



# Magyar Agrár- és Élettudományi Egyetem

**Szemes cirok (*Sorghum bicolor* L. Moench)  
szemtermésből izolált mikotoxin-termelő gombafajok,  
valamint az általuk termelt egyes mikotoxinok  
bioszintézis hátterének vizsgálata és az azonosított  
*Fusarium* fajok mikotoxin-termelése**

Szabó Barbara Katalin

Gödöllő

2024

## 1. melléklet. A belső címoldal hátoldalának mintája

### A doktori iskola

**megnevezése:** Növénytudományi Doktori Iskola

**tudományága:** agrártudományok

**vezetője:** Prof. Dr. Helyes Lajos  
egyetemi tanár, PhD., D.Sc., CMHA  
Magyar Agrár- és Élettudományi Egyetem  
Kertészettudományi Intézet, Zöldség- és  
Gombatermesztési Tanszék

**Témavezető:** Dr. Körösi Katalin Orsolya  
egyetemi docens, PhD.  
Magyar Agrár- és Élettudományi Egyetem  
Növényvédelmi Intézet  
Integrált Növényvédelmi Tanszék

.....  
Az iskolavezető jóváhagyása

.....  
A témavezető jóváhagyása

## 1. Amunka előzményei, célkitűzések

Napjainkban a kis kultúrák, köztük a szemes cirok (*Sorghum bicolor* L. Moench), egyre nagyobb térhódítása tapasztalható, köszönhetően a humán ételmezésben és a haszonállatok takarmányozásában betöltött szerepük növekedésének. E két hasznosítás miatt kikerülhetetlen a kis kultúrák esetében is a mikotoxin-termelő gombák jelenlétének kérdésköre a szemtermésben, hiszen a mikotoxin szennyezettség sok gabonaféle esetén problémát okozhat, azonban kevés ismeret áll rendelkezésünkre az említett növényeken megjelenő mikotoxin-termelő gombákról.

A Magyarországon termesztett szemes cirok fajták szemterméseit fertőző *Fusarium* fajok felderítésére és azonosítására ez idáig nem irányult kutatás, miközben a termőterületek folyamatosan növekszenek és az éghajlati viszonyok (virágzáskori páratartalom és hőmérséklet) kedveznek az *Fusarium* fajok által okozott szempenészedésnek (Fusarium Grain Mold, FGM).

Kikerülhetetlen a cirok esetében is a mikotoxin-szennyezettség problémaköre. A szemes cirok alapú élelmiszeripari termékek és takarmányok alapanyagok esetében nincs hatályos szabályozás a mikotoxin-szennyezettség mértékére.

### A célkitűzések:

1. Mikotoxin-termelő gombák jelenlétének vizsgálata az egyes szemes cirok minták esetében és az izolált gombák makro- és mikromorfológiai vizsgálata és nemzetségre sorolása:
  - i. belső fertőzőöttségi vizsgálatok
  - ii. makro- és mikromorfológiai vizsgálatok
2. Az izolált mikotoxin-termelő nemzetségek molekuláris genetikai vizsgálata transzlációs elongációs faktorra (TEF1- $\alpha$ ) és kalmodulin génre (cmd5/cmd6, CL1/CL2A) specifikus primerekkel. A DNS-ek

szekvenálása a pontos fajszerű azonosítás érdekében továbbá az azonosított fajok makro- és mikromorfológiai vizsgálata.

3. Az egyes szemes cirok szemtermésből izolált *Fusarium* fajok (*F. proliferatum*, *F. verticillioides*, *F. subglutinans*, *F. cf. incarnatum*, *F. graminearum*, *F. sporotrichioides*) mikotoxin-termelőképességének vizsgálata.
4. A szemes cirok szemtermésből izolált *Aspergillus* fajok (*A. flavus* és *A. oryzae*) aflatoxin-termelésben szerepet játszó génjeinek azonosítása.
5. A szemes cirok minták mikotoxin-szennyezettségének (FB1, FB2, BEA, ZEA, HT-2 és T-2) vizsgálata LC/MS-MS módszerrel.
6. A szemes cirok minták lipofil antioxidáns összetételének vizsgálata.
7. A kiválasztott lipofil antioxidánsok ( $\alpha$ -tokoferol,  $\gamma$ -tokoferol, lutein, zeaxantin) hatásának vizsgálata a kiválasztott *Fusarium proliferatum* fumonizin bioszintézisére.

## 2. Anyag és módszer

### 2.1. Szemes cirok minták belső szemfertőzőittségének vizsgálata mikotoxin-termelő gombák vonatkozásában

A cirok szemtermések mintagyűjtése a 2021-es és 2022-es évben történt Magyarország különböző régióiból. A szemterméseket felületi fertőtlenítés után Nash & Snyder-féle szelektív táptalajra (Leslie és Summerell 2006) helyeztük. A szemterméseket 10 ismétlésben és 10 biológiai ismétléssel vizsgáltuk. A kinőtt gombatelepeket nemzetség szintű azonosításához burgonya-dextróz táptalajt (Potato Dextrose Agar (PDA)) használtunk, majd a gombákat makro- és mikromorfológiailag vizsgáltuk.

### 2.2. Az izolált *Fusarium*-, *Aspergillus*- és *Penicillium* fajok azonosítása

A *Fusarium* fajok faj szintű azonosításához nem csak tiszta tenyészeteket, hanem monospóras tenyészeteket is készítettünk, mivel egy-egy átoltott izolátum hifáiban esetlegesen több *Fusarium* faj konídiumai is fellelhetők (Geiser et al. 2004). A DNS kivonásokat 7-14 napos tenyészetekből végeztük. A DNS kivonásokat ZR Fungal/Bacterial DNA MiniPrep Kit segítségével és fenol:kloroform (v/v, 1:1, pH 8,0) végeztük el.

A molekuláris genetikai azonosítások során 3 szekvencia párral dolgoztunk. A transzlációs elongációs faktorra (TEF-1 $\alpha$ ) speciális primert a *Fusarium* nemzetségbe tartozó gombák esetén alkalmaztuk. A kalmodulin génre (CaM) speciális indítoszekvencia párokat (cmd5/cmd6 és CL1/CL2A) az *Aspergillus* és *Penicillium* nemzetségbe tartozó gombák esetén alkalmaztuk. A *Fusarium*, *Aspergillus* és *Penicillium* nemzetségbe tartozó gombák esetében standard polimeráz láncreakciót (PCR) alkalmaztunk.

### **2.3. Az egyes *Fusarium* izolátumok mikotoxin-termelő képességének vizsgálata**

A *Fusarium* izolátumokat karboxi-metil-cellulózban (CMC) tenyésztettük, hogy spóraszuszpenziót állítsunk elő. CMC-ben 25 °C-on és 180 rpm sebességgel Multitron inkubátor rázógépből (INFORS AG, Bottmingen, Svájc) 3-4 napig inkubáltuk, majd a spórákat 40 µm-es membránszűrővel (Sefar Nitex, Svájc) választottuk el, ezután Malassez-kamrába helyeztük őket, és steril vízzel hígítottuk, hogy elérjük a 10<sup>4</sup> spóra/ml végső koncentrációt.

*F. graminearum*, *F. sporotrichioides* és a *F. cf. incarnatum* tenyészeteket MS (Mycotoxin Synthetic Medium) folyékony tápközegben szaporítottuk fel (Boutigny et al. 2009). A *F. graminearum*, *F. cf. incarnatum* izolátumok esetében a B típusú trichotecének (TCTB) kivonását Montibus és mtsai (2021) leírtak alapján végeztük el. A *F. sporotrichioides* esetében a táptalajt 50%-os metanollal hígítottuk, vortex segítségével összeráztuk, és egy 0,45 µm-es, 15 mm átmérőjű szűrőfecskendőn átszűrtük a HPLC-MS/MS analízis előtt. Majd az analízist elvégeztük.

A *F. verticillioides*, *F. proliferatum*, *F. cf. incarnatum* és *F. subglutinans* izolátumokat GAYEP (glükóz-amilopektin-élesztőkivonat-pepton) folyékony tápközegben állítottuk elő, majd UPLC segítségével megállapítottuk a fumonizin mennyiségét a vizsgált izolátumokban a Picot és mtsai. (2013) által leírtak alapján.

### **2.4. *Aspergillus* izolátumok mikotoxin-termelésben szerepet játszó génjeinek azonosítása**

A PCR vizsgálatok során 7 a mikotoxin termeléssel összefüggésbe hozható gén (*aflR* és *aflS* szabályozó gének, *aflD*, *aflO*, *aflM*, *aflP* és *aflQ*

gének strukturális gének) jelenlétét vizsgáltuk standard PCR eljárással Degola és mtsai. (2007) és Gallo és mtsai. (2012) leírása alapján A kísérlet során 21 db izolátumot vizsgáltunk, melyből 19 db *A. flavus* és 2 db *A. oryzae* izolátum volt.

## **2.5. A szemes cirok tokoferol és antioxidáns összetételének vizsgálatai**

A tokokromanol összetételre vonatkozó vizsgálatokat Lux és mtsai. (2020) által leírtak alapján. A tokokromanolok mennyiségi meghatározása fluoreszcenciadetektorhoz (LC/FLD) kapcsolt folyadékkromatográfiával történt. A karotinoid összetételre vonatkozó vizsgálatokat folyadékkromatográfiával határoztuk meg fotodiódasoros detektorhoz (LC-DAD) kapcsolva (Savignac et al. 2023).

## **2.6. Egyes lipofil antioxidánsok hatásai a kiválasztott *Fusarium proliferatum* izolátumok fumonizin bioszintézisére**

Az izolátumokat a GAYEP folyékony tápközegben hoztunk létre és szaporítottuk fel a Picot és mtsai (2013) által leírtak alapján. A táptalajt (GAYEP) 0,1 mM luteinnel, zeaxantinnal,  $\alpha$ -tokoferollal,  $\gamma$ -tokoferollal egészítettük ki. A fumonizinek kivonása a Picot és mtsai (2013) által leírt protokoll alapján történt.

## **2.7. A szemes cirok minták mikotoxin szennyezettségének vizsgálata**

A mikotoxin szennyezettség vizsgálata során a DON, T-2, HT-2, ZEA, BEA, FB1 toxinokat vizsgáltuk a Varga és mtsai. (2021) által leírt protokoll alapján.

### **3. Eredmények és azok megbeszélése**

#### **3.1. A szemtermések belső fertőzöttségének vizsgálati eredményei**

A belső fertőzöttségi értékeket alapján minden minta esetében a *Fusarium* nemzetség volt domináns, míg az *Aspergillus* és *Penicillium* nemzetség fajai ritkábban jelentek meg a belső fertőzöttségi értékek vizsgálata során. A két év vizsgálatai alapján azt tapasztaltuk, hogy az *Aspergillus* fajok dominanciája nőtt a 2022-es évben.

#### **3.2. A vizsgált gomba nemzetségek faj szintű azonosítása**

Az izolált *Fusarium* fajok molekuláris genetikai vizsgálata során összesen 9 különböző *Fusarium* fajt azonosítottunk, amelyből 60 db *F. proliferatum*, 21 db *F. verticillioides*, 19 db *F. sporotrichioides*, 13 db *F. graminearum*, 8-8 db *F. thapsinum* és *F. cf. incarnatum*, 7 db *F. equiseti*, 6 db *F. avenaceum* és 3 db *F. subglutinans* fajt azonosítottunk. Az *Aspergillus* nemzetség tagjainak molekuláris genetikai vizsgálata során 2 db *A. oryzae* és 19 db *A. flavus* fajt azonosítottunk. A *Penicillium* nemzetségből készített izolátumok DNS vizsgálatai során 27 db *P. rubens*, 23 db *P. chrysogenum*, 5 db *P. allii*, 3 db *P. hordei*, 1-1 db *P. polonicum* és *P. crustosum* faj azonosítása történt. A szekvenciák minden nemzetség esetében deponálásra kerültek az NCBI Génbankjába.

#### **3.3. A kiválasztott *Fusarium* fajok mikotoxin-termelőképességének vizsgálati eredményei**

A *F. proliferatum* izolátumok esetében fumonizin B1, B2 és B3 termelését is megfigyeltük. Az FB1, FB2 és FB3 toxinok értéktartománya a nem detektált (ND) és 14130,85 µg/g, az ND és 477,72 µg/g, és az ND és 532,50 µg/g értékek között volt. A *F. verticillioides* izolátumok esetében fumonizin B1 toxin termelődését figyeltük meg 14 napos tenyészetekben. A



szintek tartománya a nem detektálttól (ND) a 177,38 µg/g értékek között volt, ami alacsonyabb, mint a *F. proliferatum* izolátumoknál meghatározott FB1 toxin értékeknél. Az FB1 alacsony szintjét szintén detektáltuk a *F. cf. incarnatum* és *F. subglutinans* izolátumok esetében. A *F. verticillioides*, a *F. cf. incarnatum* és a *F. subglutinans* esetében FB2 és FB3 jelenlétét is detektáltuk, azonban ezek a mennyiségek értékhatár alatt maradtak.

A *F. graminearum* törzsekről kimutattuk, hogy B típusú trichotecéneket termelnek; a deoxinivalenolt (DON) és a 15-acetil-deoxinivalenolt (15ADON), melyek értéktartománya ND és 189,91 µg/g között volt. Hasonlóképpen a *F. cf. incarnatum* törzsek esetében nem tapasztaltunk TCTB toxinok termelődését. Az *F. sporotrichioides* izolátumokat A típusú trichotecén termelés szempontjából elemeztük; csak az egyik törzs termelt HT-2 és T-2 toxinokat.

### **3.4. Az *Aspergillus* izolátumok mikotoxin-termelésben szerepet játszó géneinek azonosítási eredményei**

Az *Aspergillus* izolátumok között jelentős különbségeket tapasztaltunk a mikotoxin termelésben szerepet játszó gének vizsgálata során. Két minta esetében kimutattuk valamennyi gén jelenlétét, azaz minden mikotoxin-termelést elősegítő génre pozitív eredményt kaptunk.

Az *aflD* gén jelenlétét 12 darab *Aspergillus flavus* és 1 darab *A. oryzae* izolátum esetében mutattuk ki. Az *aflM* gén jelenlétét 15 db *A. flavus* és a 2 db *A. oryzae* DNS-e esetében detektáltuk. Az *aflO* gén jelenlétét 19 db *A. flavus* és 1 db *A. oryzae* esetében detektáltuk a gélelektroforézis során. Az *aflP* gén esetében 12 db *A. flavus* és 1 db *A. oryzae* esetében tapasztaltuk a gén jelenlétét. Az *aflQ* aflatoxin-termeléssel összefüggésbe hozható gén jelenlétét az izolált gombák DNS-e esetében 9 darab *A. flavus* és 1 darab *A. oryzae* DNS-ében tapasztaltuk. Az *aflR* gén jelenlétét is detektáltuk, amely 15 darab *A.*

*flavus* és a 2 db *A. oryzae* minta esetében fordult elő. Az *aflS* gén jelenléte 12 darab *A. flavus* és 2 db *A. oryzae* esetében volt detektálható.

### **3.5. A szemes cirok minták tokoferol és antioxidáns összetétele**

A cirok gabonamintáinkban talált fő karotinoid- és tokoferolvegyületek a lutein és a zeaxantin, a  $\gamma$ -tokotrienol, a  $\gamma$ -tokoferol, az  $\alpha$ -tokotrienol, az  $\alpha$ -tokoferol és a  $\delta$ -tokotrienol voltak. A tokokromanolok teljes mennyisége az 1-es és 2-es genotípusban 23,87  $\mu\text{g/g}$  és 23,35  $\mu\text{g/g}$  volt, amely alapján kijelenthető, hogy a cirok szemtermések lipofil antioxidáns összetétele a két genotípus esetében 97,87% és 98,6%. A karotinoidok teljes mennyisége az 1-es és 2-es genotípusban 0,51  $\mu\text{g/g}$  és 0,43  $\mu\text{g/g}$  volt, amelyek a két genotípus lipofil antioxidánsainak 2,13%-a, illetve 1,84%-a. A lutein és a zeaxantin aránya a két különböző genotípusban közel hasonló volt. A két genotípus fő vegyületei az  $\alpha$ - és  $\gamma$ -tokoferol voltak.

### **3.6. Egyes lipofil antioxidánsok hatása a kiválasztott *Fusarium proliferatum* izolátum fumonizin termelésére**

A lutein (0,1 mM), zeaxantin (0,1 mM),  $\gamma$ -tokoferol (0,1 mM) és  $\alpha$ -tokoferol (0,1 mM) száraz biomasszára gyakorolt hatásának vizsgálata során megállapítottuk, hogy a zeaxantin nem volt statisztikailag szignifikáns hatással a fumonizinek bioszintézisére. A fent említett karotinoid összetétellel kiegészítve csökkenést állapítottunk meg a törzs fumonizin termelésében továbbá a lutein is csökkentette a fumonizin felhalmozódást, hiszen csak fumonizin részecskéket detektáltunk a toxinvizsgálatok során. Azonban a vizsgált antioxidánsok hatásait tekintve egy esetben sem tudtunk szignifikáns különbséget kimutatni. Az  $\alpha$ -tokoferol (0,1 mM) esetében a törzs fumonizin termelése 74,57% volt és a  $\gamma$ -tokoferol hatása a fumonizin bioszintézisére 3,34% volt. A száraz biomasszára gyakorolt hatás esetében a biomassza

mennyiségét csökkentette a  $\gamma$ -tokoferol és az  $\alpha$ -tokoferol, továbbá a lutein is, azonban ebben az esetben sem tudtunk kimutatni szignifikáns különbséget.

### **3.7. A szemes cirok minták mikotoxin-szennyezettségének vizsgálati eredményei**

A cirokszemek multimikotoxin-analízisének során a DON és T-2 toxinok nem voltak kimutathatók a mintákban. A minták 40%-ában beauvericint (BEA) detektáltunk. A fumonizin B1 esetében mindössze 5 mintában volt kimutatható, továbbá HT-2 és ZEA toxin szennyeződést 2 mintában mutattunk ki a szemtermésekből. Egy szemes cirok minta esetében mind a 4 detektált toxin jelen volt.

## 4. Következtetések és javaslatok

### 4.1. A szemtermések belső fertőzöttségének vizsgálata

Korábbi vizsgálatok kimutatták, hogy a szemes cirok terméséből izolált *Fusarium* fajok jelenléte világszerte gyakori (Zummo 1984; Summerell et al. 2003; Little et al. 2011; Astoreca et al. 2019), viszont hazánkban eddig nem történtek ilyen irányú vizsgálatok. Saját vizsgálataink eredményeképpen elmondható, hogy a minták nagy részében kimutattunk valamilyen mikotoxin-termelésre is képes gomba által okozott belső fertőzöttséget. A szemekből izolált gombák tiszta tenyészetének a *Fusarium* fajok voltak a dominánsak, azonban minden minta esetében jelentek meg *Aspergillus* és *Penicillium* fajok is. A belső szemfertőzöttséget egyes környezeti paraméterek is befolyásolhatják, mint például a termesztés technológia, biotikus tényezők, elővetemény. Az egyes *Fusarium* fajok bejutását a szemtermésbe az ún. penetrációs hifa is segítheti, továbbá a *F. graminearum* faj esetében 24 különböző sejtfalbontó enzimet különböztetnek meg, melyek közül a kutináz, lipázok és a pektinázok játszák a fő szerepet a szemtermések fertőzése során (Kikot et al. 2009). A 2022-es extrém aszályos időjárási viszonyok is közrejátszhattak a szemtermések belső fertőzöttségi értékeinek alakulásában.

### 4.2. Az izolált és azonosított mikotoxin-termelő gombák

Molekuláris genetikai vizsgálataink során 145 db *Fusarium* izolátumot azonosítottunk faj szinten. Hazai termesztési körülmények között ezidáig csupán a *F. verticillioides* fajt azonosították a cirok szárából (Szécsi et al. 2010). Ezzel ellentétben kísérleteink alapján arra a következtetésre jutottunk, hogy hazánkban számos *Fusarium* faj előfordul, nem csupán csak egy; cirok szemtermése esetében a *F. proliferatum* a leggyakrabban előforduló *Fusarium* faj, de mellette előfordul a *F. sporotrichioides*, *F. verticillioides*, *F. graminearum*, *F. thapsinum*, *F. cf. incarnatum*, *F. equiseti*, *F. avenaceum* és

*F. subglutinans*. Az azonosított *Fusarium* fajok közül az *F. thapsinum*, *F. cf. incarnatum* és az *F. equiseti* olyan fajok, amelyeket Magyarországon nem csak cirok, hanem termesztett gabona szemterméséből sem mutattak még ki. Az egyes *Fusarium* fajok dominancia viszonyai szempontjából, mint a dolgozat eredményei is alátámasztják a *F. proliferatum* faj dominált, azaz a *F. fujikuroi* betegségkomplex egyik tagja. Az összes azonosított fajt világszerte azonosították cirok szemterméséből, azonban cirok szemtermés esetében az *F. andiyazi* fajt is azonosították, amelyet kísérleteink során mi nem detektáltunk (Chala és mtsai, 2019; Corallo és mtsai, 2023; Bottalico és Perrone, 2002; Ferrigo és mtsai, 2022; Prom et al., 2021). Eredményeink összhangban állnak korábbi szemes cirokhoz kapcsolódó kutatásokkal (Kelly et al., 2016; Sharma et al., 2011).

Az *Aspergillus* fajok izolálása *A. flavus* és *A. oryzae* fajokat azonosítottunk; mindkét azonosított faj a *Flavi* szekcióba tartozik, mely szekció kiemelten fontos a mezőgazdaság, biotechnológia, humán- és állategészségügy szempontjából (Frisvad et al. 2018). Az *A. flavus* a mezőgazdasági növényeken gyakran előforduló faj, aflatoxin-termelő képessége miatt kiemelt veszélyt jelenthet az élelmezés és takarmányozás során (Palencia et al. 2010; Riba et al. 2010), hazai körülmények között mindezidáig kukorica szemterméséből azonosították (Baranyi et al. 2015; Tóth et al. 2012; Dobolyi et al. 2013; Sebők et al. 2016). Az *A. oryzae* fajt is számos esetben izolálták, azonban nem aflatoxinogén tulajdonságainak köszönhetően jelenléte biztonságosnak tekinthető. Azonban több kutatás szerint is az *Aspergillus* fajok egyre nagyobb arányú megjelenésére lehet számítani az extrém aszályos időjárás következményeképpen a szemtermésekben (Battilani et al. 2012), amire kutatási eredményeink is egyértelműen rámutatnak, ahogyan annak veszélyeire is (potenciális mikotoxin szennyezettség).

A *Penicillium* fajok molekuláris genetikai vizsgálatai során *P. rubens*, *P. chrysogenum*, *P. polonicum*, *P. hordei*, *P. crustosum*, *P. allii* fajokat azonosítottunk. A *P. rubens* és *P. chrysogenum* fajt számos esetben hazai körülmények között is izolálták kukorica szemtermésről, továbbá egyes gyümölcsök esetében ehhez kapcsolódóan a *P. chrysogenum* antifungális proteinjének vizsgálatait is elvégezték. A PAF (*Penicillium* Antifungal Protein) hatással lehet fonalas gombákra, élesztőgombákra és baktériumokra is. A PAF egy gombaellenes fehérje, amely ROS-közvetített apoptotikus sejthalált vált ki *Fusarium* és *Aspergillus* fajok esetében (Kovács et al. 2014; Galgóczy et al. 2013). Ezen tények ismeretében valószínűsíthető, hogy azon származási helyekről (SN10, SL10, SL6) amelyek szemterméseiről a *P. chrysogenum* fajokat izoláltuk sokkal kisebb számban voltak jelen az *Aspergillus* és *Fusarium* fajok (Delgado et al. 2015; Martínez-Culebras et al. 2021). A fajokat számos esetben izolálták cirok szemterméséből világszerte is (Vankudoth et al. 2015; Gupta 1996).

#### **4.3. Az azonosított *Fusarium* fajok makro- és mikromorfológiai vizsgálata**

Az azonosított 9 *Fusarium* faj esetében a makro- és mikromorfológiai vizsgálatok során megállapítottuk, hogy az általunk kimutatott és azonosított fajok az adott fajra jellegzetes tulajdonságokkal rendelkeznek (Leslie és Summerell 2006).

#### **4.4. A vizsgált *Fusarium* fajok mikotoxin-termelőképesége**

A *Fusarium* fajok mikotoxin-termelésének mértéke a fajok között és fajon belül is változhat (Crous et al. 2021). A fumonizinek (FB-k) a *F. verticillioides* által termelt fő mikotoxinok. Korábban kimutatták, hogy az *F. proliferatum* fajok különböző mennyiségű FB1, FB2 és FB3 toxint képesek termelni (Corallo et al. 2023), amelyeket különböző genotípusú cirokokból

izoláltak. A *F. subglutinans* fumonizin termeléséről szóló kutatási eredmények eltérőek, néhány esetben tapasztaltak fumonizin termelést a *F. subglutinans* faj esetében is (Stępień et al. 2013; Wang et al. 2014; Fumero et al. 2015). A szakirodalom szerint az *F. subglutinans* törzsből hiányoznak a fumonizin bioszintéziséhez szükséges *Fum* gének (Fumero et al. 2020). A vizsgálatunkban azonosított *F. subglutinans* faj kis mennyiségű FB1 toxint volt képes szintetizálni, tehát a vizsgált izolátum valószínűleg rendelkezett *Fum* génnel.

*F. cf. incarnatum* a *Fusarium incarnatum-equiseti* fajkomplex (FIESC) egyik tagja, amely képes fumonizineket és B típusú trichotecéneket is termelni (Villani et al. 2016; Villani et al. 2019). Vizsgálatunkban az izolált *F. cf. incarnatum* izolátumok kis mennyiségű FB1 és FB3 toxin termelésére képesek. A *F. cf. incarnatum* rendelkezik különböző szabályozó génekkel, amelyek a B típusú trichotecének termelődéséért felelnek, mint például a *tri5*, *tri4*, *tri13* és *tri7* gének, továbbá rendelkezik a fumonizin termelésért felelős génekkel is, mint a *tri3* és *tri11*, fontos kiemelni, hogy a *tri4* és *tri5* gének a fumonizin bioszintézisben is részt vesznek (Desjardins 2006).

Corallo és mtsai. (2023) szemes cirok szemterméséből azonosított *F. graminearum* izolátumai nagyrészt zearalenon (ZEA) és deoxinivalenol (DON) toxinokat, illetve néhány esetben nivalenolt (NIV) is termelt. A szakirodalommal ellentétben a kiválasztott *F. graminearum* izolátumaink nagy mennyiségű 15ADON és DON toxint termeltek, azonban kísérleteink során nem tapasztaltuk ZEA szintézisét az adott izolátumoknak, amely feltételezhetően a *zeb1* gén hiányát jelezheti (Alexander et al. 2003).

Edwards et al. (2012) szerint a *F. sporotrichioides* jellemzően A típusú trichotecéneket (TCTA), például HT-2 és T-2 toxinokat termel, ezzel

párhuzamosan az általunk azonosított *F. sporotrichioides* izolátum képes volt HT-2 és T-2 toxin termelésére is.

#### **4.5. Az izolált *Aspergillus* fajok aflatoxin-termeléssel összefüggésbe hozható génjeinek vizsgálata**

Gallo és munkatársai által végzett 2012-es kísérletben az *aflQ* gént a nem aflatoxinogén izolátumok esetében tudták nagy számban kimutatni. Az *aflQ* gént az általunk vizsgált minták esetében 10 alkalommal amplifikáltuk, ez arra enged következtetni, hogy a 10 darab *Aspergillus* faj feltehetően inkább a Gallo és mtsai 2012-es kutatásában a nem aflatoxinogénnek tartott csoportba tartozik. Mivel azonban egyetlen gén jelenléte vagy hiánya nem határozza megegyértelműen a mikotoxin-termelő képességet, így fontos a többi vizsgált gén eredményeinek értékelése is.

Az *aflR* és *aflS* gének esetében bizonyították legtöbbször a gének jelenlétének és az aflatoxin-termelőképeség szoros korrelációját (Degola et al. 2007; Gallo et al. 2012). Így a saját mintáink esetében ezen gének jelenléte valószínűsíti az aflatoxin termelőképeséget.

#### **4.6. A lipofil antioxidánsok hatásai az egyes *Fusarium* fajok mikotoxin-termelésére**

A cirok szemtermés mintáinkban található fő karotinoid és tokoferol vegyületek a lutein és zeaxantin,  $\gamma$ -tokotrienol,  $\gamma$ -tokoferol,  $\alpha$ -tokotrienol,  $\alpha$ -tokoferol és  $\delta$ -tokotrienol. A cirokszemekben a tokoferolok fő összetétele a  $\gamma$ -tokoferol és az  $\alpha$ -tokoferol; karotinoidokból luteint és zeaxantint tartalmaz. Számos tanulmány bizonyítja, hogy a cirok karotinoidokat és tokokromanolokat (tokoferolokat és tokotrienolokat) tartalmaz (Shahidi és Costa de Camargo 2016; Elvira-Torales et al. 2019). A szemes cirok mintákban lévő karotinoidok és tokokromanolok összetételére vonatkozó



ismeretek azonban továbbra is korlátozottak, és az eredmények többnyire a félszáraz területeken termesztett cirokfajtákhoz kapcsolódnak (Kean et al. 2007; de Morais Cardoso et al. 2015; Mawouma et al. 2022). A fent említett vizsgálatok azt mutatták, hogy a xantofilok (lutein és zeaxantin) és a tokoferolok voltak a domináns vegyületek a karotinoid és a tokokromanol családon belül.

A  $\gamma$ -tokoferolt, az  $\alpha$ -tokoferolt, a luteint és a zeaxantint 0,1 mM koncentrációban vizsgáltuk a *F. proliferatum* I58 törzs fumonizin termelésére és száraz biomasszájára gyakorolt hatásért. A lipofil antioxidánsok hatása az antioxidáns típusától függött. Ebben a vizsgálatban 0,1 mM lutein csökkentette az I58 törzs fumonizin termelését. Más tanulmányok az  $\alpha$ -tokoferol, a lutein, a zeaxantin, a  $\beta$ -karotin és a ferulinsav hatását vizsgálták a *F. verticillioides* fumonizin termelésére és a száraz biomasszára gyakorolt hatásával együtt (Picot et al. 2013). Ebben a vizsgálatban a lutein jelentősen csökkentette a fumonizin felhalmozódását. Vizsgálataink során az antioxidánsok fumonizin bioszintézisre gyakorolt hatása esetében szignifikáns különbségeket nem tudtunk kimutatni. Mindazonáltal, amint Savignac és munkatársai (2022, 2023) részletezik, erős érvek szólnak amellett, hogy ezek a vegyületek potenciálisan kulcsfontosságú szerepet játszanak a növényvédelemben: figyelembe véve a ROS által kiváltott oxidatív stressz enyhítésére való képességüket, a növényi hormonok jelátvitelét zavaró képességüket, valamint a gombák növekedését és a mikotoxin szennyezettséget csökkentő képességüket. Az  $\alpha$ - és  $\gamma$ -tokoferol, valamint a lutein és a zeaxantin *F. proliferatum* elleni bioaktivitásának értékelése során a *Fusarium* fajoktól és a lipofil antioxidánsoktól függetlenül nem észleltünk gomba növekedési gátlást. Emellett az FB-hozam csökkenése csak a lutein esetében volt megfigyelhető. A lutein FB bioszintézisének gátló hatásáról már korábban is beszámoltak (Picot et al. 2013). Ez a gátló hatás összefüggésbe

hozható a lutein és a zeaxantin oxidatív stressz enyhítő képességével, amelyről kimutatták, hogy serkentik a különböző mikotoxinok bioszintézisét (Montibus et al. 2015). A szintén erős antioxidáns vegyületekként elismert tokokromanolok hatásának hiánya (Elvira-Torales et al. 2019) azonban egyértelműen a karotinoidok bioaktivitásának háttérében álló további mechanizmusok előfordulását jelzi.

#### **4.7. A szemes cirok minták mikotoxin-szennyezettségének vizsgálata**

A mikotoxin-szennyezettség vizsgálatai során a szemes cirok minták 40%-a volt szennyezett beauvericinnel (BEA). A BEA-t termelő *Fusarium* fajok a következők: *F. sambucinum*, *F. acuminatum*, *F. oxysporum*, *F. poae*, *F. equiseti*, *F. avenaceum* (Munkvold et al. 1998). Mindazonáltal korábbi tanulmányok arról számoltak be, hogy a *F. proliferatum* és a *F. subglutinans* is képes BEA-t termelni (Logrieco és mtsai, 1993; Plattner et al., 1994; Moretti és mtsai, 1996). A BEA a mikotoxinok „új” csoportjába, az úgynevezett feltörekvő („emerging”) mikotoxinok közé tartozik. Néhány mintában fumonizin B1, HT-2 és zearalenon szennyeződést mutattunk ki. A *Fusarium* fajok jelenléte a cirokszemekben óriási kockázatot jelent az élelmiszer- és takarmánybiztonságra a jelen fajok mikotoxinogén potenciálja miatt. A HT-2 és T-2 toxinok szennyezettségével kapcsolatban az Európai Bizottság indikatív határértéket határozott meg (EU 2013/165).

## 5. Új tudományos eredmények

1. Hazai termesztési területekről származó szemes cirok szemterméseken bizonyítottuk a mikotoxin termelésre is képes penészgombák jelenlétét szelektív táptalajt használva laboratóriumi körülmények között, amelyek során molekuláris genetikai módszerekkel azonosítottunk és génbankban deponáltunk:
  - i. kilenc *Fusarium* fajt: *F. proliferatum*, *F. verticillioides*, *F. subglutinans*, *F. cf. incarnatum*, *F. equiseti*, *F. graminearum*, *F. thapsinum*, *F. sporotrichioides*, *F. avenaceum*,
  - ii. két *Aspergillus* fajt: *A. flavus*, *A. oryzae*,
  - iii. hat *Penicillium* fajt: *P. chrysogenum*, *P. rubens*, *P. allii*, *P. hordei*, *P. polonicum* és *P. crustosum*.
2. A szemes cirok szemtermésekről elsőként izoláltuk hazánkban a *F. cf. incarnatum*, *F. equiseti*, *F. thapsinum* kórokozókat, amit molekuláris genetikai módszerrel is alátámasztottunk. Az említett *Fusarium* fajokat más gabonanövényekről sem azonosították még hazánkban.
3. Megállapítottuk, hogy hazánkban a *F. proliferatum* faj a domináns *Fusarium* faj a termesztett szemes cirok szemterméseiben.
4. Megállapítottuk, hogy a magyarországi termőhelyről izolált *Fusarium* fajok a cirok szemtermésben is képesek A és B típusú trichotecének és fumonizinek (B1, B2, B3) termelésére.
5. Megállapítottuk, hogy a magyarországi szemes cirok szemtermésekben jelen vannak a beauvericin, fumonizin B1, HT-2 toxin és zearalenon mikotoxinok. Külön kiemelendő, ez az első vizsgálat, ami hazai termőhelyről származó gabonaféle szemtermése esetében a beauvericin, mint feltörekvő mikotoxin jelenlétét igazolta.
6. Megállapítottuk, hogy lipofil antioxidánsok termelésére nagy mértékben képes a szemes cirok, ezen lipofil antioxidánsok a a lutein és a zeaxantin,

a  $\gamma$ -tokotrienol, a  $\gamma$ -tokoferol, az  $\alpha$ -tokotrienol, az  $\alpha$ -tokoferol és a  $\delta$ -tokotrienol. Ehhez hasonló kutatási eredmény szemes cirok esetében még nem készült európai viszonylatban.

7. Megállapítottuk, hogy a lutein, mint lipofil antioxidáns a *F. proliferatum* faj fumonizin bioszintézisére negatív hatással van.

## 6. Irodalomjegyzék

1. Alexander, N.J., Proctor, R.H., McCormick, S.P. (2009): Genes, gene clusters, and biosynthesis of trichothecenes and fumonisins in *Fusarium*. *Toxin Reviews*, 28 (3) 198-215.p.
2. Astoreca, A.L., Emateguy, L.G., and Alconada, T.M. (2019): Fungal Contamination and Mycotoxins Associated with Sorghum Crop: Relevance Today. *European Journal of Plant Pathology*. 155 381-392. p.
3. Baranyi, N., Despot, D. J., Palágyi, A., Kiss, N., Kocsubé, S., Szekeres, A., Kecskeméti, A., Bencsik, O., Vagvölgyi, C., Segvic Klaric, M., Varga, J. (2015): Identification of *Aspergillus* species in Central Europe able to produce G-type aflatoxins. *Acta Biologica Hungarica*, 66 339-347. p.
4. Battilani, P., Rossi, V., Giorni, P., Pietri, A., Gualla, A., Van der Fels-Klerx, H. J., Booji, A., Moretti, A., Logrieco, A., Miglietta, F., Toscano, P., Miraglia, M., De Santis, B., Brera, C. (2012): Modelling, predicting and mapping the emergence of aflatoxins in cereals in the EU due to climate change. *EFSA Supporting Publications*, 9 (1) 223E.
5. Bottalico, A., Perrone, G. (2002): Toxigenic *Fusarium* species and mycotoxins associated with head blight in small-grain cereals in Europe. *European Journal of Plant Pathology*, 108 611-624.p.
6. Boutigny, A-L., Barreau, C., Atanasova-Penichon, V., Verdal-Bonnin, M-N., Pinson-Gadais, L., Richard-Forget, F. (2009): Ferulic acid, an efficient inhibitor of type B trichothecene biosynthesis and Tri gene expression in *Fusarium* liquid cultures. *Mycological Research*, 113 (6-7) 746–753. p.
7. Chala, A., Degefu, T., Brurberg, M. B. (2019): Phylogenetically diverse *Fusarium* species associated with sorghum (*Sorghum bicolor* L. Moench) and finger millet (*Eleusine coracana* L. Garten) grains from Ethiopia. *Diversity*, 11 (6) 93.p.

8. Corallo, A.B., Del Palacio, A., Oliver, M., Tiscornia, S., Simoens, M., Cea, J., de Aurrecochea, I., Martínez, I., Sanchez, A., Stewart, S., Pan, D. (2023): *Fusarium* Species and Mycotoxins Associated with Sorghum Grains in Uruguay. *Toxins*, 15 (8) 484. p.
9. Crous, P.W., Lombard, L., Sandoval-Denis, M., Seifert, K.A., Schroers, H-J., Chaverri, P., Gené, J., Guarro, J., Hirooka, Y., Bensch, K., Kema, G.H.J., Lamprecht, S.C., Cai, L., Rossman, A.Y., Stadler, M., Summerrbell, R.C., Taylor, J.W., Ploch, S., Visagie, C.M., Yilmaz, N., Thines, M. (2021): *Fusarium*: more than a node or a foot-shaped basal cell. *Studies in Mycology*, 98 1-184. p.
10. de Morais Cardoso, L., Pinheiro, S.S., da Silva, L.L., de Menezes, C.B., de Carvalho, C.W.P., Tardin, F.D., Vieira Queiroz, V.A., Duarte Martino, H.S., Pinheiro-Sant'Ana, H.M. (2015): Tocochochromanols and carotenoids in sorghum (*Sorghum bicolor* L.): Diversity and stability to the heat treatment. *Food Chemistry*, 172 900-908. p.
11. Degola, F., Berni, E., Dall'Asta, C., Spotti, E., Marchelli, R., Ferrero, I., Restivo, F.M. (2007): A multiplex RT-PCR approach to detect aflatoxigenic strains of *Aspergillus flavus*. *Journal of Applied Microbiology*, 103 (2) 409–417. p.
12. Delgado, J., Owens, R. A., Doyle, S., Asensio, M. A., & Núñez, F. (2015): Impact of the antifungal protein PgAFP from *Penicillium chrysogenum* on the protein profile in *Aspergillus flavus*. *Applied Microbiology and biotechnology*, 99 (20) 8701-8715. p.
13. Desjardins, A.E. (2006): *Fusarium* mycotoxins, chemistry, genetics, and biology. *American Phytopathological Society APS Press*, St. Paul Minnesota, USA. 260. p.
14. Dobolyi, C. S., Sebők, F., Varga, J., Kocsubé, S., Szigeti, G., Baranyi, N., Szécsi, Á., Tóth, B., Varga, M., Kriszt, B., Szoboszlay, S., Krifaton, C.,

Kukolya, J. (2013): Occurrence of aflatoxin producing *Aspergillus flavus* isolates in maize kernel in Hungary. *Acta Alimentaria*, 42 (3) 451-459. p.

15. EC 1881/2006 – Commission Regulation – setting maximum levels for certain contaminants in foodstuffs.

16. Edwards, S.G., Imathiu, S.M., Ray, R.V., Back, M., Hare, M.C. (2012): Molecular studies to identify the *Fusarium* species responsible for HT-2 and T-2 mycotoxins in UK oats. *International Journal of Food Microbiology*, 156 (2) 168-175.p.

17. Elvira-Torales, L.I., García-Alonso, J., and Periago-Castón, M.J. (2019): Nutritional Importance of Carotenoids and Their Effect on Liver Health: A Review. *Antioxidants*, 8 (229) 1-23. p.

18. FAOSTAT (2023): Food and Agriculture Organization of the United Nations – Food and agriculture data

19. Ferrigo, D., Mondin, M., & Raiola, A. (2022): Pathogenic and Genetic Characterization of *Fusarium verticillioides* Strains Collected from Maize and Sorghum Kernels. *Agriculture*, 13 (1) 105. p.

20. Frisvad, J., Hubka, V., Ezekiel, C., Hong, S.-B., Nováková, A., Chen, A., Arzanlou, M., Larsen, T., Sklenář, F., Mahakarnchanakul, W. (2018): Taxonomy of *Aspergillus* section *Flavi* and their production of aflatoxins, ochratoxins and other mycotoxins. *Studies in Mycology*, 93 (1) 1–63. p.

21. Fumero, M. V., Villani, A., Susca, A., Haidukowski, M., Cimmarusti, M. T., Toomajian, C., Leslie, J.F., Chulze, S.N., Moretti, A. (2020): Fumonisin and beauvericin chemotypes and genotypes of the sister species *Fusarium subglutinans* and *Fusarium temperatum*. *Applied and Environmental Microbiology*, 86 (13) e00133-20.

22. Fumero, M.V., Reynoso, M.M., Chulze, S. (2015): *Fusarium temperatum* and *Fusarium subglutinans* isolated from maize in Argentina. *International Journal of Food Microbiology*, 199 86-92.p.

23. Galgóczy, L., Virágh, M., Kovács, L., Tóth, B., Papp, T., & Vágvölgyi, C. (2013): Antifungal peptides homologous to the *Penicillium chrysogenum* antifungal protein (PAF) are widespread among Fusaria. *Peptides*, 39, 131-137. p.
24. Gallo, A., Stea, G., Battilani, P.F., Logrieco, A., Perrone, G. (2012): Molecular characterization of an *Aspergillus flavus* population isolated from maize during the first outbreak of aflatoxin contamination in Italy. *Phytopathologia Mediterranea*, 51 (1) 198–206. p.
25. Geiser, D.M., del Mar Jiménez-Gasco, M., Kang, S., Makalowska, I., Veeraraghavan, N., Ward, T.J., Zhang, N., Kuldau, G.A., O'Donnell, K. (2004): FUSARIUM-ID v 1.0.: A DNA sequence database for identifying Fusarium. *European Journal of Plant Pathology*, 110: 473-479.
26. Kean, E.G., Ejeta, G., Hamaker, B.R. and Ferruzzi, M. (2007): Characterization of Carotenoid Pigments in Mature and Developing Kernels of Selected Yellow-Endosperm Sorghum Varieties. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 55 (7) 2619-2626. p.
27. Kelly, A., Proctor, R.H., Belzile, F., Chulze, S.N., Clear, R.M., Cowger, C., Elmer, W., Lee, T., Obanor, F., Waalwijk, C. (2016): The geographic distribution and complex evolutionary history of the NX-2 trichothecene chemotype from *Fusarium graminearum*. *Fungal Genetics and Biology*, 95 39–48. p.
28. Kikot, G.E., Hours, R.A., Alconada, T.M. (2009): Contribution of cell wall degrading enzymes to pathogenesis of *Fusarium graminearum*: a review. *Journal of basic microbiology*, 49 (3) 231-241.p.
29. Kovács, B., Hegedűs, N., Bálint, M., Szabó, Z., Emri, T., Kiss, G., Antal, M., Pócsi, I., Leiter, É. (2014): *Penicillium* antifungal protein (PAF) is involved in the apoptotic and autophagic processes of the producer



*Penicillium chrysogenum*. *Acta Microbiologica et Immunologica Hungarica*, 61 (3) 379-388. p.

30. Leslie, J.F., Summerell, B.A. (2006): *The Fusarium Laboratory Manual*. Blackwell Publishing, Oxford, UK. 388. p.

31. Little, C. R., Perumal, R., Tesso, T. T., Prom, L. K., Odvody, G. N., Magill, C. W. (2011): Sorghum pathology and biotechnology-A fungal disease perspective: part I. Grain mold, head smut, and ergot. *European Journal of Plant Science and Biotechnology*, 6 (Special Issue 1) 10-30. p.

32. Logrieco, A., Moretti, A., Ritieni, A., Chelkowski, J., Altomare, C., Bottalico, A., Randazzo, G. (1993): Natural occurrence of beauvericin in preharvest *Fusarium subglutinans* infected corn ears in Poland. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 41 (11) 2149-2152.p.

33. Lux, P.E., Freiling, M., Stuetz, W., von Tucher, S., Carle, R., Steingass, C.B., Frank, J. (2020): (Poly) phenols, carotenoids, and tocochromanols in corn (*Zea mays* L.) kernels as affected by phosphate fertilization and sowing time. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 68 (2) 612-622.p.

34. Martínez-Culebras, P.V., Gandía, M., Boronat, A., Marcos, J.F., Manzanares, P. (2021): Differential susceptibility of mycotoxin-producing fungi to distinct antifungal proteins (AFPs). *Food Microbiology*, 97 103760.p.

35. Mawouma, S., Condurache, N.N., Turturică, M., Constantin, O.E., Croitoru, C., Rapeanu, G. (2022): Chemical composition and antioxidant profile of sorghum (*sorghum bicolor* (L.) moench) and pearl millet (*Pennisetum glaucum* (L.) R. Br.) grains cultivated in the far-North region of Cameroon. *Foods*, 11 (14) 2026. p.

36. Montibus, M., Pinson-Gadais, L., Richard-Forget, F., Barreau, C., Ponts, N. (2015): Coupling of transcriptional response to oxidative stress and

secondary metabolism regulation in filamentous fungi. *Critical reviews in microbiology*, 41 (3) 295-308. p.

37. Montibus, M., Vitrac, X., Coma, V., Loron, A., Pinson-Gadais, L., Ferrer, N., Verdal-Bonnin, M.N., Gabaston, J., Waffo-Téguo, P., Richard-Forget, F., Atanasova, V. (2021): Screening of wood/forest and vine by-products as sources of new drugs for sustainable strategies to control *Fusarium graminearum* and the production of mycotoxins. *Molecules*, 26(2), 405.p.

38. Moretti, A., Logrieco, A., Bottalico, A., Ritieni, A., Fogliano, V., Randazzo, G. (1996): Diversity in beauvericin and fusaproliferin production by different populations of *Gibberella fujikuroi* (*Fusarium* section *Liseola*). *Sydowia*, 48 (1) 44–56.p.

39. Munkvold, G., Stahr, H.M., Logrieco, A., Moretti, A., Ritieni, A. (1998): Occurrence of fusaproliferin and beauvericin in *Fusarium* contaminated livestock feed in Iowa. *Applied Environmental Microbiology*, 64 (10) 3923–3926. p.

40. Palencia, E.R., Hinto, D.M., Bacon, C.W. (2010): The black *Aspergillus* species of maize and peanuts and their potential for mycotoxin production, *Toxins*, 2 (4) 399-416. p.

41. Picot, A., Atanasova-Pénichon, V., Pons, S., Marchegay, G., Barreau, C., Pinson-Gadais, L., Roucolle, J., Daveau, F., Caron, D., Richard-Forget, F. (2013): Maize Kernel Antioxidants and Their Potential Involvement in *Fusarium* Ear Rot Resistance. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 61 (14) 3389-3395. p.

42. Plattner, R.D., Nelson, P.E. (1994): Production of beauvericin by a strain of *Fusarium proliferatum* isolated from corn fodder for swine. *Applied and Environmental Microbiology*, 60 (10) 3894-3896.p.

43. Prom, L.K., Isakeit, T. (2021): Diversity and frequency of fungal genera from sorghum lines inoculated with *Alternaria alternata* alone and in

combination with *Curvularia lunata* and *Fusarium thapsinum* in a field infected with anthracnose. *Journal of Agricultural and Crop Research*, 9 (11) 264-267.p.

44. Riba, A., Bouras, N., Mokrane, S., Mathieu, F., Lebrihi, A., Sabaou, N. (2010): *Aspergillus* section *Flavi* and aflatoxins in Algerian wheat and derived products. *Food and Chemical Toxicology*, 48 (10) 2772-2777.p.

45. Savignac, J. M., Atanasova, V., Chereau, S., Ducos, C., Gallegos, N., Ortega, V., Ponts, N., Richard-Forget, F. (2023): Carotenoids Occurring in Maize Affect the Redox Homeostasis of *Fusarium graminearum* and Its Production of Type B Trichothecene Mycotoxins: New Insights Supporting Their Role in Maize Resistance to *Giberella* Ear Rot. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 71 (7) 3285-3296. p.

46. Savignac, J.M., Atanasova, V., Chéreau, S., Ortéga, V., Richard-Forget, F. (2022): Role of tocochromanols in tolerance of cereals to biotic stresses: Specific focus on pathogenic and toxigenic fungal species. *International Journal of Molecular Sciences*, 23 (16) 9303. p.

47. Sebők, F., Dobolyi, C., Zágoni, D., Risa, A., Krifaton, C., Hartman, M., Cserhádi, M., Szoboszlai, S., Kriszt, B. (2016): Aflatoxigenic *Aspergillus flavus* and *Aspergillus parasiticus* strains in Hungarian maize fields. *Acta Microbiologica et Immunologica Hungarica*, 63 (4) 491-502. p.

48. Shahidi, F., Costa de Camargo, A. (2016): Tocopherols and Tocotrienols in Common and Emerging Dietary Sources: Occurance, Applications, and Health Benefits. *International Journal of Molecular Sciences*, 17 (1745) 1-29. p.

49. Sharma, R., Thakur, R.P., Senthilvel, S., Nayak, S., Reddy, S.V., Rao, V.P., Varshney, R.K. (2011): Identification and characterization of toxigenic *Fusaria* associated with sorghum grain mold complex in India. *Mycopathologia*, 171 223-230.p.

50. SORGHUM ID (2022): európai, szakmaközi círokszervezet. <https://www.sorghum-id.com/hu/fooldal/> (Megtekintés időpontja: 2022. február 22.)
51. Stępień, Ł. (2014): The use of *Fusarium* secondary metabolite biosynthetic genes in chemotypic and phylogenetic studies. *Critical Reviews in Microbiology*, 40 (2) 176–185. p.
52. Summerell, B. A., Salleh, B., Leslie, J. F. (2003): A utilitarian approach to *Fusarium* identification. *Plant disease*, 87 (2) 117-128. p.
53. Szécsi, Á., Szekeres, A., Bartók, T., Oros, G., Bartók, M. Mesterházy, Á. (2010): Fumonisin B1-4 producing capacity of Hungarian *Fusarium verticillioides* isolates. *World Mycotoxin Journal*, 3 (1) 67-76. p.
54. Tóth, B., Török, O., Kótai, É., Varga, M., Toldiné Tóth, É., Pálfi, X., Háfra, E., Varga, J., Mesterházy, Á. (2012): Role of *Aspergilli* and *Penicillia* in mycotoxin contamination of maize in Hungary. *Acta Agronomica Hungarica*, 60 (2) 143-149. p.
55. Vankudoth, K. R., Sivadeveuni, G., & Reddy, S. M. (2015): Influence of different species of *Penicillium* and their culture filtrates on seed germination and seedling growth of sorghum. *Journal of Biochemical Technology*, 5 (4) 832-837. p.
56. Varga, E., Fodor, P., Sörös, Cs. (2021): Multi-mycotoxin LC-MS/MS method validation and its application to fifty-four wheat flours in Hungary. *Food Additives and Contaminants: Part A*, 38 (4) 670-680. p.
57. Villani, A., Moretti, A., De Saeger, S., Han, Z., Di Mavungu, J.D., Soares, C.M., Proctor, R.H., Venancio, A., Lima, N., Stea, G., Pciolla, C., Logrieco, A.F., Susca, A. (2016): A polyphasic approach for characterization of a collection of cereal isolates of the *Fusarium incarnatum-equiseti* species complex. *International Journal of Food Microbiology*, 234 24-35.p.

58. Villani, A., Proctor, R.H., Kim, H.S., Brown, D.W., Logrieco, A.F., Amatulli, M.T., Moretti, A., Susca, A. (2019): Variation in secondary metabolite production potential in the *Fusarium incarnatum-equiseti* species complex revealed by comparative analysis of 13 genomes. *BMC Genomics*, 20 1-22.p.
59. Wang Y., Zheng W., Bian X., Yuan Y., Gu J., Liu X., Liu Z., Bian J. (2014): Zearalenone induces apoptosis and cytoprotective autophagy in primary Leydig cells, *Toxicology Letters*, 226 (2) 182-191. p.
60. Yu J., Chang, P.K., Ehrlich, K.C., Cary, J.W., Bhatnagar, D., Cleveland, T.E., Payne, G.A., Linz, J.E., Woloshuk C.P., Bennett, J.W. (2004): Clustered pathway genes in aflatoxin biosynthesis. *Applied and Environmental Microbiology*, 70 1253-1262.p.
61. Zummo, N. (1984): Sorghum diseases in western Africa. Washington DC 20250. USA, USDA, USAID 32.p.

## **7. A szerzőnek az értekezés témaköréhez kapcsolódó publikációi**

### **Lektorált publikációk:**

**Szabó B.**, Fejős A., Pálinkás Z., Turóczi Gy., Körösi K. (2020): Cirok szemtermésén megjelenő mikotoxin termelő gombák. *Növényvédelem* (81):9. 398-404. p.

**Szabó, B.K.**, Molnár, K.D., Vlaskality, S.D., Körösi, K. (2023): Occuring Fusarium spp. in sorghum (*Sorghum bicolor* L. Moench) grains. *Acta Phytopathologica et Entomologica Hungarica*, Volume: 58, Issue: 2, doi: <https://doi.org/10.1556/038.2023.00168>

**Szabó, B.K.**, Körösi, K. (2024): Storage mycotoxin producing fungi in Hungarian sorghum (*Sorghum bicolor* L. Moench) samples – molecular approach of Fusarium spp. *Journal of Plant Pathology* – (IF: 2,64) doi: <https://doi.org/10.1007/s42161-024-01624-0>

### **Lektorált publikáció – döntés alatt**

**Szabó, B.K.**, Atanasova, V., Ducos, C., Kismányoky, A., Pinson-Gadais, L., Ponts, N., Savignac, J-M., Körösi, K., Richard-Forget, F. (2024): Potential health risk related to the occurrence of toxigenic Fusarium species in sorghum (*Sorghum bicolor* L. Moench) cultivated in Hungary – benyújtva: 2024. január 31.; Under revision

### **Tudományos konferenciák – előadások, poszterek, absztraktok:**

**Szabó B.**, Bozóki B., Körösi K. (2021): Potenciális mikotoxin termelő gombanemzetségek gyakorisága cirok szemtermésén. 67. Növényvédelmi Tudományos Napok, Budapest February 2021, Növénykórtan szekció, absztrakt

Bozóki, B., **Szabó, B.** Körösi, K. (2022): Szemes- és silócirkon megjelenő mikotoxin-termelő gombák, valamint egyes Fusarium fajok patogenitásának vizsgálata. EFOP-3.6.3.-VEKOP-16-2017-00008 Szerk: Pepó Péter, Debrecen 2022

**Szabó, B.K.**, Kiss, J., Molnár, K., Körösi, K. (2022): The case of sorghum and its phytosanitary aspects in Hungary. European Scientific Conference: Towards Pesticide Free Agriculture. 2-3. June 2022. France, Dijon (poster)

**Szabó, B.K.**, Körösi, K. (2024): Naturally occurring Aspergillus species and their mycotoxigenic potential from Hungarian sorghum (*Sorghum bicolor* L. Moench) kernels. Georgikon for Agriculture – poszter – XXXIII. Keszthelyi Növényvédelmi Fórum