja?
- A növények fejlődésének kezdeti szakaszában az As(III)-, illetve As(V)-kezelések milyen hatást gyakorolnak a gyökérnövekedés intenzitására?
- Az As(III)- és As(V)-kezelések hogyan hatnak a különböző növényi részek arzén-tartalmára, valamint az arzén mely növényi részben akkumulálódik főként?
- Az egyszikű, valamint a kétszikű növények arzén felvétele között megfigyelhető-e különbség?
- A növekvő koncentrációjú As(III)- és As(V)-kezelések hatására a kísérleti növények mennyi arzént vonnak ki a tápoldatból, illetve a talajból, valamint a kivont arzén mennyisége hogyan oszlik meg a különböző növényi részek között?

- Az alkalmazott As(III)- és As(V)-kezelések hogyan befolyásolják a növények makro-, illetve mikroelem készletét?
- Az alkalmazott szervetlen arzénformák, valamint a vizsgált makro- és mikroelemek között kimutatható-e szinergista vagy antagonista kapcsolat?
- Milyen különbségek figyelhetők meg az As(III)- és As(V)-kezelések hatása között a vizsgált paraméterek tekintetében?

2. SZAKIRODALMI ÁTTEKINTÉS

2.1. Az arzén általános jellemzése

Az arzén már az ókor óta ismert elemek egyike, a felfedezése Albertus Magnus nevéhez fűződik (Sullivan, 1969). Elnevezése a görög arzenikosz szóból ered, melynek jelentése férfias, vakmerő. A periódusos rendszer 15. csoportjában található, félfém típusú kémiai elem, melynek relatív atomtömege 74,9216, rendszáma 33, vegyjele: As. Egyetlen stabil, természetes izotópja a ^{75}As . Oxidációs száma vegyületeiben -3, 0, +3 és +5 lehet. Az arzén és vegyületei erősen toxikusak (Kabata-Pendias és Mukherjee, 2007). A természetben szerves és szervetlen formán kívül szabad elemi állapotában is előfordul (Greenwood és Earnshaw, 1997). Az elemi arzénnek egy stabil fémes (szürke arzén) és egy instabil nemfémes (sárga arzén), illetve egy amorf (fekete arzén) módosulata ismert (Kabata-Pendias, 2010).

Az arzén jelen van a levegőben, vízben, talajban, földkéregben, a felszíni vizek üledékében, valamint az élő szervezetekben (Mandal és Suzuki, 2002). Koncentrációja a földkéregben 0,5 és 2,5 mg kg⁻¹ közé tehető (Kabata-Pendias és Pendias, 1984). Az arzén számos kőzet alkotója, melyekben döntően (60%) arzenát formájában van jelen. A természetben leggyakrabban előforduló arzén tartalmú ásványok a következők: arzenopirit (FeAsS), realgár (AsS), arzenolit (As₂O₃) (Kabata-Pendias, 2010).

Az arzén mérgező hatása már régóta ismert, toxicitása elsősorban kémiai módosulatától függ és csak másodsorban a koncentrációjától. A különböző arzénformák toxicitásának tekintetében a szervetlenek toxikusabbak, mint a szervesek. A szervetlen arzén vegyületek közül pedig az As(III) toxikusabb, mint az As(V) (Ullrich-Eberius et al., 1989). Ez egyrészt annak köszönhető, hogy az As(III) az ásványi anyagok felszínén kevésbé kötődik meg, azaz mobilisabb, mint az As(V) (Cullen és Reimer, 1989), valamint jobb oldhatósággal rendelkezik. A különböző arzén-specieszek toxikussága alapján összességében a következő sorrend állítható fel: As(III) > As(V) > MMA (monometil-arzensav) > DMA (dimetil-arzensav) (Jain és Ali, 2000).

2.2. Az arzén előfordulása a talajban, valamint a felszín alatti vizekben

A talajban az arzén mind szervetlen mind szerves formában megtalálható, a szerves formák mennyisége azonban jóval kisebb (Takamatsu et al., 1982; Mestrot et al., 2011). A talaj, valamint a felszín alatti vízkészlet arzén szennyezettségének forrásai egyrészt

természetes, másrészt antropogén eredetűek lehetnek (Mandal és Suzuki, 2002). A talaj természetes eredetű arzén szennyezése elsősorban az arzén tartalmú kőzetek málása során, valamint vulkáni működés hatására jön létre (Chilvers és Peterson, 1987). Természetes eredetű arzénszennyeződéssel, továbbá melegvíz, valamint termálvíz források mellett is találkozhatunk. A geológiai eseményeken felül, főleg ipari tevékenység hatására kerülhet az arzén a talajba, illetve a talajvízbe. A különböző bányászati tevékenységek, az arzén-tartalmú növényvédő-, illetve rovarölő szerek, továbbá a geológia eredetű arzént tartalmazó talajvizek mezőgazdasági hasznosítása is hozzájárult/hozzájárul a lokális jellegű szennyeződések kialakulásához (Takács, 1992; Williams et al., 2005; Gonzaga et al., 2006). A környezetünkben található arzén szennyezés jelentős része (legalább 60%-a) természetes eredetű és csak kisebb részben köszönhető emberi tevékenységnek (Chilvers és Peterson, 1987).

A talaj és a felszín alatti vízkészlet arzén szennyezettsége a világ valamennyi részére kiterjedő globális problémát jelent (Mandal és Suzuki, 2002; Liao et al., 2004), mely jelen van többek közt Argentína, Ausztria, az Amerikai Egyesült Államok, Banglades, Chile, Kína, India, Új-Zéland, Tajvan, Thaiföld, valamint Magyarország egyes részein is (Mukherjee és Bhattacharya, 2001; Mandal és Suzuki, 2002; Smedley és Kinniburgh, 2002) (*1. ábra*). E tekintetben hazánk területén elsősorban az Alföld térsége érintett, ahol az arzén jelenti a felszín alatti vizek egyik legjelentősebb problémáját (Rowland et al., 2011).



1. ábra: Arzénnal szennyezett felszín alatti vizek előfordulása a világon
(Smedley és Kinniburgh, 2002)

A termőtalajok arzén-tartalma elsődlegesen az alapkőzettől függ (Tang, 1987), így a talaj természetes eredetű arzén-tartalma a különböző földrajzi régiókban jelentősen eltérő (Collourn et al., 1975). A szennyezetlen talajok általában 1 és 40 mg kg⁻¹ közötti arzén-tartalommal bírnak (Kabata-Pendias és Pendias, 1984), az erőteljesen szennyezett területeken a talaj arzén-tartalma azonban elérheti a 2000 mg kg⁻¹-ot is. Az alacsonyabb koncentráció elsősorban a homok, valamint a gránitos alapkőzetű talajokra jellemző, magasabb érték a hordalékos és a nagy szervesanyag-tartalommal rendelkező talajok esetén figyelhető meg (Kabata-Pendias és Pendias, 1984). A különböző talajtípusok arzén-tartalmának tekintetében Shaibur et al. (2009) megállapították, hogy a csernozjom, illetve a szürke erdő talajt magasabb, míg a tundra és a podzol talajt alacsonyabb arzén-tartalom jellemzi, továbbá a meszes talajok nagyobb arzén-tartalommal bírnak, mint a nem meszesek (Walsh et al. 1977; Aichberger et al., 1989). A talajvíz arzén-tartalma a legtöbb országban nem haladja meg a 10 µg l⁻¹-t, azonban a világ számos táján ez az érték elérheti az 5000 µg l⁻¹-t is (Smedley et al., 1996). Habár a talajvíz magas arzén koncentrációja geológiai eredetű is lehet, a kiemelkedően magas arzén-tartalommal rendelkező talajvíz melegvíz-forrásokkal rendelkező területek mellett olyan térségekben jellemző, ahol bányászati, illetve ipari tevékenység zajlik (Ritchie, 1961; Nakahara et al., 1978).

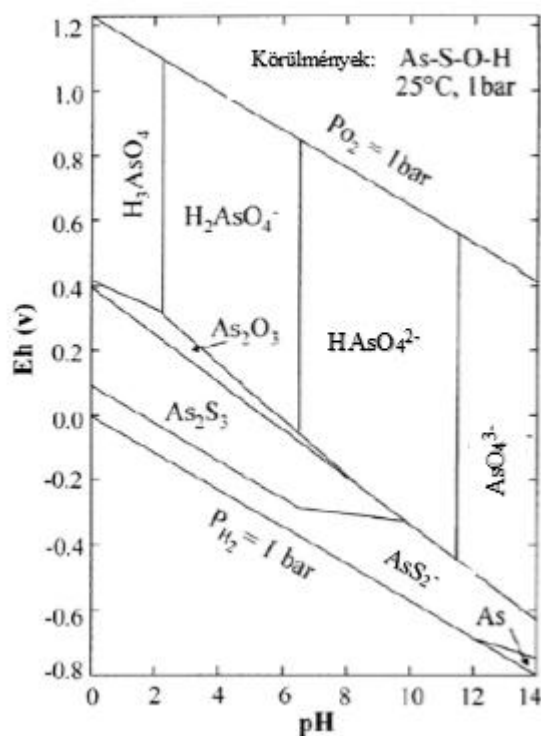
Az arzén nemcsak a talajvízben, hanem az egyéb vízáadó rétegeket (rétegvíz) érintő kútvezetekben is magas koncentrációban fordul elő. Hazánkban az arzénal szennyezett rétegvíz arzén koncentrációja 1 és 174 µg l⁻¹ között változik (Varsányi, 1990), az USA és Banglades területén ez az érték azonban meghaladja az 1000 µg l⁻¹-t (Page, 1981; Dhar et al., 1997). A felszín alatti vizekben az arzén főként szervetlen formában fordul elő, metilezett arzénszármazékok jelenléte nem jellemző (Harrington et al., 1978). A talajban elsősorban szervetlen formában, mint arzenit [As(III)] és arzenát [As(V)] található meg (Reichert, 1921). Kisebb mennyiségben szerves arzénformák is előfordulhatnak, ezek jelenléte elsősorban herbicid szennyezésre utal, hiszen a MMA, illetve a DMA nátrium és ammónia sóit, mint posztemergens gyomirtószerek használták (McBride és Wolfe, 1971; Woolson, 1973).

2.3. Az arzén mobilitását és biológiai hozzáférhetőségét befolyásoló tényezők

A nehézfémek, valamint a félfémek a talajban igen lassan mozognak, a csapadékvízzel nem mosódnak le. Nagy mennyiségű toxikus elem talajba kerülésekor, jellemzően az adott elem mobilitását gátló csapadékképzési és adszorpciós folyamatok kerülnek előtérbe (Kádár, 1991; Filep, 1999). Durva textúrájú talajok (homoktalaj) esetén azonban az arzén elmozdulása a talajprofilban nem kizárható. Mallick et al. (2011) munkájuk során homoktalajhoz nátrium-arzenitet adva megfigyelték, hogy $6,5 \pm 0,4$ év alatt a kezdeti arzén-tartalom a talaj felső 20 cm-ében a felére csökkent, azonban 20-40 cm mélységben az említett elem mennyisége nőtt (Adriano, 2001). Azáltal, hogy az arzén lefelé mozoghat a talajban (Johnson és Hiltbold, 1969; Robinson, 1975), mennyisége a vízáadó rétegekben is megnőhet (Nriagu et al., 2007).

Farnese et al. (2014) munkájuk során megállapították, hogy a talaj oldható arzén-tartalma jobban jellemzi a talaj biológiailag hasznosítható, mobilizálható arzén-tartalmát, mint a talaj összes arzén-tartalma. A talajban a növények számára hozzáférhető arzén mennyiségét számos környezeti tényező (pH, Eh, szervesanyag-tartalom, más ionok jelenléte, egyéb tényezők) határozza meg (Huang, 1975; Dudas, 1987; Chiu és Hering, 2000; Jones et al., 2000; Bissen és Frimmel 2003; Ghosh és Bhattacharya, 2004; Moreno-Jiménez, 2012). A talaj összes arzén-tartalmának csak kis része (20%) van jelen a növények számára hozzáférhető formában, mintegy 80%-a erősen kötődik a talajalkotókhoz (Muller et al., 2007).

A talaj pH-ja jelentős hatással bír az arzén mobilitására. Oxigén dús (aerob) közegben, savas körülmények között az arzén H_2AsO_4^- , lúgos, valamint neutrális körülmények között HAsO_4^{2-} formában fordul elő (2. ábra). Anaerob körülmények között, az arzén főként H_3AsO_3 formájában van jelen, mely oxidáló tényezők hatására arzénsavvá (H_3AsO_4) alakul át (Vinogradov, 1959).



2. ábra: Az arzén különböző előfordulási formái a pH és az Eh függvényében (Brookins, 1988)

Semleges körüli pH-értékű talaj esetén a fémek vegyületei stabilak, nehezen mennek oldatba, így a talaj összes arzén-tartalmának csak csekély része hozzáférhető a növények számára (Filep, 1999).

A növények számára hozzáférhető As mennyiségére a talajban jelenlevő egyéb ionok is hatással vannak. A vas-, alumínium-, valamint mangán-oxidok és hidroxidok felületén az arzén képes megkötődni, melynek következtében csökken a növények számára hozzáférhető As mennyiség. Az ilyen jellegű megkötődés mind arzenit, mind arzenát esetében létrejöhethet, jellemzően azonban az arzenátok nagyobb mennyiségben képesek adszorbeálódni (Moreno-Jiménez et al., 2012). Az arzén a talajban képes a foszfor-, vas-, alumínium-, kalcium- és mangánionnal komplexet alkotni, mely nagyban befolyásolja a talajban lévő viselkedését. Savanyú kémhatású talajok esetén az arzén elsősorban Al-As ($AlAsO_4$) és Fe-As ($FeAsO_4$), míg lúgos kémhatású, valamint meszes talajok esetén Ca-As ($Ca[AsO_4]_2$) formájában van jelen (Fordyce, 1995). Az arzén mobilitása arányos a talajba került arzén mennyiségével, ugyanakkor fordítottan arányos a talaj Fe- és Al-tartalmával, valamint az idővel. Az arzén talaj-növény rendszerben lévő mobilitását bizonyos anionok az alábbi sorrendnek megfelelően képesek fokozni: $PO_4^{3-} \gg CO_3^{2-} > SO_4^{2-} \sim Cl^-$ (Violante et al., 2008).

A növények számára hozzáférhető arzén mennyiségének szempontjából meghatározó tényező a talaj agyagásvány-tartalma is. Az arzén, As(III) és As(V) formájában képes az agyagásványok felületén megkötődni, az idő előrehaladtával beépülni szerkezetükbe (Reichert, 1921). Ebben az esetben az arzenát szintén nagyobb mértékben képes megkötődni, mint az arzenit, ugyanakkor fontos megemlíteni, hogy az ilyen jellegű adszorpciós kapcsolat gyengébb, mint a vas-, alumínium-, valamint mangán-oxidok és hidroxidok esetén fennálló. Az As(V) esetén az adszorpciós folyamatok nagy része 5, az As(III) esetén 4 körüli pH-értéken megy végbe (Moreno-Jiménez et al., 2012). Az arzenát agyagásványok felületén történő megkötődése anionos karakterének köszönhetően a foszfor megkötődésével megegyező módon, kalcium hídon keresztül történik meg (Fixen és Grove, 1990).

Első megközelítésre a talaj szorpciós kapacitását az anionok esetén, így az arzenátot illetően is a talaj agyagtartalma, valamint a talajszemcsék felszínének nagysága határozza meg (Crafts et al., 1939; Jacobs et al., 1970a; Vincent, 1944; Small, 1962). Ennek megfelelően az arzén leginkább az alacsony agyagtartalommal rendelkező homoktalajokban mozgékony, melyből adódóan fitotoxikus hatása az ilyen talajok esetén sokkal jobban érvényesül (Woolson et al., 1973ca; Deuel et al., 1972; Jacobs et al., 1970b), mint a finom textúrájú talajok esetén, továbbá a homoktalajok esetén az arzenát lefelé irányuló elmozdulása következhet be a talajprofilban (Steevens et al., 1972). A talaj arzén-visszatartó képességét Manning és Goldberg (1997) szerint a magas agyagásvány-tartalomhoz társuló, nagy vas-oxid tartalom jelentősen növeli.

Az arzén megkötődését a talajban a szemcseméret is nagyban befolyásolja. Az arzén mennyisége a feltalajban háromszor nagyobb volt abban az esetben, ha a szemcseméret $< 50 \mu\text{m}$, mint abban az esetben, ha a szemcseméret $50\text{-}600 \mu\text{m}$ közötti, vagyis ha a talaj felszíne finom szemcséjű nagyobb mennyiségű arzén tud megkötődni (Carrizales et al., 2007).

További fontos tényező a talaj szervesanyag-tartalma, ugyanis a talajban található szervesanyag képes megkötni a mikroelemeket. A talaj nagyobb molekulatömeggel rendelkező szervesanyag frakciója jelentősen fokozza a fémek immobilizációját (Jacobs és Keeney, 1970; Woolson, 1973;).

A talaj tulajdonságai nemcsak a növények számára hozzáférhető As mennyiségét, de az arzén előfordulási formáját is meghatározzák. Erősen redukáló (anaerob) körülmények közt az arzén elsősorban elemi arzén (As_4)[As(0)] és arzin (AsH_3)[As(III)] formájában stabil. Kevésbé redukáló környezet esetén, mint amilyen az árasztásos földművelés

esetén találkozhatunk az arzén arzenit (MAsO_2)[As(III)] formává képes alakulni. A jól szellőzött talajokban azonban az arzenát (MAsO_4)[As(V)] a fő előfordulási forma (Turner, 1949; Wood, 1974).

Az As(V) a talajban mikrobiális tevékenység hatására erősebben mérgező As(III)-má képes redukálódni. Oxidáló körülmények között a talajban található mikroorganizmusok segítségével metileződési folyamatok játszódnak le, melynek során a szervesetlen arzén vegyületekből monometil-arzénsav (MMA), dimetil-arzinsav (DMA), valamint trimetil-arzin-oxid (TMA₃O) keletkezik (Reichert, 1921). Ezeket a vegyületeket a talajban található egyéb mikroorganizmusok (*Penicillium brevicaulis*, *Scopulariopsis fungi*) könnyen gáz halmazállapotúvá alakítják (Thom et al., 1932), mely formában az arzén könnyen a légkörbe diffundál, ahol a későbbiek során visszaalakul szervesetlen formává. Az illékony arzénszármazékok képződésének köszönhetően csökkenhet tehát a talaj felső rétegének arzén-tartalma (Boyle és Jonasson, 1973; Cheng és Focht, 1979; Weinberg, 1977; Papp, 2002).

Az előzőekben említetteken túl a növények számára hozzáférhető arzén mennyiségét a klimatikus tényezők (hőmérséklet, páratartalom) és a geomorfológiai tényezők, valamint a talaj fizikai tulajdonságai (porozitás) is befolyásolják (Tang, 1987).

2.4. A növények arzén felvétele és az arzén növényen belüli transzlokációja

A szerves arzén vegyületek tekintetében megállapítható, hogy blokkolják a merisztéma szöveteket (Horswell és Speir, 2006), valamint gátolják a fehérje szintézist is, növényekre gyakorolt hatásuk azonban alig tanulmányozott, köszönhetően annak, hogy a növények az arzént elsősorban szervesetlen formában veszik fel (Moreno-Jiménez et al., 2012).

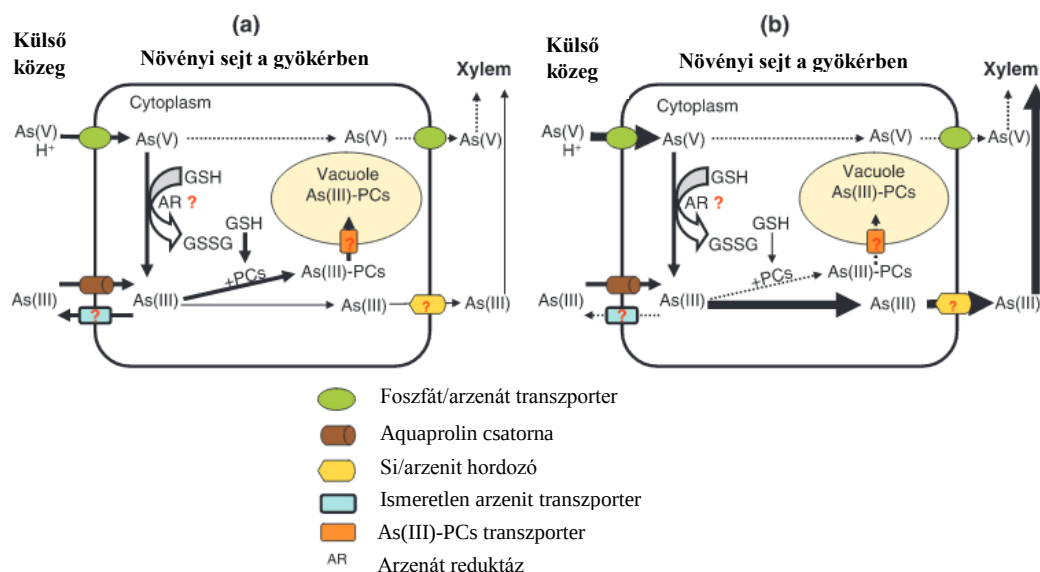
Az arzenát felvétele a foszfáttal megegyező úton történik. A szakirodalmi adatok egy része szerint a foszfátok és arzenátok felvételében szerepet játszó transzporterek affinitása azonban nagyobb a foszfáthoz, mint az arzenáthoz. Ennek ellenére Poyton et al. (2004) kísérletük során azt tapasztalták, hogyha egyenlő mértékben adagoltak a termőközeghez arzenátot és foszfátot, az arzén felvétele csak 30%-al redukálódott, így arra következtettek, hogy a transzporternek nagyobb az affinitása az arzenáthoz, mint a foszfáthoz. Ezen transzporterek működését alapvetően befolyásolja a növény foszfor háztartásának állapota. Számos növényfaj esetén a gyökérsav termelődés fokozódik foszforhiányos állapot esetén, a rizoszférában található foszfor mobilitásának elősegítése érdekében (Smith és Read, 1997). A P mobilizációjában bekövetkező

változás egyrészt a gyökér savkiválasztása indukálta pH-értékben bekövetkező változásnak köszönhető (Raghothama, 1999). Másrészt a gyökér által kiválasztott szerves savak jellemzően kis molekula tömeggel rendelkeznek és képesek a talajba a foszfát helyére beépülni, melynek következtében nő a talaj oldható foszfor-tartalma (Redman et al., 2002; Wenzel, 2009). A foszfát és az arsenát kémiai felépítésük tekintetében hasonlítanak egymáshoz, valamint a talajban azonos módon kötődnek meg, ezért ez a folyamat nem csak a foszfát, de az arsenát mobilizációját is elősegíti (Fitz és Wenzel, 2002).

Az As(III) felvételét a foszfát nem befolyásolja (Abedin et al., 2002; Wang et al., 2002), mivel az arzenit felvétele más transzport rendszeren keresztül zajlik. A közös foszfát transzporter miatt az As(V) felvételtől, régebből származó (Asher and Reay, 1979) és részletesebb ismereteink vannak (Ullrich-Eberius, 1989; Meharg et al., 1994; Singh et al., 2006), mint az As(III) felvételéről. Az As(III) felvételében elsősorban a szilícium transzportjában szerepet játszó csatornák vesznek részt (Ma et al., 2006, 2007; Yamaji et al., 2008). Az arzén növényen belüli transzportját illetően feltételezhető, hogy az arsenát a foszfáttal analóg módon szállítódik. Azonban az arzén a növényi szövetekben elsősorban mint As(III) van jelen, köszönhetően annak, hogy az As(V) a sejteken belül arzenát reduktáz segítségével As(III)-má alakul át (Chen et al., 2007; Yu et al., 2009).

Quaghebeur és Rengel (2003) lúdfű (*Arabidopsis*) mutánsokkal végzett kísérletük során bizonyították, hogy az As(V) kezelésben részesített növények nem As(V) formájában szállítják az arzént, így az arzén transzlokációja a hajtás irányába nem a foszforéval megegyező módon történik. Szareptai mustár növényt (*Brassica juncea*) vizsgálva a kutatók bebizonyították, hogy az As(V) már a gyökérben As(III)-má redukálódik, és nagy része As(III)-trisz-tiolát komplex formájában a gyökérben is marad. Borsó (*Pisum sativum*) esetén hasonlót tapasztaltak, az As(V) valószínűleg a fitokelationok közvetítésével As(III)-má redukálódott. A legtöbb kutató úgy gondolja, hogy As(V)-As(III) átalakulás már a növények gyökerében lezajlik (Duan et al., 2005; Poynton et al., 2004; Castillo-Michel et al., 2007; Mihucz et al., 2005). Az arzén transzlokációja a legtöbb növényi faj esetén nem túl hatékony, hipperakkumulátor növények kivételével az arzén nagy része a gyökérben akkumulálódik (Zhao et al., 2009), majd a gyökértől a talajfelszínen át távolodva csökken az egyes növényi szervek arzén-tartalma (Walsh et al., 1977). Ennek egyik lehetséges magyarázata, hogy az As(III) fitokelatinnal komplexet képez és a vakuólumban akkumulálódik, melynek következtében

transzportja a xylem irányába csökken (3. ábra) (Dhanker et al., 2006; Raab et al., 2004; Zhao et al., 2009).



3. ábra: Növények arzén felvétele nem-hipperakkumuláló (a) és hiperakkumuláló (b) növények esetén (Zhao et al., 2009)

A xylemben az As(III) főként nem komplex formában van jelen (Mihucz et al., 2005; Xu et al., 2007; Zhao et al., 2009). Raab et al. (2004) úgy gondolják, hogy a növényeket a mérgezéstől a vakuólumokban történő raktározás védi meg.

A gazdaszerkezet számára a mikorrhiza jelenléte az arzénal szennyezett területeken különösen előnyös lehet. Az arzén felvételének csökkenése volt megfigyelhető páfrány, lencse, lucerna, paradicsom, napraforgó esetén mikorrhiza jelenléte mellett (Trotta et al., 2006; Ahmed et al., 2006; Chen et al., 2007; Liu et al., 1998; Ultra et al., 2007; Yu et al. 2009). Kukorica esetén ennek hatására szintén szignifikáns csökkenés következett be a gyökérben akkumulálódott arzénát mennyiségében, azonban az arzenit koncentrációját illetően ilyen jellegű változás nem volt észlelhető. Mindemellett a kukoricával végzett kísérlet azt is bizonyította, hogy az arzénát reduktáz aktivitás csökken abban az esetben, ha gombás fertőzés áll fenn a növénynél. Amíg a kutatók egy része a mikorrhiza fertőzöttségnek tulajdonítja a növények arzén felvételében bekövetkező változásokat, addig másik része úgy gondolja, hogy a növények arzén koncentrációjának csökkenése a „hígulási” effektusnak köszönhető, hiszen a mikorrhiza fertőzött növények biomasszája megnőtt (Chen et al., 2007; Yu et al., 2009).

2.5. Az arzén-kezelés hatása a növények megjelenésére

Az arzén felvételének következtében olyan növényfiziológiai folyamatok sérülhetnek, melyek súlyos rendellenességek kialakulásához vezetnek (Wells és Gilmor, 1977; Smith et al., 2010). Az arzén toxicitás tünetei gyakran megfigyelhetők olyan növények esetén, melyeket bányahulladékot tartalmazó vagy korábban arzén tartalmú peszticidekkel, illetve szennyvíziszappal kezelt területen termesztünk (Kabata-Pendias, 2010). Növények esetén az arzén toxicitás tünete lehet: a magvak csírázó képességének, valamint a hajtás és a gyökér növekedésének csökkenése (Castillo-Michel et al., 2007), a levelek elhervadása, az antocianin megnövekedett mennyiségének következtében jelentkező lilás elszíneződés, a termés méretének zsugorodása, valamint a sejtek plazmolízise (Kabata-Pendias, 2010). Csökkenhet továbbá a levelek száma (Shaibur et al., 2009), valamint a biomassza tömege (Carbonell-Barrachina et al., 1997). A gyökerek sárgás-barnás elszíneződésén, valamint a mellékgyökerek mennyiségének csökkenésén, illetve a leveleken megjelenő vörösesbarna nekrotikus foltokon túl a nagy koncentrációban jelenlévő arzén a növények elhalásához vezet (Kabata-Pendias, 2010). Az arzén a növények számára nem esszenciális, sőt toxikus mikroelem (Quaghebeur és Rengel, 2003; Raab et al., 2007), egyes szakirodalmak szerint azonban az arzén kis koncentrációban hasznos lehet a növények számára (Gulz és Gupta, 2000). Habár az arzén toxikus hatása leggyakrabban a terméshozam csökkenésében nyilvánul meg, kis koncentrációjú arzén-kezelésnél terméshozam növekedés volt megfigyelhető paradicsom, búza, kukorica és rozs esetében (Gulz és Gupta, 2000; Jacobs et al., 1970b; Woolson et al., 1971; Xu és Thornton, 1985; Carbonell-Barrachina et al., 1998a). Ennek egyik oka lehet, hogy a foszfor – mely nélkülözhetetlen a termésképzésben – egy része a talajban kalciummal, vassal és alumíniummal komplexet alkotva, valamint a Fe- és Al-hidroxidhoz kötődve, illetve agyagásványok, humuszanyagok és a CaCO_3 felületén megkötődve van jelen. Az arzenát és a foszfát kémiai felépítésüket tekintve hasonlítanak egymáshoz, amelyből adódóan az arzenát képes a foszfát helyére beépülni, melynek következtében nő a növények számára hozzáférhető, oldható P-tartalom (Jacobs et al., 1970b; Woolson et al., 1973).

Az, hogy mit nevezünk „kritikus” arzén szintnek a terméshozamra nézve, nagyban függ a növény fajtájától és a talaj típusától (Walsh et al., 1977).

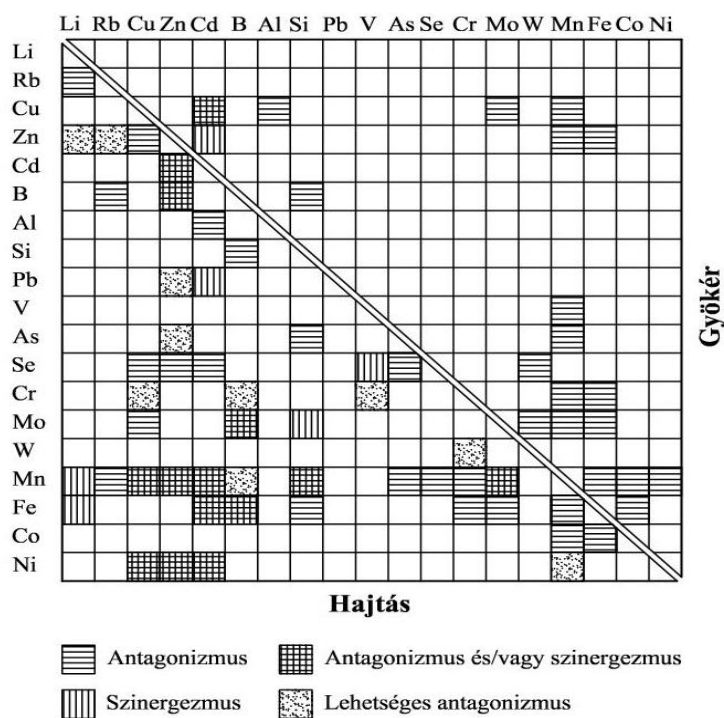
2.6. Az arzén-kezelés hatása a növények által felvett arzén mennyiségére

A növények, valamint a talaj, illetve a tápközeg arzén-tartalma közötti összefüggést számos kutató vizsgálta. A tanulmányok nagy része lineáris kapcsolatot tárt fel a növényzet arzén koncentrációja és a talaj összes-, illetve oldható arzén-tartalma között, amely megerősíti azt a megállapítást, mely szerint a növények az arzént passzív felvétellel a vízáram segítségével veszik fel (Porter et al., 1975; Warren et al., 1968; Thoresby és Thornton, 1979). Tlustos et al. (1998) kísérletük során megfigyelték, hogy a növény által felvett arzén mennyisége a talaj arzén-tartalma mellett attól is függ, hogy az arzén milyen formában van jelen a termőközegben. A különböző arzénformák hatására a növény által felvett arzén mennyisége alapján a következő sorrendet állították fel: szerves As > As(V) > As(III). Munkájuk során kapott eredmények arra is rámutattak, hogy a talaj magas arzén koncentrációjának köszönhetően az arzén döntően az idősebb levelekben, valamint a gyökérben akkumulálódott, mely növényi részek megközelítőleg azonos arzén-tartalommal bírtak, alacsony arzén szint esetén azonban a levél arzén koncentrációja meghaladta a gyökérét. MacPheel et al. (1960) kísérletük során megállapították, hogy a növény arzén koncentrációja, valamint a talajoldat arzén-tartalma között szorosabb korrelációs kapcsolat áll fenn, mint a talaj összes arzén-tartalma esetén, köszönhetően annak, hogy a növények az arzént elsősorban a talajoldatból veszik fel. Munkájuk során mindemellett azt is megfigyelték, hogy nagyobb mennyiségű arzén elsősorban a gyökérben akkumulálódott, ennél kevesebb volt jelen az egyéb vegetatív növényi szervekben, a legkisebb mennyiség pedig a reproduktív szervek esetén volt megfigyelhető. Huq és Nadiu (2005) rizs arzén-tartalmát vizsgálva alátámasztották az előzőekben ismertetetteket azáltal, hogy a növény egyes részeinek arzén-tartalma alapján a következő sorrendet állították fel: gyökér > szár > levél > szem > héj. Az arzén mennyisége a reproduktív szövetekben még akkor sem nő meg jelentősen, ha az arzén fitotoxikus hatásaként a növények növekedésében 50%-os csökkenés következik be. A generatív növényi részek esetén esetlegesen mért magas arzén-tartalom a porszennyezésnek köszönhető (Woolson et al., 1973). A talaj és a növény arzén-tartalmának összefüggését vizsgálták Lyuben et al. (2002) is, szántóföldi körülmények között végzett kísérletük során azt tapasztalták, hogy a talaj arzén koncentrációjának növekedésével együtt nőtt a teszt növényként alkalmazott napraforgó arzén koncentrációja. A növények arzén felvételét az eddigi tanulmányok nemcsak tenyészedényes és szabadföldi kísérletek során, hanem hidropónikus körülmények között is vizsgálták. Liu et al. (2008) hidropónikus körülmények között

végzett kísérletük során megállapították, hogy a tesztnövényként alkalmazott őszi búza növényi szöveteiben az As(V)-kezelés hatására nőtt az arzén koncentrációja. Shaibur et al. (2009) szintén oldatkultúrák körülmények között tanulmányozták az As(III) víziparajra gyakorolt hatását. A kísérletük során alkalmazott kezelések a következők voltak: 0, 10 (0,750 mg kg⁻¹), 25 (1,87 mg kg⁻¹), valamint 50 µM (3,75 mg kg⁻¹). A munkájuk során kapott eredmények alapján a levél kivételével az egyes növényi szervek arzén-tartalmát valamennyi kezelés növelte. A legnagyobb kezelés (50 µM) (3,75 mg kg⁻¹) a 25 µM-os (1,87 mg kg⁻¹) kezeléshez képest azonban csökkentette a levél arzén koncentrációját.

2.7. Az arzén-kezelés hatása a növények ásványi anyag felvételére

Az arzén képes gátolni a növények anyagcsere folyamatait, valamint a makro- és mikroelemek felvételét, az ásványi anyagok felvételében szerepet játszó transzporterekért történő kompetíció következtében. Kabata-Pendias (2011) megállapította, hogy a növények hajtásában az As és a Si, valamint az As és a Se között antagonista kapcsolat van, illetve antagonista kapcsolat meglétét feltételezte az As és a Zn között is. Az As és a Mn között kölcsönös antagonizmus áll fenn mind a növények hajtásában, mind a gyökerében (4. ábra).



4. ábra: Az arzén és a mikroelemek között fennálló szinergista, valamint antagonista kapcsolatok (Kabata-Pendias, 2010)

Mallick et al. (2011) az arzén-kezelésnek a kukorica ásványianyag felvételére gyakorolt hatását vizsgálták. Kísérletük során megfigyelték, hogy a növekvő koncentrációjú kezelések hatására csökkent a Fe és a Mn akkumulációja, ugyanakkor a tesztnövény Cu és Zn koncentrációjában nem történt változás. Carbonell-Barrachina et al. (1998b) paradicsommal végzett kísérletükben azt tapasztalták, hogy az arzén-kezelés hatására a növény K, Ca, Mg, B, Cu, Mn és Zn felvétele csökkent. Őszi búza tesztnövényen az arzén-kezelés eredményeként a Cu- és a Zn- mellett a Fe-tartalomban is csökkenő tendenciájú felvétel volt megfigyelhető (Liu et al., 2008). Ezzel szemben Melo et al. (2009) tesztnövényként ricinust alkalmazva megállapították, hogy az arzén-kezelés hatására a Cu és a Zn mellett nőtt a P, a N, valamint a Ca koncentrációja a gyökérben, valamint a P-, a Mn- és a Zn-tartalom a hajtásban, csökkent ugyanakkor a Mn koncentráció a gyökérben, valamint a Cu- és a Fe-tartalom a hajtásban. Farnese et al. (2014) kísérletük során arzenáttal kezelték vízisalátát (*Pistia stratiotes*), melynek következtében a kontroll növény esetén tapasztalt értékhez képest a növény gyökerének Mg-tartalmában csökkenés, K-tartalmában pedig növekedés következett be. A növekvő koncentrációjú arzén-kezelés a vízispenót levelének és szárának K és Mg-tartalmában hasonló változást indukált, továbbá a mikroelemek tekintetében növelte a Mn felvételt, ugyanakkor csökkentette az említett növényi szervek Cu koncentrációját (Shaibur et al., 2009). Arzén-kezelés hatására a különböző növényi szervekben jelenlévő Mn-tartalom kapcsán a következő növények gyökerében szintén növekedés volt megfigyelhető: sárga csillagfűrt, kukorica és taréjos tarackbúza. Ugyanakkor a talajfelszín feletti részeknél csak a sárga csillagfűrt és a kukorica esetén volt növekvő tendencia megfigyelhető, a taréjos tarackbúza hajtásának Mn-tartalma csökkent (Najmowicz et al., 2010). Nascimento és Xing (2006) növekvő koncentrációban arzenáttal kezelt tápoldaton nevelt kukorica egyes részeinek elem összetételében bekövetkező változásokat vizsgálták. Kísérletük során azt tapasztalták, hogy a növény hajtásának K-tartalma a legnagyobb koncentrációjú kezelés ($5,25 \text{ mg L}^{-1}$) kivételével valamennyi esetben nőtt, a hajtás P-tartalmát illetően szintén növekedést figyeltek meg azokban az esetekben, amikor a tápoldat arzén koncentrációja nem haladta meg a $3,75 \text{ mg L}^{-1}$ -t. Az alacsonyabb koncentrációjú arzén-kezelések hidropónikus körülmények közt nevelt őszi búza gyökerének P-tartalmát szintén növelték, azonban a magasabb dózisok (15 és 20 mg L^{-1}) hatására a Nascimento és Xing (2006) által a kukorica hajtása esetén tapasztaltakhoz hasonlóan csökkenés volt észlelhető. A mikroelemek mennyiségében bekövetkező változások vonatkozásában megállapítható, hogy a növekvő

koncentrációjú arzén-kezelések negatívan hatottak az őszi búza Zn, Cu, valamint Fe felvételére (Liu et al., 2008). Park et al. (2016) arzenit és arzenát kezelések lúdfűre gyakorolt hatásának vizsgálata során megállapították, hogy mindkét szervetlen arzén forma növelte az említett növény valamennyi szervének Mg-tartalmát, továbbá a gyökér Fe koncentrációjában is növekedés volt megfigyelhető. Ezzel szemben Raab et al. (2007) napraforgóval végzett kísérletük során azt tapasztalták, hogy a növekvő koncentrációjú arzén-kezelések hatására csökkent a tesztnövényként alkalmazott napraforgó gyökerének Mg-tartalma. Paivöke és Simola (2001) az arzén növények elemfelvételére gyakorolt hatásának vizsgálatára tesztnövényként borsót használtak. Munkájuk során azt tapasztalták, hogy a Mg mellett a Mn és a Zn koncentrációja is nőtt a gyökérben, míg a hajtás esetén a P-tartalomban következett be növekedés. Tu és Ma (2005) munkájuk során megfigyelték, hogy az arzén kis koncentrációban való jelenléte a tápközegben növelte a kísérleti növényként alkalmazott kínai páfrány B, Cu, Mn és Zn koncentrációját, ugyanakkor a magasabb arzén-dózis hatására csökkenés következett be az említett elemek koncentrációjában. A makroelemek mennyiségében bekövetkező változások tekintetében, a K-tartalom mellett ugyancsak növekedést tapasztaltak a levelek P koncentrációjában is.

Az arzén növények ásványianyag-asszimilációjára gyakorolt hatását tekintve a P az egyik leginkább tanulmányozott elem. Ennek oka, hogy az arzenátok és a foszfátok, kémiai felépítésükben hasonlítanak egymáshoz. Ami miatt azonban a növényi felvétel során antagonistaként szerepelnek (Kádár, 1991; Mokgalaka-Matlala et al., 2008; Pigna et al., 2010). Az arzenát elsősorban az ortofoszfáthoz hasonlít, habár az arzén képes a vegyértékét változtatni a különböző oxidációs-redukciós viszonyoktól függően mind a talajban, mind a biológiai rendszerekben, ellentétben a foszforral (Walsh et al., 1977). Az arzén a foszfor helyére bármely összetett molekulába vagy enzimbe beépülhet, amely molekula, illetve enzim így nem képes ellátni eredeti feladatát (Liu et al., 1998; Chrispeels et al., 1999). A foszfor az ATP és az ADP (energia transzfer) molekulák építőköve, továbbá fontos szerepet játszik a fehérje-anyagcserében (Marschner, 1995), nélkülözhetetlen a generatív szervek kialakulásában és a termésképzésben. A foszforhiány a szénhidrát- és nitrogén-anyagcsere károsodásához és a növény növekedésének visszamaradásához vezet (Pethő, 1993). Amíg a kutatók egy része az As és a P közt antagonista kapcsolatot állapított meg (Paivöke és Simola, 2001; Kumar et al., 2015), addig más része arról számolt be, hogy az arzénkezelés hatására nő egyes növényi szervek P-tartalma (Tu és Ma, 2005; Melo et al., 2009). Ez összefüggésbe

hozható azzal, hogy a foszfor felvétele során szerepet játszó transzporterek, nagy affinitású foszfát transzporterek, vagyis nagyobb affinitást elsősorban nem az arzenát hanem a foszfát iránt mutatnak (Ullrich-Eberius et al., 1989; Meharg és Macnair, 1992), valamint ezen transzporterek működését alapvetően befolyásolja a növény foszfor háztartásának állapota (Liu et al., 1998; Raghothama, 1999).

2.8. Az arzén hatása a növényélettani folyamatokra

Az arzén gátolja a fotoszintézist azáltal, hogy csökkenti a fotoszintetikus pigmentek termelődését (Mascher et al., 2002).

Az arzénnek kitett növények az $\text{As(V)} \rightarrow \text{As(III)}$ átalakulás során reaktív oxigén gyököket (ROS) generálnak (Singh és Ma, 2006). Habár reaktív oxigén-formákat (ROS) az egészséges növényi sejtek is termelnek, az arzén kitettség hatására a növényi szövetek fokozottan magas ROS szintje oxidatív stresszhez vezet (Stoeva et al., 2003, 2005).

Az arzén továbbá képes a foszfor helyére beépülni, a különböző anyagcsere folyamatokban. Az ATP-be beépülve ADP-As alakul ki, melynek következtében megváltozik a sejtek energia forgalma (Verbruggen et al., 2009). Az arzén nagy affinitással rendelkezik a különböző biomolekulák –SH csoportja iránt (enzimek és fehérjék), így képes azok működését gátolni (Meharg és Hartley-Whitaker, 2002). Mind az As(III) , mind az As(V) mutagén, azaz képesek megváltoztatni a genomot, mely növelheti a növény arzén toleráló képességét (Lin et al., 2008; Verbruggen et al., 2009).

2.9. A növények arzén toleranciája

Az arzén minden növényi szervezetben jelen van, ugyanakkor biokémiai szerepéről a tudomány mai állása szerint rendkívül keveset tudunk.

Baker (1981) a talaj fémszennyeződése esetén a magasabb rendű növényeket fémfelvételük alapján három csoportba osztotta:

- kirekesztő növények, melyek esetén a fémek általában a gyökérben akkumulálódnak és csak kisebb mértékben transzlokálódik a hajtásba, továbbá az ilyen növények szerveiben a fémfelvétel nem nő a talaj fémkoncentrációjával arányosan
- indikátor növények esetén a talaj fémterhelésével arányosan nő a gyökér és a hajtás fémfelvétele

- a hipperakkumulátor növények hajtásában pedig jóval nagyobb mennyiségben akkumulálódnak a fémek, mint az a talaj fémkoncentrációjából következne.

Arzén-hipperakkumuláló növények, valamint az általuk maximálisan felvett As mennyisége a következő: Kínai páfrány (*Pteris vittata*) (22000 mg kg⁻¹), hegyi kékcseresznye (*Jasione montana*) (6640 mg kg⁻¹), közönséges csarab (*Calluna vulgaris*) (4130 mg kg⁻¹), szemérmes mimóza (*Mimosa pudica*) (8350 mg kg⁻¹) (Wang és Mulligan, 2006).

A növények arzén-tartalma szárazanyagra vonatkoztatva 0,01 és 5 µg g⁻¹ között, a környezet arzén-tartalmának függvényében változik. Azon növényfajok esetén azonban, melyek passzív felvétel útján, a vízáram segítségével veszik fel az arzént, erősen szennyezett területen történő termesztés hatására az arzén koncentrációja az egyes növényi szövetekben meghaladhatja a 8000 mg kg⁻¹-ot (Kádár, 1991).

A szennyeztelen talajon termesztett növények esetén ez az érték 0,5 és 80 µg kg⁻¹ közé tehető (Kabata-Pendias, 2010), az élelmiszeripari felhasználásra szánt növényi részek arzén koncentrációja pedig jellemzően 10 és 60 µg kg⁻¹ között változik. Magasabb arzén-tartalom elsősorban a zöldségek, illetve az arzén-toleráns növények esetén figyelhető meg. Az egyes növény fajok arzén tolerációs képessége igen eltérő. Amíg a magas arzén koncentrációt is képes tolerálni a burgonya, fejes káposzta, paradicsom, répa, dohány, rozs, szudánifű, valamint a szőlő, addig a kukorica, cékla, illetve az eper közepesen toleráns. Alacsony tolerációs képesség jellemzi a hagymát, az uborkát, valamint a hüvelyeseket (Woolson et al., 1973; Jacobs et al., 1970a; Liebig et al., 1966).

2.10. Az arzén növényekre gyakorolt toxikus hatását csökkentő tényezők

Az arzén növényekre gyakorolt toxikus hatását a szennyezés forrásától, illetve a talaj tulajdonságaitól függően számos tényező csökkentheti (Kabata-Pendias, 2010). Az olyan vegyületek talajhoz való adagolása, melyek az arzénnal csapadékot képeznek (vas-szulfát, kalcium-karbonát) hatékonyak lehetnek abban az esetben, ha a talaj kevesebb, mint 10 mg kg⁻¹ oldható arzén-tartalommal rendelkezik (Hanada et al., 1975). Számos kutató az arzén növényekre gyakorolt toxikus hatásának csökkentése szempontjából lehetséges megoldásnak gondolta megfelelő mennyiségű foszfor adagolását a termőtalajhoz, hiszen a foszfátok és az arsenátok egymás antagonistái a növényi felvétel során, így a növények számára hozzáférhető foszfor mennyiségében bekövetkező jelentős mértékű növekedés hatására csökken a növények arzén felvétele.

Ezt a hidroponikus növénynevelési körülmények között kivitelezett kísérletek is igazolták, azonban a talaj-növény rendszerrel végzett kísérletek esetén ez már nem volt teljes mértékben alátámasztható, hiszen az arzenátok és a foszfátok azonos helyen kötődnek meg a talajban. Több tanulmány is arról számol be, hogy a foszfor talajhoz való adagolása nem csökkentette, hanem növelte az arzén toxicitását köszönhetően annak, hogy a foszfát az arzenát helyére beépült a talajba, melynek következtében nőtt a talajoldat arzén-tartalma (Nriagu et al., 2007). Peryea et al. (1998) a MAP (monoammónium-foszfát) műtrágyát illetően megállapították, hogy alkalmazása az olyan területeken ahol arzén tartalmú peszticid maradék van jelen a talajban, növelte a növények számára hozzáférhető, oldható arzén-tartalmát. A talaj oldható arzén-tartalmában bekövetkező változásokat figyelembe véve a talajhoz ként (Peryea et al., 1998), illetve FeO_x -ot (Hartley és Lepp, 2008) adagolva, csökken a talaj biológiailag hasznosítható arzén-tartalma. Sekhar et al. (2007) kísérletük során azt tapasztalták, hogy a Zn és a Cd talajhoz történő adagolásának hatására csökken, míg bizonyos anionok (karbonát, acetát, foszfát) talajba juttatásának következtében nőtt a növények által felvett arzén mennyisége. Azok az anyagok azonban, amelyek az arzén mobilitását növelik a talaj-növény rendszerben az összes arzén-tartalomnak csak kis részét képesek mozgósítani, köszönhetően annak, hogy az arzén nagy része erősen kötődik a különböző talajalkotókhoz (Muller, 2007). A mélyszántás által az arzén koncentrációja csökken a termőrétegben, valamint elősegíti az arzén fixációját a talajban, mely szintén csökkenti a fitotoxikus hatását. Az arzén a növényekben cink hiányt okozhat, azonban a cink-szulfát és a cink-kelát alkalmazása, mint lombtrágya szintén csökkentheti az arzén toxicitását. A nagy mennyiségű nitrogén adagolása ebből a szempontból szintén hasznos lehet (Kabata-Pendias, 2010).

2.11. Arzénnal szennyezett területek fitoremediációja

A talaj arzén szennyezettségének mértéke több helyen meghaladja a 2000 mg kg^{-1} -ot (Karczewska et al., 2007; Limura et al., 1977; Suzuki et al., 1974). Kiemelkedő mértékű arzénszennyezéssel főként antropogén hatásokkal erőteljesen terhelt területeken kell számolnunk (Buat-Menard, 1984; Pacyna, 1986). A különböző ipari tevékenységek (fémfeldolgozás, geotermikus erőművek, kén és foszfor tartalmú ásványokat feldolgozó vegyiművek, szén és egyéb fosszilis tüzelőanyagok elégetése, fakonzerváló anyagok előállítása) mellett az arzén tartalmú rovarölő, gyomirtó szerek és arzén tartalmú műtrágyák használata is jelentősen növelte/növeli a termőtalaj arzén-tartalmát (Lansche,

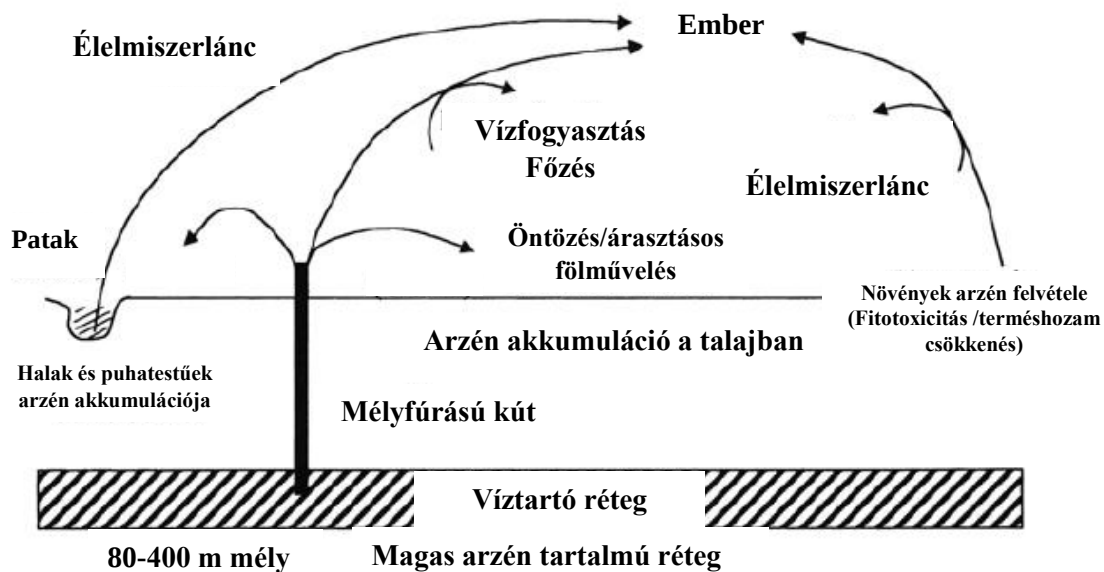
1965; Baker et al., 1968; Thompson, 1973; Nelson, 1977). Ahhoz, hogy a talajba került arzén nem fitotoxikus formává alakuljon, több évtized is szükséges, ezért az ilyen jellegű szennyezéssel bíró területek megtisztítása fontos feladat. A fitoremediáció gazdaságos, környezetkímélő, ugyanakkor esztétikus megoldás is a szennyezett talajok helyreállítására. A módszer hatékonysága azonban a különböző területeken igen eltérő lehet. A fitoremediáció esetén a növény, mint egy „biopumpa” értelmezhető, mely a napenergia segítségével távolítja el a toxikus szennyezőket a talajból, majd a talajfelszín feletti részeibe akkumulálja. Ma már nagyszámú olyan növényt tartanak számon, mely képes a talaj arzén szennyezettségének csökkentésére. Fitoremediációra alkalmas növény fajok közé elsősorban olyan növények sorolhatók, melyek a talajfelszín feletti szerveikben jelentős mennyiségű talajszennyezőt képesek felhalmozni (Mahimairaja et al., 2005). Ma et al. (2001) megállapították, hogy a *Pteris vitatta* könnyen felveszi az arzént a talajból, és száraztömegre vonatkoztatva akár 23000 mg kg⁻¹ arzén akkumulációjára is képes, így alkalmas ilyen jellegű szennyezettségnek kitett területek fitoremediációjára. Tu et al. (2004) laboratóriumi körülmények között végzett kísérletük során megerősítették a páfrány (*Pteris vitatta*) fitoremediációban történő alkalmazhatóságát. Low és Lee (1990) hidroponikus körülmények között végzett kísérletük során kapott eredményekre alapozva az arzénnal szennyezett területek fitoremediációja során alkalmazható növényfajok közé sorolta a vízi jácintot (*Eichhornia crassipes* (Mart) Solms) is.

Több kutató is arról számolt be, hogy az arzénnal szennyezett talajhoz a fitoremediációs időszak alatt érdemes P-t adagolni, hiszen a P javíthatja a folyamat hatékonyságát azáltal, hogy egyrészt elősegíti a növények növekedését, másrészt fokozza az arzén felvételét. A tudomány mai állása szerint még nem teljesen tisztázott, hogy a P adagolása az ilyen területeken valóban növeli-e a fitoremediáció hatékonyságát. Low és Lee (1990) szerint, a talajban nagyobb mennyiségben jelenlévő foszfor gátolja az arzenát felvételét, annak köszönhetően, hogy a foszfát és az arzenát felvételében szerepet játszó transzporterek négyszer nagyobb affinitást mutatnak a foszfát felé, mint az arzenát iránt.

2.12. Az arzén hatása az emberi szervezetre

Az arzén megítélését a történelem során kettősség jellemezte. Habár mérgező hatása már évezredek óta ismert, ennek ellenére a különböző arzén vegyületeket gyógyászati

célra is felhasználták. Hippokratész már alkalmazta az arzént fekélybetegség kezelésére (Hughes et al., 2011), rendszeres gyógyászati célú használatát Paracelsus svájci származású orvos kezdte meg. A későbbiek során számos más orvos is használta gyógyszerként (Frith, 2013). Thomas Fowler kis mennyiségben arzént tartalmazó oldatot alkalmazott a malária gyógyítására, melynek használata a későbbiek során bevett szokás volt pikkelysömör, vérszegénység, reuma, tuberkulózis, valamint szifilisz kezelése esetén is (Scheindlin, 2005). Volt idő, amikor az arzént az egészség megőrzésének érdekében rendszeresen szedték, illetve felhasználták a hagyományos kínai orvoslásban is (Cullen et al., 2008). Az arzén felhasználása a régi időkben azonban nem csak gyógyászati célú volt. A különböző arzén vegyületeket az iparban többek között fakonzerválásra használták. Mérgező hatásának köszönhetően gyomirtó és rovarölő szerként is alkalmazták (Zhao et al., 2009). Az arzénnal történő mérgezés hatékony eszköznél bizonyult a nem kívánatos személyek likvidálására is. A korabeli leírások alapján több uralkodó halála is összefüggésbe hozható az arzénnal, innen ered a „Mérgek királya, királyok mérge” elnevezés is (Vahidnia et al., 2007). Hazánkban 1911 és 1929 között történtek a legnagyobb port kavaró, arzénnal végzett gyilkosságok, melyek a „tiszazugi gyilkosságok” néven híresültek el. Miután Nagyrév bábaasszonya felfedezte, hogy a légyfogó papírt vízbe áztatva arzén tartalmú oldatot lehet nyerni – mely alkalmas az élőlények elpusztítására – több asszony is e módszer segítségével mérgezte meg rokonait (Fülöp et al., 2014), hiszen az arzén színtelen, szagtalan és egészen a Marsh-próba bevezetéséig kimutathatatlan, kis mennyiségben is mérgező anyag (Prokisch, 2010). Az arzént az áldozatok ételébe, italába keverték, így okozva nem kedvelt rokonaik halálát (Fülöp et al., 2014). Az arzén az emberi szerevetbe ma is elsősorban élelmiszerrel, illetve ivóvízzel kerülhet (Azizur et al., 2008). Az Európai Élelmiszerbiztonsági Hatóság (EFSA) tanulmánya alapján az ivóvízen túl, a különböző gabonafélék, a kávé, a sör, a rizs, a halak, valamint a zöldségek is hozzájárulnak a fogyasztók arzén terheléséhez (5. ábra).



5. ábra: A fogyasztók arzén terhelése az élelmiszerláncon keresztül
(Brandstetter et al., 2000)

Ipari felhasználásának köszönhetően belégzéssel, valamint bőrön keresztül történő felszívódással is szervezetünkbe juthat, ennek mértéke azonban elhanyagolható (Hong et al., 2014).

Az arzén magas koncentrációban bizonyítottan rákkeltő, máj-, tüdő-, hólyag- és bőrdaganatot idéz elő (Nriagu et al., 2007). A mérgezés tünetei azonban az arzén szervezetbe jutott mennyiségétől függően különbözőek lehetnek. Akut mérgezés esetén a tünetek gyomorrontásra emlékeztetőek: gyomorfájdalom, hányás, hidegrázás, gyengeség érzet, hasmenés. A krónikus arzén mérgezés első tünetei a bőrön jelentkeznek, először világos, majd sötét foltok jelennek meg elsősorban a végtagok bőrfelületén. Az így kialakuló tünetegyüttest az alsó végtagokon jelentkező fekélyes fekete sebek miatt „fekete láb” betegségnek is nevezik. A krónikus mérgezés tünetei főként olyan területeken jelentkeznek, ahol a lakosság magas arzén tartalmú vizet kénytelen fogyasztani. Az arzén leginkább a szaruképletekben (haj, bőr, köröm) akkumulálódik (Prokisch, 2010).

A szervezet napi arzén bevétele nagyban függ az elfogyasztott élelmiszerrel. A világ több részéről jelentettek már arzénnal szennyezett élelmiszert, ilyen élelmiszerek közé tartozott többek közt a szójaszószt (Japán), a tejpor (Japán), valamint az italok közül a bor (Anglia, Németország) is (Mandal és Suzuki, 2002). Az emberi test arzén-tartalma habár a korral együtt nő, nem haladja meg a 3-4 mg-ot. A szervezetbe kerülő arzén egy

része a vizelettel kiürül. A vizelet arzén-tartalma 5 és 40 $\mu\text{g nap}^{-1}$ között normálisnak tekinthető, azonban akut, illetve szubakut mérgezés esetén ez az érték meghaladhatja a 100 $\mu\text{g nap}^{-1}$ -ot (Arnold et al., 1990). Az emberi szervezetben elsősorban az anionos, illetve oldható formában jelenlévő arzén specieszek képesek felszívódni (Mandal és Suzuki, 2002). Az emberi szervezetre nézve az As(III) mintegy 60-szor toxikusabb, mint az As(V), a szervesetlen arzénformákhoz viszonyítva pedig a metilezett származékok kevésbé tekinthetők toxikusnak (Varsányi, 1990). 1988 és 2011 között – a WHO által közölt adatok értelmében – az ideiglenesen megállapított tolerálható heti beviteli értéket (PTWI) szervesetlen arzén esetén 0,015 mg/testtömeg-kilogramm/hét (mg/ttkg/hét) volt. A szervesetlen arzénvegyületek már ennél kisebb mennyiségben is megnövelik a daganatos megbetegedések kialakulásának kockázatát, ezért a FAO és a WHO által felállított szakértői bizottság 2011-ben kiadott értékelésében a korábban megállapított határértéket már nem tartja helyénvalónak, hiszen a rákkeltő anyagokat illetően az esetek többségében még biztonságosnak nevezhető beviteli érték sem adható meg. Az egészségügyi kockázat megítélésére ilyen anyagok esetén az úgynevezett benchmark dózis (BMDL_{0,5}) megközelítést használják. A BMDL_{0,5} érték tulajdonképpen azt a legkisebb karcinogén dózist jelöli, amely a kísérleti állatok 0,5%-ában 95%-os valószínűséggel tumort idéz elő. A WHO 2011-ben kiadott értékelésében BMDL_{0,5} értéket adott meg az arzénra a következőekben ismertetettek szerint: a tüdőt érintő rosszindulatú daganatos megbetegedés esetén 3 $\mu\text{g/ttkg/nap}$, hólyagdaganat esetén 5,2 $\mu\text{g/ttkg/nap}$, a bőrrákot illetően pedig 5,4 $\mu\text{g/ttkg/nap}$ a BMDL_{0,5} értéket. Az élelmiszerek arzén tartalmára vonatkozóan az élelmiszerek vegyi szennyezettségének megengedhető mértékéről szóló 17/1999. (VI. 16.) EüM rendelet rögzítette az egyes határértékeket. Az említett rendelet azonban a WHO által közölt adatok értelmében, 2011-ben hatályát veszítette, így az élelmiszerek esetén nincs maximálisan megengedhető arzén-tartalom. A növények emberi fogyasztásra alkalmas részeiben ritkán akkumulálódik oly mértékben arzén, hogy annak elfogyasztása veszélyt jelentene (MacPheel, 1960). A takarmányok arzén-tartalma a Magyar Takarmánykódex kötelező előírásairól szóló 44/2003. (IV. 26.) FVM rendelet értelmében 12 %-os nedvességtartalmú takarmányra vonatkozóan 2 mg kg^{-1} lehet. Habár annak a valószínűsége, hogy az arzén a takarmányból bekerülne az állati termékekbe kicsi, azonban nem kizárható.

3. ANYAG ÉS MÓDSZER

3.1. Tápoldatos kísérlet

A növények nevelésére a Debreceni Egyetem Mezőgazdaság-, Élelmiszertudományi és Környezetgazdálkodási Kar Növénytudományi Intézet Növényteni és Növényélettani Csoport Klímaszobájában került sor, ahol a kísérlet során a környezeti feltételek szabályozottak voltak: a fényintenzitás $300 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, a megvilágítás/sötét periódus 16 óra/8 óra, a hőmérséklet periodicitása 25/20°C (nappal/éjjel), a relatív páratartalom (RH) 65-75%.

Tápoldatos kísérletben tesztnövényként kukoricát (*Zea mays* L. cv. DKC 5007), valamint napraforgót (*Helianthus annuus* L. cv. P63LE13) használtam, az egy-, illetve kétszikű növények eltérő tápanyag-felvételi mechanizmusa miatt. Választásom azért esett továbbá a napraforgóra, illetve kukoricára, mert e növények gazdasági, valamint humánélelmezésbeli szerepe egyaránt jelentős.

Az arzént nátrium-arzenit (NaAsO_2) és kálium-dihidrogén-arzenát (KH_2AsO_4) formájában alkalmaztam, mely során a szükséges koncentrációt arzénra vonatkoztatva számoltam ki. A kísérlet során mind arzenit, mind arzenát esetében az alkalmazott kezelések a következők voltak: 0, 1, 3, 10, 30 és 90 mg kg⁻¹. Az ismétlések száma mindkét arzénforma esetén egyaránt 3 volt.

A kísérlet kezdetén a csávázószer eltávolításának érdekében a kukorica és napraforgó magvakat csapvízzel mostam, majd a magvak felületének fertőtlenítését 5X-ös hígítású cc. H_2O_2 oldatban 20 percen át tartó áztatás segítségével végeztem. A fertőtlenített magvakat desztillált vízzel többször átöblítettem, majd a kukorica magvakat a szemek duzzadása, valamint az egyenletesebb csírázás érdekében 2 órán keresztül 0,1 M-os CaSO_4 -oldatban áztattam. A magvak csíráztatását nedves szűrőpapír közé helyezve végeztem oly módon, hogy a csíranövények polaritása természetes legyen.

A 2,5-3,0 cm koleoptillal rendelkező csíranövényeket hidropónikus körülmények között, 1,7 L űrtartalmú edényekben neveltem (Lévai és Kovács, 2001). Egy-egy edénybe 4 növényt helyeztem, oly módon, hogy a növényeket az edénybe sterilizált szivacs segítségével rögzítettem. Egyszikű növény nevelésére a következő összetételű tápoldatot alkalmaztam: 2,0 mM $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$, 0,7 mM K_2SO_4 , 0,5 mM MgSO_4 , 0,1 mM KH_2PO_4 , 0,1 mM KCl , 1 μM MnSO_4 , 1 μM ZnSO_4 , 0,2 μM CuSO_4 , 0,01 μM $(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24}$, 1 μM H_3BO_3 .

A kétszikű növény tápoldatának az összetétele a következő volt: 2,0 mM $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$, 0,7 mM K_2SO_4 , 0,5 mM MgSO_4 , 0,1 mM KH_2PO_4 , 0,1 mM KCl , 1 μM MnSO_4 , 1 μM ZnSO_4 , 0,2 μM CuSO_4 , 0,01 μM $(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24}$, 10 μM H_3BO_3 . A növények a vasat 10^{-4} M Fe-EDTA formájában kapták (Cakmak és Marschner, 1990).

A tápoldatok levegőztetése folyamatosan biztosított volt, azok cseréjét hetente 2 alkalommal végeztem. Az edényeket a klímaszobában véletlen blokk elrendezésben helyeztem el (6. ábra).



6. ábra: Napraforgó és kukorica csíranövények nevelése tápoldaton
(Forrás: Saját)

A hidropónikus körülmények közt végzett kísérlet során a kukorica csíranövényeket 14 napig, a napraforgó csíranövényeket pedig 21 napig neveltem.

A kísérlet befejeztével a növények gyökereit 0,1 M HCl oldattal mostam, majd desztillált víz segítségével öblítettem. A teszt növényeket gyökér, valamint hajtás részre bontva Memmert UF 75 típusú szárítószekrényben 65°C-on tömegállandóságig szárítottam.

3.2. Rizoboxos kísérlet

A rizoboxos kísérlet során a növények nevelését szintén a Debreceni Egyetem Mezőgazdaság-Élelmiszertudományi és Környezetgazdálkodási Kar Növénytudományi Intézet Növénytani és Növényélettani Csoport Klímaszobájában végeztem a tápoldatos kísérlet leírásánál ismertetett környezeti feltételek mellett.

A rizoboxos kísérlet során ugyancsak kukorica (*Zea mays* L. cv. DKC 5007), valamint napraforgó (*Helianthus annuus* L. cv. P63LE13) csíranövényt használtam.

A kísérlet kivitelezéséhez a Debreceni Egyetem Látóképi Kísérleti Telepről származó mészlepedékes csernozjom talajt használtam fel, mely jellemzőit az 1. táblázat tartalmazza.

1. táblázat: A kísérletben alkalmazott mészlepedékes csernozjom talaj jellemzői

Mélység	0-0,3 m
pH (KCl)	5,71
pH (H ₂ O)	6,58
Arany-féle kötöttség (K _A)	43
CaCO ₃	0,202%
Humusz	3,54%
AL-oldható P ₂ O ₅	199 mg kg ⁻¹
AL-oldható K ₂ O	451 mg kg ⁻¹
KCL-oldható NO ₃ -N+NO ₂ -N	8,04 mg kg ⁻¹
AL-oldható Na	332 mg kg ⁻¹
KCl-oldható Mg	176 mg kg ⁻¹
KCl-oldható SO ₄ ²⁻ -S	6,04 mg kg ⁻¹
KCl-EDTA-oldható Cu	5,79 mg kg ⁻¹
KCl-EDTA-oldható Zn	7,9 mg kg ⁻¹
KCL-EDTA-oldható Mn	262 mg kg ⁻¹
Vízoldható összes só	0,015%

A talajt a kísérlet kivitelezéséhez tömegállandóságig szárítottam, majd talajdaráló segítségével daráltam. Ezt követően a szántóföldi vízkapacitás 60%-ának megfelelő ioncserélt vízzel, illetve a kezeléseknek megfelelő koncentrációjú nárium-arzenit (NaAsO₂), valamint kálium-dihidrogén-arzenát (KH₂AsO₄) oldattal nedvesítettem, mely során a szükséges koncentrációt arzénra nézve, illetve a talajra vonatkoztatva számoltam ki. A kísérletben 1, 3, 10, 30 és 90 mg kg⁻¹, továbbá kontroll kezelést alkalmaztam. A talaj bekeverése során kiemelt figyelmet fordítottam a homogenításra, így kézzel történő folyamatos keverés mellett, az arzén tartalmú oldatokat spray szórófejjel ellátott adagoló segítségével juttattam a talajra. Kiegészítő NPK-műtrágyázást nem alkalmaztam.

A kísérlet kezdetén a magvak csíráztatását a hidropónikus körülmények között végzett kísérlet esetén ismertettekkel megegyező módon végeztem. A 2,5-3,0 cm koleoptillal rendelkező csíranövényeket 23,5 cm x 10 cm x 1 cm dimenziójú úgynevezett rizoboxokban neveltem. A rizobox egy műanyagból készült, téglalap alakú, egyik oldalán átlátszó növénynevelő doboz, mely lehetővé teszi a rizoszféra tanulmányozását. Az egyes rizoboxokba ioncserélt vízzel benedvesített szűrőpapírt helyeztem, ezáltal biztosítva a növények számára az egyenletes vízfelvételt, majd a megfelelően

előkészített talajt a rizoboxokba tettem. Ezt követően egy-egy rizoboxba 3-3 db csíranövényt helyeztem. Az ismétlések száma mindkét kezelési forma esetén 5 volt.

A csíranövények talajba történő helyezését követően a rizoboxok átlátszó oldalát fekete fóliával borítottam be. A növényeket geotrópusan stimuláltam, – azaz 45°-os szögben megdöntve helyeztem el egy speciális boxtartó keretben – ,melynek következtében a gyökerek a nevelőbox fala mentén növekedtek, lehetővé téve ezáltal a gyökerek növekedésének nyomon követését (7. ábra).



*7. ábra: Napraforgó és kukorica csíranövények nevelése rizoboxban
(Forrás: Saját)*

A gyökernövekedést, valamint az egyes rizoboxok tömegét naponta mértem és a transpiráció, valamint az evaporáció következtében leadott víz mennyiségét tömegkiegészítés alapján pótoltam. A kísérlet lezárására, valamint a növényi mintavételre akkor került sor, amikor valamely kezelési szintnél a növények gyökere elérte a box alját, kukorica esetén ez az ültetést követő 6., míg napraforgónál az 5. napon következett be. A kísérlet befejezésekor a növények gyökereit 0,1 M-os HCl oldattal, valamint ioncserélt vízzel mostam, majd a növényeket hajtás és gyökér részre szétválasztva 65°C-on szárítószekrényben tömegállandóságig szárítottam.

3.3. Tenyészedényes kísérlet

A Debreceni Egyetem Mezőgazdaság-, Élelmiszertudományi és Környezetgazdálkodási Kar Agrokémiai és Talajtani Intézet Tenyészházában 2016. április-június között tenyészedényes kísérletet állítottam be.

A tenyészedényes kísérlet során tesztnövényként zöldborsót (*Pisum sativum* L.) választottam. Döntésemet az indokolta, hogy a hazai zöldségtermesztő terület több mint

70%-a az arzénal szennyezett talajvízzel érintett Alföld térségében található. Választásomat erősítette, hogy hazánkban a zöldségfajok közül a zöldborsót termesztik a legnagyobb területen. A kísérletemben használt Avola borsó a zöldborsók közül az egyik legkedveltebb fajta, mely a konzerv- és hűtőipari felhasználásra való alkalmasságnak köszönhető. Az Avola borsó korai érésű velő típusú fajta, mely a rövid tenyészidőből adódóan könnyen beilleszthető a tenyészházi körülmények között végzett kísérletbe.

A kísérletet a Debreceni Egyetem Mezőgazdaság-, Élelmiszertudományi és Környezetgazdálkodási Kar Látóképi Kísérleti Telepről származó mészlepedékes csernozjom talajon állítottam be. A Látóképi Kísérleti Telep a Hajdúsági löszháton terül el, mely a borsó jelzőnövényt végzett tenyésztedényes kísérlet szempontjából kiemelkedő jelentőségű, hiszen a borsó számára legmegfelelőbb talajtípus a löszön kialakult meszes vagy mészlepedékes csernozjom talaj. A kísérlet során alkalmazott talaj jellemzői már korábban, az *1. táblázatban* bemutatásra kerültek.

A kísérletben alkalmazott talaj nitrogénnel (25 kg t^{-1}) és foszforral (15 kg t^{-1}) jól, káliummal (20 kg t^{-1}) igen jól ellátott. A kísérleti talajok N-, P- és K-tápanyag-ellátottsági kategóriába sorolásakor a hazai műtrágyázási gyakorlatban alkalmazott MÉM NAK irányelveket vettem alapul (Antal et al., 1979). A kísérleti talaj tápanyag-ellátottságát, a zöldborsó fajlagos tápanyagigényét, valamint a tervezett termésátlagot figyelembe véve számoltam ki az NPK műtrágyák adagjait. A műtrágyázás során a nitrogént NH_4NO_3 ($0,568 \text{ g edény}^{-1}$), a foszfort KH_2PO_4 ($0,229 \text{ g edény}^{-1}$), a káliumot pedig KH_2PO_4 ($0,079 \text{ g edény}^{-1}$), illetve K_2SO_4 ($0,148 \text{ g edény}^{-1}$) formájában juttattam a talajba edényenként 100 cm^3 desztillált vizes oldat formájában.

Az arzént kálium-dihidrogén-arzenát (KH_2AsO_4), valamint nátrium-arzenit (NaAsO_2) formájában ioncserélt vízben feloldva juttattam a talajra, mely során a szükséges koncentrációt arzénra nézve, illetve talajra vonatkoztatva számoltam ki. A kísérletben 3, 10, 30, 90, 270 mg kg^{-1} , továbbá kontroll kezelést alkalmaztam, arzénformánként 3 ismétlésben. A növekvő koncentrációjú arzén-kezelések a "szennyezetlen", illetve az arzénal egyre nagyobb mértékben szennyezett, a növények számára már toxikusnak tartott dózist hivatottak prezentálni.

A kísérlet során a tenyésztedényekbe $11\text{-}11 \text{ kg}$ légszáraz, $1 \times 1 \text{ cm}$ lyukátmérőjű szitán átszitált talajt mértem be. A műtrágyákat, valamint az arzenitet, illetve az arzenátot alapos keverés mellett oldat formájában ($100\text{-}100 \text{ cm}^3 \text{ edény}^{-1}$) adagoltam, kiemelt figyelmet fordítva a homogenizálásra. A növekvő koncentrációjú arzénoldatok,

valamint műtrágyák talajba keverését (2016.04.05.) követően, 1 hét múlva vetettem el a tesztnövényként alkalmazott zöldborsót. A vetésre 2016.04.12-én került sor, mely során edényenként 25-25 db borsószemet vetettem el az alábbiakban ismertetett módon. A talaj 200 cm^3 desztillált vízzel való beöntözését, illetve a talajfelszín fellazítását követően az egyes borsószemek vetése megközelítőleg 3-4 cm mélységre történt. A vetést a tápközeg felszínének tömörítése követte. Az egyes edényeket kocsikon helyeztem (8. ábra) el véletlen blokk elrendezésben, így lehetőségem volt éjszaka, illetve eső esetén tető alá tolni.



8. ábra: Tenyészedények elhelyezése a kocsikon
(Forrás: Saját)

A vetőmag kelését követően a növények számát edényenként 16 db-ra ritkítottam. A kísérlet kezdetén megállapítottam a talaj maximális szántóföldi vízkapacitását, mely az a vízmennyiség, amit az átnedvesített talaj a gravitáció és a szárazabb talajrétegek szívóhatásával szemben képes visszatartani. A talaj nedvességtartalmát a maximális szántóföldi vízkapacitás 60%-ára állítottam be. Az evaporáció (vízpárolgás), valamint a transzspiráció (a növény szabályozott vízleadása) következtében fellépő vízvesztéséget naponta pótoltam, tömeg-kiegészítés alapján.

A tenyészedényes kísérlet felszámolására a borsó fejlődésének négy különböző fenofázisában (4 nóduszos állapot, virágzás kezdete, zöldérés, teljesérés) szakaszosan került sor. A kísérlet főbb munkaműveleteinek időpontját a 2. táblázat tartalmazza.

2. táblázat: A tenyészedényes kísérlet főbb munkaműveleteinek időpontjai

Talaj bekeverése	április 5.
Talajmintavétel	április 12.
Zöldborsó vetése	április 12.
I. Fenofázis (4 nóduszos állapot)	május 11.
II. Fenofázis (virágzás kezdete)	május 24.
III. Fenofázis (zöldérés)	június 6.
IV. Fenofázis (teljesérés)	június 13.

Az egyes fenofázisokban tenyészedényenként 4-4 db növényt számoltam fel oly módon, hogy a növények talajból történő eltávolítását óvatosan, a gyökerek épségére vigyázva végeztem. A gyökérről a talajrészecskéket folyó csapvíz alatt mostam le, majd desztillált vízzel öblítettem. A növényeket olló segítségével gyökér, szár, levél, hüvely, illetve borsószem részre szétválasztva, Memmert UF 75 típusú szárítószekrényben 65°C-on tömegállandóságig szárítottam.

3.4. Alkalmazott mintaelőkészítési és mérési módszerek

A növények szárazanyag-produktumának meghatározását, valamint a mintaelőkészítést és az analitikai vizsgálatokat a Debreceni Egyetem Mezőgazdaság-, Élelmiszertudományi és Környezetgazdálkodási Kar Élelmiszertudományi Intézetében végeztem el.

3.4.1. Szárazanyag-tartalom meghatározása

Munkám során hidropónikus körülmények között, valamint a rizoboxban nevelt kukorica, illetve napraforgó hajtásának és gyökerének száraztömegében bekövetkező változásokat vizsgáltam az alkalmazott arzenit-, illetve arzenát-kezelések függvényében. Vizsgálataim tárgyát képezte továbbá a tenyészedényben nevelt zöldborsó fejlődésének egyes fenofázisaiban a generatív (borsóhüvely, borsószem) és vegetatív (levél, szár, gyökér) részek szárazanyag-produktumában bekövetkező változások nyomon követése is. A szárazanyag-tartalom meghatározásához a növényi mintákat szárítószekrényben 65°C-on tömegállandóságig szárítottam, majd szobahőmérsékletre történő visszahűlésüket követően analitikai mérleg (Ohaus) segítségével négy tizedesjegy pontossággal meghatároztam azok száraztömegét.

3.4.2. Talaj vizsgálatok

A talajminták „oldható” és „összes” arzén-tartalmának meghatározását mind a rizoboxos, mind a tenyészedényes kísérletből származó talajminták esetén elvégeztem.

A tenyészedényes kísérlet esetén a talajminta vételezésére a zöldborsó vetéssel megegyező napon, azaz a talaj bekeverését követő 1 hét múlva került sor. A mintavétel során egy-egy tenyészedényből 3-3 pontmintát vettem.

A rizoboxos kísérlet esetén a talaj bekeverése kezelésként egy-egy külön edényben történt, majd az egyes edényekből a kezeléseknak megfelelően rizoboxokba helyeztem a talajt, mellyel egyidejűleg edényenként 3-3 talajminta vételezésére került sor.

3.4.2.1. A talaj „oldható” As-tartalma

A talajminták növény számára hozzáférhető arzén-tartalmának megállapítását, az egyes edényekből vett pontminták alapos homogenizálását, valamint szárítását követően a Lakanen-Erviö (1971) által kidolgozott módszerrel végeztem az alábbiaknak megfelelően. A vizsgálat során 1,5 g talajmintát mértem be szcintillációs edénybe, majd 1,5 cm³ hígított kivonó-oldatot (0,5 M ammónium-acetát + 0,5 M ecetsav + 0,02 M H₄EDTA, pH=4,65) adtam hozzá. A szcintillációs edényeket rázógépbe helyezve 60 percen keresztül rázattam. A mintaoldatokat Munktell Ahlstrom szűrőpapír segítségével szűrtem. A talajminták előkészítésével párhuzamosan vakpróbák készítésére is sor került. A szűrletek arzén-tartalmát ICP-MS készülék segítségével határoztuk meg a „3.5.2. Az ICP-MS készülék bemutatása” című pontban leírtak szerint.

3.4.2.2. A talaj „összes” As-tartalma

A talajminták „összes” arzén-tartalmának meghatározása során a megfelelően előkészített (szárított, homogenizált) mintából 1 g-ot mértem be 25x420 mm-es, 50 ml-re és 100 ml-re kalibrált hőálló roncsoló csövekbe, majd 5 cm³ cc. HNO₃-at adtam hozzá. Másnap a roncsoló csöveket LABOR MIM OE-718/A típusú elektromos blokkroncsoló készülék fűtőegységébe tettem, melybe egy alkalommal maximum 50 db roncsoló csövet lehet elhelyezni. A mintákat 60°C-on tartottam 30 percen keresztül, majd 5 cm³ 30%-os H₂O₂ adtam a mintaoldatokhoz, ezt követően a főroncsolás 120°C-on 270 percen keresztül zajlott. A roncsolmányt a szobahőmérsékletre történő lehűlése után 50 cm³-re egészítettük ki kétszer desztillált vízzel, majd Filtrak 388-as szűrőpapír segítségével szűrtem (Kovács et al., 2000). A minták feltárásával egyidejűleg vakpróbákat is készítettem. A mintaoldatok elemtartalmát ICP-MS, valamint ICP-OES technikák segítségével határoztuk meg. A készülékek, illetve a mérési módszerek részletes ismertetésére a későbbiekben kerül sor.

3.4.3. Növényi minták vizsgálata

A tömegállandóságig szárított növényi mintákat dörzsmozsár segítségével homogenizáltam, majd a Kovács et al. (1996) által kidolgozott HNO₃-H₂O₂-os nedves roncsolásos mintaelőkészítési módszert alkalmaztam. Azokban az esetekben, amikor nem állt rendelkezésünkre megfelelő mintamennyiség, a megfelelően előkészített mintákból 0,1 g (±0,001 g) mennyiséget mértem be hőálló kémcsövekbe. A mintákhoz 1 cm³ HNO₃-at (65 m/m%, Scharlau Chemie, Spanyolország) adtam majd egy éjszakát

állni hagytam. Másnap a kémcsöveket LABOR MIM OE-718/A típusú elektromos blokkroncsoló készülék fűtőegységébe helyeztem, melynek segítségével 30°C-on tartottam 60 percen keresztül. A mintaoldatokhoz ezt követően 0,3 cm³ 30%-os H₂O₂-ot (Darmstadt, Merck, Németország) adagoltam, majd ezt követően a főroncsolás 120°C-on 90 percig zajlott. A roncsolt mintákat, szobahőmérsékletre történő visszahűlésüket követően, 10 cm³-re egészítettem ki 18,2 MΩ cm ellenállású ioncserélt vízzel, majd Filtrak 388 típusú szűrőpapír segítségével szűrtem. A minták feltárásával párhuzamosan vakpróbákat is készítettem. A növényi minták elemanalízisét ICP-OES és ICP-MS készülékek segítségével végeztük. A készülékeket, valamint a mérési módszereket a „3.5. Elemanalitikai vizsgálatok során alkalmazott készülékek bemutatása” című pontban részletesen ismertetem.

Munkám során az egyes növényi részek szárazanyag-produktumát figyelembe véve meghatároztam azt is, hogy egy adott növény mennyi arzént vont ki a tápoldatból/talajból.

Az értékek meghatározásához az alábbi képletet használtam:

$$\begin{aligned} & \text{növény által felvett As mennyiség (mg növény}^{-1}) = \\ & \text{növény száraz tömege (mg növény}^{-1}) * \text{növény As koncentrációja (mg kg}^{-1}) \end{aligned}$$

3.5. Elemanalitikai vizsgálatok során alkalmazott készülékek bemutatása

3.5.1. Az ICP-OES készülék bemutatása



9. ábra: ICP-OES készülék
(Forrás: Saját)

Az elemanalitikai meghatározásokhoz iCAP 6300 Dual (Thermo Fisher Scientific) típusú induktív csatolású plazma optikai emissziós spektrométert (ICP-OES) alkalmaztam (9. ábra). A készülék mérési elvének rövid összefoglalása: a mintaoldatot porlasztással aeroszollá alakítva gázárammal jutnak az induktív csatolású plazmába, amelyben a minta komponensei elpárolognak, atomizálódnak, a keletkező szabad atomok és ionok gerjesztődnek, majd az egyes elemekre jellemző frekvenciájú fotonokat bocsájtják ki. A plazma fényemisszióját optikailag felbontva, az elemek adott hullámhosszúságú vonalának intenzitását mérjük.

Az ICP-OES készülék paramétereit és beállítási értékeit a 3. táblázat tartalmazza.

3. táblázat: Az ICP-OES készülék mérési paramétereit

RF kicsatolt teljesítmény	1350 W
RF generátor	27 MHz
Hűtőgáz áramlási sebesség	12 dm ³ min ⁻¹
Segédgáz áramlási sebesség	1 dm ³ min ⁻¹
Porlasztógáz áramlási sebesség	1 dm ³ min ⁻¹
Mintaáramlási sebesség	1,6 cm ³ min ⁻¹
Detektor	CID szilárd test detektor
Optikai rendszer	Echelle elrendezésű
Porlasztó típusa	koncentrikus
Hullámhossz tartomány	166-847 nm

3.5.2. Az ICP-MS készülék bemutatása



10. ábra: ICP-MS készülék
(Forrás: Saját)

Az analitikai meghatározásokhoz Thermo Scientific X-Series 2 kvadrupol típusú induktív csatolású plazma tömegspektrométert (ICP-MS) alkalmaztunk (10. ábra). Az induktív csatolású plazma tömegspektrometriás módszer elve a következő: az induktív csatolású plazmába (ICP) bevitt oldatmintában lévő elemekből a plazma hőmérsékletén (6000-8000 K) szabad atomok, illetve termikus ionizációval (elemi minőségtől

függő mértékben) ionok keletkeznek, melyek – a tömegspektrométerbe (MS) vezetve – tömeg/töltés (m/z) hányados szerint időben elválasztva kerülnek detektálásra. Az ICP-MS készülék esetén a kis koncentrációk analízise során fellépő zavaró hatások kiküszöbölésére úgynevezett ütközési cellás (CCT) (7% H₂+93% He) mérési módszert alkalmaztunk. A vizsgálatok során belső standard alkalmazására is szükség volt, a nem spektrális zavaró hatások kiküszöbölésének érdekében. A belső standard olyan elemet vagy elemeket jelent, melyeknek a mintában való előfordulási valószínűsége csekély. Az általunk belső standardként alkalmazott elemek az In, a Rh és a Te voltak (100 µg/L).

A készülék mérési paramétereit a 4. táblázatban ismertetem.

4. táblázat: Az ICP-MS készülék mérési paraméterei

RF kicsatolt teljesítmény	1400 W
Plazmagáz áramlási sebesség	13 dm ³ min ⁻¹
Porlasztógáz áramlási sebesség	0,84 dm ³ min ⁻¹
Segédgáz áramlási sebesség	1,1 dm ³ min ⁻¹
Mintaáramlási sebesség	0,87 cm ³ min ⁻¹
Pole Bias*	-10 V
Hexapole Bias*	-7 V
Extrakció	-149 V
Fókusz	0 V
Analóg detektor	1850 V
PC detektor	2170 V
CCT gáz (H₂:He) áramlási sebesség (7% H₂+93% He)	7 cm ³ min ⁻¹
Integrációs idő	0,1 s
Stabilizációs idő	40 s
Mintaszállító pumpa típusa	narancssárga

3.6. Statisztikai módszer

A kísérleti adatok feldolgozását, valamint rendezését Microsoft Excel 2013 programmal végeztem. Az eredmények statisztikai elemzéséhez az SPSS 22.0 statisztikai programot alkalmaztam. A paraméterek és az egyes tényezők közötti összefüggés statisztikai vizsgálatához egytényezős varianciaanalízist és Duncan-féle tesztet használtam. 5%-os P-érték alatt tekintettem az eltéréseket szignifikánsnak. Az azonos szinten, de eltérő formában történő arzén-kezelés hatásának összehasonlítására két mintás T-próbát használtam (*p<0,05; **p<0,01; ***p<0,001).

4. EREDMÉNYEK ÉS ÉRTÉKELÉSÜK

4.1. A TÁPOLDATOS KÍSÉRLET EREDMÉNYEI

4.1.1. Kukorica teszt növényekkel végzett tápoldatos kísérlet eredményei

4.1.1.1. Növekvő koncentrációjú As(III)- és As(V)-kezelések hatása a tápoldaton nevelt kukorica csíranövények szárazanyag-termékumára

A teszt növényként alkalmazott kukorica csíranövény szárazanyag-termékumában bekövetkező változásokat, a növekvő koncentrációjú As(III)- és As(V)-kezelések függvényében az 5. táblázat foglalja össze.

5. táblázat: Tápoldaton nevelt kukorica csíranövények szárazanyag-termékumában (g növény^{-1}) bekövetkező változások a növekvő koncentrációjú (0, 1, 3, 10 és 30 mg kg^{-1}) As(III)- és As(V)-kezelések függvényében ($n=12 \pm \text{s.e.}$)

As- kezelés (mg kg^{-1})	Kukorica csíranövény szárazanyag-termékuma (g növény^{-1})			
	Hajtás	Gyökér		
	As(III)	As(V)	As(III)	As(V)
0	0,3028 $\pm$ 0,0666 ^a	0,3028 $\pm$ 0,0666 ^a	0,0964 $\pm$ 0,0227 ^a	0,0964 $\pm$ 0,0227 ^a
1	0,2497 $\pm$ 0,0353 ^b	0,2801 $\pm$ 0,0805 ^a	0,0522 $\pm$ 0,0175 ^b	0,0655 $\pm$ 0,0207 ^b
3	0,0752 $\pm$ 0,0209 ^c	0,0724 $\pm$ 0,0192 ^b	0,0506 $\pm$ 0,0164 ^b	0,0370 $\pm$ 0,0112 ^c
10	0,0318 $\pm$ 0,0103 ^c	0,0399 $\pm$ 0,0134 ^b	0,0214 $\pm$ 0,0051 ^c	0,0205 $\pm$ 0,0032 ^{cd}
30	0,0296 $\pm$ 0,0086 ^c	0,0334 $\pm$ 0,0078 ^b	0,0200 $\pm$ 0,0061 ^c	0,0149 $\pm$ 0,003 ^d

Az azonos növényi rész esetén azonos betűvel jelölt kezelések között nincs szignifikáns különbség ($P \leq 0,05$). Szignifikáns különbség azonos szinten, de eltérő formában történő arzén-kezelés esetén: * $p < 0,05$; ** $p < 0,01$; *** $p < 0,001$.

A tápoldatos kísérlet során alkalmazott dózisok mindkét arzénforma esetén a következők voltak: 0, 1, 3, 10, 30 és 90 mg kg^{-1} . A fenti táblázat a 90 mg kg^{-1} -os kezelések eredményeit nem tartalmazza, mivel e dózis mind az As(III)-, mind az As(V)-kezelés esetén oly mértékben toxikusnak bizonyult, hogy a növények már a kísérlet kezdeti stádiumában kipusztultak. A többi kezelési szint esetén megállapítható, hogy az As(III)-koncentrációjának emelkedésével a kontroll növény esetén mért értékhez képest a kukorica hajtásának száraz tömege 18-90%-kal, gyökerének szárazanyag-tartalma 46-79%-kal esett vissza. Az As(V)-kezelések hatását megvizsgálva elmondható, hogy a legkisebb (1 mg kg^{-1}) alkalmazott dózis a kontrollhoz képest, szignifikáns eltérést a hajtás szárazanyag-tartalmában nem okozott, az 1 mg kg^{-1} -ot meghaladó koncentrációjú kezelések azonban statisztikailag igazolható módon, 76-89%-kal csökkentették a hajtás száraztömegét. A növekvő koncentrációjú As(V)-kezelések hatására a gyökér szárazanyag-termékuma szignifikánsan 32-85%-kal lecsökkent. Mindez hasonlóságot mutat Stoeva et al. (2005) eredményeivel, ugyanis Stoeva et al. (2005) azt tapasztalta,

hogy a tápoldat növekvő arzén-tartalmának hatására csökkent a tesztnövényként alkalmazott bab száraz tömege.

Az azonos szintű, de eltérő formájú As-kezelések hatását összevetve szignifikáns különbséget nem tudtam kimutatni (11. ábra).



11. ábra: As(III)- és As(V)-kezelés hatása a kukorica csíranövény fejlődésére
(Forrás: Saját)

4.1.1.2. Növekvő koncentrációjú As(III)- és As(V)-kezelések hatása a tápoldaton nevelt kukorica csíranövények As-tartalmára

A hidropónikus körülmények közt nevelt kukorica csíranövény As-tartamában bekövetkező változásokat, a növekvő koncentrációjú As(III)- és As(V)-kezelések függvényében a 6. táblázat összegzi.

6. táblázat: Tápoldaton nevelt kukorica csíranövény As-tartalma a növekvő koncentrációjú (0, 1, 3, 10 és 30 mg kg⁻¹) As(III)- és As(V)-kezelések függvényében (n=3±s.e.)

As-kezelés (mg kg ⁻¹)	Kukorica csíranövény As-tartalma (mg kg ⁻¹)	
	Hajtás	Gyökér
As(III)	0	0,620±0,039 ^a
	1	8,51±2,95 ^{ab}
	3	30,0±3,2 ^b
	10	125±16 ^c
	30	131±21 ^c
As(V)	0	0,620±0,039 ^a
	1	5,01±0,30 ^a
	3	25,1±4,1 ^b
	10	53,3±6,9 ^{c*}
	30	93,5±10,6 ^d

Az azonos növényi rész esetén azonos betűvel jelölt kezelések között nincs szignifikáns különbség (P≤0,05). Szignifikáns különbség azonos szinten, de eltérő formában történő arzén-kezelés esetén: *p<0,05; **p<0,01; ***p<0,001.

Az alkalmazott legkisebb (1 mg kg^{-1}) As(III)-kezelés a kontrollhoz képest sem a hajtás, sem a gyökér esetében nem okozott szignifikáns változást, az 1 mg kg^{-1} -ot meghaladó As(III)-dózisok azonban szignifikánsan növelték a kukorica csíranövény egyes részeinek As-tartalmát. Az As(V)-kezelés tekintetében hasonló tendencia volt megfigyelhető a hajtás esetén, a legalacsonyabb koncentrációjú (1 mg kg^{-1}) kezelés kivételével, valamennyi dózis szignifikáns növekedést eredményezett. A gyökér As-tartalmát statisztikailag is bizonyítható módon azonban csak a 10 és 30 mg kg^{-1} -os As(V)-kezelések fokozták, az alacsonyabb koncentrációjú dózisok a kontrollhoz viszonyítva szignifikáns változást nem okoztak. A hajtás, illetve a gyökér As-tartalmát összehasonlítva megállapítható, az As mindkét kezelési forma esetén nagyobb részt a gyökérben akkumulálódott, és csak kisebb rész volt jelen a hajtásban. Hasonló megállapításra jutott Kádár (2012), miszerint szántóföldi kísérlet esetén 0 , 30 , 90 és 270 mg kg^{-1} -os As-kezeléseket alkalmazva azt tapasztalta, hogy a 4-6 leveles állapotban lévő kukorica növény gyökerének As-tartalma, jóval nagyobb volt, mint a hajtásé. Az arzén felhalmozódása a gyökérben a toxikus hatás egyik lényeges kiváltó oka lehet, hiszen ezáltal sérülhetnek azok a gyökérben lejátszódó folyamatok, melyek a növény egészének fiziológiáját alapvetően meghatározzák. Az arzén-kezelés indukálta stressz folyamatok esetén, a növény detoxifikációs mechanizmusának részeként értelmezhető az, hogy az arzén döntően a gyökérben akkumulálódott. A fitokelatinok – melyek a toxikus fémionok kizárásában, elkülönítésében, valamint megkötésében részt vevő polipeptidek – szintézise elsőként a gyökérben kezdődik meg, hiszen ez az a növényi rész ahol az arzén a növényi felvétel során először megjelenik, illetve ahol – a kísérleti eredmények alapján – döntően akkumulálódik. A fitokelatinok termelése energiaigényes folyamat, az ilyen jellegű fémkötő polipeptidek szintézisének energia felhasználása a gyökér növekedésének rovására történik. A növekvő koncentrációjú arzén kezelések hatására a kísérletünk során tesztnövényként alkalmazott kukorica gyökerének száraztömegében bekövetkező jelentős mértékű csökkenés összefüggésbe hozható a fitokelatinok által kiváltott gyökernövekedés gátló hatásával.

A kukorica csíranövények szárazanyag-produktumát figyelembe véve, a tápoldatból kivont As mennyiségét is kiszámoltam a gyökér, a hajtás, illetve a teljes növény esetén (7. táblázat).

7. táblázat: Tápoldaton nevelt kukorica csíranövény által felvett As mennyisége a növekvő koncentrációjú (0, 1, 3, 10 és 30 mg kg⁻¹) As(III)- és As(V)-kezelések függvényében (n=3±s.e.)

Kukorica csíranövény által felvett As mennyisége				
As-kezelés (mg kg ⁻¹)	(µg)			
	Hajtás	Gyökér	Teljes növény	
As(III)	0	0,189±0,003 ^a (55)	0,152±0,002 ^a (45)	0,341
	1	1,42±0,08 ^b (40)	2,12±0,1 ^b (60)	3,54
	3	2,26±0,07 ^b (23)	7,39±0,28 ^c (77)	9,65
	10	4,05±0,17 ^c (33)	8,34±0,15 ^c (67)	12,4
	30	3,89±0,18 ^c (30)	8,96±0,39 ^c (70)	12,9
As(V)	0	0,189±0,003 ^a (55)	0,152±0,002 ^a (45)	0,341
	1	1,21±0,07 ^b (46)	1,40±0,01 ^{b*} (54)	2,61
	3	1,81±0,09 ^{bc} (32)	3,46±0,2 ^{c*} (66)	5,27
	10	2,13±0,07 ^{c*} (31)	8,20±0,21 ^d (79)	10,3
	30	3,12±0,09 ^d (23)	10,7±0,4 ^{d*} (77)	13,8

Az azonos növényi rész esetén azonos betűvel jelölt kezelések között nincs szignifikáns különbség (P≤0,05). Szignifikáns különbség azonos szinten, de eltérő formában történő arzén-kezelés esetén: *p<0,05; **p<0,01; ***p<0,001. A zárójelben feltüntetett értékek az adott növényi rész és a teljes növény által felvett As mennyiségének az arányát fejezik ki %-ban.

A tápoldathoz adott As(III)-, illetve As(V)-dózisok a kontrollhoz képest mind a hajtás által kivont, mind a gyökér által felvett As mennyiségét szignifikánsan megnövelték. A teljes kukorica csíranövény által kivont As mennyisége a kezelések koncentrációjának növekedésével ugyancsak fokozatosan emelkedett mindkét kezelési forma esetén. A teljes növény által felvett As mennyiségének növényi részek közötti megoszlását figyelembe véve megerősíthető az a megállapítás, mely szerint az As döntően a növények gyökerében akkumulálódik, és csak kisebb mennyiségben kerül át az egyéb növényi szervekbe, melynek oka a gyökér „szűrő” hatásában keresendő. A gyökér a növényekben ugyanis „szűrő” rendszert képez, mely megakadályozza, hogy a vizsgált csíranövények esetén a hajtásba jelentős mennyiségű As kerüljön át.

Az As(V)-kezeléseknél megfigyeltem továbbá, hogy a tápoldat As-tartalmának növekedésével tendenciálisan nőtt a gyökérben visszatartott As-aránya.

Megfigyeltem továbbá azt is, hogy a teljes növény által kivont As mennyisége az As(III)- és As(V)-kezelések koncentrációjának növekedésével folyamatosan fokozódott.

4.1.1.3. Növekvő koncentrációjú As(III)- és As(V)-kezelések hatása a tápoldaton nevelt kukorica csíranövények makroelem felvételére

A tápoldaton nevelt kukorica csíranövény Mg, P, valamint S koncentrációjában bekövetkező változásokat a 8. táblázat szemlélteti.

8. táblázat: Tápoldaton nevelt kukorica csíranövény makroelem-tartalmában (mg kg^{-1}) bekövetkező változások a növekvő koncentrációjú (0, 1, 3, 10 és 30 mg kg^{-1}) As(III)- és As(V)-kezelések függvényében ($n=3 \pm \text{s.e.}$)

As-kezelés (mg kg ⁻¹)		Kukorica csíranövény makroelem-tartalma (mg kg ⁻¹)					
		Hajtás			Gyökér		
		Mg	P	S	Mg	P	S
As(III)	0	2069±2 ^a	9999±40 ^a	2446±11 ^a	3637±179 ^a	5499±606 ^a	7237±416 ^a
	1	2420±239 ^b	8987±209 ^b	6052±204 ^b	2888±107 ^b	4692±261 ^b	6793±145 ^{ab}
	3	3572±52 ^c	7413±17 ^c	9517±47 ^c	2528±241 ^c	2813±97 ^c	6437±400 ^b
	10	2308±83 ^{ab}	6749±280 ^d	3259±43 ^d	1054±74 ^d	4123±0 ^b	3298±255 ^c
	30	1510±11 ^d	6820±250 ^d	3047±313 ^d	710±85 ^e	3002±144 ^c	2782±191 ^c
As(V)	0	2069±2 ^a	9999±40 ^a	2446±11 ^a	3637±179 ^a	5499±606 ^a	7237±416 ^a
	1	2034±60 ^a	6284±61 ^{b***}	3815±222 ^{b***}	2859±131 ^b	4485±440 ^a	5419±397 ^{bc*}
	3	2257±57 ^{b***}	5504±205 ^{c**}	6276±159 ^{c***}	2043±68 ^c	5127±398 ^{a**}	5580±598 ^c
	10	2358±112 ^b	7037±10 ^d	3671±348 ^b	1699±204 ^d	4771±296 ^a	4392±235 ^{bd}
	30	1671±146 ^c	7156±558 ^d	4529±28 ^{d*}	1602±47 ^{d**}	3445±310 ^b	4290±486 ^d

Az azonos növényi rész esetén azonos betűvel jelölt kezelések között nincs szignifikáns különbség ($P < 0,05$). Szignifikáns különbség azonos szinten, de eltérő formában történő arzén-kezelés esetén: * $p < 0,05$; ** $p < 0,01$; *** $p < 0,001$.

A kukorica csíranövények makroelem készletét az alkalmazott As(III)- és As(V)-kezelések nagyban befolyásolták, azonban amíg a vizsgált tápelemek koncentrációja a hajtás tekintetében több esetben is megnövekedett, addig a gyökér kapcsán minden esetben csökkenést tapasztaltam.

A hajtás Mg-tartalmát az 1-3 mg kg^{-1} -os As(III)-, valamint a 3-10 mg kg^{-1} -os As(V)-kezelések fokozták, azonban a legnagyobb As-dózis (30 mg kg^{-1}) mindkét esetben csökkenést eredményezett. Megfigyeltem továbbá, hogy a hajtás P-tartalma csökkent, míg S-tartalma nőtt, mind az As(III)-, mind az As(V)-dózisok esetén.

A gyökér tekintetében statisztikailag is igazolható mértékű csökkenést a következőkben ismertetett esetekben figyeltem meg. A gyökér Mg koncentrációját valamennyi As(III)-, illetve As(V)-kezelés szignifikánsan csökkentette. Az alkalmazott As(III)-kezelések mindegyike gátolta a gyökér P felvételét, az As(V)-kezelések esetén csökkenést azonban csak a legnagyobb dózis (90 mg kg^{-1}) okozott. A gyökér S-tartalmában bekövetkező változások tekintetében megállapítható, hogy az As(III)-kezelések esetén a

legkisebb dózis (1 mg kg⁻¹) kivételével valamennyi, míg az As(V)-kezelések esetén már a legkisebb dózis is szignifikáns csökkenést eredményezett.

4.1.1.4. Növekvő koncentrációjú As(III)- és As(V)-kezelések hatása a tápoldaton nevelt kukorica csíranövények mikroelem felvételére

A teszt növényként alkalmazott kukorica csíranövény mikroelem összetételében bekövetkező változásokat a 9. táblázat összesíti.

9. táblázat: Tápoldaton nevelt kukorica csíranövény mikroelem-tartalmában (mg kg⁻¹) bekövetkező változások a növekvő koncentrációjú (0, 1, 3, 10 és 30 mg kg⁻¹) As(III)- és As(V)-kezelések függvényében (n=3±s.e.)

As-kezelés (mg kg ⁻¹)		Kukorica csíranövény mikroelem-tartalma (mg kg ⁻¹)				
		Cu	Fe	Mn	Mo	Zn
Hajtás						
As(III)	0	15,6±2,3 ^a	47,6±4,9 ^{ab}	50,7±1,1 ^a	0,362±0,035 ^a	65,9±2,6 ^a
	1	10,0±0,2 ^b	42,9±5,5 ^a	52,3±3,2 ^a	0,297±0,055 ^a	51,8±3,9 ^b
	3	6,61±1,07 ^c	44,3±9,4 ^{ab}	85,2±1,6 ^b	0,874±0,003 ^b	48,3±9,1 ^{bc}
	10	3,07±0,20 ^d	70,2±11,3 ^c	7,52±1,2 ^c	0,463±0,024 ^c	39,7±1,5 ^{cd}
	30	2,18±0,33 ^d	60,0±9,3 ^{bc}	6,88±1,20 ^c	0,544±0,025 ^c	37,9±5,9 ^d
As(V)	0	15,6±2,3 ^a	47,6±4,9 ^{ab}	50,7±1,1 ^a	0,362±0,035 ^a	65,9±2,6 ^a
	1	2,23±0,21 ^{b***}	37,2±4,1 ^a	23,0±16,9 ^{bc*}	0,439±0,045 ^{ab}	30,0±2,6 ^{b**}
	3	2,11±0,02 ^{b**}	30,6±3,1 ^a	26,2±1,2 ^{c***}	0,562±0,026 ^{b**}	22,1±1,6 ^{c**}
	10	2,41±0,24 ^{b**}	66,9±23,7 ^{bc}	8,84±1,10 ^b	0,822±0,151 ^{c*}	35,3±3,4 ^{bd}
	30	2,61±0,18 ^b	79,8±17,6 ^c	10,4±1,4 ^{bc}	0,444±0,096 ^{ab}	38,3±6,9 ^d
Gyökér						
As(III)	0	115±12 ^a	241±23 ^a	125±12 ^a	1,34±0,16 ^a	85,3±11,9 ^a
	1	11,2±1,2 ^b	369±23 ^b	91,1±8 ^b	1,50±0,05 ^a	51,2±2,6 ^b
	3	9,07±0,82 ^b	656±35 ^c	80,1±7 ^b	1,62±0,04 ^a	27,5±2,6 ^c
	10	13,1±2,0 ^b	690±104 ^c	6,47±0,14 ^c	1,60±0,41 ^a	27,2±1,1 ^c
	30	6,33±0,9 ^b	269±21 ^{ab}	8,71±0,52 ^c	1,50±0,05 ^a	22,1±0,7 ^c
As(V)	0	115±12 ^a	241±23 ^a	125±12 ^a	1,34±0,16 ^a	85,3±11,9 ^{ab}
	1	106±6 ^{a**}	569±30 ^{b**}	97,7±2,0 ^b	1,35±0,06 ^{a*}	106±6 ^{ab***}
	3	134±20 ^{a**}	771±136 ^c	75,9±12,0 ^c	1,36±0,04 ^{a*}	125±7 ^{b*}
	10	109±16 ^{a**}	836±151 ^c	24,1±3,0 ^{d*}	1,27±0,04 ^{a*}	369±72 ^{c*}
	30	8,69±0,28 ^c	793±56 ^{c**}	6,64±0,74 ^e	1,14±0,06 ^{a**}	43,8±1,2 ^{a**}

Az azonos növényi rész esetén azonos betűvel jelölt kezelések között nincs szignifikáns különbség (P≤0,05). Szignifikáns különbség azonos szinten, de eltérő formában történő arzén kezelés esetén: *p<0,05; **p<0,01; ***p<0,001.

A hajtás esetén megfigyeltem, hogy az As(III)- és As(V)-kezelések adott mikroelemek mennyiségére általánosságban hasonló jellegű hatást gyakoroltak (kivéve a Mn). Azt tapasztaltam ugyanis, hogy az As(V)-tel kezelt növény hajtásának Mn-tartalma jelentősen lecsökkent, az As(III)-kezelések esetén azonban a 3 mg kg⁻¹-os dózis

szignifikáns Mn növekedést eredményezett és csupán a 30-90 mg kg⁻¹-os kezelések esetén következett be statisztikailag is igazolható mértékű csökkenés. A többi vizsgált mikroelem tekintetében a következőekben leírtakat figyeltem meg. A hajtás Cu és Zn koncentrációja a tápoldat As-tartalmának növekedésével csökkent mindkét arzénforma esetén. A hajtás elemtartalmában bekövetkező változásokat tovább elemezve megállapítható továbbá az is, hogy a Fe, illetve a Mo koncentrációját bizonyos kezelési szintek esetén, mind az As(III)-, mind az As(V)-kezelés növelte. A hajtás Fe-tartalma szignifikánsan megemelkedett a 10 mg kg⁻¹-os As(III)-, valamint a 30 mg kg⁻¹-os As(V)-kezelés hatására. A hajtás Mo koncentrációját az As(III)-kezelés esetén a 3-30 mg kg⁻¹-os dózisok, míg az As(V)-kezelés esetén csak a 3-10 mg kg⁻¹-os koncentrációk növelték szignifikánsan.

A gyökér esetében az eltérő formájú kezelések azonos jellegű hatást csak a Fe és Mn esetében váltottak ki. Amíg a gyökér Fe-tartalmát mindkét kezelésforma serkentette, addig a gyökér Mn felvételét a kezelések jelenősen gátolták. Megfigyeltem továbbá, hogy a gyökér Cu-tartalmát az alkalmazott kezelések szintén csökkentették, azonban amíg a kontrollhoz képest az As(III)-kezelések esetén valamennyi dózis szignifikánsan alacsonyabb értéket eredményezett, addig az As(V)-kezelések esetén, ez csak a legnagyobb koncentrációjú kezelésnél jelenthető ki. Az elemanalitikai vizsgálatok eredménye alapján megállapítható továbbá az is, hogy a növekvő koncentrációjú As(III)-, és As(V)-kezelések a gyökér Mo-tartalmára nem voltak hatással. A gyökér Zn-tartalmát azonban az As(III)-kezelések jelentősen csökkentették, ezzel szemben az As(V)-kezelések esetén a 10 mg kg⁻¹-os dózis nagymértékű növekedést eredményezett.

4.1.2. Napraforgó teszt növényel végzett tápoldatos kísérlet eredményei

4.1.2.1. Növekvő koncentrációjú As(III)- és As(V)-kezelések hatása a napraforgó csíranövények szárazanyag-produktumára

A napraforgó csíranövények hajtásának, illetve gyökerének szárazanyag-tartalmában bekövetkező változásokat a növekvő koncentrációjú As(III)- és As(V)-kezelések függvényében a 10. táblázat foglalja össze.

10. táblázat: Tápoldaton nevelt napraforgó csíranövények szárazanyag-produktumában (g növény⁻¹) bekövetkező változások a növekvő koncentrációjú (0, 1, 3 és 10 mg kg⁻¹) As(III)- és As(V)-kezelések függvényében (n=12±s.e.)

As-kezelés (mg kg ⁻¹)	Napraforgó csíranövény szárazanyag-produktuma (g növény ⁻¹)			
	Hajtás		Gyökér	
	As(III)	As(V)	As(III)	As(V)
0	0,811±0,208 ^a	0,811±0,208 ^a	0,228±0,025 ^a	0,228±0,025 ^a
1	0,498±0,055 ^b	0,567±0,068 ^{b*}	0,191±0,018 ^b	0,205±0,026 ^{ab}
3	0,399±0,024 ^b	0,522±0,111 ^{b*}	0,167±0,005 ^c	0,215±0,031 ^{a**}
10	-	0,374±0,005 ^c	-	0,178±0,008 ^b

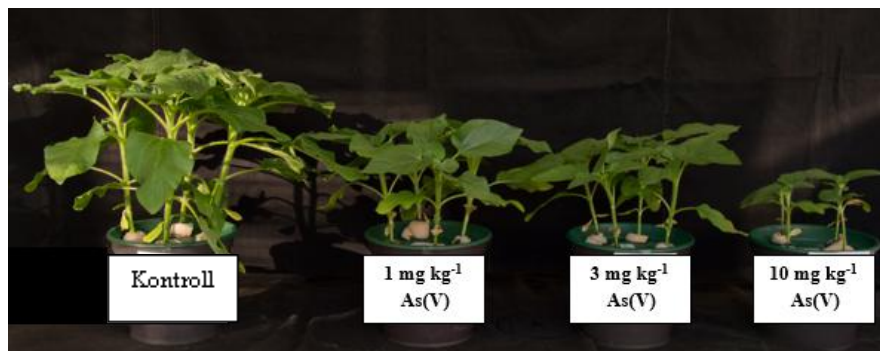
Az azonos növényi rész esetén azonos betűvel jelölt kezelések között nincs szignifikáns különbség (P≤0,05). Szignifikáns különbség azonos szinten, de eltérő formában történő arzén-kezelés esetén: *p<0,05; **p<0,01; ***p<0,001.

A napraforgó teszt növénytel végzett tápoldatos kísérlet esetén használt As(III)-, illetve As(V)-dózisok megegyeztek a kukorica csíranövénytel végzett kísérlet esetén alkalmazottakkal (0, 1, 3, 10, 30 és 90 mg kg⁻¹). A napraforgó (kétszikű) érzékenyebben reagált az arzén toxicitásra, mint a kukorica (egyszikű), hiszen a kukorica csíranövény esetén tapasztaltaktól elérően a legnagyobb koncentrációjú kezelés (90 mg kg⁻¹) mellett a 30 mg kg⁻¹-os dózis esetén mindkét szervetlen arzénforma, míg a 10 mg kg⁻¹-os koncentráció esetén csupán az As(III)-kezelés eredményezte a napraforgó csíranövények pusztulását a tápoldatra helyezését követő 4 napon belül. Ez az adat nemcsak az egy- és kétszikű növények érzékenységeinek különbségére, de a két arzénforma toxicitásának eltérésére is felhívja a figyelmet. A kukoricánál tapasztaltakhoz hasonlóan a többi As(III)-kezelés statisztikailag is igazolható módon csökkentette a napraforgó csíranövény egyes részeinek szárazanyag-tartalmát. A tápoldat növekvő As(V)-tartalmának köszönhetően a napraforgó hajtásának szárazanyag-tartalma szintén szignifikánsan csökkent a kontrollhoz képest. A gyökér száraz tömegében azonban az alacsonyabb koncentrációjú As(V)-kezelések nem okoztak jelentős változást, csupán a 10 mg kg⁻¹-os kezelés indukált szignifikáns csökkenést.

A növekvő koncentrációjú As(III)- és As(V)-kezelések hatását vizuálisan is jól szemlélteti az 12-13. ábra.



12. ábra: Növekvő koncentrációjú As(III)-kezelés hatása napraforgó csíranövények fejlődésére
(Forrás: Saját)



13. ábra: Növekvő koncentrációjú As(V)-kezelés hatása napraforgó csíranövények fejlődésére
(Forrás: Saját)

4.1.2.2. Növekvő koncentrációjú As(III)- és As(V)-kezelések hatása a tápoldaton nevelt napraforgó csíranövények As-tartalmára

A tápoldatba kijuttatott As(III)- és As(V)-mennyiségének növekedésével, fokozatosan emelkedett a kísérleti növény hajtásának, valamint gyökerének As-tartalma (11. táblázat). A gyökér, illetve a hajtás esetén mért As koncentrációkat összehasonlítva kijelenthető, hogy az As mennyiségének nagy része a gyökérben akkumulálódott, és csak kisebb részben transzlokálódott a hajtás felé, amely megegyezik a kukorica esetén tapasztaltakkal.

11. táblázat: Tápoldaton nevelt napraforgó csíranövény As-tartalma a növekvő koncentrációjú As(III)- és As(V)-kezelések függvényében ($n=3\pm s.e.$)

As-kezelés (mg kg ⁻¹)	Napraforgó csíranövény As-tartalma (mg kg ⁻¹)	
	Hajtás	Gyökér
As(III)	0	<k.h. ^a
	1	77,4±3,8 ^b
	3	97,3±1,7 ^c
As(V)	0	<k.h. ^a
	1	81,4±1,9 ^{b***}
	3	86,4±0,7 ^{b*}
	10	132±7 ^c

Az azonos növényi rész esetén azonos betűvel jelölt kezelések között nincs szignifikáns különbség ($P\leq 0,05$). Szignifikáns különbség azonos szinten, de eltérő formában történő arzén-kezelés esetén: * $p<0,05$; ** $p<0,01$; *** $p<0,001$. Jelmagyarázat: <k.h. jelentése kimutatási határ alatt.

A hajtás és a gyökér As-tartalma közötti jelentős mértékű különbség összefüggésbe hozható azzal, hogy a toxikus fémionok megkötésében szerepet játszó fitokelatinok szintézisének fő helye a növényi szervezeten belül a gyökér. A fitokelatinok szintézise, mint energiaigényes folyamat, a gyökér növekedésének, szárazanyag-tartalmának csökkenését indukálja, mely a tápoldaton nevelt napraforgó csíranövény esetében ugyanúgy megfigyelhető volt, mint a kukorica csíranövény tekintetében.

Az azonos szintű, de eltérő formájú kezelések hatását összehasonlítva megállapítható, hogy az alkalmazott legkisebb (1 mg kg⁻¹) koncentrációjú As(V)-kezelés szignifikánsan magasabb As-tartalmat indukált mindkét növényi szerv esetén, mint az ugyanilyen dózisu As(III)-kezelés. A 3 mg kg⁻¹-os kezelés esetén szignifikáns különbség az eltérő formájú As-kezelések hatása között, csak a hajtásnál volt megfigyelhető. Ebben az esetben azonban az As(III)-kezelés magasabb arzén-tartalmat eredményezett.

A 11. táblázatból továbbá az is kitűnik, hogy a napraforgó által akkumulált As mennyisége a kontroll kezelésű növény kivételével minden esetben jelentősen meghaladta a kukorica esetén megfigyelt koncentráció értékeket. Ez arra enged következtetni, hogy a napraforgó csíranövény azért bizonyult érzékenyebbnek a tápoldat As-terhelésére, mert As felvétele a kukoricához viszonyítva sokkalta intenzívebb volt. Ugyanakkor ezáltal az is bizonyítást nyert, hogy a kukoricához képest a napraforgó csíranövény szöveteiben sokkal nagyobb mennyiségű arzént képest

felhalmozni, anélkül, hogy az As-toxicitás bizonyos látható tünetei megjelenjenek, vagy a növény kipusztulása következne be.

A tápoldatból az egyes csíranövények által kivont As mennyiségét a 12. táblázat mutatja be.

12. táblázat: Tápoldaton nevelt napraforgó csíranövény által felvett As mennyisége a növekvő koncentrációjú As(III)- és As(V)-kezelések függvényében ($n=3 \pm s.e.$)

As-kezelés (mg kg ⁻¹)		Napraforgó csíranövény által felvett As mennyisége (µg)		
		Hajtás	Gyökér	Teljes növény
As(III)	0	<k.h. ^a	<k.h. ^a	<k.h.
	1	38,6±0,1 ^b (23)	128±0 ^b (77)	167
	3	38,8±0,1 ^b (16)	208±0 ^c (84)	247
As(V)	0	<k.h. ^a	<k.h. ^a	<k.h.
	1	46,2±0,1 ^b (21)	176±1 ^b (79)	222
	3	45,1±0,1 ^b (15)	259±1 ^c (85)	304
	10	45,4±0,0 ^b (15)	249±0 ^c (85)	294

Az azonos növényi rész esetén azonos betűvel jelölt kezelések között nincs szignifikáns különbség ($P \leq 0,05$). Szignifikáns különbség azonos szinten, de eltérő formában történő arzén kezelés esetén: * $p < 0,05$; ** $p < 0,01$; *** $p < 0,001$. Jelmagyarázat: <k.h. jelentése kimutatási határ alatt. A zárójelben feltüntetett értékek az adott növényi rész és a teljes növény által felvett As mennyiségének az arányát fejezik ki %ban.

A gyökérben mért arzén mennyisége ezúttal is nagyobbak bizonyult, mint a hajtás esetén tapasztalt érték. Megfigyeltem továbbá, hogy az As(III)-, illetve As(V)-kezelések hatására a kontrollhoz képest jelentősen megnőtt a hajtás által kivont As mennyisége, azonban a különböző koncentrációjú dózisok (1, 3 és 10 mg kg⁻¹) hatása között szignifikáns eltérést nem tudtam kimutatni. A növekvő koncentrációjú As(III)-, illetve As(V)-kezelések hatására a gyökér által felvett As mennyisége a kontrollhoz képest ugyancsak statisztikailag igazolható módon megnőtt. Megfigyeltem továbbá azt is, hogy a teljes növény által felvett As mennyisége a növekvő koncentrációjú As(III)-kezelések hatására fokozatosan emelkedett, az As(V)-kezelések esetén azonban a 10 mg kg⁻¹-os dózis kismértékű visszaesést eredményezett.

A 12. táblázat eredményeiből az is jól látható, hogy a napraforgó csíranövény esetén a hajtásba kisebb arányban jutott be As, mint a kukorica csíranövény esetén. A napraforgó tesztnövény hajtásában a teljes növény As-készletének 16-23%-a volt jelen az As(III)-kezelések és 15-21%-a az As(V)-kezelések esetén. Ezzel szemben a kukorica

csíranövény esetén mindkét kezelési formánál azt tapasztaltam, hogy a teljes növény által felvett As mennyiségének mintegy 23-55%-a a hajtásban fordult elő.

4.1.2.3. Növekvő koncentrációjú As(III)- és As(V)-kezelések hatása a tápoldaton nevelt napraforgó csíranövények makroelem felvételére

A tápoldaton nevelt kukorica csíranövény egyes részeinek makroelem-tartalmát a különböző koncentrációjú As(III)- és As(V)-kezelések az esetek nagy részében jelentősen befolyásolták, ahogyan azt a 13. táblázat is szemlélteti.

13. táblázat: Tápoldaton nevelt napraforgó csíranövény makroelem-tartalmában (mg kg^{-1}) bekövetkező változások a növekvő koncentrációjú As(III)- és As(V)-kezelések függvényében ($n=3\pm\text{s.e.}$)

As-kezelés (mg kg ⁻¹)		Napraforgó csíranövény makroelem-tartalma (mg kg ⁻¹)					
		Hajtás			Gyökér		
		Mg	P	S	Mg	P	S
As(III)	0	4625±145 ^a	2057±65 ^a	3398±139 ^a	3158±53 ^a	2086±56 ^a	3788±101 ^a
	1	3119±47 ^b	4003±22 ^b	3764±154 ^a	1053±11 ^b	3577±48 ^b	4150±87 ^b
	3	3963±127 ^c	5257±300 ^c	7077±558 ^b	1447±39 ^c	4237±172 ^c	5632±165 ^c
As(V)	0	4625±145 ^a	2057±65 ^a	3398±139 ^a	3158±53 ^a	2086±56 ^a	3788±101 ^a
	1	3459±102 ^{b**}	2510±86 ^{b***}	5173±373 ^{b**}	1463±65 ^{b***}	2901±144 ^{b**}	5297±422 ^{b*}
	3	4002±49 ^c	4669±164 ^{*c}	6448±285 ^c	1249±40 ^{*c}	2874±127 ^{***c}	5957±335 ^c
	10	3407±88 ^d	4473±154 ^c	7284±245 ^d	1576±45 ^d	3577±172 ^d	6719±309 ^d

Az azonos növényi rész esetén azonos betűvel jelölt kezelések között nincs szignifikáns különbség ($P\leq 0,05$). Szignifikáns különbség azonos szinten, de eltérő formában történő arzén kezelés esetén:

* $p<0,05$; ** $p<0,01$; *** $p<0,001$.

A tesztnövény hajtásának, illetve gyökerének Mg-tartalma az As(III)-, illetve az As(V)-kezelések hatására egyaránt lecsökkent, amely a gyökér tekintetében megegyezik a kukorica esetén tapasztaltakkal. A Mg-tartalomban bekövetkező változások tekintetében kiemelhető továbbá, hogy a gyökér esetén nagyobb mértékű csökkenés volt megfigyelhető, mint a hajtásnál. Ezzel szemben a csíranövény egyes részeinek P-tartalmát mindkét arzénforma serkentette, mely részben megegyezik Nascimento és Xing (2006) feljegyzéseivel, miszerint a tápoldaton nevelt napraforgó P-tartalma nőtt a 3,75 mg kg^{-1} -ot meg nem haladó koncentrációk esetén, azonban a magasabb dózisok tekintetében az általam tapasztaltakkal ellentétben már csökkenést figyeltek meg. A kísérleti növény gyökerének S koncentrációját a kontrollhoz képest ugyancsak fokozta mindkét kezelési forma, azonban amíg a hajtás S-tartalma az As(V)-kezelések esetén szignifikánsan növekvő tendenciát mutatott, addig az As(III)-mal kezelt növények

hajtásának S koncentrációja jelentősen csak a 3 mg kg⁻¹-os dózis hatására emelkedett meg.

4.1.2.4. Növekvő koncentrációjú As(III)- és As(V)-kezelések hatása a tápoldaton nevelt napraforgó csíranövények mikroelem felvételére

Az As(III)- és As(V)-kezelések a kísérleti növények mikroelem összetételére is jelentős hatással voltak (14. táblázat).

14. táblázat: Tápoldaton nevelt napraforgó csíranövény mikroelem-tartalmában (mg kg⁻¹) bekövetkező változások a növekvő koncentrációjú As(III)- és As(V)-kezelések függvényében (n=3±s.e.)

As-kezelés (mg kg ⁻¹)		Napraforgó csíranövény mikroelem-tartalma (mg kg ⁻¹)				
		Cu	Fe	Mn	Mo	Zn
Hajtás						
As(III)	0	7,16±0,32 ^a	101±3 ^a	23,8±1,1 ^a	2,68±0,04 ^a	23,7±1,0 ^a
	1	3,40±0,13 ^b	57,9±7,0 ^b	29,1±0,3 ^b	1,32±0,11 ^b	10,6±0,4 ^b
	3	4,59±0,20 ^c	70,8±7,0 ^c	37,4±2,0 ^c	1,08±0,12 ^c	17,0±0,8 ^c
As(V)	0	7,16±0,32 ^a	101±3 ^a	23,8±1,1 ^a	2,68±0,04 ^a	23,7±1,0 ^a
	1	4,47±0,14 ^{b**}	46,4±1,4 ^b	26,1±1,1 ^{b*}	1,02±0,11 ^{b*}	10,5±0,5 ^{b*}
	3	4,78±0,28 ^b	55,8±5,3 ^{bc*}	39,2±0,7 ^c	1,23±0,11 ^b	12,3±0,8 ^{c**}
	10	5,67±0,31 ^c	62,2±4,9 ^c	28,2±0,9 ^d	1,19±0,15 ^b	20,1±0,3 ^d
Gyökér						
As(III)	0	11,6±0,2 ^a	181±5 ^a	2,50±0,03 ^a	2,68±0,01 ^a	29,4±1,0 ^a
	1	11,6±0,2 ^a	727±21 ^b	9,04±0,12 ^b	3,29±0,03 ^b	31,8±0,4 ^a
	3	13,1±0,4 ^b	656±28 ^c	24,4±1,2 ^c	2,08±0,12 ^c	63,0±2,5 ^b
As(V)	0	11,6±0,2 ^a	181±5 ^a	2,50±0,03 ^a	2,68±0,01 ^a	29,4±1,0 ^a
	1	15,2±0,8 ^{b**}	786±40 ^b	28,7±1,1 ^{b***}	2,71±0,20 ^{a*}	34,3±1,5 ^b
	3	15,3±0,4 ^{b**}	874±37 ^{b**}	36,4±1,6 ^{c**}	2,13±0,03 ^b	42,7±1,8 ^{c***}
	10	24,7±1,9 ^c	1020±131 ^c	93,1±7,8 ^d	3,59±0,37 ^c	69,7±3,5 ^d

Az azonos növényi rész esetén azonos betűvel jelölt kezelések között nincs szignifikáns különbség (P≤0,05). Szignifikáns különbség azonos szinten, de eltérő formában történő arzén-kezelés esetén: *p<0,05; **p<0,01; ***p<0,001.

A gyökér, illetve a hajtás mikroelem összetételében jelentkező változásokat összevetve megállapítható, hogy az As(III)- és As(V)-kezelések hatására a hajtás Cu, Fe és Zn koncentrációja lecsökkent, a gyökér esetén azonban ezen elemek akkumulációja felerősödött. Meg kell jegyezni azonban, hogy az As(III)-kezelések esetén a gyökér Cu-, valamint Zn-tartalmában statisztikailag igazolható növekedést csak a 3 mg kg⁻¹-os dózis esetén tudtam kimutatni, az alkalmazott legkisebb (1 mg kg⁻¹) koncentráció a kontrollhoz viszonyítva szignifikáns változást nem okozott.

Kiemelhető továbbá, hogy a hajtás Cu- és Zn-tartalmában, valamint a gyökér Fe koncentrációjában bekövetkező változások tekintetében egyezést találtam mindkét kezelési formánál a tápoldaton nevelt kukorica csíranövény esetén tapasztaltakkal.

Megfigyeltem továbbá azt is, hogy a tápoldat növekvő As-tartalma pozitívan hatott mind a hajtás, mind a gyökér Mn-tartalmára, mindkét kezelési forma szignifikánsan növekvő tendenciát eredményezett. Mindez összhangban van Najmowicz et al. (2010) megfigyeléseivel, miszerint a kijuttatott As serkentette a sárgavirágú csillagfűt, valamint a kukorica Mn felvételét.

Azt tapasztaltam továbbá, hogy amíg az előzőekben említett mikroelemek (Cu, Fe, Mn és Zn) mennyisége az As(III)-, illetve As(V)-kezelések hatására az adott növényi részben azonos irányba változott, addig ez a Mo esetén nem minden esetben mondható el. A hajtás Mo-tartalma ugyan vitathatatlanul lecsökkent mindkét kezelési forma esetén, és a gyökér Mo-tartalmára nézve is statisztikailag igazolható módon hatást gyakoroltak egyes kezelési koncentrációk, tendenciózus változást azonban a gyökér esetében egyik arzénforma sem idézett elő.

4.2. A RIZOBOXOS ÉS TENYÉSZEDÉNYES KÍSÉRLET TALAJEREDMÉNYEI

A kísérlet során alkalmazott mészlepedékes csernozjom talaj arzén-tartalmát laboratóriumi körülmények között állítottam be. Annak érdekében, hogy ellenőrizsem, a talaj bekeverése során megfelelő homogenitást értem-e el, vizsgáltam a talaj „összes” arzén-tartalmát. A növények számára hozzáférhető arzén mennyiségét elsősorban nem az „összes”, hanem az „oldható” arzén-tartalom képezi, így vizsgálatom tárgyát képezte e paraméter meghatározása is. A vizsgálatok során kapott eredményeket a 15. táblázat összesíti.

15. táblázat: A rizoboxos és tenyészedényes kísérletek során alkalmazott mészlepedékes csernozjom talaj „összes” és „oldható” As-tartalma (mg kg^{-1}), valamint ezek aránya az alkalmazott kezelések (0, 1, 3, 10, 30, 90, 270 mg kg^{-1} As) függvényében ($n=3\pm\text{s.e.}$)

As-kezelés (mg kg^{-1})	"Összes" As-tartalom (mg kg^{-1}) (A)	"Oldható" As-tartalom (mg kg^{-1}) (B)	B/A
As(III)	0	2,07 $\pm$ 0,04 ^a	0,799 $\pm$ 0,064 ^a
	1	3,23 $\pm$ 0,17 ^a	1,61 $\pm$ 0,12 ^{ab}
	3	5,20 $\pm$ 0,28 ^a	2,54 $\pm$ 0,78 ^{ab}
	10	12,4 $\pm$ 1,7 ^b	4,84 $\pm$ 0,12 ^b
	30	31,9 $\pm$ 1,8 ^c	19,3 $\pm$ 1,6 ^c
	90	93,4 $\pm$ 1,2 ^d	53,3 $\pm$ 3,2 ^d
	270	273 $\pm$ 6 ^e	162 $\pm$ 10 ^e
As(V)	0	2,07 $\pm$ 0,04 ^a	0,799 $\pm$ 0,064 ^a
	1	3,20 $\pm$ 0,60 ^a	1,57 $\pm$ 0,20 ^{ab}
	3	5,26 $\pm$ 0,25 ^a	2,53 $\pm$ 0,37 ^{ab}
	10	11,6 $\pm$ 0,1 ^b	4,42 $\pm$ 0,18 ^{ab}
	30	32,1 $\pm$ 0,5 ^c	15,7 $\pm$ 1,1 ^b
	90	92,0 $\pm$ 4,3 ^d	39,1 $\pm$ 2,6 ^c
	270	269 $\pm$ 4 ^e	153 $\pm$ 17 ^d

Az azonos növényi rész esetén azonos betűvel jelölt kezelések között nincs szignifikáns különbség ($P\leq 0,05$). Szignifikáns különbség azonos szinten, de eltérő formában történő arzén-kezelés esetén: * $p<0,05$; ** $p<0,01$; *** $p<0,001$.

A fenti táblázatban ismertetett eredmények alapján megállapítható, hogy a kezeletlen (kontroll) talaj is tartalmazott arzént (2,07 $\pm$ 0,04 mg kg^{-1}), ezáltal a kezelések során a talaj ezen kezdeti arzéntartalmát növeltem meg, amelyből adódóan a talaj összes arzén-tartalma az adott kezelés esetén kismértékben eltér az alkalmazott arzén koncentrációtól. Ennek ellenére eredményeim azt bizonyítják, hogy a különböző kezelések esetén az arzén eloszlása a talajban egyenletes volt, így a talaj ebből a szempontból homogénnek tekinthető.

A kontroll talaj „összes” arzén-tartalmának 38,6%-a, az As(V)-tel kezelt talajban a 38,2-56,9%-a, míg a As(III)-kezeléseknél a 39-60,7%-a volt a növények számára felvehető formában jelen. Ez egyrészt annak köszönhető, hogy a kísérlet során alkalmazott talaj jelentős humusztartalommal bírt, mely képes a talajhoz kevert arzén egy részét megkötni, elősegítve ezáltal az arzén talaj-növény rendszerben való mobilitásának gátlását. Másrészt a talajban jelenlévő vas-, magnézium-, alumínium-, valamint mangán-oxidok és hidroxidok felületén az arzén képes megkötődni, mely szintén elősegítette az arzén talajban lévő immobilitását. A kísérlet során alkalmazott csernozjom talaj pH-értéke semleges körüli (6,58), megközelítőleg neutrális

körülmények között a fémek nehezen mennek oldatba, vegyületeik stabilnak nevezhetőek, mely szintén hozzájárult ahhoz, hogy a talaj „oldható” arzén koncentrációját kisebbnek találtam, mint az „összes” arzén-tartalmát. A kísérlet kezdetén nagy mennyiségű toxikus elemet juttattam a talajba, olyan csapadékképzési és adszorpciós folyamatok előtérbe kerülését indukáltam, melynek következménye, hogy a talaj növények számára hozzáférhető arzén mennyisége jelentősen kisebb volt, mint a talaj „összes” arzén-tartalma. Mindez összhangban van Szegedi et al. (2013) eredményeivel, akik munkájuk során szintén arra a megállapításra jutottak, hogy a talaj „összes” arzén-tartalmának csak kis része hozzáférhető a növények számára.

A kapott eredményeket megvizsgálva arra a megállapításra jutottam, hogy a kísérlet során alkalmazott As(III)- és As(V)-kezelések hatására, a talaj „összes” arzén-tartalma növekvő tendenciát mutatott, a talaj „oldható” arzén-tartalma szintén egyenletesen nőtt. Az As(V)-kezelések 270 mg kg⁻¹-os dózisánál, míg az As(III)-kezelések 30-270 mg kg⁻¹-os dózisainál a talaj „összes” arzén-tartalmának már több mint fele volt a növények számára felvehető formában jelen.

A 30-270 mg kg⁻¹-os As(III)-dózisok esetén az arzén talajban való megkötődése során az adszorbensként szolgáló talajkomponensek valószínűleg nagyrészt telítődtek, így a kezelés során a talajhoz adott arzén nagyobb mértékben már nem volt képes megkötődni, melynek következtében ezen meg nem kötődött mennyiség a növények számára hozzáférhető arzén koncentrációját növelte. Az As(V)-kezeléseknél ez azonban csak a legnagyobb koncentrációjú (270 mg kg⁻¹) dózis esetén következett be, köszönhetően annak, hogy az As(V)-nek valószínűleg több megkötődési lehetősége van a talajban, a foszfáthoz való hasonlósága miatt. A rizoboxos, illetve a tenyészedényes kísérletben az As(III)-kezelések több esetben is jóval toxikusabbnak bizonyultak, mint az As(V)-kezelések, melynek magyarázata egyrészt abban keresendő, hogy az azonos szintű, de eltérő formájú kezelések esetén a növények számára hozzáférhető arzén mennyisége nagyobb volt az As(III)-kezelések esetén, mint az As(V)-kezelések esetén. Különösképpen igaz ez a magasabb dózisok (30-270 mg kg⁻¹) tekintetében.

4.3. A RIZOBOXOS KÍSÉRLET EREDMÉNYEI

4.3.1. Kukorica teszt növényvel végzett rizoboxos kísérlet eredményei

4.3.1.1. Növekvő koncentrációjú As(III)- és As(V)-kezelések hatása a rizoboxban nevelt kukorica csíranövények szárazanyag-termékumára

Az As(III)- és As(V)-kezelések hatásait a rizoboxban nevelt kukorica egyes növényi részeinek szárazanyag-termékumára vonatkozóan a 16. táblázat tartalmazza.

16. táblázat: Rizoboxban nevelt kukorica csíranövények szárazanyag-termékumában (g növény^{-1}) bekövetkező változások a növekvő koncentrációjú (0, 1, 3, 10, 30 és 90 mg kg^{-1}) As(III)- és As(V)-kezelések függvényében ($n=15 \pm \text{s.e.}$)

As- kezelés (mg kg^{-1})	Kukorica csíranövény szárazanyag-termékuma (g növény^{-1})			
	Hajtás		Gyökér	
	As(III)	As(V)	As(III)	As(V)
0	0,0245 $\pm$ 0,0080 ^a	0,0245 $\pm$ 0,0080 ^a	0,0455 $\pm$ 0,0080 ^a	0,0455 $\pm$ 0,0080 ^a
1	0,0243 $\pm$ 0,0037 ^a	0,0294 $\pm$ 0,0066 ^{ab}	0,0450 $\pm$ 0,0046 ^a	0,0426 $\pm$ 0,0048 ^a
3	0,0238 $\pm$ 0,0030 ^a	0,0301 $\pm$ 0,0061 ^{ab}	0,0410 $\pm$ 0,0057 ^a	0,0453 $\pm$ 0,0082 ^a
10	0,0240 $\pm$ 0,0038 ^a	0,0336 $\pm$ 0,0027 ^{b**}	0,0430 $\pm$ 0,0049 ^a	0,0496 $\pm$ 0,0083 ^a
30	0,0255 $\pm$ 0,0082 ^a	0,0257 $\pm$ 0,0073 ^{ab}	0,0448 $\pm$ 0,0076 ^a	0,0468 $\pm$ 0,0083 ^a
90	0,0234 $\pm$ 0,0038 ^a	0,0235 $\pm$ 0,0050 ^a	0,0380 $\pm$ 0,0080 ^a	0,0432 $\pm$ 0,0098 ^a

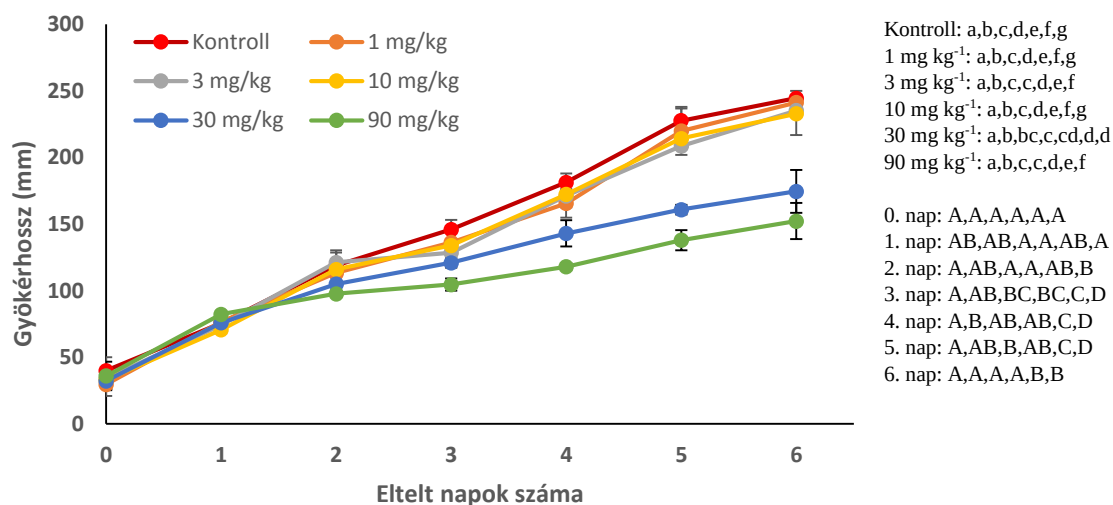
Az azonos növényi rész esetén azonos betűvel jelölt kezelések között nincs szignifikáns különbség ($P \leq 0,05$). Szignifikáns különbség azonos szinten, de eltérő formában történő arzén-kezelés esetén: * $p < 0,05$; ** $p < 0,01$; *** $p < 0,001$.

A fenti táblázatban közölt eredmények alapján az As(III)-kezelések hatására szignifikáns változást a hajtás és a gyökér esetén mért értékek tekintetében egyaránt nem tudtam kimutatni. Azt tapasztaltam továbbá, hogy az As(V)-kezelések a teszt növény gyökerének szárazanyag-tartalmát statisztikailag igazolható mértékben szintén nem befolyásolták. A hajtás szárazanyag-termékuma azonban a 10 mg kg^{-1} -os As(V)-kezelés hatására szignifikánsan megnőtt, a többi kezelési szint a kontrollhoz képest azonban szignifikáns változást nem eredményezett. Ez összhangban van több kutató feljegyzésével is, miszerint habár az As toxikus, kis mennyiségben hasznos lehet a növények számára, elősegítheti a talajfelszín feletti szervek tömegének gyarapodását (Carbonell-Barrachina et al., 1998a; Gulz és Gupta, 2000; Jacobs et al., 1970a; Woolson et al., 1971; Xu és Thornton, 1985).

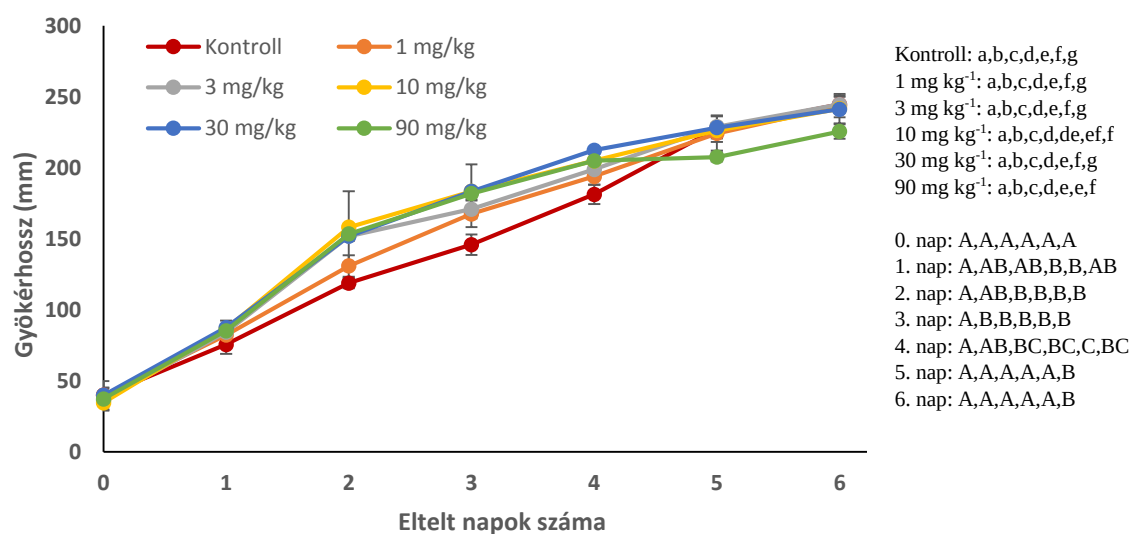
4.3.1.2. Növekvő koncentrációjú As(III)- és As(V)-kezelések hatása a rizoboxban nevelt kukorica csíranövények gyökérnövekedésére

A rizoboxos kísérlet lehetővé tette a teszt növények gyökérnövekedésének nyomonkövetését is. A gyökér fejlődését a kísérlet felszámolásáig, azaz 6 napig

kísértem figyelemmel. A kukorica csíranövények naponkénti gyökérnövekedését az As(III)-, illetve As(V)-kezelések esetén a 14-15. ábra szemlélteti.



14. ábra: Növekvő koncentrációjú (0, 1, 3, 10, 30 és 90 mg kg⁻¹) As(III)-kezelések hatása a rizoboxban nevelt kukorica csíranövény gyökérnövekedésére (n=15±s.e.)



15. ábra: Növekvő koncentrációjú (0, 1, 3, 10, 30 és 90 mg kg⁻¹) As(V)-kezelések hatása a rizoboxban nevelt kukorica csíranövény gyökérnövekedésére (n=15±s.e.)

Az esetek többségében az eltelt napok között, valamennyi alkalmazott As(III)- illetve As(V)-kezelés esetén szignifikáns növekedést tudtam kimutatni. A 14-15. ábrák ugyanakkor arra is felhívják a figyelmet, hogy az As(III), valamint As(V) gyökérnövekedésre gyakorolt hatása jelentősen eltérő volt. Az As(III)-mal kezelt növények esetén megfigyeltem, hogy a kontroll növény gyökér növekedése volt a

legintenzívebb. Az 1-10 mg kg⁻¹-os As(III)-dózisok nagymértékben nem befolyásolták a gyökérnövekedést, ugyanakkor a 30-90 mg kg⁻¹-os kezelések esetén a kukorica gyökérnövekedésének intenzitása jelentősen mérséklődött.

Ezzel szemben az As(V)-kezelések esetén általánosságban azt tapasztaltam, hogy a kontroll növény gyökere növekedett legkisebb ütemben, a talaj növekvő As-tartalma egyre nagyobb mértékben fokozta a teszt növények gyökér növekedését. A legnagyobb (270 mg kg⁻¹) As(V)-dózis azonban a 4-5. napon kismértékben már gátolta a gyökér fejlődését. Az arzén-kezelések gyökérnövekedésre gyakorolt hatása a 16. ábrán is jól látható, továbbá az is megfigyelhető hogy a kezelések a mellégyökerek fejlettségét is jelentősen befolyásolták.



16. ábra: Növekvő koncentrációjú (0, 1, 3, 10, 30 és 90 mg kg⁻¹-os) As(III)- és As(V)-kezelések hatása a rizoboxban nevelt kukorica csíranövények fejlődésére (Forrás:Saját)

4.3.1.3. Növekvő koncentrációjú As(III)- és As(V)-kezelések hatása a rizoboxban nevelt kukorica csíranövények As-tartalmára

A 17. táblázat a rizoboxban nevelt kukorica csíranövények As-tartalmát mutatja be az As(III)-és As(V)-kezelések függvényében.

17. táblázat: Növekvő koncentrációjú (0, 1, 3, 10, 30 és 90 mg kg⁻¹) As(III)- és As(V)-kezelések hatása a rizoboxban nevelt kukorica csíranövény As-tartalmára (n=3±s.e.)

As-kezelés (mg kg ⁻¹)	Kukorica csíranövény As-tartalma (mg kg ⁻¹)	
	Hajtás	Gyökér
As(III)	0	0,0933±0,0152 ^a
	1	0,280±0,028 ^b
	3	0,330±0,300 ^{bc}
	10	0,406±0,005 ^c
	30	0,516±0,065 ^d
	90	1,05±0,08 ^e
As(V)	0	0,0933±0,0152 ^a
	1	0,330±0,070 ^b
	3	0,446±0,055 ^{b*}
	10	0,510±0,043 ^b
	30	0,676±0,130 ^b
	90	1,44±0,41 ^c

Az azonos növényi rész esetén azonos betűvel jelölt kezelések között nincs szignifikáns különbség (P≤0,05). Szignifikáns különbség azonos szinten, de eltérő formában történő arzén-kezelés esetén: *p<0,05; **p<0,01; ***p<0,001.

A 17. táblázatban feltüntetett értékek alapján megállapítható, hogy mindkét arzénforma hatására monoton nőtt az egyes növényi részek As-tartalma, azonban amíg a hajtás esetén valamennyi kezelési szint a kontrollhoz viszonyítva szignifikánsan magasabb értéket eredményezett, addig a gyökér esetén ez csak az 1 mg kg⁻¹-ot meghaladó kezeléseknel mondható el. Összehasonlítva a különböző növényi részek As-tartalmát megállapítható, hogy a gyökérmintákban mért As mennyiségek jóval meghaladták a hajtásban mért értékeket, mely hasonlóságot mutat a Wells és Gilmor (1997), valamint Marin et al. (1992) által rizs esetén megállapítottakkal.

A rizoboxos és tápoldatos kísérletekben mért As koncentrációkat összehasonlítva megállapítható, hogy a tápoldatos kísérlet esetén a kukorica csíranövény jóval nagyobb mennyiségben vett fel arzént, mint a rizoboxos kísérletben. Ez elsősorban annak köszönhető, hogy amíg a tápoldatos kísérlet esetén a kijuttatott arzén teljes mennyisége elérhető volt a növények számára, addig a rizoboxos kísérletnél a talajba juttatott arzén mennyiségének csak kisebb része volt hozzáférhető a növények számára.

A rizoboxban nevelt kukorica által a talajból kivont As mennyiségét a 18. táblázatban foglaltam össze.

18. táblázat: Rizoboxban nevelt kukorica csíranövény által felvett As mennyisége a növekvő koncentrációjú (0, 1, 3, 10, 30 és 90 mg kg⁻¹) As(III)- és As(V)-kezelések függvényében (n=3±s.e.)

As-kezelés (mg kg ⁻¹)		Kukorica csíranövény által felvett As mennyisége (μg)		
		Hajtás	Gyökér	Teljes növény
As(III)	0	0,00229±0,00012 ^a (18)	0,0105±0,0004 ^a (82)	0,0127
	1	0,00680±0,00010 ^{ab} (27)	0,0182±0,0001 ^a (73)	0,0250
	3	0,00785±0,00009 ^{ab} (4)	0,175±0,003 ^b (96)	0,183
	10	0,00976±0,00002 ^{ab} (4)	0,208±0,001 ^b (96)	0,218
	30	0,0132±0,0005 ^b (2)	0,639±0,002 ^b (98)	0,652
	90	0,0247±0,0003 ^b (1)	3,26±0,01 ^b (99)	3,28
As(V)	0	0,00229±0,00012 ^a (18)	0,0105±0,0004 ^a (82)	0,0127
	1	0,00970±0,00047 ^{ab} (30)	0,0224±0,0005 ^a (70)	0,0321
	3	0,0134±0,0003 ^{b*} (5)	0,243±0,004 ^b (95)	0,256
	10	0,0171±0,0001 ^{b*} (5)	0,357±0,013 ^b (95)	0,374
	30	0,0174±0,0010 ^b (1)	1,15±0,04 ^{c*} (99)	1,17
	90	0,0338±0,0021 ^b (1)	4,23±0,15 ^c (99)	4,26

Az azonos növényi rész esetén azonos betűvel jelölt kezelések között nincs szignifikáns különbség (P≤0,05). Szignifikáns különbség azonos szinten, de eltérő formában történő arzén-kezelés esetén: *p<0,05; **p<0,01; ***p<0,001. A zárójelben feltüntetett értékek az adott növényi rész és a teljes növény által felvett As mennyiségének az arányát fejezik ki %-ban.

A teljes növény által felvett As mennyisége jelentősen megnőtt a növekvő koncentrációjú kezelések hatására, az As(V)-dózisok esetén azonban nagyobb mértékű növekedést figyeltem meg, mint az As(III)-kezelések tekintetében. Mindemellett a hajtás, illetve a gyökér által felvett As mennyiségét külön-külön tanulmányozva is növekvő tendenciát állapítottam meg.

A kontrollhoz viszonyítva szignifikáns növekedést azonban a hajtás esetén csak a 30-90 mg kg⁻¹-os As(III)-, valamint a 3-90 mg kg⁻¹-os As(V)-kezelések tekintetében tudtam kimutatni. A gyökér As-tartalmát a kezeletlen kontroll növényben tapasztalt értékhez képest statisztikailag is igazolható módon a 3-90 mg kg⁻¹-os dózisok növelték mindkét kezelési forma esetén.

A teljes növény által a talajból kivont As mennyiségének a növényi részek közötti megoszlását figyelembe véve elmondható, hogy az As nagyobb részt a gyökérben volt jelen, vagyis ebben az esetben is működött a „gyökérszűrő”. Megfigyeltem továbbá mindkét arzénforma kapcsán, hogy a legkisebb kezelés (1 mg kg⁻¹) esetén tapasztaltaktól eltekintve, a talaj As-tartalmának növekedésével fokozatosan emelkedett a gyökér által visszatartott As aránya. A legnagyobb (90 mg kg⁻¹) As(III)-, illetve

As(V)-kezelés esetén a kukorica csíranövény által felvett As mennyiségének már csaknem egésze (99%-a) a gyökérben volt megtalálható.

4.3.1.4. Növekvő koncentrációjú As(III)- és As(V)-kezelések hatása a rizoboxban nevelt kukorica csíranövény makroelem felvételére

A 19. táblázat a rizoboxban nevelt kukorica csíranövény Mg-, P- és S-tartalmát mutatja be, a növekvő koncentrációjú As(III)- és As(V)-kezelések függvényében.

19. táblázat: Rizoboxban nevelt kukorica csíranövények makroelem-tartalmában (mg kg^{-1}) bekövetkező változások a növekvő koncentrációjú (0, 1, 3, 10, 30 és 90 mg kg^{-1}) As(III)- és As(V)-kezelések függvényében ($n=3\pm s.e.$)

As-kezelés (mg kg ⁻¹)		Kukorica csíranövények makroelem-tartalma (mg kg ⁻¹)		
		Mg	P	S
Hajtás				
As(III)	0	1265±1 ^{ab}	6284±438 ^a	2341±132 ^{ab}
	1	1542±252 ^b	6045±48 ^a	2121±20 ^a
	3	1407±88 ^b	5869±526 ^a	2253±107 ^a
	10	987±158 ^{ad}	6087±323 ^a	3197±243 ^c
	30	729±15 ^{cd}	5926±693 ^a	3040±243 ^c
	90	416±74 ^c	6611±426 ^a	2599±17 ^b
As(V)	0	1265±1 ^{ab}	6284±438 ^a	2341±132 ^a
	1	1307±86 ^b	2130±44 ^{b***}	1147±20 ^{b***}
	3	1170±11 ^{ab***}	2597±14 ^{c**}	1218±9 ^{b***}
	10	1227±95 ^{ab}	3206±179 ^{d***}	1800±163 ^{c**}
	30	1147±58 ^{ab}	3182±143 ^{d**}	1581±50 ^{c**}
	90	885±83 ^c	2860±370 ^{dc**}	1270±218 ^b
Gyökér				
As(III)	0	5411±514 ^a	6010±134 ^a	2638±56 ^a
	1	535±111 ^b	4407±446 ^b	1245±146 ^b
	3	392±53 ^b	4212±228 ^b	1253±74 ^b
	10	284±18 ^b	3189±242 ^c	1242±133 ^b
	30	402±65 ^b	4276±255 ^b	1419±92 ^b
	90	783±115 ^b	4306±108 ^b	1642±115 ^c
As(V)	0	5123±174 ^a	5939±69 ^a	2613±49 ^a
	1	2339±354 ^{b***}	4435±1150 ^b	1703±661 ^b
	3	1611±54 ^{b**}	4384±18 ^b	1750±86 ^{b**}
	10	1455±190 ^{b*}	3621±93 ^{b*}	1405±50 ^b
	30	1253±179 ^{b**}	4295±387 ^b	1661±181 ^b
	90	739±2 ^b	4049±7 ^{b*}	1370±19 ^b

Az azonos növényi rész esetén azonos betűvel jelölt kezelések között nincs szignifikáns különbség ($P\leq 0,05$). Szignifikáns különbség azonos szinten, de eltérő formában történő arzén-kezelés esetén: * $p<0,05$; ** $p<0,01$; *** $p<0,001$.

A táblázatban ismertetett adatok alapján megállapítható, hogy a gyökér Mg, P és S felvételét valamennyi alkalmazott As(III)-, illetve As(V)-kezelés gátolta. A Mg tekintetében mindez hasonlóságot mutat Raab et al. (2007) feljegyzéseivel, akik azt tapasztalták, hogy a tápoldat növekvő As-tartalma csökkentette a napraforgó

gyökerének Mg koncentrációját. Megfigyeltem továbbá, hogy az As(III)-dózisok hatására az esetek többségében jóval nagyobb mértékben csökkent a gyökér Mg-tartalma, mint az As(V)-kezeléseknél. A gyökér P-, valamint S felvételét azonban az alkalmazott arzénformák az esetek nagy részében megközelítőleg azonos mértékben gátolták.

A gyökér esetén tapasztaltakkal ellentétben, a hajtás makroelem-készletére az As(III)-, és As(V)-kezelések több esetben is eltérő jellegű hatást gyakoroltak. Amíg a hajtás P-tartalmában az alkalmazott As(III)-kezelések nem okoztak változást, addig az As(V)-dózisok esetén jelentős csökkenés következett be. A hajtás S koncentrációját ugyancsak valamennyi As(V)-kezelés szignifikánsan csökkentette, ezzel szemben azonban a 10 és 30 mg kg⁻¹-os As(III)-kezelések hatására szignifikáns növekedés volt tapasztalható. A Mg esetén az As(III)-, illetve As(V)-kezelések hasonlóképpen hatottak. A 30 és 90 mg kg⁻¹-os As(III)-kezelések hatására szignifikáns csökkenés következett be, csakúgy, mint a 90 mg kg⁻¹-os As(V)-kezelésnél.

Az azonos koncentrációjú, de eltérő formájú kezelések hatását összehasonlítva az alábbiakban leírtak állapíthatók meg. A gyökér tekintetében az As(III)-kezelések az esetek többségében szignifikánsan alacsonyabb Mg-tartalmat eredményeztek, mint az As(V)-dózisok. A P-, illetve a S-tartalmat illetően szignifikáns eltérés az azonos koncentrációjú As(III)- és As(V)-kezelések között csak elvétve volt megfigyelhető. A hajtás esetén azonban ennek az ellenkezőjét tapasztaltam. Az azonos koncentrációjú, de eltérő formájú arzénkezelések esetén mért Mg-tartalmak között az esetek többségében nem volt szignifikáns különbség, míg az As(V)-kezeléseknél az esetek nagy részében szignifikánsan alacsonyabb P, illetve S koncentrációkat mértem.

4.3.1.5. Növekvő koncentrációjú As(III)- és As(V)-kezelések hatása a rizoboxban nevelt kukorica csíranövény mikroelem felvételére

A kukorica csíranövény Cu-, Fe-, Mn-, Mo-, és Zn-tartalmában bekövetkező változásokat a 20. táblázat szemlélteti.

20. táblázat: Rizoboxban nevelt kukorica csíranövények mikroelem-tartalmában (mg kg⁻¹) bekövetkező változások a növekvő koncentrációjú (0, 1, 3, 10, 30 és 90 mg kg⁻¹) As(III)- és As(V)-kezelések függvényében (n=3±s.e.)

As-kezelés (mg kg ⁻¹)	Kukorica csíranövények mikroelem-tartalma (mg kg ⁻¹)					
	Cu	Fe	Mn	Mo	Zn	
Hajtás						
As(III)	0	6,58±0,86 ^a	113±8 ^{ab}	45,3±5,6 ^{ab}	1,36±0,09 ^a	65,31±5,01 ^{ab}
	1	6,83±1,06 ^{ab}	148±18 ^c	45,4±4,4 ^{ab}	1,08±0,14 ^b	65,61±2,66 ^{ab}
	3	7,19±0,43 ^{ab}	133±18 ^{abc}	39,4±3,1 ^a	0,48±0,012 ^c	68,76±9,08 ^{ab}
	10	8,23±1,22 ^{abc}	141±14 ^{bc}	49,6±1,7 ^b	0,287±0,029 ^d	63,18±1,08 ^{ab}
	30	9,50±0,91 ^{bc}	127±18 ^{abc}	50,1±4,1 ^b	0,198±0,018 ^d	70,1±9,47 ^b
	90	8,82±0,99 ^c	105±14 ^a	44,2±6,9 ^{ab}	0,242±0,034 ^d	53,49±2,19 ^a
As(V)	0	6,58±0,86 ^a	113±8 ^a	45,3±5,6 ^a	1,36±0,09 ^a	65,3±5 ^a
	1	5,80±0,14 ^{a*}	274±45 ^{b*}	62,5±5,0 ^{b*}	0,536±0,109 ^{b*}	119±6 ^{b**}
	3	59,2±11,5 ^{b**}	208±33 ^c	60,4±7,1 ^{b**}	0,169±0,024 ^{c***}	141±4 ^{c***}
	10	24,5±3,0 ^{c**}	128±17 ^a	42,8±1,8 ^{a**}	0,100±0,006 ^{c**}	84,7±4,7 ^{ad*}
	30	7,86±1,23 ^a	108±15 ^a	31,1±4,0 ^{c**}	0,126±0,02 ^c	96,1±16,5 ^d
	90	5,04±0,79 ^{a*}	104±1 ^a	28,4±1,5 ^c	0,124±0,01 ^{c*}	72,7±4,1 ^{a*}
Gyökér						
As(III)	0	12±1,3 ^{ab}	2639±363 ^a	99,0±0,6 ^a	4,15±0,21 ^a	75,6±3,4 ^a
	1	93±2 ^c	959±3 ^b	26,7±0,2 ^b	0,311±0,021 ^b	63,0±7,0 ^a
	3	45,9±8,4 ^b	2130±148 ^c	52,3±4,5 ^c	0,048±0,007 ^c	66,7±7,4 ^a
	10	15,9±1,5 ^{ab}	1778±12 ^d	37,5±1,2 ^d	0,116±0,006 ^{bc}	43,1±4,3 ^b
	30	9,79±1,56 ^{ab}	1931±6d ^c	50,2±2,1 ^c	0,145±0,016 ^{bc}	50,8±7,6 ^b
	90	5,95±0,02 ^a	1790±81 ^d	42,8±1,4 ^e	0,117±0,007 ^{bc}	44,5±5,6 ^b
As(V)	0	12±1,3 ^a	2471±306 ^a	99,2±0,8 ^a	4,15±0,21 ^a	75,6±3,4 ^a
	1	9,84±0,88 ^b	3232±222 ^{b***}	65,5±22,2 ^b	0,152±0,017 ^{b**}	37,5±2,6 ^{b***}
	3	8,16±0,22 ^{cd**}	3486±421 ^b	53,9±3,5 ^b	0,135±0,002 ^{b***}	40,2±2,9 ^{b*}
	10	7,02±0,11 ^c	3126±73 ^{b**}	35,4±1,4 ^c	0,115±0,014 ^b	36,2±2,6 ^b
	30	8,71±0,81 ^d	4115±489 ^c	49,4±5,8 ^{bc}	0,140±0,019 ^b	38,4±2,7 ^b
	90	7,07±0,18 ^c	2050±132 ^{a*}	32,6±1,1 ^{c**}	0,130±0,024 ^b	36,9±4 ^b

Az azonos növényi rész esetén azonos betűvel jelölt kezelések között nincs szignifikáns különbség (P≤0,05). Szignifikáns különbség azonos szinten, de eltérő formában történő arzén-kezelés esetén: *p<0,05; **p<0,01; ***p<0,001.

Az As(III)- és As(V)-kezelések a hajtás esetén a Mn kivételével valamennyi vizsgált elem koncentrációjára azonosképpen hatottak. A hajtás Mn-tartalmát elemezve megfigyeltem, hogy amíg az As(III)-kezelések hatására számottevő változás nem következett be, addig az alacsonyabb dózisú (1-3 mg kg⁻¹) As(V)-kezelések növelték, a nagyobb koncentrációjú kezelések (30-90 mg kg⁻¹) azonban a Mn koncentráció csökkenését eredményezték. A hajtás mikroelem-tartalmát tovább elemezve azt tapasztaltam, hogy a Mo-tartalom a kontroll növényénél volt a legnagyobb, az

alkalmazott kezelések mindegyike csökkenést eredményezett. A mikroelem összetételét tanulmányozva továbbá azt is megfigyeltem, hogy a hajtás Cu-, Fe és Zn-tartalma több esetben is szignifikánsan megnőtt az As(III)- és As(V)-kezelések hatására. Mindez részben megegyezik a Mallick et al. (2011) által megfigyeltekkel, miszerint a tápoldaton nevelt kukorica Fe-tartalma megnőtt a kezelések hatására, ugyanakkor az általam leírtakkal ellentétben az arzén Zn és Cu felvételre gyakorolt hatását nem tudta bizonyítani.

Amíg a hajtásnál az esetek többségében növekedés volt megfigyelhető, addig a gyökérnél az alkalmazott As(III)-, illetve As(V)-kezelések túlnyomó része csökkentette a vizsgált mikroelemek mennyiségét. Az As(III)-kezeléseknél a legkisebb (3 mg kg⁻¹) kezelés hatására ugyan megnőtt a gyökér Cu-tartalma, valamennyi dózis hatására azonban a Fe, Mn és Mo koncentrációja, míg a Zn koncentrációja pedig csak a 10-90 mg kg⁻¹-os kezelések hatására szignifikánsan lecsökkent. Az As(V)-tel kezelt növények esetén a gyökér Fe felhalmozását a 1-30 mg kg⁻¹-os kezelések serkentették, a Cu, Mn, Mo, valamint a Zn felvételét azonban valamennyi kezelési szint esetén gátolták.

4.3.2. Napraforgó teszt növényen végzett rizoboxos kísérlet

4.3.2.1. Növekvő koncentrációjú As(III)- és As(V)-kezelések hatása a rizoboxban nevelt napraforgó csíranövények szárazanyag-termékre

Az As(III)- és As(V)-kezelések napraforgó csíranövény szárazanyag-termékére gyakorolt hatását a 21. táblázat foglalja össze.

21. táblázat: Rizoboxban nevelt napraforgó csíranövények szárazanyag-termékében (g növény⁻¹) bekövetkező változások a növekvő koncentrációjú (0, 1, 3, 10, 30 és 90 mg kg⁻¹) As(III)- és As(V)-kezelések függvényében (n=15±s.e.)

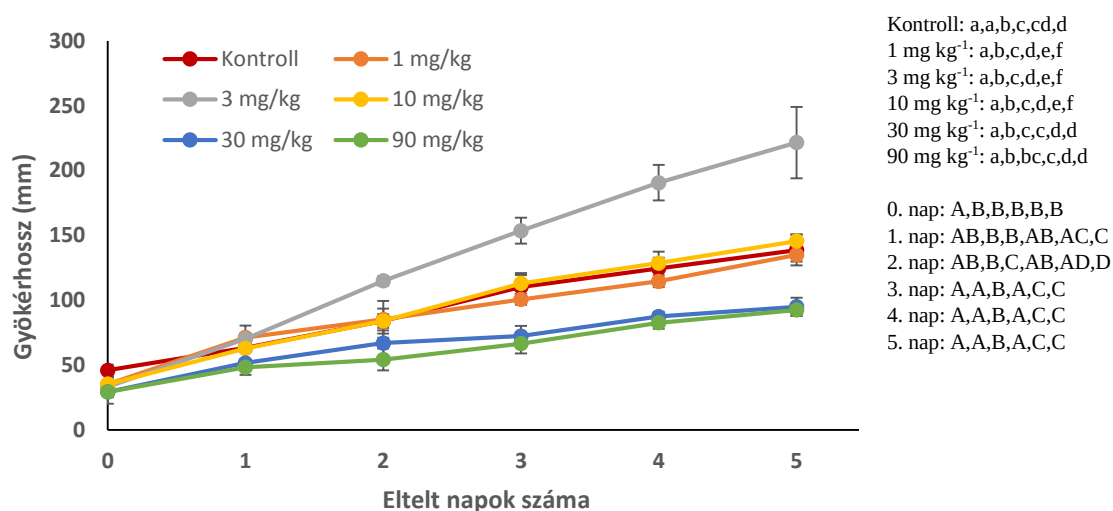
As-kezelés (mg kg ⁻¹)	Napraforgó csíranövények szárazanyag-terméke (g növény ⁻¹)			
	Hajtás		Gyökér	
	As(III)	As(V)	As(III)	As(V)
0	0,0386±0,0046 ^a	0,0386±0,0046 ^{ab}	0,0116±0,0014 ^a	0,0116±0,0014 ^a
1	0,0390±0,0134 ^a	0,0423±0,0079 ^{ab}	0,0107±0,0036 ^a	0,0119±0,0023 ^a
3	0,0380±0,0010 ^a	0,0453±0,0112 ^{ab}	0,0109±0,0018 ^a	0,0135±0,0021 ^a
10	0,0389±0,0070 ^a	0,0521±0,0127 ^b	0,0121±0,0017 ^a	0,0148±0,0037 ^a
30	0,0413±0,0138 ^a	0,0513±0,0147 ^b	0,0130±0,0045 ^a	0,0143±0,0048 ^a
90	0,0385±0,0134 ^a	0,0337±0,0111 ^a	0,0092±0,0031 ^a	0,0121±0,0040 ^a

Az azonos növényi rész esetén azonos betűvel jelölt kezelések között nincs szignifikáns különbség (P≤0,05). Szignifikáns különbség azonos szinten, de eltérő formában történő arzén-kezelés esetén: *p<0,05; **p<0,01; ***p<0,001.

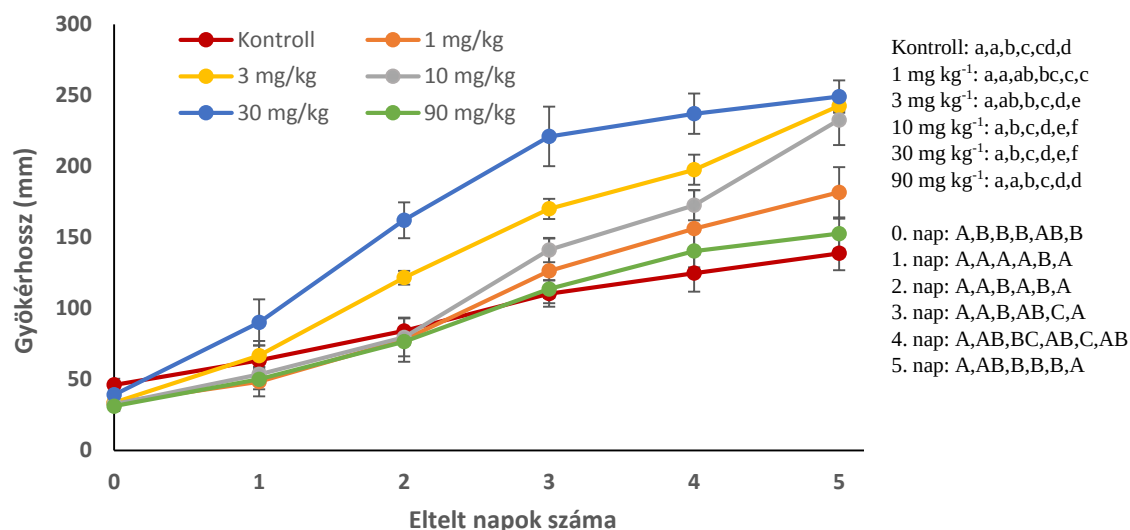
A rizoboxban nevelt napraforgó csíranövények szárazanyag-produktumára sem az As(III)-, sem az As(V)-kezelések nem gyakoroltak szignifikáns hatást.

4.3.2.2. Növekvő koncentrációjú As(III)- és As(V)-kezelések hatása a rizoboxban nevelt napraforgó csíranövények gyökérnövekedésére

A rizoboxban nevelt napraforgó csíranövények naponkénti gyökérnövekedését a 17-18. ábra szemlélteti.



17. ábra: Növekvő koncentrációjú (0, 1, 3, 10, 30 és 90 mg kg⁻¹) As(III)-kezelések hatása a rizoboxban nevelt napraforgó csíranövény gyökérnövekedésére (n=15±s.e.)



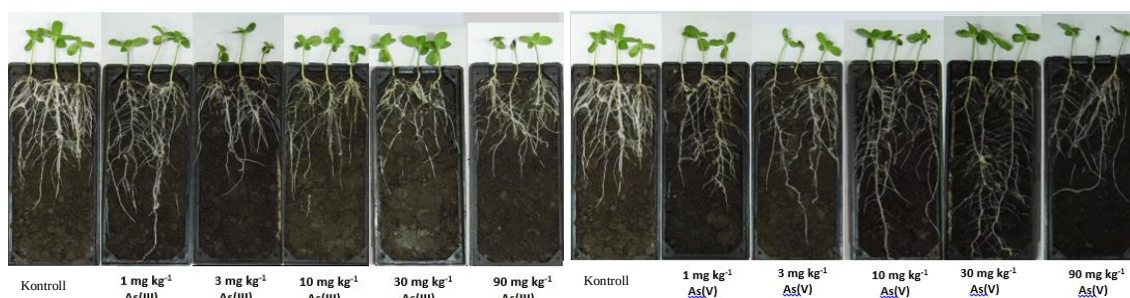
18. ábra: Növekvő koncentrációjú (0, 1, 3, 10, 30 és 90 mg kg⁻¹) As(V)-kezelések hatása a rizoboxban nevelt napraforgó csíranövény gyökérnövekedésére (n=15±s.e.)

A 17-18. ábrán bemutatott eredményeket elemezve általánosságban megállapítható, hogy a napraforgó gyökérnövekedése jelentős eltérést mutat a kukorica fejlődéséhez képest.

A rizoboxos kísérletek bontására – mint ahogyan a kukoricával végzett kísérletnél is történt – jellemzően akkor kerül sor, amikor a kontroll növény gyökere eléri a rizobox alját. A napraforgó teszt növényvel végzett kísérlet esetén azonban több esetben is azt tapasztaltam, hogy a kezelések hatására a csíranövények gyökere sokkalta nagyobb ütemben nőtt, mint a kontroll kezelésű növényé. Ebből adódóan a kísérlet felszámolása akkor következett be, amikor valamely kezelési szintnél a növények gyökere elérte a box alját.

Az As(III)-kezelések hatását elemezve megfigyeltem, hogy a 3 mg kg^{-1} -os kezelés jelentősen serkentette a gyökér növekedését, míg az 1 és 10 mg kg^{-1} -os dózisok számottevő hatást nem gyakoroltak a gyökér növekedésére, ugyanakkor a 30 - 90 mg kg^{-1} -os kezelések esetén a gyökér növekedése már erőteljesen gátolt volt.

Ezzel szemben az As(V)-kezelések esetén általánosságban elmondható, hogy a kezeletlen kontroll növény gyökere nőtt a legkisebb ütemben, a gyökérnövekedésre gyakorolt hatásuk alapján a különböző koncentrációjú As(V)-kezelések között az alábbi sorrend állítható fel: $30 \text{ mg kg}^{-1} > 3 \text{ mg kg}^{-1} > 10 \text{ mg kg}^{-1} > 1 \text{ mg kg}^{-1} > 90 \text{ mg kg}^{-1} > \text{kontroll}$. Az As(III)- és As(V)-kezelések gyökérnövekedésre gyakorolt hatását a 19. ábra is jól szemlélteti, mely arra is felhívja a figyelmet, hogy a növekvő koncentrációjú kezelések nemcsak a gyökérnövekedés intenzitására, de a mellékgyökérzet fejlettségére is hatással voltak.



19. ábra: Növekvő koncentrációjú As(III)- és As(V)-kezelések hatása a rizoboxban nevelt napraforgó csíranövények fejlődésére (Forrás: Saját)

4.3.2.3. Növekvő koncentrációjú As(III)- és As(V)-kezelések hatása a rizoboxban nevelt napraforgó csíranövények As-tartalmára

A rizoboxban nevelt napraforgó csíranövények As-tartalmát a növekvő koncentrációjú (0, 1, 3, 10, 30 és 90 mg kg⁻¹) As(III)-, illetve As(V)-kezelések függvényében a 22. táblázat foglalja össze.

22. táblázat: Növekvő koncentrációjú (0, 1, 3, 10, 30 és 90 mg kg⁻¹) As(III)- és As(V)-kezelések hatása a rizoboxban nevelt napraforgó csíranövény As-tartalmára (n=3±s.e.)

As-kezelés (mg kg ⁻¹)	Napraforgó csíranövény As-tartalma (mg kg ⁻¹)	
	Hajtás	Gyökér
As(III)	0	0,243±0,013 ^a
	1	0,358±0,030 ^{ab}
	3	0,533±0,024 ^{ab}
	10	0,742±0,075 ^{ab}
	30	2,15±0,16 ^b
	90	11,0±1,7 ^c
As(V)	0	0,243±0,013 ^a
	1	0,410±0,050 ^a
	3	0,536±0,066 ^a
	10	1,34±0,05 ^a
	30	15,6±2,3 ^{b**}
	90	10,7±0,7 ^c

Az azonos növényi rész esetén azonos betűvel jelölt kezelések között nincs szignifikáns különbség (P≤0,05). Szignifikáns különbség azonos szinten, de eltérő formában történő arzén-kezelés esetén: *p<0,05; **p<0,01; ***p<0,001.

Mindkét kezelési forma esetén az As döntően a gyökérben akkumulálódott és csak kisebb részben volt jelen a hajtásban, amely elsősorban a gyökér „szűrő” hatásának köszönhető. A kísérleti növény hajtásának, illetve gyökerének As-tartalmát a kontrollhoz képest a 30 és 90 mg kg⁻¹-os As(III)- és As(V)-kezelések jelentősen fokozták, az alacsonyabb koncentrációjú dózisok (1, 3, 10 és 30 mg kg⁻¹) esetén azonban szignifikáns változás nem volt megfigyelhető. Az As(III)-kezeléseknél a legmagasabb értéket a hajtás, illetve a gyökérmintákban is a 90 mg kg⁻¹-os dózis esetén jegyeztem fel, míg az As(V)-kezeléseknél ez csak a gyökér esetén igaz. A hajtást illetően a 30 mg kg⁻¹-os As(V)-kezelés növelte leginkább az As koncentrációját, a 90 mg kg⁻¹-os kezelés ehhez képest kismértékű visszaesést eredményezett. A hasonló koncentrációjú, de eltérő formájú kezelések hatása közt szignifikáns különbséget mind a hajtás, mind a gyökér esetén csak a 30 mg kg⁻¹-os kezelésnél figyeltem meg. Mindkét

növényi rész esetén az As(V)-kezelés hatására jóval magasabb As koncentrációt tapasztaltam, mint az As(III)-kezelés alkalmazásakor.

A 22. táblázatban ismertetett eredmények alapján megerősíthető a tápoldatos kísérlet esetén tett megállapítás, mely szerint az As(III)- és As(V)-kezelések a napraforgó esetén intenzívebb As-akkumulációt eredményeztek, mint a kukorica csíranövény esetén, mely ismételten felhívja a figyelmet az egy- és kétszikű növények As felvétele közötti különbségre.

A tápoldatos illetve rizoboxos kísérlet esetén mért As-értékeket összehasonlítva elmondható, hogy a tápoldaton nevelt napraforgó As-tartalma, jóval magasabb volt, mint a rizoboxban nevelt növényé, melyek magyarázata megegyezik a korábban a kukorica esetén már ismertetettekkel.

A napraforgó csíranövény esetén is meghatároztam, hogy adott növény mennyi As-t vont ki a talajból (23. táblázat).

23. táblázat: Rizoboxban nevelt napraforgó csíranövény által felvett As mennyisége a növekvő koncentrációjú (0, 1, 3, 10, 30 és 90 mg kg⁻¹) As(III)- és As(V)-kezelések függvényében (n=3±s.e.)

Napraforgó csíranövény által felvett As mennyisége				
As-kezelés (mg kg ⁻¹)		(μg)		
		Hajtás	Gyökér	Teljes növény
As(III)	0	0,00938±0,00006 ^a (22)	0,0329±0,0001 ^a (78)	0,0423
	1	0,0140±0,0004 ^b (22)	0,0500±0,0001 ^a (78)	0,0640
	3	0,0203±0,0002 ^b (20)	0,0794±0,0007 ^a (80)	0,0997
	10	0,0289±0,0005 ^b (8)	0,322±0,007 ^b (92)	0,351
	30	0,0888±0,0022 ^b (11)	0,693±0,004 ^b (89)	0,781
	90	0,424±0,023 ^c (11)	3,57±0,11 ^c (89)	3,99
As(V)	0	0,00938±0,00006 ^a (22)	0,0329±0,0001 ^a (78)	0,0423
	1	0,0173±0,0004 ^b * (28)	0,0437±0,0012 ^{a*} (72)	0,0610
	3	0,0243±0,0007 ^b (20)	0,0940±0,0027 ^{a*} (80)	0,118
	10	0,0698±0,0006 ^b *** (20)	0,274±0,013 ^{b*} (80)	0,344
	30	0,800±0,034 ^c *** (40)	1,17±0,08 ^{c***} (60)	1,97
	90	0,361±0,008 ^d * (7)	4,46±0,05 ^{d*} (93)	4,82

Az azonos növényi rész esetén azonos betűvel jelölt kezelések között nincs szignifikáns különbség (P≤0,05). Szignifikáns különbség azonos szinten, de eltérő formában történő arzén-kezelés esetén: *p<0,05; **p<0,01; ***p<0,001. A zárójelben feltüntetett értékek az adott növényi rész és a teljes növény által felvett As mennyiségének az arányát fejezik ki %-ban.

Az eredmények alapján elmondható, hogy a hajtás által kivont As mennyiségét valamennyi dózis, míg a gyökér által felvett As mennyiséget a 10, 30 és 90 mg kg⁻¹ kezelések szignifikánsan növelték mindkét alkalmazott arzénforma esetén. A

teljes növény által kivont As mennyisége a növekvő koncentrációjú As(III)- és As(V)-kezelések hatására folyamatosan nőtt, a legnagyobb kezelések esetén megközelítőleg két nagyságrenddel nagyobb értéket tapasztaltam, mint a kontroll növény esetén.

A napraforgó csíranövények egyes részei által akkumulált As mennyiségét figyelembe véve továbbá megerősíthető az a megállapítás, mely szerint az arzén nehezen mozog a növényen belül, nagyjából a gyökérben van jelen és csak kismértékben transzlokálódik a talajfelszín feletti szervek irányába.

A rizoboxban nevelt egy- és kétszikű növények eredményeit összevetve elmondható, hogy az 1 mg kg⁻¹-os kezelési szint esetén tapasztaltaktól eltekintve valamennyi As(III)- és As(V)-dózis esetén megfigyelhető volt, hogy a napraforgó teszt növények gyökere kisebb mértékben tudta visszatartani az arzént, a hajtásba nagyobb mennyiség jutott be, mint a kukorica csíranövény esetén.

4.3.2.4. Növekvő koncentrációjú As(III)- és As(V)-kezelések hatása a rizoboxban nevelt napraforgó csíranövények makroelem felvételére

Az esszenciális makroelemként funkcionáló Mg, P, és S mennyiségében fellépő változásokat a 24. táblázat foglalja össze.

A napraforgó csíranövény hajtásának Mg-tartalmát megvizsgálva megállapítható, hogy az 1-30 mg kg⁻¹-os As(III)-dózisok a kontrollhoz viszonyítva növekedést okoztak, a legnagyobb (90 mg kg⁻¹) kezelés hatására azonban a hajtás Mg koncentrációja visszaesett a kontrollnál tapasztalt szintre. Az As(V)-kezelések esetén valamennyi alkalmazott dózis statisztikailag igazolható módon növelte a hajtás Mg koncentrációját. A különböző arzénformák által kiváltott növekedés intenzitását összehasonlítva megállapítható, hogy az As(V)-kezelések erőteljesebb növekedést indukáltak.

24. táblázat: Rizoboxban nevelt napraforgó csíranövények makroelem-tartalmában (mg kg^{-1}) bekövetkező változások a növekvő koncentrációjú (0, 1, 3, 10, 30 és 90 mg kg^{-1}) As(III)- és As(V)-kezelések függvényében ($n=3\pm s.e.$)

As-kezelés (mg kg ⁻¹)		Napraforgó csíranövények makroelem-tartalma (mg kg ⁻¹)		
		Mg	P	S
Hajtás				
As(III)	0	1950±27 ^a	2444±29 ^a	1094±5 ^a
	1	2217±30 ^b	2344±60 ^a	1209±15 ^b
	3	2333±67 ^c	2349±119 ^{ab}	1303±44 ^c
	10	2093±55 ^d	2423±127 ^a	1555±12 ^d
	30	2278±70 ^b	2191±83 ^{ab}	1673±33 ^e
	90	2010±90 ^{ad}	2204±74 ^b	1494±33 ^f
As(V)	0	1950±27 ^a	2444±29 ^a	1094±5 ^a
	1	2401±58 ^{b***}	2354±73 ^a	1404±27 ^{b****}
	3	4586±41 ^{c****}	5124±287 ^{b***}	2699±75 ^{c****}
	10	6678±123 ^{d****}	6453±202 ^{c****}	5405±254 ^{d*}
	30	6555±219 ^{d****}	8027±338 ^{d****}	4062±69 ^{e****}
	90	7054±137 ^{e****}	6660±74 ^{b****}	4133±38 ^{f****}
Gyökér				
As(III)	0	4645±786 ^a	6225±901 ^a	2848±373 ^a
	1	3284±39 ^{ab}	5401±141 ^a	2543±34 ^a
	3	1463±1081 ^{bc}	5724±573 ^a	2893±100 ^a
	10	2858±5 ^{ab}	5688±93 ^a	3823±74 ^a
	30	3076±15 ^{ab}	5436±49 ^a	3260±77 ^a
	90	2230±17 ^{bc}	5169±120 ^a	2469±75 ^a
As(V)	0	4645±786 ^a	6225±901 ^a	2848±373 ^a
	1	3631±123 ^{ab}	4856±67 ^{a*}	2421±24 ^a
	3	3104±260 ^{abc}	5774±725 ^a	2615±10 ^{a*}
	10	3228±277 ^{abc}	4698±593 ^a	2668±305 ^{a*}
	30	2478±177 ^{bc}	5450±220 ^a	2579±122 ^a
	90	1775±163 ^{c*}	4986±108 ^a	2246±60 ^{a*}

Az azonos növényi rész esetén azonos betűvel jelölt kezelések között nincs szignifikáns különbség ($P\leq 0,05$). Szignifikáns különbség azonos szinten, de eltérő formában történő arzén-kezelés esetén: * $p<0,05$; ** $p<0,01$; *** $p<0,001$.

A 24. táblázat eredményeit tovább elemezve megállapítható, hogy a hajtás P-tartalmára az As(III)- és As(V)-kezelések eltérőképpen hatottak. Amíg az As(III)-kezelések esetén a legnagyobb (90 mg kg^{-1}) kezelés a kontrollhoz képest szignifikáns csökkenést eredményezett, addig a 3-90 mg kg^{-1} -os As(V)-kezelések jelentősen növelték a hajtás P koncentrációját.

Azt tapasztaltam továbbá, hogy a hajtás S-tartalmát valamennyi As(III)-, illetve As(V)-kezelés fokozta, az As(V)-kezelések esetén azonban ismételtén jóval intenzívebb S koncentráció növekedést tapasztaltam, mely statisztikailag is alátámasztható volt.

A gyökér makroelem készletében jóval kevesebb esetben történt statisztikailag igazolható változás. A hajtás esetén megfigyeltéktől eltérően a gyökér Mg-tartalma több esetben lecsökkent. A kezelések Mg felvételére gyakorolt zavaró hatása az As(III)-dózisok esetén a 3, illetve 90 mg kg⁻¹-os koncentrációknál, az As(V)-kezeléseknél a két legnagyobb dózisonál (90 és 270 mg kg⁻¹) nyilvánult meg. A gyökér P-, illetve S-tartalmát a kezelések számottevően nem befolyásolták.

4.3.2.5. Növekvő koncentrációjú As(III)- és As(V)-kezelések hatása a rizoboxban nevelt napraforgó csíranövények mikroelem felvételére

A talaj növekvő arzén-tartalma, a kísérleti növény makroelem összetétele mellett, a mikroelem készletében is számottevő változást okozott, ahogyan azt a 25. táblázatban feltüntetett értékek is mutatják.

Mind az As(III)-, mind az As(V)-kezelés hatására jelentősen változott a rizoboxban nevelt csíranövény hajtásának mikroelem összetétele, azonban amíg az As(V)-kezelések fokozták a vizsgált mikroelemek mennyiségét, addig az As(III)-kezelések által kiváltott hatás az egyes mikroelemek tekintetében eltérő volt.

Az As(V)-kezeléseknél statisztikailag igazolható növekedést a Fe-, a Mn- és a Zn-tartalom tekintetében valamennyi kezelés, míg a Cu koncentrációt illetően a 3-90 mg kg⁻¹-kezelések, a Mo-tartalom tekintetében pedig a 10-90 mg kg⁻¹-os kezelések esetén tudtam kimutatni. A napraforgó csíranövények hajtásának Mn és Fe-tartalmát az As(III)-dózisok túlnyomórészt ugyancsak növelték, azonban a Cu, és a Mo mennyiségében több kezelési szint esetén is csökkenés volt megfigyelhető. Mindemellett megfigyeltem, hogy amíg az alacsonyabb koncentrációjú (1-3 mg kg⁻¹) As(III)-kezelések hatására kismértékű növekedés következett be a hajtás Zn-tartalmában, addig a legnagyobb kezelés (90 mg kg⁻¹) gátló módon hatott.

25. táblázat: Rizoboxban nevelt napraforgó csíranövények mikroelem-tartalmában (mg kg⁻¹) bekövetkező változások a növekvő koncentrációjú (0, 1, 3, 10, 30 és 90 mg kg⁻¹) As(III)- és As(V)-kezelések függvényében (n=3±s.e.)

As-kezelés (mg kg ⁻¹)		Napraforgó csíranövények mikroelem-tartalma (mg kg ⁻¹)				
		Cu	Fe	Mn	Mo	Zn
Hajtás						
As(III)	0	8,74±0,70 ^a	96,5±3,1 ^a	16,1±0,5 ^a	0,569±0,013 ^{ab}	29,4±0,7 ^{ab}
	1	7,99±0,40 ^b	142±10 ^b	19,2±0,7 ^b	0,469±0,043 ^{cd}	31,3±0,4 ^c
	3	7,59±0,42 ^b	152±13 ^c	27,1±0,9 ^{cd}	0,640±0,044 ^{ab}	33,0±0,7 ^c
	10	8,08±0,25 ^{ab}	116±5 ^b	22,3±1,1 ^e	0,649±0,055 ^b	31,0±1,1 ^{bc}
	30	7,72±0,21 ^b	124±11 ^b	24,0±0,3 ^c	0,553±0,071 ^{ad}	26,8±1,1 ^a
	90	7,30±0,21 ^b	70,1±10,1 ^d	27,6±1,2 ^d	0,460±0,012 ^d	25,5±1,6 ^d
As(V)	0	8,74±0,70 ^a	96,5±3,1 ^a	16,1±0,5 ^a	0,569±0,013 ^a	29,4±0,7 ^a
	1	8,88±0,50 ^a	226±18 ^{b***}	30,5±2,3 ^{b**}	0,504±0,043 ^a	30,4±0,4 ^b
	3	26,1±0,5 ^{b***}	179±3 ^c	67,0±8,4 ^{b**}	0,527±0,002 ^{a*}	80,0±0,1 ^{c***}
	10	19,8±0,6 ^{c***}	160±23 ^c	79,3±3,2 ^{bc**}	0,707±0,007 ^b	87,8±1,7 ^{d***}
	30	23,4±1,0 ^{b***}	162±5 ^{c**}	85,0±6,4 ^{bc***}	0,874±0,027 ^{c*}	90,9±1,4 ^{e***}
	90	21,7±0,4 ^{d***}	217±18 ^{b**}	89,0±13,1 ^{c**}	0,868±0,038 ^{c**}	91,1±0,9 ^{f***}
Gyökér						
As(III)	0	15,2±2,4 ^a	2379±1 ^a	116±5 ^{ab}	0,450±0,006 ^a	60,3±4,3 ^a
	1	19,9±1,5 ^a	3154±132 ^{ab}	132±15 ^b	0,343±0,018 ^a	52,8±5,0 ^a
	3	16,6±4,6 ^a	3011±16 ^{ab}	113±8 ^{abc}	0,330±0,004 ^a	45,8±6,6 ^a
	10	20,2±0,8 ^a	3347±393 ^b	105±8 ^{abc}	0,639±0,154 ^a	56,3±1,7 ^a
	30	18,2±0,5 ^a	2589±139 ^{ab}	81±6 ^{ac}	3,41±1,01 ^b	52,0±1,7 ^a
	90	20,9±0,1 ^a	2841±299 ^{ab}	80±8 ^c	1,09±0,30 ^a	74,0±2,1 ^a
As(V)	0	15,2±2,4 ^a	2379±1 ^{ab}	116±5 ^a	0,450±0,006 ^{ab}	60,3±4,3 ^a
	1	19,2±0,2 ^{ab}	3243±178 ^a	104±8 ^a	0,839±0,134 ^{c*}	51,1±0,7 ^a
	3	21,2±1,9 ^b	3436±253 ^a	92±10 ^a	0,516±0,113 ^b	45,8±6,6 ^a
	10	17,4±1,3 ^{ab}	2904±441 ^{ab}	94±3 ^a	0,349±0,042 ^a	48,9±0,2 ^{a*}
	30	20,9±0,6 ^{ab}	2497±172 ^{ab}	112±9 ^a	0,388±0,037 ^a	67,2±1,1 ^a
	90	20,7±0,5 ^{ab}	2136±377 ^b	85±0 ^b	0,388±0,030 ^{a**}	69,1±3,6 ^{a**}

Az azonos növényi rész esetén azonos betűvel jelölt kezelések között nincs szignifikáns különbség (P≤0,05). Szignifikáns különbség azonos szinten, de eltérő formában történő arzén-kezelés esetén: *p<0,05; **p<0,01; ***p<0,001.

A gyökérben jelenlévő mikroelemek mennyiségét az As(III)- és As(V)-kezelések kevésbé befolyásolták. Az As(III)-mal kezelt növényeknél a gyökér Cu és Zn koncentrációjában, az As(V)-tel kezelt növényeknél a Fe és Zn koncentrációjában számottevő változás nem következett be. Megfigyeltem továbbá, hogy a gyökér Mn-tartalmát mindkét kezelési forma esetén csökkentette a legnagyobb dózis (270 mg kg⁻¹). A további esetekben elmondható, hogy az alkalmazott As(III)- és As(V)-dózisok csak egy-egy kezelési szinten okoztak statisztikailag igazolható változást, mely minden esetben növekedést jelentett.

4.4. A TENYÉSZEDÉNYES KÍSÉRLET EREDMÉNYEI

4.4.1. Növekvő koncentrációjú As(III)- és As(V)-kezelések hatása a tenyészedényben nevelt zöldborsó szárazanyag-produktumára

A tenyészedényben nevelt különböző fejlődési stádiumban lévő zöldborsó növény vegetatív szerveinek szárazanyag-produktumát a 26. táblázat foglalja össze.

26. táblázat: Tenyészedényben nevelt zöldborsó vegetatív növényi részeinek szárazanyag-produktumában (g növény⁻¹) bekövetkező változások a növény fejlődésének egyes fenofázisaiban (4 nóduszos állapot, virágzás kezdete, zöldérés, teljesérés) a növekvő koncentrációjú (0, 3, 10, 30, 90 és 270 mg kg⁻¹) As(III)- és As(V)-kezelések függvényében (n=4±s.e.)

As- kezelés (mg kg ⁻¹)	Száraztömeg (g növény ⁻¹)					
	Levél		Szár		Gyökér	
	As(III)	As(V)	As(III)	As(V)	As(III)	As(V)
I. fenofázis						
0	0,162±0,042 ^a	0,162±0,042 ^a	0,123±0,039 ^a	0,123±0,039 ^{ab}	0,0223±0,0055 ^a	0,0223±0,0055 ^a
3	0,135±0,010 ^b	0,175±0,026 ^{ab*}	0,0817±0,0087 ^b	0,151±0,051 ^{b*}	0,0210±0,0046 ^a	0,0312±0,0069 ^{b*}
10	0,123±0,010 ^b	0,160±0,038 ^{a*}	0,0813±0,0069 ^b	0,111±0,014 ^{ab}	0,0178±0,0058 ^a	0,0215±0,0048 ^a
30	0,117±0,007 ^b	0,121±0,028 ^b	0,0785±0,0053 ^b	0,0837±0,0154 ^a	0,0176±0,0059 ^a	0,0181±0,0051 ^a
90	0,114±0,013 ^b	0,109±0,024 ^b	0,0711±0,0083 ^b	0,0740±0,0119 ^{ac}	0,0107±0,0007 ^b	0,0164±0,0016 ^{a*}
270	0,0198±0,0056 ^c	0,0215±0,0052 ^c	0,0207±0,0058 ^c	0,0287±0,0071 ^c	0,0101±0,0034 ^b	0,0157±0,0053 ^a
II. fenofázis						
0	0,192±0,048 ^a	0,192±0,048 ^a	0,255±0,085 ^a	0,255±0,085 ^a	0,0304±0,0077 ^a	0,0304±0,0077 ^a
3	0,165±0,014 ^{ab}	0,218±0,060 ^a	0,170±0,027 ^b	0,266±0,070 ^a	0,0287±0,0095 ^a	0,0335±0,0068 ^a
10	0,145±0,046 ^{ab}	0,311±0,078 ^{b**}	0,156±0,037 ^b	0,345±0,081 ^{a**}	0,0255±0,0053 ^{ab}	0,0299±0,0079 ^{ab}
30	0,133±0,041 ^b	0,208±0,056 ^{a*}	0,141±0,036 ^b	0,276±0,070 ^{a*}	0,0200±0,0059 ^{bc}	0,0267±0,0077 ^{abc}
90	0,128±0,030 ^b	0,112±0,039 ^c	0,126±0,037 ^b	0,122±0,025 ^b	0,0159±0,0051 ^c	0,0202±0,0069 ^{bc}
270	0,0298±0,0106 ^c	0,0294±0,0098 ^d	0,0238±0,0046 ^c	0,0323±0,0079 ^c	0,0130±0,0044 ^c	0,0189±0,0057 ^c
III. fenofázis						
0	0,226±0,072 ^a	0,226±0,072 ^a	0,299±0,087 ^a	0,299±0,087 ^a	0,0463±0,0127 ^{ab}	0,0463±0,0127 ^a
3	0,176±0,038 ^{ab}	0,240±0,078 ^a	0,194±0,066 ^b	0,306±0,068 ^{a*}	0,0497±0,0149 ^b	0,0452±0,0035 ^a
10	0,174±0,049 ^{ab}	0,356±0,049 ^{b**}	0,192±0,061 ^b	0,391±0,113 ^{b**}	0,0394±0,0087 ^{ab}	0,0455±0,0067 ^a
30	0,173±0,059 ^{ab}	0,248±0,055 ^{a*}	0,185±0,041 ^b	0,299±0,046 ^{a***}	0,0341±0,0033 ^{ab}	0,0415±0,0105 ^{ab}
90	0,159±0,046 ^b	0,116±0,028 ^c	0,176±0,057 ^b	0,133±0,028 ^c	0,0323±0,0104 ^{ab}	0,0300±0,0071 ^{bc}
270	0,0379±0,0126 ^c	0,034±0,0106 ^c	0,027±0,0074 ^c	0,0399±0,0124 ^{d*}	0,0293±0,0061 ^b	0,0238±0,0072 ^c
IV. fenofázis						
0	0,240±0,061 ^{ab}	0,240±0,061 ^a	0,305±0,064 ^{ab}	0,305±0,064 ^a	0,0607±0,0119 ^a	0,0607±0,0119 ^a
3	0,368±0,072 ^c	0,246±0,056 ^{a*}	0,374±0,129 ^b	0,316±0,085 ^a	0,0565±0,0194 ^{ab}	0,0505±0,0097 ^{ab}
10	0,301±0,039 ^{bc}	0,379±0,052 ^{b*}	0,322±0,036 ^{ab}	0,465±0,108 ^{b*}	0,0527±0,0110 ^{ab}	0,0471±0,0092 ^{bc}
30	0,238±0,074 ^{ab}	0,262±0,037 ^a	0,263±0,032 ^{ab}	0,307±0,048 ^a	0,0450±0,0150 ^{ab}	0,0463±0,0119 ^{bc}
90	0,197±0,059 ^a	0,127±0,036 ^c	0,209±0,028 ^a	0,153±0,043 ^c	0,0430±0,0120 ^b	0,0342±0,0074 ^c
270	0,0554±0,0182 ^d	0,0435±0,0119 ^d	0,065±0,0107 ^c	0,0525±0,0154 ^d	0,0249±0,0081 ^c	0,0341±0,0089 ^c

Az azonos növényi rész esetén azonos betűvel jelölt kezelések között nincs szignifikáns különbség (P≤0,05). Szignifikáns különbség azonos szinten, de eltérő formában történő arzén-kezelés esetén: *p<0,05; **p<0,01; ***p<0,001.

A zöldborsó vegetatív növényi részeinek száraztömegében bekövetkező változásokat figyelembe véve megállapítható, hogy a növekvő koncentrációjú As(III)-kezelés hatására a tesztnövény fejlődésének I., II. és III. fenofázisában csökkent a levél száraz tömege. Szignifikáns csökkenést azonban a növény fejlődésének előrehaladtával csak az egyre nagyobb koncentrációjú kezelések eredményeztek. A kontrollhoz képest az I. fenofázis esetén a 3-270 mg kg⁻¹-os, a II. fenofázisnál a 30-270 mg kg⁻¹-os, a III. fenofázis esetén pedig csak a 90-270 mg kg⁻¹-os As(III)-kezelések hatására következett be szignifikáns csökkenés. A IV. fenofázisban a legkisebb (3 mg kg⁻¹-os) kezelés pozitívan hatott a levél száraztömegére, a legnagyobb kezelés (270 mg kg⁻¹) azonban ez esetben is csökkenést eredményezett. Összességében megállapítható, hogy a kontrollhoz képest a legnagyobb dózisú kezelésnél minden fenofázisban jelentős csökkenés következett be, azonban a csökkenés mértéke a növény fejlődésének előrehaladtával kissé mérséklődött.

Az As(V)-kezelésben részesített zöldborsó levelének szárazanyag tartalma az I. fenofázisban szignifikánsan csökkent a 30-270 mg kg⁻¹-os kezelések hatására. A II-IV. fenofázisoknál azonban azt tapasztaltam, hogy a kontrollhoz viszonyítva a 10 mg kg⁻¹-os kezelés statisztikailag bizonyítható módon fokozta a szárazanyag-tartalmat, a 90-270 mg kg⁻¹-os dózisok azonban minden esetben visszaesést eredményeztek.

A 26. táblázat továbbá arra is felhívja a figyelmet, hogy a szár szárazanyag akkumulációjára az I., II. és III. fenofázis esetén valamennyi As(III)-kezelés gátló hatást fejtett ki, a IV. fenofázisnál azonban szignifikáns csökkenés csak a 270 mg kg⁻¹-os kezelés esetén volt megfigyelhető.

Azt tapasztaltam továbbá, hogy az I. fenofázisnál az As(V)-tel kezelt talajon termesztett zöldborsó szárának szárazanyag-tartalmát a kontrollhoz képest a legkisebb (3 mg kg⁻¹) kezelés fokozta, azonban a legnagyobb kezelés (270 mg kg⁻¹) csökkenést eredményezett. Megfigyeltem továbbá, hogy a II-IV. fenofázisoknál a 270 mg kg⁻¹-os dózis mellett a 90 mg kg⁻¹-os kezelés is gátló hatást fejtett ki, ugyanakkor a 10 mg kg⁻¹-os mind a zöldérés (III. fenofázis), mind a teljesérés (IV. fenofázis) stádiumában pozitívan hatott a szár száraz tömegére.

A gyökér szárazanyag felhalmozását megvizsgálva általánosságban elmondható, hogy az alkalmazott As(III)-kezelések negatívan hatottak a gyökér szárazanyag felhalmozására, mindezt statisztikailag is alátámasztani azonban csak az alábbi esetekben tudtam: az I. és a IV. fenofázisnál a 90-270 mg kg⁻¹-os, a II. fenofázisnál a

30-270 mg kg⁻¹-os kezelés eredményezett szignifikáns csökkenést. A III. fenofázis tekintetében statisztikailag igazolható változást nem tapasztaltam.

Az As(V)-tel kezelt talajon termesztett zöldborsó gyökerének szárazanyag-tartalma az I. fenofázis esetén a legkisebb (3 mg kg⁻¹) kezelés hatására szignifikánsan nőtt a kontrollhoz képest. A növény fejlődésének előrehaladtával azonban az alacsonyabb koncentrációjú As(V)-kezelések száraztömegre gyakorolt pozitív hatását már nem tudtam bizonyítani. A nagy koncentrációjú As-dózisok indukálta szárazanyag-produktum csökkenését viszont igazolni tudtam a II-III. fenofázis esetén a 90-270 mg kg⁻¹-os, a IV. fenofázis esetén pedig a 10-270 mg kg⁻¹-os As(V)-dózisok esetén. A növekvő koncentrációjú As(III)- és As(V)-kezelések hatását a teljesérés fenofázisában a 20. ábra is jól szemlélteti.



20. ábra: Növekvő koncentrációjú (0, 3, 10, 30, 90 és 270 mg kg⁻¹) As(III)- és As(V)-kezelések hatása a tenyészvényben nevelt zöldborsó növény fejlődésére (Forrás: Saját)

A vegetatív növényi szervek mellett vizsgáltam a generatív szervek szárazanyag-produktumában bekövetkező változásokat is. A zöldérés, valamint a teljesérés fenofázisában a borsóhévely száraztömegét a 27. táblázat összesíti.

27. táblázat: Borsóhüvely (g) száraztömegében bekövetkező változások a növény fejlődésének III. (zöldérés) és IV. (teljesérés) fenofázisaiban a növekvő koncentrációjú (0, 3, 10, 30, 90 és 270 mg kg⁻¹) As(III)- és As(V)-kezelések függvényében (n=4±s.e.)

Fenofázis	As-kezelés (mg kg ⁻¹)	Borsóhüvely száraztömeg (g növény ⁻¹)	
		As(III)	As(V)
III.	0	0,229±0,005 ^a	0,229±0,005 ^a
	3	0,128±0,044 ^b	0,239±0,033 ^{a*}
	10	0,109±0,033 ^b	0,249±0,055 ^{a***}
	30	0,0633±0,0186 ^c	0,220±0,058 ^{a**}
	90	0,0533±0,0098 ^c	0,126±0,041 ^{b**}
	270	0,0288±0,0093 ^c	0,0360±0,0068 ^c
IV.	0	0,241±0,082 ^a	0,241±0,082 ^a
	3	0,242±0,083 ^a	0,271±0,075 ^{ab}
	10	0,239±0,058 ^a	0,339±0,077 ^{b*}
	30	0,208±0,066 ^{ab}	0,251±0,066 ^{ab}
	90	0,141±0,042 ^{bc}	0,186±0,049 ^a
	270	0,0812±0,0054 ^c	0,0435±0,0223 ^c

Az azonos növényi rész esetén azonos betűvel jelölt kezelések között nincs szignifikáns különbség (P≤0,05). Szignifikáns különbség azonos szinten, de eltérő formában történő arzén-kezelés esetén: *p<0,05; **p<0,01; ***p<0,001.

A fenti táblázatban ismertetett eredmények rámutatnak arra, hogy az As(III)-kezelések hatására csökkent a borsóhüvely szárazanyag-tartalma, a növény fejlődésének előrehaladtával, statisztikailag igazolható csökkenést azonban csak az egyre nagyobb koncentrációjú kezelések okoztak. Megfigyeltem ugyanis, hogy amíg a zöldérés fenofázisában a szárazanyag beépülés már a legkisebb As(III)-kezelés (3 mg kg⁻¹) esetén is gátolt volt, addig a teljesérés szakaszában a borsóhüvely száraz tömege jelentősen csak a 90-270 mg kg⁻¹-os As(III)-dózisok hatására csökkent.

Az As(V)-tel kezelt növények esetén részben hasonló tendenciát figyeltem meg, hiszen a zöldérés stádiumában a borsóhüvely szárazanyag-tartalma a 90 és 270 mg kg⁻¹-os kezelés eredményeként egyaránt csökkent, a teljesérés fenofázisában jelentős mértékű csökkenést azonban csak a 270 mg kg⁻¹-os dózis okozott. Ugyanakkor a vegetatív részeknél, a több esetben is tapasztaltakhoz hasonlóan, a 10 mg kg⁻¹-os As(V)-kezelés a teljesérés stádiumában fokozta a borsóhüvely száraztömegét, mely összhangban van Gulz és Gupta (2000) azon megállapításával, miszerint bár az arzén toxikus, kis koncentrációban hasznos lehet a növények számára.

A borsószem száraztömegét az As(III)- és As(V)-kezelések függvényében a 28. táblázat tartalmazza.

28. táblázat: A borsószem szárazanyag-produktumában (g) bekövetkező változások a növekvő koncentrációjú (0, 3, 10, 30, 90 és 270 mg kg⁻¹) As(III)- és As(V)-kezelések függvényében (n=4±s.e.)

As-kezelés (mg kg ⁻¹)	Borsószem száraztömeg (g növény ⁻¹)	
	As(III)	As(V)
0	0,283±0,101 ^a	0,283±0,101 ^{ab}
3	0,264±0,064 ^{ab}	0,350±0,091 ^b
10	0,228±0,072 ^{ab}	0,375±0,123 ^{b*}
30	0,175±0,056 ^{bc}	0,288±0,081 ^{ab**}
90	0,084±0,010 ^c	0,191±0,057 ^{a*}
270	0,0744±0,0155 ^c	0,0595±0,0005 ^c

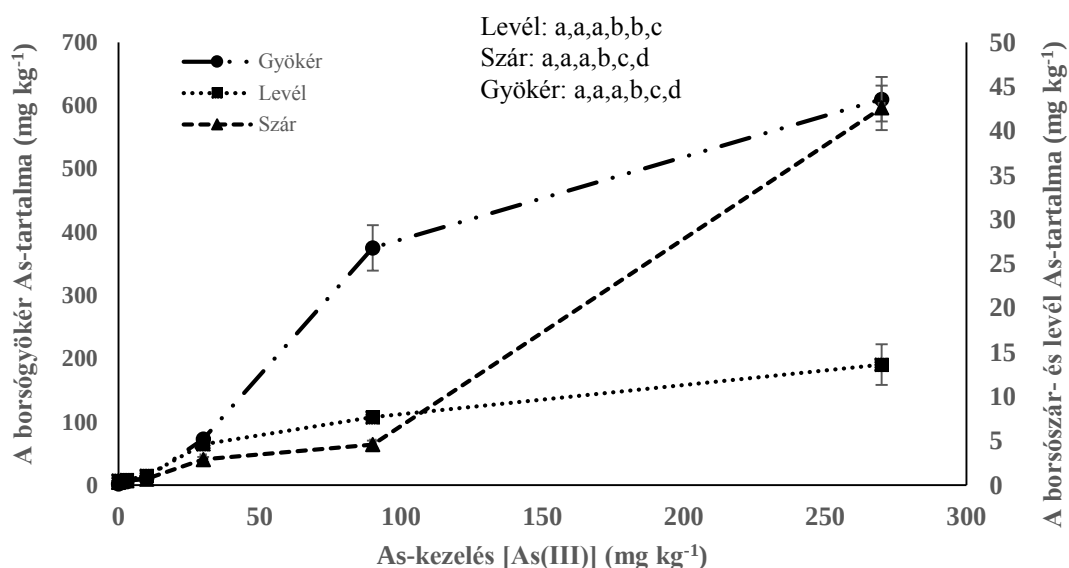
Az azonos növényi rész esetén azonos betűvel jelölt kezelések között nincs szignifikáns különbség (P≤0,05). Szignifikáns különbség azonos szinten, de eltérő formában történő arzén-kezelés esetén: *p<0,05; **p<0,01; ***p<0,001.

Az eredmények alapján megállapítható, hogy a növekvő koncentrációjú As(III)-kezelések hatására fokozatosan csökkent a borsószem száraztömege, statisztikailag igazolható mértékű csökkenés azonban csak a 30-270 mg kg⁻¹-os kezeléseknél volt megfigyelhető. A 28. táblázat eredményei továbbá arra is rámutatnak, hogy az alacsonyabb koncentrációjú As(V)-kezelések az átlagok tekintetében ugyan növelték a borsószem száraztömegét, statisztikai értelemben vett növekedés azonban nem volt megfigyelhető. Ugyanakkor a legnagyobb As(V)-kezelés (270 mg kg⁻¹) hatására szignifikánsan lecsökkent a borsószem szárazanyag-tartalma. Hasonló eredményekre jutott Kádár Imre (2012), aki az MTA ATK TAKI nagyhőrcsöki kísérleti telepén, mészlepedékes csernozjom talajon állított be mikroelem terheléses kísérletet. Az általam alkalmazott koncentrációk lefedik, sőt több kezelési tényezőt vizsgáltam, mint ami a nagyhőrcsöki kísérletben található, ahol a vizsgált koncentrációk a következők voltak: 0, 30, 90 és 270 mg kg⁻¹, valamint a vizsgált tesztnövény 1995-ben szintén a borsó volt. Kádár (2012) azt tapasztalta, hogy a kontrollhoz képest a legkisebb kezelés (30 mg kg⁻¹) növelte a borsószem száraztömegét, a 90 mg kg⁻¹-os kezelés azonban kismértékben már gátolta a szárazanyag beépülését, a legnagyobb dózis (270 mg kg⁻¹) hatására pedig drasztikusan lecsökkent a borsószem száraz tömege.

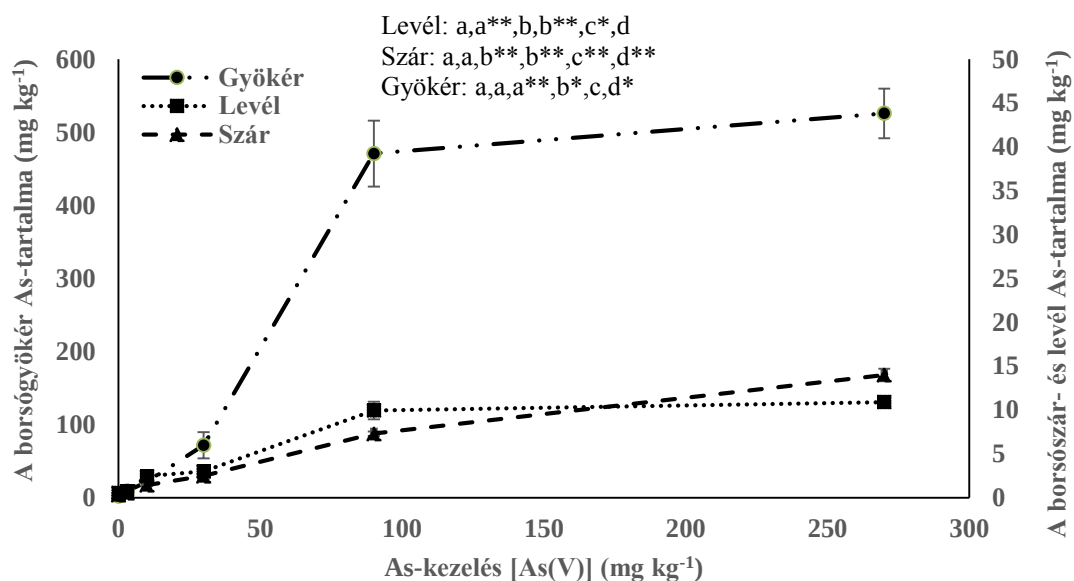
4.4.2. Növekvő koncentrációjú As(III)- és As(V)-kezelések hatása a tenyészedényben nevelt zöldborsó As-tartalmára

A tenyészedényben nevelt zöldborsó As-tartalmát a növény fejlődésének több fázisában (4 nóduszos állapot, virágzás kezdete, zöldérés, teljesérés) is vizsgáltam. Ezáltal lehetőségem nyílt tanulmányozni, hogy az egyes növényi részek As koncentrációja hogyan változik az idő előrehaladtával. Vizsgálatom tárgyát képezte továbbá annak meghatározása is, hogy az As a növény fejlődésének egyes fenofázisaiban milyen arányban oszlik meg a különböző növényi szervek közt.

A 21-22. ábra az I. fenofázis esetén mért As koncentrációkat mutatja be a levél, a szár, valamint a gyökér esetén.



21. ábra: Tenyészedényben nevelt zöldborsó vegetatív részeinek As-tartalmában bekövetkező változások a növekvő koncentrációjú (0, 3, 10, 30, 90 és 270 mg kg⁻¹) As(III)-kezelések hatására a növény fejlődésének I. fenofázisában ($n=3 \pm s.e.$)
Az azonos növényi rész esetén azonos betűvel jelölt kezelések között nincs szignifikáns különbség ($P \leq 0,05$).



22. ábra: Tenyészedényben nevelt zöldborsó vegetatív részeinek As-tartalmában bekövetkező változások a növekvő koncentrációjú (0, 3, 10, 30, 90 és 270 mg kg⁻¹) As(V)-kezelések hatására a növény fejlődésének I. fenofázisában (n=3±s.e.)

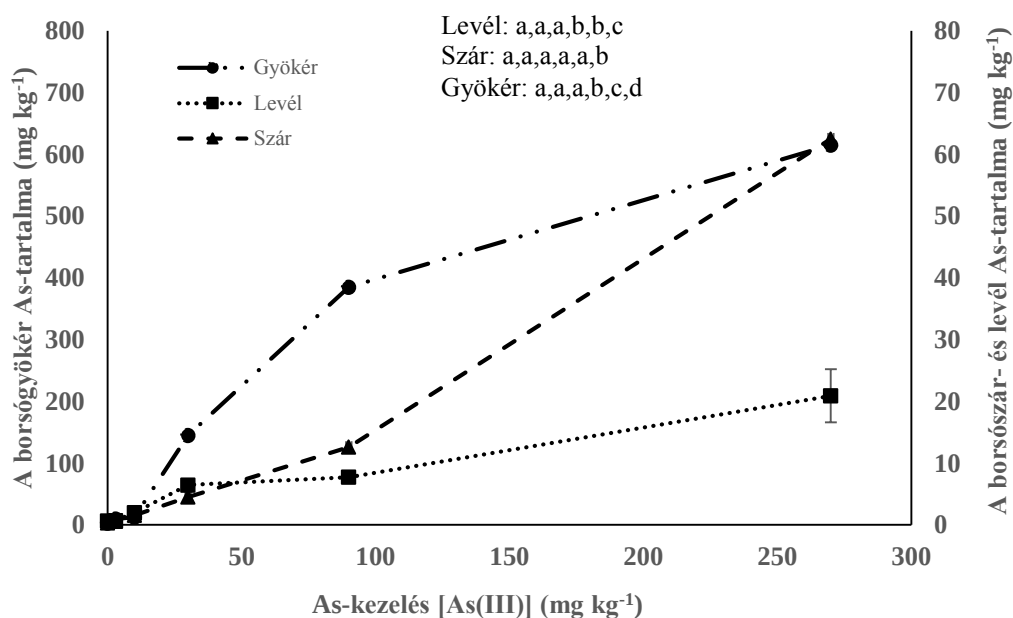
Az azonos növényi rész esetén azonos betűvel jelölt kezelések között nincs szignifikáns különbség (P≤0,05). Szignifikáns különbség azonos szinten, de eltérő formában történő arzén-kezelés esetén: *p<0,05; **p<0,01; ***p<0,001.

A mérési eredmények összevetése után általánosságban elmondható, hogy a növekvő koncentrációjú As(III)- és As(V)-kezelések fokozták a zöldborsó vegetatív részeinek As-akkumulációját. Az As(III)-mal kezelt növények esetén szignifikáns növekedést a 10 mg kg⁻¹-ot meghaladó dózisok esetén tudtam kimutatni. Az As(V)-kezelésben részesített növények esetén a gyökér As-tartalma szintén csak a 10 mg kg⁻¹-nál nagyobb kezelések esetén nőtt meg szignifikánsan, a talajfelszín feletti vegetatív növényi szervek As koncentrációját azonban már a 10 mg kg⁻¹-os dózis is statisztikailag igazolható módon fokozta.

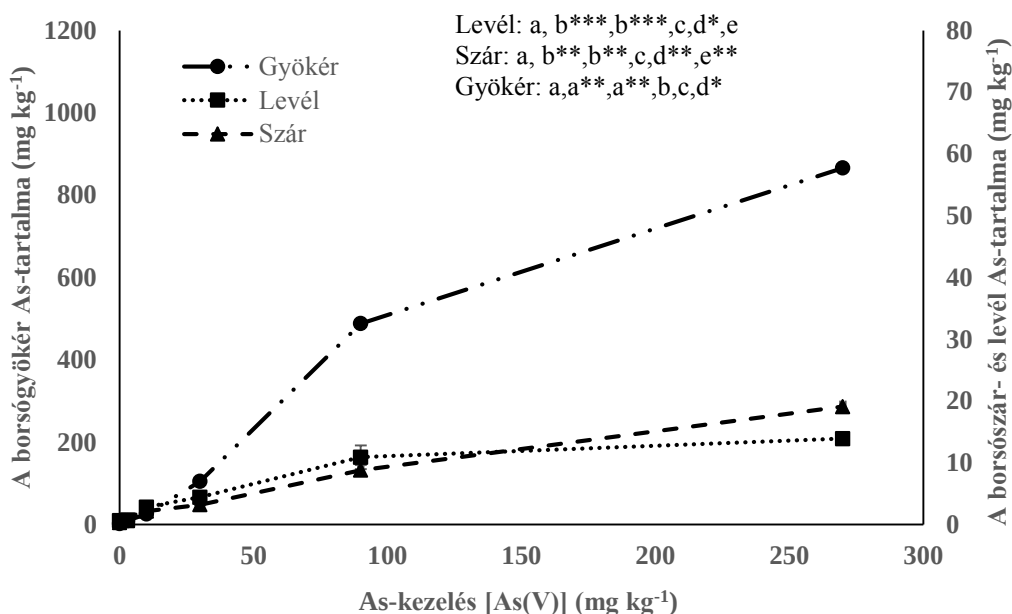
Az ábráról továbbá az is megállapítható, hogy a vizsgált vegetatív növényi részek közül a gyökérnek volt a legmagasabb az As-tartalma mindkét kezelési forma esetén. A gyökérben felhalmozódott As mennyiségét tovább vizsgálva az is megállapítható, hogy az alacsonyabb koncentrációjú (0-30 mg kg⁻¹) kezelésekhez képest a 90 mg kg⁻¹-os dózis hatására ugrásszerű növekedés következett be mind az As(III)-, mind az As(V)-kezelések esetén. A 270 mg kg⁻¹-os As(III)-kezelés hatására a gyökér As-tartalmában további jelentős mértékű növekedés következett be. A 270 mg kg⁻¹-os As(V)-dózis ugyan szintén fokozta a gyökér As-fevételét, azonban a növekedés mértéke az As(III)-kezelés esetén megfigyeltékhez képest enyhébb volt.

A talajfelszín feletti vegetatív részek As-tartalmát megvizsgálva, kijelenthető, hogy mindkét kezelési forma vonatkozásában a levél és a szár As koncentrációja a 0-30 mg kg⁻¹-os kezelések esetén megközelítőleg azonos volt, a 90 mg kg⁻¹-os dózisok hatására azonban a levél As-tartalma kis mértékben meghaladta a szárét, a 270 mg kg⁻¹-os kezelésnél azonban ennek az ellenkezőjét tapasztaltam. A szár As koncentrációja, az As(V)-kezelés esetén kismértékben, míg az As(III)-dózis esetén jelentősen meghaladta a levélét.

A II. fenofázisból származó növényi minták As-tartalmát megvizsgálva megállapítható, hogy a növekvő koncentrációjú As(III)-, valamint As(V)-kezelések hatására továbbra is fokozódott az egyes növényi részek As koncentrációja (23-24. ábra).



23. ábra: Tenyészedényben nevelt zöldborsó vegetatív részeinek As-tartalmában bekövetkező változások a növekvő koncentrációjú (0, 3, 10, 30, 90 és 270 mg kg⁻¹) As(III)-kezelések hatására a növény fejlődésének II. fenofázisában ($n=3 \pm s.e.$)
Az azonos növényi rész esetén azonos betűvel jelölt kezelések között nincs szignifikáns különbség ($P \leq 0,05$).



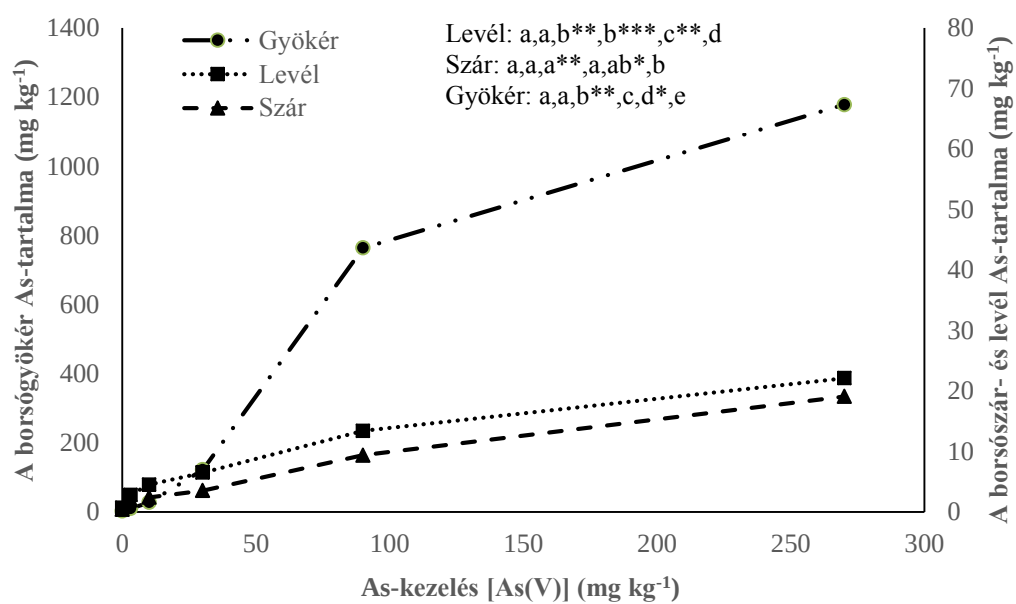
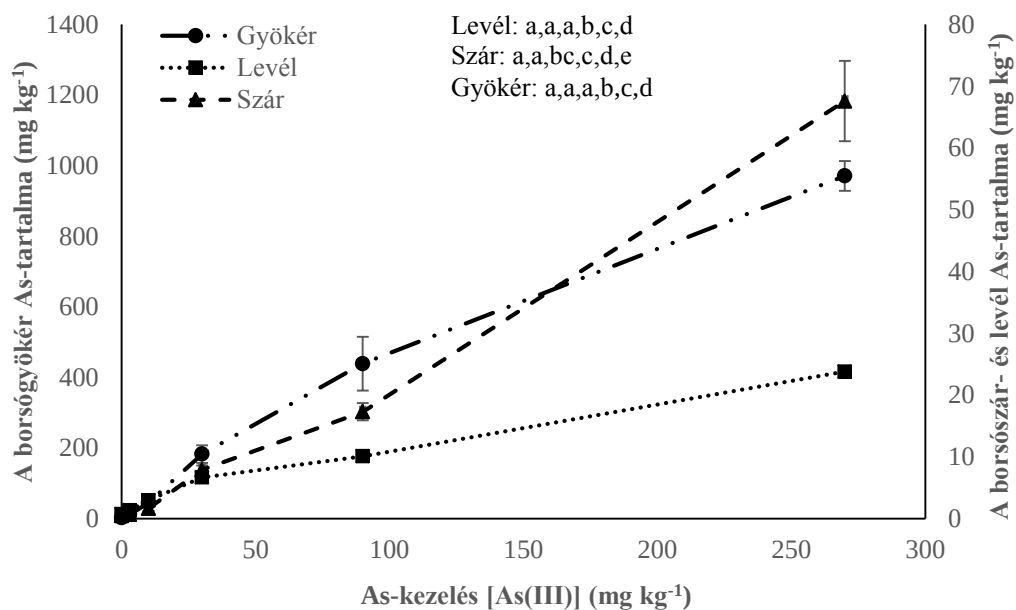
24. ábra: Tenyészedényben nevelt zöldborsó vegetatív részeinek As-tartalmában bekövetkező változások a növekvő koncentrációjú (0, 3, 10, 30, 90 és 270 mg kg⁻¹) As(V)-kezelések hatására a növény fejlődésének II. fenofázisában (n=3±s.e.)

Az azonos növényi rész esetén azonos betűvel jelölt kezelések között nincs szignifikáns különbség (P≤0,05). Szignifikáns különbség azonos szinten, de eltérő formában történő arzén-kezelés esetén: *p<0,05; **p<0,01; ***p<0,001.

A kontrollhoz viszonyítva a levélnél és a gyökérnél a 30-270 mg kg⁻¹-os As(III)-dózisoknál, míg a szárnál csak a 270 mg kg⁻¹-os kezelés esetén mértem szignifikánsan magasabb koncentráció értéket. Az As(V)-kezeléseknél a levél és a szár As-tartalmát valamennyi alkalmazott dózis, míg a gyökér As koncentrációját a 30-270 mg kg⁻¹-os kezelések szignifikánsan fokozták a kontrollhoz képest.

Az egyes növényi részek As-akkumulációs képességét megvizsgálva megállapítható, hogy a növény fejlődésének előrehaladtával az As továbbra is nagyrészt a gyökérben akkumulálódott és csak kisebb részben került át az egyéb vegetatív növényi részekbe. Megfigyeltem továbbá azt is, hogy a szár As-visszatartó képessége az idő előrehaladtával fokozódott.

A III. fenofázis esetén a növekvő koncentrációjú As(III)- és As(V)-kezelések hatását elemezve azt tapasztaltam, hogy az egyes vegetatív növényi részek As koncentrációja monoton nőtt, azonban a kontrollhoz képest az alacsonyabb koncentrációjú kezeléseknél több esetben továbbra sem tudtam szignifikáns növekedést kimutatni (25. ábra).

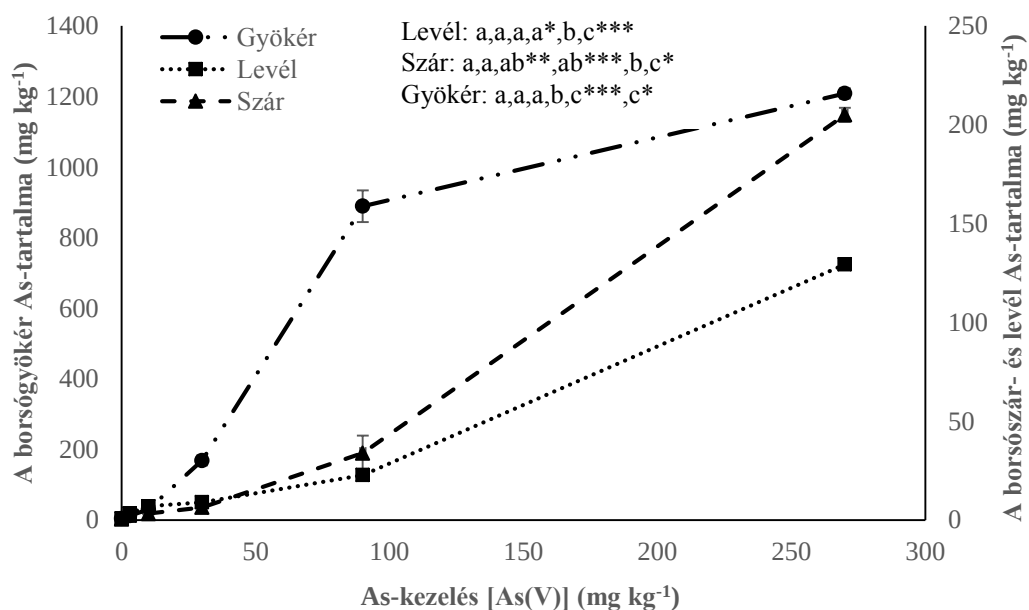
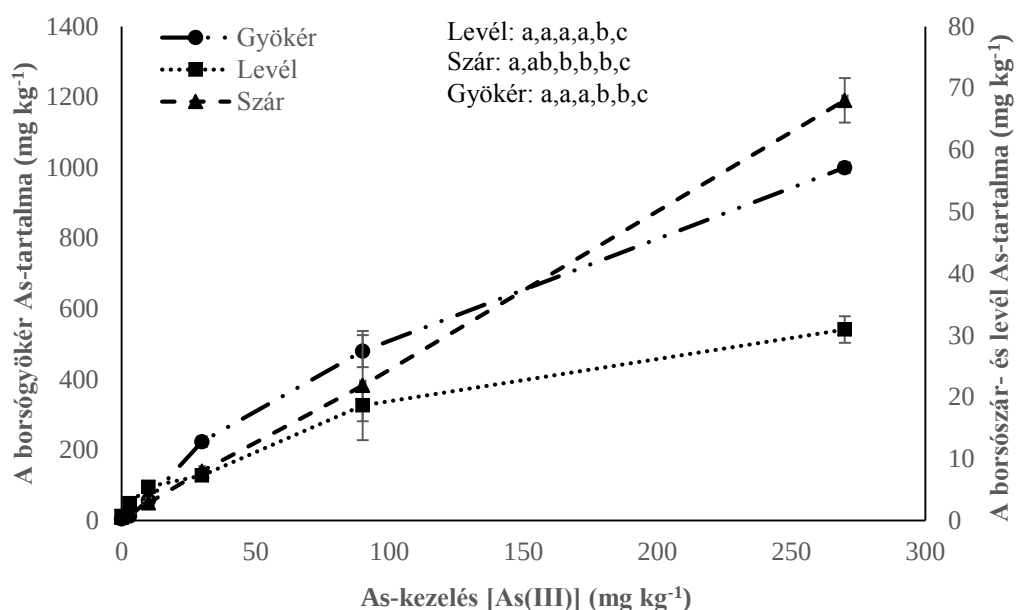


25. ábra: Tenyészedényben nevelt zöldborsó vegetatív részeinek As-tartalmában bekövetkező változások a növekvő koncentrációjú (0, 3, 10, 30, 90 és 270 mg kg⁻¹) As(III)- és As(V)-kezelések hatására a növény fejlődésének III. fenofázisában (n=3±s.e.)
 Az azonos növényi rész esetén azonos betűvel jelölt kezelések között nincs szignifikáns különbség (P≤0,05). Szignifikáns különbség azonos szinten, de eltérő formában történő arzén-kezelés esetén: *p<0,05; **p<0,01; ***p<0,001.

A levél és a gyökér esetén a 30-270 mg kg⁻¹-os As(III)-dózisok, a szár tekintetében pedig a 10-270 mg kg⁻¹-os As(III)-kezelések eredményeztek statisztikailag is igazolható mértékű növekedést. Az As(V)-tel kezelt növények levelének, illetve gyökerének As koncentrációját szignifikánsan a 10-270 mg kg⁻¹-os kezelések növelték, a szár As-tartalmában jelentős változást pedig a 270 mg kg⁻¹-os dózis okozott.

A szár és levél As-tartalmában bekövetkező változásokat megvizsgálva azt tapasztaltam, hogy az As(V)-tel kezelt növény esetén az As transzlokációja fokozódott a levél irányába, melynek következtében a levél As-tartalma – a II. fenofázis esetén tapasztaltakkal ellentétben – valamennyi kezelési szint esetén meghaladta a szárét. A növekvő koncentrációjú As(III)-dózisoknak kitett zöldborsó esetén a talajfelszín feletti vegetatív részek As koncentrációját megvizsgálva, azt tapasztaltam, hogy a 0-30 mg kg⁻¹-os kezelések esetén a két növényi rész As-tartalma megközelítőleg azonos volt, azonban a 90-270 mg kg⁻¹-os dózisok esetén a szár As-tartalma egyre nagyobb mértékben haladta meg a levelét. Összességében tehát az As(V)-tel kezelt növények esetén az egyes növényi szervek As-akkumulációs képességét figyelembe véve az alábbi sorrend állítható fel: gyökér > levél > szár, ezzel szemben az As(III)-kezeléseknek kitett zöldborsó szerveinek As-tartalma a nagyobb dózisok esetén (90-270 mg kg⁻¹) az alábbiak szerint alakult: gyökér > szár > levél.

A vegetatív növényi szervek As-tartalmát tovább tanulmányozva megállapítható, hogy az As(III)-dózisok esetén a gyökér által akkumulált As mennyiségét a kezelési koncentrációk függvényében ábrázolva, a kapott görbe az idő előrehaladtával egyre jobban közelít egy lineáris egyeneshez. Az As(V)-tel kezelt növények esetén azonban a 90 mg kg⁻¹-os dózis hatására ugrásszerű növekedés következett be, mind a négy fenofázisban (26. ábra).



26. ábra: Tenyészedényben nevelt zöldborsó vegetatív részeinek As-tartalmában bekövetkező változások a növekvő koncentrációjú (0, 3, 10, 30, 90 és 270 mg kg⁻¹) As(III)- és As(V)-kezelések hatására a növény fejlődésének IV. fenofázisában (n=3±s.e.) Az azonos növényi rész esetén azonos betűvel jelölt kezelések között nincs szignifikáns különbség (P<0,05). Szignifikáns különbség azonos szinten, de eltérő formában történő arzén-kezelés esetén: *p<0,05; **p<0,01; ***p<0,001.

A IV. fenofázis esetén megfigyeltem továbbá, hogy a levél As-tartalma a 90-270 mg kg⁻¹-os, a gyökér As koncentrációja pedig a 30-270 mg kg⁻¹-os kezelések hatására szignifikánsan megnőtt a kontrollhoz képest mindkét kezelési forma esetén. A szár As-tartalmában statisztikailag bizonyítható mértékű növekedés az As(III)-dózisok esetén a 10-270 mg kg⁻¹-os kezelési szintnél, az As(V)-dózisok esetén pedig a 90-270 mg kg⁻¹-os kezelések esetén volt megfigyelhető.

A mérési eredmények tanulmányozása után kijelenthető, hogy a gyökér As-akkumulációs képessége a növény fejlődésének IV. fenofázisában is messze túlhaladta bármely növényi szervét. Mindkét kezeléstípus esetén megállapítható továbbá az is, hogy a levél és a szár a 0-90 mg kg⁻¹-os kezelési szintek esetén hozzávetőlegesen azonos mennyiségű arzént volt képes felhalmozni, a legnagyobb kezelés hatására azonban a szár As-tartalma jóval nagyobb volt, mint a levélé.

Az As(III)- és As(V)-kezelések hatását nemcsak a vegetatív, hanem a generatív szervek esetén is vizsgáltam. A III. és IV. fenofázis esetén a generatív szervek As-tartalmát a kezelések függvényében a 29. táblázat foglalja össze.

29. táblázat: *Tenyészedényben nevelt zöldborsó generatív részeinek As-tartalmában (mg kg⁻¹) bekövetkező változások a zöldérés, valamint a teljesérés fenofázisaiban a növekvő koncentrációjú (0, 3, 10, 30, 90 és 270 mg kg⁻¹) As(III)- és As(V)-kezelések függvényében (n=3±s.e.)*

As- kezelés (mg kg ⁻¹)	Zöldborsó generatív szerveinek As-tartalma (mg kg ⁻¹)		
	Hüvely (III. fenofázis)	Hüvely (IV. fenofázis)	Szem (IV. fenofázis)
As(III)-kezelés			
0	< k.h. ^a	0,276±0,015 ^a	0,129±0,019 ^a
3	< k.h. ^a	0,840±0,135 ^a	0,331±0,041 ^a
10	< k.h. ^a	0,802±0,052 ^a	0,405±0,010 ^a
30	0,196±0,063 ^b	0,790±0,125 ^a	0,419±0,014 ^a
90	0,378±0,014 ^b	0,875±0,034 ^a	0,959±0,222 ^b
270	3,23±0,45 ^c	5,38±1,26 ^b	1,76±0,21 ^c
As(V)-kezelés			
0	< k.h. ^a	0,276±0,015 ^a	0,129±0,019 ^a
3	< k.h. ^a	0,597±0,023 ^a	0,486±0,015 ^b
10	< k.h. ^a	0,765±0,038 ^a	0,486±0,067 ^c
30	0,286±0,125 ^b	0,789±0,001 ^a	0,489±0,066 ^c
90	0,289±0,03 ^b	2,20±0,15 ^{b*}	0,949±0,079 ^d
270	4,73±0,66 ^c	18,15±0,78 ^{c*}	1,17±0,04 ^e

Az azonos növényi rész esetén azonos betűvel jelölt kezelések között nincs szignifikáns különbség (P≤0,05). Szignifikáns különbség azonos szinten, de eltérő formában történő arzén-kezelés esetén: *p<0,05; **p<0,01; ***p<0,001.

A mérési eredmények alapján elmondható, hogy a borsószem, illetve a borsóhüvely mind a III., mind a IV. fenofázisban a teljes növény As koncentrációjának csak kis hányadát tartalmazta, mely megegyezik a Kádár (2012) által zöldborsó növény esetén tapasztaltakkal. Általánosságban az is megállapítható, hogy a növekvő koncentrációjú As(III)- és As(V)-kezelések fokozták a generatív részek As-akkumulációját. Ugyanakkor a 29. táblázat arra is felhívja a figyelmet, hogy a III. fenofázis esetén a 0-10 mg kg⁻¹-os kezeléseknél, a borsóhüvely As-tartalma kimutatási határ alatt volt, így a kontrollhoz képest szignifikáns növekedést, csak a 30-270 mg kg⁻¹-os kezelések esetén tudtam kimutatni mindkét kezelési formánál. Megfigyeltem továbbá, hogy a növény fejlődésének előrehaladtával, az As-transzlokációja a borsóhüvely irányába fokozódott. A teljesérés fenofázisában a borsóhüvely As-tartalma és a kezelések koncentrációja közötti összefüggést megvizsgálva pedig arra a megállapításra jutottam, hogy a statisztikailag igazolható mértékű növekedést az As(III)-kezelések esetén, csak a legnagyobb (270 mg kg⁻¹) dózis, míg az As(V)-kezelések esetén, a 90-270 mg kg⁻¹-os dózisok okozták. Az As(V)-kezelések esetén tapasztalt növekedés mértéke azonban jóval meghaladta az As(III)-kezelés esetén tapasztaltat.

A teljesérés fenofázisában a generatív növényi részek As koncentrációját összevetve elmondható, hogy a hüvely As-tartalma az esetek többségében meghaladta a borsószemét. A borsószem As koncentrációját tovább elemezve azt figyeltem meg, hogy a kontrollhoz viszonyítva, az As(V)-kezeléseknél már a legkisebb dózis is szignifikáns növekedést okozott, az As(III)-kezelések esetén azonban csak a 90-270 mg kg⁻¹-os kezeléseknél tapasztaltam statisztikailag igazolható mértékű növekedést. A borsószemben a különböző formájú kezeléseknél mért As koncentráció értékek között szignifikáns különbséget egyik kezelési szint esetén sem tudtam kimutatni.

A zöldborsó fejlődésének egyes fenofázisaiban tapasztaltakat összefoglalva kiemelhető, hogy mindkét kezelési forma esetén valamennyi fenofázisban a gyökér akkumulált a legnagyobb mennyiségben az arzént. A talajfelszín feletti vegetatív részek esetén megfigyelhető volt továbbá, hogy az I-III. fenofázisokban a növény fejlődésének előrehaladtával, valamint az As(III)-kezelés koncentrációjának növekedésével, a felvett As egyre nagyobb mértékben a szárban maradt és csak kisebb rész került át a levélbe. A IV. fenofázis tekintetében azonban a szár As-visszatartó képessége kissé csökkent.

Ezzel szemben az As(V)-kezelésű zöldborsónál az I-II. fenofázisában, a talajban jelenlévő As koncentrációja nagyban meghatározta, hogy az As a levélben vagy a

szárban halmozódik-e fel nagyobb mértékben. A III. fenofázisnál azonban a levél As-tartalma az esetek többségében meghaladta a szárét, a növény fejlődésének utolsó szakaszában viszont a szár As visszatartó képessége fokozódott, melynek következtében a szár As koncentrációja a magasabb kezelési szintek esetén már meghaladta a levélét.

A tenyészedényes kísérlet esetén is fontosnak tartottam annak meghatározását, hogy az adott zöldborsó növény mennyi arzént von ki a talajból és a kivont As mennyiség, hogyan oszlik meg az egyes növényi részek között.

A zöldborsó által kivont As mennyiségét az I-II. fenofázisokban a 30-31. táblázat foglalja össze.

30. táblázat: Tenyészedényben nevelt zöldborsó által felvett As mennyisége a növekvő koncentrációjú (0, 3, 10, 30, 90 és 270 mg kg⁻¹) As(III)-kezelések függvényében (n=3±s.e.)

As(III)- kezelés (mg kg ⁻¹)	Zöldborsó vegetatív szervei által felvett As mennyisége (µg)			
	Levél	Szár	Gyökér	Teljes növény
I. Fenofázis				
0	0,0854±0,001 ^a (50)	0,0391±0,0007 ^a (23)	0,0459±0,0009 ^a (27)	0,170
3	0,0791±0,0004 ^a (33)	0,0422±0,0002 ^a (18)	0,119±0,003 ^a (50)	0,240
10	0,130±0,001 ^b (33)	0,057±0,001 ^a (15)	0,205±0,005 ^a (52)	0,392
30	0,542±0,005 ^b (26)	0,228±0,001 ^b (11)	1,28±0,03 ^b (62)	2,05
90	0,874±0,008 ^b (17)	0,330±0,000 ^b (6)	4,01±0,03 ^b (77)	5,21
270	0,269±0,013 ^b (4)	0,882±0,015 ^b (12)	6,16±0,12 ^b (84)	7,31
II. Fenofázis				
0	0,126±0,002 ^a (43)	0,0867±0,0005 ^a (30)	0,0809±0,0022 ^a (28)	0,294
3	0,116±0,001 ^a (25)	0,1046±0,0005 ^{ab} (26)	0,279±0,004 ^b (49)	0,500
10	0,286±0,015 ^a (37)	0,245±0,005 ^b (31)	0,319±0,012 ^b (32)	0,850
30	0,859±0,006 ^b (20)	0,637±0,003 ^b (19)	2,90±0,33 ^c (61)	4,40
90	0,989±0,016 ^b (10)	1,588±0,048 ^c (9)	6,12±0,11 ^c (81)	8,70
270	0,623±0,046 ^b (2)	1,49±0,02 ^c (4)	8,00±0,20 ^c (94)	10,1

Az azonos növényi rész esetén azonos betűvel jelölt kezelések között nincs szignifikáns különbség (P≤0,05). A zárójelben feltüntetett értékek az adott növényi rész és a teljes növény által felvett As mennyiségének az arányát fejezik ki %-ban.

31. táblázat: Tenyészedényben nevelt zöldborsó által felvett As mennyisége a növekvő koncentrációjú (0, 3, 10, 30, 90 és 270 mg kg⁻¹) As(V)-kezelések függvényében (n=3±s.e.)

As(V)- kezelés (mg kg ⁻¹)	Zöldborsó vegetatív szervei által felvett As mennyisége (µg)			
	Levél	Szár	Gyökér	Teljes növény
I. Fenofázis				
0	0,0854±0,001 ^a (50)	0,0391±0,0007 ^a (23)	0,0459±0,0009 ^a (27)	0,170
3	0,129±0,001 ^{ab**} (26)	0,0840±0,0030 ^{a**} (17)	0,285±0,006 ^{b**} (57)	0,498
10	0,392±0,005 ^{b***} (39)	0,161±0,001 ^{b***} (16)	0,464±0,016 ^{b**} (46)	1,02
30	0,363±0,004 ^{b*} (19)	0,208±0,007 ^b (11)	1,30±0,09 ^c (69)	1,87
90	1,08±0,02 ^{c*} (12)	0,540±0,001 ^{b**} (6)	7,72±0,07 ^{d**} (83)	9,34
270	0,234±0,003 ^b (3)	0,402±0,005 ^{b***} (4)	8,30±0,20 ^{d**} (93)	8,94
II. Fenofázis				
0	0,126±0,002 ^a (43)	0,0867±0,0005 ^a (30)	0,0809±0,0022 ^a (28)	0,294
3	0,165±0,027 ^a (25)	0,168±0,007 ^b (26)	0,322±0,01 ^{b*} (49)	0,655
10	0,880±0,006 ^{a***} (37)	0,752±0,027 ^{b***} (31)	0,761±0,014 ^{b***} (32)	2,39
30	0,920±0,020 ^a (20)	0,883±0,006 ^{bc*} (19)	2,80±0,02 ^c (61)	4,61
90	1,22±0,07 ^{b*} (10)	1,07±0,02 ^{c**} (9)	9,86±0,03 ^{d**} (81)	12,2
270	0,409±0,001 ^{a**} (2)	0,617±0,165 ^{b***} (4)	16,3±0,1 ^{e***} (94)	17,4

Az azonos növényi rész esetén azonos betűvel jelölt kezelések között nincs szignifikáns különbség (P≤0,05). Szignifikáns különbség azonos szinten, de eltérő formában történő arzén-kezelés esetén: *p<0,05; **p<0,01; ***p<0,001. A zárójelben feltüntetett értékek az adott növényi rész és a teljes növény által felvett As mennyiségének az arányát fejezik ki %-ban.

A 30-31. táblázatokban feltüntetett eredmények alapján megállapítható, hogy a teljes növény által felvett As mennyisége a kezelések koncentrációjának növekedésével döntően nőtt.

A 30-31. táblázatok alapján az is elmondható, hogy az As növényen belüli eloszlását nagyban meghatározta a talajban lévő As mennyisége, valamint a növény fejlettségi állapota.

Azt tapasztaltam ugyanis, hogy az I. fenofázis esetén a kontroll kezelésű növény által felvett As mennyiségének mintegy fele a levélben volt jelen, másik fele pedig a szár és a gyökér között megközelítőleg egyenlő arányban oszlott meg. Ezzel szemben mind az As(III)-mal, mind az As(V)-tel kezelt talajon termesztett zöldborsók esetén azt figyeltem meg, hogy az As legnagyobb mennyiségben a gyökérben volt jelen. A levél, illetve a szár által kivont As mennyiségét összevetve pedig azt tapasztaltam, hogy a 3-90 mg kg⁻¹-os kezelések esetén a levélben jelenlévő As mennyisége jóval meghaladta a szár által kivont As mennyiségét. A 270 mg kg⁻¹-os As(V)-dózis esetén azonban a levél

és a szár által kivont As mennyisége megközelítőleg azonos volt, az As(III)-kezelés esetén viszont a szárból jelenlévő As aránya nagyobb volt, mint a levélé.

A tesztnövény fejlődésének II. fenofázisában (30-31. táblázat) a kontroll növény esetén tapasztaltak megegyeznek az I. fenofázis esetén megfigyelttel, vagyis a teljes növény által felvett As mennyiségének közel a fele a levélben halmozódott fel, a szárból, illetve a gyökérben pedig megközelítőleg azonos mennyiségű As volt jelen. A 30-31. táblázatok eredményei továbbá arra is felhívják a figyelmet, hogy a kezelések hatására a talajból kivont As mennyiségének nagy része, továbbra is a gyökérben volt jelen, a szár, illetve a levél által kivont As mennyiségének aránya pedig körülbelül azonos volt mindkét kezelési forma esetén. Mindez alól kivételt jelentett azonban a 10 mg kg⁻¹-os kezelés, ugyanis ez esetben azt tapasztaltam, hogy a zöldborsó által felvett As mennyisége az egyes vegetatív részek között, hozzávetőlegesen azonos arányban oszlott meg.

A zöldérés fenofázisában lévő borsó növények által felvett As mennyiségét a kezelések függvényében a 32-33. táblázat foglalja össze.

32. táblázat. *Tenyészedényben nevelt, zöldérés fenofázisában lévő zöldborsó növények által felvett As mennyisége a növekvő koncentrációjú (0, 3, 10, 30, 90 és 270 mg kg⁻¹) As(III)-kezelések függvényében (n=3±s.e.)*

As(III)- kezelés (mg kg ⁻¹)	Zöldborsó által felvett As mennyisége (µg)				
	Hüvely	Levél	Szár	Gyökér	Teljes növény
0	< k.h. ^a (-)	0,160±0,001 ^a (37)	0,134±0,004 ^a (31)	0,141±0,001 ^a (32)	0,435
3	< k.h. ^a (-)	0,236±0,003 ^a (25)	0,128±0,003 ^a (14)	0,562±0,033 ^a (61)	0,926
10	< k.h. ^a (-)	0,513±0,009 ^a (20)	0,315±0,024 ^a (12)	1,74±0,02 ^b (68)	2,58
30	0,0124±0,0012 ^b (0,1)	1,15±0,06 ^b (13)	1,46±0,03 ^b (16)	6,24±0,08 ^c (70)	8,89
90	0,0200±0,0001 ^b (0,1)	1,61±0,02 ^b (9)	3,00±0,10 ^b (16)	14,2±0,8 ^d (75)	19,0
270	0,0900±0,0010 ^b (0,3)	0,902±0,038 ^b (3)	1,80±0,01 ^b (6)	28,5±0,3 ^e (91)	31,6

Az azonos növényi rész esetén azonos betűvel jelölt kezelések között nincs szignifikáns különbség (P≤0,05). A zárójelben feltüntetett értékek az adott növényi rész és a teljes növény által felvett As mennyiségének az arányát fejezik ki %-ban.

33. táblázat. Tenyészedényben nevelt, zöldérés fenofázisában lévő zöldborsó növények által felvett As mennyisége a növekvő koncentrációjú (0, 3, 10, 30, 90 és 270 mg kg⁻¹) As(V)-kezelések függvényében (n=3±s.e.)

As(V)- kezelés (mg kg ⁻¹)	Zöldborsó által felvett As mennyisége (µg)				
	Hüvely	Levél	Szár	Gyökér	Teljes növény
0	< k.h. ^a (-)	0,160±0,001 ^a (37)	0,134±0,004 ^a (31)	0,141±0,001 ^a (32)	0,435
3	< k.h. ^a (-)	0,677±0,005 ^{a*} (39)	0,609±0,014 ^{a**} (35)	0,461±0,003 ^a (26)	1,75
10	< k.h. ^a (-)	1,61±0,02 ^{b***} (42)	0,946±0,011 ^{ab**} (25)	1,27±0,01 ^b (33)	3,83
30	0,0629±0,0073 ^{b**} (1)	1,61±0,06 ^{b*} (21)	1,06±0,01 ^{b*} (14)	5,06±0,23 ^b (65)	7,79
90	0,0364±0,0012 ^{b*} (0,1)	1,55±0,02 ^b (6)	1,25±0,02 ^{b**} (5)	22,9±0,2 ^{d**} (89)	25,7
270	0,17±0,004 ^{c***} (1)	0,751±0,063 ^a (3)	0,762±0,012 ^{a**} (3)	28,0±0,2 ^d (94)	29,7

Az azonos növényi rész esetén azonos betűvel jelölt kezelések között nincs szignifikáns különbség (P≤0,05). Szignifikáns különbség azonos szinten, de eltérő formában történő arzén kezelés esetén: *p<0,05; **p<0,01; ***p<0,001. A zárójelben feltüntetett értékek az adott növényi rész és a teljes növény által felvett As mennyiségének az arányát fejezik ki %-ban.

A zöldérés fenofázisában azt tapasztaltam, hogy a borsóhüvely As-tartalma a teljes növény által kivont As mennyiségéhez viszonyítva rendkívül alacsony volt mindkét kezelési forma esetén, a borsóhüvely a kísérleti növény As-mennyiségének maximálisan 1%-át tartalmazta az As(V)-kezelések esetén, azonban az As(III)-kezeléseknél még ezt az értéket sem érte el.

A vegetatív növényi részek As koncentrációját megvizsgálva elmondható, hogy a gyökér által visszatartott As-arány a 3 mg kg⁻¹-ot meghaladó As(V)-dózisok esetén a kezelések koncentrációjának növekedésével fokozatosan emelkedett, a legnagyobb (270 mg kg⁻¹) As(V)-dózisnál a teszt növény által felvett As mennyiségének már mintegy 94%-a a gyökérben volt jelen. Ugyanakkor azt is fontos megjegyezni, hogy a 0-10 mg kg⁻¹-os kezelések esetén az As legnagyobb arányban nem a gyökérben, hanem a levélben volt jelen. Megfigyeltem továbbá, hogy a levélben akkumulált As-aránya nemcsak a gyökér, hanem a 0-90 mg kg⁻¹-os kezelések esetén a szárban jelenlévő As arányát is meghaladta, a legnagyobb kezelés esetén azonban levél és a szár As-tartalma kiegyenlítődt.

Az As(III)-kezelések esetén a gyökér As-visszatartó képessége a kezelések hatására tendenciálisan nőtt, megfigyeltem továbbá, hogy a kontroll növény kivételével valamennyi esetben a gyökér által akkumulált arzén százalékos aránya volt a legmagasabb, a levélben jelenlévő As aránya csak a 0-10 mg kg⁻¹-os kezelések esetén haladta meg a szárét.

Az eredmények továbbá arra is rámutattak, hogy a talaj növekvő As-tartalma nagymértékben fokozta a teljes növény által felvett As mennyiségét, mindkét kezelési forma esetén, csakúgy mint a teljesérés fenofázisában (34-35. táblázat).

34. táblázat. *Tenyészedényben nevelt, teljesérés fenofázisában lévő zöldborsó növények által felvett As mennyisége a növekvő koncentrációjú (0, 3, 10, 30, 90 és 270 mg kg⁻¹) As(III)-kezelések függvényében (n=3±s.e.)*

As(III)- kezelés (mg kg ⁻¹)	Zöldborsó által felvett As mennyisége (µg)					
	Szem	Hüvely	Levél	Szár	Gyökér	Teljes növény
0	0,0365±0,0019 ^a (5)	0,0665±0,0013 ^a (10)	0,180±0,003 ^a (26)	0,153±0,003 ^a (22)	0,261±0,001 ^a (37)	0,697
3	0,0873±0,0026 ^a (3)	0,203±0,011 ^b (8)	1,02±0,02 ^b (39)	0,608±0,058 ^{ab} (23)	0,702±0,002 ^a (27)	2,62
10	0,0923±0,0007 ^a (2)	0,192±0,003 ^b (3)	1,65±0,02 ^b (28)	0,912±0,011 ^b (16)	3,02±0,06 ^b (51)	5,87
30	0,0733±0,0008 ^a (1)	0,164±0,008 ^b (1)	1,74±0,01 ^b (12)	2,11±0,01 ^c (15)	10,1±0,2 ^c (71)	14,1
90	0,0805±0,0022 ^a (0,4)	0,123±0,001 ^b (0,4)	3,68±0,15 ^c (13)	4,57±0,25 ^d (16)	20,6±0,5 ^d (71)	29,1
270	0,1306±0,0032 ^b (0,3)	0,437±0,007 ^c (1)	1,71±0,04 ^b (5)	4,42±0,04 ^d (12)	29,4±0,12 ^d (81)	36,1

Az azonos növényi rész esetén azonos betűvel jelölt kezelések között nincs szignifikáns különbség (P≤0,05). A zárójelben feltüntetett értékek az adott növényi rész és a teljes növény által felvett As mennyiségének az arányát fejezik ki %-ban.

35. táblázat. *Tenyészedényben nevelt, teljesérés fenofázisában lévő zöldborsó növények által felvett As mennyisége a növekvő koncentrációjú (0, 3, 10, 30, 90 és 270 mg kg⁻¹) As(V)-kezelések függvényében (n=3±s.e.)*

As(V)- kezelés (mg kg ⁻¹)	Zöldborsó által felvett As mennyisége (µg)					
	Szem	Hüvely	Levél	Szár	Gyökér	Teljes növény
0	0,036±0,002 ^a (5)	0,0664±0,0013 ^a (10)	0,180±0,003 ^a (26)	0,153±0,003 ^a (22)	0,261±0,001 ^a (37)	0,696
3	0,170±0,001 ^{b***} (7)	0,162±0,002 ^{b*} (6)	0,845±0,002 ^{b*} (33)	0,786±0,011 ^a (30)	0,623±0,011 ^a (24)	2,59
10	0,182±0,008 ^{b***} (3)	0,259±0,003 ^{b*} (4)	2,64±0,01 ^{c*} (44)	1,53±0,01 ^{b***} (25)	1,41±0,01 ^{b***} (23)	6,02
30	0,140±0,01 ^{b***} (1)	0,198±0,001 ^b (2)	2,36±0,01 ^{c*} (19)	1,98±0,01 ^b (16)	7,82±0,07 ^{c*} (63)	12,5
90	0,180±0,001 ^{b***} (0,5)	0,408±0,007 ^{b***} (1)	2,90±0,01 ^{c*} (7)	5,19±0,04 ^c (13)	30,42±0,09 ^{d*} (78)	39,1
270	0,070±0,001 ^{b***} (0,1)	0,79±0,017 ^{c***} (1)	5,63±0,17 ^{d***} (10)	10,8±0,2 ^{d***} (18)	41,23±0,21 ^{e**} (70)	58,5

Az azonos növényi rész esetén azonos betűvel jelölt kezelések között nincs szignifikáns különbség (P≤0,05). Szignifikáns különbség azonos szinten, de eltérő formában történő arzén kezelés esetén: *p<0,05; **p<0,01; ***p<0,001. A zárójelben feltüntetett értékek az adott növényi rész és a teljes növény által felvett As mennyiségének az arányát fejezik ki %-ban.

A fenti táblázatokban ismertetett adatok alapján mindkét kezelési típus esetén megállapítható, hogy az As legkisebb mennyiségben a generatív részekben volt jelen. Ezenkívül a 34-35. táblázatok arra is felhívják a figyelmet, hogy a generatív részekben akkumulált As mennyisége a teljes növény által felvett As mennyiségéhez viszonyítva az esetek többségében csökkent a növekvő koncentrációjú kezelések hatására. Fontos továbbá azt is kiemelni, hogy a hüvely által felvett As százalékos aránya mindkét kezelési formánál majdnem minden esetben meghaladta a borsószemben jelenlévő As-arányát.

A vegetatív növényi részek által kivont As mennyiségét szemügyre véve azt tapasztaltam, hogy a gyökérben jelenlévő As-aránya a 3 mg kg^{-1} -ot meghaladó As(III)-dózisok hatására a kezelések koncentrációjának emelkedésével nőtt. Megfigyeltem továbbá azt is, hogy az esetek többségében a felvett As döntő hányada a gyökérben akkumulálódott, csupán az 3 mg kg^{-1} -os As(III)-dózis, illetve a $3\text{-}10 \text{ mg kg}^{-1}$ -os As(V)-dózisok esetén haladta meg a levélben jelenlévő As-aránya a gyökérét.

A táblázatban feltüntetett adatokból továbbá az is szembetűnik, hogy az alacsonyabb koncentrációjú As(III)-kezelések esetén ($0\text{-}10 \text{ mg kg}^{-1}$) a levél által kivont As százalékos aránya meghaladta a szárét, a $30\text{-}270 \text{ mg kg}^{-1}$ -os kezeléseknél azonban ennek az ellenkezőjét tapasztaltam, vagyis ezekben az esetekben nemcsak a gyökér, de a szár As-visszatartó képessége is felerősödött. Az As(V)-kezelések esetén ez azonban csak a $90\text{-}270 \text{ mg kg}^{-1}$ -os dózisok esetén volt megfigyelhető.

Általánosságban tehát mindkét kezelési forma esetén megállapítható, hogy az egyes növényi részek felvett As mennyisége folyamatosan nőtt a borsó fejlődése során, csakúgy, mint a teljes növény által kivont As koncentrációja. Általánosságban elmondható továbbá, hogy a gyökérben akkumulált As mennyisége az esetek többségében a kezelési koncentrációk növekedésével minden fenofázisban fokozódott, azonban fontos megjegyezni, hogy a generatív szervek megjelenésével az alacsonyabb kezelési koncentrációk esetén, a felvett As legnagyobb arányban nem a gyökérben, hanem a levélben volt jelen.

Az elemanalízis során megállapítást nyert továbbá az is, hogy a növény fejlődésének kezdeti szakaszában a levelében jelenlévő As százalékos aránya az esetek túlnyomó részében meghaladta a szárét. Az idő előrehaladtával azonban a levél, illetve a szár As-aránya nemcsak hogy kiegyenlítődött, de a szár As-visszatartó képessége oly mértékben fokozódott, hogy a zöldérés, illetve a teljesérés fenofázisában a szárban jelenlévő As százalékos mennyisége a magasabb kezelési szintek esetén meghaladta a levélét.

A vegetatív és generatív részek As-arányát összevetve elmondható, hogy a generatív szervekbe a vegetatív részek által felvett As mennyiségéhez képest kevesebb jutott be. A generatív növényi részek által felvett As százalékos arányát megvizsgálva az is elmondható, hogy a teljes zöldborsó növény által kivont As mennyiségének növekedésével általában csökkent a generatív szervek As-aránya. Továbbá az is megfigyelhető, hogy a borsóhévelyben jelenlévő As százalékos aránya minden esetben meghaladta a termés As mennyiségét. Ezen felül azt is megfigyeltem, hogy azon

kezelési szintek esetén ahol a szár As visszatartó képessége jelentősen megnőtt, a borsószemben a teljes növény által felvett As mennyiségéhez viszonyítva elhanyagolható mennyiségű, még az 1%-ot sem elérő rész jutott be, mely humán egészségügyi szempontból lényeges.

4.4.3. Növekvő koncentrációjú As(III)- és As(V)-kezelések hatása a tenyészedényben nevelt zöldborsó makroelem felvételére

A teljesérés fenofázisban vizsgáltam a zöldborsó makro- és mikroelem készletében bekövetkező változásokat, az As(III)-, illetve As(V)-kezelések függvényében.

A vizsgált makroelemek megegyeznek a tápoldatos, illetve rizoboxos kísérlet esetén ismertettekkel (P, Mg és S). A kísérleti növény P-tartalmának meghatározását különösen fontosnak tartottam, hiszen az arzén a növények ásványianyag-asszimilációjára gyakorolt hatását tekintve a P az egyik leginkább tanulmányozott elem. Ennek oka, hogy az arzenátok és a foszfátok, kémiai felépítésükben hasonlítanak egymáshoz, ami miatt a kutatók egy része az As és a P között antagonistá kapcsolatot állapított meg (Paivöke és Simola, 2001; Kumar et al., 2015), azonban mások arról számoltak be, hogy az arzén-kezelés hatására nő egyes növényi szervek P-tartalma (Tu és Ma, 2005; Melo et al., 2009).

A tenyészedényes kísérlet során alkalmazott zöldborsó szerveinek P-tartalmát a 36. táblázat tartalmazza.

Az As(V)-kezelésekben a generatív részek, illetve a levél és a szár esetén a legnagyobb kezelés (270 mg kg^{-1}), a gyökér vonatkozásában pedig a legnagyobb kezelés mellett a 90 mg kg^{-1} -os dózis is szignifikánsan növelte a P koncentrációját.

36. táblázat: Tenyészedényben nevelt zöldborsó generatív és vegetatív részeinek P-koncentrációja (mg kg^{-1}) a növekvő koncentrációjú (0, 3, 10, 30, 90 és 270 mg kg^{-1}) As(III)- és As(V)-kezelések függvényében ($n=3\pm\text{s.e.}$)

As-kezelés (mg kg ⁻¹)	Különböző növényi szervek P koncentrációja (mg kg ⁻¹)					
	Szem	Hüvely	Levél	Szár	Gyökér	
As(V)	0	4631±236 ^a	964±61 ^a	1303±16 ^a	817±13 ^a	2236±11 ^a
	3	4615±162 ^a	1081±122 ^a	1119±5 ^a	638±6 ^a	2134±97 ^a
	10	4670±140 ^a	918±42 ^a	1048±9 ^a	644±14 ^a	2179±159 ^a
	30	4526±78 ^a	1137±14 ^a	1133±4 ^a	750±9 ^a	2310±136 ^a
	90	4402±113 ^a	1040±69 ^a	1053±7 ^a	731±12 ^a	3989±469 ^b
	270	6911±132 ^b	5524±45 ^b	2636±107 ^b	7272±962 ^b	7097±420 ^c
As(III)	0	4631±236 ^a	964±61 ^{ab}	1303±16 ^a	817±13 ^{ab}	2236±11 ^a
	3	5379±167 ^b	2113±129 ^c	1587±12 ^b	1147±20 ^b	2888±203 ^b
	10	4952±64 ^{ab}	1548±51 ^d	1455±50 ^c	884±103 ^c	2538±56 ^c
	30	4713±285 ^a	1095±7 ^b	1258±11 ^a	820±49 ^{ab}	2277±166 ^a
	90	4749±265 ^a	955±32 ^a	1249±24 ^a	727±20 ^a	2475±57 ^{ac}
	270	6640±324 ^c	3383±86 ^e	2262±113 ^e	2623±127 ^d	3640±117 ^d

Az azonos növényi rész esetén azonos betűvel jelölt kezelések között nincs szignifikáns különbség ($P\leq 0,05$). Szignifikáns különbség azonos szinten, de eltérő formában történő arzén-kezelés esetén: * $p<0,05$; ** $p<0,01$; *** $p<0,001$.

Az As(III)-kezelések hatását megvizsgálva azt tapasztaltam, hogy valamennyi növényi szerv P-tartalma több esetben is megnőtt, elmondható továbbá, hogy a legnagyobb (270 mg kg^{-1}) kezelés hatására jelentős mértékű növekedés következett be. Mindez megegyezik a Melo et al. (2009) által megfigyeltekkel, miszerint az arzén-kezelés hatására nőtt a ricinus növény gyökerének P-tartalma, valamint hasonlóságot mutat Carbonnel-Barrachina et al. (1997) megfigyeléseivel, melynek értelmében az arzén kezelés hatására fokozódott a bab növény hajtásának P koncentrációja.

A foszfor növényeken belüli szállításában feltehetően a Mg hordozó szerepet játszik, mindemellett növényélettani szerepe igen sokrétű, így az egyes növényi szervek Mg-tartalmában bekövetkező változások súlyos anomáliák kialakulásához vezethetnek.

A 37. táblázat a zöldborsó generatív és vegetatív részeinek Mg-tartalmát mutatja be az As(III)- és As(V)-kezelések függvényében.

37. táblázat: Tenyészedényben nevelt zöldborsó generatív és vegetatív részeinek Mg-koncentrációjában (mg kg^{-1}) bekövetkező változások a növekvő koncentrációjú (0, 3, 10, 30, 90 és 270 mg kg^{-1}) As(III)- és As(V)-kezelések függvényében ($n=3\pm\text{s.e.}$)

As-kezelés (mg kg ⁻¹)	Különböző növényi szervek Mg koncentrációja (mg kg ⁻¹)					
	Szem	Hüvely	Levél	Szár	Gyökér	
As(V)	0	1740±75 ^a	2758±134 ^a	4328±32 ^a	2513±40 ^a	1606±32 ^{ab}
	3	1988±52 ^b	3939±318 ^b	5193±58 ^b	2823±18 ^b	2028±96 ^{cd}
	10	1863±38 ^c	3142±62 ^c	5662±46 ^c	3271±37 ^c	1388±21 ^a
	30	1711±27 ^a	2918±14 ^{ac}	4417±7 ^a	2576±8 ^d	1724±158 ^{bc}
	90	1726±22 ^a	2720±79 ^a	4383±49 ^a	2474±27 ^a	2199±301 ^d
	270	1781±84 ^{ac}	2583±106 ^a	3400±141 ^d	2486±46 ^a	2132±89 ^d
As(III)	0	1740±75 ^a	2758±134 ^a	4328±32 ^a	2513±40 ^a	1606±32 ^a
	3	1764±47 ^{ab}	3144±79 ^b	4451±46 ^a	2643±67 ^a	2101±179 ^b
	10	1747±42 ^{ab}	2965±60 ^c	4482±116 ^a	2845±153 ^b	2564±16 ^{c*}
	30	1627±33 ^a	3121±81 ^{cb}	4708±53 ^b	3383±100 ^c	3806±595 ^{d**}
	90	1732±95 ^{ab}	2646±72 ^{ad}	5901±94 ^c	3559±68 ^{cd}	2276±80 ^{bc}
	270	1724±15 ^{ab}	2499±105 ^d	5512±258 ^{d**}	3614±130 ^{d*}	2016±75 ^{ab}

Az azonos növényi rész esetén azonos betűvel jelölt kezelések között nincs szignifikáns különbség ($P\leq 0,05$). Szignifikáns különbség azonos szinten, de eltérő formában történő arzén-kezelés esetén: * $p<0,05$; ** $p<0,01$; *** $p<0,001$.

Az esetek túlnyomó részében mindkét kezelési forma fokozta a zöldborsó különböző növényi szerveinek Mg-tartalmát, mely összhangban van Park et al. (2016) megállapításával, miszerint az As(III)- és As(V)-kezelések növelték a lúdfű Mg koncentrációját.

Az előzőekben tett megállapítást statisztikailag is alátámasztani az alábbi esetekben tudtam.

Az As(V)-kezelések esetén a 3 és 10 mg kg^{-1} -os dózis statisztikailag igazolható mértékben növelte a generatív növényi részek, valamint a levél és a szár Mg-tartalmát. A gyökér esetén szintén szignifikáns növekedés volt megfigyelhető a 3, valamint a $90\text{-}270 \text{ mg kg}^{-1}$ -os kezelések esetén.

Az As(III)-kezelések a borsószem Mg koncentrációját számottevően nem befolyásolták, ugyanakkor a hüvely esetén a $3\text{-}30 \text{ mg kg}^{-1}$ -os, a levélnél a $30\text{-}270 \text{ mg kg}^{-1}$ -os, a szár esetén a $10\text{-}270 \text{ mg kg}^{-1}$ -os, a gyökér esetén pedig a $3\text{-}90 \text{ mg kg}^{-1}$ -os kezelések szignifikáns növekedést eredményeztek.

Mindemellett fontosnak tartom megemlíteni, hogy a legnagyobb dózis (270 mg kg^{-1}) az As(V)-kezelésben a levélnél, az As(III)-kezelésben pedig a borsóhüvelynél kismértékben, de szignifikánsan gátolta a Mg beépülését.

Az alkalmazott As(III)- és As(V)-kezelések hatással voltak a tenyészedényben nevelt zöldborsó szerveinek S-tartalmára is, ahogyan azt a 38. táblázat is mutatja.

38. táblázat: Tenyészedényben nevelt zöldborsó generatív és vegetatív részeinek S-koncentrációjában (mg kg^{-1}) bekövetkező változások a növekvő koncentrációjú (0, 3, 10, 30, 90 és 270 mg kg^{-1}) As(III)- és As(V)-kezelések függvényében ($n=3\pm\text{s.e.}$)

As-kezelés (mg kg ⁻¹)	Különböző növényi szervek S koncentrációja (mg kg ⁻¹)					
	Szem	Hüvely	Levél	Szár	Gyökér	
As(V)	0	2589±97 ^a	1374±44 ^a	4079±44 ^a	2984±6 ^{ab}	4469±88 ^a
	3	3081±96 ^b	1780±91 ^{bc}	4297±43 ^{ab}	2947±39 ^a	6165±120 ^b
	10	2625±73 ^{ac}	1399±27 ^a	4357±87 ^b	3009±45 ^{ab}	3994±204 ^c
	30	2493±61 ^a	1454±3 ^a	4381±23 ^b	2888±169 ^a	3945±184 ^c
	90	2134±178 ^d	1653±127 ^b	7342±16 ^c	3181±15 ^b	2989±453 ^d
	270	2775±29 ^c	1801±69 ^c	6497±357 ^d	6601±201 ^c	7676±249 ^e
As(III)	0	2589±97 ^a	1374±44 ^a	4079±44 ^a	2984±6 ^{ab}	4469±88 ^{ab}
	3	2635±15 ^a	1621±49 ^b	3501±24 ^b	2719±38 ^{ac}	3979±124 ^{a**}
	10	2620±51 ^a	1494±33 ^c	3542±325 ^b	2641±204 ^a	4850±236 ^b
	30	2145±157 ^b	1285±42 ^d	3457±28 ^b	3212±92 ^b	6349±875 ^{c***}
	90	3241±182 ^c	2159±49 ^e	7241±155 ^c	5684±207 ^{d**}	6516±150 ^{c***}
	270	2725±26 ^a	1972±69 ^f	3659±168 ^{b***}	4287±135 ^{e**}	6478±140 ^c

Az azonos növényi rész esetén azonos betűvel jelölt kezelések között nincs szignifikáns különbség ($P \leq 0,05$). Szignifikáns különbség azonos szinten, de eltérő formában történő arzén-kezelés esetén: * $p < 0,05$; ** $p < 0,01$; *** $p < 0,001$.

A mérési eredményeket tanulmányozva azt tapasztaltam, hogy az As(V)-tel kezelt növények esetén a hüvely, a levél és a szár, míg az As(III)-mal kezelt növények esetén a szár és a gyökér S-tartalma több esetben is szignifikánsan megnőtt. Kumar et al. (2015) szintén azt tapasztalta, hogy az As pozitívan hat a növény S-fevételére, azonban az általam megfigyelttel ellentétben, mindezt csak a $2 \mu\text{M}$ -nál ($0,15 \text{ mg kg}^{-1}$) kisebb As(V)-kezelések esetén tudta bizonyítani. Ezenfelül részben hasonló eredményekre jutott Kádár Imre (2012) is, aki szántóföldi kísérletében azt tapasztalta, hogy a 0, 30, 90 és 270 mg kg^{-1} -os As-kezelések hatására fokozódott a szár, valamint a 90- 270 mg kg^{-1} -os kezelésekben a borsóhüvely S-tartalma.

A további esetekben az As(V)- és As(III)-kezelések hatásának irányultsága nagyban függött az alkalmazott kezelés koncentrációjától, tendenciózus változást egyik esetben sem tapasztaltam.

4.4.4. Növekvő koncentrációjú As(III)- és As(V)-kezelések hatása a tenyészedényben nevelt zöldborsó mikroelem felvételére

A zöldborsó különböző szerveinek P-, Mg-, és S-tartalma mellett, vizsgáltam a mikroelem összetételben bekövetkező változásokat is, hiszen a növekedés, a fejlődés, valamint a termésképzés szempontjából bizonyos mikroelemek éppúgy nélkülözhetetlenek, mint a fent említett makroelemek. A vizsgált mikroelemek

megegyeznek a tápoldatos, illetve rizoboxos kísérlet esetén ismertettekkel (Cu, Fe, Mo, Mn és Zn).

A 39. táblázat a növekvő koncentrációjú As(III)- és As(V)-kezelések, zöldborsó Cu-koncentrációjára gyakorolt hatását mutatja be.

39. táblázat: *Tenyészedényben nevelt zöldborsó generatív és vegetatív részeinek Cu-koncentrációjában (mg kg^{-1}) bekövetkező változások a növekvő koncentrációjú (0, 3, 10, 30, 90 és 270 mg kg^{-1}) As(III)- és As(V)-kezelések függvényében ($n=3\pm s.e.$)*

As-kezelés (mg kg ⁻¹)	Különböző növényi szervek Cu koncentrációja (mg kg ⁻¹)					
	Szem	Hüvely	Levél	Szár	Gyökér	
As(V)	0	5,44±0,11 ^a	2,31±0,03 ^a	4,22±0,1 ^a	2,55±0,02 ^a	14,6±0,8 ^a
	3	6,07±0,33 ^b	2,79±0,11 ^b	4,27±0,11 ^a	2,58±0,07 ^a	12,8±0,2 ^a
	10	6,31±0,05 ^b	2,75±0,08 ^b	4,57±0,12 ^a	2,95±0,02 ^a	14,2±0,1 ^a
	30	4,31±0,08 ^c	2,55±0,07 ^c	4,10±0,06 ^{ab}	2,81±0,08 ^a	14,6±1,7 ^a
	90	3,40±0,12 ^d	1,88±0,06 ^d	3,64±0,07 ^b	2,32±0,04 ^a	11,9±2,9 ^a
	270	6,81±0,38 ^e	5,20±0,08 ^e	13,3±0,8 ^c	10,0±1,1 ^b	22,1±2,8 ^b
As(III)	0	5,44±0,11 ^{ab}	2,31±0,03 ^a	4,22±0,1 ^a	2,55±0,02 ^a	14,6±0,8 ^{ab}
	3	7,50±1,12 ^c	4,42±0,13 ^{b*}	5,48±0,65 ^b	3,41±0,58 ^a	17,1±0,1 ^{ab*}
	10	6,09±0,34 ^b	3,84±0,23 ^{c*}	4,86±0,11 ^{ab}	3,56±0,1 ^a	12,4±1,7 ^{ac}
	30	6,05±0,33 ^{b**}	3,73±0,46 ^c	4,75±0,09 ^{ab}	3,84±0,11 ^{a*}	11,4±0,95 ^{ac}
	90	4,79±0,23 ^{a*}	2,68±0,22 ^a	4,62±0,67 ^{ab}	3,35±0,08 ^{a*}	14,1±1,6 ^a
	270	6,30±0,86 ^b	3,41±0,23 ^{c**}	5,48±1,23 ^{b**}	7,8±4,39 ^{b*}	21,6±10,5 ^b

Az azonos növényi rész esetén azonos betűvel jelölt kezelések között nincs szignifikáns különbség ($P\leq 0,05$). Szignifikáns különbség azonos szinten, de eltérő formában történő arzén-kezelés esetén: * $p<0,05$; ** $p<0,01$; *** $p<0,001$.

Az As(V)-tel kezelt növények esetén megfigyeltem, hogy a 270 mg kg^{-1} -os kezelés hatására az alacsonyabb kezelési szinteken ($0\text{-}90 \text{ mg kg}^{-1}$) mért értékekhez képest jelentősen megnőtt valamennyi növényi szerv Cu-tartalma, mely véleményem szerint a „töményedési” effektusnak köszönhető. Ezen felül szignifikáns változást a vegetatív növényi szervek tekintetében csak a 90 mg kg^{-1} -os kezelés esetén figyeltem meg, mely szignifikánsan csökkentette a levél Cu koncentrációját. Az As(V)-kezelésben részesített növények generatív részeinek Cu-tartalmát tanulmányozva megfigyeltem, hogy amíg az alacsonyabb koncentrációjú kezelések serkentették a Cu-felhalmozást, addig a nagyobb As(V)-dózisok esetén a Cu felvétel már gátoltta vált. Ugyanakkor fontos megjegyezni, hogy a legnagyobb (270 mg kg^{-1}) dózis esetén a generatív részeknél is érvényesült a „töményedési” effektus.

Az As(III)-mal kezelt növények esetén a legnagyobb dózis (270 mg kg^{-1}) hatására a borsószem kivételével valamennyi növényi rész esetén szintén megfigyelhető volt a „töményedési” effektus. Mindemellett, az alkalmazott As(III)-kezelések eredményeként

több esetben is szignifikáns növekedést figyeltem meg. A borsószem és levél esetén a 3 mg kg⁻¹-os, borsóhüvely esetén a 3-30 mg kg⁻¹-os kezelések fokozták szignifikánsan a Cu mennyiségét. Az As(III)-kezelésnél megfigyeltek több esetben is összhangban vannak Kumar et al. (2015) megállapításával, melynek értelmében az As pozitívan hat a növények Cu felvételére. A szár és a gyökér esetén azonban a legnagyobb kezelésben tapasztaltaktól eltekintve szignifikáns változás nem volt megfigyelhető.

A kutatók egy része a Cu mellett vizsgálta az As-kezelések Fe-tartalomra gyakorolt hatását is. E tekintetben Park et al. (2016), valamint Vromman et al. (2011) azt tapasztalta, hogy az As pozitív hatást gyakorol a növények Fe felvételére, mely megállapítást zöldborsó növény esetén több alkalommal is bizonyítani tudtam (40. táblázat).

40. táblázat: *Tenyészedényben nevelt zöldborsó növényi részeinek Fe koncentrációjában (mg kg⁻¹) bekövetkező változások a növekvő koncentrációjú (0, 3, 10, 30, 90 és 270 mg kg⁻¹) As(III)- és As(V)-kezelések függvényében (n=3±s.e.)*

As-kezelés (mg kg ⁻¹)	Különböző növényi szervek Fe koncentrációja (mg kg ⁻¹)					
	Szem	Hüvely	Levél	Szár	Gyökér	
As(V)	0	68,3±2,9 ^a	21,7±4,3 ^a	141±3 ^a	58,9±2,3 ^a	1772±25 ^a
	3	109±4 ^b	25,4±2,3 ^a	202±3 ^a	85,6±21,2 ^a	1972±270 ^a
	10	86,6±2,8 ^c	40,0±1,6 ^b	170±24 ^a	46,9±2,3 ^a	1390±589 ^a
	30	80,7±2,3 ^d	35,6±7,9 ^b	147±7 ^a	126±8 ^a	2299±569 ^a
	90	73,7±3,0 ^a	44,5±8,2 ^b	178±18 ^a	89,9±3,8 ^a	1385±231 ^a
	270	59,4±2,0 ^e	61,5±2,1 ^c	1012±152 ^b	654±142 ^b	2389±80 ^a
As(III)	0	68,3±2,9 ^a	21,7±4,3 ^a	141±3 ^a	58,9±2,3 ^a	1772±25 ^a
	3	99,1±15,5 ^{abc}	74,4±47,4 ^{b***}	207±25 ^b	71,9±18,0 ^a	3820±487 ^{b**}
	10	101±6 ^{abc*}	55,6±4,9 ^{ab*}	185±7 ^{ab}	71,4±1,8 ^{a**}	1840±330 ^a
	30	115±12 ^{bc*}	44,6±4,2 ^{ab}	161±45 ^{ab}	72,3±11,1 ^{a**}	1902±503 ^a
	90	130±45 ^{c**}	49,6±3,1 ^{ab}	186±36 ^{ab}	123±42 ^{b*}	1705±206 ^a
	270	80,2±4,2 ^{ab*}	40,7±5,8 ^{ab**}	178±35 ^{ab***}	118±20 ^{b***}	1836±936 ^a

Az azonos növényi rész esetén azonos betűvel jelölt kezelések között nincs szignifikáns különbség (P≤0,05). Szignifikáns különbség azonos szinten, de eltérő formában történő arzén-kezelés esetén: *p<0,05; **p<0,01; ***p<0,001.

A fenti táblázatból jól látható, hogy az As(III)-kezelések hatására a zöldborsó növényi szerveinek Fe-tartalma megemelkedett, statisztikailag is igazolható növekedést azonban csak az alábbiakban felsorolt esetekben tudtam kimutatni. A kontrollhoz viszonyítva a borsószem esetén a 30-90 mg kg⁻¹-os, a borsóhüvely, a levél, valamint a gyökér esetén a 3 mg kg⁻¹-os, a szár tekintetében pedig a 90-270 mg kg⁻¹-os kezelések fejtettek ki szignifikáns hatást.

Az As(V)-kezelések esetén hasonló tendenciát figyeltem meg a borsóhüvely, a levél, valamint a szár esetén, ugyanis a borsóhüvelynél a 10-270 mg kg⁻¹-os, a levél és a szár esetén pedig a 270 mg kg⁻¹-os kezelés statisztikailag alátámasztható módon növelte a Fe mennyiségét. Megfigyeltem továbbá, hogy amíg a 3-30 mg kg⁻¹-os As(V)-dózisok fokozták a borsószem Fe koncentrációját, addig a 270 mg kg⁻¹-os kezelés már gátolta a Fe beépülését. A 40. táblázat alapján továbbá megállapítható az is, hogy az alkalmazott As(V)-kezelések a gyökér Fe koncentrációját nagymértékben nem befolyásolták.

Az alkalmazott As(III)-, illetve As(V)-kezelések hatással voltak a tenyészedényben nevelt zöldborsó szerveinek Mn-tartalmára is, ahogyan azt a 41. táblázat is mutatja.

41. táblázat: Tenyészedényben nevelt zöldborsó növényi részeinek Mn koncentrációjában (mg kg⁻¹) bekövetkező változások a növekvő koncentrációjú (0, 3, 10, 30, 90 és 270 mg kg⁻¹) As(III)- és As(V)-kezelések függvényében (n=3±s.e.)

As-kezelés (mg kg ⁻¹)	Különböző növényi szervek Mn koncentrációja (mg kg ⁻¹)					
	Szem	Hüvely	Levél	Szár	Gyökér	
As(V)	0	19,9±1,5 ^a	27,5±2,3 ^a	107±2 ^a	25,7±0,2 ^a	98,5±2,2 ^a
	3	24,6±1,1 ^b	36,1±3,2 ^b	137±3 ^b	28,8±0,2 ^c	138±10 ^b
	10	22,6±0,8 ^b	34,6±1,4 ^b	138±3 ^b	31,0±0,2 ^b	119±11,1 ^c
	30	22,2±0,7 ^b	35,4±0,4 ^b	146±1 ^c	34,4±0,2 ^d	93,6±3,9 ^{da}
	90	23,6±1,1 ^b	35,2±1,5 ^b	183±0 ^d	38,3±0,7 ^e	86,4±2,0 ^{da}
	270	28,5±2,1 ^c	33,8±2,6 ^b	87,1±1,2 ^e	44,1±2,8 ^f	76,7±10,8 ^d
As(III)	0	19,9±1,5 ^a	27,5±2,3 ^a	107±2 ^a	25,7±0,2 ^a	98,5±2,2 ^a
	3	19,3±0,7 ^{a*}	31,2±1,4 ^b	111±1 ^{a**}	30,6±0,9 ^b	181±18 ^{b*}
	10	19,0±0,6 ^a	28,5±0,9 ^{a**}	125±4 ^b	32,5±0,6 ^{bc}	154±6 ^{c*}
	30	17,9±0,4 ^{ab*}	27,7±0,8 ^{a**}	137±2 ^{c*}	34,0±2,9 ^{cd}	128±4 ^{d*}
	90	16,0±2,0 ^{b*}	29,6±1,0 ^{ab*}	208±5 ^{d**}	36,7±0,7 ^d	125±28 ^{d*}
	270	12,8±0,7 ^{c**}	12,4±0,1 ^{c**}	88,1±6,1 ^e	23,4±2,1 ^{a**}	59,3±2,1 ^e

Az azonos növényi rész esetén azonos betűvel jelölt kezelések között nincs szignifikáns különbség (P≤0,05). Szignifikáns különbség azonos szinten, de eltérő formában történő arzén-kezelés esetén: *p<0,05; **p<0,01; ***p<0,001.

A táblázat eredményei rámutatnak arra, hogy az As(V)-dózisok hatására a generatív növényi részek, valamint a szár Mn koncentrációja fokozódott, amely hasonlóságot mutat Kádár (2012) eredményeivel. Szántóföldi mikroelem terheléses kísérletében ugyanis azt tapasztalta, hogy a növekvő koncentrációjú (0, 30, 90 és 270 mg kg⁻¹) As-kezelés hatására nőtt a borsóhüvely, illetve a szár Mn koncentrációja. A levél, illetve a gyökér Mn-tartalma az alacsonyabb koncentrációjú kezelések esetén emelkedett, a kontrollhoz viszonyítva szignifikánsan magasabb értéket a levélnél a 3-90 mg kg⁻¹-os, a gyökér tekintetében pedig a 3-10 mg kg⁻¹-os As(V)-kezeléseknél tudtam kimutatni,

ugyanakkor a 270 mg kg^{-1} -os As(V)-kezelés hatására már visszaesést tapasztaltam a Mn koncentrációjában, mely statisztikailag is igazolható volt.

Az As(III)-mal kezelt talajon termett zöldborsó vegetatív szerveinek Mn-tartalmát tanulmányozva hasonló tendenciát figyeltem meg. A 270 mg kg^{-1} -os dózis mind a levél, mind a szár, illetve a gyökér Mn felvételét gátolta, az alacsonyabb koncentrációjú kezelések azonban serkentették a Mn-felhalmozását. A generatív növényi részek Mn-tartalmát megvizsgálva megállapítható, hogy az As(III)-kezelésekben a magasabb koncentrációjú kezelések csökkenést eredményeztek: a borsóhüvely esetén a 270 mg kg^{-1} -os, a borsószem esetén pedig a 270 mg kg^{-1} -os kezelés mellett a 90 mg kg^{-1} -os dózis is szignifikáns csökkenést eredményezett a kontrollhoz képest. Mindemellett fontosnak tartom megjegyezni, hogy a borsóhüvely esetén a 3 mg kg^{-1} -os As(III)-kezelés hatására szignifikáns növekedést tudtam kimutatni.

Az előzőekben leírtak összhangban vannak a Tu és Ma (2005) megállapításával, melynek értelmében a talaj kisebb mértékű arzén szennyezése esetén növekedés volt megfigyelhető a kínai páfrány Mn-tartalmában, azonban a magasabb As koncentrációk már gátlón hatottak.

Az elemanalitikai vizsgálatok során kiemelten fontosnak tartottam a növényi szervek Mo-tartalmának meghatározását is (42. táblázat), hiszen az As a növények Mo felvételére gyakorolt hatása kevésbé tanulmányozott.

Mindkét arzénforma esetén megfigyeltem, hogy a legnagyobb dózis (270 mg kg^{-1}) hatására valamennyi növényi szerv Mo-tartalma jelentősen megnőtt. A Mo-tartalomban jelentkező nagymértékű növekedésre, az erőteljesen lecsökkent biomassza esetén fellépő töményedési effektus adhat magyarázatot.

42. táblázat: Tenyészedényben nevelt zöldborsó generatív és vegetatív részeinek Mo koncentrációjában (mg kg^{-1}) bekövetkező változások a növekvő koncentrációjú (0, 3, 10, 30, 90 és 270 mg kg^{-1}) As(III)- és As(V)-kezelések függvényében ($n=3\pm\text{s.e.}$)

As-kezelés (mg kg ⁻¹)	Különböző növényi szervek Mo koncentrációja (mg kg ⁻¹)					
	Szem	Hüvely	Levél	Szár	Gyökér	
As(V)	0	2,90±0,20 ^a	1,15±0,07 ^a	0,45±0,047 ^{ab}	2,85±0,06 ^{ab}	2,51±0,19 ^a
	3	2,16±0,10 ^b	1,26±0,05 ^a	0,327±0,017 ^a	1,75±0,02 ^a	5,43±0,51 ^b
	10	2,12±0,04 ^b	0,947±0,04 ^a	0,312±0,037 ^a	2,06±0,03 ^a	3,30±0,37 ^c
	30	1,83±0,03 ^c	1,04±0,00 ^a	0,337±0,016 ^a	2,84±0,05 ^{ab}	2,25±0,27 ^a
	90	2,88±0,08 ^a	2,58±0,11 ^b	0,617±0,087 ^b	3,75±0,04 ^b	2,20±0,29 ^a
	270	8,82±0,26 ^d	6,21±0,58 ^c	2,24±0,33 ^c	11,9±1,6 ^c	5,51±0,15 ^b
As(III)	0	2,90±0,20 ^a	1,15±0,07 ^a	0,450±0,047 ^a	2,85±0,06 ^a	2,51±0,19 ^a
	3	1,95±0,07 ^b	1,64±0,02 ^{b*}	0,547±0,010 ^{a**}	3,47±0,04 ^{a***}	1,95±0,23 ^{b**}
	10	1,99±0,1 ^b	1,49±0,10 ^{b**}	0,439±0,035 ^{a**}	3,20±0,20 ^{a**}	1,63±0,08 ^{bc**}
	30	1,24±0,05 ^{c*}	0,944±0,038 ^c	0,320±0,048 ^b	1,92±0,15 ^{b*}	1,51±0,49 ^{bc}
	90	1,42±0,07 ^{c**}	1,07±0,04 ^{a^{c**}}	0,218±0,027 ^{b***}	1,74±0,02 ^{b*}	1,26±0,06 ^{c*}
	270	5,73±0,34 ^{d**}	6,12±0,29 ^d	2,21±0,17 ^c	8,18±0,72 ^c	4,15±0,28 ^{d*}

Az azonos növényi rész esetén azonos betűvel jelölt kezelések között nincs szignifikáns különbség ($P\leq 0,05$). Szignifikáns különbség azonos szinten, de eltérő formában történő arzén-kezelés esetén: * $p<0,05$; ** $p<0,01$; *** $p<0,001$.

A 42. táblázatból továbbá az is kitűnik, hogy a talajba kijuttatott arzén több esetben gátolta a vegetatív részek Mo felvételét. Az As(III)-kezelésekben statisztikailag igazolható mértékű csökkenést figyeltem meg a levél és a szár esetén a 30-90 mg kg^{-1} -os, míg a gyökérnél a 3-90 mg kg^{-1} -os dózisok hatására. A zöldborsó, mint pillangós virágú növény különösen érzékeny a Mo hiányra. A Mo a nitrát-reduktáz enzim egyik fémkomponense. Hiányában nitrát akkumulációt tapasztalhatunk, ugyanis a redukciója nem történhet meg. A Mo nitrogén-anyagcserében betöltött szerepe miatt, hiányában N-hiányhoz hasonló tünetek (növekedés visszamaradása, levelek kivilágosodása) alakulhatnak ki, mely több esetben is megfigyelhető volt a tenyészedényes kísérletnél. Ezzel szemben az As(V)-tel kezelt talajon termesztett zöldborsó vegetatív részeinek Mo-tartalma több esetben is szignifikánsan megnőtt. A legnagyobb kezelési szint (270 mg kg^{-1}) mellett a levélnél a 90 mg kg^{-1} -os, a gyökérnél pedig a 3-10 mg kg^{-1} -os kezelésekben figyeltem meg szignifikáns növekedést.

A generatív szervek Mo koncentrációjában bekövetkező változásokat elemezve megállapítható, hogy a borsószem Mo-tartalma mindkét kezelési forma esetén visszaesett, a kontrollhoz képest statisztikailag igazolható mértékű csökkenést az As(V)-tel kezelt növény esetén a 3-30 mg kg^{-1} -os, az As(III)-mal kezelt növény esetén pedig a 3-90 mg kg^{-1} -os kezelésekben tudtam kimutatni. A generatív növényi részek Mo koncentrációját tanulmányozva megfigyeltem továbbá, hogy a borsóhüvelynél az

As(III)-, illetve az As(V)-kezelések hatása különbözött. Az As(V)-kezelésekben a 270 mg kg⁻¹-os kezelésnél tapasztalttól eltekintve szignifikáns változást csak a 90 mg kg⁻¹-os dózis eredményezett, a kontrollhoz képest több mint duplájára nőtt a borsóhüvely Mo-tartalma. Az As(III)-kezelésekben ezzel szemben a 3-10 mg kg⁻¹-os dózisok növekedést eredményeztek, a 30-90 mg kg⁻¹-os kezelések azonban kismértékben, de szignifikánsan gátolták a borsóhüvely Mo felvételét.

Az előzőekben említetteken túl, jelentős változást tapasztaltam a kísérleti növény egyes részeinek Zn-tartalmában is (43. táblázat).

43. táblázat: *Tenyészedényben nevelt zöldborsó növényi részeinek Zn koncentrációjában (mg kg⁻¹) bekövetkező változások a növekvő koncentrációjú (0, 3, 10, 30, 90 és 270 mg kg⁻¹) As(III)- és As(V)-kezelések függvényében (n=3±s.e.)*

As-kezelés (mg kg ⁻¹)	Különböző növényi szervek Zn koncentrációja (mg kg ⁻¹)					
	Szem	Hüvely	Levél	Szár	Gyökér	
As(V)	0	63,7±0,4 ^a	25,1±0,7 ^a	25,8±0,5 ^a	34,4±0,3 ^a	71,7±4,1 ^a
	3	89,3±3,7 ^b	82,5±5,1 ^b	29,9±0,8 ^b	34,2±1,2 ^a	34,6±2,1 ^{bc}
	10	66,5±1,4 ^a	27,0±6,0 ^a	33,6±6,6 ^b	11,5±0,4 ^b	28,5±0,9 ^b
	30	56,6±2,3 ^c	24,2±0,6 ^a	16,1±0,8 ^c	19,9±1,1 ^c	42,0±7,5 ^c
	90	40,5±1,0 ^d	9,87±0,61 ^c	16,3±0,2 ^c	3,59±0,23 ^d	28,7±10,3 ^b
	270	42,8±3,7 ^d	27,2±0,9 ^a	7,8±0,62 ^d	42,6±8,2 ^e	69,5±1,8 ^a
As(III)	0	63,7±0,4 ^a	25,1±0,7 ^a	25,8±0,5 ^a	34,4±0,3 ^{abc}	71,7±4,1 ^{ab}
	3	89,6±13,4 ^b	46,1±1,8 ^{b***}	46,3±4,2 ^{b**}	40,4±10,2 ^c	48,3±1,4 ^{ac**}
	10	74,8±4,7 ^{ab}	37,0±2,1 ^c	18,5±0,5 ^{c***}	35,0±4,2 ^{bc***}	40,4±1,5 ^{c**}
	30	68,8±3,0 ^{a*}	34,0±3,6 ^c	16,6±0,7 ^c	28,3±0,5 ^{ab**}	43,1±9,8 ^c
	90	59,6±10,1 ^a	26,5±2,1 ^{a***}	15,8±2,4 ^c	27,7±9,4 ^{ab***}	39,9±5,8 ^c
	270	73,6±9,5 ^{a***}	27,3±2,5 ^a	17,4±3,2 ^{c***}	23,3±1,0 ^{a***}	80,4±7,6 ^{b*}

Az azonos növényi rész esetén azonos betűvel jelölt kezelések között nincs szignifikáns különbség (P≤0,05). Szignifikáns különbség azonos szinten, de eltérő formában történő arzén-kezelés esetén: *p<0,05; **p<0,01; ***p<0,001.

A 43. táblázatban ismertetett eredmények alapján megállapítható, hogy az As(V)-tel kezelt növények generatív részeinek Zn-tartalmát a 3 mg kg⁻¹-os dózis szignifikánsan növelte, ugyanakkor a borsószemnél a 30-270 mg kg⁻¹-os, míg a borsóhüvelynél a 90 mg kg⁻¹-os kezelés hatására a Zn koncentrációja statisztikailag alátámasztható módon visszaesett. Ezzel szemben az As(III)-mal kezelt növények generatív részeinek Zn-tartalmában csökkenés nem, azonban szignifikáns növekedés több esetben is megfigyelhető volt. A borsószem Zn koncentrációjában a 3 mg kg⁻¹-os, a borsóhüvely Zn-tartalmában pedig a 3-30 mg kg⁻¹-os kezelések okoztak jelentős növekedést. Tehát az As(III)- és As(V)-kezelés eltérő hatása a generatív szervek tekintetében több esetben is megmutatkozott.

A vegetatív növényi szervek Zn-tartalmát megvizsgálva megállapítható, hogy a gyökérnél több esetben is mindkét kezelési forma csökkenést eredményezett, mely megegyezik a Liu et al. (2008) által őszi búza, illetve Shaibur et al. (2009) által vízi spenót esetén tapasztaltakkal. Az As a növények Zn felvételére gyakorolt negatív hatása, a levél esetén is megfigyelhető volt a 30-270 mg kg⁻¹-os As(III)-kezeléseknél, valamint a 10-270 mg kg⁻¹-os As(V)-dózisoknál. Fontos azonban megjegyezni, hogy az ennél alacsonyabb dózisok a levél Zn felhalmozását indukálták.

A talajfelszín feletti vegetatív részek Zn koncentrációját tanulmányozva azonban ismételten szembetűnik a különböző kezelési formák eltérő hatása. Ugyanis amíg az As(III)-kezelések esetén a szár Zn koncentrációjában szignifikáns változás nem történt, addig az As(V)-tel kezelt növények esetén a Zn-tartalom koncentráció-függő módon változott. Az alacsonyabb koncentrációjú kezelések (10-90 mg kg⁻¹) esetén csökkenést, míg a legmagasabb (270 mg kg⁻¹) dózis esetén növekedést figyeltem meg.

5. KÖVETKEZTETÉSEK

5.1. Talajvizsgálati eredményekből levont következtetések

Munkám során meghatároztam a rizoboxos, illetve a tenyészedényes kísérlet esetén alkalmazott mészelepedékes csernozjom talaj összes, valamint Lakanen-Erviö oldható As-tartalmát. Az elemanalitikai vizsgálatok eredménye alapján megállapítottam, hogy az As(III)-, illetve As(V)-kezelések hatására a talaj összes, valamint oldható As-tartalma egyenletesen nőtt, azonban a talaj összes As-tartalmának csak kis része volt a növények számára hozzáférhető, mely összhangban van Szegedi et al. (2013) megfigyelésével. A kezeletlen kontrolltalaj esetén az összes arzén 38,6%-a, az As(III)-kezelések esetén a 39-60,7%-a, az As(V)-dózisoknál pedig 38,2-56,9%-a volt a növények számára felvehető formában jelen. Feltételezésem szerint ez egyrészt annak köszönhető, hogy a kísérleti talaj jelentős humusz-tartalommal bírt, mely képes a talajba jutott As egy részét megkötni. Másrészt a talajban jelenlévő magnézium-, alumínium-, vas-, valamint mangán-oxidok és -hidroxidok felületén az As képes megkötődni, amely szintén hozzájárul az As talaj-növény rendszerben való mobilitásának megakadályozásához. Az As mozgékonyágát a talaj elemkészlete (pl.: Al, Fe, Mn) mellett, kémhatása is nagyban befolyásolja. A kísérletekben alkalmazott mészelepedékes csernozjom talaj pH-értéke közel semleges (6,58), ilyen körülmények között a fémek vegyületei stabilak, nehezen mennek oldatba, amely hozzájárul ahhoz, hogy a talaj Lakanen-Erviö oldható As koncentrációja lényegesen kisebb, mint az összes arzén-tartalma. A rizoboxos, illetve tenyészedényes kísérletek során az arzént nagy mennyiségben juttattam a talajba, így feltételezésem szerint nemcsak az adszorpciós folyamatok előtérbe kerülését, de olyan csapadékképződési folyamatok lejátszódását is indukáltam, melyeknek szintén következménye, hogy a növények számára hozzáférhető As mennyisége jelentősen kisebb, mint a talaj teljes As készlete.

A kapott eredményeket értékelve megfigyeltem, hogy a rizoboxos, illetve tenyészedényes kísérletben az As(III)-kezelések, több esetben is toxikusabban hatottak, mint az As(V)-dózisok. Véleményem szerint ez részben annak köszönhető, hogy az azonos koncentrációjú, de eltérő formájú kezelések esetén a növények számára elérhető As mennyisége az As(III)-kezeléseknél nagyobb volt, mint az As(V)-dózisok tekintetében, mely a magasabb koncentrációjú (30-270 mg kg⁻¹) kezelésekben kiváltképpen igaz.

Az As(V)-kezeléseknél csak a 270 mg kg⁻¹-os, míg az As(III)-kezeléseknél a 30-270 mg kg⁻¹-os dózisok esetén a talaj teljes As mennyiségének több mint fele elérhető

volt a növények számára. Ennek magyarázata feltételezésem szerint abban keresendő, hogy az As(V)-nek több megkötődési lehetősége van a talajban a foszfáthoz való hasonlósága miatt. Az As(III)-kezelések esetén azonban az abszorbensként szolgáló talajkomponensek nagyobb részt már az alacsonyabb koncentrációjú kezelések esetén is telítődtek, melynek következtében a talajba juttatott As nagyobb mértékben már nem volt képes megkötődni, így ezen meg nem kötött mennyiség a növények számára felvehető As koncentrációt növelte.

5.2. Növényminták vizsgálati eredményeiből levont következtetések

A teszt növények **szárazanyag-produktumát** tanulmányozva megállapítottam, hogy a tápoldatos kísérlet esetén, a növekvő koncentrációjú As(III)- és As(V)-kezelések hatására csökkent mind a kukorica-, mind a napraforgó csíranövény szerveinek száraztömege. A növekvő koncentrációjú As-kezelések egy- és kétszikű növényekre gyakorolt hatását elemezve azt is megfigyeltem, hogy a napraforgó (kétszikű növény) érzékenyebben reagált az As-toxicitásra, mint a kukorica (egyszikű növény). Azt tapasztaltam ugyanis, hogy a tápoldatos kísérletben a kukorica csíranövény számára a 90 mg kg^{-1} -os kezelés mindkét szervetlen As-forma tekintetében oly mértékben toxikusnak bizonyult, hogy már a kísérlet kezdetén a növények pusztulását okozta. A napraforgó csíranövényeknél viszont a 90 mg kg^{-1} -os kezelés mellett a 30 mg kg^{-1} -os dózis esetén mindkét kezeléstípus, míg a 10 mg kg^{-1} -os koncentrációnál pedig az As(III)-kezelés hatására a kísérleti növények pusztulása következett be. Mindez nemcsak az egy- és kétszikű növények eltérő érzékenysége, de az As(III) és As(V) toxicitásának különbségére is felhívja a figyelmet.

Amíg a tápoldatos kísérletben a kijuttatott As teljes mennyiségében elérhető volt a növények számára, addig a rizoboxos kísérletben a talajba juttatott arzénnek csak kis része volt hozzáférhető a növények számára, melyből adódóan az As(III) és As(V) toxikus hatása rizoboxos kísérlet esetén kevésbé nyilvánult meg, a nagyobb koncentrációjú kezelések sem okozták a növények pusztulását. A rizoboxos kísérleti eredményeket értékelve azt tapasztaltam, hogy a kezelések hatására a kukorica és napraforgó növények szárazanyag-tartalmában számottevő változás nem következett be, csupán a 10 mg kg^{-1} -os As(V)-kezelés hatására nőtt meg szignifikánsan a kukorica csíranövény hajtásának száraztömege, mely összhangban van Carbonell-Barrachina et al. (1998b), Gulz és Gupta (2000), Jacobs et al. (1970b), Woolson et al. (1971), valamint Xu és Thornton (1985) azon megállapításával, miszerint az arzén kis

koncentrációban hasznos lehet a növények számára, serkentheti egyes növényi szervek tömegének gyarapodását.

Az arzénal kezelt kukorica és napraforgó fejlődése, valamint az As(III)- és As(V)-kezelések hatása közötti különbségek a **rizoboxos kísérlet gyökérnövekedési eredményeit** tanulmányozva azonban jól megmutatkoznak. Megállapítottam ugyanis, hogy a kukorica csíranövényeknél az As(III)-kezelések esetén a kontrollnövény gyökérnövekedése volt a legintenzívebb, az alacsonyabb koncentrációjú ($1-10 \text{ mg kg}^{-1}$) As(III)-kezelések számottevő hatást nem gyakoroltak, ugyanakkor a nagyobb As(III)-dózisok ($30-90 \text{ mg kg}^{-1}$) már akadályozták a gyökér fejlődését. Ezzel ellentétben az As(V)-tel kezelt növények tekintetében a kontroll növény gyökere fejlődött a legkisebb mértékben, a növekvő koncentrációjú As(V)-kezelések pedig egyre jobban fokozták a kukorica csíranövény gyökérnövekedését. A napraforgó teszt növényvel végzett rizoboxos kísérlet esetén a kontrollhoz képest az As(V)-kezelések az alábbi sorrendnek megfelelően szintén fokozták a csíranövények gyökérnövekedését: $30 \text{ mg kg}^{-1} > 3 \text{ mg kg}^{-1} > 10 \text{ mg kg}^{-1} > 1 \text{ mg kg}^{-1} > 90 \text{ mg kg}^{-1} > \text{kontroll}$. Ezzel szemben az As(III)-mal kezelt kukorica növény gyökér növekedését csupán a 3 mg kg^{-1} -os dózis serkentette, az 1 és 10 mg kg^{-1} -os dózisok a kontrollhoz viszonyítva jelentős hatást nem gyakoroltak a gyökér növekedésére, a $30-90 \text{ mg kg}^{-1}$ -os kezelések azonban már erőteljesen gátolták a gyökér fejlődését. Mindez megint csak felhívja a figyelmet az As(III)- és As(V)-kezelések növényekre gyakorolt eltérő hatására, valamint az egy- és kétszikű növények eltérő érzékenységre. A kukorica és napraforgó csíranövények gyökér növekedését tanulmányozva azt is megfigyeltem, hogy az alkalmazott kezelések nemcsak a gyökérnövekedés intenzitására, de a mellékgökérzet fejlettségére is hatással voltak. Több esetben is azt tapasztaltam, hogy bár a kezelések serkentették a főgyökér növekedését, azonban a mellékgökérzet fejlődése visszamaradt.

A tenyészedényes kísérlet eredményei arra mutattak rá, hogy a teszt növényként alkalmazott zöldborsó fejlődését nagymértékben meghatározta a kísérletben alkalmazott kezelési forma. A **tenyészedényes kísérlet száraztömeg eredményeit** elemezve megállapítottam ugyanis, hogy az As(III)-kezelések hatására, a zöldborsó növény egyes részeinek szárazanyag-terméke csökkent, a növények fejlődésének előrehaladtával szignifikáns csökkenést a talajfelszín feletti vegetatív részek, valamint a generatív szervek esetében azonban csak az egyre nagyobb koncentrációjú kezelések eredményeztek. Továbbá a teljesérés fenofázisában az alkalmazott legkisebb (3 mg kg^{-1}) As(III)-kezelés már pozitívan hatott a levél szárazanyag felhalmozására.

Ezzel szemben az As(V)-tel kezelt zöldborsó növény szárazanyag-produktumát figyelembe véve megállapítottam, hogy az alacsonyabb koncentrációjú kezelések fokozták a száraztömeg gyarapodását, melyet statisztikai értelemben is igazolni tudtam a szárnál és a gyökérnél a 3 mg kg⁻¹-os kezelés esetén az I. fenofázisban, illetve a 10 mg kg⁻¹-os kezelésnél nőtt a levél szárazanyag-tartalma a II-IV. fenofázisokban, a száré a III-IV. fenofázisokban, a borsóhévelyé pedig a növény fejlődésének IV. fenofázisában. A 10 mg kg⁻¹-ot meghaladó As(V)- dózisok azonban gátolták a zöldborsó fejlődését valamennyi fenofázisban, melyet több alkalommal statisztikailag is bizonyítottam.

A kísérleti növények As felvételét tanulmányozva, megállapítottam, hogy a tápoldatos és a rizoboxos kísérletek esetében a növekvő koncentrációjú As(III)- és As(V)-kezelések hatására a kukorica és napraforgó hajtásának, valamint gyökerének As-tartalma egyaránt nőtt, melyet statisztikailag számos esetben bizonyítani tudtam. Megállapítottam továbbá mind a tápoldatos, mind a rizoboxos kísérlet tekintetében, hogy az As(III)- és As(V)-kezelések a napraforgó esetén intenzívebb As-akkumulációt eredményeztek, mint a kukorica csíranövéynél. Mindemellett a mérési eredmények azt is igazolják, hogy a napraforgó csíranövény a kukoricához képest nagyobb mértékben képes az arzént felhalmozni szöveteiben anélkül, hogy az As-toxicitás egyes látható tünetei megjelenjenek, mely ismételten kiemeli az egy- és kétszikű növények As felvétele és érzékenysége közötti különbségeket.

Az eredmények értékelése során fontosnak tartottam annak meghatározását is, hogy **egy adott növény mennyi arzént von ki a tápoldatból/talajból**, valamint hogy ez az As mennyiség hogyan oszlik meg a növényben, figyelembe véve az egyes növényi részek száraztömegét. Megállapítottam, hogy a kukorica és napraforgó csíranövény hajtásában, gyökerében, valamint magában a teljes csíranövényben jelenlévő As mennyisége az As(III)- és As(V)-kezelések hatására a kontrollhoz képest megemelkedett. A tápoldatos és a rizoboxos kísérlet során azt is tapasztaltam, hogy az As, mindkét kezelési forma esetén döntően a kukorica-, illetve napraforgó csíranövények gyökerében akkumulálódott és csak kisebb rész volt jelen a hajtásban, mely véleményem szerint a növény detoxifikációs mechanizmusának részeként értelmezhető. Ugyanis a toxikus fémionok megkötésében szerepet játszó fitokelatinok szintézisének fő helye a növényi szervezeten belül a gyökér. Feltételezésemet erősíti továbbá, hogy a fitokelatinok szintézise, mint energiaigényes folyamat a gyökér fejlődésének visszamaradását indukálja, mely több esetben is megfigyelhető volt mindkét kísérlet típusnál. A

tápoldatos és rizoboxos kísérleti eredmények továbbá arra is rámutattak, hogy a tápoldat/talaj As-tartalmának növekedésével több esetben is fokozatosan emelkedett a gyökér által visszatartott As aránya. A tápoldatos kísérlet eredményeit tanulmányozva továbbá megállapítottam, hogy a napraforgó csíranövénynél kisebb arányban jutott be az arzén a hajtásba, mint a kukorica esetében. A rizoboxban kivitelezett kísérletnél az 1 mg kg⁻¹-os dózis esetén tapasztaltaktól eltekintve, mind az As(III)-, mind az As(V)-kezelések esetén ennek az ellenkezőjét tapasztaltam.

A tenyészedényben nevelt zöldborsó As-tartalmát a növény fejlődésének több fenofázisában (4 nóduszos állapot, virágzás kezdete, zöldérés, teljesérés) is vizsgáltam. A tenyészedényes kísérleti eredményeket figyelembe véve megállapítottam, hogy a növény fejlődésének valamennyi szakaszában az alkalmazott As(III)- és As(V)-kezelések fokozták a különböző növényi részek As-tartalmát, a legtöbb esetben a növekedés statisztikailag is igazolható volt. A tenyészedényes kísérletből származó eredmények alapján megerősíthető az a korábbi megállapításom, mely szerint a növényen belül az arzén nehezen mozog, nagyobb részt a gyökérben van jelen és csak kisebb rész kerül át az egyéb növényi szervekbe. Megállapítottam, hogy a növény fejlődésének előrehaladtával, valamint az As(III)-kezelések koncentrációjának növekedésével, a felvett As egyre nagyobb mértékben a szárban maradt, a IV. fenofázis esetén azonban a szár As-visszatartó képessége kissé visszaesett. Ezzel ellentétben az As(V)-kezeléseknél a talajban jelenlévő As koncentrációja, valamint a növény fejlettségi állapota nagyban befolyásolta, hogy az As a vegetatív szervek közül a szárban vagy a levélben halmozódik-e fel nagyobb mértékben.

A borsónövény által a talajból kivont As mennyiségét elemezve megállapítottam, a teljes növény által kivont As mennyisége általában növekvő tendenciát mutatott mindkét kezelési forma esetén. Általánosságban elmondható továbbá, hogy a növény fejlődésének valamennyi szakaszában a kezelési koncentrációk növekedésével fokozódott a gyökérben visszatartott As mennyisége, a generatív szervek megjelenésével azonban a talajból kivont As az alacsonyabb koncentrációjú kezeléseknél több esetben nem a gyökérben, hanem a levélben volt jelen nagyobb arányban.

A talajfelszín feletti vegetatív részek As-tartalmát elemezve megállapítottam továbbá, hogy az I. fenofázis esetén a levélben található As aránya meghaladta a szárét, azonban a növény fejlődésének előrehaladtával a szár As visszatartó képessége oly mértékben fokozódott, hogy a teljesérés fenofázisában a szárban jelenlévő As aránya a magasabb

koncentrációjú dózisok esetén felülmúlta a levélét. A generatív részek által felvett As mennyisége jóval kisebb volt, mint a vegetatív szerveké, illetve a borsószem a borsóhüvelyhez képest az esetek többségében kevésbé akkumulálta az arzént. Megfigyeltem továbbá, hogy a teljes növény által felvett As mennyiségének növekedésével általában csökkent a generatív szervekbe jutott As aránya. Humán egészségügyi szempontból lényeges megállapítás továbbá, hogy azon kezelési szintek esetén, ahol a szár As visszatartó képessége felerősödött, a borsószembe a teljes növény által felvett As mennyiségének csupán 1% alatti része került be.

Munkám során vizsgáltam azt is, hogy a növekvő koncentrációjú As(III)- és As(V)-kezelések hogyan befolyásolják a növények makro-, illetve mikroelem készletét. A kísérleti növények **P koncentrációjának** meghatározását kifejezetten fontosnak tartottam, hiszen az arzenátok és foszfátok kémia viselkedésükben hasonlítanak egymáshoz, melynek következtében a kutatók egy része antagonista kapcsolatot állapított meg köztük (Kádár, 1991; Mokgalaka-Matlala et al., 2008; Pigna et al., 2010). Az antagonista kapcsolat meglétét kukorica esetén mind a tápoldatos, mind a rizoboxos kísérletben igazolni tudtam, azonban a tenyészedényben nevelt zöldborsónál, illetve a napraforgónál mindkét kísérlet típus esetében azt tapasztaltam, hogy az As(V)-kezelések hatására megnőtt egyes növényi részek P-tartalma. Véleményem szerint ez összefüggésbe hozható azzal, hogy a növények P felvételében szerepet játszó transzporterek lehetnek kis-, illetve nagy affinitású foszfát transzporterek. A nagy affinitású foszfát transzporterek nagyobb affinitást elsősorban nem az arzenát, hanem a foszfát iránt mutatnak (Liu et al., 1998; Chrispeels et al., 1999), így az ilyen felvételi rendszerrel rendelkező növények esetén a termőközeg emelkedett As-tartalma mellett sem csökken a P felvétele. Feltételezésem szerint tehát, amíg a kukorica esetén elsősorban a kis affinitású foszfát transzporterek, addig a napraforgó és a zöldborsó tekintetében a nagy affinitású foszfát transzporterek jelenléte a domináns.

Az As(III)-mal kezelt teszt növények P koncentrációjában bekövetkező változások megegyeznek az As(V)-tel kezelt növények esetén ismertettekkel.

A kísérleti növények **S-tartalmát** megvizsgálva a napraforgó, illetve zöldborsó teszt növényeknél az esetek többségében növekedést figyeltem meg, a kukorica csíranövényénél az As(III)- és As(V)-kezelések azonban többnyire gátolták a S beépülését.

Tápoldatos kísérletnél a napraforgó mindkét vizsgált növényi részének, míg a rizoboxos kísérletben a hajtás S-tartalma az As(III)-, és As(V)-kezeléseknél egyaránt

megemelkedett. Zöldborsó tekintetében a S koncentrációjának növekedését figyeltem meg az As(V)-dózisok esetében a borsószemnél és a gyökérnél a 3 és 270 mg kg⁻¹-os, a borsóhüvelynél a 3 és a 90-270 mg kg⁻¹-os, a levélnél a 10-270 mg kg⁻¹-os, a szárnál pedig a 270 mg kg⁻¹-os kezelés hatására. Az As(III) kijuttatásakor a borsószem S-tartalma a 90 mg kg⁻¹-os, a borsóhüvelyé a 3-10 és a 90-270 mg kg⁻¹-os, a levélé a 90 mg kg⁻¹-os, a szaré a 90-270 mg kg⁻¹-os, a gyökéré pedig a 30-270 mg kg⁻¹-os dózisok hatására fokozódott szignifikánsan.

Az előzőekben említettekkel ellentétben a kukorica csíranövény gyökerének S-tartalma a tápoldatos és rizoboxos kísérlet esetében egyaránt csökkent a növekvő koncentrációjú As(III)- és As(V)-kezelések hatására, továbbá a rizoboxban nevelt kukorica hajtásának S-koncentrációja is visszaesett az As(V)-dózisok alkalmazásakor.

Megállapítható tehát, hogy azon növények esetén melyeknek magasabb a S igénye - hiszen a napraforgónál, mint olajnövénynél a S alapvetően fontos a zsírsavak bioszintéziséhez, a zöldborsónál, pedig mint fehérjenövénynél, a S mint a fehérjék alapvető építőköve elengedhetetlen a megfelelő minőségű és mennyiségű fehérjetartalom kialakításához - az esetek többségében a S-tartalom növekedése következett be. Az alacsonyabb S igénnyel bíró tesztnövény (kukorica) esetén azonban a S-tartalom több esetben is visszaesett mindkét kezelés típusnál.

A növények **Mg felvételét** tanulmányozva megállapítottam, hogy az esetek döntő részében a növények gyökerének Mg-tartalma az As(III)- és As(V)-kezelések hatására lecsökkent, melyet statisztikai értelemben a kukoricánál, illetve napraforgónál mind a tápoldatos mind a rizoboxos kísérletben bizonyítani tudtam. A talajfelszín feletti növényi részek Mg-koncentrációjában viszont elsősorban növekedés volt tapasztalható, csökkenést nagyobb részt csak a magasabb koncentrációjú kezelések indukáltak.

A kukorica hajtásának Mg koncentrációját tápoldatos kísérletben a 3-10 mg kg⁻¹-os As(V)-kezelések, valamint az 1-3 mg kg⁻¹-os As(III)-dózisok serkentették, azonban a 30 mg kg⁻¹-os kezelés már gátolta a Mg beépülését, mindkét kezelés típus esetében. Rizoboxos kísérletben megnőtt a napraforgó csíranövény hajtásának Mg-tartalma az alkalmazott As(III)- és As(V)-kezelések hatására. Tenyészedényes kísérletben több alkalommal is a Mg koncentráció növekedését tudtam kimutatni As(V)-kezelések esetén, valamennyi növényi részben, az As(III)-kezeléseknél pedig a borsóhüvelyben, a levélben, a szárnál, valamint a gyökérben. Ugyanakkor a magasabb koncentrációjú dózisok gátló hatása is megmutatkozott a legnagyobb (270 mg kg⁻¹) As(V)-dózisnál a

levélben, a legnagyobb koncentrációjú (270 mg kg^{-1}) As(III)-kezelésnél pedig a borsóhüvelyben.

A Mg a zöld szintestek központi alkotóeleme, így fontos szerepe van a fotoszintézis folyamatában. Dutta és Mondal (2014) munkája során arról számolt be, hogy az As(III) és As(V) emelkedett jelenléte a termőközegben csökkenti a fotoszintetikus pigmentek mennyiségét, mely véleményem szerint összefüggésbe hozható azzal, hogy a magasabb kezelési szintek esetén csökkent a hajtás Mg-tartalma, az alacsonyabb dózisoknál azonban a növények védekező mechanizmusuknak köszönhetően a Mg transzlokációja fokozódott a hajtás irányába, amely a gyökérben csökkent, a hajtásban azonban emelkedett Mg szintet eredményezett. Mindezt megerősítik Kumar et al. (2015) megállapításai is.

Az alkalmazott As(III)- és As(V)-kezelések a növények mikroelem készletére is hatással voltak. A növényminták mikroelem összetételét megvizsgálva megállapítottam, hogy az alkalmazott As(III)- és As(V)-kezelések legtöbbször fokozták a kísérleti növények **Fe-tartalmát**, mely összhangban van a Park et al. (2016), valamint a Vromman et al. (2011) által tapasztaltakkal. Tápoldatos kísérletben napraforgónál a gyökér, kukorica esetében pedig mind a gyökér mind a hajtás esetén megfigyeltem, hogy az As(III)- és As(V)-dózisok egyaránt növelték a Fe koncentrációját, melyet az esetek többségében statisztailag is bizonyítani tudtam. Rizoboxos kísérletben a napraforgó hajtásában valamennyi As(V)-dózisnál, illetve az $1\text{--}30 \text{ mg kg}^{-1}$ -os As(III)-kezeléseknél jegyeztem fel Fe-tartalom növekedést, a gyökerében a Fe koncentráció szignifikáns megemelkedését a 10 mg kg^{-1} -os As(III)-kezelés idézte elő. A rizoboxban nevelt kukorica hajtásnak Fe-tartalma mindkét kezelési formánál több esetben is szignifikánsan megnőtt, kukorica csíranövény gyökérben, az arzén Fe felvételt fokozó hatását csak az As(V)-kezeléseknél tudtam bizonyítani. A tenyészedényes kísérletben megnövekedett Fe koncentrációt az alábbi estekben figyeltem meg: az As(III)-mal kezelt növény esetén a borsószemnél a $30\text{--}90 \text{ mg kg}^{-1}$ -os, a borsóhüvelynél, a levélnél és a gyökérnél a 3 mg kg^{-1} -os, a szár esetében pedig a $90\text{--}270 \text{ mg kg}^{-1}$ -os dózisok eredményezték a Fe-tartalom szignifikáns emelkedését. Az As(V)-kezeléseknél a borsószemben a $3\text{--}30 \text{ mg kg}^{-1}$ -os, a borsóhüvelyben a $10\text{--}270 \text{ mg kg}^{-1}$ -os, a levélben és a szárbán a 270 mg kg^{-1} -os dózis okozott szignifikáns növekedést. Ennek magyarázata lehet részben, hogy az arzenát a Fe^{3+} ionnal komplexet képez, majd a vas(III)-arzenát a foszfáttal megegyező úton kerül felvételre, így a megnövekedett arzén felvétel maga után vonja a Fe-tartalom fokozódását is. További lehetséges magyarázat, hogy az

arzénak kitett növények az $\text{As(V)} \rightarrow \text{As(III)}$ átalakulás során reaktív oxigén gyököket (ROS) generálnak, a felszabaduló szabadgyökök megkötése az antioxidáns enzimrendszer feladata, melynek fontos komponense a Fe.

Kabata-Pendias (2011) az As és **Mn** között antagonista kapcsolatot állapított meg, amelyet elsősorban a kukoricával végzett kísérletekben tudtam bizonyítani. Tápoldatos kísérletben a 10-30 mg kg⁻¹-os As(III)-, valamint valamennyi As(V)-kezelés hatására szignifikánsan csökkent a kukorica hajtásának Mn koncentrációja, a gyökér tekintetében pedig szignifikáns Mn-tartalom csökkenés jelentkezett valamennyi kezelési szintnél mindkét arzénforma esetében. Rizoboxos kísérletben az As és Mn antagonista kapcsolata a kukorica gyökerében az alkalmazott As(III)- és As(V)-dózisoknál egyaránt megfigyelhető volt, a hajtás Mn-tartalma azonban csak a magasabb koncentrációjú (30-90 mg kg⁻¹-os) As(V)-kezeléseknél esett vissza.

Az előzőekben leírtakkal szemben azonban a napraforgónál, mint kétszikű növénynél a Mn-tartalom növekedését figyeltem meg csakúgy, mint a tenyészedényben nevelt zöldborsónál (kétszikű). A napraforgó hajtásának és gyökerének Mn-tartalma egyaránt megnőtt a tápoldatos kísérletben. Rizoboxos nevelési körülmények között, a napraforgó Mn koncentrációjának növekedése mindkét kezeléstípusnál megfigyelhető volt a hajtásban. Tenyészedényes kísérletben az alkalmazott As(V)-dózisok több esetben növelték a vegetatív és generatív szervek Mn-tartalmát. Az As(III)-mal kezelt növényeknél növekedést a borsóhüvelyben a 3 mg kg⁻¹-os, a levélben a 10-90 mg kg⁻¹-os, a szárban és a gyökérben pedig a 3-90 mg kg⁻¹-os kezelési szinteken figyeltem meg.

Megállapítottam továbbá, hogy az As(III)-, illetve As(V)-dózisok kijuttatása számos esetben gátolta a kísérleti növények **Mo felvételét**. A Mo koncentráció visszaesését tapasztaltam tápoldatos kísérletben a napraforgó hajtásánál valamennyi kezelési szint esetén, valamint a gyökérben a 3 mg kg⁻¹-os dózisok hatására, mindkét kezelési formánál. Rizoboxos kísérletben a kukorica csíranövény hajtásának és gyökerének Mo-tartalma az As(III)- és As(V)-dózisok alkalmazásakor egyaránt csökkent, a napraforgó csíranövény esetén csökkenés az As(III)-mal kezelt növény hajtásában volt megfigyelhető. Tenyészedényes kísérletben szintén észlelhető volt, hogy az arzén kijuttatása gátolta a zöldborsó növény Mo felvételét. Az As(III)-mal kezelt növényeknél szignifikáns csökkenést tudtam kimutatni a 3-90 mg kg⁻¹-os kezeléseknél a borsószemben, az As(V)-tel kezelt növényeknél a borsószemben a 3-30 mg kg⁻¹-os dózisoknál, a borsóhüvelyben és a levélben a 90 mg kg⁻¹-os kezelésnél. Az arzén által

okozott Mo hiány felismerése kiemelkedő jelentőségű, hiszen a Mo a nitrát-reduktáz enzim fő komponense, így hiányában nitrát akkumuláció jelentkezhethet, ugyanis a redukciója nem történik meg, amely azon kívül, hogy növényélettani rendellenességekhez vezet, tovább súlyosbítja az arzénnal erőteljesen szennyezett területről származó élelmiszer- és takarmánynövények felhasználásának egészségügyi veszélyeit.

A kísérleti eredmények arra is rámutattak, hogy a növekvő koncentrációjú As(III)-, valamint As(V)-kezelések hatására az esetek többségében visszaesett a növények **Zn felvétele**, mely megegyezik Kabata-Pendias (2011) azon feljegyzésével, melynek értelmében az As és Zn között valószínűleg antagonista kapcsolat áll fenn. A Zn-tartalom csökkenését figyeltem meg a tápoldatos kísérletnél a napraforgó és kukorica hajtásában mindkét kezelési forma esetén, valamint az As(III)-mal kezelt kukorica gyökerében. Rizoboxos kísérletben a kukorica csíranövény gyökerének Zn koncentrációja mindkét kezelés típusnál csökkent, a napraforgónál Zn-tartalom csökkenést a 90 mg kg⁻¹-os As(III)-kezelésnél a hajtásban jegyeztem fel. Tenyészedényes kísérletben pedig a Zn koncentráció visszaesését figyeltem meg a borsószemnél és a levélnél a 30-270 mg kg⁻¹-os, a borsóhüvelynél a 90 mg kg⁻¹-os, a szárnál a 10-90 mg kg⁻¹-os, a gyökérnél pedig a 3-90 mg kg⁻¹-os As(V)-dózisoknál. Az As(III)-kezelések Zn-tartalomra gyakorolt negatív hatását a levél, illetve a gyökér tekintetében tudtam bizonyítani a 10-270 mg kg⁻¹-os, valamint a 10-90 mg kg⁻¹-os kezeléseknél.

Kumar et al. (2015) arról számolt be, hogy a növekvő koncentrációjú arzénkezelések hatására nőtt a kísérletben alkalmazott teszt növény **Cu-tartalma**, mely az általam végzett kísérletek esetében is több alkalommal megfigyelhető volt. A Cu koncentráció növekedését figyeltem meg a tápoldaton nevelt napraforgó gyökerében mind az As(III)-, mind az As(V)-dózisoknál. Rizoboxos kísérletben az As(III)-mal kezelt kukorica gyökerében, valamint hajtásában mindkét kezelési forma esetében a Cu-tartalom növekedése következett be. Tenyészedényes kísérletben az As(III)-mal kezelt növény talajfelszín feletti szerveiben több esetben is szignifikánsan megnőtt a Cu mennyisége. A 3-10 és 270 mg kg⁻¹-os As(V)-kezelések a borsószem, a 3-30 és 270 mg kg⁻¹-os a borsóhüvely, a 270 mg kg⁻¹-os a levél, a szár és a gyökér Cu koncentrációját serkentette.

6. ÖSSZEFOGLALÁS

A talaj, valamint a felszíni és a felszín alatti vízkészlet arzén szennyezettsége a világ valamennyi részére kiterjedő globális problémát jelent. Az arzén a vizekben, valamint a talajban elsősorban szervesetlen formában, mint arzenit [As(III)], illetve arzenát [As(V)] van jelen. Ezek a szervesetlen arzénformák nemcsak az emberre, állatra, de a magasabb rendű növényekre nézve is toxikusak. A növényi szervezetbe bejutva számos metabolikus folyamatot képesek gátolni, emelkedett jelenlétük a talajban az ionantagonizmus jelenségének köszönhetően korlátozhatja a növények számára fontos tápelemek felvehetőségét, mindez pedig fejlődési rendellenességek kialakulásához vezethet.

Kutatásom célkitűzése volt annak meghatározása, hogy a növekvő koncentrációjú As(III) és As(V)-kezelések milyen hatással vannak a kísérleti növények egyes részeinek szárazanyag-termékumára, illetve As-tartalmára, a kezdeti gyökernövekedés intenzitására, valamint vizsgáltam, hogy az alkalmazott kezelések hogyan befolyásolják a kísérleti növények makro- és mikroelem összetételét. Fontosnak tartottam továbbá annak meghatározását, hogy a talaj összes As-tartalmának hány százaléka hozzáférhető a növények számára (oldható As-tartalom), ennek érdekében a kísérletben felhasznált, As(III)-mal és As(V)-tel kezelt talajt elemanalitikai vizsgálatnak vetettem alá. Célkitűzésem volt továbbá annak meghatározása is, hogy az As(III)- és As(V)-kezelések hatása között milyen mértékű különbségek figyelhetők meg a vizsgált paraméterek tekintetében.

A növekvő koncentrációjú As(III)- és As(V)-dózisok hatását tápoldat-növény, valamint talaj-növény rendszerben tanulmányoztam, melyhez háromféle kísérlet típust állítottam be: tápoldatos, rizoboxos és tenyészedényes kísérlet.

Tápoldatos, illetve rizoboxos kísérletben teszt növényként egy egyszikű (kukorica) és egy kétszikű (napraforgó) növényt használtam, melyeknek mind gazdasági, mind humánélelmezési szerepe jelentős. A tenyészedényes kísérletbe pedig a zöldborsót vontam be, hiszen a hazai zöldségtermesztő területen több mint 70%-a az arzénal szennyezett Alföld térségében található, a zöldségnövények közül pedig az egyik legnagyobb területen termesztett faj a zöldborsó.

A tápoldatos és rizoboxos kísérletek esetén a növények nevelésére a Debreceni Egyetem, Növénytudományi Intézet, Mezőgazdasági Növénytani és Növényélettani Tanszékcsoport Klímaszobájában került sor, a tenyészedényes kísérletet pedig az Agrokémiai és Talajtani Intézet Tenyészházában állítottam be 2016 tavaszán.

A növény és talajminták elemanalitikai vizsgálatát induktív csatolású plazma tömegspektrométerrel (ICP-MS) és induktív csatolású plazma optikai emissziós spektrométerrel (ICP-OES) végeztük. Növéyminták esetén $\text{HNO}_3\text{-H}_2\text{O}_2$ -os nedves-roncsolásos mintaelőkészítési módszert alkalmaztam. A talajminták „összes” As-tartalmának meghatározásához mintaelőkészítési módszerként szintén atmoszférikus nyomáson tömény salétromsav és hidrogén-peroxid segítségével végzett nedves roncsolást használtam. A talaj növények számára hozzáférhető As-tartalmát a Lakanen-Erviö féle kivonószer felhasználásával határoztam meg.

A talajvizsgálati eredmények alapján megállapítottam, hogy a kontrolltalajnál az össz-arzénttartalom 38,6%-a, az As(III)-kezeléseknél a 39-60,7%-a, a As(V)-dózisok esetében pedig a 38,2-56,9%-a volt a növények számára felvehető formában jelen. Megfigyeltem továbbá, hogy az azonos koncentrációjú, de eltérő formájú kezeléseknél az oldható As-tartalom nagyobb volt az As(III)-kezelések esetén, mint az As(V)-dózisoknál, amely a magasabb koncentrációjú ($30\text{-}270\text{ mg kg}^{-1}$) kezeléseknél kiváltképp szembetűnő. Mindez annak köszönhető, hogy az As(V)-nek a foszfáthoz való hasonlósága miatt több megkötődési lehetősége van a talajban, mint az As(III)-nak.

A teszt növények szárazanyag-produktumát elemezve megállapítottam, hogy a növekvő koncentrációjú As(III)- és As(V)-kezelések hatására a kukorica és napraforgó csíranövény szárazanyag-tartalma a tápoldatos kísérletben csökkent. Rizoboxos kísérletben a 10 mg kg^{-1} -os As(V)-kezelés hatására szignifikáns növekedést figyeltem meg, melyet a kukorica hajtásában észleltem. Megállapítottam, hogy a napraforgó, mint kétszikű növény érzékenyebben reagált az As-toxicitására, mint a kukorica (egyszikű növény). Azt tapasztaltam ugyanis, hogy amíg a napraforgó csíranövéynél a $30\text{-}90\text{ mg kg}^{-1}$ -os kezelések mindkét szervesetlen arzénforma esetében, a 10 mg kg^{-1} -os koncentráció pedig az As(III)-kezelésnél a növények pusztulását okozta, addig a kukoricánál csak a 90 mg kg^{-1} -os As(III)- és As(V)-kezelések voltak oly mértékben toxikusak, hogy a teszt növény pusztulása következzen be.

A rizoboxban nevelt kukorica és napraforgó csíranövény gyökérnövekedését tanulmányozva ismételtam szembetűnt az egy- és kétszikű növények érzékenységbeli különbsége, valamint az As(III) és As(V)-kezelések eltérő hatása.

Az As(III)-kezelések esetén a kontroll kukorica csíranövény gyökere nőtt a legintenzívebben, ehhez képest számottevő hatást csak a $30\text{-}90\text{ mg kg}^{-1}$ -os kezelések okoztak, melyek erőteljesen gátolták a gyökér fejlődését. Ezzel szemben a növekvő koncentrációjú As(V)-dózisok egyre nagyobb mértékben fokozták a kukorica

csíranövény gyökerének fejlődését, a kezeletlen kontrollnövény gyökere növekedett a legkisebb ütemben. Az As(V)-kezelések a napraforgó csíranövény gyökérnövekedését is fokozták az alábbi sorrendnek megfelelően: $30 \text{ mg kg}^{-1} > 3 \text{ mg kg}^{-1} > 10 \text{ mg kg}^{-1} > 1 \text{ mg kg}^{-1} > 90 \text{ mg kg}^{-1} > \text{kontroll}$. Az As(III)-kezeléseknél viszont a napraforgó gyökérnövekedést jelentősen csak a 3 mg kg^{-1} -os As(III)-kezelés serkentette, a kontrollhoz viszonyítva számottevő hatást a $30\text{-}90 \text{ mg kg}^{-1}$ -os kezelések gyakoroltak, melyek erőteljesen gátolták a gyökér növekedését.

A tenyészedényes kísérletnél a kezelések hatását a növény fejlődésének több szakaszában is vizsgáltam (4 nóduszos állapot, virágzás kezdete, zöldérés, teljesérés). A tenyészedényes kísérlet száraztömeg eredményei megerősítették azt a megállapítást, miszerint a növények fejlődésére az As(III)- és As(V)-kezelések jelentősen eltérő hatást gyakorolnak. Megfigyeltem ugyanis, hogy az As(III)-dózisoknál a zöldborsó generatív és vegetatív szerveinek száraztömege egyaránt csökkent, növekedést csupán a teljesérés fenofázisában figyeltem meg, ahol is a 3 mg kg^{-1} -os As(III)-kezelés hatására nőtt a levél szárazanyag-tartalma. Ezzel szemben az alacsonyabb koncentrációjú As(V)-kezelések a tesztnövény szárazanyag-termékumát valamennyi vizsgált fenofázisnál növelték, melyet statisztikailag a 3 és 10 mg kg^{-1} -os dózisok esetén több alkalommal bizonyítani is tudtam. Ugyanakkor a 10 mg kg^{-1} -ot meghaladó As(V)-kezelések már gátolták a száraztömeg gyarapodását.

A kísérleti növények As-tartalmát elemezve megállapítottam, hogy a növekvő koncentrációjú As(III)- és As(V)-dózisok hatására nőtt a növényi szervek As-tartalma valamennyi kísérlet típusnál. A tápoldatos és rizoboxos kísérlet eredményei arra mutattak rá, hogy az egyszikű (kukorica) és a kétszikű növények As felvételében jelentős különbség van. A tápoldatos és rizoboxos kísérlet esetén is azt tapasztaltam, hogy a napraforgó által akkumulált As mennyisége jóval nagyobb volt, mint a kukorica csíranövény esetén mért értékek. Mindez azt is bizonyítja, hogy a napraforgó, mint kétszikű növény szöveteiben sokkal magasabb As-tartalmat képes elviselni, mint a kukorica, anélkül, hogy az As-toxicitás látható tünetei jelennének meg.

Az As(III)- és As(V)-kezelések eltérő hatása a tenyészedényes kísérlet As eredményeiben is jól megmutatkozott. A legmagasabb As koncentrációkat ugyan mindkét kezelés típusnál a gyökérben mértem, azonban megfigyeltem a talajfelszín feletti generatív szerveknél azt, hogy a szár vagy a levél esetén volt-e magasabb az As koncentrációja, nagyban meghatározta a növény fejlettségi állapota, valamint a kezelés koncentrációja.

Kutatómunkám során az egyes növényi részek száraztömegét figyelembe véve meghatároztam azt is, hogy az adott növény mennyi arzént vont ki a talajból, illetve tápoldatból, valamint, hogy a kivont arzén mennyiség hogyan oszlik meg a különböző növényi szervek között. Valamennyi kísérlet típusnál megfigyeltem, hogy a különböző növényi részek által kivont, valamint a teljes növény által felvett As koncentrációja túlnyomórészt fokozódott a növekvő koncentrációjú As(III)- és As(V)-kezelések hatására. Megállapítottam a tápoldatos és rizoboxos kísérletnél, hogy a kukorica és a napraforgó csíranövények által felvett As mennyisége döntően a gyökérben akkumulálódott és csak kisebb részben került át a hajtásba, mely a növény detoxifikációs mechanizmusának része. Tápoldatos kísérlet esetében az egy- és kétszikű növények As-kezelésekre adott válaszreakcióját összevetve mindkét kezelési formánál azt tapasztaltam, hogy a napraforgó csíranövény hajtásába kisebb arányba jutott be az arzén, mint a kukorica esetében. Az 1 mg kg⁻¹-os kezelési szint esetén tapasztaltaktól eltekintve a rizoboxos kísérletnél azonban ennek az ellenkezőjét figyeltem meg.

Tenyészedényes kísérletben azt tapasztaltam, hogy a növények fejlettségi állapota, valamint a kezelés koncentrációja nagyban meghatározta azt, hogy a felvett As mennyisége döntően melyik szervben akkumulálódott, ugyanakkor a felvett As növényi szervek közötti megoszlását tekintve az alkalmazott szervetlen arzénformák eltérő hatása kevésbé mutatkozott meg. Általánosságban elmondható mindkét kezeléstípus esetén, hogy az I-II. fenofázisoknál a talajból kivont As mennyisége nagyobb részt a gyökérben volt megtalálható. A generatív szervek megjelenésével az alacsonyabb koncentrációjú dózisoknál a felvett As nagyobb részt nem a gyökérben, hanem a levélben akkumulálódott. Ugyanakkor az elemanalitikai vizsgálatok azt is bizonyították, hogy a gyökér „szűrő” hatása a kezelési koncentrációk növekedésével fokozódott mindkét szervetlen arzénformánál. Mindemellett azt is megfigyeltem, hogy a növény fejlődésének előrehaladtával fokozódott a szár As-visszatartó képessége. Megállapítottam, hogy a teljes növény által felvett As mennyiségének növekedésével az esetek többségében csökkent a generatív szervekben jelenlévő As-aránya. Megfigyeltem továbbá, hogy a borsóhüvelyben jelenlévő As-aránya nagyrészt meghaladta a borsószem As-tartalmát. A tenyészedényes kísérletből származó eredmények rámutattak arra is, hogy azon kezelési szinteknél, ahol a szár As-visszatartó képessége felerősödött, a borsószembe a teljes növény által felvett As mennyiségének csak kevesebb mint 1%-a jutott be, mely humánélelmezés szempontjából lényeges adat.

Megfigyeltem, hogy a kezelések hatással voltak a tesztnövények makro- és mikroelem készletére is. Általánosságban elmondható, hogy amíg a kísérleti növények gyökerének Mg-tartalma a kontrollhoz képest nagyrészt visszaesett, addig a talajfelszín feletti szervek Mg-koncentrációja elsősorban fokozódott, csökkenést csak a magasabb koncentrációjú kezelések váltottak ki. A növények S igénye és a kezelések hatására a S-tartalmában bekövetkező változások között szoros összefüggést figyeltem meg, hiszen azon tesztnövények esetén, amelyeknek alapvetően magasabb a S szükségletük (napraforgó, borsó), a S koncentráció növekedése következett be, mely a növény védekezési mechanizmusának részeként értelmezhető. Az alacsonyabb S igénnyel bíró kukorica csíranövényénél azonban a kontrollhoz képest visszaesett a S felvétele mindkét kezelési forma esetén. A növények P koncentrációját elemezve, az arzenátok és foszfátok közti antagonista kapcsolatot kukoricánál mind a tápoldatos, mind a rizoboxos nevelési körülmények között igazolni tudtam, azonban a napraforgó és a zöldborsó esetében azt tapasztaltam, hogy az As(V)-kezelések hatására több alkalommal is megnőtt a növények P koncentrációja. Mindez összefüggésbe hozható azzal, hogy a foszfát felvételében szerepet játszó transzporterek lehetnek nagy-, valamint kis affinitású foszfát transzporterek. A nagy affinitású foszfát transzporterek nagyobb affinitást elsősorban a foszfát és nem az arzenát iránt mutatnak. Ebből adódóan arra következtethetünk, hogy amíg a kukorica (egyszikű) esetén a kis, addig a napraforgónál (kétszikű) és zöldborsónál (kétszikű) a nagy affinitású foszfát transzporterek előfordulása a domináns. Az As(III)-mal kezelt növények P koncentrációjában hasonló változásokat figyeltem meg, mely azt bizonyítja, hogy az As-kezelések hatására az egy- és kétszikű növények foszfor felvétele jelentősen eltért. Munkám során vizsgáltam a kísérleti növények Fe, Cu, Mo, Mn és Zn koncentrációját is. Az elemanalitikai eredmények alapján elmondható, hogy az As(III)- és As(V)-dózisok túlnyomórészt fokozták a kísérleti növények Fe-, valamint Cu-koncentrációját, ugyanakkor a Mo-, és a Zn-tartalom az esetek többségében csökkent. A növények Mn-felvételét elemezve különbséget véltem felfedezni az egy-, és kétszikű növények között, ugyanis amíg az As és a Mn közötti antagonista kapcsolatot bizonyítani tudtam az egyszikű kísérleti növény esetében, addig a kétszikű növényeknél (napraforgó, zöldborsó) azt találtam, hogy az As(III)- és As(V)-kezelések serkentették a Mn-felvételét.

7. SUMMARY

Contamination of agricultural soils and groundwaters by arsenic is a global environmental problem. Arsenic occurs in groundwaters predominantly as inorganic arsenic species, namely arsenite [As(III)] and arsenate [As(V)]. These two forms of arsenic are toxic to humans, animals and plants. By the arsenic uptake of the plants it can obstruct many metabolic processes, their increased presence in the soil due to the phenomenon of the ion antagonism can limit the availability of nutrient elements important for plants, which all can lead to developmental disorders.

The aim of my research was to determine what effect the As(III) and As(V)-treatments with increasing concentration have on the dry mass product of the test plants' parts, the intensity of original root growth, the As-content as well as how the applied treatments influence the macroelement and microelement contents of plants. In addition, I felt it was important to carry out the element analysis of soils treated with As(III) and As(V) which were used during the experiment. During the examination of soil my objective was to determine how much percent of the soil's total As content is available to the test plants (soluble element content). In order to answer to the above questions I set up experiments which can be listed into three main groups: hydroponic experiments, rhizobox experiments and pot experiments.

I involved a monocotyledon (maize) and a dicotyledon plant (sunflower) in my hydroponic and rhizobox experiments which directly or indirectly play an important role in human nutrition while their economic role is also essential. In my pot experiment I chose green peas as test plant since it is one of the vegetables grown in the largest arsenic contaminated area in Hungary.

My examinations deal with the hydroponic and rhizobox experiment set in the Climate Chamber of Department of Agriculture and Botany Plant in the Institute of Plant Sciences as well as the plant and soil samples of the pot experimentation set in the Greenhouse of Institute of Agricultural Chemistry and Soil Science in spring 2016.

During my research work I carried out the element analysis of plant samples with inductively coupled plasma optical emission spectrometry (ICP-OES) and inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS).

Wet digestion with nitric acid and hydrogen peroxide was applied during sample preparation of these plants. The determination of the total element content of the soil samples with atmospheric wet digestion using concentrated nitric acid and hydrogen

peroxide. The determination of the samples' soluble As content easily available for plants using the extraction tool by Lakanen-Erviö.

Based on the results of the soil test I have found that in the control soil 38.6% of the total arsenic content, in the case of As(III)-treatments 39-60.7%, whereas in the case of As(V)- doses 38.2-56.9% were present in an absorbable form for plants. In addition, I have observed that in the case of treatments with the same concentration but with difference treatment form, the soluble As content was greater in the case of As(III)-treatments, than for As(V)-doses, which is particularly outstanding in treatments of higher concentration (30-270 mg kg⁻¹). This is due to the fact that because of As(V) is similarity to the phosphate ion, As(V) has more binding possibility in the soil than As(III).

By analyzing the test plants' dry matter I have found that due to the increasing concentration of As(III)- and As(V)-treatments the dry matter content of maize and sunflower plantlets have decreased in the nutrient solution experiment. I only have observed significant growth as an effect of the 10 mg kg⁻¹ As(V)-treatment, perceiving the growth of maize. I have found that the sunflowers, as a dicotyledonous plant reacted more sensitive to the As-toxicity as the maize (monocotyledonous plant). I have experienced namely, that in case of the sunflower seedlings 30-90 mg kg⁻¹ treatments for both forms of inorganic arsenic and 10 mg kg⁻¹ concentration of As(III)-treatment caused destruction of the plants, whereas in case of the maize only 90 mg kg⁻¹ As(III)- and As(V)-treatments were toxic to causing the test plant's destruction.

Studying root growth of maize and sunflower seedlings in rhizobox I noticed the differences in sensitivity of the mono- and dicotyledonous plants, and the different effects of As(III)- and As(V)-treatments.

In case of As(III)-treatments the control maize seedling's root grew the most vigorously, compared to this significant effects were caused only by 30 to 90 mg kg⁻¹ treatments, which strongly obstructed root development. In contrast, increasing concentrations of As(V)-dosage increasingly enhanced development of the maize seedling's root, the untreated control plants' root grew at the slowest pace. As(V)-treatments have also increased the sunflower seedling's root growth in the following order: 30 mg kg⁻¹ > 3 mg kg⁻¹ > 10 mg kg⁻¹ > 1 mg kg⁻¹ > 90 mg kg⁻¹ > control. However, in the case of As(III)-treatments, sunflower root growth was significantly increased only by the 3 mg kg⁻¹ As(III)-treatment, compared with the controls the 30-90 mg kg⁻¹ treatments showed significant effects, which strongly obstructed root growth.

In the pot experiment I have examined the effect of treatments in several stages of plant growth (4 nodes, begin of blooming, leaf expansion, full maturation). The dry weight results of the pot experiment strengthened the conclusion that the effect of As(III)- and As(V)- treatments on the plant development are significantly different. I have namely observed that in case of As(III)-doses the dry weight of peas' vegetative and generative organs both decreased, an increase was observed only in the full maturation phenophase, wherein as a result of a 3 mg kg^{-1} As(III)-treatment the dry weight content of the leaf increased. In contrast, the As(V) -treatments of lower concentrations increased the dry matter of the test plant in all observed phenophases, which I could statistically prove in the case of 3 and 10 mg kg^{-1} doses several times. However, the 10 mg kg^{-1} exceeding As(V)-treatments already obstructed the dry weight gain.

As analyzing the As content of the test plants I found that as an impact of increasing concentrations of As(III)- and As(V)-doses the plant organs' As content generally had grown for each experiment type. The results of the nutrient solution and rhizobox experiments have revealed that there is a significant difference between monocotyledonous (maize) and dicotyledonous plants' As uptake. In the case of both the nutrient solution and rhizobox experiment I found that the As amount accumulated by the sunflower was much higher than the measured values for maize seedlings. This also proves that the sunflower as a dicotyledonous plant can tolerate much higher As content in its tissues than maize, without the shown symptoms of As toxicity appearing.

In the case of the pot experiment I measured the highest As-concentrations in case of both treatment types in the roots, but I observed in the case of a stem or leaf the As concentration was higher, was largely determined by the crop development stage and the concentration of the treatments.

During my research, taking into account the different plant parts' dry weight I have also determined the aggregate extracted amount of arsenic by the plant from the soil or nutrient solution, and how this amount of arsenic is distributed among different plant organs. In each type of experiment I have observed that the As concentration extracted by the whole plant parts generally was increased, as an impact of increasing concentrations of As(III)- and As(V)-treatments. I found in the nutrient solution and rhizobox experiment that the As quantity absorbed by maize and sunflowers seedlings were accumulated mainly in the roots and a less amount translocated to the shoot, which is part of the detoxification mechanism of the plant. In the case of an experiment with nutrient solution comparing the reactive results of mono- and bicotyledon plants to As

treatment I have found in both treatment form that into the sunflower seedling's shoot arsenic passed into in a lower ration than in the case of maize. However, besides in the case of the 1 mg kg⁻¹ treatment level, I have observed the opposite at the rhizobox experiment.

The pot experiment showed that the plants' development stage and the concentration of the treatment largely determined that the organ where the absorbed As quantity predominantly accumulated, in terms of the breakdown between plant organs with the same absorbed As amount the different effect of the inorganic arsenic forms have less manifested. Generally in the case of both treatment types it can be said that in I-II. phenophases the amount of As extracted from the soil was found in a larger ratio in the root. With the appearance of the generative organs the lower concentrations doses the absorbed As was accumulated largely not in the root, but in the leaves. However, the elemental analytical studies have also shown that the root "filtering" effect in several cases was increased with the augmentation of the treatment concentrations of both forms of inorganic arsenic. In addition, I have also observed that the stem As-retention capacity increased during the progress of the plant development. I have found that as the augmentation of the whole plant's As content was increased the As content of generative organs generally was decreased. Moreover, the As proportion present in the pod exceeded the As content of the grain. Results from the grow pot experiment have pointed out that in case of treatments where the stem's As-retention capacity amplified, out of the As amount taken up by the entire plant only less than 1% reached the pea, which is an essential data for human nutrition.

I have observed that the treatments had an effect on the test plants' macro and micro elements content. Generally, as long as Mg content of the roots of the experimental plants have mainly decreased compared to the control, Mg concentration of organs above the soil surface has particularly increased, decrease was elicited only by treatments of higher concentration. I have observed a close correlation between the S need of plants and changes in the S-content due to the treatment, since in case of the test plants, which have an essentially higher S need (sunflower, peas), an S concentration increase occurred, which can be interpreted as part of the plant defense mechanism. However, in the case of the maize seedling with lower S claim the uptake of S decreased compared to control in both forms of treatment. Analyzing the P concentration of the plants I could demonstrate the antagonist relation between arsenates and phosphates both under nutrient solution and rhizobox growing conditions

in the case of maize, however, I have found in the case of sunflower and peas, that as a result of As(V)-treatments a increase in the P concentration of plants occurred. This may be related to the fact that transporters playing a role in the absorbing of phosphate can be phosphate transporters of high and low affinity. The high-affinity phosphate transporters have a greater affinity towards phosphate and especially not towards arsenate. Hence it can be concluded that, while in the case of maize (monocotyledon) the low, thus in the case of the sunflower (dicotyledon) and pea (dicotyledon), the high-affinity phosphate transporter's occurrence is dominant. I have observed similar changes in the P concentration of plants treated with As(III), which proves that as the effect of As-treatments, the phosphorus uptake of mono and dicotyledonous plants significantly differed.

I also examined the test plants' Fe, Cu, Mo, Mn, and Zn concentration during work. Based on the elemental analysis results, it can be said that the As(III) and As(V)-doses predominantly enhanced the experimental plants' Fe and Cu concentration, however, the Mo and Zn content has reduced in most of the cases. Analyzing the plants Mn uptake I discovered a difference between monocotyledonous and dicotyledonous plants, namely as long as I could prove the antagonist relationship between As and Mn in the case of a monocotyledonous experimental plant, thus in the case of dicotyledonous plants (sunflowers, peas), I found that the As(III)- and As(V)-treatments stimulated Mn uptake.

8. ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK

1. Tápoldatos kísérletben bizonyítottam, hogy a napraforgó, mint kétszikű növény érzékenyebben reagál az As-toxicitásra, mint a kukorica (egyszikű növény). Napraforgó esetén ugyanis a 30 és 90 mg kg⁻¹-os dózis mindkét szervetlen arzén formánál, a 10 mg kg⁻¹-os koncentráció pedig az As(III)-kezelésnél a csíranövény pusztulását okozta. Kukorica esetén azonban csak a 90 mg kg⁻¹-os As(III)- és As(V)-kezelések voltak oly mértékben toxikusak, hogy a növény pusztulása következzen be.
2. Tápoldatos kísérletben bizonyítottam, hogy a napraforgó csíranövény (kétszikű növény) hajtásába kisebb arányban került be az arzén, mint a kukorica csíranövény (egyszikű növény) esetén.
3. Tápoldatos kísérletben bizonyítottam, hogy az As(III)- és As(V)-kezelések eltérő módon hatnak a kukorica (egyszikű növény) és a napraforgó (kétszikű növény) Mn felvételére, ugyanis amíg a Mn-tartalom a kukorica csíranövény esetén csökkent, addig a napraforgó Mn felvétele fokozódott.
4. Megállapítottam, hogy a talajban az azonos koncentrációjú, de eltérő formájú [As(III) és As(V)] kezeléseknel a növények számára hozzáférhető As-tartalom nagyobb volt az As(III)-kezelések alkalmazásakor, mint az As(V)-dózisoknál.
5. Kukorica és napraforgó csíranövények esetén igazoltam, hogy a kísérleti növények által felvett As mennyisége döntően a gyökérben akkumulálódik és csak kisebb rész transzlokálódik a hajtásba, megállapítottam továbbá, hogy a kezelési koncentrációk emelkedésével a gyökér szűrő hatása mindkét arzénforma [As(III) és As(V)] esetén fokozódik.
6. Tenyészedényes kísérletben bizonyítottam, hogy az arzén zöldborsó növényen belüli eloszlását elsősorban a növény fejlettségi állapota, valamint az alkalmazott dózis nagysága határozza meg, a kezelés formája csak kismértékben befolyásolja.

7. Tenyészedényes kísérletben megállapítottam, hogy a magasabb koncentrációjú (90-270 mg kg⁻¹) As(III)- és As(V)-kezeléseknél a gyökér szűrőhatása mellett a szár As-visszatartó képessége is felerősödik, melynek következtében a borsószembe a teljes növény által felvett As mennyiségének kevesebb mint 1%-a kerül be. Az alacsonyabb kezelési szinteken (0-30 mg kg⁻¹) azonban a teljes zöldborsó növény As-tartalmának 5-7%-a a borsószemben fordul elő.
8. Megállapítottam, hogy a növekvő koncentrációjú As(III)- és As(V)-kezelések eltérőképpen hatnak az egy- (kukorica), és kétszikű növények (napraforgó, borsó) P felvételére. As(III)- és As(V)-kezelések valamennyi kísérlet típus esetén fokozták a kétszikű kísérleti növények (napraforgó, borsó) P-tartalmát, az egyszikű tesztnövénynél (kukorica) a P koncentráció azonban visszaesett.

9. GYAKORLATBAN HASZNOSÍTHATÓ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK

1. Rizoboxban nevelt kukorica esetén bizonyítottam, hogy a növekvő koncentrációjú As(III) és As(V)-kezelések hatására visszaesik a növények Mo felvétele. A Mo a nitrát-reduktáz enzim egyik fő komponense, így hiányában nitrát akkumuláció jelentkezhet, amely újabb veszélyt jelent az arzénnal szennyezett területről származó növények élelmiszerként, valamint takarmányként való felhasználásakor.
2. Tenyészedényes kísérletben bizonyítottam, hogy a generatív és vegetatív szervek As-tartalmában nagyságrendnyi eltérés van. Az As nagy része a vegetatív szervekben akkumulálódik és a generatív szervek csak kis hányadát tartalmazzák, mely humán élelmezés szempontjából kiemelkedő jelentőségű.
3. Tenyészedényes kísérletben megállapítottam, hogy amíg az As(III)-mal szennyezett talajon történő borsótermesztés esetén csökken a növényi biomassa, illetve a termés mennyisége, addig az olyan talajok esetén, amelyeknek az As-tartalma 10 mg kg^{-1} vagy az alatti és az az arzén As(V) formájában fordul elő, a növények intenzívebb fejlődése, valamint a termés hozam növekedése várható.

IRODALOMJEGYZÉK

- *Abedin M. - Cresser J. M. - Meharg A. A. - Feldmann J. - Cotter-Howells J.:* 2002. Arsenic accumulation and metabolism in rice (*Oryza sativa* L.). *Environmental Science and Technology*. 36. 962-968.
- *Adriano D. C.:* 2001. Trace elements in terrestrial Environments. Springer, New York.
- *Ahmed F. R. S. - Killham K. - Alexander I.:* 2006. Influences of arbuscular mycorrhizal fungus *Glomus mosseae* on growth and nutrition of lentil irrigated with arsenic contaminated water. *Plant and Soil*. 283. 33-41.
- *Aichberger K. - Hofer G. F.:* 1989. Contents of arsenic, mercury and selenium in agricultural soils of Upper Austria. *Bodenkultur*. 40. (1):1-11.
- *Antal J. - Buzás I. - Debreczeni B. - Fekete A. - Nagy M. - Sipos S. - Sváb J.:* 1979. A Műtrágyázás irányelvei és üzemi számítási módszer. I. rész. N, P, K műtrágyázási irányelvek. MÉM Növényvédelmi és Agrokémiai Központ, Mezőgazdasági kiadó, Budapest.
- *Arnold H. L. - Odam R. B. - James W. D.:* 1990. Disease of the skin *Clinical Dermatology*. Saunders W.B. Company, Philadelphia.
- *Asher C. J. - Reay P. F.:* 1979. Arsenic uptake by barley seedlings. *Plant Physiology*. 6. 459-466.
- *Azizur M. - Hasegawa H. - Mahfuzur M. - Mazid M. A. - Tasmin A.:* 2008. Arsenic accumulation in rice (*Oryza sativa* L.): Human exposure through food chain. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 69. 317-324.
- *Baker A. J. M.:* 1981. Accumulators and excluders - strategies in the response of plants to heavy metals. *Journal of Plant Nutrition*. 3. 643-654.
- *Baker R. S. - Arle H. F. - Miller J. H. - Halstun J. T.:* 1968. Effect of organic arsenical herbicides on cotton response and chemical residues. *Weed Science*. 17. 37-40.
- *Bissen M. - Frimmel F. H.:* 2003. Arsenic - A review: Part I. Occurrences, toxicity, speciation, and mobility. *Acta Hydrochimica et Hydrobiologica*. 31. 9-18.
- *Boyle R. W. - Jonasson I. R.:* 1973. The geochemistry of arsenic and its use as an indicator element in geochemical prospecting. *Journal of Geochemical Exploration*. 2. 251-256.

- *Brandstetter A. E. - Lombi W.W. - Wenzel D. E.- Adriano D. C.:* 2000. Arsenic contaminated soils. [In: Wise D. J., Tarantolo D. J., Inyang H. I., CicLuom E. J., (eds.) Remediation Engineering Of Contaminated Soils.]. Marcel Dekker, New York, 715-737.
- *Brookins D.G.:* 1988. Eh-pH Diagrams for Geochemistry. Springer-Verlag, New York.
- *Buat-Menard P. E.:* 1984. Fluxes of metals through the atmosphere and oceans. [In: Nriagu J. O., (ed.) Changing Metal Cycles and Human Health.]. Springer-Verlag, Berlin, 43-89.
- *Cakmak I. - Marschner H.:* 1990. Decrease in nitrate uptake and increase in proton release in zinc deficient cotton, sunflower and buckwheat plants. Plant and Soil.129. 261-268.
- *Carbonell-Barrachina A. A. - Burló F. - Burgos-Hernández A. - López E. - Mataix J.:* 1997. The influence of arsenite concentration on arsenic accumulation in tomato and bean plants. Scientia Horticulturae. 71. (3-4):167-176.
- *Carbonell-Barrachina A. A. - Aarabi M. A. - Delaune R. D. - Gambrell, R. P. - Patrick W. H.:* 1998a. Bioavailability and uptake of arsenic by wetland vegetation: effects on plant growth and nutrition. Journal of Environmental Science and Health. 33. 45-66.
- *Carbonell-Barrachina A. A. - Burló F. - López E. - Mataix J.:* 1998b. Tomato plant as affected by arsenite concentration. Journal of Plant Nutrition. 21. (2):235-244.
- *Carrizales L. - Razo I. - Téllez-Hernández J. I. - Torres-Nerio R. - Torres A. - Batres L. E. - Cubillas A. C. - Díaz-Barriga F.:* 2007. Exposure to arsenic and lead of children living near a copper-smelter in San Luis Potosi, Mexico: importance of soil contamination for exposure of children. Environmental Research. 101. (1):1-10.
- *Castillo-Michel H. - Parsons J. G. - Peralta-Videa J. R. - Martinez-Martinez A. - Dokken K. M. - Gardea-Torresdey J. L.:* 2007. Use of X-ray absorption spectroscopy and biochemical techniques to characterize arsenic uptake and reduction in pea (*Pisum sativum*) plants. Plant Physiology and Biochemistry. 45. 457-463.
- *Chen B. - Xiao D. - Zhu X. - Smith G. - Xie F. A. - Smith S. E:* 2007. The arbuscular mycorrhizal fungus *Glomus mosseae* gives contradictory effects on phosphorus and arsenic acquisition by *Medicago sativa* Linn. Science of the Total Environment. 379. 226-234.

- *Cheng E. N. - Focht D. D.*: 1979. Production of arsenic and methylarsines in soil and in culture. *Applied and Environmental Microbiology*. 38. 494-498.
- *Chilvers D. C. - Peterson P. J.*: 1987. Global Cycling of Arsenic. [In: Hutchinson T. C., Meema K. M. (eds.) *Lead, Mercury, Cadmium and Arsenic in the Environment.*]. Scope, Chichester. 279-301.
- *Chiu V.Q. - Hering J. G.*: 2000. Arsenic adsorption and oxidation at manganite surfaces. 1. Method for simultaneous determination of adsorbed and dissolved arsenic species. *Environmental Science and Technology*. 34. 2029-2034.
- *Chrispeels M. J. - Crawford N. M. - Schroeder J. I.*: 1999. Proteins for transport of water and mineral nutrients across the membranes of plant cells. *The Plant Cell*. 11. 661-676.
- *Collourn P. - Alloway B.J. - Thornton. I.*: 1975. Arsenic and heavy metals in soils. *Science of the Total Environment*. 4. 359-369
- *Crafts A. S. - Rosenfelds R. S.*: 1939. Toxicity studies with arsenic in eighty California soils. *Hilgardia* 12. 177-182.
- *Cullen W. R. - Reimer K. J.*: 1989. Arsenic speciation in the environment. *Chemical Reviews*. 89. 713-764.
- *Deuel L. - Swoboda A. R.*: 1972. Arsenic toxicity to cotton and soybeans. *Journal of Environmental Quality*. 1. 317-322.
- *Dhankher O. P. - Rosen B. P. - McKinney E. C. - Meagher R. B.*: 2006. Hyperaccumulation of arsenic in the shoots of *Arabidopsis* silenced for arsenate reductase (ACR2). *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 103. 5413-5418.
- *Dhar R. K. - Biswas B. K. - Samanta G. - Mandal B. K. - Chakraborti D. - Roy S. - Jafar A. - Islam A. - Ara G. - Kabir S. - Khan A. W. - Ahmed S. A. - Hadi S.*: 1997. Groundwater arsenic calamity in Bangladesh. *Current Science*. 73. 48-59.
- *Duan G. L. - Zhu Y. G. - Tong Y. P. - Cai C. - Kneer R.*: 2005. Characterization of arsenate reductase in the extract of roots and fronds of Chinese brake fern, an arsenic hyperaccumulator. *Plant Physiology*. 138. 461-469.
- *Dudas M. J.*: 1987. Accumulation of native arsenic in acid sulphate soils in Alberta. *Canadian Journal of Soil Science*. 67. 317-324.
- *Dutta P. - Mondal S.*: 2014. Changes in pigments and photosynthetic parameters of cowpea under two inorganic arsenicals. *Journal of Agriculture and Veterinary Science*. 7. (4):99-103.

- *Farnese F. S. - Oliveira J. A. - Farnese M. S. - Gusman G. S. - Silveira M. N. - Siman L. I.*: 2014. Uptake arsenic by plants: Effects on mineral nutrition, growth and antioxidant capacity. *Idesia (Arica)*. 32. (1):99-106.
- *Filep Gy.*:1999. Talajszennyeződés, talajtisztítás. [In.: *Stefanovits P., Filep Gy., Füleki Gy. (szerk.) Talajtan.*]. Mezőgazda Kiadó, Budapest, 363-381.
- *Fitz W. J. - Wenzel W. W.*: 2002. Arsenic transformations in the soil-rhizosphere-plant system: fundamentals and potential application to phytoremediation. *Journal of Biotechnology*. 99. 259-278.
- *Fixen P. E. - Grove J. H.*: 1990. Testing soils for phosphorus.[In: *Westerman R. L., (ed.) Soil testing and plant analysis, 3rd edn.*]. Soil Science Society of America, Wisconsin, USA, 141-180.
- *Fordyce F.M. - Williams T. M. - Pajitpapapon A. - Charoenchaisi P.*:1995. Hydrogeochemistry of arsenic in an area of chronic mining-related arsenium. British Geological Survey, Keyworth.
- *Frith J.*: 2013. Arsenic – the “Poison of Kings” and the “Saviour of Syphilis”. *Journal of Military and Veterans' Health*. 21. 11-17.
- *Fülöp M. - Hamrák D. - Kenesei Zs. - Lakatos S. - Mravik P. - Mécs B.*: 2014. Arzén a Tiszazugban. *Médiakutató*. 15. (3):7-23.
- *Ghosh A. K. - Bhattacharya P.*: 2004. Arsenate sorption by reduced and reoxidised rice soils under the influence of organic matter amelioration. *Environmental Geology*. 45. 1010-1016.
- *Gonzaga M. I. S. - Santos J. A. G. - Ma L. Q.*: 2006. Arsenic phytoextraction and hyperaccumulation by fern species. *Scientia Agricola*. 63. 90-101.
- *Greenwood N. N. - Earnshaw A.*: 1997. *Chemistry of the Elements*. Butterworth-Heinemann, United Kingdom.
- *Gulz P. A. - Gupta S. K.*: 2000. Arsenaufnahme von Kulturpflanzen. *Agrarforschung Schweiz*. 7. 360-365.
- *Hanada S. - Nakano M. - Saitoh H. - Mochizuki T.*: 1975. Studies on the pollution of apple orchard surface soils and its improvement in relation to inorganic spray residues. *Bulletin of the Faculty of Agriculture Saga University*. 25. 13-25.
- *Harrington J. M. - Middaugh J. P. - Morse D. L. - Houseworth J.*: 1978. A survey of pollution exposed to high concentrations of arsenic in well water in Fairbanks, Alaska. *American Journal of Epidemiology*. 108. 377-385.

- *Hartley W. - Lepp N.W.:* 2008. Remediation of arsenic contaminated soils by iron-oxide application, evaluation in terms of plant productivity, arsenic and phytotoxic metal uptake. *Science of the Total Environment*. 390. 35-44.
- *Hong J. S. - Song K. H. - Chung. J.Y.:* 2014. Health Effects of Chronic Arsenic Exposure. *Journal of Preventative Medicine and Public Health*. 47. 245-252.
- *Horswell J. - Speir T.:* 2006. Arsenic phytotoxicity. [In: Naidu R., Smith E., Owens G., Bhattacharya P. (eds.) *Managing arsenic in the environment. From soils to human health.*] CSIRO Pub, Collingwood, Australia, 183-208.
- *Huang P. M.:* 1975. Retention of arsenic by hydroxy-aluminum on surface of micaceous mineral colloids. *Soil Science Society of America, Proceedings*. 39. 271-278.
- *Hughes M.F. - Beck B.D. - Chen Y. - Lewis A.S. - Thomas D.J.:* 2011. Arsenic exposure and toxicology: a historical perspective. *Toxicology Science*. 123. (3):305-332.
- *Huq S. M. I. - Naidu R.:* 2005. Arsenic in groundwater and contamination of the food chain: Bangladesh scenario. [In: Bundschuh J. (eds.) *Natural Arsenic in Groundwater: Occurrence, Remediation and Management.*]. Taylor and Francis Group, New York, 95-101.
- *Jacobs L. W. - Syers J. K. - Keeney D. R.:* 1970a. Arsenic sorption by soils. *Soil Science Society of America, Proceedings*. 34. 750-758.
- *Jacobs L. W. - Keeney D. R. - Walsh L. M.:* 1970b. Arsenic residue toxicity of vegetable crops grown on Plainfield sand. *Agronomy Journal*. 62. 588-591.
- *Jacobs L. W. - Keeney D. R.:* 1970. Arsenic-phosphorus interactions on corn. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*. 1. 85-92.
- *Jain C. K. - Ali I.:* 2000. Arsenic: occurrence, toxicity and speciation techniques. *Water Research*. 34. (7):4304-4312.
- *Johnson L. R. - Hiltbold A. E.:* 1969. Arsenic content of soil and crops following use of methane arsenate herbicides. *Soil Science Society of America*. 33. 279-282.
- *Jones C.A. - H.W. Langer K – Anderson T. R. – McDermott - W.P. Inskeep.:* Rates of microbially mediated arsenate reduction and solubilization, 2000. *Soil Science Society of America*. 64. 600-608.
- *Kabata-Pendias A. - Mukherjee A. B.:* 2007. Trace elements from soil to human. Springer-Verlag, Heidelberg.

- Kabata-Pendias A. - Pendias H.: 1984. Trace elements in soils and plants. CRC Press, Florida.
- Kabata-Pendias A.: 2010. Trace Elements in Soils and Plants (4th edition). CRC Press, Florida.
- Kádár I.: 1991. Környezet- és természetvédelmi kutatások. A talajok és növények nehézfém tartalmának vizsgálata. Környezetvédelmi és területfejlesztési minisztérium. Magyar Tudományos Akadémia Talajtani és Agrokémiai Kutató Intézete, Budapest.
- Kádár I.: 1995. A talaj-növény-állat-ember tápláléklánc szennyeződése kémiai elemekkel Magyarországon. KTM - MTA TAKI, Budapest.
- Kádár I.: 2012. A főbb szennyező mikroelemek környezeti hatása. MTA ATK Talajtani és Agrokémiai Intézet, Budapest.
- Karczewska A. - Bogda A. - Krysiak A.: 2007. Arsenic in soils in the areas of former mining and mineral processing in Lower Silesia, southwestern Poland. [In: Bhattacharya P., Mukherjee A. B., Bundschuh J., Zevenhoven R., Loeppert R. (eds.) Arsenic in Soils and Groundwater Environment]. Elsevier, Amsterdam, 411-440.
- Kovács B. - Győri Z. - Prokisch J. - Loch J. - Dániel P.: 1996. A study of plant sample preparation and inductively coupled plasma emission spectrometry parameters. Communications in Soil Science and Plant Analysis. 27.1177-1198.
- Kovács B. - Győri Z. - Prokisch J. - Loch J. - Dániel P.: 2000. Studies on soil sample preparation for inductively coupled plasma atomic emission spectrometry analysis. Communications in Soil Science and Plant Analysis. 31. 1949-1963.
- Kumar D. - Singh V. P. - Tripathi D. K. - Prasad S. M. - Chauhan D. K.: 2015. Effect of arsenic on growth, arsenic uptake, distribution of nutrient elements and thiols in seedlings of *Wrightia arborea* (Dennst.) Mabb. International Journal of Phytoremediation. 23.128-134.
- Lakanen E. - Erviö, R.: 1971. A comparison of eight extractants for determination of plant available micronutrients in soil. Acta Agronomica Fennica. 123. 23-232.
- Lansche A. M.: 1965. Arsenic. Bureau of Mines. 630. 75-80.
- Lévai L. - Kovács B.: 2001. The influence of IAA and TIBA on iron concentration of maize seedlings. [In: Horst W. J. (ed.) Plant Nutrition - Food. Security and Sustainability of Agro- Ecosystem.]. Kluwer Academia Publishers, Netherlands, 154-155.

- Liao X. Y. - Chen T. B. - Lei M. - Huang Z. C. - Xiao X. Y. - An Z. Z.: 2004. Root distributions and elemental accumulations of Chinese brake (*Pteris vittata* L.) from As-contaminated soils. *Plant and Soil*. 261. 109-116.
- Liebig G. F.: 1966. Arsenic. [In: Chapman H. D. (ed.) *Diagnostic Criteria for Plants and Soils*.]. University of California, Riverside, 22-45.
- Limura K. - Ito H. - Chino M. - Morishita T. - Hirata H.: 1977. Behavior of contaminant heavy metals in soil-plant system. *International Seminar on Soil Environment and Fertility Management in Intensive Agriculture*, Tokyo, 357.
- Lin A. - Zhang X. - Zhu Y. G. - Zhao F. J.: 2008. Arsenate-induced toxicity: effects on antioxidative enzymes and DNA damage in *Vicia faba*. *Environmental Toxicology and Chemistry*. 27. 413-419.
- Liu C. - Muchhal U. S. - Uthappa M. - Kononowicz A. K. - Raghothama K.G.: 1998. Tomato phosphate transporter genes are differentially regulated in plant tissues by phosphorus. *Plant Physiology*. 116. (1):91-99.
- Liu Q. - Hu C. - Tan Q. - Sun X. - Su J. - Liang Y.: 2008. Effects of As on As uptake, speciation, and nutrient uptake by winter wheat (*Triticum aestivum* L.) under hydroponic conditions. *Journal of Environmental Sciences*. 20. (3):326-331.
- Low K. S. - Lee C. K.: 1990. EDTA extractable arsenic in relation to available forms in soils. *Pertanika*. 13. 129-132.
- Lyubun Y. V. - Kosterin P. V. - Zakharova E. A. - Shcherbakov A. A. - Fedorov E. E.: 2002. Arsenic-contaminated soils phytotoxicity studies with sunflower and sorghum. *Journal of Soils and Sediments*. 2. (3):143-147.
- Ma J F. - Yamaji N. - Mitani N. - Tamai K. - Konishi S. - Fujiwara T. - Katsuhara M. - Yano M.: 2007. An efflux transporter of silicon in rice. *Nature*. 448. 209-213.
- Ma J. F. - Tamai K. - Yamaji N. - Mitani N. - Konishi S. - Katsuhara M. - Ishiguro M. - Murata Y. - Yano M.: 2006. A silicon transporter in rice. *Nature*. 440. 688-691.
- Ma L. Q. - Komar K. M. - Tu C. - Zhang W. H. - Cai Y. - Kennelley E. D.: 2001. A fern that hyperaccumulate arsenic: A hardly, versatile, fast growing plant helps to remove arsenic from contaminated soils. *Nature*. 409. 579-585.
- MacPheel A. W. - Chisholm D. - MacEachern C. R.: 1960. The persistence of certain pesticides in the soil and their effect on crop yields. *Canadian Journal of Soil Science*. 40. 59-63.

- Mahimairaja S. - Bolan N. S. - Adriano D. C. - Robinson B.: 2005. Arsenic contamination and its risk management in complex environmental settings. *Advances in Agronomy*. 86. 1-82.
- Mallick S. - Sinam G. - Sinha S.: 2011. Study on arsenate tolerant and sensitive cultivars of *Zea mays* L.: Differential detoxification mechanism and effect on nutrients status. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 74. (5):1316-1324.
- Mandal K. B. - Suzuki T.K.: 2002. Arsenic around the world: a review. *Talanta*. 58. 201-235.
- Manning B. A. - Goldberg S.: 1997. Arsenic (III) and arsenic (V) adsorption on three California soils. *Soil Science*. 162. 886-895.
- Marin A. R. - Masscheleyn P.H. - Patrick W. H.: 1992. The influence of chemical form and concentration of arsenic on rice growth and tissue arsenic concentration. *Plant and Soil*. 139. 175-180.
- Marschner H.: 1995. Mineral nutrition of higher plants. 2nd edition. Academic Press, London.
- Marschner H.: 1995. Mineral nutrition of higher plants. Academic Press, London.
- Mascher R. - Lippmann B. - Holzinger S. - Bergmann H.: 2002. Arsenate toxicity: effects on oxidative stress response molecules and enzymes in red clover plants. *Plant Science*. 163. 961-969.
- McBride B. C. - Wolfe R. S.: 1971. A new coenzyme of methyl transfer, coenzyme M. *Biochemistry* 10. 2317-2324.
- Meharg A. A. - Hartley-Whitaker J.: 2002. Arsenic uptake and metabolism in arsenic resistant and nonresistant plant species. *New Phytology*. 154. 29-43.
- Meharg A. A. - Macnair M. R.: 1992. Suppression of the high affinity phosphate uptake system: A mechanism of arsenate tolerance in *Holcus lanatus* L. *Journal of Experimental Botany*. 43. (4):519-524.
- Meharg A. A. - Naylor J. - Macnair M. R.: 1994. Phosphorus-nutrition of arsenate-tolerant and non-tolerant phenotypes of velvet grass. *Journal of Environmental Quality*. 23. 234-238.
- Melo E. E. C. - Costa E. T. S. - Guilherme L. R. G. - Faquin V. - Nascimento C. W. A.: 2009. Accumulation of arsenic and nutrients by castor bean plants grown on an As-enriched nutrient solution. *Journal of Hazardous Materials*. 168. (1):479-483.

- Mestrot A. - Feldmann J. - Krupp E. M. - Hossain M. S. - Roman-Ross G. - Meharg A. A.: 2011. Field fluxes and speciation of arsines emanating from soils. *Environmental Science & Technology*. 45. 1798-1804.
- Mihucz V. G. - Tatár E. - Virág I. - Cseh E. - Fodor F. - Záray Gy.: 2005. Arsenic speciation in xylem sap of cucumber (*Cucumis sativus* L.). *Analytical and Bioanalytical Chemistry*. 383. 461-466.
- Mokgalaka-Matlala N. S. - Flores-Tavizon E. - Castillo-Michel H. - Peralta-Videa J. R. - Gardea-Torresdey J. L.: 2008. Toxicity of arsenic (III) and (V) on plant growth, element uptake, and total amylolytic activity of mesquite (*Prosopis juliflora* x *P. velutina*). *International Journal of Phytoremediation*. 10. 47-60.
- Moreno-Jiménez E. - Esteban E. - Peñalosa J. M.: 2012. The Fate of Arsenic in Soil-Plant Systems. [In: Whitacre D. M. (ed.). *Reviews of Environmental Contamination and Toxicology, Reviews of Environmental Contamination and Toxicology*.]. Springer Science+Business Media LLC, New York, 1-36.
- Mukherjee A. B. - Bhattacharya P.: 2001. Arsenic in the groundwater in the Bengal Delta Plain: slow poisoning in Bangladesh. *Environmental Research*. 9. 189-220.
- Muller S. - Daus B. - Morgenstern P. - Wennrich R.: 2007. Mobilization of antimony and arsenic in soil sediment samples – Evaluation of different leaching procedure. *Water Air and Soil Pollution*. 183. 427-436.
- Najmowicz T. - Wyszowski M. - Ciecko Z.: 2010. Effect of soil contamination with arsenic and application of different substances on the manganese content in plants. *Journal of Elementology*. 15. (3):549-558.
- Nakahara H. - Yanokura M. - Murakami Y.: 1978. Environmental effects of geothermal waste water on the near-by river system. *Journal of Radioanalytical Chemistry*. 45. 25-36.
- Nascimento C. W. A. - Xing C.: 2006. Phytoextraction: a review on enhanced metal availability and plant accumulation. *Scientia Agricola*. 63. (3):299-311.
- Nelson K. W.: 1977. Industrial contributions of arsenic to the environment. *Environmental Health Perspectives*. 19. 31-34.
- Nriagu J.O. - Bhattacharya P. - Mukherjee A.B. - Bundschuh J. - Zevenhoven R. - Loeppert R.H.: 2007. Arsenic in soil and groundwater: an overview. [In: Bhattacharya P., Mukherjee A. B., Bundschuh J., Zevenhoven R., Loeppert R.H.

- (eds.) Trace Metals and other Contaminants in the Environment. Volume 9.] Elsevier, Amsterdam, 3-60.
- Pacyna J. M.: 1986. Atmospheric trace elements from natural and anthropogenic sources. [In: Nriagu J. O., Davidson C. I. (eds.) Toxic Metals in the Atmosphere.], J. Wiley, London, 33-58.
 - Page G. W.: 1981. Comparison of groundwater and surface water for patterns and levels of contamination by toxic substances. Environmental Science and Technology. 15. 1475-1481.
 - Paivöke A. E. A. - Simola L. K.: 2001. Arsenate toxicity to *Pisum sativum*: mineral nutrients, chlorophyll content, and phytase activity. Ecotoxicology and Environmental Safety. 49. (2):111-121.
 - Papp S.: 2002 . Biokémia Körfolyamatok a természetben. Veszprémi Egyetem Kiadó, Veszprém.
 - Park J. H. - Han Y. S. - Seong H. J. - Ahn J. S. - Nam I. H.: 2016. Arsenic uptake and speciation in *Arabidopsis thaliana* under hydroponic conditions. Chemosphere. 154. 283-288.
 - Peryea F. J.: 1998. Phosphate starter fertilizer temporarily enhances soil arsenic uptake by apple trees grown under field conditions. Horticultural Science. 33. 826-831.
 - Pethő M.: 1993. Mezőgazdasági növények élettana. Akadémiai Kiadó, Budapest.
 - Pigna M. - Cozzolino V. - Caporale A. - Mora M. L. - Di Meo V. - Jara, A. A. Violante A.: 2010. Effects of phosphorus fertilization on arsenic uptake by wheat grown in polluted soils. Journal of Soil Science and Plant Nutrient. 10. 428-442.
 - Porter E. K. - Peterson P. J.: 1975. Arsenic accumulation by plants on mine waste, United Kingdom. Science of the Total Environment. 4. 365-368.
 - Poyton C. Y. - Huang J. W. - Blaylock M. J. - Kochian L. V. - Elles M. P.: 2004. Mechanisms of arsenic hyperaccumulation in *Pteris* species: root As influx and translocation. Planta. 219. 1080-1088.
 - Prokisch J.: 2010. Vigyázat, mérreg! Az öt legveszélyesebb mérgező fém a környezetünkben: arzén, ólom, higany, kadmium és króm. Dr. Aliment Kft., Debrecen.
 - Quaghebeur M. - Rengel Z.: 2003. The distribution of arsenate and arsenite in shoots and roots of *Holcus lanatus* in influenced by arsenic tolerance and arsenate and phosphate supply. Plant Physiol. 132. 1600-1609.

- Raab A. - Feldmann J. - Meharg A. A.: 2004. The nature of arsenic-phytochelatin complexes in *Holcus lanatus* and *Pteris cretica*. Plant Physiology. 134. 1113-1122.
- Raab A. - Ferreira K. - Meharg A. A. - Feldmann J.: 2007. Can arsenic-phytochelatin complex formation be used as an indicator for toxicity in *Helianthus annuus*?. Journal of Experimental Botany. 58. (6):1333-1338.
- Raghothama K. G.: 1999. Phosphate acquisition. Annual review of plant physiology and plant molecular biology. 50. 665-693.
- Redman A. D. - Macalady D.L. - Ahmann D.: 2002. Natural organic matter affects arsenic speciation and sorption onto hematite. Environmental Science and Technology. 36. 2889-2896.
- Reichert F. - Trelles R.: 1921. Yodo y arsénico en las aguas subterráneas. Anales de la Asociacion Quimica Argentina. 9. 89-95.
- Ritchie J. A.: 1961. Arsenic and antimony in some New Zealand thermal water. New Zealand Journal of Forestry Science. 218-229.
- Robinson E. L.: 1975. Arsenic in soil with five annual applications of MSMA. Weed Science. 23. 341-343.
- Rowland H. A. L. - Omoregie E. O. - Millot R. - Jimenez C. - Mertens J. - Baciuc C. - Hug S. J. - Berg M.: 2011. Geochemistry and arsenic behaviour in groundwater resources of the Pannonian Basin (Hungary and Romania). Applied Geochemistry. 26. 1-17.
- Scheindlin S.: 2005. The duplicitous nature of inorganic arsenic. Molecular Interventions. 5. 60-64.
- Sekhar K. - Kamala C.T. - Chary N.S. - Mukherjee A.B.: 2007. Arsenic accumulation by *Talinum cuneifolium* - application for phytoremediation of arsenic-contaminated soils of Patancheru, Hyderabad, India. [In: Bhattacharya P., Mukherjee A. B., Bundschuh J. (eds.) Arsenic in Soils and Groundwater Environment]. Elsevier, Amsterdam, 315-338.
- Shaibur M. R. - Islam T. - Kawai S.: 2009. Response of leafy vegetable kalmi (water spinach; *Ipomoea aquatica* L.) at elevated concentrations of arsenic in hydroponic culture. Water Air, and Soil Pollution. 202. (1):289-300.
- Singh N. - Ma L. Q. - Srivastava M. - Rathinasabapathi B.: 2006. Metabolic adaptation to arsenic-induced oxidative stress in *Pteris vittata* L. and *Pteris ensiformis* L. Plant Science. 170. 274-282.

- Singh N. - Ma L.Q.: 2006. Arsenic speciation, and arsenic and phosphate distribution in arsenic hyperaccumulator *Pteris vittata* L. and non-hyperaccumulator *Pteris ensiformis* L. Environmental Pollution. 141. 238-246.
- Small H. G. - McCants C. B.: 1962. Influence of arsenic applied to the growth media on the arsenic content of flue-cured tobacco. Agronomy Journal. 54. 129-133.
- Smedley P. L. - Pelig-Ba K .B. – Edmunds W. M.: 1996. Mobility of arsenic in groundwater in the Obuasi gold-mining area of Ghana: some implications for human health. [In: Appleton J. D., Fuge R., McCall G. J. H. (eds.) Environmental geochemistry and health: with special reference to developing countries]. Geological Society of London, London.163-181.
- Smedley P. L. - Kinniburgh D. G.: 2002. A review of the source, behaviour and distribution of arsenic in natural waters. Applied Geochemistry. 17. 517-568.
- Smith S. E. - Christophersen H. M. - Pope S. - Smith F. A.: 2010. Arsenic uptake and toxicity in plants: integrating mycorrhizal influences. Plant and Soil. 327. 1-21.
- Smith S. E. - Read D. J.: 1997. Mycorrhizal symbiosis. Academic Press, San Diego.
- Steevens D. R. - Walsh L. M. - Keeney D. R.: 1972. Arsenic phytotoxicity on a Plainfield sand as affected by ferric sulfate or alunminum sulfate. Journal of Environmental Quality. 1. 301-308.
- Stoeva N. - Berova M. - Zlatev Z.: 2003. Physiological response of maize to arsenic contamination. Biological Plantarum 47. 449-452.
- Stoeva N.- Berova M. - Zlatev Z.: 2005. Effect of arsenic on some physiological parameters in bean plants. Biologia Plantarum 49. 293-296.
- Sullivan R. J.: 1969. Preliminary air pollution survey of arsenic and its compaunds. National Air Pollution Control Administration Publication, North Carolina.
- Suzuki Y. - Suzuki Y. - Fujii, N. - Mouri T.: 1974. Environmental contamination around a smelter by arsenic. Shikoku Acta Medica. 30. 213-222.
- Szalay L.: 2010. Tápanyagegyensúly a talajban és a gyümölcsfákban. Agrofórum. 10. 71-72.
- Szegedi L. - Béltéki I. - Fodorné Fehér E.: 2013. A talaj és növények arzén tartalmának összefüggés vizsgálata nehézfém terheléses tartamkísérletben. Acta Carolicus Roberticus. 3. 135-144.
- Takács S.: 1992. Környezet, ember, mikroelemek. Triorg Kft., Budapest.

- Takamatsu T. - Aoki H. - Yoshida T.: 1982. Determination of arsenate, arsenite, monomethylarsonate, dimethylarsinate in soil polluted with arsenic. *Soil Science*. 133. 239-246.
- Tang S. L.: 1987. Factors affecting the geochemical background contents of heavy metals in different soils of China. *Acta Scientiae Circumstantiae*. 7. 245-252.
- Thom C. - Raper K.B.: 1932. Arsenic Fungi of Gosio. *Science*. 76. 548-552.
- Thompson W. T.: 1973. *Agricultural Chemicals Book 1, Insecticides*, Indianapolis. Thompson Publication, Washington.
- Thoresby P. - Thornton I.: 1979. Heavy metals and arsenic in soil, pasture herbage and barley in some mineralised areas in Britain. *Trace Substances in Environmental Health*. 13. 93-97.
- Tlustos P. - Balik J. - Szakova J. - Pavlikova D.: 1998. The accumulation of arsenic in radish biomass when different forms of As were applied in the soil. *Rostlin Vyroba*. 44. 7-12.
- Trotta A. - Falaschi P. - Cornara L. - Minganti V. - Fusconi A. - Drava G. - Berta G.: 2006. Arbuscular mycorrhizae increase the arsenic translocation factor in the As hyperaccumulating fern *Pteris vittata* L. *Chemosphere* 65. 74-81.
- Tu C. - Ma L. Q. - MacDonald G. E. - Bondada B.: 2004. Effects of arsenic species and phosphorus on arsenic absorption, arsenate reduction and thiol formation in excised parts of *Pteris vittata* L. *Environmen. Experimental Botany*. 51. 121-131.
- Tu C. - Ma L. Q.: 2002. Effects of arsenic concentrations and forms on arsenic uptake by the hyperaccumulator ladder brake. *Journal of Environmental Quality*. 31. (2):641-647.
- Tu C. - Ma L. Q.: 2005. Effect of arsenic concentration and distribution of nutrients in the fronds of the arsenic hyperaccumulator *Pteris vittata* L. *Environmental Pollution*. 135. 333-340.
- Turner A. W.: 1949. Bacterial oxidation of arsenite. *Nature*. 164. 76-82.
- Ullrich-Eberius C. I. - Sanz A. - Novacky A. J.: 1989. Evaluation of arsenate- and vanadate-associated changes of electrical membrane potential and phosphate transport in *Lemna gibba* G1. *Journal of Experimental Botany*. 40. (210):119-128.
- Ultra V. U. - Tanaka S. - Sakurai K. - Iwasaki K.: 2007. Effects of arbuscular mycorrhiza and phosphorus application on arsenic toxicity in sunflower (*Helianthus annuus* L.) and on the transformation of arsenic in the rhizosphere. *Plant and Soil*. 290. 29-41.

- Vahidnia A. - Voet G.B. - Wolff F.A.: 2007. Arsenic neurotoxicity - a review. Human Experiment Toxicology. 26. 823-832.
- Varsányi Z.: 1990., A Délkelet-Alföld felszín alatti vizeinek arzéntartalma az arzén geokémiájának tükrében [In: szederkényi T. (szerk.) Az arzéntartalom származása és alakulásának kérdései békés megye vízmű kútjaiban.]. Magyar Tudományos Akadémia Szegedi Akadémiai Bizottságának Kiadványai, Szeged, 11-31.
- Verbruggen N. - Hermans C. - Schat H.: 2009. Mechanisms to cope with arsenic or cadmium excess in plants. Current Opinion in Plant Biology. 12. (3):364-372.
- Vincent C. L.: 1944. Vegetable and small fruit growing in toxic ex-orchard soils of Central Washington. Washington Agricultural Experiment Station Bulletin. 1944. 437-445.
- Vinogradov A. P.: 1959. The Geochemistry of Rare and Dispersed Chemical Elements in Soils. Consultants Bureau for the Geochemical Society, New York.
- Violante A. - Del Gaudio S. - Pigna M. - Pucci M. - Amalfinato C.: 2008. Sorption and desorption of arsenic by soil minerals and soils in the presence of nutrients and organics. [In: Huang Q., Violante A., Huang P. M. (szerk.) Interactions of Soil Minerals, Organic Matter and Microorganism in Soils.]. Springer-Verlag, New York, 39-69.
- Vromman D. - Flores-Bavestrello A. - Šležkovec Z. - Lapaille S. - Teixeira-Cardoso C. - Briceño M. - Kumar M. - Martínez J. P. - Lutts S.: 2011. Arsenic accumulation and distribution in relation to young seedling growth in *Atriplex atacamensis* Phil. Science of the Total Environment. 412-413. 286-295.
- Walsh L. M. - Sumner E. M. - Keeney D. R.: 1977. Occurance and distribution of arsenic in soils and plants. Enviromental Health Perspectives. 19. 67-71.
- Wang J. - Zhao F. J. - Meharg A. A. - Raab A. - Feldmann J. - McGrath S. P.: 2002. Mechanisms of arsenic hyperaccumulation in *Pteris vittata*. Uptake kinetics, interactions phosphate, and arsenic speciation. Plant Physiology. 130. 1552-1561.
- Wang S. - Mulligan C.: 2006. Natural attenuation processes for remediation of arsenic contaminated soils and groundwater. Journal of Hazardous Material. 138. 459-470.
- Warren H. V. - Delavault R. E. - Barakso J.: 1968. The arsenic content of Douglas fir as a guide to some gold, silver and base metal deposits. Can. Mining Metall. Bull. 7. 1-14.
- Weinberg E. D.: 1977. Microorganisms and Minerals. Marcel Dekker, New York.

- Wells B. R. - Gilmore J. T.: 1977. Sterility in rice cultivars as influenced by MSMA rate and water management. *Agronomy Journal*. 69. 451-454.
- Wenzel W. W.: 2009. Rhizosphere processes and management in plant-assisted bioremediation (phytoremediation) of soils. *Plant and Soil*. 321. 385-408.
- Williams P. N. - Price A. R. - Raab A. - Hossain S. A. - Feldmann J. - Meharg A. A.: 2005. Variation in arsenic speciation and concentration in paddy rice related to dietary exposure. *Environmental Science and Technology*. 39. 5531-5540.
- Wood J. M.: 1974. Biological cycles for toxic elements in the environment. *Science*. 183. 1049-1055.
- Woolson E. A. - Axley J. H. - Kearney P. C.: 1971. Correlation between available soil arsenic, estimated by six methods, and response of corn (*Zea mays* L.). *Soil Science Society of America Journal*. 35. 101-105.
- Woolson E. A. - Axley J. H. - Kearney P. C.: 1973. The chemistry and phytotoxicity of arsenic in soils: 11. Effects of time and phosphorus. *Soil Science Society of America, Proceedings*. 37. 254-260.
- Woolson E. A.: 1973. Arsenic phytotoxicity and uptake in six vegetable crops. *Weed Science*. 21. 524-529.
- Xu J. - Thornton I.: 1985. Arsenic in garden soils and vegetable crops in Cornwall, England: implications for human health. *Environmental Geochemistry and Health*. 7. 131-133.
- Xu X. Y. - McGrath S. P. - Zhao F. J.: 2007. Rapid reduction of arsenate in the medium mediated by plant roots. *New Phytologist*. 176. 590-599.
- Yamaji N. - Mitani N. - Ma J. F.: 2008. A transporter regulating silicon distribution in rice shoots. *Plant Cell*. 20. 1381-1389.
- Yu Y. - Zhang S. - Huang H. - Luo L. - Wen B.: 2009. Arsenic accumulation and speciation in maize as affected by inoculation with arbuscular mycorrhizal fungus *Glomus mossaeae*. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 57. 3695-3701.
- Zehnalek, J. - Adam, V. - Kizek R.: 2004. Influence of heavy metals on production of protecting compounds in agriculture plants. *Lis Cukrov Reprske*. 120. 222-224.
- Zhao F. J. - Ma J. F. - Meharg A. A - McGrath S. P.: 2009. Arsenic uptake and metabolism in plants. *New Phytologist*. 181. 777-794.

Rendeletek:

1. 17/1999. (VI. 16.) EüM rendelet – az élelmiszerek vegyi szennyezettségének megengedhető mértékéről
2. 44/2003. (IV. 26.) FVM rendelet - a Magyar Takarmánykódex kötelező előírásairól

Internetes források:

1. Az EFSA (EUROPA - Európai Élelmiszerbiztonsági Hatóság) tudományos álláspontja az élelmiszerek arzén szennyezettségéről (Letöltés: 2016.09.10. 14:00 h.)
<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.2903/j.efsa.2009.1351/pdf>
2. A WHO (Egészségügyi Világszervezet) honlapja (Letöltés: 2016.10.08. 10:00 h.)
<http://apps.who.int/food-additives-contaminants-jecfa-database/chemical.aspx?chemID=1863>

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Ezúton szeretném kifejezni köszönetemet témavezetőmnek, **Dr. Kovács Béla** egyetemi tanárnak, aki iránymutató javaslataival, értékes szakmai tanácsaival és biztató szavaival segítette a doktori értekezés elkészülését.

Köszönöm opponenseimnek, **Dr. Sárvári Mihály** egyetemi tanárnak és **Dr. Jakab Péter** főiskolai docensnek a disszertáció elkészítésében nyújtott segítségüket és áldozatos munkájukat.

Köszönettel tartozom **Balláné Dr. Kovács Andrea** egyetemi docensnek, az Agrokémiai és Talajtani Intézet intézetvezetőjének, valamint **Dr. Veres Szilviának**, a Mezőgazdasági Növénytan Növényélettani és Biotechnológiai Tanszék egyetemi docensének, hogy a kísérleteim kivitelezéséhez szükséges feltételeket biztosították számomra, valamint köszönöm a kísérletek beállításánál nyújtott szakmai segítségüket.

Köszönettel tartozom továbbá az Élelmiszertudományi Intézet dolgozóinak, **Andrási Dávidnak**, **Jánószky Mihálynak**, **Nyeste Erikának**, valamint **Soós Áron Ph.D.** hallgatónak a minták elemanalitikai mérésében nyújtott segítségükért.

Köszönettel tartozom Ph.D. hallgató társaimnak, **Bacskainé Bódi Évának** és **Soós Áronnak**, a kutatómunkám során nyújtott segítségükért és biztatásukért.

Köszönöm a **családomnak** az évek alatt nyújtott segítségüket, megértésüket, türelmüket és támogatásukat.

Köszönöm!



Nyilvántartási szám: DEENK/274/2017.PL
Tárgy: PhD Publikációs Lista

Jelölt: Várallyay Szilvia
Neptun kód: H91BRM
Doktori Iskola: Kerpely Kálmán Doktori Iskola
MTMT azonosító: 10040651

A PhD értekezés alapjául szolgáló közlemények

Magyar nyelvű könyvrészletek (1)

1. **Várallyay, S.**, Veres, S., Soós, Á., Bódi, É., Kovács, B.: Arzén kezelés hatása kukorica növény tápanyagfelvételére rhizoboxos nevelési körülmények között.
In: Georgikon Napok konferenciakötet [elektronikus dokumentum] : 2015-ös előadások, Pannon Egyetem, [Keszthely], 458-464, 2015. ISBN: 9789639639829

Idegen nyelvű, hazai könyvrészletek (3)

2. Garousi, F., Veres, S., Bódi, É., **Várallyay, S.**, Kovács, B.: Changes of pH during uptaking of selenate and selenite by sunflower plants growing in nutrient solution.
In: XXXV. Óvári Tudományos Nap. Közread.: Nyugat-magyarországi Egyetem, Nyugat-magyarországi Egyetem Kiadó, Mosonmagyaróvár, 327-331, 2014. ISBN: 9789639941940
3. **Várallyay, S.**, Kovács, B., Garousi, F., Bódi, É., Veres, S.: Effect of different arsenic treatments on sunflower and maize plant production.
In: XXXV. Óvári Tudományos Nap. Közread.: Nyugat-magyarországi Egyetem, Nyugat-magyarországi Egyetem Kiadó, Mosonmagyaróvár, 415-419, 2014. ISBN: 9789639941940
4. Bódi, É., Veres, S., Garousi, F., **Várallyay, S.**, Kovács, B.: Growth of maize and sunflower seedlings by effect of molybdenum treatments.
In: XXXV. Óvári Tudományos Nap. Közread.: Nyugat-magyarországi Egyetem, Nyugat-magyarországi Egyetem Kiadó, Mosonmagyaróvár, 297-302, 2014. ISBN: 9789639941940

Magyar nyelvű tudományos közlemények hazai folyóiratban (6)

5. **Várallyay, S.**, Balláné Kovács, A., Soós, Á., Kovács, B.: Arzénnal szennyezett területen termesztett zöldborsó élelmiszer- és takarmánybiztonsági megítélése.
Élelmisz. közl. [Megjelenés alatt], [15], 2017. ISSN: 0422-9576.



6. **Várallyay, S.**, Balláné Kovács, A., Soós, Á., Kovács, B.: Élelmiszeripari felhasználásra szánt zöldborsó ásványi anyag összetételének vizsgálata növekvő koncentrációjú arzénkezelések függvényében.
Agrártud. közl. 72, 203-208, 2017. ISSN: 1587-1282.
7. **Várallyay, S.**, Balláné Kovács, A., Soós, Á., Kovács, B.: Arzénkezelés hatása zöldborsó (*Pisum sativum* L.) arzén- és foszforkoncentrációjára, valamint szárazanyag-produktumára.
Agrokém. talajt. 65 (2), 275-295, 2016. ISSN: 0002-1873.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1556/0088.2016.65.2.7>
8. **Várallyay, S.**, Szilva, D., Soós, Á., Kovács, B.: Talaj- és növény minta arzéntartalmának meghatározására irányuló minta-előkészítési módszerek összehasonlító vizsgálata.
Agrártud. közl. 69, 167-170, 2016. ISSN: 1587-1282.
9. **Várallyay, S.**, Veres, S., Garousi, F., Bódi, É., Kovács, B.: Arzénkezelés hatása kukorica és napraforgó csíranövények fiziológiai paramétereire.
Agrártud. közl. 64, 81-84, 2015. ISSN: 1587-1282.
10. Bódi, É., Veres, S., András, D., Garousi, F., **Várallyay, S.**, Kovács, B.: Molibdénrel kezelt kukorica és napraforgó növények vizsgálata rizoboxos kísérletben.
Agrártud. közl. 64, 11-14, 2015. ISSN: 1587-1282.

Idegen nyelvű tudományos közlemények hazai folyóiratban (1)

11. Garousi, F., Veres, S., Bódi, É., **Várallyay, S.**, Kovács, B.: Assessment and comparison of selenium-enriched maize with sodium selenite and sodium selenate.
Agrártud. közl. 68, 11-15, 2016. ISSN: 1587-1282.

Idegen nyelvű tudományos közlemények külföldi folyóiratban (8)

12. **Várallyay, S.**, Balláné Kovács, A., Soós, Á., Kovács, B.: Effect of different arsenic-treatments on the dry weight of vegetative plant parts of green pea in the different phenophase of the plant development.
Annals of Academy of Romanian Scientists Series on Agriculture, Silviculture and Veterinary Medicine Sciences. 6 (1), 144-151, 2017. ISSN: 2069-1149.
13. Bódi, É., **Várallyay, S.**, Soós, Á., Kovács, B.: Effect of molybdenum treatments on growth and molybdenum uptake of green pea.
Annals of Academy of Romanian Scientists Series on Agriculture, Silviculture and Veterinary Medicine Sciences. 6 (1), 130-135, 2017. ISSN: 2069-1149.
14. **Várallyay, S.**, Bódi, É., Garousi, F., Veres, S., Kovács, B.: Effect of arsenic on dry weight and relative chlorophyll content in greening maize and sunflower tissues.
J. Microbiol. Biotech. Food Sci. 4 (3), 167-169, 2015. ISSN: 1338-5178.
DOI: <http://dx.doi.org/10.15414/jmbfs.2015.4.special3.167-169>



15. Garousi, F., Veres, S., Bódi, É., **Várallyay, S.**, Kovács, B.: Effect of selenite and selenate uptake by maize plants on specific leaf area.
World Academy of Science, Engineering and Technology : International Journal of Biological, Food, Veterinary and Agricultural Engineering. 5 (9), 379-382, 2015. ISSN: 2010-376X.
16. Bódi, É., Veres, S., Garousi, F., **Várallyay, S.**, Kovács, B.: Effects of molybdenum treatments on maize and sunflower seedlings.
World Academy of Science, Engineering and Technology : International Journal of Biological, Food, Veterinary and Agricultural Engineering. 5 (9), 375-378, 2015. ISSN: 2010-376X.
17. Garousi, F., Kovács, B., Bódi, É., **Várallyay, S.**, Veres, S.: Physiological reactions of sunflower plants to different spices of selenium.
Bull. of Univ. of Agr. Sci. and Vet. Med. 72 (2), 403-408, 2015. ISSN: 1843-5246.
18. Garousi, F., Kovács, B., **Várallyay, S.**, Bódi, É., Veres, S.: Relative chlorophyll content changes during uptaking of selenite and selenate by maize plants grown in nutrient solution.
J. Microbiol. Biotech. Food Sci. 4 (3), 44-47, 2015. ISSN: 1338-5178.
DOI: <http://dx.doi.org/10.15414/jmbfs.2015.4.special3.44-47>
19. Garousi, F., Veres, S., Bódi, É., **Várallyay, S.**, Kovács, B.: Role of selenite and selenate uptake by maize plants in chlorophyll A and B content.
World Academy of Science, Engineering and Technology : International Journal of Biological, Food, Veterinary and Agricultural Engineering. 9 (6), 549-552, 2015. ISSN: 2010-376X.

Magyar nyelvű absztrakt kiadványok (4)

20. **Várallyay, S.**, Balláné Kovács, A., Soós, Á., Kovács, B.: Arzénkezelés hatása a zöldborsó kén, magnézium, valamint vas felvételére.
In: Magyar Spektrokémia vándorgyűlés és XIII. Környezetvédelmi Analitikai és Technológiai Konferencia. Debrecen, 2017. 08. 23-25 : Program és előadás összefoglalók, [Debreceni Egyetem], [Debrecen], 150-153, 2017.
21. Bódi, É., **Várallyay, S.**, Soós, Á., Kovács, B.: Molibdén kezelés hatása a zöldborsó makroelem felvételére.
In: Magyar Spektrokémia vándorgyűlés és XIII. Környezetvédelmi Analitikai és Technológiai Konferencia. Debrecen, 2017. 08. 23-25 : Program és előadás összefoglalók, [Debreceni Egyetem], [Debrecen], 147-149, 2017.
22. **Várallyay, S.**, Veres, S., Soós, Á., Bódi, É., Kovács, B.: Arzén kezelés hatása kukorica növény tápanyagfelvételére rhizoboxos nevelési körülmények között.
In: LVII. Georgikon Napok = 57th Georgikon Scientific Conference : Kivonat-kötet : Programfüzet, valamint az elhangzó és poszter előadások rövid kivonatainak gyűjteménye : [agrárgazdaság a növekedéskor után] : [2015. október 1-2., Keszthely]. Szerk.: Nagy Zita Barabara, Pannon Egyetem Georgikon Kar, Keszthely, 123, 2015. ISBN: 9789639639812



23. **Várallyay, S.**, Veres, S., Bódi, É., Garousi, F., Kovács, B.: Hidropónikus körülmények között nevelt napraforgó tápoldatának pH-érték változása különböző arzén kezelések hatására.
In: Tavaszi Szél Absztraktkötet 2015 : Absztraktkötet. Szerk.: Keresztes Gábor, Publio Kiadó, Budapest, 44, 2015. ISBN: 9789633977026

Idegen nyelvű absztrakt kiadványok (12)

24. **Várallyay, S.**, Veres, S., Soós, Á., Bódi, É., Kovács, B.: Effect of different arsenic treatments on the uptake of Ca, K, S, P and Mg by maize seedlings.
In: 1st Meeting of Young Researchers from V4 Countries. Book of Abstract. Ed.: Monika Wesołowska, University of Rzeszow, Rzeszow, 90, 2016.
25. Bódi, É., **Várallyay, S.**, Soós, Á., Kovács, B.: Effect of molybdenum treatment on the element content of maize and green pea in a long-term field experiment.
In: 1st Meeting of Young Researchers from V4 Countries : Book of Abstract. Ed.: Monika Wesołowska, University of Rzeszow, Rzeszow, 17, 2016.
26. **Várallyay, S.**, Bódi, É., Garousi, F., Veres, S., Kovács, B.: Effect of arsenic on dry weight and relative chlorophyll content in greening maize and sunflower tissues.
In: 10th International Scientific Conference Biotechnology and Quality of Raw Materials and Foodstuffs Book of Abstracts and Posters, [ISCBQRMF], Stará Lesná, 110, 2015.
27. **Várallyay, S.**, Kovács, B.: Effect of arsenic on the mineral nutrient uptake by plant.
In: Student in Bucovina Abstracts : International Conference for Students "Student in Bucovina" May, 7th-9th, 2015, Faculty of Food Engineering, Stefan cel Mare University of Suceava, Suceava, 157, 2015, (ISSN 2068-7648)
28. **Várallyay, S.**, Veres, S., Bódi, É., Garousi, F., András, D., Kovács, B.: Effect of arsenic treatment on elements contents of sunflower growing on nutrient solution.
World Academy of Science, Engineering and Technology. Agricultural and Biosystems Engineering. 2 (5), 465, 2015. ISSN: 2010-376X.
29. **Várallyay, S.**, Kovács, B., Bódi, É., Garousi, F., Veres, S.: Effect of different arsenic treatments on root growth of sunflower seedlings in rhizobox experiment.
World Academy of Science, Engineering and Technology. International Journal of Nutrition and Food Engineering. 2 (6), 1, 2015. ISSN: 2010-376X.
30. Bódi, É., Veres, S., Garousi, F., **Várallyay, S.**, Kovács, B.: Effects of molybdenum treatments on maize and sunflower seedlings.
World Academy of Science, Engineering and Technology. Agricultural and Biosystems Engineering. 2 (5), 516, 2015. ISSN: 2010-376X.



31. Garousi, F., Veres, S., Bódi, É., **Várallyay, S.**, Kovács, B.: Changes of pH during uptaking of selenate and selenite by sunflower plants growing in nutrient solution.
In: XXXV. Óvári Tudományos Nap. A magyar és nemzetközi agrár- és élelmiszer-gazdaság lehetőségei. Szerk.: Schmidt Rezső, Bali Papp Ágnes, Nyugat-magyarországi Egyetem Kiadó, Mosonmagyaróvár, 34, 2014. ISBN: 9789633341933
32. **Várallyay, S.**, Kovács, B., Garousi, F., Bódi, É., Veres, S.: Effect of different arsenic treatments on sunflower and maize plants production.
In: XXXV. Óvári Tudományos Nap. A magyar és nemzetközi agrár- és élelmiszer-gazdaság lehetőségei. Szerk.: Schmidt Rezső, Bali Papp Ágnes, Nyugat-magyarországi Egyetem Kiadó, Mosonmagyaróvár, 21, 2014. ISBN: 9789633341933
33. Bódi, É., **Várallyay, S.**, Garousi, F., Kovács, B.: Effect of molybdenum treatment on the element uptake of spinach and garden sorrel in a long-term field experiment.
In: 14th International Nutrition and Diagnostics Conference : Book of Abstracts. Ed.: A. Horna, Radanal Ltd., Prága, 167, 2014. ISBN: 9788073957766
34. Bódi, É., Veres, S., Garousi, F., **Várallyay, S.**, Kovács, B.: Growth of maize and sunflower seedlings by effect of molybdenum treatments.
In: XXXV. Óvári Tudományos Nap. A magyar és nemzetközi agrár- és élelmiszer-gazdaság lehetőségei. Szerk.: Schmidt Rezső, Bali Papp Ágnes, Nyugat-magyarországi Egyetem Kiadó, Mosonmagyaróvár, 33, 2014. ISBN: 9789633341933
35. **Várallyay, S.**, Bódi, É., Garousi, F., Kovács, B.: Risk assessment of arsenic contamination.
In: 14th International Nutrition and Diagnostics Conference : Book of Abstracts.. Ed.: A. Horna, Radanal Ltd., Prága, 166, 2014. ISBN: 9788073957766

További közlemények

Magyar nyelvű közlemények hazai folyóiratban (2)

36. Soós, Á., Reichenbach, R., **Várallyay, S.**, Bódi, É., Kovács, B.: Pest, Zala és Bács-Kiskun megyékből származó propolisz minták elemértalmi összetétele.
Agrártud. közl. 72, 149-153, 2017. ISSN: 1587-1282.
37. Soós, Á., **Várallyay, S.**, Kovács, B.: Hazai kékrankos borok toxikus elem koncentrációja.
Agrártud. közl. 68, 87-90, 2016. ISSN: 1587-1282.





Magyar nyelvű konferencia közlemények (1)

38. Soós, Á., Reichenbach, R., **Várallyay, S.**, Bódi, É., Molnár, S., Kovács, B.: Kis mennyiségű propolisz minták előkészítése és mérése ICP-OES és ICP-MS technikákkal.
In: Magyar Spektrokémia vándorgyűlés és XIII. Környezetvédelmi Analitikai és Technológiai Konferencia. Debrecen, 2017. 08. 23-25 : Program és előadás összefoglalók, [Debreceni Egyetem], [Debrecen], 113-116, 2017.

Magyar nyelvű absztrakt kiadványok (11)

39. **Várallyay, S.**: A tejről őszintén: méreg vagy áldás?: avagy a tejben található ásványi alkotók vizsgálata és azok élettani hatásai.
In: Debreceni Fejlődés és Környezet Konferencia írásos anyagainak összefoglalói / fel. szerk. Balla Zoltán, DE AGTC Kerpely Kálmán Szakkollégium, Debrecen, 10, 2013.
40. **Várallyay, S.**, Andrási, D., Kovács, B.: Mintaelőkészítési módszerek összehasonlítása tejminta elemtartalom vizsgálatára.
In: A Magyar Szabad-gyök Kutató Társaság VII. konferenciája, Magyar Szabadgyök-Kutató Társaság, Debrecen, 41, 2013.
41. **Várallyay, S.**, Andrási, D., Soós, Á., Kovács, B.: Mintaelőkészítési módszerek összehasonlítása tejminta elemtartalom vizsgálatára.
In: XI. Környezetvédelmi Analitikai és Technológiai Konferencia : Program és Előadás Összefoglalók, KAT13, Hajdúszoboszló, 93, 2013.
42. **Várallyay, S.**: Mérési paraméterek és mintaelőkészítési módszerek vizsgálata, tej elemtartalom meghatározásához ICP technikákkal.
In: Kari Tudományos Diákköri Konferencia : meghívó és programfüzet, DE AGTC MÉK, Debrecen, 45, 2013.
43. **Várallyay, S.**: Mérési paraméterek és mintaelőkészítési módszerek vizsgálata, tej elemtartalom meghatározásához ICP technikával.
In: IV. Kerpely Kálmán Szakmai Napok a Gyakorlatorientált Oktatásért, AGTC, Debrecen, 7, 2013.
44. Sánta, K., **Várallyay, S.**: Nehézfémek káros hatásai a környezetre.
In: Ökonapok az Agráron 2013, AGTC, Debrecen, 11, 2013.
45. **Várallyay, S.**: Ásványvizek minőségét meghatározó paraméterek összehasonlító elemzése.
In: XXXI. Országos Tudományos Diákköri Konferencia Agrártudományi Szekció : pályaművek összefoglalói, BCE, Budapest, 87, 2013. ISBN: 9789635035366
46. **Várallyay, S.**: Ásványvizek minőségét meghatározó paraméterek összehasonlító elemzése.
In: Fiatal kutatók az egészséges ételmiszerért : tudományos ülés. Szerk.: Bódi Éva, Fekete István, Kovács Béla, Debreceni Egyetem Hankóczy Jenő Növénytermesztési, Kertészeti és Élelmiszertudományok Doktori Iskola, Debrecen, 41-46, 2013. ISBN: 9789634736011



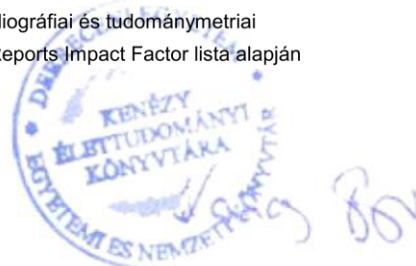
47. **Várallyay, S.:** Felszín alatti vízkészlet védelme a megfelelő minőségű víz biztosításának érdekében.
In: II. SzaKKKör Konferencia : Szakkollégiumok konferenciája a környezet- és természetvédelemért : II. SzaKKKör Konferencia összefoglalói : Természetvédelem Szekció, Környezetvédelem Szekció, Egyéb Társadalomtudományok Szekció, Poszterszekció / fel. szerk. Takács Márton, SZIE Környezetvédelmi (Zöld) Szakkollégium, Gödöllő, 18, 2012.
ISBN: 9789632692883
48. **Várallyay, S.:** Ásványvizek minőségét meghatározó paraméterek összehasonlító elemzése.
In: XIX. Országos Magyar Élelmiszertudományi és Technológiai Egyesület Tudományos Diákköri Konferencia : Absztrakt kötet, Debreceni Egyetem, Debrecen, 102, 2012.
49. **Várallyay, S.:** Ásványvizek minőségét meghatározó paraméterek összehasonlító elemzése.
In: Tudományos Diákköri Konferencia, 2011/2012. tanév őszi félév : Debrecen, 2011. október 20. : meghívó és programfüzet, DE MÉKK, Debrecen, 52, 2011.

Idegen nyelvű absztrakt kiadványok (2)

50. Kovács, B., Bódi, É., Garousi, F., **Várallyay, S.**, Soós, Á., Vágó, X., András, D.: Problems and solutions in the application of ICP-MS for analysis of trace elements in various samples.
World Academy of Science, Engineering and Technology. International Journal of Nutrition and Food Engineering. 2 (6), 1, 2015. ISSN: 2010-376X.
51. Kovács, B., Bódi, É., Garousi, F., **Várallyay, S.**, András, D.: What are the problems in the case of analysis of selenium by inductively coupled plasma mass spectrometry in food and food raw materials?
World Academy of Science, Engineering and Technology. Agricultural and Biosystems Engineering. 2 (5), 1, 2015. ISSN: 2010-376X.

A DEENK a Jelölt által az iDEa Tudóstérbe feltöltött adatok bibliográfiai és tudományometriai ellenőrzését a tudományos adatbázisok és a Journal Citation Reports Impact Factor lista alapján elvégezte.

Debrecen, 2017.09.05.



NYILATKOZAT

Ezen értekezést a Debreceni Egyetem, Kerpely Kálmán Növénytermesztési és Kertészeti Tudományok Doktori Iskola keretében készítettem, a Debreceni Egyetem doktori (Ph.D.) fokozatának elnyerése céljából.

Debrecen, 20.....

.....
a jelölt aláírása

NYILATKOZAT

Tanúsítom, hogy **Várallyay Szilvia** doktorjelölt 2014-2017 között a fent megnevezett Doktori Iskola keretében irányításommal végezte munkáját. Az értekezésben foglalt eredményekhez a jelölt önálló alkotó tevékenységével meghatározóan hozzájárult, az értekezés a jelölt önálló munkája. Az értekezés elfogadását javaslom.

Debrecen, 20.....

.....
a témavezető aláírása