



SZEGEDI TUDOMÁNYEGYETEM

Kukorica genotípusok ellenállóságának vizsgálata toxikus *Fusarium* és *Aspergillus* gomba fajokkal szemben és ezek takarmány- és élelmiszerbiztonságra gyakorolt hatása

Doktori (PhD) értekezés

Készítette:

Szabó Balázs

Szeged

2022

Doktori iskola: **Biológia Doktori Iskola**

Vezetője: Prof. Dr. Vágvölgyi Csaba, Tanszékvezető Egyetemi tanár
SZTE TTIK, Mikrobiológiai Tanszék

Tudományága: Biológiai Tudományok

Témavezetők: Dr. Tóth Beáta, Kutatási igazgató, Tudományos
főmunkatárs, Növénykórtani és Multirezisztencia
csoportvezető,
Gabonakutató Nonprofit Közhasznú Kft.

Prof. Dr. Mesterházy Ákos, Tudományos
tanácsadó, az MTA rendes tagja
Gabonakutató Nonprofit Közhasznú Kft.

.....
Dr. Tóth Beáta
Témavezető

.....
Prof. Dr. Mesterházy Ákos
Témavezető

.....
Prof. Dr. Vágvölgyi Csaba
Biológia Doktori Iskola vezetője

TARTALOMJEGYZÉK

TARTALOMJEGYZÉK	3
ALKALMAZOTT RÖVIDÍTÉSEK	6
1. BEVEZETÉS ÉS CÉLKITŰZÉSEK	7
2. IRODALMI ÁTTEKINTÉS	9
2.1. A kukorica gazdasági jelentősége	9
2.2. A kukorica toxintermelő gombák okozta megbetegedéseinek okai és a kórokozók előfordulása	11
2.3. A <i>Fusarium</i> nemzetség általános áttekintése	15
2.3.1. <i>Fusarium culmorum</i>	16
2.3.2. <i>Fusarium graminearum</i>	18
2.3.3. <i>Fusarium verticillioides</i>	19
2.4. Az <i>Aspergillus</i> nemzetség és az <i>A. flavus</i>	21
2.5. Mikotoxinok	23
2.5.1. Trichotecének	23
2.5.2. Zearalenon	25
2.5.3. Fumonizinek	25
2.5.4. Aflatoxin	27
2.5.5. A mikotoxin koncentrációkra vonatkozó szabályozások és határértékek.....	29
2.6. A csőpenészekkel szembeni rezisztencia vizsgálatok során alkalmazott mesterséges inokulációs módszerek	30
2.7. A csőpenészt okozó kórokozókkal szembeni ellenállóság genetikai háttéré	33
2.7.1. A növényi ellenállóság általános tényezői.....	33
2.7.2. A különböző patogén gomba fajokkal szembeni rezisztencia háttéré	35
2.7.3. A patogén gomba fajokkal szembeni rezisztencia molekuláris alapja.....	38
2.8. A kórokozókkal szembeni védekezés további lehetőségei.....	42
3. ANYAG ÉS MÓDSZER.....	45
3.1. Szántóföldi kísérletek, 2012-2013.....	45

3.1.1. Vizsgált kukorica genotípusok	45
3.1.2. A szántóföldi kísérletek jellemzői	46
3.1.2.1. A talaj jellemzői.....	46
3.1.2.1.1. Kiszombor	46
3.1.2.1.2. Bácskertes	47
3.1.2.2. A kísérleti helyszínek meteorológiai adottságai	47
3.1.2.2.1. Kiszombor	47
3.1.2.2.2. Bácskertes.....	47
3.1.2.3. Alkalmazott agrotechnika.....	48
3.1.2.3.1. Kiszombor	48
3.1.2.3.2. Bácskertes.....	49
3.1.3. Szántóföldi vizsgálatok.....	49
3.1.3.1. Tenyészkerti elrendezés.....	49
3.1.3.2. A mesterséges fertőzéshez használt fajok és izolátumaik	50
3.2. Szántóföldi kísérletek, 2017-2018.....	50
3.2.1. Vizsgált kukorica genotípusok	51
3.2.2. A szántóföldi kísérletek jellemzői	51
3.2.3. Szántóföldi vizsgálatok.....	52
3.2.3.1. Tenyészkerti elrendezés.....	53
3.2.3.2. A mesterséges fertőzéshez használt fajok és izolátumaik	53
3.3. A mesterséges fertőzéshez használt fertőző anyag előkészítése	53
3.4. A felhasznált fertőzési módszer bemutatása.....	55
3.5. A csőpenész boritottság mértékének meghatározása	56
3.6. Laboratóriumi vizsgálatok.....	57
3.6.1. A kukorica toxin minták előkészítése.....	57
3.6.2. A kukorica minták toxinanalízise	57
3.6.2.1. DON toxin koncentrációjának meghatározása	57
3.6.2.2. Fumonizin B ₁ , B ₂ és Aflatoxin B ₁ toxinok koncentrációjának meghatározása	58
3.7 Az adatok statisztikai feldolgozása	58
4. EREDMÉNYEK ÉS ÉRTÉKELÉSÜK	59
4.1. Szántóföldi fertőzöttségi adatok 2012-2013.....	59

4.2. A toxin vizsgálatok eredményei 2012-2013.....	68
4.3. Összefüggés a szántóföldi adatok és toxin vizsgálat eredményei között, 2012-2013.....	74
4.4. Szántóföldi fertőzöttségi adatok 2017-2018.....	78
4.5. A toxin vizsgálatok eredményei 2017-2018.....	82
4.6. Összefüggés a szántóföldi adatok és toxin vizsgálat eredményei között, 2017-2018.....	86
5. DISZKUSSZIÓ	90
5.1. A természetes fertőződés monitorozásának és a mesterséges fertőzés alkalmazásának ellentmondásai a kórtani szűrővizsgálatok során ..	90
5.2. A különböző fajok patogenitása és toxin termelő képessége közötti különbség.....	91
5.3. A fertőzéshez felhasznált izolátumok patogenitása, száma.....	92
5.4. A földrajzi elhelyezkedés és az időjárás hatása a fertőzöttségi értékekre és a mért toxin koncentrációkra.....	93
5.5. A vizsgált toxikus gomba fajokkal szembeni rezisztencia genetikai háttere kukoricában és a kiváltott fertőzések közötti összefüggések	94
5.6. A toxin felhalmozódással szembeni rezisztencia és a csőpenész rezisztenciához fűződő kapcsolata	96
5.7. Szelekciós vizsgálatok a nemesítési munka szolgálatában	98
6. ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK	100
7. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS.....	101
8. IRODALOMJEGYZÉK.....	102
9. ÖSSZEFOGLALÁS.....	119
10. SUMMARY	121
11. MELLÉKLETEK	123

ALKALMAZOTT RÖVIDÍTÉSEK

AAL-toxin: <i>Alternaria alternata</i> f. sp. <i>lycopersici</i> - toxin	ITS: Internal transcribed spacer
ADI: Acceptable Daily Intake	KSA: Kernel screening assay
Af: <i>Aspergillus flavus</i>	KSH: Központi Statisztikai Hivatal
AFB ₁₋₂ : Aflatoxin B ₁₋₂	MAS: Marker-assisted selection
AFG ₁₋₂ : Aflatoxin G ₁₋₂	MG: Methylglyoxal
AFM ₁ : Aflatoxin M ₁	MP A-G: Mating Population A-G
AI: Aridity index	NIV: Nivalenol
ANOVA: Analysis of variance	OTA: Ochratoxin A
ARI: Aflatoxin Risk Index	PCR: Polymerase chain reaction
DAD: Diode-Array Detection	PDA: Potato dextrose agar
DDGS: Distillers Dried Grains with Solubles	PR gén: Pathogenesis-related gén
DMI: Demethylation inhibitor	QTL: Quantitative trait locus
DON: Deoxynivalenol	RAP: Resistance associated protein
DON-3G: Deoxynivalenol-3-glucoside	RAPD: Random amplification of polymorphic DNA
ESI: Electrospray ionization	RASFF: Rapid Alert System for Food and Feed
FAO: Food and Agriculture Organization	RI: Resistant inbred
FB ₁₋₄ : Fumonizin B ₁₋₄	ROS: Reactive oxygene species
Fc: <i>Fusarium culmorum</i>	RPM: Rotation per minute
Fg: <i>Fusarium graminearum</i>	rRNS: Ribosomal RNS
FGSC: <i>Fusarium graminearum</i> species complex	SPE: Solid phase extraction
Fv: <i>Fusarium verticillioides</i>	SZD: Szignifikáns differencia
GMO: Genetically modified organisms	TEF: Translation elongation factor 1- α
HCC: hepatocellular carcinoma	UTR: Untranslated region
HPLC: High Performance Liquid Chromatography	ZEA: Zearalenon
IARC: International Agency for Research on Cancer	3-ADON: 3-acetildeoxynivalenol
	15-ADON: 15-acetildeoxynivalenol

1. BEVEZETÉS ÉS CÉLKITŰZÉSEK

A magyar mezőgazdaság legnagyobb mennyiségben termesztett és exportált cikke a kukorica, mely ennek köszönhetően igen fontos nemzetgazdasági tényezővé vált az elmúlt néhány évtizedben. A folyamatosan növekvő nyersanyag igény, valamint export kényszer miatt exponenciális növekedés figyelhető meg a kukorica tételekből származó jövedelmek tekintetében. A globális kereslet és a termelők igénye az, hogy a kukorica hektáronkénti termésmennyisége a lehető legnagyobb legyen, kiegészítve a megfelelő biotikus és abiotikus stresszekkel szembeni toleranciával. Az elmúlt 150 évben körülbelül hatszorosára nőtt a kukorica hektáronkénti termésátlaga. Ez elsősorban a nagy termőképességű hibridek elterjedésének köszönhető, de emellett jelentős szerepe volt az agrotechnikai fejlesztéseknek is, melyek a potenciális termőképesség megvalósulását segítik elő. A globális klímaváltozás komoly kihívást jelent a hibridek termesztési technológiájának terén is, hiszen folyamatosan nő a hőségnapok száma, valamint egyre több a szélsőséges időjárási körülmény is. A kánikula folyamatosan növekvő gyakorisága, az átlaghőmérsékletek emelkedése és a lehullott csapadék mennyiségének csökkenése, eloszlásának megváltozása a termesztési technológia változtatását okozza. A korábban legegészségesebb szántóföldi növényünként jellemzett hibrid növény, a globális felmelegedés következtében egyre nagyobb kitettséggel rendelkezik a toxikus *Fusarium* és *Aspergillus* gomba fajok fertőzésével szemben. A *Fusarium* fajok által előidézett csőpenész számos járványt okozott az elmúlt évtizedekben, de az utóbbi évek megváltozott klimatikus viszonyai segítették az *Aspergillus flavus* Link (*A. flavus*) szántóföldi kártételét is. Ezen fajok jelentős terméseszköket képesek előidézni kukoricában, mely a jelenlegi 460 milliárd forintos össztermelés (KSH, 2021) 1%-át alapul véve is közel 5 milliárd forint kiesést jelent, mely összeg egy járványos évben, kiegészítve a mikotoxinok által okozott kárral, már akár a tízszeresére is nőhet. Annak érdekében, hogy megfelelő határfokkal tudjunk védekezni a csőpenészt okozó mikotoxinogén gombákkal szemben, egyrészt kiváló ellenállósággal rendelkező kukorica hibrideket kell nemesítenünk, másrészt a már forgalomban lévőket szelektálhatjuk egy megfelelő tesztrendszer alkalmazásával, de emellett nem elhanyagolható a megfelelő agrotechnikai módszerek alkalmazása sem. Kutatócsoportunk a Gabonakutató Nonprofit Közhasznú Kft. kötelékében már közel 50 éve végez nemesítést segítő tevékenységet. Célunk az, hogy a rezisztencia genetikai alapjait jobban megismerve segítsük a nemesítő kollégákat a megfelelő szelekciós döntések meghozatalában.

A kutatásaink célkitűzéseként az alábbi kérdésekre kerestük a választ:

1. A kukorica csőpenész ellenállóságra történő nemesítése során alkalmazott mesterséges inokulációs módszer alkalmazásával kapott adatok milyen összefüggést mutatnak a természetes fertőződés mértékével?
2. Milyen mértékű különbség van a különböző gomba fajok izolátumai által előidézett csőpenész borítottság, valamint mikotoxin koncentráció tekintetében?
3. Mekkora a különbség a *Fusarium* és *Aspergillus* fajok izolátumainak patogenitása között?
4. Milyen hatása van a környezeti tényezőknek a fertőzöttség mértékére és a mikotoxin koncentrációra, ugyanazon genotípusok esetében?
5. Milyen kapcsolat van a különböző gomba fajokkal szembeni rezisztencia genetikai háttere között?
6. Mi jellemzi a toxin felhalmozódással szembeni rezisztenciát és milyen a csőpenész rezisztenciához fűződő kapcsolata?
7. A kapott kutatási eredmények hogyan realizálhatók a gyakorlati nemesítés során?

2. IRODALMI ÁTTEKINTÉS

2. 1. A kukorica gazdasági jelentősége

A kukorica felhasználása elsősorban takarmányként jelentős az egész világon, de vannak olyan országok is, ahol fontos élelmiszerforrás is. Magyarországon jelenleg is a takarmánykeverékek közel 90%-át biztosítja (Győri és Győriné, 2011). Energetikai felhasználása szempontjából a bioetanol előállítás alapanyagaként is szolgál. Emellett ipari felhasználása is jelentős, mivel rendkívül magas keményítő tartalmának köszönhetően alapanyaga a cukor, keményítő és alkohol gyártásnak is. Magyarországon 2021-ben a kukorica vetésterülete 1,04 millió ha, a megtermelt mennyisége 6,3 millió tonna volt, mely az országban megtermelt mezőgazdasági termékek közül a legnagyobb mennyiségű. A megtermelt kukorica átlagos termésmennyisége országos szinten 6,04 t/ha körül alakul (**1. ábra**). Az ebből származó bevétel 2021-ben országos szinten közel 460 milliárd forint volt. A világ legnagyobb kukorica termelői közül Magyarország 2020-ban a 17. pozíciót foglalta el (**1. táblázat**) és a megtermelt mennyiség felét exportálta, mellyel a 7. helyen áll az exportáló országok versenyében (**2. táblázat**) (Food and Agricultural Organization of United Nations: Economic And Social Department: The Statistical Division, 2020).

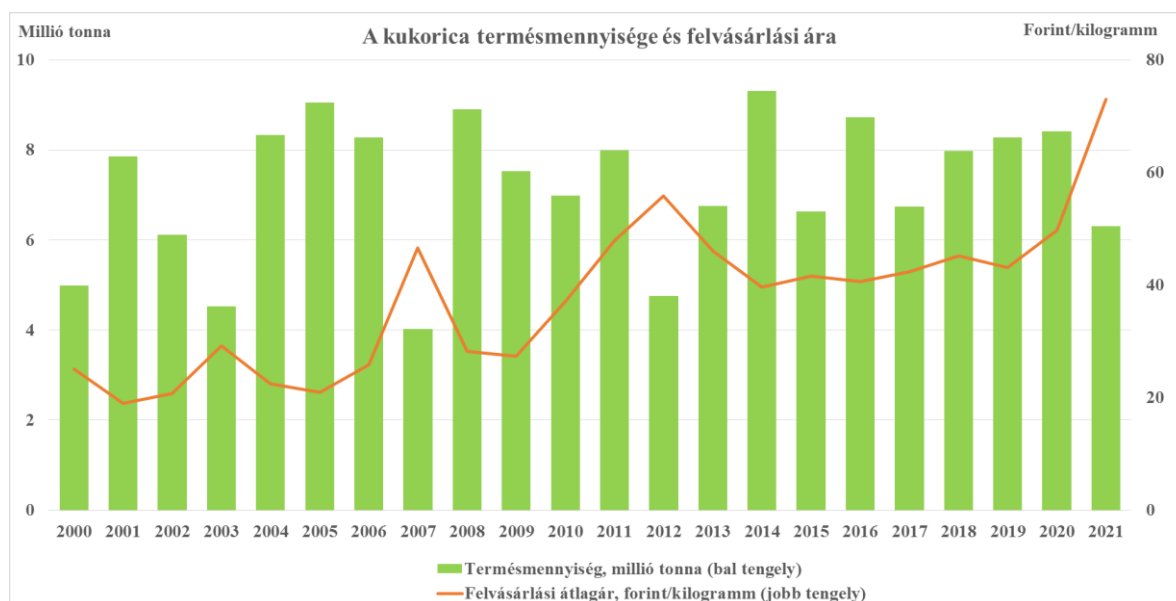
1. táblázat: Az egyes országok által megtermelt kukorica mennyisége, FAO, 2020

Rangsor	Termelő ország	Mennyiség (tonna)
1.	Amerikai Egyesült Államok	360 251 560
2.	Kína	260 876 476
3.	Brazília	103 963 620
4.	Argentína	58 395 811
5.	Ukrajna	30 290 340
6.	India	30 160 000
7.	Mexikó	27 424 528
8.	Indonézia	22 500 000
9.	Dél-Afrikai Köztársaság	15 300 000
10.	Oroszország	13 879 210
...
17.	Magyarország	8 365 430

2. táblázat: Az egyes országok által exportált kukorica mennyisége, FAO, 2020

Rangsor	Exportáló ország	Mennyiség (tonna)
1.	Amerikai Egyesült Államok	51 838 933
2.	Argentína	36 881 996
3.	Brazília	34 431 936
4.	Ukrajna	27 952 483
5.	Románia	5 651 064
6.	Franciaország	4 558 720
7.	Magyarország	4 040 502
8.	Szerbia	3 608 208
9.	Dél-Afrikai Köztársaság	2 584 946
10.	Bulgária	2 559 570

A kukorica termésmennyiségének és felvásárlási árának alakulását az elmúlt 21 évben az **1. ábra** szemlélteti.



1. ábra: A kukorica termésmennyiségének és felvásárlási árának alakulása 2000-2021 között

(Forrás: KSH)

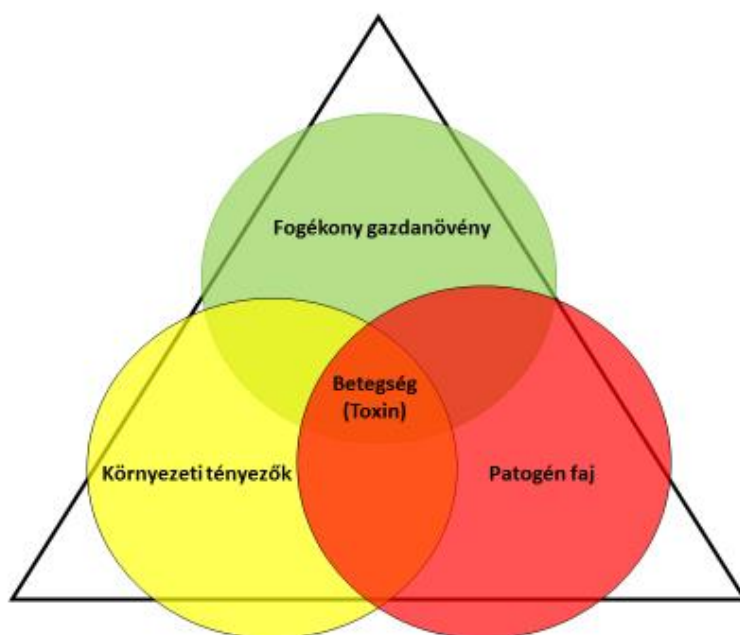
A kukorica rendkívül nagy genetikai diverzitással rendelkezik, mely alaktani sokszínűségében is felfedezhető. A több ezer rendkívül változatos genotípusú kukorica hibrid között jelentős különbség van a növény színének, alakjának, valamint méretének tekintetében. A kukorica beltartalmi értékei alapján inkább szénhidrát forrásnak minősíthető. Átlagos keményítőtartalma 65-70%, fehérjetartalma 7-9% (a zein protein az összes fehérje 45-50%-át is elérheti), pentozán

tartalma körülbelül 6%, olajtartalma 3-5%, rosttartalma 2%, cukortartalma 1,4%, míg ásványi anyag tartalma 1,2%.

A kedvező termesztési tulajdonságok és a magas termőképesség miatt a hazai vetésterület szinte teljes nagyságát a hibrid kukoricák foglalják el. Ezen genotípusok elterjedése, valamint a magasabb hozamot jelentő, eredményesebb termesztésük iránti igény fejlődésnek indította az újabb és toleránsabb hibridek előállítását célzó nemesítési tevékenységet. Ez magával vonta a termesztési technológia, valamint a vetőmag előállítás további rohamléptű fejlődését. A kukorica felhasználása igen széleskörű, mivel mind az élelmiszeriparban, mind a takarmány előállításban, valamint az egyéb ipari felhasználás területén is igen fontos szereppel rendelkezik. A kukorica felvásárlás jelentős része az etanol gyártáshoz köthető. Az etanol gyártása során nincs közvetlenül negatív hatása a kukorica tételek mikotoxin tartalmának, azonban a gyártási melléktermék DDGS (Distillers Dried Grains with Solubles) kiváló fehérjeforrás, amelyben az erjesztés utáni beszárítást követően a mikotoxinok mennyisége körülbelül a háromszorosára emelkedik. A DDGS forgalmazása nélkül az etanol előállítás veszteséges lenne.

2.2. A kukorica toxintermelő gombák okozta megbetegedéseinek okai és a kórokozók előfordulása

A gombabetegségek esetében, mint minden más kórokozónál, három feltétel egyidejű jelenléte szükséges a kórképek kialakulásához. Egyrészt szükséges, hogy a növényi genotípus fogékony legyen az adott kórokozóval szemben, valamint megfelelő környezeti körülményeknek kell teljesülnie, hogy a fertőződés létre jöhessen és a fajra jellemző kórkép kialakulhasson. Emellett természetesen a megfelelő patogenitású kórokozó jelenléte is szükséges. Ez a három tényező együtt szükséges a betegség kialakulásához és amennyiben ezek egyike nem teljesül, a kórkép nem alakul ki (**2. ábra**). Amennyiben a kórokozó adott izolátuma képes szántóföldi toxin termelésre, ez a tényező is hozzáadódik a tényezők metszetéhez. Mivel azonban a betegségekkel szembeni ellenállóképeség és a toxin felhalmozódással szembeni rezisztencia szabályozása eltérhet, így a két tényező feltételei nem feltétlenül esnek egybe.



2. ábra: „Betegség (toxin) háromszög” (Stevens, 1960)

A kukorica kórtani megbetegedései közül jelen értekezésben a toxikus gomba fajok által előidézett csőpenészekre helyeződik a hangsúly. Világszerte fontos állat- és humánegészségügyi problémákat okoznak a *Fusarium* és *Aspergillus* nemzetség fajai, de ezek kártétele a világ különböző tájain eltérő. A *Fusarium graminearum* Schwabe (*F. graminearum*) és a *Fusarium culmorum* Saccardo (*F. culmorum*) elterjedésének kedvez a nyári nagyobb mennyiségű csapadék és az alacsonyabb átlaghőmérséklet, míg a *Fusarium verticillioides* Nirenberg (*F. verticillioides*) a száraz és meleg körülményeket részesíti leginkább előnyben. Ezen fajokon kívül még 14 további *Fusarium* faj is jelen lehet a kukoricán (Mesterházy és Vojtovics 1977, Logrieco és mtsai. 2002). Az *A. flavus* növekedésének és aflatoxin termelésének a forró, száraz nyarak kedveznek. Tekintettel, hogy az egyes fajok ökológiai igényei jelentősen különböznek, ezért hazánkban évenként és akár országrészenként is különböző mértékűek lehetnek a fertőzési adatok és a mikotoxin koncentrációk (Mesterházy és mtsai., 2022) (**3. táblázat**). Mivel a fertőződés túlnyomórészt a bibe közvetítésével, a bibecsatornán keresztül valósul meg (Munkvold és White, 2016), ezért a fertőződés létrejöttéhez a mérsékelt meleg és magasabb páratartalmú környezeti tényezők szükségesek minden faj esetében.

3. táblázat: Toxin koncentrációk megoszlása 2012-2017 között természetes eredetű gomba fertőzött kukorica tételekben (Mesterházy és mtsai., 2022)
Piros színnel az adott toxin, régiók szempontjából kiemelkedő átlag értékeit jelöltük.

Megye	Régió	DON (mg/kg)	Összes aflatoxin (µg/kg)	Összes fumonizin (mg/kg)
Veszprém	ÉNY	0,87	2,17	0,63
Fejér	ÉNY	0,71	0,43	1,06
Komárom-Esztergom	ÉNY	0,90	0,12	0,72
Győr-Moson-Sopron	ÉNY	0,62	0,36	0,75
Vas	ÉNY	0,71	0,07	0,41
Átlag		0,76	0,63	0,71
Baranya	DNY	0,86	1,15	1,82
Tolna	DNY	1,17	0,63	1,44
Somogy	DNY	0,97	0,75	1,11
Zala	DNY	1,21	0,10	0,57
Átlag		1,05	0,66	1,24
Bács-Kiskun	DK	0,61	2,60	1,51
Csongrád-Csanád	DK	0,17	1,63	0,85
Békés	DK	0,17	1,38	0,91
Jász-Nagykun-Szolnok	DK	0,42	0,21	1,40
Átlag		0,34	1,46	1,17
Pest	ÉK	0,57	1,16	0,72
Szabolcs-Szatmár-Bereg	ÉK	0,32	0,30	0,53
Borsod-Abaúj-Zemplén	ÉK	0,33	0,07	0,50
Hajdú-Bihar	ÉK	0,13	0,12	0,58
Heves	ÉK	0,10	0,17	0,04
Átlag		0,29	0,36	0,47
SZD 5%				0,85

A környezeti tényezők mellett hasonlóan fontos szereppel rendelkezik a megfelelő agrotechnikai gyakorlat alkalmazása is, a gomba okozta fertőződés és a mikotoxin felhalmozódás elkerülése érdekében. Blandino és mtsai. (2008, 2009) a vetésidőnek, a növények számának, a N-műtrágyázásnak és a rovarirtó kezelésnek a hatásait tanulmányozták a *F.verticillioides* fumonizin termelésének vonatkozásában. Az alacsonyabb vetéssűrűség, a korábbi vetéssel és a megfelelő rovarirtó kezeléssel, valamint a kiegyensúlyozott nitrogén műtrágyázással kombinálva jelentősen csökkentheti a gombás megbetegedések és mikotoxin szennyeződések kockázatát. Agrotechnikai kísérletekkel bizonyították (Folcher és mtsai., 2009), hogy az inszekticid kezelés önmagában nem csökkentette a mikrobiota jelenlétét, azonban a mikotoxinok mennyisége jelentősen csökkent. Megvizsgálták (Folcher és mtsai., 2010) a MON 810 Bt transzgenikus kukorica hibrid és nem GMO izogén párjának FB₁ + FB₂,

DON és ZEA tartalmát is. A Bt genotípus használata több mint 90%-kal csökkentette a fumonizin koncentrációt és 50%-kal a ZEA tartalmat, megerősítve Munkvold és mtsai. korábbi eredményeit (1997). Parsons és mtsai. (2010) vizsgálatai alapján szignifikáns hatása van a hibridek rezisztencia szintjének, a vetési időnek, az inszekticid kezelésnek, valamint a szárazság stressznek a *Fusarium* csőpenész tünetekre és a fumonizin B₁ szennyezettségre és e tényezők kölcsönhatása is szignifikáns volt. A leginkább befolyásoló tényező a hibrid választás és a rovarirtó kezelés volt, de ezek hatását a vetésidő és az aszály stressz is befolyásolta.

Scarpino és mtsai. (2018) vizsgálatai alapján a rovarölőszeres kezelés hatására kevesebb volt a rovarkártétel és csőpenész mértéke, míg a termésmennyiség 5%-kal nőtt. Ez azonban a Liseola szekció tagjaira volt csak érvényes, míg a Discolor szekció fajainak esetében sok esetben még növekedett is a toxin kontamináció mértéke. Robertson és mtsai. (2011) vizsgálatai rávilágítottak arra, hogy a szórványos jégesők is jelentős csőpenész borítottságot képesek okozni, az általuk okozott sebzés hatására. A gombák által termelt mikotoxinok koncentrációja is magasabb lehet ezekben az esetekben.

Ni és mtsai. (2011) pozitív korrelációt mutattak ki a csövön előforduló rovarrágás mértéke és az aflatoxin szennyezettség között. A kései vetés és a korai betakarítás csökkenti a fumonizin felhalmozódásának esélyét, de a jól fedő levelek és a vastag maghéj réteg hasonló hatást fejt ki (Cao és mtsai., 2014). Cotty és Garcia (2007) szerint a globális klímaváltozás növeli az *A. flavus* izolátumok előfordulási gyakoriságát, valamint elősegíti a mikrobióta összetételének változását. Magyarország különböző kukoricatermő területeiről származó kukorica minták vizsgálata során a vizsgált kukoricaminták közel kétharmada volt *A. flavus*-szal fertőzött és mintegy egyötödük képes volt aflatoxin termelésére is (Dobolyi és mtsai., 2013). Kos és mtsai. (2013) megerősítették ezeket az eredményeket az aflatoxin szerbiai előfordulása esetében is. Mesterházy és Vojtovics (1977) munkája alapján a kukorica mikrobióta legfontosabb fajai a *F. graminearum*, *F. culmorum*, *F. verticillioides* és *F. subglutinans* voltak, de további 10 fajt is leírtak. Goertz és mtsai. (2010) németországi kukorica minták mikrobiótáját vizsgálva arra a következtetésre jutottak, hogy jelentős eltérések vannak az évjáratok között. Míg 2006-ban a DON mellett, a magasabb hőmérséklet és a kevesebb csapadék miatt még ZEA és fumonizin volt kimutatható, addig 2007-ben a közepes hőmérséklet és a magas csapadék mennyiség miatt csak nagy mennyiségű DON és ZEA volt detektálható a mintákban. 2006-ban a *F. verticillioides*, *F. graminearum* és *F. proliferatum* voltak a gyakrabban izolált fajok, míg 2007-ben a *F. graminearum*, *F. cerealis* és *F. subglutinans* előfordulása dominált. Dorn és mtsai. (2009) svájci kukorica minták mikrobiótáját tanulmányozva a szemekből 16, a szármintákból 15 *Fusarium* fajt mutattak ki. A mikrobióta összetétele és az izolátumok mikotoxin termelő

képessége is változott az ország északi és déli részéből származó minták esetében. Horvátországban több kultúrnövény mikrobiótáját is tanulmányozták és a kukoricamintákban a *F. verticillioides* volt a domináns faj (Ivić és mtsai., 2009). Scauflaire és mtsai. (2011) belga kukoricaminták mikrobiótáját vizsgálták. 23 *Fusarium* fajt azonosítottak. Az évjáratok legnagyobb hatását a *F. graminearum* esetében tapasztalták, valószínűleg az időjárási viszonyok miatt. Szerbiából származó mezőgazdasági mintákban előforduló gomba nemzetségek a következők voltak: *Aspergillus spp.*, *Penicillium spp.*, *Fusarium spp.*, *Mucor spp.* *A. flavus* a minták mintegy negyedében fordult elő. Az aflatoxin koncentráció egyik esetben sem érte el az EU határértéket (Jakić-Dimić és mtsai., 2009). *Fusarium* fajok a Lengyelországban vizsgált kukoricaszemek 25,24%-ában fordultak elő. A *F. verticillioides* és a *F. temperatum* volt a domináns faj. A fumonizin B₁ minden vizsgált mintában, míg a DON a minták 67%-ában, a ZEA pedig 43%-ban volt jelen (Czembor és mtsai., 2015). Tabuc és mtsai. (2009) vizsgálatai alapján az *A. flavus*, *A. fumigatus*, *F. graminearum* és *F. culmorum* jelenléte minden gabonaféle esetében meghatározó volt, míg a *F. verticillioides* a kukorica mintákban volt leginkább jelen. A minták 30%-a tartalmazott AFB₁-et és 20%-a meghaladta az uniós határértékeket is. A DON és a ZEA esetében a szennyezett minták aránya 48% és 42% volt. Az olaszországi kukorica minták mikotoxin szennyezettségének vizsgálata során az aflatoxinok előfordulási gyakorisága 75%, míg a fumonizineké 100% volt (Leggieri és mtsai., 2015). A magyarországi mikobiota vizsgálatok a *F. verticillioides* dominanciáját fedték fel, míg a *F. graminearum*, *F. proliferatum* és a *F. subglutinans* jelenléte jóval esetlegesebb volt (Tóth és mtsai., 2012).

2.3. A *Fusarium* nemzetség általános áttekintése

A *Fusarium* a legfontosabb toxinogén gomba nemzetségek közé tartozik, melynek sokáig zavaró, instabil nevezéktana volt. A *Fusarium* nemzetség fajainak sokszínűségét és fajgazdagságát korábban jelentősen alábecsülték (O'Donnell és mtsai., 1998a; b; Aoki és O'Donnell, 1999; O'Donnell és mtsai., 2000; Ward és mtsai., 2002). A 20. század első felében a *Fusarium* fajok jelentős részét a mikotoxikológusok és a növény kórtannal foglalkozó kutatók helytelenül azonosították, mivel egy nagyon egyszerű morfológiai módszert használtak. Marasas és mtsai. (1984) hatalmas erőfeszítéseket tettek annak érdekében, hogy több száz toxikus izolátum faji besorolását elvégezzék, az éppen aktuális rendszer használatával.

A *Fusarium* fajok járványos években jelentős gazdasági károkat okoznak. Az általuk okozott termésveszteség hatásánál még fontosabb negatív hatásuk a mikotoxinok termelése. A *Fusarium* fajok rendkívül széleskörű biológiai aktivitással rendelkező, másodlagos metabolitokat, mikotoxinokat termelnek, melyek az állatokra és az emberre is veszélyt jelentenek. A gabonaféléket károsító, gazdasági szempontból legjelentősebb *Fusarium* fajokat és az általuk termelt legfontosabb mikotoxinokat a **4. táblázat** foglalja össze.

2.3.1. *Fusarium culmorum*

A *F. culmorum* Sacc. a fonalas gombák *Hypocreales* rendjének *Nectriaceae* családjába tartozó faj. A *F. culmorum* a *Discolor* szekcióba tartozik, ahol többek között a *F. graminearum* Schwabe, és a *F. sambucinum* Fuckel (Nelson és mtsai., 1983) is található. A *Discolour* szekció tagjait gyakran csak úgy emlegetik, hogy a „gabona fuzáriumok”. A micéliumok színe általában fehér, de előfordulhat sárgás, vagy cser színben is. Narancs és vöröses-barna sporodochiumok a telepek öregedésével jelennek meg. A *F. culmorum* által termelt legjellemzőbb mikotoxinok a dezoxinivalenol, zearalenon és a nivalenol. Ezek mellett még fusarenon-X, zearalenol és mono-acetildezoxinivalenol is előfordulhat. Tóth és mtsai. 2004-ben vizsgáltak 37 *F. culmorum* izolátumot, melyek közül 30 az I. kemotípusba tartozott, melyek DON-t és 3-ADON-t termeltek, 7 pedig a II. kemotípusba és a NIV mellett fuzarenon-X-t termeltek. Az I. kemotípus tagjai sokkal patogénebbek voltak, mint a II. típus tagjai. A filogenetikai analízis eredményei alapján a magyar izolátumok azonos RAPD profilt hordoztak. Eredményeiket megerősítették 2008-ban (Tóth és mtsai., 2008), kiegészítve azzal, hogy a magyarországi *Fusarium graminearum* populáció szexuális reprodukcióval is rendelkezik életciklusa során, míg a *Fusarium culmorum* elvesztette azt. A faj elsősorban a hűvösebb területek kórokozója és a kalászos gabonafélék kalászfuzariózisának, valamint a kukorica *Gibberella* típusú csőpenészesedésének és szártőkorhadásának kialakulásában játszik fontos szerepet (Mesterházy, 1988).

4. táblázat: A kukoricacsöveken előforduló legjelentősebb *Fusarium* fajok Európában és a rájuk legjellemzőbb mikotoxinok (Forrás: Logrieco és mtsai., 2002)

<i>Fusarium</i> fajok	Mikotoxinok
<i>F. acuminatum</i>	T2, MON, HT2, DAS, MAS, NEO, BEA
<i>F. anthophilum</i>	BEA
<i>F. avenaceum</i>	MON, BEA
<i>F. cerealis</i>	NIV, FUS, ZEN, ZOH
<i>F. chlamydosporum</i>	MON
<i>F. culmorum</i>	DON, ZEN, NIV, FUS, ZOH, AcDON
<i>F. equiseti</i>	ZEN, ZOH, MAS, DAS, NIV, DAcNIV, FUS, FUC, BEA
<i>F. graminearum</i>	DON, ZEN, NIV, FUS, AcDON, DAcDON, DAcNIV
<i>F. heterosporum</i>	ZEN, ZOH
<i>F. nygamai</i>	BEA, FB₁, FB₂
<i>F. oxysporum</i>	MON, BEA
<i>F. poae</i>	DAS, NIV, FUS, MAS, T2, HT2, NEO, BEA
<i>F. proliferatum</i>	FB₁, BEA, MON, FUP, FB₂,
<i>F. sambucinum</i>	DAS, T2, NEO, ZEN, MAS, BEA
<i>F. semitectum</i>	ZEN, BEA
<i>F. sporotrichioides</i>	T2, HT2, NEO, MAS, DAS
<i>F. subglutinans</i>	BEA, MON, FUP
<i>F. tricinctum</i>	MON, BEA
<i>F. verticillioides</i>	FB₁, FB₂, FB₃

A fontosabb mikotoxinok vastaggal szedve. Rövidítések jelentése: AcDON – Mono-acetildezoxinivalenol (3-AcDON, 15-AcDON); AcNIV – Mono-acetilnivalenol (15-AcNIV); BEA – Beauvericin; DiAcDON – Di-acetildezoxinivalenol (3,15-AcDON); DAcNIV – Diacetilnivalenol (4,15-AcNIV); DAS – Diacetoxiscirpenol; DON – Dezoxinivalenol; FB₁ – Fumonizin B₁; FB₂ – Fumonizin B₂; FB₃ – Fumonizin B₃; FUP – Fusaproliferin; FUS – Fusarenon-X (4-Acetyl-NIV); FUC – Fusarochromanone; HT2 – HT-2 toxin; MAS – Monoacetoxiscirpenol; MON – Moniliformin; NEO – Neosolaniol; NIV – Nivalenol; T2 – T-2 toxin; ZEN – Zearalenon; ZOH – zearalenol

2.3.2. *Fusarium graminearum*

Hazánkban a *F. graminearum* Schwabe (teleomorf alakja: *Gibberella zeae* (Schw.) Petch) elsősorban a kalászos gabonafélék kalászfuzariózisának, valamint a kukorica *Gibberella* típusú csőpenészesedésének (3. ábra) és szárkorhadásának kialakulásában játszik fontos szerepet (Békési és Hinfner 1970; 1971). A kétezres évek elején végzett molekuláris genetikai vizsgálatok (O'Donnell és mtsai., 2000) alapján a *F. graminearum* (*Gibberella zeae*) fajt nyolc biogeográfaiailag elkülönülő vonalra osztották, ezeket a vonalakat pedig a *F. graminearum* fajkomplexbe (FGSC) sorolták. A filogenetikai fajkonceptió elterjedése következtében, a legújabb vizsgálatok alapján a fajkomplexumot már 13 fajra tagolják (O'Donnell és mtsai., 2004; Starkey és mtsai., 2007). Közülük a *F. vorosii* fajt kutatócsoportunk fedezte fel. A fajkomplex tagjai közül a nemzetközi szakirodalom alapján öt faj képviselői fertőzik a kukoricát, a *F. asiaticum*, *F. austroamericanum*, *F. boothii*, *F. meridionale* és a *F. graminearum sensu stricto*. A *F. graminearum* által a legnagyobb mennyiségben termelt mikotoxinok a dezoxinivalenol, zearalenon, nivalenol, fusarenon-X és a mono-acetildezoxinivalenol. Az izolátumokat a termelt mikotoxinok összetétele alapján I. és II. kemotípusba sorolhatjuk. Tóth és mtsai. 2005-ben *F. graminearum* populáció genetikai variabilitásának vizsgálata során megállapították, hogy a közép-európai izolátumok mindegyike az I. kemotípusba tartozott, de amellet, hogy DON-t termeltek, a 15-ADON előfordulása nagyobb volt a 3-ADON származéknál, így az izolátumok az I. b csoportba tartoztak. A patogenitás tekintetében rendkívül erősnek bizonyult az összes izolátum. A filogenetikai analízis eredményei alapján az izolátumok jelentős része a *F. graminearum sensu stricto*, míg kettő izolátum a *F. boothii* fajba tartozott. A nemzetközi irodalomban számos kutatócsoport szignifikáns különbséget talált a *Fusarium* izolátumok agresszivitása között (Xue és mtsai., 2003; Kuhnem és mtsai., 2015). Általánosan megállapítható, hogy *F. graminearum* izolátumok erőteljesebb fertőzést tudnak kiváltani a csöveken (Díaz Arias és mtsai., 2013), mint a *F. verticillioides* és az *A. flavus* fajok képviselői (Yates és mtsai., 2005). Nem egyértelmű azonban az összefüggés az izolátumok toxintermelő képessége és agresszivitása között. Kuhnem és mtsai. (2015) *F. graminearum* izolátumok esetében szoros összefüggést mutattak ki a csőpenész borítottság és a toxintartalom között. A szelekciós munkák során használt izolátumok kiválasztását ugyan segítik a laboratóriumi vizsgálatok során nyert széles körű információk, azonban az izolátumok tényleges szántóföldi agresszivitását erősen befolyásolják a környezeti tényezők.



3. ábra: *Gibberella* típusú csőpenész természetes úton fertőződött kukoricacsöveken

(A szerző saját felvételei)

2.3.3. *Fusarium verticillioides*

A *F. verticillioides* Sacc. Nirenberg (teleomorf *Gibberella moniliformis*) a legáltalánosabb kórokozó, mely a *Fusarium* típusú csőpenészcsoport tagja (4. ábra). A *Fusarium verticillioides* a *Liseola* szekcióba tartozik. Ez a kórokozó széles körben elterjedt a mérsékelt és szubtrópusi területeken, beleértve az összes európai kukorica termesztő területet is (Logrieco és mtsai., 2002). A *F. verticillioides* fertőzőképességének elsősorban a meleg, száraz időjárási körülmények kedveznek. Ez a gomba faj képes fumonizin mikotoxinok termelésére (Munkvold és Desjardins, 1997; Desjardins és mtsai., 1998). A *F. verticillioides* több fumonizin izomert termelhet, de ezek közül az FB₁, az FB₂ és az FB₃ a legjelentősebbek gyakorlati szempontból (Mesterházy és mtsai., 2022). Általános megállapítás a korábbi kutatási eredmények alapján, hogy a *F. verticillioides* izolátumok nem mindegyike termel fumonizineket szántóföldi körülmények között (Dixit és mtsai., 2007). Covarelli és mtsai. 2012-ben *F. verticillioides* izolátumok fumonizin termelő képességét, patogenitását és genetikai variabilitását vizsgálták. Az izolátumok ötöde nem volt képes (*in vitro*) toxin termelésre és a termelők között is jelentős toxin koncentrációbeli különbségek adódtak. A patogenitás tekintetében is jelentős

különbségek voltak, de ez nem volt korrelációban a fumonizin termeléssel. Iglesias és mtsai. 2010-ben publikált eredményeik alapján azonban nem találtak összefüggést a *F. verticillioides* toxintermelő képessége és a csőpenész borítottság között, hasonlóan Desjardins és Plattner 2000-ben publikált megállapításaihoz. A talaj *Fusarium* közösségének összetételét vizsgálva az előfordulás elsődleges meghatározó tényezőjének a növényi maradványokat találták (Wakelin és mtsai., 2008; Venturini és mtsai. 2011). A kukorica maradványok jelenléte a talajban elősegítette a *Fusarium* fajgazdagságot, míg a *F. verticillioides* akkor került túlsúlyba, ha a tarlót megtartották, míg a gomba eltűnt, ha azt elégették. Wu és mtsai. 2013-ban DsRed-el jelölt *F. verticillioides* kolonizációját és fumonizin termelését vizsgálták rezisztens és fogékony beltenyésztett vonalakon. A fogékony vonalak esetében a hifák mozaikszerűen sejtről-sejtre haladtak a gyökérben és töltötték meg hifával őket, míg rezisztenseknél ez nagyon ritkán volt megfigyelhető. A fumonizin koncentráció pozitív korrelációban volt a kolonizáció mértékével. Shim és mtsai. 2010-ben elsőként írták le a „starburst” jelenséget, mely a fertőzés korai szakaszában jelenik meg a szemek perikarpiumán sávozottság formájában (4. ábra). A kukorica érése során vizsgálták a *F. verticillioides* fertőződés kiterjedésének növekedését és a fumonizin kontaminációt (Bush és mtsai., 2004). A szemek fiziológiai érésénél jelentkezett először a fertőződés és tovább növekedett a betakarításig. A fumonizin koncentrációja ez idő alatt fluktuált. Vizsgálatok alapján a *F. verticillioides* fertőződés létrejöttét elősegíti a csuhélevelek zártsága és a rovarkártétel mértéke is (Farrar és mtsai., 1991).



4. ábra: *F. verticillioides* „starburst” tünet együttes (bal oldal) és csővégi természetes fertőződés (jobb oldal)

(Prof. Dr. Mesterházy Ákos és Dr. Tóth Beáta felvételei)

2.4. Az *Aspergillus nemzetség* és az *A. flavus*

Az *A. flavus* és az *A. parasiticus* a fonalas gombák *Eurotiales* rendjének, *Trichocomaceae* családjának, *Aspergillus* nemzetségébe tartoznak és azon belül pedig a Flavi szekcióba (Peterson, 2008). Jellemzően mindkét faj képez szkleróciumokat (Horn és mtsai., 1996). Az *A. flavus* egy oportunista patogén fonalas gomba, amely képes megfertőzni a kukoricát (**5. ábra**), a rizst, a gyapotot és a földimogyorót is. A szkleróciumuk méretei alapján az *A. flavus*-nak jellemzően két morfortípusa van. A nagy (L) törzs, 400 µm átmérő felett és a kis (S) törzs, melynek szklerócium méretei 400 µm alatt vannak (Cotty és mtsai., 1989). A kukorica esetében az *A. flavus* L törzse (Wicklow és mtsai., 1984a; b), gyapotban az *A. flavus* S törzse (Garber és mtsai., 1997), míg földimogyoróban az *A. parasiticus* (Horn és mtsai., 1994) szklerócium képzése volt jellemző. Az *A. flavus* által, kukoricán képzett szkleróciumok a gépi betakarítás során, elszórta kerültek a talaj felszínére (Wicklow és mtsai., 1984b). A mezőgazdasági termények aflatoxin szennyezettségének jelentős részéért az *A. flavus* a felelős. Az elsődleges fertőzés mellett az állatok és emberek számára káros aflatoxinokat képes termelni száraz, forró időjárási viszonyok mellett (Payne és mtsai., 1998). Az *A. flavus* legnagyobb mennyiségben az aflatoxin B₁ és B₂ variánsát termeli (Ogundero és mtsai., 1987), melyek toxikusak, karcinogének és mutagének az emberre és állatokra nézve is (Yu és mtsai., 2004; Wogan és mtsai., 2012). Emellett még képes sterigmatocisztint és ciklopiazonsavat is termelni. Az aflatoxin kedvezőtlen élettani hatásait megelőzendő, az Európai Unió rendkívül szigorú 2 µg/kg határértéket jelölt ki az aflatoxin B₁ koncentrációjára, míg az összes variáns összesített értékére 4 µg/kg értéket.



5. ábra: *A. flavus* okozta természetes fertőződés kukoricacsöveken

(Prof. Dr. Mesterházy Ákos felvételei)

Hazánkban az *A. flavus*-t sűrűn izolálják a legkülönbözőbb mezőgazdasági terményekről (búza, kukorica, szőlő, paprika), de ennek ellenére az az általános nézet, hogy a mérsékelt égövi éghajlati viszonyok között az idehaza megtermelt élelmiszerekben csekély az aflatoxinok felhalmozódásának lehetősége, mivel a faj leginkább magasabb hőmérsékleti tartományban termel aflatoxint. A globális felmelegedés számos negatív hatása közül meg kell említenünk a mikotoxinok felhalmozódásának fokozottabb mértékét is. Mivel az *A. flavus* a trópusi, szubtrópusi területekről származik, ezért számára kedvezőek a klímaváltozás okozta új körülmények. Ezt a kérdést számos tanulmány vizsgálta a közelmúltban (Bunyavanich és mtsai., 2003; Cotty és Jaime-Garcia, 2007; Miraglia és mtsai., 2009; Paterson és Lima, 2010; Tirado és mtsai., 2010). Eredményeik alapján a klímaváltozás hatására számos olyan faj kártétele fordulhat elő nagyobb gyakorisággal a mérsékelt égövben, amelyek korábban nem voltak jellemzőek és északabbra tolódhatnak azok, amelyek viszont az adott területen voltak általánosan elterjedtek. Egybehangzó vélemény, hogy az elkövetkezendő években az *A. flavus* kártételének szélesebbkörű elterjedése várható a régióban, melynek eredménye az aflatoxin, terményekben mért koncentrációinak emelkedése lesz.

Az utóbbi években több olyan közlemény is megjelent, melyben arról számolnak be, hogy aflatoxint termelő gombákat és a határértékeknél nagyobb aflatoxin koncentrációkat detektáltak

több mérsékelt égövi, európai országban. Giorni és mtsai. 2007 és Miraglia és mtsai. 2009 vizsgálatai alapján Olaszországban, a hosszabb száraz, forró időjárásnak köszönhetően az *A. flavus* tömeges megjelenését észlelték kukoricán, ami a kukorica minták aflatoxin kontaminációját a határérték fölé emelte. Szerbiában a vizsgált kukorica minták 18,7%-ban volt jelen az *A. flavus* és hasonló arányban sikerült is nekik az aflatoxin jelenlétét detektálni (Jakic-Dimic és mtsai., 2009). Tabuc és mtsai. 2009-ben megjelent közleményében a 2002-2004 közötti időszakban gyűjtött kukorica minták közel harmadából mutatták ki az *A. flavus* jelenlétét és az aflatoxin határérték feletti koncentrációját. Az aflatoxin M₁ megjelenése a tejben arra utal, hogy a tehenek által elfogyasztott takarmány jelentős mennyiségű aflatoxint tartalmazott, mely a metabolikus folyamatok során alakult át aflatoxin M₁ formává. A tejminták aflatoxin szennyezettségét a dél-szláv régióban vizsgálták több helyen is. A szlovéniai vizsgált minták körülbelül 10%-ában detektáltak a határértéket meghaladó aflatoxin M₁ koncentrációkat (Torkar és Vengust, 2008). Szerbiában családi gazdaságok tej mintáit vizsgálták meg, melynek során több, mint 30%-os arányban detektálták a toxin jelenlétét. Mesterházy és mtsai. (2022) szintén alátámasztották a faj közép-európai térnyerését. Az általuk vizsgált időszakban a dél-magyarországi régióban mutattak ki legnagyobb mennyiségben aflatoxint a mintákból. Az *A. flavus* jelenlétének molekuláris alapon történő kimutatásának barcode-jai a kalmodulin és β -tubulin gének, melyek fajsztinten is nagyon informatívak (Hong és mtsai., 2005).

2.5. Mikotoxinok

2.5.1. Trichotecének

A *Fusarium* fajok által termelt trichotecének triciklikus szeszkviterpének, melyek kettős kötést tartalmaznak a 9-es és 10-es szén atom között, valamint egy 12,13-epoxid gyűrűt, így létrehozva a 12,13-epoxitrichotec-9-éneket. A trichotecének rendkívül nagy vegyület családot alkotnak, így ide tartozik a diacetoxiscirpenol, T-2 toxin, nivalenol és a dezoxinivalenol is. A belek nyálkahártya rétege az első biológiai védelmi vonal, mely a természetes eredetű toxinokkal találkozik és pont emiatt jelentős mennyiségű, a tápcsatornába kerülő toxinnak lehet kitéve. Számos publikáció született azzal kapcsolatban, hogy a belek epithel sejtjei célpontjai az ételt szennyező vegyületeknek, köztük a mikotoxinoknak (McLaughlin és mtsai., 2004; Bouhet és Oswald, 2005). Ezek a toxinok növelik a belső patológiás elváltozások gyakoriságát az emberben és az állatokban is, bele értve a bélsejtek nekrozisát is. A DON befolyásolja az immunrendszer válaszkészségét és a bél immunsejtjei közötti kommunikációt is, valamint

hajlamosító tényezőt jelent a gyulladáshoz vezető megbetegedések esetében is (Maresca és Fantini, 2010). A DON globális hatásai közé tartozik a növekedési hormon szintézisének szabályozása a citokin szignalizációs útvonalak gátlásával, valamint a központi neuronhálózatra gyakorolt közvetlen hatása. A sertések ebből a szempontból kifejezetten veszélyeztetettek, mivel a legérzékenyebb fajok közé tartoznak, valamint a gabonákban dús étrendjük miatt igen nagy mennyiségű mikotoxin halmozódhat fel a szervezetükben. A DON elsősorban a bélrendszerre és az immunrendszerre gyakorolt negatív hatása miatt veszélyes az emberre nézve.

A *Fusarium* fajok a DON mellett még számos más trichotecént is képesek termelni, köztük az acetil-DON származékokat, melyek toxikus hatását mindössze *in vitro* kísérletekkel vizsgálták eddig. A DON maszkolt formája, a dezoxinivalenol-3- β -D-glükózid (DON-3G), mely a növényi detoxifikációs mechanizmusok eredményeképp jön létre, egyre növekvő problémát jelent (Berthiller és mtsai., 2013; Kuhnem és mtsai., 2015). Ennek előfordulási adatai és toxikussága alig ismert és az is, hogy hidrolízise a belekben milyen gyakran fordul elő. A DON toxicitását azzal is összehangba kell hozni, hogy a mikotoxin keverékek milyen hatással vannak rá. Ez a kérdés annál is fontosabb, mivel a gomba fajok jelentős része számos mikotoxin termelésére is képes egyidejűleg (Schollenberger és mtsai., 2005) és az élelmiszereket egyszerre több gomba faj is fertőzheti (**6. ábra**), ráadásul a komplett étrendben több élelmiszer is szerepel egyidejűleg (Streit és mtsai., 2012). Sajnos a mikotoxin kombinációk toxicitása nem minden esetben megjósolható az egyes mikotoxinok különálló hatásai alapján. A legfrissebb eredmények alapján az interakció típusa nagyban függ a toxin keverék átlagos koncentrációjától is és nem csak az egyes toxinok egyéni reprezentáltságától (Alassane-Kpembé és mtsai., 2013). A szinergista hatásokról egyelőre nem állnak rendelkezésre adatok, így ezek megértése még várat magára.



6. ábra: Példa a gomba fertőzések egyidejű előfordulására a természetben (*A. niger*: fekete, *A. flavus*: zöld, *F. verticillioides*: halvány rózsaszín)

(Dr. Tóth Beáta felvétele)

2.5.2. Zearalenon

A zearalenonok nem rendelkeznek akut toxikus hatással és nem hozták őket összefüggésbe emberi vagy állati fatális mikotoxikózissal. Ezek a mikotoxinok ösztrogén hatású toxinok, így sertésekben és kísérleti állatokban számos ösztrogén szindrómában mutatták ki a szerepüket. A zearalenonok egy olyan nagy, gomba eredetű vegyület családot alkotnak, melyek nonaketid prekursorból származtathatóak és számos ciklizációs és modifikációs lépésen mennek keresztül a szintézisük során. A zearalenon génklaszter 25 kb méretű a *F. graminearum* genomjában (Kim és mtsai., 2005; Gaffoor és Trail, 2006). Bizonyított, hogy négy, szorosan kapcsolt gén szükséges a zearalenon bioszintéziséhez. A *F. graminearum*-on kívül számos további faj képes zearalenon bioszintézisre (Logrieco és mtsai., 2002).

2.5.3. Fumonizinek

A fumonizinek az élelmiszer eredetű, karcinogén mikotoxinok egy csoportját alkotják, melyeket először 1988-ban mutattak ki (Gelderblom és mtsai., 1988) egy *F. verticillioides* (Sacc.) Nirenberg kultúrából. Még ugyanebben az évben felderítették a fumonizinek struktúráját (Bezuidenhout és mtsai., 1988) és bebizonyították, hogy a fumonizin B₁ felelős a lovak leukoenkefalomaláciájáért (Marasas és mtsai., 1988). A fumonizinek kukoricában

előforduló széleskörű megjelenése következtében vizsgálták e mikotoxinok emberre gyakorolt karcinogén kockázatát is. A *F. verticillioides* által termelt toxinokat a 2B karcinogének csoportjába (talán karcinogén) sorolták (IARC, 1993). A kimutatásuk óta leírt 28 fumonizin analógot 4 csoportba sorolták be. Ezek az A, B, C és P fumonizinek csoportjai. A fumonizin B csoportba tartozik a toxikológiai szempontból legfontosabb és legnagyobb mennyiségben előforduló FB₁, valamint az FB₂ és FB₃ is (Marasas, 1996). Az FB₁ általában az összes fumonizin koncentráció 70-80%- ért felelős, míg az FB₂ 15-25%-ot, az FB₃ pedig 3-8%-ot tesz ki (Branham és mtsai., 1993; Marín és mtsai., 1995; Dixit és mtsai., 2007). Az FB₁ esetében közel 100 különböző izomert írtak le az évek során (Bartók és mtsai., 2006; 2010; 2014).

15 *Fusarium* fajról bizonyították eddig, hogy képesek fumonizineket termelni. Ezek közül 8 a *Liseola* szekcióba tartozik, beleértve a *F. verticillioides* (MP-A) fajt is. A különböző *Fusarium* fajok fumonizin termelési képessége rendkívül különböző. A legfontosabb fumonizin termelők a *F. verticillioides* és a *F. proliferatum*, a széleskörű elterjedtségük, az általuk termelt magas mikotoxin koncentrációk, a kukoricán magas előfordulási gyakoriságuk és az általuk okozott állati mikotoxikózisok miatt (Ross és mtsai., 1990; 1992). E két faj kivételével, a többi faj esetében, körülbelül az izolátumok fele termel mikotoxint (Nelson és mtsai., 1992). A *F. verticillioides* izolátumok jelentős része képes a fumonizin termelésre és a faj által legnagyobb koncentrációban termelt FB₁ értéket Dél-Afrikában (17 900 mg/kg, Alberts és mtsai., 1990) mutatták ki laboratóriumi körülmények között. A legmagasabb *Fusarium* fajok által termelt FB₁ koncentráció (31 000 mg/kg) viszont egy szemes kukoricán nevelt *F. proliferatum* izolátumhoz köthető (Castellá és mtsai., 1999).

Annak ellenére, hogy a fumonizinek különböző szerkezetű molekulák, az állati szfingolipid metabolizmusra gyakorolt gátló hatásuk igen sokrétű és komplex. A fumonizinek agyi léziókat, leukoenkefalomaláciát okoznak a lovakban, melyek végzetes hatásúak már kis mennyiségű szennyezett táp elfogyasztása esetén is. Emellett tüdővizenyőt okoznak sertéseknél, de karcinogén hatásúak a rágcsőkre is, valamint az ezzel szennyezett élelmiszerek fogyasztása epidemiológiailag összeköttetésbe hozható a nyelőcső rákkal és a születési rendellenességekkel. A kukorica csíranövények fertőződésének vizsgálata során bizonyítást nyert, hogy a fumonizinek képesek a *F. verticillioides* virulenciáját növelni. A faj virulenciájához nem feltétlenül szükségesek és önmagukban nem is elegendőek a fertőződés előre haladásához (Desjardins és mtsai., 1995). Annak ellenére, hogy a fumonizint nem termelő törzsek ugyanolyan mértékű csőpenészt voltak képesek okozni mesterséges fertőzési körülmények között, mint amelyek termeltek mikotoxint (Desjardins és Plattner, 2000). Williams és mtsai. (2006, 2007) vizsgálatai alapján pozitív korreláció figyelhető meg a kukorica

csíranövények levél sérülései és a *F. verticillioides* fumonizin termelése között. A *F. verticillioides* a növekvő víz stressz hatására kezdi el a mikotoxin termelést, míg a *F. proliferatum* függetlenül ettől (Marín és mtsai., 2010). Fanelli és mtsai. (2012) vizsgálatai alapján a *F. proliferatum* fumonizin termelő képessége változik a különböző színű fényvel történő megvilágítás esetén. Szignifikáns inverz korreláció áll fent továbbá a gyökértömeg, a szármagasság és a csíranövény gyökeréhez kapcsolható fumonizin koncentráció között is.

Pel és mtsai. (2007) vizsgálatai alapján az *Aspergillus niger* genomjában is jelen van a fumonizin génklaszter, mely nagyfokú hasonlóságot mutat a *F. verticillioides* genomban megtalálhatóval. Borutova és mtsai. (2012) eredményei alátámasztják azt a hipotézist, hogy ezeknek a gomba fajoknak és mikotoxinoknak a többsége nem egyedül fordul elő. A minták elemzése szignifikáns összefüggést mutatott ki a fumonizin B₁ és B₂ és az aflatoxin B₁ és B₂ előfordulása között.

2.5.4. Aflatoxin

Az aflatoxinok olyan másodlagos anyagcseretermékek, mikotoxinok, melyeket elsősorban az *Aspergillus* nemzetség tagjai termelnek, közülük is az *A. flavus*, *A. parasiticus*, *A. nomius*, *A. tamarii*, *A. pseudotamarii*, *A. bombycis* és az *A. ochraceoroseus* (Cary és mtsai., 2005). Legnagyobb mennyiségben a trópusi és szubtrópusi területeken fordul elő kukorica, mogyoró és földimogyoró termésén. Az aflatoxin elsősorban a betakarítás előtti időszakban, szántóföldi körülmények között halmozódik fel a mezőgazdasági termékekben, de raktári kórokozóként is jelentős szerepük van az *Aspergillus* fajoknak. Az aflatoxin kontaminációja szempontjából legfontosabb fajok az *A. flavus* és az *A. parasiticus*. Az aflatoxin analógok szempontjából legnagyobb mennyiségben az aflatoxin B₁ és B₂ fordul elő, de emellett fontos szerepük van a G₁ és G₂ analógoknak is. Az *A. flavus* elsősorban B₁ és B₂ toxinokat termel, míg az *A. parasiticus* mind a 4 fontos szerkezeti variánst.

Az 1960-as évek óta ismert, hogy az aflatoxin hepatotoxikus hatással rendelkezik és rákot okoz több állatfajban is (hepatocelluláris karcinóma: HCC). 1993-ban az International Agency for Research on Cancer (IARC) a legmagasabb, 1-es fokozatú karcinogénnek minősítette az aflatoxint, mely egyben azt is jelentette, hogy bizonyíték van arra, hogy az aflatoxin kitétség májrákot okoz (IARC, 1993). Nagy mennyiségben az aflatoxin jelenléte az emberből akut aflatoxikózist és májfunkció leállást válthat ki az aflatoxin dialdehid kialakulása révén (Kensler és mtsai., 2011). Egyes becslések szerint több milliárd ember van kitéve a kontrollálatlan mennyiségű aflatoxin fogyasztásnak az élelmiszerekben (Strosnider és mtsai., 2006). Az emberi

és állati egészség megóvása érdekében több mint 100 ország jelölt ki maximális tolerálható mennyiségeket az élelmiszerekben az aflatoxinnal szemben (Wu és Guclu, 2012). Egyes országok csak a legtoxikusabb és legkarcinogénebb aflatoxin B₁-el szemben, míg más országok az összesített aflatoxin (aflatoxin B₁, B₂, G₁ és G₂) koncentrációval szemben, míg továbbiak mindkettővel szemben alkottak határértékeket. Néhány ország külön határértékekkel rendelkezik az aflatoxin M₁-el szemben is, mely az AFB₁ metabolizált formája, mely a tehenekben alakul ki, aflatoxinnal szennyezett takarmány fogyasztása esetén (FAO, 2004).

Az aflatoxin gazdasági hatásait figyelembe véve több becslés is született. Egyes becslések szerint az USA komplett mezőgazdaságának 500 millió dolláros veszteséget jelent (Vardon és mtsai., 2003), míg mások csak a kukorica esetében számoltak 163 millió dollárt (Wu, 2006). Az EU által felállított szigorú szabályozás az afrikai exportőröknek 670 millió dolláros kiesést jelent (Otsuki és mtsai., 2001).

Az aflatoxin bioszintézis során több mint 25, enzimek által katalizált reakció megy végbe, mely enzimeket kódoló gének már jól ismertek (Minto és Townsend, 1997; Yabe és Nakajima, 2004). Az *A. parasiticus* genomjának vizsgálata alkalmával lokalizálták az aflatoxin génklasztert, mely mintegy 70 kb méretű (Yu és mtsai., 2004). Az *A. flavus* és *A. nomius* esetében is ugyanez a génklaszter volt jelen (Ehrlich és mtsai., 2005).

A bioszintézisben részt vevő legfontosabb gének az aflR és aflS regulátor gének és az aflD, aflM, aflO, aflP és az aflQ struktúrgének. Az aflR regulátor gén hatását számos tanulmány vizsgálta (Chen és mtsai., 2004; Smith és mtsai., 2007). Az aflatoxin kártétele ellen a GAP (good agricultural practice) alkalmazásával (Munkvold és mtsai., 2003) és rezisztencia nemesítéssel lehet védekezni (Brown és mtsai., 2003). A betakarítást követően a megfelelő szárítás, szállítás és tárolás szükséges ahhoz, hogy a szemek károsodását és az aflatoxin szennyezettséget elkerüljük, amellett, hogy a megfelelő nedvesség tartalmat is biztosítjuk (Turner és mtsai., 2005).

Az aflatoxin szennyezettség előrejelzésére az adott szezonban, már számos módszert és rendszert fejlesztettek ki. Ezek közös sajátossága, hogy egy adott területet fednek le nagy határfokkal és bemeneti jelnek elsősorban az időjárási adatok minél részletesebb és nagyobb felbontású mátrixát használják. Az első ilyen módszer kifejlesztése a 2003. évi nagy aflatoxin szennyezettség után indult meg Olaszországban (Battilani és mtsai., 2008). Ez a modell a hőmérsékleti adatokat és a talaj nedvességtartalmát használja inputnak a kukoricacsövek szemtöltődésének időszakában. A hibridek FAO számának bevitele, a vetésidő és a tőszám értékek alkalmazása még tovább javította a rendszer határfokát. Afrikában egy más típusú modell született (Masuoka és mtsai., 2010). Az időjárási adatokat itt 1 km-es felbontásban

rendezik adatbázissá, felhasználva a magassági adatokat, a talaj borítottságát és a vegetáció sűrűségét. Az AFLA-maize modell (Battilani és mtsai., 2013) az *A. flavus* fertőzési ciklusát figyelembe véve, az időjárási adatokat felhasználva jelzi előre a kukorica minták *A. flavus* fertőzöttségét és aflatoxin kontaminációját, napi bontásban. A rendszer továbbfejlesztésével már 73%-os megbízhatóságot tudtak elérni. A rendszer további fejlődését a hibridek rezisztencia tulajdonságainak betáplálásával lehet elérni.

2.5.5. A mikotoxin koncentrációkra vonatkozó szabályozások és határértékek

A fonalas gombákat és az általuk termelt másodlagos anyagcsere termékeket, a mikotoxinokat nagyon nehéz feladat semlegesíteni, így szükség van egy egységes szabályozásra, mely a kereskedelmi termékek szabad áramlása ellenére is biztosítja az egészséges takarmányt és élelmiszereket az egész EU-ban. Ez a szabályozás kiterjed a kóros elváltozásokat még nem okozó mennyiségekre is, így csökkentve az élelmiszerbiztonsági kockázatot. A határértékek felállításánál elsődleges szempont a termékek tárolására, további feldolgozására és fogyaszthatóságára való felkészülés. A vegyületek szempontjából az a cél, hogy meghatározzák azt a legkisebb mennyiséget, mely még nem okoz az állatkísérletekben tüneteket. A kísérleti szisztéma EU szinten rögzített és általánosan elfogadott protokoll alapján határozza meg a mikotoxin határértékeket. Ezen állatkísérletek adatait vonatkoztatják az emberekre, figyelembe véve az esetleges magasabb fokú érzékenységet (pl. gyermekek). A határértékek meghatározásánál minden esetben tkkg értékeket vesznek alapul. Az Acceptable Daily Intake (ADI) mérőszáma mg/testtömeg kg/nap értékekkel határozza meg a maximálisan tolerálható mikotoxin mennyiségeket. Az egyes élelmiszereket tematikusan külön csoportokba sorolják és a vonatkozó határértéket a gyakoriság és napi átlagos fogyasztás figyelembe vételével határozzák meg. Magyarországon szintén az EU rendeletek (EC 2006/576/EC, EC No 1881/2006, EC 2002/32/EC, EC No 1126/2007) által meghatározott határértékek követendők. A teljes fumonizin koncentráció felső határa feldolgozatlan kukorica minták esetén 4000 µg/kg, feldolgozott élelmiszereknél 200-1000 µg/kg. A DON esetében ezek az értékek 1750 µg/kg, illetve 750 µg/kg. Az AFB₁-re előírt határértékek 0,1 és 8 µg/kg között változnak, az élelmiszer típusától függően. Az aflatoxin esetében a B₁ variánsra külön határértékek vonatkoznak, míg egy másik az összesített mennyiséget szabályozza (1 és 8 µg/kg).

2.6. A csőpenészekkel szembeni rezisztencia vizsgálatok során alkalmazott mesterséges inokulációs módszerek

Az elmúlt évszázadban számos módszert fejlesztettek ki a kukorica csőpenészek mesterséges előidézésének céljából. A mesterséges inokulációs kísérletek alapvetően három lépésből állnak, melyek magukban foglalják az inokulum előkészítését, az inokulációt és a kiértékelés folyamatát. A metodikai fejlesztések alapját a természetesen úton előforduló rovarrágás jelentette. A *Fusarium* és az *Aspergillus* fertőződést elősegítheti a rovarrágás, mely sebzési felületen a gomba spórák és hifák könnyebben megtelepednek és növekednek. A kukoricamolylepke (*Ostrinia nubilalis*) és az amerikai kukoricabogár (*Diabrotica virgifera virgifera*) mellett a gyapottok-bagolylepke (*Helicoverpa armigera*) a legjelentősebb kártevők ebből a szempontból Magyarországon. Hatásukra jelentősen megnőhet a fertőzöttség mértéke és toxintartalom is (7. ábra).



7. ábra: Rovar kártétel mentén kialakult *Aspergillus* (bal oldal) és *Fusarium* (jobb oldal) csőpenész
(A szerző saját felvételei)

A mesterséges inokulációs kísérletek alapjai Young nevéhez fűződnek (1943). Kísérletei során fertőző inokulummal átitatott fogvájókat használt. Ullstrup és mtsai. (1970) két módszert alkalmaztak, melyek során a bibéket permetezték makrokonídium szuszpenzióval, 1-2 héttel a

nővirágzás után, valamint micéliummal átszőtt fogvájókat helyeztek a bibecsatornába teljes nővirágzás előtt 1 héttel. Mindkét módszert alkalmasnak ítélték a genotípusok közötti differenciálásra. Sutton és Baliko (1981) szintén a fogvájós és a bibe permetezős módszert alkalmazták, kiegészítve egy bibecsatorna injekciós technikával. Vizsgálataik alapján a bibecsatornás injekciós módszer nem működött megfelelő hatásfokkal a hibridek közötti differenciálás terén. Schaafsma és mtsai. (1993) ezzel szemben a konídium szuszpenzióval történő bibecsatornás fertőzési módszert alkalmasnak ítélték erre a célra. Chungu és mtsai. (1996) már 6 módszert vizsgáltak a genotípusok tesztelése céljából. Minden módszer esetében konídium szuszpenziót használtak a fertőzések kivitelezésére.

Az általuk használt módszerek:

- bibecsatorna fertőzése hipoderm tűvel (a csövet egy 4 ágú tűvel fertőzték, melyet a felhasználás előtt szuszpenzióba mártottak)
- csőszúrás és permetezés (az előző módszer módosított verziója, melynél a 4 ágú tűt szuszpenzió nélkül szúrták a csőbe, majd porlasztással jutatták a sebzésre a szuszpenziót)
- Pamut pálcikás módszer (a cső közepén sebzést ejtettek, majd ebbe helyezték a szuszpenzióval átitatott pamut pálcikát)
- csővégi inokulációs módszer (a cső végén akkumulátoros fűróval sebzést ejtettek, majd ebbe helyezték a szuszpenzióval átitatott pamut pálcikát)

Módszertani szempontból az első két módszert 6-7 nappal, míg a többit 15 nappal a bibekitolás kezdete után alkalmazták. Az inokulációs módszerek között szignifikáns különbségeket találtak. A legsúlyosabb fertőzöttséget a csőszúrásos, valamint a pamut pálcikás módszer adta, de ezek közül a leginkább lokalizált fertőződést a csőszúrásos verzió okozta. Ez a módszer, kisebb mértékű sebzése miatt közel állt a rovarok által ejtett sebzéshez. Mesterházy és mtsai. (1982, 1983) a Young-féle fogvájós módszert továbbfejlesztve jutottak el egy magasfokú differenciálást lehetővé tevő mesterséges inokulációs módszerhez, melynek során a fertőzéseket az 50%-os nővirágzás utáni 6. napon kell végrehajtani. A módszer alkalmazása során a fertőző inokulumot tartalmazó fogvájót a cső közepébe szúrják, miután azon egy ár segítségével sebzést ejtettek. Ez a fenológiai stádium, a csövek fejlettségi állapotát figyelembe véve megfelelő volt a mesterséges inokulációs kísérletek kivitelezésére.

Általánosságban elmondható, hogy a járványok sporadikus előfordulása miatt a rezisztens kukorica genotípusok szűrése mesterséges fertőzést követel meg, mivel a természetes

fertőződés hektikussága és megbízhatatlansága nem ad kellő támpontot a rezisztencia viszonyok megállapítására. A bibecsatornás, szuszpenziós módszer hosszas vizsgálatok alapján kevésbé bizonyult megbízhatónak, mint a sebzést alkalmazó, fogvájós módszer (Gulya, 1980; Schaafsma és mtsai., 1993; du Toit és mtsai., 1999; Silva és mtsai., 2007). Mesterházy és mtsai. (2020) 40 hibrid alkalmazásával hasonlították össze a fogvájós és bibecsatornás, szuszpenziós eljárást. Míg a bibecsatornás módszer által előidézett fertőződés gyakorlatilag kontroll szintű volt a négy évig tartó kísérletben, addig a fogvájós módszer 3,5-szer nagyobb fertőzöttséget és hasonló mértékű toxin szennyezettséget eredményezett. Drepper és mtsai. (1990) kísérletei értelmében az inokulációs eszköz átmérőjével pozitív korrelációban volt a csőpenész és szárkorhadás mértéke. A különböző módszerek között szignifikáns különbségek voltak. Bata és mtsai. (1997) vizsgálatai alapján a genotípusok ellenállósága és a toxintartalom között nem minden esetben van szignifikáns összefüggés. Emellett rávilágítottak arra is, hogy a vegetációs időszak hossza jól korrelál a rezisztencia viszonyokkal.

A különböző fertőzési módszereket a **8. ábrán** mutatjuk be.



8. ábra: Szuszpenzió injektálás (*bal felső sarok*), szuszpenzióba mártott több pontos, sebzéses (*jobb felső sarok*) és az általunk alkalmazott fogvájós fertőzési módszer (*alsó képek*)

(*Bal felső fotó forrása: Nagypál B.*

A többi kép: Dr. Tóth Beáta felvételei)

2.7. A csőpenészt okozó kórokozókkal szembeni ellenállóság genetikai háttere

2.7.1. A növényi ellenállóság általános tényezői

A szártó korhadás és a különböző csőpenészek a kukorica, gazdasági szempontból legfontosabb megbetegedései. A legjelentősebb gomba nemzetségek, melyek e betegségek kialakulásában szerepet játszhatnak a *Fusarium*, *Giberella*, *Diplodia* és csőpenészek esetében még az *Aspergillus*. Mivel a csőpenészek kialakulásában jelentős hatása van a környezeti tényezőknek,

ezért az ellenálló genotípusok nemesítése mellett fontos szerepe van az ellenállóság genetikai hátterének megismerésének is. A kukorica, toxikus gombákkal szembeni ellenállósága kapcsán elmondható, hogy a hibridek és a beltenyésztett vonalak ellenállósága között jelentős különbségek voltak (**9. ábra**) és a vonalak rezisztencia szintje általában alacsonyabb szintű (Clements és mtsai., 2004).



9. ábra: *A. flavus*-szal szemben rezisztensebb és fogékonyabb genotípus

(A szerző saját felvételei)

A növényi rezisztencia genetikai hátterét több aspektusból is meg lehet közelíteni. Ezek közül az egyik az, amikor a növény a rovarkártéttel szemben bizonyul ellenállóbbnak az anyagcseréje következtében. Barros-Rios és mtsai. (2011) vizsgálatai alapján a kukoricamoly elleni rezisztencia lehetséges oka a kéreg és bélszövet sejtfal összetétele lehet, melyet rezisztens és érzékeny beltenyésztett vonalak esetében vizsgáltak. Minden összetevő magasabb koncentrációban volt jelen a kéregben, mint a bélszövetben, kivéve a galaktózt és néhány észtert. A rezisztens vonalak esetében jóval magasabb volt a sejtfalösszetevők koncentrációja (legkiemelkedőbb a xilóz és a diferulát-észterek aránya), mint az érzékeny vonalak esetében és a moly lárvák kártétele negatív korrelációban állt az összes diferulát szinttel, mely alapján az a következtetés vonható le, hogy a sejtfal vastagsága jelenti a rezisztencia kulcsát.

A rezisztencia genetikai háttere mellett számos, a genotípusra jellemző tulajdonság is befolyásolja a csőpenész rezisztenciát. Ilyen többek között a csövek csuhélevelekkel való borítottságának mértéke. További külső tényezők is befolyásolhatják a megbetegedés mértékét. A gomba populáció genetikai variabilitása is befolyásolhatja a betegség súlyosságának és a mikotoxin kontaminációjának variabilitását (Carter és mtsai., 2002).

A fumonizin kontamináció egyik legjelentősebb befolyásoló tényezője a kukoricaszem minőségi összetétele. A legalacsonyabb fumonizin kontaminációt azokban az esetekben

detektálták, amikor még alacsony volt a szemek keményítő tartalma, vagy magas volt az amilóz: amilopektin arány. Russin és mtsai. (1997) a kukoricaszem összetételének szerepét vizsgálták az *A. flavus*-szal szembeni rezisztencia viszonylatában. Az általuk vizsgált, *A. flavus*-szal szemben rezisztensebb genotípusok perikarpiuma több viaszt tartalmazott, mint az érzékenyebb genotípusok. A rezisztensebb genotípus elektronmikroszkópos képén bőséges viasz lerakódás látszódott és érdes felszínű volt, míg a sima felszínű fogékony hibrid szeménél ez nem volt meg.

A fertőződés erőssége mellett, a fajra jellemző mikotoxin koncentráció is fontos tényező, és a mikotoxin felhalmozódással szembeni rezisztencia mértéke is hibrid függő (Szabó és mtsai., 2018). A két tényező összefüggését számos kutatás vizsgálta. Toldi és mtsai. 2008-ban 30 hibridet vizsgáltak a *F. graminearum*, *F. culmorum* és *F. verticillioides*-szel szembeni rezisztencia vonatkozásában, mely során a DON és a FB₁-B₄ szennyezettség szintén meghatározásra került. A fertőzőtségi értékek és a toxin koncentrációk között magas fokú korreláció állt fent, míg az évek és a különböző fajokkal szembeni rezisztencia viszonyok között csak mérsékelt.

2.7.2. A különböző patogén gomba fajokkal szembeni rezisztencia háttere

A genetikai rezisztencia alapvetően két csoportra osztható. A kvalitatív rezisztencia általában egy fő rezisztencia génre (R gén) vezethető vissza, mely egy magas fokú rassz specifikus rezisztenciát okoz egy faktoral szemben. A kvantitatív rezisztencia nem köthető egy gén jelenlétéhez, hanem multigénes tulajdonság, mely egy közepes szintű, nem rassz specifikus rezisztenciát hoz létre. Ennek létrehozásához szükséges genomi régiókat nevezik QTL-eknek. A kvalitatív rezisztencia legtöbbször a hiperszenzitív reakcióval (HR) jár együtt. A kvantitatív rezisztencia sokkal hosszabb hatással rendelkezik és lassabb lefolyású választ jelent. Míg a kvalitatív rezisztencia általában biotróf patogének ellen hatásos, addig a kvantitatív rezisztencia leginkább a hemibiotróf és nekrotróf patogének ellen hatékony és lefolyása nagyban függ az adott kórokozótól.

Pérez-Brito és mtsai. 2001-ben két trópusi eredetű kukorica populációt vizsgáltak, melynek során kimutatták, hogy a csőpenész-ellenállóság poligénes tulajdonság viszonylag alacsony h^2 értékkel. Későbbi vizsgálatok alapján találtak genetikai variabilitást a bibecsatornás fertőzéssel szembeni ellenállóság, valamint az alacsonyabb mikotoxin tartalom esetében, de emellett rendkívül erős a környezet hatása is (Loeffler és mtsai., 2008). Kovács és mtsai. (1994) eredményei alapján a rezisztensebb szülő vonalak párosításai nagyobb eséllyel eredményeztek

rezisztens hibridet a keresztezések során. A hibridek általában az ellenállóbb szülőre hasonlítottak a rezisztencia vonatkozásában.

A gyökerek a növény egész élete során fogékonyabbak a fertőzésre, mint a szár. Emellett szoros kapcsolatot fedtek fel a csírákori ellenállóság és a csőpenész rezisztencia között, valamint a *F. graminearum* és *F. culmorum* gomba fajokkal szembeni ellenállóság között is (Mesterházy és mtsai., 1982; 2000; Szabó és mtsai., 2018). Martin és mtsai. (2012) két *F. graminearum*-mal szemben rezisztens és két fogékony vonalat és azok keresztezéseit, valamint backcross utódait vizsgálták. Az eredmények alapján additív génhatást fedtek fel. Domináns hatás a csőpenész rezisztencia terén egy, míg a DON felhalmozódással szembeni rezisztencia terén négy keresztezésben mutatkozott.

Clements és mtsai. számos vizsgálatot végeztek a *F. verticillioides* rezisztencia genetikai hátterével kapcsolatban és rávilágítottak arra, hogy a csőpenész ellenállóság és a mikotoxin felhalmozódás mértékét elsősorban a genotípusok genetikai rezisztencia szintje határozza meg (Clements és mtsai., 2003). Több, mint 1000 beltenyésztett vonal, a fogékony FR1064 genotípussal történő tesztelése alkalmával szignifikáns genetikai variabilitást találtak mind a csőpenész rezisztencia, mind pedig a mikotoxin koncentráció vonatkozásában, de teljes rezisztencia egyik esetben sem volt megfigyelhető (Clements és mtsai., 2004). Robertson-Hoyt és mtsai. 2006-ban két kukorica populációt vizsgáltak és a négyes kromoszómán olyan QTL szakaszt találtak, mely nagy valószínűséggel szerepet játszik a *F. verticillioides* csőpenész és fumonizin felhalmozódással szembeni rezisztencia kialakításában is. Lanubile és mtsai. (2011; 2012; 2014; 2015) számos vizsgálatot végeztek a rezisztencia genetikai hátterének és a növények sejtszínű immunitásának megértése érdekében. Lanubile és mtsai. (2011) munkájuk korai éveiben a *F. graminearum*-mal és *A. flavus*-szal szemben rezisztens vonalak használatát elegendőnek gondolták a nemesítés során, a *F. verticillioides*-szel szembeni rezisztencia elérésére is.

Presello és mtsai. (2011) kukorica genotípusok ellenállóképességét vizsgálták *F. proliferatum*-mal szemben, mesterséges fertőzéssel. Ezzel a fajjal szemben ellenálló és fogékony genotípusokat keresztezték egymással és az utód nemzedéket vizsgálták *F. verticillioides* és *F. graminearum* fertőzéssel szemben mesterséges körülmények között. Eredményeik arra engedtek következtetni, hogy egy *Fusarium* fajjal szembeni ellenállóság elegendő lehet az egész nemzetséggel szembeni védelemhez. A rezisztens csoport tagjai *F. verticillioides*-szel szemben ellenállóak voltak és rendkívül alacsony volt a fumonizin tartalmuk is. Pozitív korreláció állt fent a csőpenész mértéke és a fumonizin szennyezettség között. *F. graminearum* esetében is hasonlókat tapasztaltak.

Menkir és mtsai. (2008) *A. flavus*-szal és az aflatoxin felhalmozódással szemben rezisztens amerikai genotípusokat és szintén rezisztens afrikai vonalakat kereszteztek és az utódokat KSA (kernel screening assay) segítségével rangsorolták. Az egyes csoport tagjai között szignifikáns genotípus különbségek voltak a vonalak között és némelyik a szülői anyagoknál is jobbnak bizonyult, mely a heterózis hatásnak volt tulajdonítható. Luo és mtsai. (2011) *A. flavus*-szal mesterségesen inokulált szemeket inkubáltak 72 órán át KSA (mesterséges szem inokuláció) keretein belül, mely monitorozta a szemek reakcióját a gomba fertőzés hatására. A szemek egy rezisztens és egy fogékony genotípusból származtak. A két genotípus elsősorban a génexpressziós hálózatban különbözött egymástól a gombafertőzés hatására indukálódott válasz tekintetében.

Warburton és mtsai. (2011) az aflatoxin felhalmozódással szembeni rezisztencia elérése érdekében azonosítottak QTL-eket, egy bizonyítottan rezisztens és egy fogékony genotípus használatával létrejött térképező populáció segítségével. Több nagy hatású QTL-t azonosítottak az 1., 3., 5. és 10. kromoszómákon, míg kisebb hatásúakat a 4. és 9. kromoszómákon. Becslésük szerint egy több QTL-es modell alapján a fenotípus variációk 46%-át tudták lefedni ezekkel. Később bemutattak (Warburton és mtsai., 2013) egy új asszociációs térképezési panelt, az akkoriban elérhető összes aflatoxin felhalmozódással szemben rezisztens vonal bevonásával és genotipikus és fenotipikus karakterizálással kiegészítve. A vizsgálatok alapján a rezisztens vonalak jelentős része a mexikói Tuxpeño fajtától származhat, mely az *A. flavus*-szal szembeni rezisztencia forrása lehet. Annak ellenére, hogy akadnak rezisztens genotípusok *A. flavus*-szal szemben, a nemesítést mégis hátráltatja, hogy nincsenek megfelelő nemesítési markerek, melyek a RAP-ok formájában (rezisztencia asszociált fehérjék) jelennének meg.

Paul és mtsai. (2003) egy további QTL-t azonosítottak, mely szerepet játszik a kukorica esetében, az aflatoxin felhalmozódással szembeni rezisztencia kialakulásában. Warburton és mtsai. (2011) további két QTL-t azonosítottak, melyek a patogén stressz válaszban szerepet játszanak. Brooks és mtsai. (2005) vizsgálatai alapján minden esetben jelentős környezet-genotípus hatás érvényesült és a tulajdonságok heritabilitása is alacsony szintű volt. Általánosságban elmondható, hogy a talált QTL-ek jelentős része alacsony, vagy mérsékelt hatású volt, de ezek közül kettő a fenotípusok 20%-ban előfordult és több termőhelyen is. Annak ellenére, hogy jelentős nehézségek léphetnek fel az *A. flavus*-szal szembeni rezisztencia nemesítésben, mégis megvalósíthatónak tűnik a rezisztens genotípusok megalkotása. Erre vonatkozó eredmények már születtek néhány beltenyésztett vonal esetében (Williams és Windham, 2003). További vizsgálatok magas fokú korrelációt tártak fel rekombináns beltenyésztett vonalak esetében az *A. flavus* és *F. verticillioides* által előidézett fertőzések és

az általuk termelt mikotoxinok felhalmozódása között (Robertson-Hoyt és mtsai., 2007). Hasonló eredményt tudott felmutatni kutató csoportunk is (Szabó és mtsai., 2018). Az eredmények szerint az *A. flavus*-szal szembeni rezisztencia erősen kvantitatív, poligénikus tulajdonság, melyből adódik, hogy a rezisztens fenotípus számos pozitív tulajdonság kombinációjából jön létre (Yin és mtsai., 2014; Fountain és mtsai., 2015). Az eddig azonosított QTL-ek csöpenész rezisztenciában betöltött szerepe azonban mérsékelt.

A *F. graminearum*-mal szembeni rezisztencia genetikai háttere hosszú ideje kutatott terület, mely sok publikáció megszületését hívta életre (Chiang és mtsai., 1987; Cullen és mtsai., 1983; Schaafsma és mtsai., 1997) és bizonyítást nyert a rezisztencia genetikai variációinak magas száma is. Liakat-Ali és mtsai. (2005) szintén a *F. graminearum*-mal szembeni rezisztencia genetikai hátterét kutatták, melynek során egy RI (resistant inbred) populációt hoztak létre egy rezisztens és egy fogékony vonal keresztezésével. A QTL-ek térképezése során a bibecsatornás mesterséges fertőzés és szemfertőzés esetében különböző rezisztencia QTL-eket találtak és ezek kifejeződése is változott a környezeti tényezők hatására.

2.7.3. A patogén gomba fajokkal szembeni rezisztencia molekuláris alapja

A rezisztencia kutatásának egy lehetséges módszere egy csoport, egymással rokonságban nem álló, különböző rezisztencia viszonyokkal rendelkező beltenyészett vonal analízise és olyan összetett protein profilok létrehozása, melyek alapján a genetikai háttér különbségei kizárhatóak és segítenek a RAP-ok azonosításában. A proteomikai analízis folyamán fontos, hogy a protein profil különbségek a konstitutív protein szintekből adódjanak, de az sem zárható ki a vizsgálatok során, hogy a vonalak közötti protein profilbeli különbségeket növelheti a növény növekedése során, ha patogénnel találkozik.

Lanubile és mtsai., 2012 a kukorica genotípusok expressziós profilját is vizsgálták *F. verticillioides* fertőződés után. A kifejeződő gének 7,3%-a játszott szerepet a sejt védelmében, ám alaposabb vizsgálat alapján ezek már a fertőződés előtt kifejeződtek. A ROS (reactive oxygen species) eltávolítására szolgáló enzimek (aszorbát-peroxidáz, kataláz, összes peroxidáz és szuperoxid-dizmutáz) vizsgálata alkalmával fedték fel, hogy a rezisztens genotípusban már magas szinten fejeződtek ki ezek az enzimek a fertőződés előtt is, míg a fogékonyban csak a fertőződés létrejöttkor. A globális transzkripciós analízis (Lanubile és mtsai., 2014) átfogó képet adott azokról a génekről, melyek termékei részt vesznek a patogén felismerésében és az ezt követő jelátvitelben, valamint a különböző folyamatokat irányító transzkripciós faktorokról, fitohormonokról és másodlagos anyagcsere termékekről, melyek a

F. verticillioides-szel szembeni rezisztenciában szerepet játszanak. Munkájuk során fontos markereket írtak le, melyek hozzájárulhatnak a kórtanilag rezisztens kukorica genotípusok megalkotásában. Korábbi vizsgálataikat megerősítve, a rezisztens genotípusok már egy emelkedettebb transzkripciós szinttel és enzimaktivitással „várták” a patogén megjelenését. A PR gének magasfokú kifejeződése végig megmaradt a folyamat során. Az érzékeny genotípusban ezzel szemben csak a patogén megjelenése idején aktiválódtak a ROS-al összefüggésbe hozható gének (Lanubile és mtsai., 2015). Campos-Bermudez és mtsai. (2013) rezisztens és fogékony beltenyésztett vonalak *F. verticillioides*-szel szembeni ellenálló képességét vizsgálták mesterséges szemfertőzési módszer alkalmazásával. A génexpresszió vizsgálat során a rezisztens genotípusban nem tapasztaltak jelentős változást, így valószínűsíthető, hogy egy konstitutív kifejeződésű gén/géncsoport áll a rezisztencia hátterében, mely alapvető védelmet biztosít, míg ez a fogékony genotípusban nincs jelen.

Yuan és mtsai. (2010) felfedtek egy olyan gént, mely egy guanilil cikláz proteint kódol és mely összefüggésbe hozható a *F. graminearum* ellenállósággal. Nagyon magas szintű homológia mutatkozott a rezisztens és fogékony genotípusban jelenlévő allélek között, azonban van néhány nukleotidnyi különbség az UTR és intron régiókban. 2 markert jelöltek meg a 7. és 8. kromoszómán, melyek kapcsolatba hozhatóak a rezisztenciával. A gén terméke sokkal gyorsabban és nagyobb mennyiségben jelent meg a rezisztens genotípusban, mint a fogékonyban, a mesterséges fertőzés hatására. Ez összhangban van Lanubile és mtsai. (2012; 2015) eredményeivel. Cao és mtsai. (2011) a *F. graminearum*-mal szembeni rezisztencia hátterét vizsgálták. Bibecsatornás *F. graminearum* fertőzést követően vizsgálták a bibékben a sejtfalhoz kötött hidroxifahéjsav koncentrációjának változását. A változások nem mutattak összefüggést a genotipikus rezisztenciával. A ferulinsav szintje csökkent a gomba extracelluláris hidrolitikus enzimek által lebontott hemicellulózhoz köszönhetően, míg a p-kumarinsav és a diferulátok mennyisége megnövekedett, de ez a gomba növekedését nem befolyásolta. A ferulinsav szintjének csökkenése azonban a rezisztens genotípusban sokkal lassabban ment végbe, mely egy más típusú degradációt feltételez. Más típusú hemicellulóz struktúra és xilanáz inhibitor jelentheti a *F. graminearum*-mal szembeni rezisztencia hátterét.

Chen és mtsai. (2004) *A. flavus* fertőzésre érzékeny és rezisztens genotípusok vizsgálata során az embriókból a glioxaláz-1 enzimet azonosították, mely szerepet játszhat a fajjal szembeni rezisztenciában. A *glx-1* kódoló gén kifejeződését vizsgálták szemfertőzés után és ennek során az enzim működése fokozódott a rezisztens genotípusokban. Továbbá a fertőzések hatására növekedett a metilglioxál (MG) mennyisége az érzékeny vonalakban, mely egyben növelte az aflatoxin felhalmozódást is, annak köszönhetően, hogy fokozott kifejeződésre

készítette az *aflR* gént az aflatoxin génklaszter szabályozó régiójában. Az eredmények alapján a glioxaláz-1 enzim kulcsfontosságú szerepet tölt be az MG szint alacsonyan tartásában és a rezisztencia létrejöttében. Munkatársaival (Chen és mtsai., 2006) azonosítottak egy patogenezishez köthető (PR) fehérjét, mely ötszörös mennyiségben termelődött a rezisztens genotípusokban, az érzékenyekhez viszonyítva. Ezen ZmPR-10 protein számos vizsgálat alapján gátolta az *A. flavus* növekedését. További vizsgálatok (Chen és mtsai., 2007) során további 10 fehérjét vizsgáltak, melyek túlermelését detektálták rezisztens genotípusokban. A peroxiredoxin-antioxidáns (PER1) enzim kifejeződését vizsgálva peroxidáz aktivitást mutattak. Chen és mtsai. (2012) különböző rokonsági körben álló beltenyésztett vonalak embrióit és endospermium fehérjéit vizsgálták proteomikai módszerekkel. A stressz hatására megemelkedett RAP-ok szintjét vizsgálva, olyan fehérjéket találtak, melyek antifungális hatásúak, stressz indukáltak és tárolási vagy szabályzó szerepet töltenek be. A homológ szekvenciákat vizsgálva számos olyan fehérjét találtak, melyek közreműködnek az *A. flavus*-szal és aflatoxin felhalmozódással szembeni rezisztenciában.

Kelley és mtsai. (2012) vizsgálati eredményeik alapján az *A. flavus*-szal szembeni rezisztenciáért több független mechanizmus a felelős. Az általuk vizsgált fogékony genotípusban a hiperszenzitív reakció kialakulásáért a glicin-gazdag RNS kötő fehérje 2-t kódoló gén a felelős, míg a rezisztens genotípusban a nuclear pore complex protein *YUP85* génje expresszáldott nagyobb mennyiségben.

Myroie és mtsai. (2013) is rávilágítottak arra, hogy megbízható rezisztencia marker hiányában nehéz az *A. flavus* és az aflatoxin felhalmozódással szembeni rezisztencianemesítés. Találtak egy gént, mely egy kloroplasztisz prekuzort kódol és melyben többszörös polimorfizmus van. Ezt használták fel egy marker fejlesztéséhez (Mississippi Marker 1-MpM1). A marker megkülönbözteti a rezisztenciát és fogékonyságot okozó allélt. Emellett a marker segítségével a 4. kromoszómán azonosítottak egy addig ismeretlen QTL-t, mely az aflatoxin felhalmozódással szembeni rezisztenciában játszik szerepet. Ezek felhasználásával megvalósítható a MAS.

Lanubile és mtsai. (2017) az atoxinogén és toxinogén *A. flavus* izolátumok által kiváltott fertőződés hatására kifejeződő géneket vizsgálták. Az atoxinogén izolátum fertőzésének hatására magasabb expressziós szint valósult meg a patogenezishez és oxidatív stresszhez köthető fehérjék esetében, valamint a transzkripció faktoroknál és lipoxigenázoknál. Az atoxinogén faj jóval erőteljesebb növekedést mutatott és valószínű emiatt képes csökkenteni az aflatoxin szennyezettséget is.

Számos korábban leírt, stresszhez köthető protein (HSP) is differenciált kifejeződést mutat a különböző ellenállósággal rendelkező kukorica genotípusokban, kihangsúlyozva a szerepüket a patogén támadása esetén. A növények ilyen stresszhatás esetén, nemcsak a specifikus antifungális proteinek transzlációját aktiválják, hanem számos egyéb stresszhez köthető fehérjét is expresszálnak, melyek közül meg kell említeni a növényi kis HSP-eket, melyek molekuláris chaperonként funkcionálnak, hogy megerősítsék a szemek stressz toleranciáját (Sun és mtsai., 2002).

Emellett számos egyéb stressz indukált RAP is kifejeződik az embrióban, köztük a glioxaláz, hideg szabályozású protein és cupin domaint tartalmazó fehérjék, emellett az endospermiumban a globulin-2, szuperoxid dizmutáz, peroxiredoxin és kései embriogenezis proteinek. Ezek közül a ZmCORp hideg szabályozású protein gátolja az *A. flavus* konídiumok csírázását és a micéliumok növekedését (Baker és mtsai., 2009). A cupin domaint tartalmazó fehérjék szerepe az *A. flavus* rezisztenciában még nem bizonyított, de enzimeként és transzkripció faktoroként funkcionálnak (Dunwell és mtsai., 2004).

A szárazság stressz és az aflatoxin kontamináció közötti igen erős pozitív korreláció következtében (Payne, 1998) érdemes lehet e fehérjék vizsgálatba történő bevonása is. Számos antifungális fehérje is differenciált expressziót mutatott a rokon, rezisztens és fogékony vonalak esetében, mint például egy 14 kDa méretű tripszin-inhibitor és egy 22 kDa méretű zeamatin/tripszin inhibitor. Mindkettő gátolta az *A. flavus* növekedését (Guo és mtsai., 1997; Chen és mtsai., 1998). A RAP-ok egy új kategóriáját is sikerült kimutatni, melybe a lipid transzfer proteinek szabályozói is tartoznak és egy eukarióta transzlációs iniciációs faktor. A növényi lipid transzfer proteinek széles körben jelen lévő lipid kötő fehérjék, melyek részt vesznek számos stressz válaszban, míg a transzlációs iniciációs faktor a növény növekedésében és differenciálódásában is szerepet játszik (Wang és mtsai., 2009). A felsorolt konstitutív expressziójú proteinek csoportja fontos szerep tölthet be a gazdanövény downstream RAP expressziójának szabályozásában az *A. flavus* fertőzés hatására, de ennek bizonyítása még folyamatban van.

2.8. A kórokozókkal szembeni védekezés további lehetőségei

A különböző csőpenészekkel és toxin felhalmozódással szembeni védekezés több tényező figyelembevételével történhet, melyek mind fontosak, azonban hatékonyságuk a megelőzésben és védekezésben igen eltérő lehet (**5. táblázat**). A kukorica esetében a fungicides védekezés kevésbé kiforrott technológiája miatt nem elterjedt. A különböző agrotechnikai specifikációk közül kiemelhetjük a korai vetés előnyét, valamint az öntözés megfelelő ütemben történő időzítését, de emellett kiemelten fontos a rovarok ellen történő inszekticides védekezés, valamint az időben történő betakarítás. A legnagyobb szerepe azonban mégis a hibrid választásnak van (Munkvold és mtsai., 2014; Logrieco és mtsai., 2021). A megfelelő rezisztencia tulajdonságokkal rendelkező genotípusok jelentik a legnagyobb biztonságot. Kiemelten fontos tehát a rezisztencia nemesítés szerepe a védekezésben és a megelőzésben is. A csuhéleveleken túl növekvő csutka nyílt behatolási kaput jelent a rovaroknak, valamint a gombáknak is. A felfelé álló cső könnyebben beázik és nehezebben is szárad, ami növeli a fertőzés valószínűségét. A csőre simuló csuhélevelek jobban megvédik a cső felszínét, és kevesebb a fertőződés kockázata. Az érés során lehajló csövek csuhélevelei védik a szemeket, így a nedvesedés lehetősége kisebb.

A gombabetegségek számára sok esetben a rovarok kártétele biztosít fertőzési kaput, így az ellenük való inszekticides védekezéssel jelentős mértékben csökkenthető a fertőződés kockázata (Munkvold és mtsai., 1997; Blandino és mtsai., 2008; de Curtis és mtsai., 2011). A mikotoxin kontamináció valószínűsége azonban nem mindig mutat szoros korrelációt a fertőződés mértékének csökkenésével (de Curtis és mtsai., 2011; Szabó és mtsai., 2018).

A génmódosítást és e termékek használatát engedélyező országok esetében a különböző Bt kukorica hibrideket tesztelték a rovarkártétel, a gomba fertőződés és mikotoxin kontamináció tekintetében, melynek során szignifikánsan alacsonyabb értékeket kaptak minden vizsgálat alkalmával, mint a génmódosítást nem tartalmazó genotípusok esetében (Munkvold és mtsai., 1997; de la Campa és mtsai., 2005; Folcher és mtsai., 2010).

	<i>Fusarium</i> típusú csőpenész ¹	<i>Gibberella</i> típusú csőpenész ²	<i>Aspergillus</i> csőpenész ³
	Fumonizinek	DON, zearalenon	Aflatoxinok
Hibrid választás	++	++	++
Rovarirtás	++	+	++
Korai vetés	++	++	+
Öntözés tervezés	++	+	++
Időben elvégzett betakarítás	++	++	++
Megfelelő vetésforgó, talajművelés	+/?	++	+/?
Növénytűrség	+	+	+
Műtrágyázás	+	+	+
Gyomirtás	+/?	?	+/?
Biokontroll	?	?	+
Vetőmag kezelés	?	?	?
Fungicid kezelés	?	?	?

++: nagy hatás; +: kisebb hatás; ?: bizonytalan hatás vagy hiányos bizonyíték

¹Elsődlegesen a *F. verticillioides*, *F. proliferatum* és *F. subglutinans* okozza.

²Elsődlegesen a *F. graminearum* és *F. culmorum* okozza.

³Elsődlegesen az *A. flavus* és az *A. parasiticus* okozza.

5. táblázat: A toxikus gombákkal és az általuk termelt toxinokkal szembeni megelőzési és védekezési lehetőségek kukoricában, hatékonyságuk szerint rangsorolva

(Forrás: Munkvold, 2014)

A megfelelő agrotechnikai gyakorlat alkalmazása is rendkívül fontos, mivel a vizsgálatok alátámasztották, hogy az alacsonyabb tőszám, korábbi vetésidő és a kiegyensúlyozott nitrogén trágyázás csökkenti a gomba fertőződés és a mikotoxin kontamináció kockázatát (Blandino és mtsai., 2008; 2009). A megfelelő talajmunkák kivitelezése szintén fontos lépés a kórokozóval fertőzött növényi maradványok ártalmatlanítására (Naef és mtsai., 2006; Wakelin és mtsai., 2008; Folcher és mtsai., 2009).

A leghatékonyabb védekezési mód a toxikus gombafajokkal szemben a szintetikus fungicid készítmények használata, melyekből hatalmas választék áll rendelkezésre, mind a hatóanyagok, mind az előállítók tekintetében. A legjelentősebb hatóanyag típusokat és az ezekbe sorolható hatóanyagokat az **6. táblázat** összegzi (A kukorica kultúrákban Magyarországon jelenleg csak a Prosaro rendelkezik hatósági engedéllyel). A kukorica esetében jelentősebb problémát jelent a megfelelő fungicid kezelések ütemezése és kivitelezése, mivel a csövek teljesen zártak és a hatóanyagok megfelelő transzlokációjára van szükség, hogy kifejtsék hatásukat. A különböző kereskedelmi és engedélyeztetési vizsgálatok mellett alapvetési programok is vizsgálták a fungicidek (*in vitro*) hatását, mely megerősítette a hatóanyagok széles spektrumú hatását, de előfordult, hogy a táptalajhoz adagolva emelték a mikotoxinok koncentrációját a kontrollhoz

képest (Falcao és mtsai., 2011; García-Cela és mtsai., 2012). A fungicidek hatékonyságát jelentősen befolyásolja, hogy milyen rezisztencia tulajdonságokkal rendelkező genotípust szeretnénk megvédeni és a különböző környezeti tényezők, beleértve az időjárást és a kezelések helyszínét (Small és mtsai., 2012; Cruz és mtsai., 2014). Mivel a globális felmelegedés folyamatosan zajlik, a meglévő fungicid hatóanyagok hatékonysága is folyamatosan változik, így ezeket akklimatizálni szükséges az új körülményekhez (García-Cela és mtsai., 2012). A kereskedelmi adatokat a tudományos vizsgálatok is alátámasztották, melyek szerint a triazol hatóanyag család bizonyult a leghatékonyabbnak, míg a strobilurinok pedig a legkevésbé hatékonyak (Shin és mtsai., 2014). Mivel a korábban említettek alapján a fungicidek hatékonysága nagyban függ a környezeti tényezőktől, a kijuttatás technológiájától, emellett érzékenyek lehetnek a klíma változására is, de mégis a kezelni kívánt genotípus rezisztencia szintje jelentheti a legsarkalatosabb pontot. A vegyszeres védekezés, beleértve a konvencionális és bio hatóanyagokat is, akkor lehet igazán hatékony, ha ezeket megfelelő ellenállóságú hibriden alkalmazzák. Ezt a célt szolgálják a nemesítő házak rezisztencia nemesítési programjai, melyek a kukorica esetében jelentősebb szereppel rendelkeznek, mint például a búza esetében, ahol a virágzás és terméskötés folyamata is nyitott.

6. táblázat: A legjelentősebb fungicid hatóanyag típusok, hatóanyagok

Hatóanyag típus		Hatóanyag
DMI-fungicidek	Triazolok	Tebukonazol
		Protiokonazol
		Metkonazol
		Epoxiokonazol
		Mefentriflukonazol
		Bromukonazol
		Tetrakonazol
	Triadimenol	
	Diazol	Prokloráz
Karboxamidok		Bixafen
		Fluxapiroxad
		Fluopiram
Strobilurinok		Piraklostrobin
		Azoxitrobin
Morfolin származékok		Fenpropimorf
		Spiroxamin
Kinazolin		Proquinazid
Benzofenon		Metrafenon
Benzimidazol	Karbendazim	Tiofanát-metil
Benzamid		Cyflufenamid

3. ANYAG ÉS MÓDSZER

3.1. Szántóföldi kísérletek, 2012-2013

A vizsgálatokat 2012-2013 között végeztük Kiszomboron, a Gabonakutató Nonprofit Kft. tenyészkertjében és a szerbiai Bácskertesén (Kapusina). A bácskerteszi kísérlet kivitelezésében az Újvidéki Egyetem (Univerzitet u Novom Sadu) volt segítségünkre. Az adatok a szántóföldi felvételezés és a laboratóriumban végzett mérések eredményeiből származnak.

3.1.1. Vizsgált kukorica genotípusok

A kísérlet 2 évében 10-10 szegedi és újvidéki kukorica hibridet vizsgáltunk két termőhelyen (**7. táblázat**). A különböző hibridek köztermesztésben voltak a vizsgálati években és FAO szám tekintetében 290 és 690 között helyezkedtek el.

7. táblázat: A kísérletekben vizsgált kukorica genotípusok (2012-2013)

Jelölés	Genotípus	Eredet	FAO	Hasznosítás
Sz-M1	GKT288	Gabonakutató	290	szemes
Sz-M2	Sarolta	Gabonakutató	290	szemes
Sz-M3	Sze349	Gabonakutató	370	szemes
Sz-M4	GK Boglár	Gabonakutató	370	szemes
Sz-M5	SzeTC367	Gabonakutató	380	szemes
Sz-M6	Sze386	Gabonakutató	390	szemes/siló
Sz-M7	Sze363	Gabonakutató	400	szemes
Sz-M8	SzeTC465	Gabonakutató	450	szemes/siló
Sz-M9	Kenéz	Gabonakutató	410	szemes
Sz-M10	Sze521	Gabonakutató	560	siló
Sz-M11	NS 3014	NS Seme	380	szemes/siló
Sz-M12	NS 4015	NS Seme	460	szemes/siló
Sz-M13	NS 4023	NS Seme	480	szemes
Sz-M14	NS 4030	NS Seme	440	szemes
Sz-M15	NS 5043	NS Seme	550	szemes/siló
Sz-M16	NS 640	NS Seme	660	szemes/siló

Sz-M17	NS 6010	NS Seme	690	szemes/siló
Sz-M18	NS 6030	NS Seme	660	szemes/siló
Sz-M19	NS 6102	NS Seme	610	szemes/siló
Sz-M20	NS 5051	NS Seme	580	szemes/siló

3.1.2. A szántóföldi kísérletek jellemzői

3.1.2.1. A talaj jellemzői

3.1.2.1.1. Kiszombor

A kiszombori tenyészkert (46°11'14.9"N 20°24'10.3"E) a mélyben sós réti csernozjom talajon helyezkedik el, mely a felszíntől karbonátos (pH 6,8-7,2) talajtípusok közé tartozik (**8. táblázat**). Magas agyagtartalmú, kötött terület, aszályos időben a sorok között repedések képződhetnek.

8. táblázat: A kiszombori tenyészkert talajának jellemzői (Kiszombor, 2012)

Talaj adottságai		Értékek	
pH		6,98	semleges
Arany-féle kötöttségi érték		58	agyag
Össz. só	%	0,05	alacsony sótartalmú
CaCO ₃	%	4,8	közepesen meszes
Humusz	%	2,21	közepes
NO ₃ -N	mg/kg	5,8	gyenge
P ₂ O ₅		280	igen jó
K ₂ O		317	igen jó
Mg		376	jó
Na		41	megfelelő
Zn		1	gyenge
Cu		5,4	jó
Mn		128	túlzott
SO ₄		1,5	gyenge

3.1.2.1.2. Bácskertes

A bácskertes tenyészkert (45°43'11.9"N 18°59'21.4"E) a Vajdaságban jellemző réti csernozjom talajon helyezkedik el, mely Szerbia legtermékenyebb talajtípusa. A tenyészkert talaja humuszban gazdag, sötét színű, porózus szerkezetű, mely a felesleges vizet átengedi. Magas agyagtartalmú, kötött terület, aszályos időben a sorok között repedések képződhetnek. A kísérlet éveiben nem végeztek felmérést a talaj tápanyag ellátottságát illetően.

3.1.2.2. A kísérleti helyszínek meteorológiai adottságai

3.1.2.2.1. Kiszombor

A vizsgált két év időjárása igen különböző volt. A júniustól szeptemberig tartó időszak esetében magasabb átlaghőmérsékleti értékeket mértünk 2012-ben. A vegetációs időszak hőingása szintén jóval magasabb volt 2012-ben. A tenyészidőszakban (május-szeptember) lehullott csapadék mennyisége 2012-ben fele annyi volt és a csapadékos napok száma is hasonlóképp alakult (2012: 29, 2013: 54) (**8. táblázat**).

3.1.2.2.2. Bácskertes

A két vizsgálati év időjárása nagyon különböző volt Szerbia esetében is. Az átlagos középhőmérsékleti értékek 2012-ben voltak magasabbak (a kukorica tenyészidőszaka alatt átlagosan 1,5 °C-kal). A hőingás tekintetében szintén 2012-ben találtunk magasabb értékeket, míg a csapadék mennyiségének szempontjánól, 2013 tenyészidőszaka 2,5-szeres mennyiségű csapadékot hozott. Csapadékos napokból szintén kevesebb volt 2012-ben (2012: 35, 2013: 60) (**9. táblázat**).

9. táblázat: A kísérleti helyszínek meteorológiai adatai a kukorica tenyészidőszakában (Kiszombor-Bácskertes, 2012-2013).

Kiszombor												
Hónap	T _{közép} (°C)		T _{min} (°C)		T _{max} (°C)		Max. hőingás (°C)		Havi csap. (mm)		Csap. napok száma	
	2012	2013	2012	2013	2012	2013	2012	2013	2012	2013	2012	2013
Április	12,8	12,3	-5,5	-2,1	31,3	24,9	21,4	18,4	47,2	82,0	16	11
Május	17,7	18,2	6,2	7,6	32,0	31,4	20,6	18,5	59,1	104,5	10	20
Június	23,1	20,8	10,2	9,6	36,8	36,5	18,7	17,6	31,5	55,8	9	11
Július	24,8	23	12,5	10,9	38,0	38,3	20,4	20,4	43,8	24,2	5	4
Augusztus	23,9	23,6	9,6	11,3	39,2	37,7	21,4	19,8	5,0	44,6	1	5
Szeptember	19,6	16,2	3,1	6,1	32,6	27,2	19,0	18,2	28,9	59,0	4	14
Október	12,3	13,2	-2,1	-1,6	24,9	24,6	18,4	16,4	82,0	28,6	11	10
Bácskertes												
Hónap	T _{közép} (°C)		T _{min} (°C)		T _{max} (°C)		Max. hőingás (°C)		Havi csap. (mm)		Csap. napok száma	
	2012	2013	2012	2013	2012	2013	2012	2013	2012	2013	2012	2013
Április	12,7	12,9	6,4	6,0	19,2	19,4	12,8	13,4	40,2	37,5	15	9
Május	17,5	16,8	11,1	11,9	23,5	22,6	12,4	10,7	56,5	127,7	12	19
Június	22,6	20,4	14,8	14,4	29,3	25,9	14,5	11,5	24,3	57,8	8	14
Július	25,1	23,3	17,6	15,5	32,3	30,3	14,7	14,8	22,2	18,3	7	7
Augusztus	24,1	22,9	15,0	16,0	32,8	30,3	17,8	14,3	6,9	62,1	1	8
Szeptember	18,9	15,5	12,5	10,4	26,7	21,7	14,3	11,3	30,1	83,1	7	13
Október	11,9	13,0	7,0	7,8	19,1	20,1	12,1	12,3	51,3	56,5	15	8

(Forrás: Kiszombor és Bácskertes meteorológiai mérőállomások)

3.1.2.3. Alkalmazott agrotechnika

3.1.2.3.1. Kiszombor

A kísérleti területen az elővetemény az első évben őszi búza volt, míg a második évben szója, így az alkalmazott agrotechnikai műveletek is hasonlóak voltak. A kísérleti területen, 2011 őszen középmező lazítást, míg 2012 őszen mélyszántást végeztünk. Ezután mindkét esetben tárcsázás következett. A tavaszi vetés előtt a talaj előkészítését mindkét kísérleti évben kétszeri kombinátorozással biztosítottuk. A kísérlet első évében ezt műtrágya szórással párosítottuk. További műtrágya kijuttatásra 2012 őszen került sor [komplex (10x15x15; N 34%) 600/300

kg]. A vetés mindkét évben Nodet szemenkénti vetőgép segítségével történt. A gyomirtás során Lumax (Syngenta, 37,5 g/l meztion+375,0 g/l S-metolaklór+125,0 g/l terbutilazin), Dezormon (Nufarm, 600 g/l 2,4-D dimetilamin só) és Shadow 200 (BASF, 200 g/l dimethenamid-P, 200 g/l metazachlor és 100 g/l quinmerac) került felhasználásra. A kukorica tenyészidőszaka alatt a gyomosodásnak megfelelően kétszeri kultivátorozást végeztünk, majd szükség esetén kézi kapálást. A kísérletek kivitelezése során nem volt szükség inszekticid kezelésekre. A kukorica állomány mindkét évben három alkalommal kapott 20-20 mm öntözővizet.

3.1.2.3.2. Bácskertes

A kísérleti területen az elővetemény mindkét évben őszi búza volt, így az alkalmazott agrotechnikai műveletek is megegyeztek és mindkét évben ugyanazok a folyamatok zajlottak le. A búza aratását követően 348 kg KAN (27%) műtrágyát szórtak ki a területre, amit a talajba be is dolgoztak. Az alapművelés őszi mélyszántás volt 26-32 cm mélyen, amit egy simítóval zártak le. Vetés előtt 174 kg karbamid starter trágyát juttattak ki a területre, majd kombinátorral készítették elő a magágyat. A vetés Nodet szemenkénti vetőgép segítségével történt. A gyomirtás során ecetsavas kezelést végeztek. A kukorica tenyészidőszaka alatt a gyomosodásnak megfelelően végeztek kézi kapálást. A kísérletek kivitelezése során nem volt szükség inszekticid kezelésekre.

3.1.3. Szántóföldi vizsgálatok

3.1.3.1. Tenyészkeri elrendezés

A vizsgált genotípusokat három tényezős, négy ismétléses elrendezésben vetették el. A parcellák kilenc sorból álltak. Két-két *F. culmorum*, *F. graminearum*, *F. verticillioides* és *A. flavus* izolátummal mesterségesen fertőzött sort, valamint egy kezeletlen kontrollt tartalmaztak. A parcella hossza 4,4 méter, az ismétléseket elválasztó út pedig 1,2 méter széles volt. A sortáv 75 cm, a tőtáv 20 cm, míg a soronkénti növényszám 22 darab volt, ami 66667 növény/ha állománysűrűségnek felel meg. A parcellák alapterülete ennek értelmében 29,7 m² volt. A vizsgált kukorica genotípusok véletlen blokk elrendezésben kerültek elvetésre. A kísérlet elrendezése Bácskertesben is hasonlóképpen alakult.

3.1.3.2. A mesterséges fertőzéshez használt fajok és izolátumaik

A mesterséges inokulációhoz két-két *F. culmorum*, *F. graminearum* (Schwa.), *F. verticillioides* és *A. flavus* izolátumot választottunk ki (**10. táblázat**). A morfológiai jellemzők vizsgálata mellett a *Fusarium* fajok molekuláris azonosítása során a translációs elongációs faktor 1- α (TEF) gén egy 700 bp méretű régióját amplifikáltuk (Geiser és mtsai., 2004). Az *A. flavus* fajszerű, molekuláris alapon történő azonosítását a kalmudin gén egy 600 bp méretű régiója alapján végeztük el (Geiser és mtsai., 2000). A kapott szekvenciákat a NCBI GenBank adatbázisával vetettük össze (<http://blast.ncbi.nlm.nih.gov>). Az *Aspergillus* izolátumok (*in vitro*) toxintermelését előzetesen ellenőriztük (Davis és mtsai., 1966), ugyanis az izolátumok jelentős része nem képes szántóföldi aflatoxin termelésre, minthogy az ehhez szükséges génklaszter csak részben vagy egyáltalán nincs jelen a genomjukban.

10. táblázat: A mesterséges inokulációhoz használt izolátumok (2012-2013)

Izolátum	Kódszám	Génbanki azonosító	Nemzetség	Faj	Izolálás forrása	Izolálás helyszíne
Fc1	12.375	NGBAB142627	<i>Fusarium</i>	<i>culmorum</i>	búza	Szeged
Fc2	12.551	NGBAB142626	<i>Fusarium</i>	<i>culmorum</i>	búza	Szeged
Fg1	13.38	-	<i>Fusarium</i>	<i>graminearum</i>	búza	Szeged
Fg2	13.05	-	<i>Fusarium</i>	<i>graminearum</i>	búza	Kiszombor
Fv1	18TE	NGBAB142625	<i>Fusarium</i>	<i>verticillioides</i>	kukorica	Kiszombor
Fv2	Sz 1.1.1.	NGBAB142624	<i>Fusarium</i>	<i>verticillioides</i>	kukorica	Szeged
Asp1	171	NGBAB043764	<i>Aspergillus</i>	<i>flavus</i>	kukorica	Kiszombor
Asp2	126	NGBAB043760	<i>Aspergillus</i>	<i>flavus</i>	kukorica	Kiszombor

3.2. Szántóföldi kísérletek, 2017-2018

A vizsgálatokat 2017-2018 között végeztük Kiszomboron, a Gabonakutató Nonprofit Kft. tenyészkertjében. Az adatok a szántóföldi felvételezés és a laboratóriumban végzett mérések eredményeiből származnak. A toxin vizsgálati eredményeket a Bonafarm-Bábolna Takarmány Zrt. analitikai laboratóriuma szolgáltatta.

3.2.1. Vizsgált kukorica genotípusok

A kísérlet 2 évében 18 kereskedelmi forgalomban kapható kukorica hibridet vizsgáltunk (**11. táblázat**). A különböző hibridek köztermesztésben voltak a vizsgálati években és FAO szám tekintetében 350 és 730 között helyezkedtek el. A kísérletekben egy pozitív (Korimbos) és egy negatív kontroll (DKC4541) került beállításra, a rezisztencia sorrend felállításának megkönnyítése érdekében.

11. táblázat: A kísérletekben vizsgált kukorica genotípusok (2017-2018)

Kód	Hibrid	FAO	Tulajdonos
MKK 1	P 9241	350	Corteva Agriscience
MKK 2	DKC4590	340-350	Bayer
MKK 3	DKC4541	360-380	Bayer
MKK 4	P9537	370	Corteva Agriscience
MKK 5	P9903	390	Corteva Agriscience
MKK 6	DKC4943	390-410	Bayer
MKK 7	DKC4717	380-400	Bayer
MKK 8	PR37F80	420	Corteva Agriscience
MKK 9	Fornad	420	KITE
MKK 10	4517	520	Kiskun
MKK 11	P9911	450	Corteva Agriscience
MKK 12	Cardixxio Duo	460-480	RAGT
MKK 13	Siló Star	490	Gabonakutató
MKK 14	DKC5542	530-540	Bayer
MKK 15	DKC5830	550-570	Bayer
MKK 16	Szegedi 521	560	Gabonakutató
MKK 17	Korimbos	550-600	KWS
MKK 18	Valkür	730	Kiskun

3.2.2. A szántóföldi kísérletek jellemzői

A vizsgált két év időjárása igen különböző volt. 2017 csapadék eloszlása egyenletesebb volt a tenyészidőszak folyamán. Ebben az évben a csapadékos napok számát tekintve inkább május-június-július volt meghatározó, míg 2018-ban ez inkább egy hónappal előrébb csúszott. Az átlaghőmérsékletek alapján 2018 melegebb tavaszt hozott, majd egy hűvösebb júniust. A tenyészidőszak hátrélvő részében közel azonosak voltak a csapadék adatok a két évben (**12.-13. táblázat**). Az összesített csapadék mennyisége a teljes tenyészidőszak folyamán 2017: 229,6 mm; 2018: 345,6 mm.

12. táblázat: A kísérleti helyszín meteorológiai adatai a kukorica tenyészidőszakában (Kiszombor, 2017).

Év	Hónap	T _{ÁTLAG} (°C)	T _{min} (°C)	T _{max} (°C)	Hőingás (°C)	Csapadék (mm)	Csapadékos napok száma
2017	Április	11	0	26,1	21,3	40,7	15
2017	Május	18,2	4	32,7	22	39,3	11
2017	Június	23,1	10,7	34,6	17,8	49,4	13
2017	Július	23,3	12,2	36,9	19,2	45,4	8
2017	Augusztus	24,2	10,7	38,3	19,7	18,8	5
2017	Szeptember	18	7,5	33,1	18,1	36,0	11

13. táblázat: A kísérleti helyszín meteorológiai adatai a kukorica tenyészidőszakában (Kiszombor, 2018).

Év	Hónap	T _{ÁTLAG} (°C)	T _{min} (°C)	T _{max} (°C)	Hőingás (°C)	Csapadék (mm)	Csapadékos napok száma
2018	Április	16,4	2,8	30,5	22,7	15,4	8
2018	Május	20	10,2	31	18,3	51,4	10
2018	Június	21,6	9,6	32	16,3	116,3	15
2018	Július	23,6	11,3	32,7	15,1	65,6	14
2018	Augusztus	24,6	13,3	34,1	16,6	59,1	7
2018	Szeptember	18,9	1,2	33,4	19	37,8	8

(Forrás: Kiszombor meteorológiai mérőállomás)

A kísérleteket 2017. május 5-én és 2018. április 28-án vetettük. A tőállomány valamivel 70000 növény/ha alatt maradt. A nitrogén, foszfor és kálium kijuttatására két lépésben került sor, 170/100/100 kg/ha arányban. A gyomirtást és a rovarirtást a GK Kft. Kukoricanevelési Osztálya által alkalmazott protokoll szerint hajtottuk végre. Az állományban a rovar kártétel nem volt jelentős.

3.2.3. Szántóföldi vizsgálatok

3.2.3.1. Tenyészkerti elrendezés

A vizsgált genotípusokat három tényező, három ismétléses, véletlen blokk elrendezésben vetettük el. A sorok hossza 6 méter volt, melyeket középen ketté választottunk. Hat kezelést alkalmaztunk: két-két *F. graminearum*, *F. verticillioides* és *A. flavus* izolátumot, valamint egy kezeletlen kontrollt. A parcella hossza így 3 méter, az ismétléseket elválasztó út pedig 1 méter széles volt. A parcellák a kezelési terv alapján 4 sorból álltak. A sortáv 75 cm, a tőtáv 20 cm, míg a soronkénti növényszám körülbelül 30 darab volt, ami 66667 növény/ha állománysűrűségnek felel meg.

3.2.3.2. A mesterséges fertőzéshez használt fajok és izolátumaik

A mesterséges inokulációhoz két-két *F. graminearum* (Schwa.), *F. verticillioides* és *A. flavus* izolátumot választottunk ki (**14. táblázat**). Az izolátumok fajszintű besorolását szekvencia analízissel végeztük el. Az első évben használt Fg1 izolátumot gyenge agresszivitása miatt a második évben az Fg4 jelzésűre cseréltük. Az *Aspergillus* izolátumok (*in vitro*) toxintermelését előzetesen ellenőriztük (Davis és mtsai., 1966), ugyanis az izolátumok jelentős része nem képes szántóföldi aflatoxin termelésre.

14. táblázat: A mesterséges inokulációhoz használt izolátumok (2017-2018)

Izolátum	Kódszám	Génbanki azonosító	Nemzetség	Faj	Izolálás forrása	Izolálás helyszíne
Fg1	46.06	NGBAB142630	<i>Fusarium</i>	<i>graminearum</i>	búza	Kiszombor
Fg3	19.42	NGBAB142629	<i>Fusarium</i>	<i>graminearum</i>	búza	Szeged
Fg4	GB 70	NGBAB142696	<i>Fusarium</i>	<i>graminearum</i>	kukorica	Dalmand
Fv1	18TE	NGBAB142625	<i>Fusarium</i>	<i>verticillioides</i>	kukorica	Kiszombor
Fv2	Sz 1.1.1.	NGBAB142624	<i>Fusarium</i>	<i>verticillioides</i>	kukorica	Szeged
Asp1	KZT 17.12	NGBAB142601	<i>Aspergillus</i>	<i>flavus</i>	kukorica	Kiszombor
Asp2	KZT 18.11	NGBAB142602	<i>Aspergillus</i>	<i>flavus</i>	kukorica	Kiszombor

3.3. A mesterséges fertőzéshez használt fertőző anyag előkészítése

Az inokulációhoz a Young-féle fogvájós módszer (Young, 1943) módosított verzióját (Mesterházy és mtsai., 1982; 1983) alkalmaztuk. A bibecsatornás módszert is több éven át

teszteltük (Mesterházy és mtsai., 2020), de nem adott a természetes fertőződésnél nagyobb mértékű fertőződést, azaz eredménytelen maradt. Ezért alkalmazzuk a sokkal intenzívebb fertőződést okozó fogvájós módszert. A fertőző anyagokat egy több lépcsős folyamat során készítettük elő. Első lépésben a fertőzéshez szükséges natúr fogvájókat négy alkalommal kifőztük (a forrástól számított 20 percig), hogy a gombák növekedését gátló csersavaktól és tanninoktól megszabaduljunk. A folyamat végén 48 óráig szűrőpapíron szárítottuk őket, majd teljesen száraz állapotukban befőttes üvegekbe töltöttük őket. Az üvegek méretétől függően 1000-3000 darab került betöltésre. A konzervüveg tetők közepét kilyukasztottuk és vattával láttuk el őket, a megfelelő O₂ szint biztosítása érdekében. A megfelelő tápanyagellátást Czapek-Dox (Czapek, 1902; 1903; Dox, 1910; Mesterházy, 1978) tápoldattal biztosítottuk az izolátumoknak. Minden üvegebe 2 ujjnyi vastagságban rétegeztük a tápoldatot, majd lezárást követően MA-5403 típusú autoklávban (Magyarország), 1,3 bar nyomáson (körülbelül 140°C-on) sterilizáltuk őket. Az így sterilizált üvegeket egy éjszakán át hagytuk hűlni, majd steril fülke alatt felbontva őket, helyeztük el a felszínükön az inokulumokat, steril oltókacs segítségével. Az üvegeket lezártuk, majd folpack-kal zártuk körbe őket. Az így elkészített egységeket 25°C-on, 21 napig inkubáltuk sötétben (**10. ábra**).



10. ábra: Az előkészített fertőző anyag

(A szerző saját felvételei)



11. ábra: Mesterséges inokulációval megfertőzött kukoricacső (Kiszombor, 2013)

(A szerző saját felvétele)

3.4. A felhasznált fertőzési módszer bemutatása

Az inokulációt az 50%-os nővirágzás utáni 6. napon végeztük, ugyanis a módszertani kísérleteink azt mutatták, hogy a korábbi fertőzési időpont jelentősebb mértékű fertőződéssel jár, így a rezisztencia sorrend megállapítása is biztonságosabb. A kukoricacsövek középső részén steril, kézi lyukfúróval előkészített lyukba helyeztük a gombával átszótt fogvájókat. Egy csőbe egy fogvájót helyeztünk (**11. ábra**). Soronként átlagosan 18 (2012-2013) és 14 (2017-2018) csövet tudtunk fertőzni és a kilencedik/hetedik, kezelés nélküli sor esetében is ennyi csövet értékeltünk a természetes fertőződés megállapításához. A mesterséges fertőzések kivitelezése mindkét évben július második felében zajlott FAO számok szerinti sorrendben és összesen megközelítőleg 17 000 (2012-2013) valamint 11 000 (2017-2018) cső került fertőzésre évenként, illetve helyszínenként. A kukorica érése idején a mesterségesen fertőzött csöveket kézzel törtük le. A csövek letörését követően sorba raktuk őket az értékelés megkönnyítése érdekében (**12. ábra**). A csövek kézi törése, értékelése és a toxin minták

begyűjtése mindkét évben szeptember utolsó dekádjában, éréscsoportoknak megfelelő sorrendben történt.

3.5. A csőpenész borítottság mértékének meghatározása

Az értékelés során minden csövet úgy értékeltünk, hogy a fogvájó környékén látható mesterséges fertőződés kiterjedését néztük és fejeztük ki százalékosan. Egy átlagos kukorica hibrid csővéen nagyságrendileg 500 szemmel számoltunk, így az 5 szemre kiterjedő fertőzés számított 1%-nak, míg ha csak 1 szem fertőződött, az 0,2%-ot kapott. Azok a csövek, melyek a fogvájó mellett sem fertőződtek nulla értéket kaptak. A rovarkártételt hordozó csöveket az értékelésből kihagytuk. A cső egyéb részein látható természetes eredetű fertőzést is ugyanígy értékeltük. A természetes fertőződés tekintetében külön vizsgáltuk a *Fusarium* és *Aspergillus* fertőződés mértékét is, így minden vizsgált cső 3 százalékos értéket kapott. A csőenkénti 3 érték figyelembe vételével körülbelül 54 000 (2012-2013) és 33 000 felvételezett adatot jelentett kísérleti helyenként és évenként. A kísérleti helyszíneken szárprobléma nem volt, a megvizsgált növények szárkeresztmetszete egészséges volt, színük pedig zöld. Szárfelvágásra csak kontroll célból volt szükség, így a fertőzöttségi értékeket valósnak tudtuk elfogadni. Az alkalmazott értékelési rendszert az indokolja, hogy a korábbi kutatások (Reid és mtsai., 1996) a *F. graminearum* fertőzést értékelték, ahol akár a cső 100%-a is fertőződhet, így könnyebb a csöveket egy 0-5-ig terjedő skálán értékelni, míg az *A. flavus* esetében a fertőződés gyakran még az 1%-ot sem éri el, így minden érték 1 lenne, és nem lehetne a genotípusok között differenciálni. Aflatoxin esetében kilogrammonként már akár 5-6 fertőzött szem is elegendő lehet ahhoz, hogy a koncentrációt az EU határérték fölé emelje.



12. ábra: A sorba rendezett és a toxinanalízishez összegyűjtött csövek, Kiszombor, 2012

(A szerző saját felvételei)

3.6. Laboratóriumi vizsgálatok

3.6.1. A kukorica toxin minták előkészítése

A toxinanalízishez 5 átlagos fertőzöttségű csövet választottunk ki a kísérlet minden sorából (**12. ábra**). Ezek termését lemorzszoltuk, majd Omas terménydaráló 7 mm-es rostájának használatával durva darálmányt készítettünk az egész mennyiségből. Átkeverés után a mintából körülbelül 150 g-os mennyiséget különítettünk el és finomra őröltük egy Perten Laboratory Mill 3310 (Svédország) malom segítségével.

3.6.2. A kukorica minták toxinanalízise

3.6.2.1. DON toxin koncentrációjának meghatározása

Centrifugacsövekbe kimért 1 g kukoricadarára 4 ml 84/16 v/v% arányú acetonitril/víz elegyet mértünk. 2,5 órán keresztül vertikális rázógépből extraháltuk. Ezt követően 10 percen keresztül 4400 RPM-es sebességgel centrifugáltuk a mintákat. A felülúszóból 1 ml-t, 20/1 arányú alumínium-oxid/aktív szén töltetű SPE csövön keresztül, nagy nyomással átréseltünk. A tisztított anyagból 500 µl-t ampullákba mértünk, majd bepárooltuk. A visszamaradt szilárd anyagot 20/80 v/v% arányú acetonitril/víz elegyével visszaoldottuk. Vortexelés, valamint 5 perc ultrahangos kádban történő kezelés segítségével homogenizáltuk a mintát. Ezt követően Agilent 1260-as HPLC-DAD műszerrel meghatároztuk a minta DON toxin koncentrációját. A minta komponenseinek elválasztására Zorbax SB-Aq (3,5 µm, 4,6 x 12,5 mm) előtétoszloppal ellátott Zorbax SB-Aq (3,5 µm, 4,6 x 50 mm) HPLC oszlopot használtunk. A minták analízisére gradiens HPLC módszert alkalmaztunk 100% víz (A) és 50% metanolt és 50% acetonitrilt tartalmazó (B) eluensek felhasználásával. A gradiens 5% (B)-ről indult, 1,5 perc alatt 15% (B)-ra emeltük, melyet további 1,2 percig 15%-on tartottunk. Ezután 1,5 perc alatt 5% (B)-ra változtattuk az összetételt, majd további 2,3 percig tartottuk azt. Az előkészített mintákból 5 µl-t injektáltunk a HPLC-oszlopra. Az áramlási sebesség 1 ml/perc volt. Az oszlop hőmérsékletét 40°C-on tartottuk (Protokoll Mesterházy és mtsai., 1999 alapján).

3.6.2.2. Fumonizin B₁, B₂ és Aflatoxin B₁ toxinok koncentrációjának meghatározása

Centrifugacsövekbe kimért 1 g kukoricadarára, 4 ml 80/20 v/v% arányú metanol/víz elegyet mértünk. 2,5 órán keresztül vertikális rázógépből extraháltuk. Ezt követően 10 percen keresztül 4400 RPM-es sebességgel centrifugáltuk a mintákat. A felülúszóból 1 ml-t fecskendőszűrő segítségével ampullákba mértünk. A membránszűrt minták vizsgálatát Agilent 1100 HPLC rendszerrel kapcsolt elektroporlasztásos ionforrással (ESI) felszerelt Varian 500MS ioncsapdás tömegspektrométerrel végeztük pozitív ionizációs üzemmódban. A mintakomponensek elválasztására Polaris C18-A (5 µm, 10 x 2 mm) előtétoszloppal ellátott Polaris C18-A (5 µm, 150 x 3 mm) HPLC oszlopot használtunk. A minták analízisére gradiens HPLC módszert alkalmaztunk 0,1% hangyasavat tartalmazó, víz (A) és 0,1% hangyasavat tartalmazó 1:1 arányú, metanol: acetonitril (B) eluensek felhasználásával. A gradiens 30% (B)-ról indult, amely összetételt 1 percig tartottuk, majd 14 perc alatt 100% (B)-ra emeltük, melyet további 5 percig 100%-on tartottunk. Ezután 5 perc alatt 30% (B)-ra változtattuk az összetételt. Az ekvilibrálás további 5 percet vett igénybe. Az előkészített mintákból 5 µl-t injektáltunk a HPLC-oszlopra. Az áramlási sebesség 0,23 ml/perc volt. Az oszlop hőmérsékletét 35°C-on tartottuk. Az ionforrás paraméterei a következők voltak: szárítógáz (N₂) hőmérséklete 350 °C, nyomása 30 psi, a porlasztó gáz (N₂) nyomása 50 psi. A kapilláris és a „spray shield” feszültségét 5000 V, ill. 500 V értékre állítottuk (Protokoll Bartók és mtsai., 2010; Varga és mtsai., 2010 alapján).

3.7. Az adatok statisztikai feldolgozása

A kísérlet bonitálásából származó adatokat a Microsoft Excel táblázatkezelő software-rel rendeztük a statisztikai analízishez előírt formába. Az adatok rendszerezéséhez, diagramok szerkesztéséhez, a többtenyezős variancia analízisek elkészítéséhez, a korrelációs koefficiensek meghatározásához és a lineáris regresszióanalízishez is a MS Excel program beépített Analysis ToolPak modulját használtuk. A statisztikai értékelés során a három-, négy- és öttényezős varianciaanalízisek kivitelezését Weber (1967) és Sváb (1981) biometriai tanulmányai alapján készítettük el. A fő tényezők és kölcsönhatások elemzése során is Weber (1967) munkáját vettük alapul.

4. EREDMÉNYEK ÉS ÉRTÉKELÉSÜK

4.1. Szántóföldi fertőzöttségi adatok 2012-2013

A szántóföldi vizsgálatokat 2012-2013 között végeztük Kiszomboron, a Gabonakutató Nonprofit Kft. tenyészkertjében és a szerbiai Bácskertesén (Kapusina). A szántóföldi kísérleti adatok elemzése során figyelemmel voltunk arra, hogy a kísérleti átlagot leginkább a legnagyobb patogenitással rendelkező faj, a *F. graminearum* határozta meg. Ez a tényező nagyban torzította volna a többi fajjal szembeni ellenállóság vizsgálatát. A kísérleti eredmények értelmezése során első lépésben a komplett kísérlet eredményeit értékeltük ki, mindkét év és mindkét termőhely eredményeit figyelembe véve. Az értékelés második szakaszában a különböző patogén fajokkal szembeni ellenállóságot külön-külön értékeltük. A vizsgált fajok patogenitása között Pearson korrelációs analízist is végeztünk. A különböző hibridek rezisztencia viszonyait a **15. táblázat** mutatja be.

15. táblázat: A 20 kísérleti hibrid toxikus gomba fajokkal szembeni ellenállósága és a fajok által kiváltott fertőzöttségek közötti korreláció, faj átlagok a teljes csőfelület %-ában, 2012-2013 (Kiszombor, Bácskertes)

A fehér-piros színátmenetes skála a hibridek fertőzöttségét jelzi, mely esetben a fehér a legalacsonyabb, a piros pedig a legmagasabb fertőzöttségi szintet jelöli. Fg: F. graminearum, Fc: F. culmorum, Fv: F. verticillioides, Af: A. flavus

Genotípusok	Toxikus fajok				Kontroll	Átlag
	Fg	Fc	Fv	Af		
SzeTC465	1,66	1,33	0,73	0,41	0,16	0,86
Sze521	2,83	1,20	1,65	0,62	0,58	1,37
NS3014	3,44	2,02	1,92	0,61	0,30	1,66
Sarolta	3,28	2,83	2,70	0,87	0,16	1,97
NS6030	3,18	4,97	1,64	0,55	0,36	2,14
NS6102	4,82	3,42	2,12	0,30	0,13	2,16
Sze363	5,42	2,10	2,60	0,97	0,53	2,32
Kenéz	3,79	3,30	3,59	0,85	0,30	2,37
GKT288	4,07	2,17	4,84	1,09	0,15	2,46
NS5051	6,04	2,41	2,59	1,20	0,70	2,59
NS4015	6,87	2,79	2,87	0,81	0,76	2,82
NS640	8,32	3,71	1,89	0,47	0,21	2,92

Sze386	5,38	3,08	4,08	1,37	1,00	2,98
NS6010	11,73	5,42	4,33	0,32	0,16	4,39
Sze349	9,85	5,16	6,60	0,76	0,31	4,53
NS4023	12,27	2,90	7,01	0,38	0,25	4,56
SzeTC367	8,41	5,71	7,95	1,52	0,79	4,88
GK Boglár	13,59	4,56	6,43	0,90	0,49	5,19
NS5043	17,92	6,31	4,97	0,99	0,89	6,22
NS4030	15,96	8,00	7,33	0,57	0,21	6,41
Átlag	7,44	3,67	3,89	0,78	0,42	3,24
SZD 5%	2,96	1,14	1,59	0,52	0,47	0,76

	<i>Fg</i>	<i>Fc</i>	<i>Fv</i>	<i>Af</i>	<i>Kontroll</i>
<i>Fc</i>	0,7686***				
<i>Fv</i>	0,7183***	0,6502**			
<i>Af</i>	-0,0129	0,0282	0,3194		
<i>Kontroll</i>	0,1712	0,0589	0,1387	0,7182***	
<i>Átlag</i>	0,9584***	0,8540***	0,8574***	0,1541	0,2169

***p=0,001, **p=0,01,

A kísérleti átlagot figyelembe véve jól látszik, hogy a *F. graminearum* faj okozta a legerősebb fertőződést (7,44%). A *F. culmorum*, *F. verticillioides* és az *A. flavus* szignifikánsan alacsonyabb kísérleti átlaggal rendelkezett hozzá képest. A különböző *Fusarium* fajok adatsorai között szignifikáns különbségek voltak. Az *A. flavus* fertőzöttség mértéke mindösszesen tizede volt a meghatározó fajhoz képest. Az *A. flavus*-szal szembeni rezisztencia nem mutat szoros korrelációt más fajokkal, így az eredmények alapján kizárható a közös genetikai háttér. A kontroll sorok természetes fertőzöttsége csak az *A. flavus*-szal korrelál szorosabban. A többi *Fusarium* faj esetében viszont nincs korreláció sem az előbbi fajjal, sem pedig a kontroll sorral. A *F. graminearum* és *F. culmorum* által kiváltott fertőződés közötti szorosabb korreláció egybevág a korábbi saját és mások által is publikált eredményekkel. A *F. verticillioides* némileg gyengébb korrelációt mutatott ezekkel a fajokkal, így a vele szembeni rezisztencia genetikai eltérése nagyobb lehet a többi fajtól.

A kísérleti hibridek közötti különbség, a főátlagok tekintetében, körülbelül 7,4-szeres volt az ellenállóság tekintetében. Kórokozó fajonként is jelentős ingadozást figyeltünk meg a legmagasabb és legalacsonyabb fertőzöttségi szinttel rendelkező genotípusok esetében (Fg: 10,8-szeres; Fc: 6,7-szeres; Fv: 10,9-szeres; Af: 5,0-szörös és kontroll: 7,6-szeres). A legjobb rezisztencia tulajdonságokkal rendelkező hibridek közül 3 szegedi, míg egy szerb. A legmagasabb fertőzöttségi értékekkel rendelkező hibridek között 2-2 szegedi és szerb található.

3 olyan hibrid volt a kísérletben, melyek minden fajjal szemben átlag alatti eredménnyel zártak, míg 3 olyan, melyek mindennel szemben átlag felett. A két országból származó genotípusok igen változatos megoszlásban fordulnak elő minden ellenállósági csoportban. A természetes fertőződést reprezentáló kontroll sorok vizsgálatának fontosságára is fel kell hívni a figyelmet, mivel a mesterséges fertőződés vizsgálata nem minden esetben ad megfelelő támpontot az esetleges sporadikus természetes fertőződés vonatkozásában. Jó példa erre a Sz521 hibrid, mely az összes kórokozóval szemben átlag alatti fertőzöttséget mutatott, de a kontroll sorok természetes fertőződése átlag feletti volt, így ez a hibrid az eredmények alapján nagyobb figyelmet igényelhet élelmiszerbiztonsági szempontból. Az optimális esetben az adott genotípus az összes vizsgált fajjal és a természetes fertőzéssel szemben is átlag alatti értékekkel rendelkezik, hasonlóan az SzeTC465 hibridhez. Az NS4030 hibrid ezzel szemben rendkívül fogékony mindhárom vizsgált *Fusarium* fajjal szemben, de átlag alatti fertőzöttségi értékekkel rendelkezik az *A. flavus*-szal szemben és a természetes fertőződés vonatkozásában. Az eredmények megfelelő statisztikai értékelése érdekében öttényezős varianciaanalízist végeztünk, melynek eredményeit a **16. táblázat** foglalja össze. A kísérlet fő hatásait A-E jelölésekkel láttuk el, míg az első oszlop többi sorában a köztük fellépő interakciókat szerepeltettük. Mivel az C-D-E tényezők viszonylatában az interakciók nehezen voltak értelmezhetőek, ezért a 3 fő hatást egyesítve (SS és df viszonylatában is) kezeltük a táblázatban. Az összes főhatás és az interakciók is mind szignifikánsak voltak $p=0,001$ és $p=0,05$ között, de a főhatások kapcsolat rendszerét jobban felderíthetjük, ha az interakcióikat vizsgáljuk meg. Számunkra, mivel a vizsgálat célja a hibridek rezisztencia viszonyainak felderítése volt, az A tényező különböző interakciói voltak a legfontosabbak. Az A tényező $p=0,001$ szinten magasfokú szignifikanciát mutatott, míg a különböző interakciói mind alacsonyabb F értékekkel rendelkeztek nála. Szignifikáns különbségeket tártunk fel a hibrid (A) főhatás és a hibrid (A) X izolátum (B), valamint a hibrid (A) X toxikus faj (E) interakciók között. Az eredmények alapján a toxikus fajok izolátumainak patogenitása befolyásoló tényező, azonban a legmeghatározóbb tényező mégis a hibridek rezisztencia tulajdonsága. Az év (C) és a helyszín (D) főhatások MS értékei nem különböznek szignifikánsan a hozzájuk társítható kölcsönhatásoktól, ezért a főhatások dominanciája ezen interakciók felett nem meghatározott.

16. táblázat: Öttényezős varianciaanalízis a toxikus gomba fajokkal végzett rezisztencia vizsgálatokban a csőfelület borítottság mértéke alapján, Kiszombor-Bácskertes, 2012-2013

	SS	df	MS	F
Hibrid A	7810,85	19	411,10	34,11***
Izolátum B	178,40	1	178,40	14,80***
Év C	4855,54	1	4855,54	402,94***
Helyszín D	4303,72	1	4303,72	357,15**
Toxikus faj E	20654,59	4	5163,65	428,51***
AxB	1570,65	19	82,67	6,86**
AxC	3738,80	19	196,78	16,33***
AxD	5517,86	19	290,41	24,10***
AxE	10541,69	76	138,71	11,51***
BxC	21136,66	1	21136,66	1754,07***
BxD	76,63	1	76,63	6,35*
BxE	10117,77	4	2529,44	209,91***
CxD	301,22	1	301,22	24,99***
CxE	11110,72	4	2777,68	230,51***
DxE	3495,71	4	873,93	72,52***
Kölcsönhatások (3-5)	55174,00	625	88,28	7,32**
Hiba	28928,70	2400	12,05	
Összes	189513,61	3199		

***p=0.001, **p=0,01, *p=0,05

A fő tényezők összehasonlítása a kéttényezős kölcsönhatásokkal, az MS értékek alapján

AxB	Hibrid A/AxB	df: 19, 19	4,97***
AxB	Izolátum B/AxB	df: 1, 19	2,16
AxC	Hibrid A/AxC	df: 19, 19	2,09
AxC	Év C/AxC	df: 1, 19	24,67***
AxD	Hibrid A/AxD	df: 19, 19	1,42
AxD	Helyszín D/AxD	df: 1, 19	14,82**
AxE	Hibrid A/AxD	df: 19, 19	2,96*
AxE	Toxikus faj E/AxD	df: 1, 19	37,23***

***p=0.001, **p=0,01, *p=0,05

A kísérlet SZD 5% értékét a teljes adatbázis alapján számoltuk, azonban mivel az eredményesort elsősorban a *F. graminearum* adatok dominálták, ezért a kísérlet valódi értékelését ez torzította volna. Mivel az izolátumok és a különböző fajok patogenitása között nagyságrendbeli különbségek vannak, ezért az általános ANOVA nem ad elegendő információt, így ennek megfelelően az egyes fajokra külön is elvégeztük a varianciaanalízist. Az így elkészített ANOVA néhány hasonlóság ellenére mégis jelentős különbségeket mutatott (**17. táblázat**). Az analízis alapján az összes fő hatás szignifikáns volt, leszámítva az *A. flavus* esetében, ahol a

helyszín és a különböző izolátumok patogenitása közötti különbség hatása elhanyagolhatóbb volt. A *F. graminearum* esetében a hibrid főhatás (A) szignifikánsan magasabb MS értékkel rendelkezett, mint a különböző kölcsönhatások, melyekben szerepel. A *F. verticillioides* esetében nincsenek ekkora különbségek, így ezeket nem tekinthetjük szignifikánsnak. A *F. culmorum* esetében a kölcsönhatásokhoz társítható értékek voltak a magasabbak, így ebből a hibridekre nézve nem lehet következtetéseket levonni. A helyszín, év, izolátum (B x C x D) kölcsönhatás a *F. verticillioides* és a *F. culmorum* esetében magasfokú, szignifikáns különbségeket mutatott az A x B, A x C és A x D kölcsönhatásokhoz viszonyítva. A különböző fajok interakciói esetében nem lehetett egy általános megállapítást tenni, így a következtetés az, hogy a különböző fajokkal szembeni ellenállóság vizsgálata rendkívül komplex és ezeket külön kell vizsgálni. Ezt az igen jelentős fajonkénti átlag különbségek és a többnyire nem elég szoros korrelációk mellett a Hiba értékek jelentős különbsége (1,12-36,7) is indokolja.

17. táblázat: Kukorica mesterséges csőpenész rezisztencia vizsgálatok, ANOVA a különböző toxikus fajok esetében külön-külön, Kiszombor-Bácskertes, 2012-2013

Fg: *F. graminearum*, Fc: *F. culmorum*, Fv: *F. verticillioides*, Af: *A. flavus*

	df	MS értékek			
		Fg	Fc	Fv	Af
Hibrid A	19	703,48***	102,57***	153,58***	3,82**
Helyszín B	1	4321,77***	1108,22***	2367,66***	0,11ns
Év C	1	9983,15***	831,57***	5058,64***	40,44***
Izolátum D	1	3794,60***	1466,87***	5033,99***	0,84ns
AxB	19	490,87***	127,32***	131,75***	1,98**
AxC	20	435,06***	134,70***	123,62***	2,10**
AxD	21	196,02***	110,56***	145,67***	1,27ns
BxC	1	168,97**	755,86***	2765,34***	1,87ns
BxD	2	1307,89***	1643,06***	3503,68***	4,2*
CxD	3	268,12***	301,84***	4354,64***	0,12ns
AxBxC	19	308,59***	209,82***	120,96***	2,26**
AxBxD	20	156,68**	98,61***	127,69***	1,48ns
AxCxD	21	66,88ns	162,30***	123,83***	1,25ns
BxCxD	1	75,14ns	1276,80***	3344,70***	0,14ns
AxBxCxD	19	49,24*	108,99***	114,86***	2,31**
Hiba	480	36,72	10,90	10,61	1,12
Összes	639				

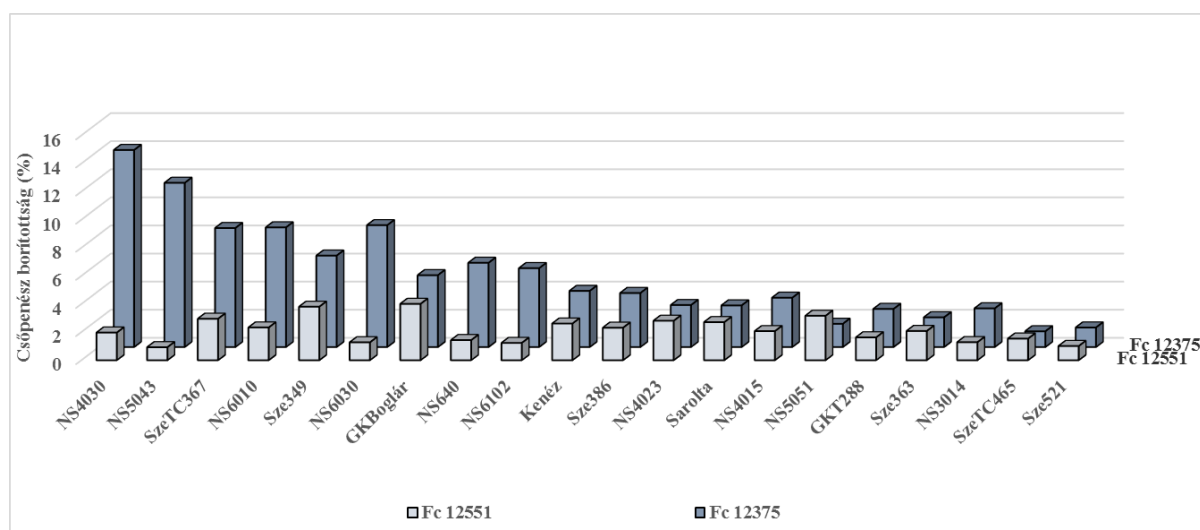
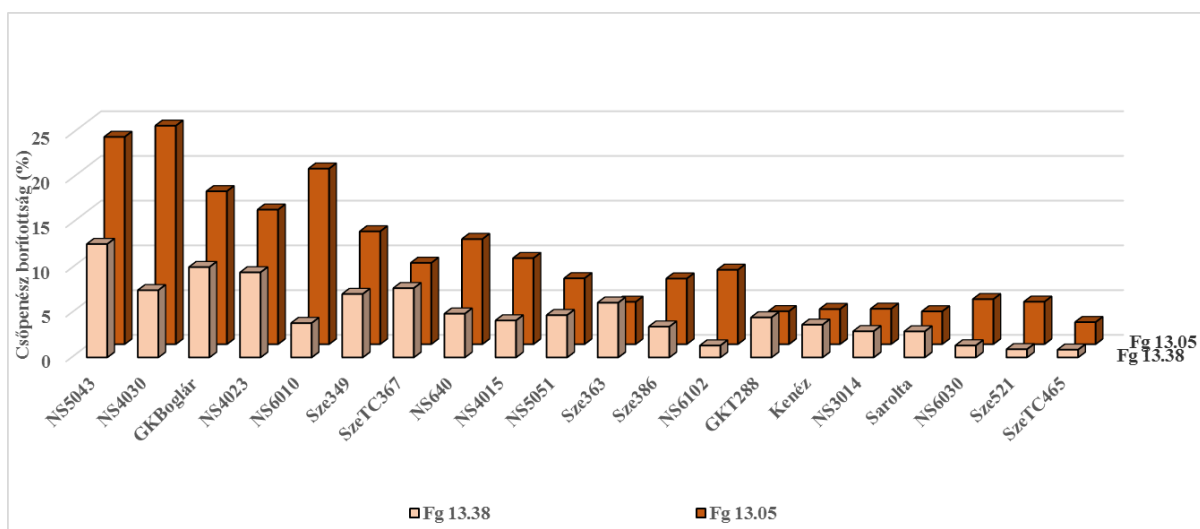
***p = 0,001, **p = 0,01, *p = 0,05

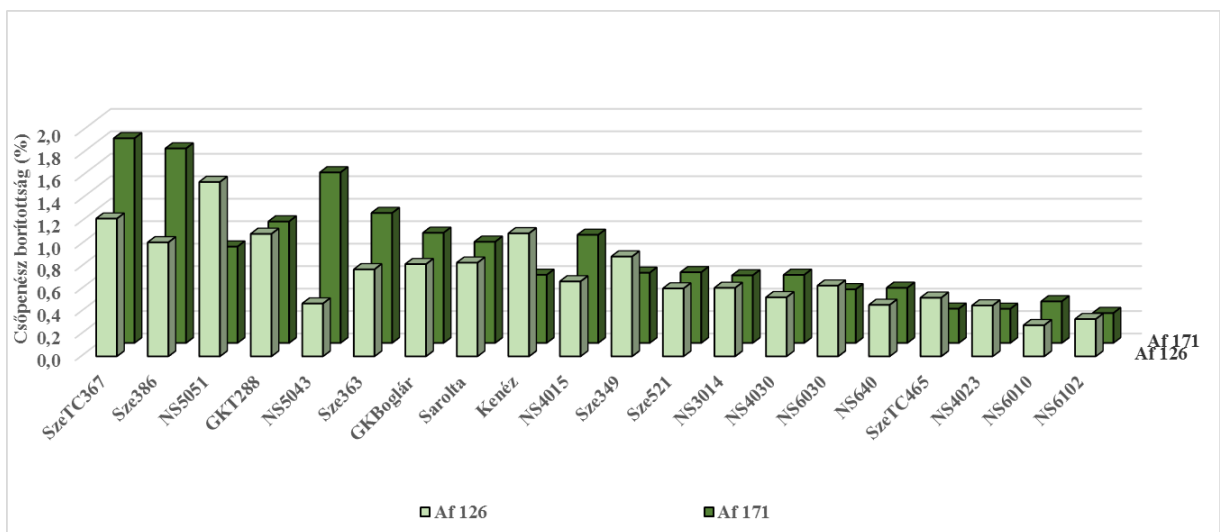
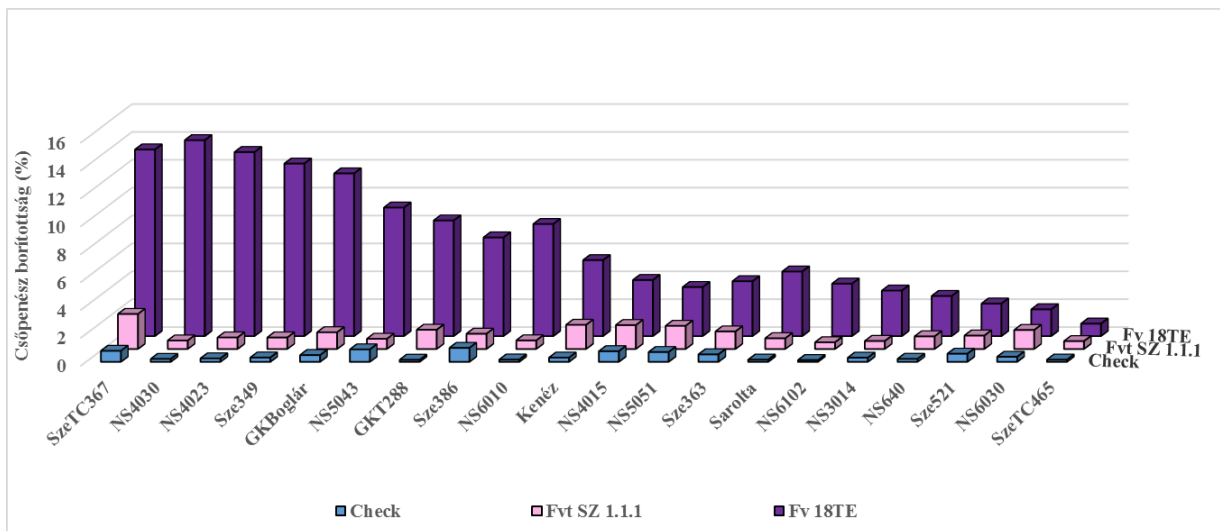
A fő tényezők összehasonlítása a kéttényezős kölcsönhatásokkal, az MS értékek alapján

			<i>F_g</i>	<i>F_c</i>	<i>F_v</i>	<i>A_f</i>
<i>AxB</i>	Hibrid A/AxB	df: 19, 19	1,43	0,81	1,17	1,93
<i>AxB</i>	Helyszín B/AxB	df: 1, 19	8,80**	8,70**	17,99***	0,06
<i>AxC</i>	Hibrid A/AxC	df: 19, 19	1,62	0,76	1,24	1,82
<i>AxC</i>	Év C/AxC	df: 1, 19	22,94***	6,17*	40,92***	0,21
<i>AxD</i>	Hibrid A/AxD	df: 19, 19	3,58***	0,93	1,05	3,00**
<i>AxD</i>	Izolátum D/AxD	df: 1, 19	19,35***	13,26**	34,55***	0,66

***p = 0,001, **p = 0,01, *p = 0,05

A toxikus gomba fajok izolátumainak patogenitását külön-külön, az **13. ábra** mutatja be. Az eredmények alapján egyértelműen látszik, hogy az ugyanazon fajba tartozó izolátumok fertőzőképessége között is igen jelentős különbségek vannak és ennek hatására a hibridek rezisztencia sorrendje is megváltozhat. Ennek mértékét tekintve a különböző fajok között jelentős különbségek lehetnek. Ezek alapján kijelenthető, hogy egy izolátum által kiváltott fertőződés mértékéből nem lehet egyértelműen következtetni a hibrid rezisztencia viszonyaira.





13. ábra: Toxikus gomba fajok izolátumai által kiváltott csőpenész borítottságok százalékos értékei, Kiszombor-Bácskertes, 2012-2013

A különböző izolátumok közötti korrelációs analízis eredményei alapján (**18. táblázat**), a *F. graminearum* izolátumok által kiváltott fertőzések között magas fokú szignifikáns kapcsolat mutatható ki, de a *F. verticillioides* és *F. culmorum* izolátumok között ez már rendkívül alacsony szintű volt, hasonlóan az *A. flavus* izolátumokhoz. Mivel az *A. flavus* fertőzés 2012-ben járványos méreteket öltött a dél-alföldi régióban, ezért az ebben az évben végzett kísérletek még nagyobb jelentőségűek voltak a genotípusok rezisztenciájának vizsgálata kapcsán. A korreláció vizsgálatok alapján az is jól látszik, hogy az Af 126 izolátum magasfokú szignifikáns kapcsolatot mutatott az Sz111 izolátum által kiváltott fertőzéssel ($r=0,729$, $p=0,001$), míg az Af 171 izolátum pedig ugyan gyengébb, de szintén szignifikáns kölcsönhatást ($r=0,546$, $p=0,01$). Mivel a másik *F. verticillioides* izolátum által kiváltott fertőzés semmilyen kapcsolatot nem mutatott az *A. flavus* izolátumok által kiváltott fertőzésekkel, megerősíti azt

a korábbi eredményt, hogy egy izolátummal történő vizsgálatok nem adnak megfelelően megbízható eredményt a tesztelések során.

18. táblázat: Korreláció analízis a toxikus fajok izolátumai által okozott fertőzések közötti összefüggések vizsgálatára, Kiszombor-Bácskertes, 2012-2013

Fg: *F. graminearum*, Fc: *F. culmorum*, Fv: *F. verticillioides*, Af: *A. flavus*

	<i>Fg13.38</i>	<i>Fg13.05</i>	<i>Fc12551</i>	<i>Fc12375</i>	<i>Fv18TE</i>	<i>FvSZ 1.1.1</i>	<i>Af126</i>	<i>Af171</i>
<i>Fg13.05</i>	0,722***							
<i>Fc12551</i>	0,392	0,156						
<i>Fc12375</i>	0,463*	0,769***	-0,079					
<i>Fv18TE</i>	0,7674***	0,674**	0,546*	0,533*				
<i>FvSZ 1.1.1</i>	0,108	-0,270	0,341	-0,092	0,111			
<i>Af126</i>	0,047	-0,385	0,515	-0,299	0,090	0,729***		
<i>Af171</i>	0,410	0,033	0,162	0,121	0,296	0,546*	0,530*	
Kontroll	0,316	0,085	0,078	0,040	0,081	0,498	0,405	0,790***

***p = 0,001, **p = 0,01, *p = 0,05

Mivel a hibridek a különböző kórokozók által előidézett fertőzöttség terén akár nagyságrendileg is eltérő átlaggal rendelkeztek ezért minden oszlop esetében rangsorrendet állítottunk fel, hogy a patogenitásbeli jelentős különbségeket tompítani tudjuk. Az adatok kiszámítása során Spearman rangkorrelációt végeztünk, melynek eredményeit a **19. táblázat** mutatja be. A szórást is meghatároztuk egytényezős varianciaanalízis segítségével. Az eredmények alapján jól látszik, hogy a vizsgált genotípusok rang átlaga alapján közel kilencszeres rangkülönbségek fedezhetőek fel (2,2-18,0). Van két olyan hibrid (SzeTC465, NS3014.), amelyek minden kórokozó és oszlop vonatkozásában 10 alatti értékekkel rendelkeztek, míg van három olyan genotípus is, amelyek minden esetben átlag alatti ranggal rendelkeztek, minden tényező esetében. Ezekben az esetekben a variancia is alacsony volt. Az alacsony variancia nincs kapcsolatban a rezisztenciával, mivel a nagyon fogékony hibridek között is van ilyen, de igen magas rang értékekkel (pl. SzeTC367, NS5043). A további 15 hibrid vegyes értékekkel rendelkezett, mivel előfordultak átlag alatti és feletti rangok is az esetükben. Az NS6102 esetében például csak a *F. culmorum*-mal szembeni rezisztencia rangja, az Sz521 és az NS6030 hibrid esetében a természetes fertőzödést reprezentáló kontroll sorok rangja esetében, míg a Sarolta esetében az *A. flavus*-szal szembeni rezisztencia rangjának esetében voltak átlag feletti értékek. Az értékek közötti összefüggések a *Fusarium* fajok esetében szignifikánsak voltak, míg az *A. flavus* által kiváltott fertőződéssel egy sem mutatott összefüggést. Az eredmények

tanulsága, hogy a hibrideknek minden rezisztencia sajátosságát célszerű figyelembe venni, így az összes gomba fajjal szembeni mesterséges fertőzési eredményeket és a természetes fertőződést is. Azok a genotípusok, amelyek minden oszlopban alacsony besorolási értéket kaptak, azok tekinthetőek alacsony, vagy alacsony-közepes kockázatúaknak élelmiszerbiztonsági szempontból. A rangok vizsgálata mellett a korrelációk vizsgálata esetében is hasonló képet kaptunk, az alap fertőzöttségi adatokból készült táblázattal (**19. táblázat**).

19. táblázat: A vizsgált hibridek csőpenész rezisztenciájának rang értékei toxikus fajokkal szemben, Kiszombor-Bácskertes, 2012-2013

A fehér-piros színátmenetes skála a rangsort jelzi, mely esetben a fehér a legjobb, a piros pedig a legrosszabb eredményt jelöli. Fg: F. graminearum, Fc: F. culmorum, Fv: F. verticillioides, Af: A. flavus

Genotípusok	Toxikus fajok				Kontroll	Átlag	Variancia
	Fg	Fc	Fv	Af			
SzeTC465	1	2	1	4	3	2,2	1,7
NS6102	8	12	6	1	1	5,6	22,3
NS3014	5	3	5	8	9	6,0	6,0
Sze521	2	1	3	9	15	6,0	35,0
Sarolta	4	8	9	13	4	7,6	14,3
NS6030	3	15	2	6	12	7,6	32,3
NS640	13	13	4	5	7	8,4	18,8
GKT288	7	5	14	17	2	9,0	39,5
Kenéz	6	11	11	12	10	10,0	5,5
Sze363	10	4	8	15	14	10,2	20,2
NS6010	16	17	13	2	5	10,6	45,3
NS4023	17	9	18	3	8	11,0	40,5
NS4015	12	7	10	11	17	11,4	13,3
NS5051	11	6	7	18	16	11,6	28,3
Sze349	15	16	17	10	11	13,8	9,7
Sze386	9	10	12	19	20	14,0	26,5
NS4030	19	20	19	7	6	14,2	49,7
GK Boglár	18	14	16	14	13	15,0	4,0
NS5043	20	19	15	16	19	17,8	4,7
SzeTC367	14	18	20	20	18	18,0	6,0

	<i>Fg</i>	<i>Fc</i>	<i>Fv</i>	<i>Af</i>	<i>Kontroll</i>
<i>Fc</i>	0,7007***				
<i>Fv</i>	0,7759***	0,6015**			
<i>Af</i>	0,0902	-0,0301	0,3338		
<i>Kontroll</i>	0,2391	0,1038	0,1759	0,6390**	
<i>Átlag</i>	0,8013***	0,6785***	0,8245***	0,5806**	0,6162**

***p = 0,001, **p = 0,01

4.2. A toxin vizsgálatok eredményei 2012-2013

A toxin vizsgálatok során derült fény arra, hogy a két *A. flavus* izolátum nem termelt értékelhető mennyiségű toxint egyik termőhelyen sem, annak ellenére, hogy előzetesen *in vitro* körülmények között nagy mennyiségű toxin termelést detektáltunk. Az eredmények értékelése során az aflatoxin adatokat kihagytuk, de a jelenség alátámasztja azt, hogy a laboratóriumi körülmények között nagy mennyiségű toxint termelő izolátumok nem feltétlen termelnek aflatoxint szántóföldi körülmények között, annak ellenére, hogy a génklaszter minden eleme a rendelkezésükre áll a genomban. Az eredmények alapján a hibridek között magas fokú szignifikáns különbségek vannak a toxin felhalmozódással szembeni rezisztencia vonatkozásában (**20. táblázat**). A DON toxin mennyiségének átlaga elmaradt a fumonizin koncentrációk átlagától, mely az időjárási körülményekre vezethető vissza. A legalacsonyabb toxin koncentrációt a *F. culmorum* izolátumok esetében detektáltuk. Annak ellenére, hogy az időjárási viszonyok kedveztek a természetes eredetű *F. verticillioides* fertőzés létrejöttének, a kontroll sorok esetében mégis csak 1-2 helyen volt detektálható mennyiségű toxin a mintákban. A különböző toxinok esetében a legalacsonyabb és legmagasabb értékek között 7-16-szoros különbségek voltak megfigyelhetőek. Hét olyan genotípust találtunk, melyek mindegyik toxin esetében átlag alatti értékekkel rendelkeztek, míg egy olyat, amely pedig mindegyik esetében átlag felettiekkel. A korrelációs analízis eredményei alapján a *F. verticillioides* által termelt fumonizin koncentrációja és a *F. graminearum*, valamint a *F. culmorum* által termelt DON mennyiségei között nincs szignifikáns összefüggés. A *F. graminearum* és *F. culmorum* toxin koncentrációs értékei között viszont szoros kapcsolatot tudtunk kimutatni, hasonló a szántóföldi fertőzöttségi értékekhez. Ha a fertőzöttségi értékek, illetve a toxin koncentrációk közötti korrelációs együtthatókat nézzük, akkor az adatok arra utalnak, hogy a két tulajdonság genetikai szabályozása akár igen eltérő is lehet, hiszen a fertőzöttségi adatok között még kaptunk szignifikáns összefüggéseket a *F. graminearum* és a *F. verticillioides* között. A fertőzöttségi

értékek ennek megfelelően önmagukban még nem elegendők az élelmiszerbiztonsági besorolás eldöntéséhez.

20. táblázat: Toxin koncentrációk (mg/kg) a mesterséges inokulációs kísérletek eredményei alapján rendezve, Kiszombor-Bácskertes, 2012-2013

(SZD 5% értékek a különböző toxinok esetében külön-külön és a kísérleti átlagok alapján)

Sárgával a kísérleti átlag alatti toxin szinteket jelöltük. Fg: F. graminearum, Fc: F. culmorum,

Fv: F. verticillioides

Genotípusok	Toxikus faj/Toxin (mg/kg)				Átlag
	Fg/DON	Fc/DON	Fc+Fg/DON	Fv/Fum	
SzeTC465	2,45	2,31	2,38	4,41	3,06
NS3014	3,56	1,85	2,70	4,56	3,32
NS6102	3,97	3,15	3,56	2,88	3,34
NS4015	6,14	2,53	4,34	3,84	4,17
Sze386	6,19	2,21	4,20	5,50	4,63
Sarolta	3,07	3,18	3,12	8,71	4,98
NS6030	2,34	4,52	3,43	10,91	5,92
NS640	6,55	5,60	6,08	5,90	6,02
Sze349	8,86	4,55	6,70	7,07	6,83
GKT288	4,47	3,22	3,85	15,95	7,88
GK Boglár	10,89	5,02	7,96	7,85	7,92
Sze363	2,76	1,83	2,29	19,21	7,93
NS4023	12,00	4,80	8,40	7,23	8,01
Sze521	2,75	1,19	1,97	20,47	8,14
NS4030	14,52	9,47	12,00	3,23	9,07
NS6010	12,05	6,07	9,06	10,77	9,63
NS5043	15,20	13,28	14,24	3,18	10,55
Kenéz	1,19	0,72	0,95	30,60	10,83
SzeTC367	8,46	5,76	7,11	28,67	14,29
NS5051	3,49	3,06	3,28	43,83	16,79
Átlag	6,55	4,22	5,38	12,24	7,67
SZD 5%	2,10	2,96	1,82	7,74	0,48

	<i>Fg</i>	<i>Fc</i>	<i>Fg/Fc</i>	<i>Fv</i>
<i>Fc</i>	0,8463***			
<i>Fc/Fg</i>	0,9745***	0,9441***		
<i>Fv</i>	-0,3728	-0,3130	-0,3623	
<i>Átlag</i>	0,2547	0,2982	0,2830	0,7903**

***p = 0,001, **p = 0,01

Az egyes toxikus fajok esetében külön-külön elvégezve az ANOVA-t (**21. táblázat**), a toxin adatok esetében szignifikáns hibrid hatás mutatkozott, de a helyszínek és az évjáratok között is

szignifikáns különbségek voltak (kivéve a *F. culmorum* által termelt DON adatsor esetében), hasonlóan az izolátumok hatásához (kivéve a *F. verticillioides* által termelt fumonizin adatsor esetében). A Hibrid A hatást magában foglaló interakciók F értékei jóval alacsonyabbak voltak és köztük szignifikáns különbség nem mutatkozott. Összességében elmondható, hogy a fertőzöttségi adatok között nagyon nagy különbségek voltak, így azok megbízhatóbbak voltak, de egyben az is látszik, hogy a két típusú vizsgálat közötti különbségek miatt mindkettőre szükség van a helyes rezisztencia viszonyok felderítése érdekében.

21. táblázat: ANOVA a kukorica mesterséges inokulációs kísérlet toxin adatainak értékelésére, Kiszombor-Bácskertes, 2012-2013

Fg: *F. graminearum*, Fc: *F. culmorum*, Fv: *F. verticillioides*

Genotípusok	df	DON Fg		DON Fc		Fum B ₁ +B ₂ Fv	
		MS	F	MS	F	MS	F
<i>Hibrid A</i>	19	606,14	16,49***	286,58	3,49***	3726,55	13,95***
<i>Helyszín B</i>	1	23797,35	647,72***	5671,60	69,25***	82455,79	308,74***
<i>Év C</i>	1	8571,66	233,30***	5,29	0,06***	3159,35	111,83***
<i>Izolátum D</i>	1	1160,57	31,58***	2193,39	26,78***	83,36	0,31
<i>AxB</i>	19	602,75	16,40***	193,32	2,36**	3731,33	13,97***
<i>AxC</i>	19	358,18	9,74***	184,02	2,24**	1662,34	6,22***
<i>AxD</i>	19	154,46	4,20***	203,14	2,48**	1409,53	5,28***
<i>BxC</i>	1	7425,05	202,09***	18,19	0,22	2775,64	10,38***
<i>BxD</i>	1	578,25	15,73***	3675,49	44,88***	0,75	0,01
<i>CxD</i>	1	146,53	3,98*	120,03	1,47	47,44	0,18
<i>AxBxC</i>	19	326,34	8,88***	176,99	2,16**	1706,45	6,39***
<i>AxBxD</i>	19	145,49	3,95***	273,78	3,34**	1407,15	5,27***
<i>AxCxD</i>	19	222,02	6,04***	83,07	1,01	2394,66	8,97***
<i>BxCxD</i>	1	393,16	10,70***	182,93	2,23	10,45	0,04
<i>AxBxCxD</i>	19	200,76	5,46***	81,89		2469,09	9,25***
<i>Hiba</i>	480	36,74		18,47		267,07	
<i>Összes</i>	639						

***p = 0,001, **p = 0,01, *p = 0,05

Ebben az esetben is elvégeztük a rangok meghatározását, valamint a korreláció vizsgálatot, melynek eredménye alapján három hibrid tartozott a legjobb rezisztencia tulajdonsággal rendelkezők közé, mivel ezek mindegyike, minden toxin esetében átlag alatti koncentrációkat mutatott (**22. táblázat**). Szintén három olyan genotípust találtunk, amelyek egyformán magas szennyezettséget mutattak mindhárom toxin vonatkozásában. A többi esetben keveredtek a pozitív és negatív eredmények. A két nemesítőház eredményeit nézve szintén vegyes képet láthatunk, mivel jó és kevésbé jó ellenállósággal rendelkező genotípusok mindkét esetben

előfordultak. Több olyan hibridet is azonosítottunk, amelyek esetében magas DON koncentráció halmozódott fel, a fumonizin koncentrációjuk viszont alacsonyabb volt az átlagnál. Ilyen volt például az NS4030 és az NS5043. Az Sz521 és a Kenéz esetében ennek pont az ellenkezője volt megfigyelhető. A korrelációanalízis eredményei alapján ebben az esetben is negatív, nem szignifikáns kapcsolatban voltak a DON és fumonizin adatsorok, ellentétben a fertőzöttségi adatoknál tapasztaltakkal.

22. táblázat: A kukorica mesterséges inokulációs kísérletben vizsgált hibridek rezisztenciájának rang értékei a toxin koncentrációk alapján, Kiszombor-Bácskertes, 2012-2013

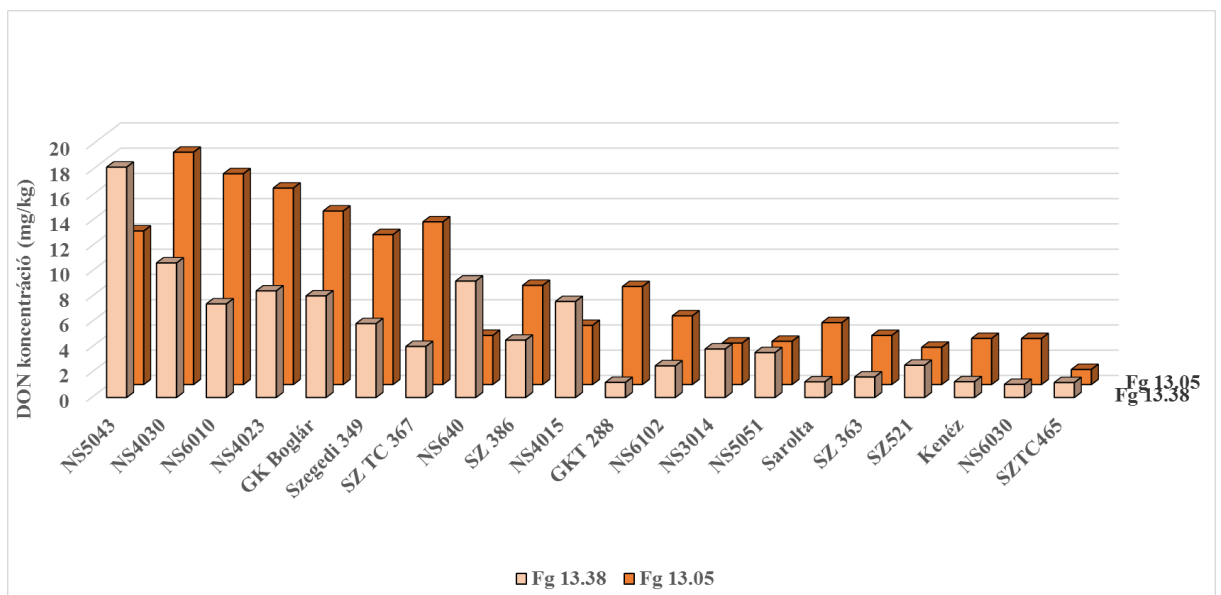
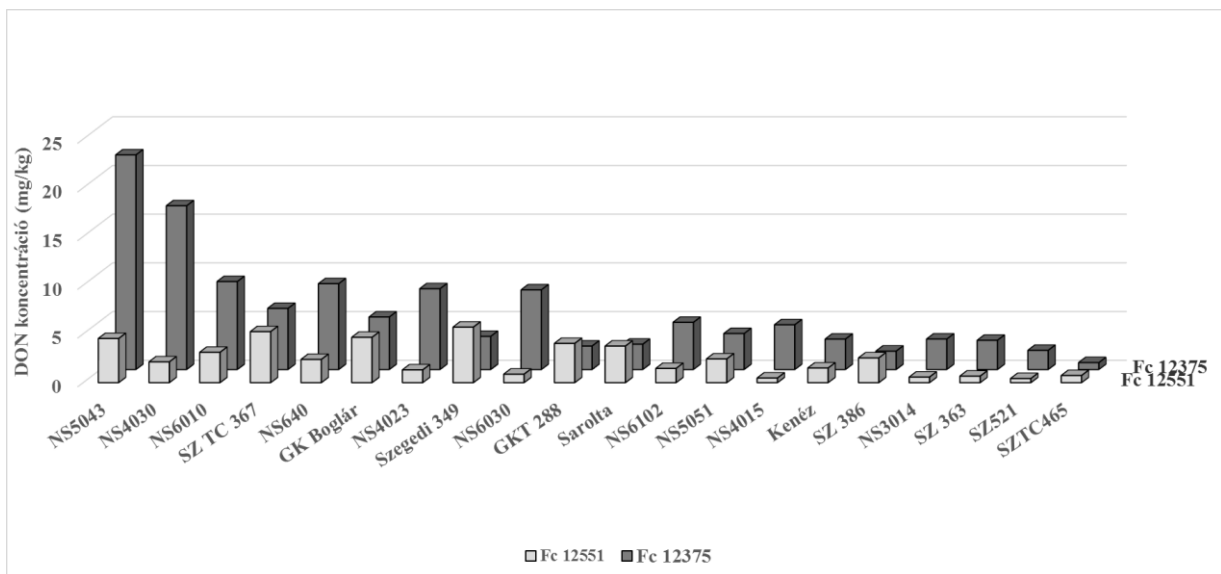
Sárgával az átlag alatti rangokat jelöltük. Fg: *F. graminearum*, Fc: *F. culmorum*, Fv: *F. verticillioides*

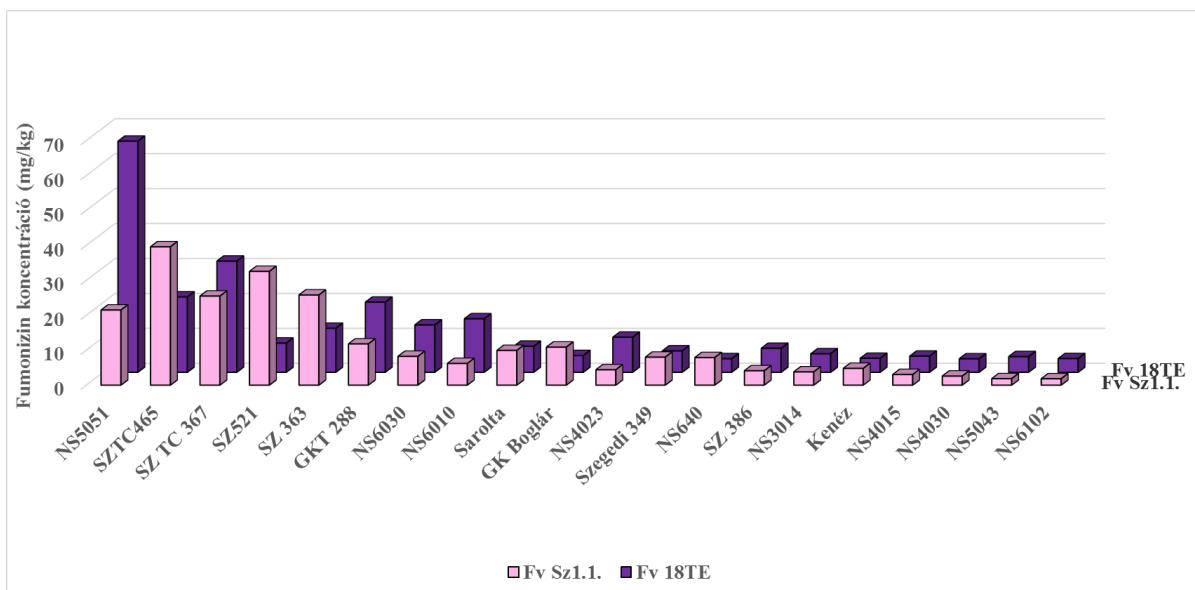
Genotípusok	Toxikus faj/Toxin				Átlag	Variancia
	Fg	Fc	Fc/Fg	Fv		
SzeTC465	3	6	4	5	4,7	2,3
NS3014	8	4	5	6	6,0	4,0
NS6102	9	9	9	1	6,3	21,3
Kenéz	1	1	1	19	7,0	108,0
NS4015	11	7	12	4	7,3	12,3
Sze521	4	2	2	17	7,7	66,3
Sze363	5	3	3	16	8,0	49,0
Sze386	12	5	11	7	8,0	13,0
NS6030	2	12	8	14	9,3	41,3
Sarolta	6	10	6	12	9,3	9,3
NS5051	7	8	7	20	11,7	52,3
GKT288	10	11	10	15	12,0	7,0
NS640	13	16	13	8	12,3	16,3
Sze349	15	13	14	9	12,3	9,3
NS4023	17	14	17	10	13,7	12,3
NS4030	19	19	19	3	13,7	85,3
GKBoglár	16	15	16	11	14,0	7,0
NS5043	20	20	20	2	14,0	108,0
NS6010	18	18	18	13	16,3	8,3
SzeTC367	14	17	15	18	16,3	4,3

	<i>Fg</i>	<i>Fc</i>	<i>Fc/Fg</i>	<i>Fv</i>
<i>Fc</i>	0,8135***			
<i>Fc/Fg</i>	0,9563***	0,9067***		
<i>Fv</i>	-0,4211	-0,2677	-0,4045	
<i>Átlag</i>	0,8399***	0,8364***	0,8613***	-0,0075

***p=0,001

A toxin koncentrációk esetében is megvizsgáltuk a különböző fajok egyes izolátumainak adatsorát. Ennek hasonló volt az eredménye, mint a csőpenész borítottság esetében láhattuk, mely alapján kijelenthető, hogy ugyanazon faj két izolátuma által termelt toxin koncentrációi között is jelentős különbségek lehetnek, melyek nem feltétlen esnek egybe az adott hibrid szántóföldi csőpenész borítottságának adataival. A legmagasabb fumonizin koncentrációt például egy olyan hibrid esetében kaptuk, amelynek a szántóföldi fertőzöttségi értéke viszonylag alacsony volt (**14. ábra**).





14. ábra: Kukorica hibridek toxikus gomba izolátumokkal szembeni ellenálló képességének vizsgálata a toxin felhalmozódás vonatkozásában, mesterséges inokulációt követően, Kiszombor-Bácskertes, 2012-2013

Az összes izolátum közötti korreláció vizsgálata alkalmával (**22. táblázat**) a *F. graminearum* és a *F. culmorum* izolátumok által termelt DON koncentrációi között volt magasabb fokú szignifikáns kapcsolat, míg a *F. verticillioides* izolátumok fumonizin termelő képessége között csak mérsékelt, de még szignifikáns kapcsolatot fedtünk fel. A 28 korrelációs koefficiens értékből mindössze nyolc mutatott szignifikáns összefüggést, ami annak bizonyítéka, hogy csak e tényező alapján nem lehet hatékony szelekciós munkát folytatni.

23. táblázat: A toxikus fajok izolátumai által termelt mikotoxinok koncentrációi alapján készített korreláció analízis, Kiszombor-Bácskertes, 2012-2013

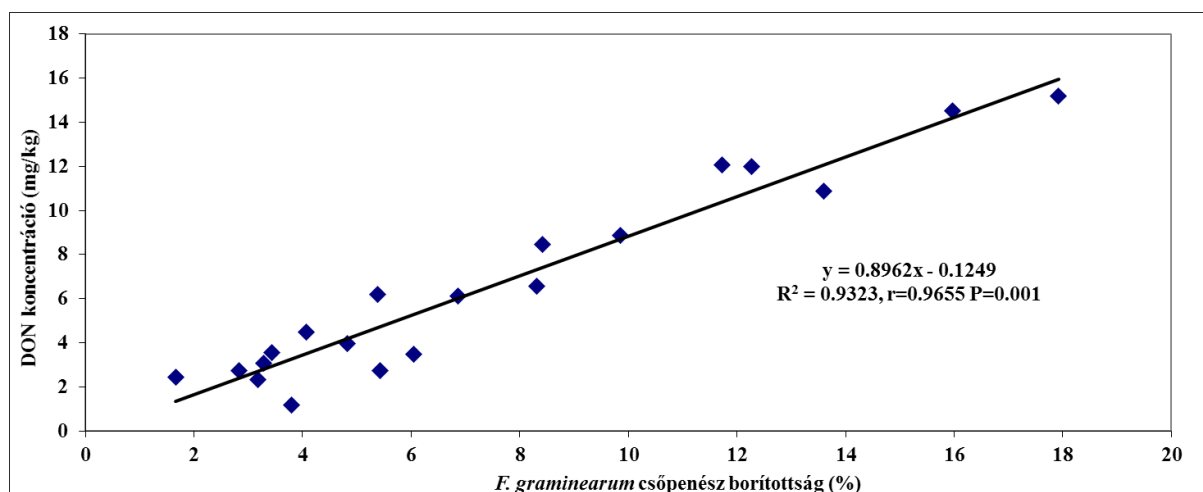
Fg: *F. graminearum*, *Fc:* *F. culmorum*, *Fv:* *F. verticillioides*

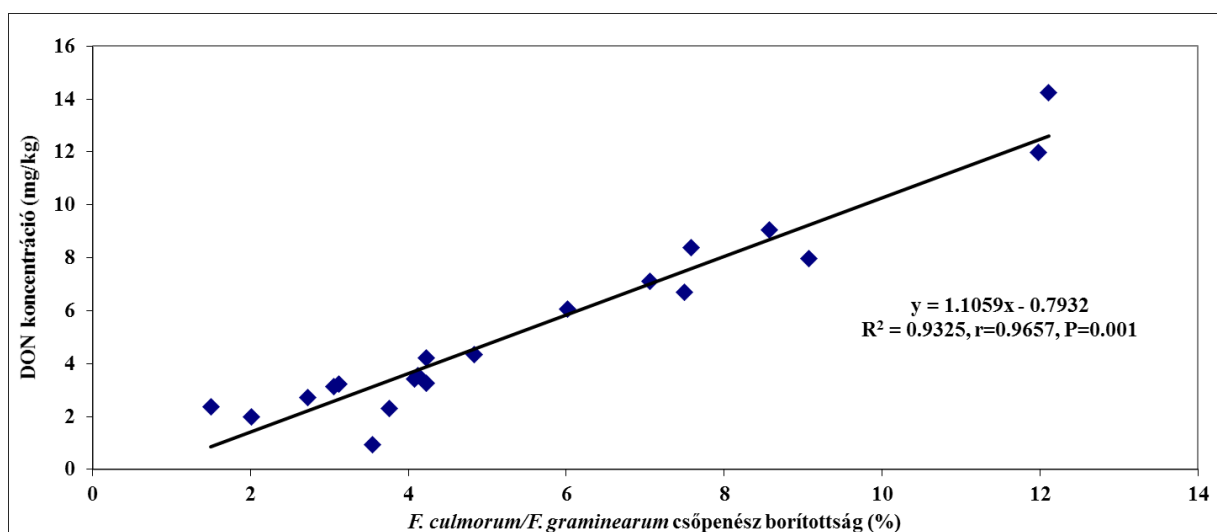
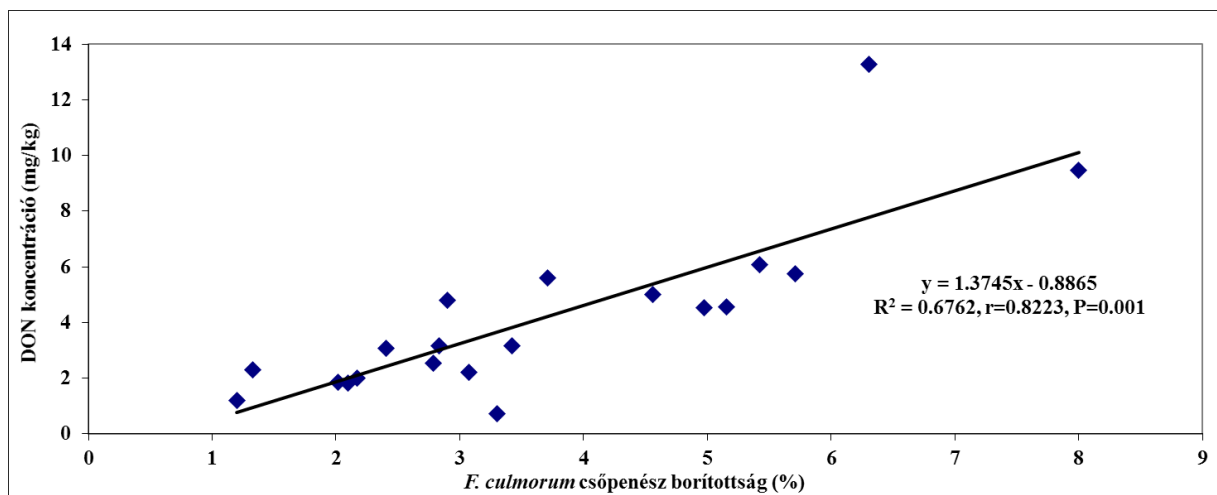
	<i>Fg 13.05</i>	<i>Fg 13.38</i>	<i>Fc 12375</i>	<i>Fc 12551</i>	<i>Fv 18TE</i>	<i>Fv Sz1.1.</i>
<i>Fg 13.38</i>	0,6065**					
<i>Fc 12375</i>	0,5869**	0,8550***				
<i>Fc 12551</i>	0,5484*	0,3250	0,2385			
<i>Fv 18TE</i>	-0,1440	-0,2600	-0,1986	0,1020		
<i>Fv Sz1.1.</i>	-0,3806	-0,4505*	-0,4384	-0,1461	0,4863*	
<i>Átlag</i>	0,2963	0,1982	0,2385	0,3553	0,7856***	0,5206*

***p = 0,001, **p = 0,01, *p = 0,05

4.3. Összefüggés a szántóföldi adatok és toxin vizsgálat eredményei között, 2012-2013

Az adatok megfelelő értékelhetősége érdekében egy táblázatban tüntettük fel a fertőzöttségi adatokat és a toxin koncentrációkat (**1. melléklet**). A hibridek kockázati besorolását a színátmenetek jelölik, ahol a fehér az alacsony, míg a vörös a magas kockázatú genotípus teljesítményeket jelöli. A táblázat adatait a *F. graminearum*-mal szembeni rezisztencia sorrend alapján rendeztük. A *F. graminearum* és *F. culmorum* fajokkal szembeni rezisztencia közötti igen szoros kapcsolatot mind a tüneti, mind a toxin koncentráció adatok alátámasztották. A *F. verticillioides* fajjal szembeni rezisztencia azonban ezektől függetlennek bizonyult. Míg a tüneteknél a szignifikancia határértékét éppen elérő kapcsolatot mutatott a korrelációs analízis, ez a fumonizin koncentrációkra már nem volt igaz. A szántóföldi mesterséges fertőzés következtében létrejövő csőpenész borítottság és az eközben akkumulálódó mikotoxin koncentrációk összefüggésének vizsgálatára regressziós analízist végeztünk külön-külön fajonként (**15. ábra**). Az eredmények alapján a *F. graminearum* fertőződés és a *F. culmorum* fertőződés is magas fokú szignifikáns összefüggést mutatott az általuk előidézett DON kontaminációval. A *F. graminearum* esetében ez a kapcsolat némileg szorosabb ($r=0,9655$), mint a *F. culmorum* esetében ($r=0,8223$). A két faj összesített eredményeiből készített korreláció szintén magas fokon szignifikáns volt; $r=0,9657$ ($p=0,001$).

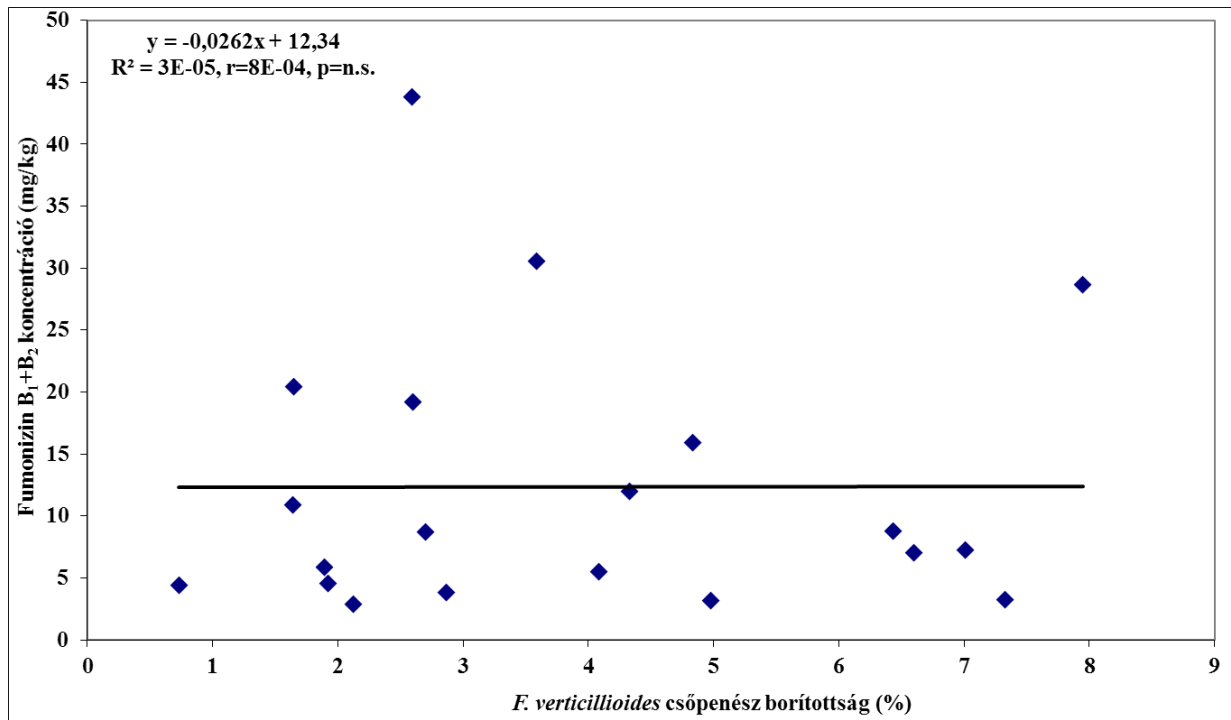




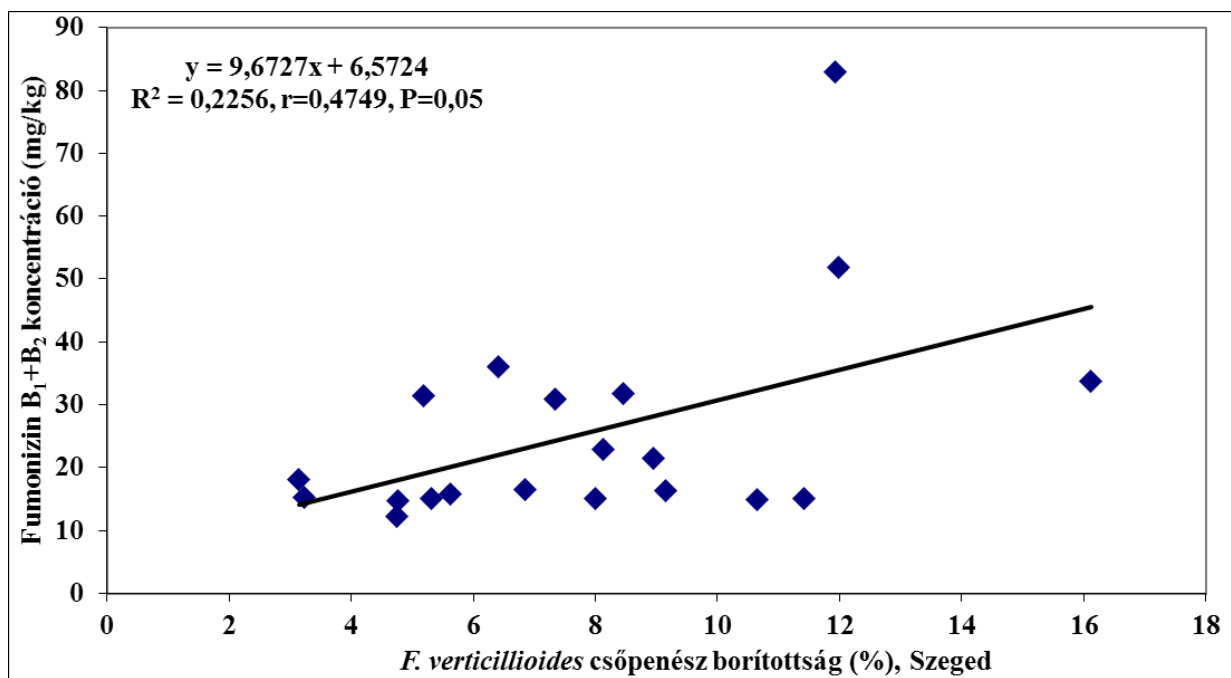
15. ábra: Regressziós analízis a *F. graminearum* és a *F. culmorum* fertőződés és a DON toxin koncentrációja között, Kiszombor-Bácskertes, 2012-2013

A *F. verticillioides* fertőződés és a fumonizin koncentráció között végzett regressziós vizsgálat eredményei ellentmondanak az előzőekben tapasztaltakkal, mivel az eredmények alapján a fertőződési értékek és a toxin eredmények között nincs szignifikáns kapcsolat (**16. ábra**). A szegedi adatok esetében alacsonyabb fertőződéshez magasabb fumonizin értékek társultak, míg Bácskertes esetében ez pont fordítva volt. Ennek következtében az analízist a két termőhely esetében külön-külön is elvégeztük. Mindkét esetben $p=0,05$ szinten szignifikáns összefüggés volt a két tényező között. Az eredmények rávilágítottak arra, hogy a szántóföldi fertőződés létrejötte és toxin felhalmozódásnak más-más környezeti feltételek kedveznek.

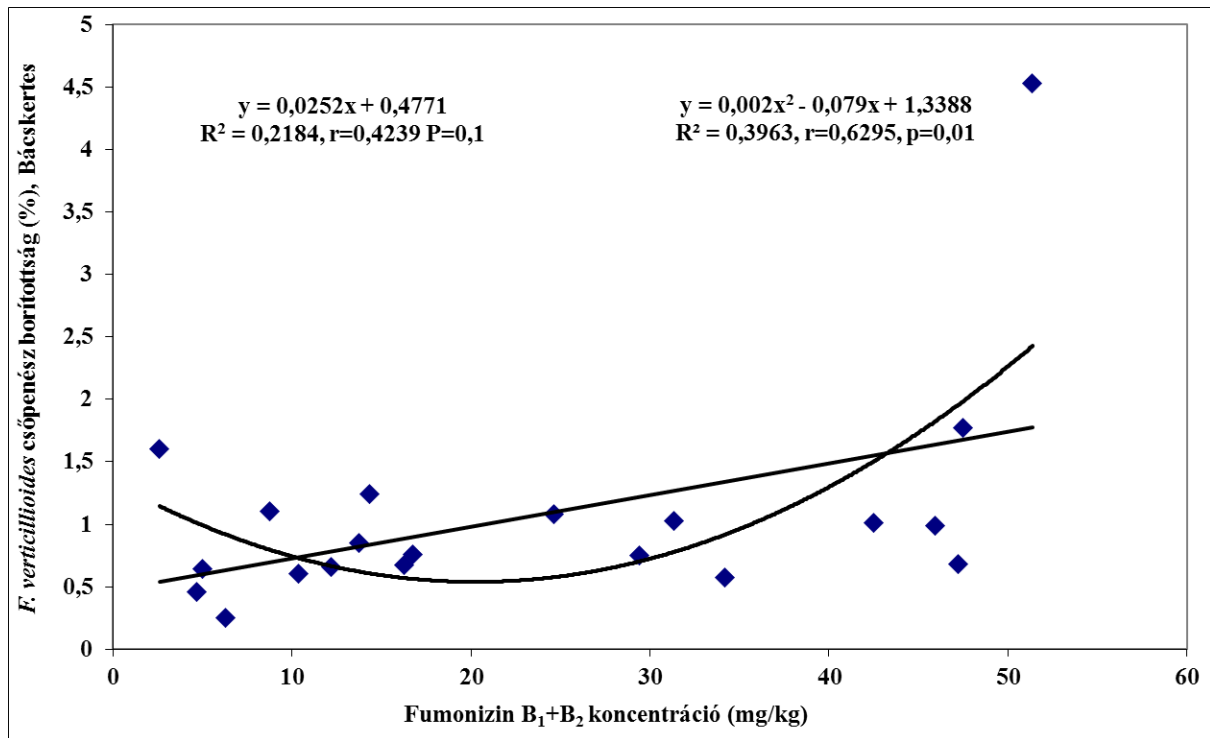
A.



B.



C.



16. ábra: Regressziós analízis a *F. verticillioides* fertőződés és a fumonizin toxin koncentrációja között, 2012-2013, A. Kiszombor-Bácskertes, B. Szeged, C. Bácskertes

Az *A. flavus* fertőződés ellenére nem volt értékelhető mennyiségű aflatoxin egyik termőhelyen sem, ennek következtében a regressziós analízist sem tudtuk elvégezni. Fontos azonban ezen eredmények ismeretében hangsúlyoznunk, hogy sem a szántóföldi, sem a toxin adatokból, önmagukban nem szabad következtetéseket levonni a genotípusokkal kapcsolatban, mivel a grafikonok alapján is látszik, hogy alacsony fertőzöttségi értékekhez is tartozhat magas toxin kontamináció.

4.4. Szántóföldi fertőzöttségi adatok 2017-2018

A 2017-2018. évi kísérlet sorozatban 18 kukorica hibrid csőpenész borítottsági adatait dolgoztuk fel. Az eredmények változatos képet mutattak a hibridek ellenállóságának tekintetében (**24. táblázat**). A kísérleti átlagokat tekintve a *F. graminearum* okozta a legerőteljesebb fertőződést, míg a másik két faj izolátumai jóval gyengébb patogenitással rendelkeztek. Mivel az egyes fajok fertőzőképessége között jelentős különbség volt, ezért az SZD értékek és a kockázati besorolás is fajonként került meghatározásra. A hibridek fertőzöttségi értékei között szignifikáns különbségeket fedtünk fel.

A kísérlet eredményei alapján, a pozitív és negatív kontroll hibridek ellenállósága a várakozásoknak megfelelő volt. Az ellenállósági szinteket a színátmenetek jelölik, ahol a fehér a legalacsonyabb, míg a vörös a legmagasabb fertőzöttségi szintet jelöli. A hibridek eredményei alapján azt láthatjuk, hogy a pozitív kontrollon kívül nem volt más olyan genotípus, amely minden vizsgált kórokozóval szemben egyenletesen jó teljesítményt mutatott volna. Vannak mérsékelt rezisztens hibridek, amelyek világos piros kiemelést kaptak minden oszlopban és olyanok is, amelyek, habár a mesterséges inokulációs kísérlet alapján jó eredménnyel zártak, a természetes eredetű fertőződéssel szemben fogékonyabbak voltak. Ilyen hibrid például a legalacsonyabb fertőzöttséggel rendelkező Szegedi 521. Ennek magyarázata a nemesítők szerint a csuhélevelek nyitottsága és a csővégi fertőződés lehetősége. Mindenesetre ezek a tényezők is veszélyforrást jelenthetnek járványosabb években. Hasonló képet láthatunk a Valkür esetében is, mely ugyan jó ellenállóságot mutatott *F. verticillioides* és *A. flavus* gombákkal szemben, de a rendkívül gyenge *F. graminearum*-mal szembeni rezisztenciája miatt csak az utolsó előtti helyen található a táblázatban. Azok a hibridek, amelyek bármely fajjal szemben piros vagy vörös színt kaptak, fokozottabb termesztési kockázatot jelentenek. A korrelációs vizsgálat eredményei alapján a kísérleti átlagot leginkább a *F. graminearum* által kiváltott fertőződés határozta meg, míg a kontroll sorok természetes eredetű fertőződését nagy valószínűséggel a *F. verticillioides* váltotta ki.

24. táblázat: Kereskedelmi forgalomban kapható kukorica hibridek ellenállósága toxikus gomba fajok izolátumaival szemben, mesterséges inokulációt követően. Csőpenész borítottság (%), 2017-2018

Fg: F. graminearum, Fc: F. culmorum, Fv: F. verticillioides, Af: A. flavus

A fehér-piros színátmenetes skála a hibridek fertőzöttségét jelzi, mely esetben a fehér a legalacsonyabb, a piros pedig a legmagasabb fertőzöttségi értéket jelöli.

Hibrid	Toxikus faj			K (F+A)	Átlag
	Fg	Fv	Af		
Szegedi 521	5,50	0,20	0,11	0,42	1,56
Korimbos	8,48	0,04	0,05	0,12	2,17
DKC4590	11,18	0,36	0,15	0,50	3,05
P9537	11,64	0,32	0,14	0,25	3,09
P9241	12,21	0,25	0,10	0,23	3,20
4517	12,09	0,87	0,17	0,60	3,43
DKC4717	13,29	0,45	0,24	0,35	3,58
Cardixxio Duo	13,88	0,23	0,29	0,26	3,66
DKC5542	14,04	0,32	0,10	0,37	3,71
Siló Star	15,05	0,26	0,16	0,20	3,92
P9903	15,27	0,32	0,21	0,44	4,06
DKC4943	15,22	0,32	0,39	0,32	4,06
Fornad	14,34	1,18	0,29	0,63	4,11
P9911	19,18	0,30	0,13	0,49	5,03
DKC5830	20,38	0,27	0,30	0,21	5,29
DKC4541	19,79	1,12	0,35	0,68	5,49
Valkür	21,83	0,14	0,03	0,03	5,51
PR37F80	26,20	0,86	0,48	0,58	7,03
Átlag	14,98	0,43	0,20	0,37	4,00
SZD 5%	7,69	0,45	0,18	0,25	1,92

	Fg	Fv	Af	Kontroll	
Fv	0,3190				
Af	0,5127*	0,5746*			
Kontroll	0,1234	0,8271***	0,4918*		
Átlag	0,994***	0,4128	0,5691*	0,2187	

*** p=0,001, * p = 0,05

A fertőzöttségi adatok felhasználásával négytényezős varianciaanalízist végeztünk (**25. táblázat**). Az eredmények alapján az összes fő hatás magas fokon szignifikáns volt. A kölcsönhatások közül a Hibrid/Toxikus faj kölcsönhatás erősen szignifikáns, mely a különböző

genotípusok eltérő reakcióját jelenti a különböző toxikus fajokkal szemben. A Hibrid/Izolátum és a Hibrid/Év kölcsönhatások esetében nem állt fent ilyen összefüggés, mely a fajták inokulációra adott válaszában stabilitását mutatja. Mivel a toxikus fajok fertőzőképessége között jelentős különbségek vannak nemcsak a fajok szintjén, hanem az izolátumok között is, így azok az interakciók, amelyekben ez a variancia forrás szerepel, erősen szignifikánsak.

25. táblázat: Kereskedelmi forgalomban kapható kukorica hibridek ellenállósága toxikus gomba fajok izolátumaival szemben, mesterséges inokulációt követően. 4 tényezős ANOVA, 2017-2018

Variancia forrás	SS	df	MS	F
Hibrid A	1381,31	17	81,25	3,50**
Toxikus faj B	34725,54	3	11575,18	498,93***
Izolátum C	603,00	1	603,00	25,99***
Év D	3749,36	1	3749,36	161,61***
AxB	3716,68	51	72,88	3,14***
AxC	577,27	17	33,96	1,46
AxD	968,62	17	56,98	2,46
BxC	1847,21	3	615,74	26,54***
BxD	11770,75	3	3923,58	169,12***
CxD	388,63	1	388,63	16,75***
AxBxC	1752,40	51	34,36	1,48*
AxBxD	2878,55	51	56,44	2,43***
AxCxD	319,94	17	18,82	0,81
BxCxD	1048,26	3	349,42	15,06***
AxBxCxD	989,37	51	19,40	0,84
Hiba	13387,95	576	23,24	
Összesen	80104,82	863		

*** p=0,001, ** p = 0,01, *p=0,05

A mesterséges fertőződés mellett megjelenő természetes eredetű fertőződés szintje megközelítőleg azonos volt a mesterséges fertőzést nem kapott kontroll sorokéval, így egy stabil szintű természetes háttér fertőződés volt jelen a kísérletben. Az *A. flavus* természetes fertőződés mindössze néhány kísérleti sorban volt megfigyelhető és az egyik évben 1 genotípuson, a másik évben pedig 6 genotípuson jelent meg. Mivel a különböző fajok fertőzőképessége között jelentős különbségek vannak, a hibridekre vonatkozó kísérleti átlagot minden esetben a domináns faj befolyásolja a legerőteljesebben. Emiatt rang vizsgálatot végeztünk a **24. táblázat** adatai alapján, melynek során az átlag értékek alapján minden toxikus fajnál 1-18-ig terjedő rangsor alapján pozicionáltuk a genotípusokat

(26. táblázat). Az eredmények alapján mindösszesen két hibrid (Korimbos, P9241) esetében láthatunk egyöntetű halvány színezetet és e korrelációban is a pozitív kontroll (Korimbos) hozta a várakozásoknak megfelelő magas ellenállósági szintet. A negatív kontroll (DKC4541) végzett az utolsó helyen, mely mellett még további két hibrid (PR37F80, Fornad) rendelkezik magas fertőzőttséggel. A lista középső kétharmadában rendkívül variábilis ellenállósági viszonyokat fedhetünk fel. A korrelációs vizsgálat eredményei alapján a domináns kórokozó (*F. graminearum*) hatását az átlagra megszüntettük a rang vizsgálat segítségével és ez a faj nem is mutatott semmilyen más tényezővel szignifikáns kapcsolatot. Az átlagra egyenletes hatást gyakorolt minden tényező és a természetes fertőződést reprezentáló kontroll sorokkal a *F. verticillioides* fertőződés mutatta a legszorosabb összefüggést.

26. táblázat: Kereskedelmi forgalomban kapható kukorica hibridek ellenállósága toxikus gomba fajok izolátumaival szemben, mesterséges inokulációt követően. Rang vizsgálat, 2017-2018

Fg: *F. graminearum*, Fc: *F. culmorum*, Fv: *F. verticillioides*, Af: *A. flavus*

A fehér-piros színátmenetes skála a rangot jelzi, mely esetben a fehér a legjobb, a piros pedig a legrosszabb rangot jelöli.

Hibrid	Toxikus faj			K (F+A)	Átlag	Variancia
	Fg	Fv	Af			
Korimbos	2	1	2	2	1,75	0,25
P 9241	6	5	4	5	5,00	0,67
Szegedi 521	1	3	5	11	5,00	18,67
Valkür	17	2	1	1	5,25	61,58
Siló Star	11	6	9	3	7,25	12,25
P 9537	4	12	7	6	7,25	11,58
DKC 5542	9	10	3	10	8,00	11,33
Cardixio Duo	8	4	14	7	8,25	17,58
DKC 4590	3	13	8	14	9,50	25,67
P 9911	14	8	6	13	10,25	14,92
DKC 5830	16	7	15	4	10,50	35,00
DKC 4717	7	14	12	9	10,50	9,67
P 9903	13	9	11	12	11,25	2,92
4517	5	16	10	16	11,75	28,25
DKC 4943	12	11	17	8	12,00	14,00
Fornad	10	18	13	17	14,50	13,67
PR37F80	18	15	18	15	16,50	3,00
DKC 4541	15	17	16	18	16,50	1,67

	Fg	Fv	Af	Kontroll
Fv	0,1558			
Af	0,4427	0,5892**		
Kontroll	0,0691	0,7936***	0,4489	
Átlag	0,5559*	0,8462***	0,8270***	0,7705***

***p=0,001, **p=0,01, *p = 0,05

4.5. A toxin vizsgálatok eredményei, 2017-2018

A *F. graminearum* izolátumok által előidézett DON kontaminációkat a **27. táblázat** foglalja össze. 2017-ben az Fg1 jelzésű izolátum igen gyenge fertőzöttségi értékeket és toxin termelést produkált, így 2018-ban ezt, egy másik izolátumra (Fg4) cseréltük le. Ezt az adatsort leszámítva, a többi izolátum esetében közel hasonló toxin koncentrációkat tapasztaltunk. A genotípusok között szignifikáns különbségeket tudtunk kimutatni. A hibridek varianciáját vizsgálva 7 olyan genotípust találtunk, melyek alacsonyabb variancia és átlag értékekkel rendelkeztek. Ezek bizonyultak a legjobbnak a DON toxin felhalmozódással szembeni rezisztencia tekintetében. A gyengébb patogenitású izolátum eredményeit figyelmen kívül hagyva, a lista első 7 helyén nem tapasztaltunk változást. Az egyes izolátumok által termelt toxin mennyiségek között nem minden esetben tudtunk szignifikáns korrelációt kimutatni, de az átlaggal viszont magasfokú korreláció állt fent, mely az átlag értékek megbízhatóságát jelzi előre.

27. táblázat: Kereskedelmi forgalomban kapható kukorica hibridek DON toxin kontaminációja, mesterséges *F. graminearum* inokulációt követően, 2017-2018

Sárgával az átlag alatti toxin koncentrációkat jelöltük.

Hibrid	DON koncentráció (mg/kg)				Átlag	Variancia
	Fg1 2017	Fg3 2017	Fg3 2018	Fg4 2018		
P9537	0,00	7,34	6,40	8,10	5,50	13,7
DKC4590	0,00	4,61	2,30	19,40	6,60	76,4
Fornad	0,29	15,73	3,20	13,60	8,20	57,9
4517	1,14	15,44	11,40	7,90	9,00	36,7
DKC4717	0,12	13,41	15,40	12,70	10,40	48,1
DKC4943	0,29	14,70	7,00	20,20	10,60	76,3
Szegedi 521	1,94	16,10	17,80	10,50	11,60	51,2
Cardixxio Duo	0,00	8,80	29,80	13,40	13,00	156,6
PR37F80	0,08	25,20	11,60	18,90	13,90	116,3

DKC4541	0,11	6,30	18,40	31,90	14,20	197,0
DKC5542	0,00	16,34	9,60	32,60	14,70	188,6
P9241	0,00	6,04	25,90	26,70	14,70	187,3
P9911	0,00	21,94	14,00	23,50	14,80	115,2
P9903	8,86	3,94	25,00	22,20	15,00	103,7
DKC5830	0,00	14,26	36,90	17,00	17,00	230,7
Siló Star	0,00	22,97	16,60	30,90	17,60	171,7
Korimbos	0,00	20,74	16,90	39,80	19,30	266,4
Valkür	0,00	99,50	43,50	46,80	47,50	1658,8
Átlag	0,71	18,52	17,31	22,00	14,63	208,48
SZD 5%						15,52

	Fg1 2017	Fg3 2017	Fg3 2018	Fg4 2018
Fg3 2017	-0,1861			
Fg3 2018	0,1355	0,5138*		
Fg4 2018	-0,1017	0,5841*	0,3994	
Átlag	-0,0400	0,9148***	0,7432***	0,7658***

***p= 0,001, **p= 0,01, *p= 0,05

A *F. verticillioides* fertőződés során akkumulálódott fumonizin toxin mennyiségét a **28. táblázat** szemlélteti. A különböző genotípusok fumonizin felhalmozódással szembeni rezisztencia tulajdonságai között szignifikáns különbségek voltak. A legrezisztensebb és legfogékonyabb hibridek adatai között tízszeres különbség volt. A két évet tekintve azt láthatjuk, hogy 2017-ben erősebb járvány helyzet volt, mint 2018-ban, de ennek ellenére mégis konzekvensek voltak a rezisztencia sorrendek. Az összes adatsort figyelembe véve a variancia 7 esetben is rendkívül alacsony volt, mely az eredmények megbízhatóságára utal. Fontos megjegyezni, hogy a hibridek átlag adatai között jelentős eltérések vannak annak ellenére is, hogy az egyes izolátumok agresszivitása az évek során csekély mértékben változott csak. Az adatsorok között egy kivétellel mindig szignifikáns kapcsolat állt fent.

28. táblázat: Kereskedelmi forgalomban kapható kukorica hibridek fumonizin B₁+B₂ toxin kontaminációja, mesterséges *F. verticillioides* inokulációt követően, 2017-2018

Sárgával az átlag alatti toxin koncentrációkat jelöltük.

Hibrid	Fumonizin B ₁ +B ₂ koncentráció (mg/kg)				Átlag	Variancia
	Fv1 2017	Fv2 2017	Fv1 2018	Fv2 2018		
Korimbos	1,00	0,91	0,60	0,72	0,81	0,03
DKC4943	1,44	1,88	0,34	0,08	0,94	0,74
DKC5830	0,97	2,03	0,61	0,30	0,98	0,57
Siló Star	2,43	0,59	0,88	0,33	1,06	0,89
DKC4717	2,15	1,97	0,30	0,00	1,11	1,24
Cardixxio Duo	1,33	2,98	0,45	0,12	1,22	1,64
DKC5542	2,21	1,57	0,51	0,85	1,29	0,58
Valkür	2,83	1,12	2,32	0,30	1,64	1,31
P9903	2,01	3,19	1,30	0,24	1,69	1,54
P9241	3,15	1,55	1,24	1,21	1,79	0,85
DKC4590	5,29	2,21	0,86	0,86	2,31	4,37
Szegedi 521	2,85	2,73	3,68	1,55	2,70	0,77
P9537	6,96	3,60	1,39	0,26	3,05	8,71
DKC4541	4,52	5,72	1,44	1,03	3,18	5,30
Fornad	7,21	10,05	0,00	0,62	4,47	24,48
P9911	7,77	3,22	6,22	8,65	6,47	5,69
PR37F80	18,68	9,07	2,39	0,50	7,66	67,49
4517	15,10	21,85	2,26	6,58	11,45	76,55
Átlag	4,88	4,24	1,49	1,34	2,99	11,26
SZD 5%						4,00

	Fv1 2017	Fv2 2017	Fv1 2018	Fv2 2018
Fv2 2017	0,7705***			
Fv1 2018	0,3721	0,1308		
Fv2 2018	0,4439	0,4863*	0,7655***	
Átlag	0,9111***	0,8922***	0,5058*	0,7122***

***p= 0,001, *p= 0,05

Az *A. flavus* fertőződés során akkumulálódott aflatoxin mennyiségét a **29. táblázat** szemlélteti. A hibridek kísérleti átlaga 13 és 338,5 µg/kg között változott, mely a legjobb és leggyengébb teljesítményt nyújtó hibrid között huszonhatszoros különbséget jelent. A genotípusok között szignifikáns különbségeket fedtünk fel. Az egyes izolátumok által termelt aflatoxin mennyisége igen eltérő volt a hibridek esetében annak ellenére, hogy a kísérleti évek folyamán igen közel álltak egymáshoz az átlagaik. Az izolátumok adatsorai ebben az esetben is gyengén korrelálnak egymással, de az átlag értékekkel viszont jelentős mértékben. A Valkür, P 9241, DKC 4590 és

DKC 4717 alacsony variancia mellett relatíve rezisztensnek mutatkoztak, míg a Korimbos esetében a két kísérleti év jelentős különbségeket eredményezett, mely az eltérő járványhelyzetekkel és talán a toxin felhalmozódással szembeni fogékonysággal is magyarázható.

29. táblázat: Kereskedelmi forgalomban kapható kukorica hibridek aflatoxin B₁ toxin kontaminációja, mesterséges *A. flavus* inokulációt követően, 2017-2018

Sárgával az átlag alatti toxin koncentrációkat jelöltük.

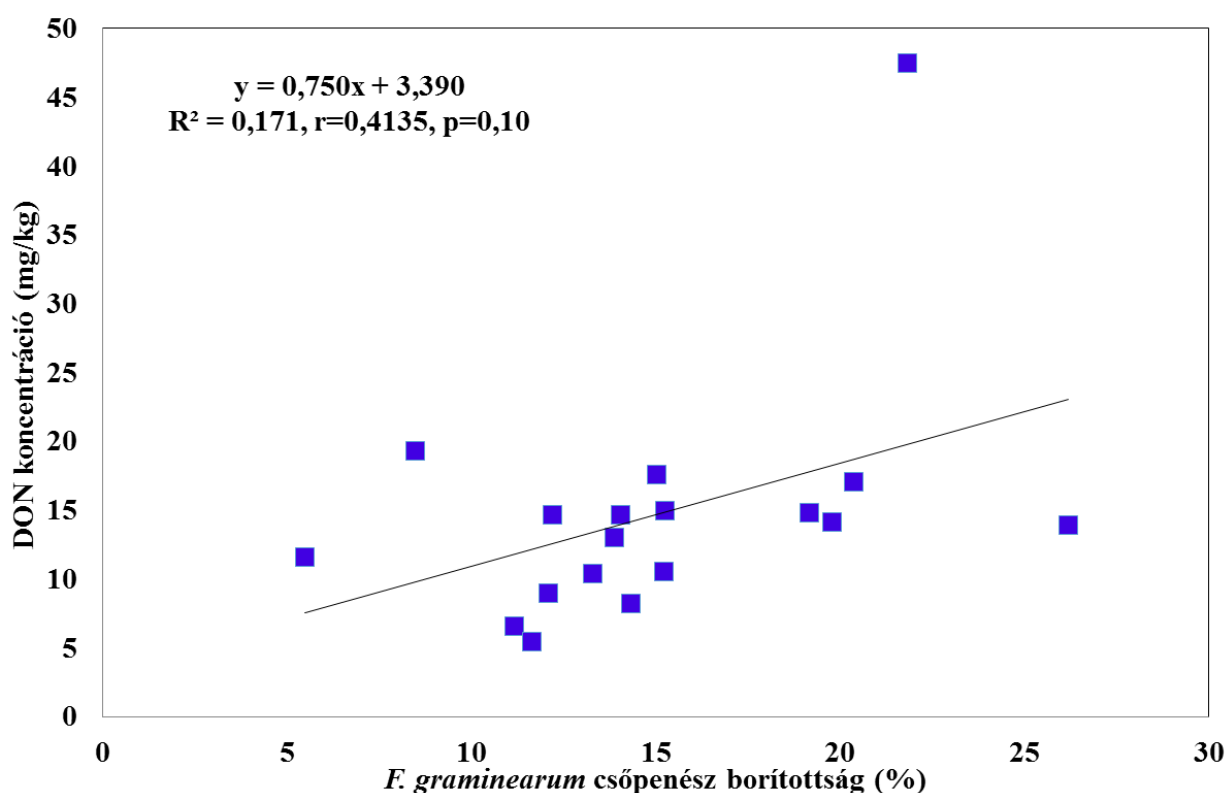
Hibrid	Aflatoxin B ₁ koncentráció (µg/kg)				Átlag	Variancia
	Asp2 2017	Asp1 2017	Asp2 2018	Asp1 2018		
Valkür	15,00	16,00	0,00	21,00	13,00	82,00
P9241	21,00	12,00	9,00	37,00	19,75	158,25
DKC4590	36,00	18,00	17,00	15,00	21,50	95,00
P9537	48,00	30,00	5,00	4,00	21,75	450,92
Cardixxio Duo	28,00	69,00	20,00	1,00	29,50	821,67
P9903	63,00	14,00	64,00	13,00	38,50	833,67
DKC4717	41,00	58,00	38,00	24,00	40,25	194,92
DKC4393	14,00	65,00	73,00	25,00	44,25	847,58
DKC4541	64,00	118,00	14,00	34,00	57,50	2049,00
P9911	102,00	102,00	31,00	2,00	59,25	2576,92
4517	119,00	144,00	31,00	17,00	77,75	3988,92
PR37F80	89,00	84,00	40,00	328,00	135,25	16996,92
Fornad	145,00	162,00	81,00	161,00	137,25	1466,92
Siló Star	350,00	81,00	64,00	314,00	202,25	22710,92
Szegedi 521	516,00	334,00	45,00	264,00	289,75	37904,25
Korimbos	345,00	779,00	70,00	1,00	298,75	124586,92
DKC5830	847,00	77,00	356,00	8,00	322,00	145134,00
DKC5542	333,00	697,00	321,00	3,00	338,50	80473,00
Átlag	176,44	158,89	71,06	70,67	119,26	24520,65
SZD 5%						66,29

	Asp2 2017	Asp1 2017	Asp2 2018	Asp1 2018
Asp1 2017	0,3966			
Asp2 2018	0,7450***	0,4128		
Asp1 2018	0,2121	-0,0471	-0,1197	
Átlag	0,8754***	0,7436***	0,7368***	0,2934

***p=0,001

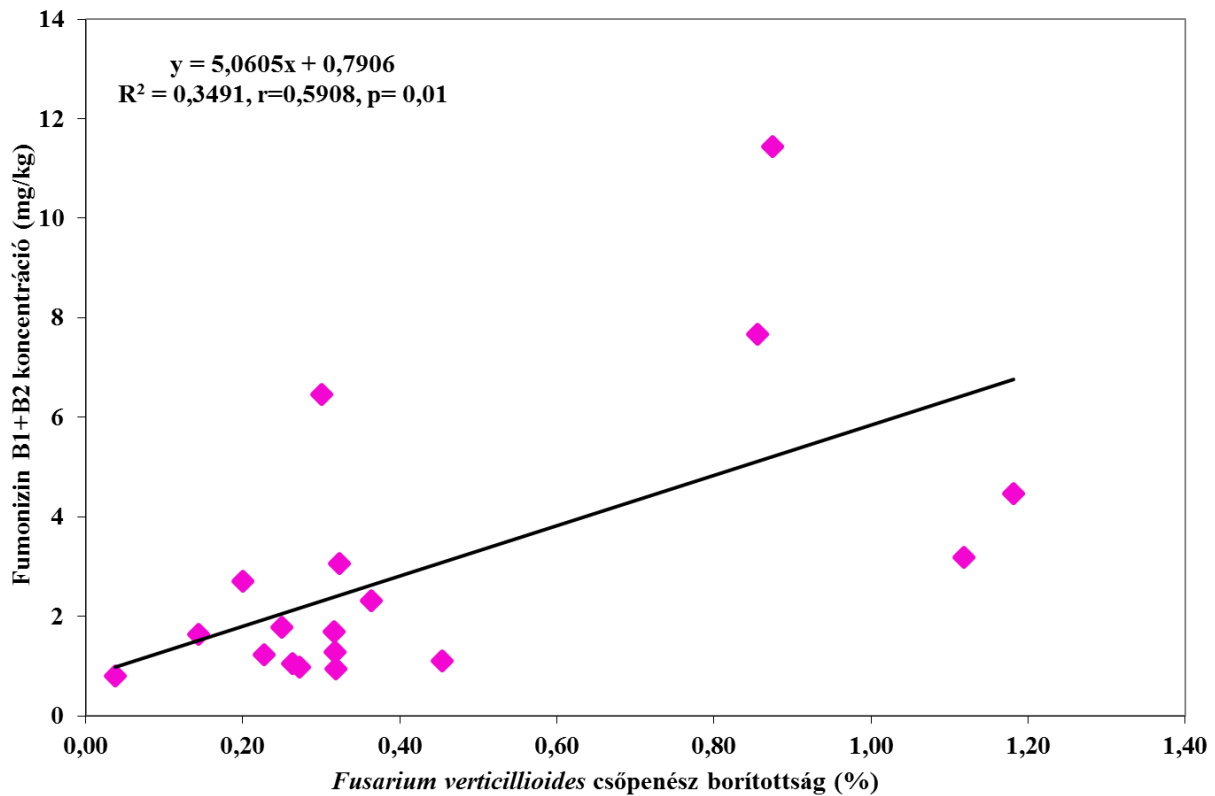
4.6. Összefüggés a szántóföldi adatok és toxin vizsgálat eredményei között, 2017-2018

A szántóföldi mesterséges *F. graminearum* fertőzöttségi adatok és a DON toxin koncentráció közötti összehasonlítás eredménye alapján (17. ábra) csak gyenge összefüggés áll fenn a két tényező között ($p=0,1$). A kapott grafikon alapján számos olyan hibrid van, amely esetében az alacsony fertőzöttséghez alacsony toxin koncentráció is társult. Volt azonban egy olyan genotípus is, amely az alacsonyabb fertőzöttségi szinthez képest is fogékonyabb volt a toxin felhalmozódásra. Ez fokozottabb kockázatot jelenthet. Ha a vizsgálatból ezt a genotípust kivesszük, a korreláció szorossága $r=0,5136$ -ra változott ($p=0,05$). A hibridek túlnyomó többségénél ennek értelmében a fertőződés és a toxin koncentráció között sokkal szorosabb összefüggés áll fent.



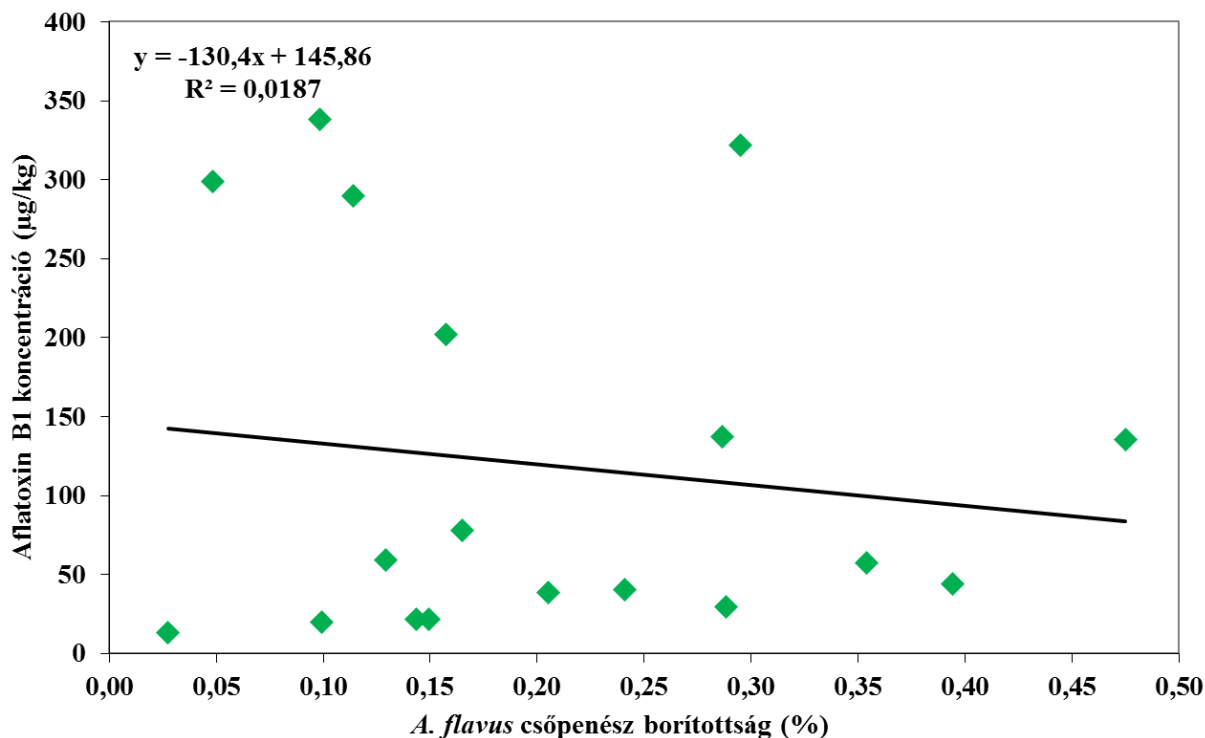
17. ábra: A *F. graminearum* fertőzöttségi adatok és a DON toxin koncentráció közötti összefüggés, 2017-2018

A szántóföldi *F. verticillioides* fertőzöttségi adatok és a fumonizin koncentráció közötti összehasonlítás eredménye alapján (18. ábra) szignifikáns összefüggés áll fenn a két tényező között ($p=0,01$). Ebben az esetben két olyan hibridet találtunk, melyek érzékenyebbek voltak a toxin felhalmozódásra. A két genotípus adatait figyelmen kívül hagyva még magasabb regressziós együtthatót kapunk ($r=0,69$).



18. ábra: A *F. verticillioides* fertőzöttségi adatok és a fumonizin koncentráció közötti összefüggés, 2017-2018

A szántóföldi *A. flavus* fertőzöttségi adatok és az aflatoxin koncentráció közötti összehasonlítás eredményt a **19. ábra** szemlélteti. A fertőzöttségi értékek igen alacsonyok voltak, de ennek ellenére a toxin kontamináció mértékében annál jelentősebb kilengések voltak tapasztalhatók. Itt öt olyan genotípust találtunk, amelyek esetében a felhalmozott AFB₁ mennyisége szignifikánsan több volt, mint ami a tünetek százalékos értéke alapján várható volt. Ha ezt az öt hibrid adatait eltávolítjuk az analízisből, az összefüggés $r=0,61$ -re javul ($p=0,05$), annak ellenére, hogy csak 13 hibrid szerepel benne. A kiugró értékekkel rendelkező hibridek közül nem a magas vagy az átlagnál nagyobb fertőzöttségűek veszélyesek, mert ezek már a tünetek alapján kizárhatóak a nemesítési programokból. Az alacsony fertőzöttségű, de mégis magas AFB₁ tartalommal rendelkező genotípusok a veszélyesek. Ezt a rizikót csak toxinanalízisekkel lehet kiszűrni.



19. ábra: Az *A. flavus* fertőzöttségi adatok és az aflatoxin koncentráció közötti összefüggés, 2017-2018

Az adatok megfelelő értékelhetősége érdekében egy táblázatban tüntettük fel a fertőzöttségi adatokat és a toxin koncentrációkat (**2. melléklet**). Az ellenállósági viszonyokat a színátmenetek jelölik, ahol a fehér a legalacsonyabb, míg a vörös a legmagasabb biztonsági kockázat kategóriát jelöli. A táblázat adatait a *F. graminearum*-mal szembeni rezisztencia sorrend alapján rendeztük. Korábbi feltevésünket, mely szerint a különböző fajokkal szembeni rezisztencia nem feltétlen esik egybe, ezúttal is igazolni tudtuk. Emellett a toxin vizsgálat eredményei sem mindig támasztották alá a szántóföldi fertőzöttségi adatokat. Legjobb példa erre talán a pozitív kontroll Korimbos, mely rendkívül jó szántóföldi rezisztencia tulajdonságokkal rendelkezett, azonban az aflatoxin kontaminációja magas volt. Hasonló adatokat figyelhetünk meg a Szegedi 521 esetében is. A Valkür esetében jó példát láthatunk arra, hogy a genotípus rendkívül jó rezisztencia tulajdonságokkal rendelkezik, igen pozitív termés tulajdonságokkal, azonban egy fajjal, a *F. graminearum*-mal és toxinjának felhalmozódásával szemben viszont rendkívül érzékeny, mely szintén alátámasztja, hogy a különböző fajokkal szembeni rezisztencia genetikai háttere nem esik egybe. Vizsgálataink és szűréseink során mindenképp érdemes a természetes fertőződést és az abból származó toxin koncentrációt is figyelembe venni. Ezek számos esetben összefüggésben vannak a mesterséges fertőzés eredményeivel, de sok esetben pozitív vagy negatív irányú kilengések tapasztalhatóak,

mely miatt pusztán ezen eredmények értékelése nem alkalmas a helyes rezisztencia sorrend megállapítására. A korrelációs vizsgálat eredményei alapján (**3. melléklet**) azt láthatjuk, hogy a mesterséges *F. verticillioides* fertőződés és a természetes *Fusarium* fertőződés között magasfokú korreláció állt fent, hasonlóan a fumonizin koncentrációkhoz, mely megerősíti a tényt, hogy a természetes fertőződés kialakításában leginkább ez a faj vesz részt a kukorica esetében. A mesterséges *F. verticillioides* fertőződés és a mesterséges *A. flavus* fertőződés között is szignifikáns összefüggés volt, mely alátámasztja több korábbi eredményünket is. A FAO számmal mindössze egy esetben találtunk jelentősebb korrelációt, a *F. graminearum* mesterséges fertőződés nyomán kialakult DON kontaminációval. A *F. graminearum* fertőződés emellett némileg ellentmondásos módon pozitív korrelációban áll az *A. flavus* fertőződéssel, de az aflatoxin koncentrációval viszont már negatívan korrelál.

5. DISZKUSSZIÓ

A gyakorlati nemesítési és rezisztencia szűrési munkák során alapvető feltétel az, hogy a vizsgált genotípusok között jelentős és szignifikáns különbségek legyenek a patogén gomba fajokkal szemben. Vizsgálataink során igyekeztünk mesterséges fertőzési módszer használatával előidézni a szelekcióhoz szükséges fertőzési nyomást és a megfelelő rezisztencia sorrend felállítását. Mindkét kísérlet sorozatban jelentős és szignifikáns különbségeket fedtünk fel a kukorica hibridek ellenállóságának tekintetében. A 2012-2013-as kísérletekben a kísérleti átlagokat tekintve hétszeres, míg a 2017-2018-as adatokban ötszörös különbségeket fedtünk fel a fertőzöttségi értékek között. A toxin vizsgálati eredményeket tekintve hasonló képet láthattunk. A 2012-2013 évi kísérletekben a genotípusok toxin koncentrációi között hatszoros különbségek voltak, míg 2017-2018-ban ez a DON esetében szintén hatszoros, a fumonizin esetében nyolcszoros, az aflatoxin esetében pedig huszonhétszeresnek adódott. A kapott különbségek minden esetben magas fokon ($p=0,001$ és $p=0,01$) szignifikánsak voltak, így a hibridek szelekciójához szükséges jelentős, szignifikáns különbségek elérhetőek ennek a fertőzési módszernek az alkalmazásával.

5.1. A természetes fertőződés monitorozásának és a mesterséges fertőzés alkalmazásának ellentmondásai a kórtani szűrővizsgálatok során

A kukorica csőpenészt okozó gombákkal szembeni ellenállósága egy nagyon komplex, sok változós, mennyiségi tulajdonság. Az egymást követő évek járványhelyezeteinek hektikussága (Goertz és mtsai., 2010) és sokszínűsége következtében a természetes fertőződés csak nagyon ritka esetben ad elegendő információt ahhoz, hogy arra megfelelő nemesítési programot lehessen felépíteni. A nemesítési folyamat során számos olyan évjárat előfordulhat, amikor egyetlen gomba fajra sem lehet szelektálni érdemben és nagy eséllyel az összes faj természetes előfordulása sem reális ebben az időszakban. Ez azt vetíti előre, hogy megfelelő szelekciós nyomás nélkül olyan genotípusok kerülhetnek köztermesztésbe, amelyek egy járványos évben, megfelelő környezeti körülmények között egyrészt hatalmas termés deficitet okoznak (Mesterházy és mtsai., 2020), másrészt a láthatatlan toxin koncentráció következtében élelmiszerbiztonsági kockázatot is jelentenek (Mesterházy és mtsai., 2022). Ezért szükséges a mesterséges fertőzési módszer alkalmazása (Young és mtsai., 1943; Mesterházy és mtsai., 1982;1983) a rezisztencia szűrése során és támogatva a szelekciós munkát. A korábbi

vizsgálataink alkalmával bebizonyosodott, hogy nem elegendő egy toxikus fajjal szemben tesztelni (Mesterhazy és mtsai., 2012, Szabó és mtsai., 2018). Magyarország kontinentális, ám melegedő éghajlata mind a 4 kórokozó faj növekedésének és mikotoxin termelésének kedvez, így ezek egyidejű tesztelése szükséges. Az általunk kivitelezett kísérletekben a természetes fertőződést reprezentáló kontroll sorok fertőződése és a mesterségesen fertőzött sorok között fajtól függően akár negyvenszeres különbségek is voltak (2017-2018 *F. graminearum* fertőzött sorok). A gyenge fertőzőtségi értékek hátránya az is, hogy a hibridek közötti ellenállóságbeli különbségek sem annyira kifejezettek, így az ez alapján felállított sorrend is másképp alakul, mely téves szelekciós döntések meghozatalát hozhatja. Legjobb példa erre a 2017-2018 kísérletben szereplő Szegedi 521 és a Valkúr. A Valkúr rendkívül alacsony természetes fertőzőtségi értéke miatt a lista elején szerepelne, azonban egy *F. graminearum* fertőzések által sújtott csapadékosabb, hűvösebb nyáron (pl. 2014, 2018) jelentős termésvesztés lépne fel az intenzív fertőződés következtében. A Szegedi 521 ezzel szemben remekül szerepelt a mesterséges fertőzési kísérletekben és mindössze a nyitott csóvég miatt időszakosan fellépő természetes fertőződés miatt jelent rizikót. A terméspotenciáljával nem arányos a veszély, melyet a természetes fertőződés magasabb értéke jelent.

5.2. A különböző fajok patogenitása és toxin termelő képessége közötti különbség

A 2012-2013 és a 2017-2018 évi vizsgálataink alapján a magyarországi klimatikus viszonyok között a *F. graminearum* a legpatogénebb faj a kukorica esetében, annak ellenére, hogy talán nem ez az elsődlegesen a növényre specializálódott gomba faj (Almeida és mtsai., 2000; Adejumo és mtsai., 2007; Aliakbari és mtsai., 2007; Tóth és mtsai., 2012; Czembor és mtsai., 2015). A *F. verticillioides* ennél jóval gyengébb fertőzőtségi értékeket produkált, melyeknél az előző fajhoz képest sok esetben nagyságrendbeli eltérés volt. A *F. culmorum* az általunk vizsgált időszakban némileg magasabb patogenitással rendelkezett, mint a *F. verticillioides*. A vizsgált fajok közül az *A. flavus* volt a leggyengébb fertőzőképességű, általában a *F. verticillioides* faj átlagának felét tapasztaltuk. A toxin vizsgálatok eredményei alapján a 2012-2013 évi kísérletekben a fumonizin mennyisége jelentősen meghaladta a DON koncentrációját, mely magyarázható a magasabb átlaghőmérsékletű, szárazabb nyarak előfordulásával. A DON mennyisége nagyságrendileg fele akkora volt a *F. graminearum* esetében, míg harmada a *F. culmorum* esetében. A 2017-2018-as kísérleti években a DON koncentrációja közel ötszöröse volt a fumonizin analógok mennyiségének, míg az aflatoxin mennyisége nagyjából század része

volt. A fertőzöttségi értékek és a toxin koncentrációk között a 2012-2013-as kísérletek *A. flavus* adatait kivéve minden esetben magas fokon szignifikáns különbségek ($p=0,001$) voltak.

5.3. A fertőzéshez felhasznált izolátumok patogenitása, száma

A korábbi irodalmi adatok feldolgozása során azt tapasztaltuk, hogy a kísérletekben vagy tiszta izolátumokat, vagy egy fajból származó izolátumok keverékét, vagy pedig több faj izolátumainak keverékét használták, de minden esetben csak egyet fajonként (Mesterházy és mtsai., 2012). Jelenlegi ismereteink szerint az általunk vizsgált kórokozóknál nincsenek rasszok, így ezek lokális izolátumai használhatóak a szelekciós feladatokra, akár az izolálásuk helyétől távolabb is. Ugyanazon faj izolátumai között akár tizennyolcszoros különbségek is lehetnek patogenitásuk terén (2017: Fg1-Fg3 *F. graminearum* izolátumok). Az eredményeink alapján jól látszik, hogy mind a 4 faj mindkét izolátuma esetében szignifikáns különbségek voltak a fertőződés esetében, így az azonos fajba tartozó izolátumok agresszivitása jelentősen eltért egymástól. Ezek alapján egy izolátummal végzett kísérlet esetében nem lehet következtetéseket levonni a genotípusok ellenállóságáról, mivel a különböző patogenitású inokulumok esetében a hibridek rezisztencia sorrendje is megváltozik. Mivel a kísérleti eredmények alapján a hibrid X izolátum kölcsönhatás magas fokon szignifikáns, ezért az izolátumok esetében nem beszélhetünk egy éveken átnyúló, stabil szintű agresszivitásról minden hibrid esetében. Ezért a szűrési vizsgálatok alkalmával legalább kettő, de leginkább 3 izolátum alkalmazása célszerű. A 4 izolátum alkalmazása már akkora plusz munkamennyiséget jelentene, hogy annak gazdasági megtérülése hosszabb távú. Az *A. flavus* esetében az izolátumok jelentős része sem *in vivo*, sem pedig *in vitro* körülmények között nem termel aflatoxint. A másik három faj izolátumai esetében akár háromszoros különbségek is lehetnek toxintermelő képességük között. Mivel az izolátumok ugyanazon környezeti feltételeknek vannak kitéve, így a fenotípusos variációk inkább genetikai eredetűek. Mivel az évek között is jelentős különbségek voltak a kísérleti eredmények tekintetében, ezért az adatok megbízhatósága érdekében legalább két éves kísérletet célszerű tervezni.

5.4. A földrajzi elhelyezkedés és az időjárás hatása a fertőzöttségi értékekre és a mért toxin koncentrációkra

A földrajzi elhelyezkedés hatását a 2012-2013 évi kísérletekkel tudtuk jól modellezni. Ennek során nemcsak a fertőzőképességre, hanem a fajok toxintermelésre gyakorolt hatást is modellezni lehetett. A környezeti optimumokat figyelembe véve a *F. graminearum* és a *F. culmorum* inkább a hűvösebb, csapadékosabb időjárási körülmények között képes jelentősebb fertőzést és toxin koncentrációkat produkálni (Martins és mtsai., 2002; Stewart és mtsai., 2002; Pleadin és mtsai., 2012), addig a *F. verticillioides* a melegebb, szárazabb klimatikus viszonyokat kedveli (Schjoth és mtsai., 2009; Marín és mtsai., 2010; Cao és mtsai., 2014), az *A. flavus* pedig a trópusi jellegű szárazabb, forró nyarakat preferálja (Cotty és Jaime-Garcia, 2007; Dobolyi és mtsai., 2013; Kos és mtsai., 2013; Medina és mtsai., 2015).

A két kísérleti helyszín időjárási adatait figyelembe véve a két kísérleti év tendenciája azt mutatta, hogy a szerbiai helyszín átlaghőmérsékletei éves szinten valamennyivel alacsonyabbak voltak, a csapadékos napok száma és a lehullott csapadék mennyisége pedig több. Kiszombor ennek megfelelően az Alföld DK-i részén magasabb hőmérséklettel és szárazabb klimatikus viszonyokkal rendelkezett.

A fertőzöttségi adatokat vizsgálva, a várakozásoknak megfelelően a szerbiai helyszínen a *F. graminearum* fertőződés közel másfélszeres átlaggal rendelkezett, míg a *F. culmorum* is magas fertőzőképességű volt. A 2012-es adatok alapján az egyik *F. verticillioides* izolátum jelentősebb járványhelyzetet tudott modellezni Szerbiában, de ennek ellenére a többi adatsor alátámasztja, hogy *F. verticillioides* Kiszombor klimatikus viszonyai között eredményesebben tud fertőzni. Az *A. flavus* patogenitása nem mutatott jelentősebb eltéréseket a két kísérleti helyszínen. A fertőződés mértéke közötti különbségek az első három faj esetében magas fokon szignifikánsak ($p=0,001$) voltak a Helyszín főhatás vonatkozásában. A toxintartalom tekintetében szintén jelentősebb különbségeket tudtunk kimutatni a két helyszínen. A fumonizin koncentrációk alapján a kiszombori kísérlet toxin szennyezettsége közel húszszorosa volt a bácskertesinek az összesített koncentrációkat illetően. A DON tartalom a szerb mintákban volt nagyobb, melynek mértéke összesen százszoros volt a *F. graminearum*-mal fertőzött csövek esetén, míg tízszeres a *F. culmorum*-mal fertőzött csövek esetén. A különböző fajok által termelt mikotoxinok (DON, Fumonizin B₁+B₂) koncentrációi között a két kísérleti helyszínen szintén magas fokon szignifikáns ($p=0,001$) különbségeket tudtunk kimutatni.

5.5. A vizsgált toxikus gomba fajokkal szembeni rezisztencia genetikai háttere kukoricában és a kiváltott fertőzések közötti összefüggések

A kísérleti eredmények alapján a különböző fajokkal szembeni rezisztencia genetikai háttere nem esik egybe. Korábbi vizsgálati eredményeket (Mesterházy és mtsai., 1982; 2000; Kovács és mtsai., 1988; Oldenburg és mtsai., 2015) alátámasztva, a 2012-2013 évi kísérletekben is szorosabb összefüggést mutattak a *F. graminearum* és *F. culmorum* fertőzöttségi adatok, ami arra enged következtetni, hogy a két fajjal szembeni rezisztencia genetikai háttere közel azonos lehet. A két faj környezeti igényeit (Martins és mtsai., 2002; Stewart és mtsai., 2002; Pleadin és mtsai., 2012) figyelembe véve azonban meg kell állapítanunk, hogy az elterjedési terület függvényében nem minden esetben lehet mindkét fajjal szemben tesztelni a genotípusokat, így ezekben az esetekben előnyös, ha a közös genetikai háttér enged következtetni a másik fajjal szembeni ellenállóság szintjére is. Másik olvasata a kérdéses témának, hogy az adott földrajzi régióban viszonylag kis eséllyel okoz mindkét faj azonos erősségű fertőzést, így mindenképp érdemes a tesztelésben mindkét fajt alkalmazni annak elkerülésére, hogy esetlegesen az adott régióban kevésbé patogén fajjal szembeni rezisztencia vizsgálata téves következtetéseket okozzon a hibridek vizsgálata során.

A *F. verticillioides* fertőződés gyengébb, ám de ennek ellenére szignifikáns kapcsolatot mutatott az előbbi két faj által kiváltott fertőzéssel, de ez csak a 2012-2013-as kísérletekben volt igaz. Az *A. flavus* rezisztencia látszólag csak a *F. verticillioides* fajjal szembeni rezisztencia genetikai hátterével hozható összefüggésbe (Robertson-Hoyt és mtsai., 2007; Henry és mtsai., 2009). Az első kísérlet sorozatban erre szignifikáns összefüggést nem találtunk, de ebben a relációban is ezzel a fajjal mutatta a legszorosabb összefüggést. A 2017-2018-as kísérletekben már szignifikáns kapcsolatot ($p=0,05$) tudtunk kimutatni a két faj által kiváltott fertőződés között is. A természetes fertőzést reprezentáló kontroll sorok fertőzöttségével szintén-e két faj mutatott mindkét kísérletben szignifikáns összefüggést, mely alátámasztja azt, hogy átlagos években ez a két faj okozza a természetes fertőzést a legnagyobb valószínűséggel.

A rangkorreláció alkalmas volt arra, hogy a patogenitásbeli jelentős különbségeket csökkenteni tudja, de a rezisztencia tulajdonságok korrelációjában mindössze kisebb szerepe volt csak. Presello és mtsai. (2004; 2006) szignifikáns összefüggést találtak a *F. graminearum* és *F. verticillioides* rezisztencia vonatkozásában, míg Löffler és mtsai. (2010) szoros fenotípusos és genotípusos korrelációt fedtek fel a két faj által okozott fertőződés esetében. A *F. graminearum* és *F. culmorum* fajokkal szembeni ellenállóság tekintetében is születtek olyan közlemények, melyek szorosabb összefüggésre mutattak rá ennek a két fajnak a viszonylatában. Henry és

mtsai. (2009) a *F. verticillioides* és *A. flavus* fertőzések közötti korrelációt vizsgálva $r=0,72$ ($p=0,02$) összefüggést találtak. Williams és Windham 2009-ben szintén hasonló következtetésekre jutott e két fajjal kapcsolatban.

Az eredményeink alapján körvonalazódik, hogy a különböző fajok fertőzőképességének vonatkozásában szignifikáns különbségek voltak, de az ezekkel szembeni rezisztencia már sokkal komplexebb. A kísérleteink során 3 olyan genotípust találtunk, melyek minden vizsgált fajjal szemben átlag alatti fertőzöttségi értékekkel rendelkeztek, míg akadtak olyanok is, melyek minden fajjal szemben fogékonyabbak voltak. A hibridek jelentős része vegyes eredményekkel zárt, mely felhívja a figyelmet a szűrővizsgálatok fontosságára, tekintettel arra, hogy az egyik fajjal szemben rezisztensebb hibrid, a többi faj által okozott járványos években komoly kockázatot jelent.

Eredményeink ismét rávilágítottak arra, hogy a *F. graminearum* és *F. culmorum* fajokkal szembeni ellenállóság között szorosabb összefüggés található (Mesterhazy és mtsai., 1982; 1983). Az *A. flavus* faj esetében azonban, mi sem a *F. verticillioides*-szel, sem pedig a többi *Fusarium* fajjal szemben nem találtunk szignifikáns összefüggést a fertőzöttségi adatsorok között. Robertson-Hoyt és mtsai. (2006a) szintén szignifikáns kapcsolatot találtak a *F. verticillioides* és *A. flavus* fertőzések között és ők ezt QTL analízissel alá is tudták támasztani (2006b). Xiang és mtsai. (2010) a *F. graminearum*, a *F. verticillioides* és *A. flavus* fajokkal szembeni rezisztencia viszonyokat vizsgálták és ennek során ugyanarra a QTL-re térképeződtek a tulajdonságok, aminek alapján valószínűsíthető lehet a közös genetikai alap. A mi kísérleti eredményeink ezeket a kutatásokat nem támasztják alá, de ennek ellenére a két tanulmány nem zárja ki egymást, mivel az eredmények különbözőségére magyarázatul szolgálhat a kísérleti hibridek különböző genetikai eredete.

Mivel a vizsgálati eredményeink alapján alacsony százalékban fordultak elő olyan hibridek, melyek minden fajjal szemben ellenállóbbak, vagy fogékonyabbak voltak, ezért nem fogadhatjuk el általános megállapításként az általános rezisztencia feltevését, mivel a genotípusok 80%-a esetében a különböző fajokkal szemben ellentmondásos adatok alapján más hibrid rezisztencia sorrendet is kaptunk. Mivel csoportunk korábban számos hibrid szortimentet vizsgált és ezek esetében sem mindig volt felfedezhető ugyanolyan rezisztencia mintázat, ezért feltételezhető, hogy a vizsgált genotípusok csoportjai a különböző nemesítési eredet következtében kísérletenként más-más reakciókat mutathatnak a rezisztencia vonatkozásában. Ennek ellenére sem zárható ki a *F. verticillioides* és *A. flavus* fajokkal szembeni rezisztencia összefüggése, mivel a hibrid szortimentekben mi is találtunk olyan elemeket, melyek

alátámaszthatják ezt a nézetet is. A fentebb említett okokra hivatkozva szakmailag a hibridek és beltenyészett vonalak vizsgálata során továbbra is minden fajjal szemben célszerű tesztelni.

5.6. A toxin felhalmozódással szembeni rezisztencia és a csőpenész rezisztenciához fűződő kapcsolata

A különböző toxikus fajok fertőződésével szembeni rezisztencia és az ezek által termelt mikotoxinok felhalmozódásával szembeni rezisztencia egyenlően fontos tulajdonságok egy kukorica genotípus esetében. De emellett az is nagyon fontos tényező, hogy ez a két jellemző mennyire mutat szoros összefüggést egymással, tehát ezek vizsgálata mennyire válthatja ki egymást. Henry és mtsai. (2009) vizsgálata alapján a *F. verticillioides* fertőződés szintje és az általa termelt fumonizin mennyisége között szoros, szignifikáns összefüggés volt. Hasonló eredmény mutatkozott az *A. flavus* fertőződés és aflatoxin koncentrációk között is (Windstrom és mtsai., 2003). Bolduan és mtsai. (2009) a *F. graminearum* fertőződés és DON kontamináció mértéke között talált $r=0,94$ szoros összefüggést. A korábbi szakirodali adatok alapján mindenképp megállapítható, hogy a csőpenészekkel szembeni rezisztencia fontos tényező a rezisztencia egészét tekintve. Azonban azt is fontos megjegyeznünk, hogy ez abban az esetben lehet igazán meghatározható, ha a toxin koncentrációk és a csőpenész borítottság értékek között mindig elég szoros a korreláció.

Jelen vizsgálatok alkalmával a *F. graminearum* fertőződés és DON kontamináció mértéke között mi is $r=0,9655$ ($p=0,001$) szoros összefüggést kaptunk, mely alátámasztja Bolduan és mtsai. (2009) eredményeit. A *F. culmorum* esetében szintén szoros összefüggést kaptunk a toxin adatokkal ($r=0,81$). Ezek a korrelációs adatok voltak az egész kísérlet esetében is a legmagasabbak fokúak. Természetesen ez az összefüggés csak egy általános megállapítás, mert a különböző kukorica genotípusok között vannak olyanok, melyek valamelyik tulajdonság esetében kiugró értékeket produkáltak.

A *F. verticillioides* esetében, a kísérlet egészét tekintve nem találtunk szignifikáns összefüggést a csőpenész borítottság és a toxintartalom között. A két kísérleti helyszínt külön-külön tekintve azonban volt egy gyengén szignifikáns kapcsolat. Tapasztalataink alapján egy adott fertőzöttségi szinthez rendkívül divergens toxin koncentrációs értékek tartozhatnak és mindez még a termőhelyek tekintetében is változhat. A *F. verticillioides* rezisztencia különös megnyilvánulása mellett még a korrelációs analízis eredményei is kirívóak voltak, mivel több esetben negatív korreláció állt fent más toxikus fajokkal szemben mutatott reakciókhoz képest. A két termőhely adatait vizsgálva azt láthatjuk, hogy a kiszombori alacsonyabb fertőzöttségi

értékekhez kiugróan magas fumonizin koncentrációk társultak, mely a bácskerteszi adatok alapján megfordult, ahol a magas szántóföldi gomba szennyezettséget jóval alacsonyabb mikotoxin koncentráció meghatározása követett. Megállapítható tehát, hogy a fertőzöttség létrejöttének és a toxin felhalmozódásnak más-más környezeti optimuma van, és nem lehet feltétlen az egyik adatból következtetést levonni a genotípusra nézve.

A *F. graminearum* esetében meg kell említenünk egy különös tünet együttest, melyet először Christensen és Kaufmann (1969) írt le. Vizsgálataik alapján a fertőződés terjedése a szemek 23%-os szemnedvesség tartalmánál leáll, azonban a csutkában ekkor még 30% körül alakul ez az érték, így a gomba növekedése a rachilla felől továbbra is fenáll. Ezekben az esetekben a szemek látszólag egészségesek lehetnek és csak épp a szemek csúcsi részén látszik elszíneződés, mégis jelentős DON toxin felhalmozódást okozhat a gomba. A gomba terjedése ebben az esetben körülbelül még két hétig tovább folytatódik a szem érettsége ellenére. Oldenburg és Ellner (2015) szintén megerősítette ezt. Ezt a jelenséget már a hetvenes években megfigyelték, de mi is kimutattuk ezt 2014-ben több, természetes eredetű fertőződés esetében. A csöveken kívülről nem látszott fertőződés és a szemek morzsolása után is csak minimális volt a fertőződés mértéke a szemek alján, a csutka viszont nagy felületen elszürkült a gomba terjedése következtében. Ezekben a mintákban az EU DON toxin határértékének többszörösét tudtuk kimutatni. A hűvös, ámde rendkívül csapadékos szeptember és október következtében ez némileg magyarázható volt.

Egyéb kísérleteink esetében is megvizsgáltuk ebben az évben a természetes fertőződést reprezentáló kontroll sorok mintáinak mikotoxin koncentrációit. A természetes fertőződési szint alacsony volt ezeknek a soroknak az esetében. Az eredményeink alapján a rendkívül magas DON koncentrációk mellett magas volt a fumonizin és az aflatoxin előfordulási gyakorisága is, mely felborította a toxin termelés optimális környezeti feltételeiről alkotott elképzelésünket, mivel a 2014. év időjárási körülményei ellent mondtak ennek a kevésbé forró nyár és a hűvös, csapadékos őszi miatt. 2017-ben hasonló felmérés alkalmával a forró, száraz nyár eredményeképp rendkívül magas aflatoxin koncentrációkat mértünk természetes fertőződésű mintákból is, melyhez tartozó fertőzöttségi értékek ugyanakkorák voltak, mint 2014 esetében. Ez is rávilágított arra, hogy a természetes fertőződés mértékéből és általánosságban a csöpenész borítottságból nem lehet a toxin felhalmozódással szembeni rezisztencia mértékére nézve következtetést levonni. A vizsgált hibrid szortimentben voltak olyanok, melyek a kedvezőtlenebb időjárási körülmények ellenére, mégis 2014-ben halmoztak fel több aflatoxint. A kapott eredményeinket az országos felmérések is alátámasztották (Mesterházy és mtsai., 2022). Ez pedig ismét arra enged következtetni, hogy a csöpenész

borítottság kialakulásának és a toxin felhalmozódásnak más-más környezeti körülmények kedveznek. Ezek a jelenségek természetesen jelentősen megnehezítik a fenotípezálási munkát is. Amíg a jelenségek magyarázatát nem értjük meg, addig egyetlen lehetséges módszer az lehet, hogy a több éves tesztelés alkalmával, minden kórokozóval szemben a rezisztensebb hibrideket, beltenyészett vonalakat szelektáljuk ki a nemesítési munka során.

Azt már korábban is felismerték, hogy a természetes fertőződés felvételezése nem elegendő a rezisztencia sorrend felállításához, de eredményeink azt is bizonyítják, hogy annak ellenére, hogy a mesterséges fertőzés erőteljesebb szelekciót biztosít, mégsem lehet csak ennek eredményére támaszkodni a vizsgálatok során (Szabó és mtsai., 2018; Mesterhazy és mtsai., 2022). Mivel a piacot a toxinokra vonatkozó határértékek befolyásolják, így erre is nagy hangsúlyt kell fektetni a gyakorlati nemesítési munka során és egyenlő latba kell vetni a fertőződési értékekkel a szelekció során.

5.7. Szelekciós vizsgálatok a nemesítési munka szolgálatában

A rezisztencia egy poligénikus tulajdonság, melyet több QTL határoz meg. Ez egy stabil genetikai hátteret jelent, de a rezisztencia tulajdonságok expressziója változhat az évjárat, a klimatikus viszonyok és akár a különböző izolátumok hatására is (Liakat-Ali és mtsai., 2005; Mukanga és mtsai., 2010; Löffler és mtsai., 2011; Mideros és mtsai., 2012). Az élelmiszer- és takarmánybiztonsági problémák orvoslásának talán a leggyorsabb és legegyszerűbb módja, ha a jelenlegi hibrid szortiment tesztelése után azokat a genotípusokat ajánljuk a termelőknek, melyek kevésbé fogékonyak a különböző kórokozókkal szemben. A tesztelés során mindenképp vizsgálnunk kell a hibrideket mindegyik fontos kórokozóval szemben és minimum két izolátumot, vagy izolátum keveréket kell alkalmaznunk, annak érdekében, hogy a különböző patogenitásuk alapján, különböző erősségű járványhelyzeteket tudjunk generálni. A szántóföldi vizsgálatokat toxin analízissel kiegészítve, egy komplex kockázati besorolást lehet kialakítani az alacsony, közepes és magas élelmiszerbiztonsági veszélyt jelentő genotípusokból. Sajnos a kockázati besorolásból még hiányzik a teljesen kockázatmentes kategória, mivel eddigi vizsgálataink alapján nem találtunk egyik fajjal szemben sem teljesen rezisztens genotípust (Mesterházy és mtsai., 1982; 2000; Toldi és mtsai., 2008; Szabó és mtsai., 2018). Ennek ellenére, a hibridek közötti 5-10-szeres ellenállóságbeli különbségek monitorozásával és a rezisztensebb hibridek termesztésével, minimálisra lehet csökkenteni a veszélyt. Legfontosabb feladatunk tehát, hogy a kukorica legfontosabb, csőpenészt okozó gomba fajaival szemben rezisztencia teszteket alkalmazzunk, fajonként több izolátummal és végezzük el az

ehhez kapcsoló toxin vizsgálatokat is, mely eredmények alapján a nemesítési szelekciós munkát segíthetjük. A későbbi évek során a kukorica rezisztencia viszonyainak molekuláris genetikai alapjait megismerve elindulhat egy célzott nemesítési tevékenység a rezisztensebb genotípusok előállítására.

6. ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK

1. A kukoricacsövek gombák okozta természetes fertőződésének és a mesterségesen inokulált csövek fertőződésének mértéke között fajtól függően akár negyvenszeres különbségek is lehetnek.
2. A kukorica mikotoxin termelő gomba kórokozói közül Magyarországon, a kísérleti eredményeink alapján a *F. graminearum* a legpatogénebb faj. A *F. verticillioides* és a *F. culmorum* patogenitása jóval alacsonyabb volt. A vizsgált fajok közül az *A. flavus* volt a leggyengébb fertőzőképességű.
3. A kísérletekben alkalmazott egyes gombafajok izolátumai között akár tizennyolcszoros különbségek is lehetnek patogenitásuk terén, míg akár háromszoros különbségek a toxintermelő képességük vonatkozásában.
4. Szerbiában, a kísérleti időszakban magasabb volt a *F. graminearum* és a *F. culmorum* fertőződés átlaga, mint a Kiszomboron beállított mesterséges inokulációs kísérletben. A *F. verticillioides* Kiszombor szárazabb klimatikus viszonyai között eredményesebben tudott fertőzni. Az *A. flavus* patogenitása nem mutatott szignifikáns eltérést a két kísérleti helyszínen. Hasonló különbségek voltak a fajokra jellemző mikotoxinok koncentrációiban is.
5. A *F. graminearum* és *F. culmorum* fajokkal szembeni rezisztencia genetikai háttere közel azonos lehet eredményeink alapján. A *F. verticillioides*-szel szembeni ellenálló képesség ezekhez gyengébben kapcsolódik. Az *A. flavus* rezisztencia csak a *F. verticillioides* rezisztenciával hozható összefüggésbe.
6. A *F. graminearum* és a *F. culmorum* fertőződés, valamint a toxin kontamináció mértéke között szoros összefüggés van. A *F. verticillioides* és *A. flavus* esetében nem találtunk összefüggést a két tényező között.
7. A hibridek közötti, akár 10-szeres rezisztencia különbségek monitorozásával és a fajonként több izolátummal történő rezisztencia tesztek elvégzésével minimálisra lehet csökkenteni az élelmiszer- és takarmánybiztonsági kockázatot.

7. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Ezúton szeretném köszönetemet kifejezni témavezetőimnek Dr. Tóth Beátának és Prof. Dr. Mesterházy Ákosnak, hogy biztosították a PhD disszertációm elkészítéséhez szükséges feltételeket és, hogy szakmai tanácsaikkal és konferenciákon való részvételeim biztosításával segítették munkámat és szakmai fejlődésemet.

Köszönetet szeretnék mondani Szilágyi László, Dr. Szarka Béla, Wágner József és Mandák Attila ügyvezető igazgató uraknak, akik támogatták, hogy munkámat a Gabonakutató Nonprofit Közhasznú Kft. berkein belül végezhessem.

Köszönettel tartozom Dr. Bagi Ferencnek (University of Novi Sad; Department for Plant and Environmental Protection), aki a bácskertesesi kísérletek kivitelezésében volt segítségünkre.

Köszönet illeti Dr. Varga Mónikát, a Gabonakutató Nonprofit Közhasznú Kft. analitikai laboratóriumának korábbi vezetőjét valamint Herczig Beátát, a Bonafarm-Bábolna Takarmány Kft. Vizsgálólaboratóriumának vezetőjét, akik a mikotoxin koncentrációk meghatározásával segítették munkámat.

Köszönet illeti továbbá a Gabonakutató Nonprofit Közhasznú Kft. Kukoricanevelési Osztályának munkatársait, valamint a Kiszombor Dénes-majori Termelési osztály munkatársait a kísérletek kivitelezésében nyújtott munkájukért.

Köszönettel tartozom továbbá közvetlen munkatársaimnak: Berényi Attilának, Berényi-Ormánydlaky Csengének, Frank Szilviának, Meszlényi Tamásnak és Nagy-György Andreának szakmai és baráti segítségükért.

Hálával tartozom továbbá családomnak, akik tanulmányaim és munkám során támogattak és biztatásukkal segítettek.

8. IRODALOMJEGYZÉK

- Adejumo, T. O., Hettwer, U., & Karlovsky, P. (2007). Occurrence of *Fusarium* species and trichothecenes in Nigerian maize. *International Journal of Food Microbiology*, 116(3), 350-357.
- Alassane-Kpembé, I., Kolf-Clauw, M., Gauthier, T., Abrami, R., Abiola, F. A., Oswald, I. P., & Puel, O. (2013). New insights into mycotoxin mixtures: The toxicity of low doses of Type B trichothecenes on intestinal epithelial cells is synergistic. *Toxicology and Applied Pharmacology*, 272(1), 191-198.
- Alberts, J. F., Gelderblom, W. C., Thiel, P. G., Marasas, W. F., Van Schalkwyk, D. J., & Behrend, Y. (1990). Effects of temperature and incubation period on production of fumonisin B1 by *Fusarium moniliforme*. *Applied and Environmental Microbiology*, 56(6), 1729-1733.
- Ali, M. L., Taylor, J. H., Jie, L., Sun, G., William, M., Kasha, K. J., Reid, L. M. & Pauls, K. P. (2005). Molecular mapping of QTLs for resistance to *Gibberella* ear rot, in corn, caused by *Fusarium graminearum*. *Genome*, 48(3), 521-533.
- Aliakbari, F., Mirabolfathy, M., Emami, M., Mazhar, S. F., & Karami-Osboo, R. (2007). Natural occurrence of *Fusarium* species in maize kernels at Gholestan province in northern Iran. *Asian Journal of Plant Sciences*, 6(8), 1276-1281.
- Almeida, A. P., Corrêa, B., Mallozzi, M. A., Sawazaki, E., & Soares, L. M. V. (2000). Mycoflora and aflatoxin/fumonisin production by fungal isolates from freshly harvested corn hybrids. *Brazilian Journal of Microbiology*, 31, 321-326.
- Aoki, T., & O'Donnell, K. (1999). Morphological and molecular characterization of *Fusarium pseudograminearum* sp. nov., formerly recognized as the Group 1 population of *F. graminearum*. *Mycologia*, 91(4), 597-609.
- Arias, M. M. D., Leandro, L. F., & Munkvold, G. P. (2013). Aggressiveness of *Fusarium* species and impact of root infection on growth and yield of soybeans. *Phytopathology*, 103(8), 822-832.
- Baker, R. L., Brown, R. L., Chen, Z. Y., Cleveland, T. E., & Fakhoury, A. M. (2009). A maize lectin-like protein with antifungal activity against *Aspergillus flavus*. *Journal of Food Protection*, 72(1), 120-127.
- Barros-Rios, J., Malvar, R. A., Jung, H. J. G., & Santiago, R. (2011). Cell wall composition as a maize defense mechanism against corn borers. *Phytochemistry*, 72(4-5), 365-371.
- Bartók, T., Szécsi, Á., Szekeres, A., Mesterházy, Á., & Bartók, M. (2006). Detection of new fumonisin mycotoxins and fumonisin-like compounds by reversed-phase high-performance liquid chromatography/electrospray ionization ion trap mass spectrometry. *Rapid Communications in Mass Spectrometry: An International Journal Devoted to the Rapid Dissemination of Up-to-the-Minute Research in Mass Spectrometry*, 20(16), 2447-2462.
- Bartók, T., Tölgyesi, L., Szekeres, A., Varga, M., Bartha, R., Szécsi, Á., Bartók, M. & Mesterházy, Á. (2010). Detection and characterization of twenty-eight isomers of fumonisin B1 (FB1) mycotoxin in a solid rice culture infected with *Fusarium verticillioides* by reversed-phase high-performance liquid chromatography/electrospray ionization time-of-flight and ion trap mass spectrometry. *Rapid Communications in Mass Spectrometry*, 24(1), 35-42.

- Bartók, T., Tölgyesi, L., Szécsi, Á., Mesterházy, Á., Bartók, M., Gyimes, E., & Véha, A. (2014). Detection of previously unknown fumonisin P analogue mycotoxins in a *Fusarium verticillioides* culture by high-performance liquid chromatography–electrospray ionization time-of-flight and ion trap mass spectrometry. *Journal of Chromatographic Science*, 52(6), 508-513.
- Bata, Á., Rafai, P., Kovács, G., & Halász, A. (1997). Study of the effects of N-fertilization and plant density on the resistance of maize hybrids to Fusarial ear rot. *Periodica Polytechnica Chemical Engineering*, 41(1), 11-17.
- Battilani, P., Barbano, C., & Piva, G. (2008). Aflatoxin B1 contamination in maize related to the aridity index in North Italy. *World Mycotoxin Journal*, 1(4), 449-456.
- Battilani, P., Leggieri, M. C., Rossi, V., & Giorni, P. (2013). AFLA-maize, a mechanistic model for *Aspergillus flavus* infection and aflatoxin B1 contamination in maize. *Computers and Electronics in Agriculture*, 94, 38-46.
- Békési, P., & Hinfner, K. (1970). Adatok a kukorica fuzáriumos eredetű megbetegedéseinek ismeretéhez. (Data to the knowledge of Fusarium-caused diseases of Maize.) *Növényvédelem*, 6, 13-18.
- Berthiller, F., Crews, C., Dall'Asta, C., Saeger, S. D., Haesaert, G., Karlovsky, P., Oswald, I. P., Seefelder, W., Speijers, G. & Stroka, J. (2013). Masked mycotoxins: A review. *Molecular Nutrition & Food Research*, 57(1), 165-186.
- Berzsenyi-Janosits, L. (1956). A kukorica termesztése. *Mezőgazdasági Kiadó, Budapest*, 303 pp
- Bezuidenhout, S. C., Gelderblom, W. C., Gorst-Allman, C. P., Horak, R. M., Marasas, W. F., Spiteller, G., & Vlegaar, R. (1988). Structure elucidation of the fumonisins, mycotoxins from *Fusarium moniliforme*. *Journal of the Chemical Society, Chemical Communications*, (11), 743-745.
- Blandino, M., Reyneri, A., & Vanara, F. (2008). Effect of plant density on toxigenic fungal infection and mycotoxin contamination of maize kernels. *Field Crops Research*, 106(3), 234–241. doi:10.1016/j.fcr.2007.12.004
- Blandino, M., Reyneri, A., & Vanara, F. (2009). Effect of Sowing Time on Toxigenic Fungal Infection and Mycotoxin Contamination of Maize Kernels. *Journal of Phytopathology*, 157(1), 7–14. doi:10.1111/j.1439-0434.2008.01431.x
- Bolduan, C., Miedaner, T., Schipprack, W., Dhillon, B. S., & Melchinger, A. E. (2009). Genetic variation for resistance to ear rots and mycotoxins contamination in early European maize inbred lines. *Crop science*, 49(6), 2019-2028.
- Borutova, R., Aragon, Y. A., Nährer, K., & Berthiller, F. (2012). Co-occurrence and statistical correlations between mycotoxins in feedstuffs collected in the Asia–Oceania in 2010. *Animal Feed Science and Technology*, 178(3-4), 190–197. doi:10.1016/j.anifeedsci.2012.09.015
- Bouhet, S., & Oswald, I. P. (2005). The effects of mycotoxins, fungal food contaminants, on the intestinal epithelial cell-derived innate immune response. *Veterinary Immunology and Immunopathology*, 108(1-2), 199-209.
- Branham, B. E., & Plattner, R. D. (1993). Isolation and characterization of a new fumonisin from liquid cultures of *Fusarium moniliforme*. *Journal of Natural Products*, 56(9), 1630-1633.

- Brooks, T. D., Williams, W. P., Windham, G. L., Willcox, M. C., & Abbas, H. K. (2005). Quantitative trait loci contributing resistance to aflatoxin accumulation in the maize inbred Mp313E. *Crop Science*, 45(1), 171-174.
- Brown, R. L., Zhi-Yuan, C., Menkir, A., & Cleveland, T. E. (2003). Using biotechnology to enhance host resistance to aflatoxin contamination of corn. *African Journal of Biotechnology*, 2(12), 557-562.
- Bunyavanich, S., Landrigan, C. P., McMichael, A. J., & Epstein, P. R. (2003). The impact of climate change on child health. *Ambulatory Pediatrics*, 3(1), 44-52.
- Bush, B. J., Carson, M. L., Cubeta, M. A., Hagler, W. M., & Payne, G. A. (2004). Infection and fumonisin production by *Fusarium verticillioides* in developing maize kernels. *Phytopathology*, 94(1), 88-93.
- Campos-Bermudez, V. A., Fauguel, C. M., Tronconi, M. A., Casati, P., Presello, D. A., & Andreo, C. S. (2013). Transcriptional and metabolic changes associated to the infection by *Fusarium verticillioides* in maize inbreds with contrasting ear rot resistance. *PLoS One*, 8(4), 1-10.
- Cao, A., Reid, L. M., Butrón, A., Malvar, R. A., Souto, X. C., & Santiago, R. (2011). Role of hydroxycinnamic acids in the infection of maize silks by *Fusarium graminearum* Schwabe. *Molecular Plant-Microbe Interactions*, 24(9), 1020-1026.
- Cao, A., Santiago, R., Ramos, A. J., Souto, X. C., Aguin, O., Malvar, R. A., & Butrón, A. (2014). Critical environmental and genotypic factors for *Fusarium verticillioides* infection, fungal growth and fumonisin contamination in maize grown in northwestern Spain. *International Journal of Food Microbiology*, 177, 63-71. doi:10.1016/j.ijfoodmicro.2014.02.004
- Cappelle, K. M., Munkvold, G. P., & Wolt, J. D. (2019). Meta-effect of insect resistant maize on fumonisin B1 in grain estimated by variance-weighted and replication-weighted analyses. *World Mycotoxin Journal*, 12(2), 141-151.
- Carter, J. P., Rezanoor, H. N., Holden, D., Desjardins, A. E., Plattner, R. D., & Nicholson, P. (2002). Variation in pathogenicity associated with the genetic diversity of *Fusarium graminearum*. *European Journal of Plant Pathology*, 108(6), 573-583.
- Cary, J. W., Klich, M. A., & Beltz, S. B. (2005). Characterization of aflatoxin-producing fungi outside of *Aspergillus* section *Flavi*. *Mycologia*, 97(2), 425-432.
- Castella, G., Bragulat, M. R., & Cabanes, F. J. (1999). Fumonisin production by *Fusarium* species isolated from cereals and feeds in Spain. *Journal of Food Protection*, 62(7), 811-813.
- Chen, Z. Y., Brown, R. L., Lax, A. R., Guo, B. Z., Cleveland, T. E., & Russin, J. S. (1998). Resistance to *Aspergillus flavus* in corn kernels is associated with a 14-kDa protein. *Phytopathology*, 88(4), 276-281.
- Chen, Z. Y., Brown, R. L., Damann, K. E., & Cleveland, T. E. (2004). Identification of a maize kernel stress-related protein and its effect on aflatoxin accumulation. *Phytopathology*, 94(9), 938-945.
- Chen, Z. Y., Brown, R. L., Rajasekaran, K., Damann, K. E., & Cleveland, T. E. (2006). Identification of a maize kernel pathogenesis-related protein and evidence for its involvement in resistance to *Aspergillus flavus* infection and aflatoxin production. *Phytopathology*, 96(1), 87-95.

- Chen, Z. Y., Brown, R. L., Damann, K. E., & Cleveland, T. E. (2007). Identification of maize kernel endosperm proteins associated with resistance to aflatoxin contamination by *Aspergillus flavus*. *Phytopathology*, 97(9), 1094-1103.
- Chen, Z. Y., Brown, R. L., Menkir, A., & Cleveland, T. E. (2012). Identification of resistance-associated proteins in closely-related maize lines varying in aflatoxin accumulation. *Molecular Breeding*, 30(1), 53-68.
- Chiang, M. S., Hudon, M., Devaux, A., & Ogilvie, I. (1987). Inheritance of resistance to *Gibberella* ear rot in maize. *Phytoprotection*, 68(1), 29-33.
- Christensen, C. M., & Kaufmann, H. H. (1969). *Grain storage: The role of fungi in quality loss*. University of Minnesota Press, Minneapolis, USA, 160 pp.
- Chungu, C., Mather, D. E., Reid, L. M., & Hamilton, R. I. (1996). Comparison of techniques for inoculating maize silk, kernel, and cob tissues with *Fusarium graminearum*. *Plant Disease*, 80(1), 81-84.
- Clements, M. J., Kleinschmidt, C. E., Maragos, C. M., Pataky, J. K., & White, D. G. (2003). Evaluation of inoculation techniques for *Fusarium* ear rot and fumonisin contamination of corn. *Plant Disease*, 87(2), 147-153.
- Clements, M. J., Maragos, C. M., Pataky, J. K., & White, D. G. (2004). Sources of resistance to fumonisin accumulation in grain and *Fusarium* ear and kernel rot of corn. *Phytopathology*, 94(3), 251-260.
- Clements, M. J., & White, D. G. (2004). Identifying sources of resistance to aflatoxin and fumonisin contamination in corn grain. *Journal of Toxicology: Toxin Reviews*, 23(2-3), 381-396.
- Cotty, P. J. (1989). Virulence and cultural characteristics of two *Aspergillus flavus* strains pathogenic on cotton. *Phytopathology*, 79(7), 808-814.
- Cotty, P. J., & Jaime-Garcia, R. (2007). Influences of climate on aflatoxin producing fungi and aflatoxin contamination. *International Journal of Food Microbiology*, 119(1-2), 109-115. doi:10.1016/j.ijfoodmicro.2007.07.060
- Covarelli, L., Stifano, S., Beccari, G., Raggi, L., Lattanzio, V. M. T., & Albertini, E. (2012). Characterization of *Fusarium verticillioides* strains isolated from maize in Italy: Fumonisin production, pathogenicity and genetic variability. *Food Microbiology*, 31(1), 17-24.
- Cruz, A., Marin, P., Magan, N., & Gonzalez-Jaen, M. T. (2014). Combined effects of benomyl and environmental factors on growth and expression of the fumonisin biosynthetic genes FUM1 and FUM19 by *Fusarium verticillioides*. *International Journal of Food Microbiology*, 191, 17-23.
- Cullen, D., Caldwell, R. W., & Smalley, E. B. (1983). Susceptibility of maize to *Gibberella zeae* ear rot: relationship to host genotype pathogen virulence, and zearalenone contamination. *Plant Disease*, 67(1), 89-91.
- Czapek, F. (1902). Untersuchungen über die Stickstoffgewinnung und Eiweissbildung der Schimmelpilze. *Hofmeister's Beiträge Chem. Physiol. & Pathol.*, 2, 557-590.
- Czapek, F. (1903). Der Stickstoff im Stoffwechsel der Pflanze. *Ergebnisse der Physiologie*, 2(1), 639-669.

- Czembor, E., Stępień, Ł., & Waśkiewicz, A. (2015). Effect of Environmental Factors on Fusarium Species and Associated Mycotoxins in Maize Grain Grown in Poland. *PLOS ONE*, 10(7), 1-18. doi:10.1371/journal.pone.0133644
- Davis, N. D., Diener, U. L., & Eldridge, D. W. (1966). Production of aflatoxins B1 and G1 by *Aspergillus flavus* in a semisynthetic medium. *Applied microbiology*, 14(3), 378-380.
- De Curtis, F., De Cicco, V., Haidukowski, M., Pascale, M., Somma, S., & Moretti, A. (2011). Effects of agrochemical treatments on the occurrence of Fusarium ear rot and fumonisin contamination of maize in Southern Italy. *Field Crops Research*, 123(2), 161-169.
- De La Campa, R., Hooker, D. C., Miller, J. D., Schaafsma, A. W., & Hammond, B. G. (2005). Modeling effects of environment, insect damage, and Bt genotypes on fumonisin accumulation in maize in Argentina and the Philippines. *Mycopathologia*, 159(4), 539-552.
- Desjardins, A. E., Plattner, R. D., Nelsen, T. C., & Leslie, J. F. (1995). Genetic analysis of fumonisin production and virulence of *Gibberella fujikuroi* mating population A (*Fusarium moniliforme*) on maize (*Zea mays*) seedlings. *Applied and Environmental Microbiology*, 61(1), 79-86.
- Desjardins, A. E., Plattner, R. D., Lu, M., & Clafflin, L. E. (1998). Distribution of fumonisins in maize ears infected with strains of *Fusarium moniliforme* that differ in fumonisin production. *Plant Disease*, 82(8), 953-958.
- Desjardins, A. E., & Plattner, R. D. (2000). Fumonisin B1-nonproducing strains of *Fusarium verticillioides* cause maize (*Zea mays*) ear infection and ear rot. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 48(11), 5773-5780.
- Dixit, S., & Singh, S. (2007). Fumonisin production by *Fusarium moniliforme* isolates from maize grains. *Indian Phytopathology*, 60(3), 380-382.
- Dobolyi, Cs., Sebök, 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.
- Dorn, B., Forrer, H.-R., Schürch, S., & Vogelgsang, S. (2009). *Fusarium* species complex on maize in Switzerland: occurrence, prevalence, impact and mycotoxins in commercial hybrids under natural infection. *European Journal of Plant Pathology*, 125(1), 51-61. doi:10.1007/s10658-009-9457-8
- Dox, A. W. (1910). The intracellular enzymes of penicillium and aspergillus: with special reference to those of *Penicillium camemberti*. US Department of Agriculture, Bureau of Animal Industry, Washington, 70 pp.
- Drepper, W. J., & Renfro, B. L. (1990). Comparison of methods for inoculation of ears and stalks of maize with *Fusarium moniliforme*. *Plant Disease*, 74(12), 952-956.
- du Toit, L. J., & Pataky, J. K. (1999). Reactions of processing sweet corn hybrids to *Gibberella* ear rot. *Plant Disease*, 83(2), 176-180.
- Dunwell, J. M., Purvis, A., & Khuri, S. (2004). Cupins: the most functionally diverse protein superfamily?. *Phytochemistry*, 65(1), 7-17.
- EC Commission recommendation 2006/576/EC, 17 August 2006 on the presence of deoxynivalenol, zearalenone, ochratoxin A, T-2, and HT-2 and fumonisins in products intended for animal feeding. *Off. J. European Communities* 2006, L 229, 7-9.

EC Commission Regulation (EC) No 1881/2006 of 19 December 2006 setting maximum levels for certain contaminants in foodstuffs. Official Journal of the European Union, 2006, 20.12. L 364/5

EC Directive 2002/32/EC of the European Parliament and of the Council of 7 May 2002 on undesirable substances in animal feed (OJ L 140, 30.5. 2002, p. 10)

EC (2007) Commission regulation (EC) No 1126/2007 of 28 September 2007, amending regulation (EC) No 1881/2006 setting maximum levels for certain contaminants in foodstuffs as regards Fusarium toxins in maize and maize products. Off. J. Eur. Union 2007, L255:14–17

Ehrlich, K. C., Yu, J., & Cotty, P. J. (2005). Aflatoxin biosynthesis gene clusters and flanking regions. *Journal of Applied Microbiology*, 99(3), 518-527.

Falcão, V. C. A., Ono, M. A., de Ávila Miguel, T., Vizoni, E., Hirooka, E. Y., & Ono, E. Y. S. (2011). *Fusarium verticillioides*: evaluation of fumonisin production and effect of fungicides on in vitro inhibition of mycelial growth. *Mycopathologia*, 171(1), 77-84.

Fanelli, F., Schmidt-Heydt, M., Haidukowski, M., Susca, A., Geisen, R., Logrieco, A., & Mulè, G. (2012). Influence of light on growth, conidiation and fumonisin production by *Fusarium verticillioides*. *Fungal Biology*, 116(2), 241-248.

FAO (2020). Economic And Social Department: The Statistical Division

FAO (2004). Worldwide regulations for mycotoxins in food and feed in 2003. FAO Food and Nutrition Papers 81. Food and Agriculture Organization, Rome

Farrar, J. J., & Davis, R. M. (1991). Relationships among ear morphology, western flower thrips, and *Fusarium* ear rot of corn. *Phytopathology*, 81(6), 661-666.

Folcher, L., Jarry, M., Weissenberger, A., Gérard, F., Eychenne, N., Delos, M., & Regnault-Roger, C. (2009). Comparative activity of agrochemical treatments on mycotoxin levels with regard to corn borers and *Fusarium* mycoflora in maize (*Zea mays* L.) fields. *Crop Protection*, 28(4), 302–308. doi:10.1016/j.cropro.2008.11.007

Folcher, L., Delos, M., Marengue, E., Jarry, M., Weissenberger, A., Eychenne, N., & Regnault-Roger, C. (2010). Lower mycotoxin levels in Bt maize grain. *Agronomy for Sustainable Development*, 30(4), 711–719. doi:10.1051/agro/2010005

Fountain, J. C., Khera, P., Yang, L., Nayak, S. N., Scully, B. T., Lee, R. D., Chen, Z. Y., Kemeraita, R. C., Varshney, R. K. & Guo, B. (2015). Resistance to *Aspergillus flavus* in maize and peanut: Molecular biology, breeding, environmental stress, and future perspectives. *The Crop Journal*, 3(3), 229-237.

Gaffoor, I., & Trail, F. (2006). Characterization of two polyketide synthase genes involved in zearalenone biosynthesis in *Gibberella zeae*. *Applied and Environmental Microbiology*, 72(3), 1793-1799.

Garber, R. K., & Cotty, P. J. (1997). Formation of sclerotia and aflatoxins in developing cotton bolls infected by the S strain of *Aspergillus flavus* and potential for biocontrol with an atoxigenic strain. *Phytopathology*, 87(9), 940-945.

García-Cela, E., Gil-Serna, J., Marín, S., Acevedo, H., Patiño, B., & Ramos, A. J. (2012). Effect of preharvest anti-fungal compounds on *Aspergillus steynii* and *A. carbonarius* under fluctuating and extreme environmental conditions. *International Journal of Food Microbiology*, 159(2), 167-176.

- Geiser, D. M., Harbinski, F. M., & Taylor, J. W. (2000). Molecular and analytical tools for characterizing *Aspergillus* and *Penicillium* species at the intra-and interspecific levels. *Integration of Modern Taxonomic Methods of Penicillium and Aspergillus Classification*, Harwood Academic Publishers, Amsterdam, 381-394.
- 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(5), 473-479.
- Gelderblom, W. C., Jaskiewicz, K., Marasas, W. F., Thiel, P. G., Horak, R. M., Vlegaar, R., & Kriek, N. (1988). Fumonisin--novel mycotoxins with cancer-promoting activity produced by *Fusarium moniliforme*. *Applied and Environmental Microbiology*, 54(7), 1806-1811.
- Giorni, P., Magan, N., Pietri, A., Bertuzzi, T., & Battilani, P. (2007). Studies on *Aspergillus* section *Flavi* isolated from maize in northern Italy. *International Journal of Food Microbiology*, 113(3), 330-338.
- Goertz, A., Zuehlke, S., Spiteller, M., Steiner, U., Dehne, H. W., Waalwijk, C., de Vries, I. & Oerke, E. C. (2010). *Fusarium* species and mycotoxin profiles on commercial maize hybrids in Germany. *European Journal of Plant Pathology*, 128(1), 101–111. doi:10.1007/s10658-010-9634-9
- Guo, B. Z., Chen, Z. Y., Brown, R. L., Lax, A. R., Cleveland, T. E., Russin, J. S., Mehta, A. D., Selitrennikoff C. P. & Widstrom, N. W. (1997). Germination induces accumulation of specific proteins and antifungal activities in corn kernels. *Phytopathology*, 87(11), 1174-1178.
- Gulya, T., Martinson, C., & Loesch, P. (1980). Evaluation of inoculation techniques and rating dates for *Fusarium* ear rot of opaque-2 maize. *Phytopathology*, 70(11), 1116-1118.
- Győri, Z., & Győriné, M. I. (2011). *A búza és kukorica minősége és feldolgozása*. Szaktudás Kiadó Ház, Budapest, 185 pp.
- Henry, W. B., Williams, W. P., Windham, G. L., & Hawkins, L. K. (2009). Evaluation of maize inbred lines for resistance to *Aspergillus* and *Fusarium* ear rot and mycotoxin accumulation. *Agronomy Journal*, 101(5), 1219-1226.
- Hinfner, K., & Békési, P. (1971). Kukoricahibridek fuzáriumos eredetű megbetegedésének rezisztenciavizsgálati módszerei. Országos Mezőgazdasági Fajtakísérleti Intézet Országos Fajtakísérletek, 1, 253-267.
- Hong, S. B., Go, S. J., Shin, H. D., Frisvad, J. C., & Samson, R. A. (2005). Polyphasic taxonomy of *Aspergillus fumigatus* and related species. *Mycologia*, 97(6), 1316-1329.
- Horn, B. W., Dorner, J. W., Greene, R. L., Blankenship, P. D., & Cole, R. J. (1994). Effect of *Aspergillus parasiticus* soil inoculum on invasion of peanut seeds. *Mycopathologia*, 125(3), 179-191.
- Horn, B. W., Greene, R. L., Sobolev, V. S., Dorner, J. W., Powell, J. H., & Layton, R. C. (1996). Association of morphology and mycotoxin production with vegetative compatibility groups in *Aspergillus flavus*, *A. parasiticus*, and *A. tamaris*. *Mycologia*, 88(4), 574-587.
- IARC Working Group on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans, International Agency for Research on Cancer, & World Health Organization. (1993). Some naturally occurring substances: food items and constituents, heterocyclic aromatic amines and mycotoxins (Vol. 56). World Health Organization.

- Iglesias, J., Presello, D. A., Botta, G., Lori, G. A., & Fauguel, C. M. (2010). Aggressiveness of *Fusarium* Section *Liseola* isolates causing maize ear rot in Argentina. *Journal of Plant Pathology*, 92(1), 205-211.
- Ivic, D., Domijan, A. M., Peraica, M., Milicevic, T., & Cvjetkovic, B. (2009). *Fusarium* spp. contamination of wheat, maize, soybean, and pea in Croatia. *Arhiv za Higijenu Rada i Toksikologiju*, 60(4), 435-441.
- Jakić-Dimić, Dobrila, K. Nešić, and M. Petrović. (2009). Contamination of cereals with aflatoxins, metabolites of fungi *Aspergillus flavus*. *Biotechnology in Animal Husbandry*, 25(5-6), 1203-1208.
- Kelley, R. Y., Williams, W. P., Mylroie, J. E., Boykin, D. L., Harper, J. W., Windham, G. L., & Shan, X. (2012). Identification of maize genes associated with host plant resistance or susceptibility to *Aspergillus flavus* infection and aflatoxin accumulation. *PLoS One*, 7(5), 1-12.
- Kensler, T. W., Roebuck, B. D., Wogan, G. N., & Groopman, J. D. (2011). Aflatoxin: a 50-year odyssey of mechanistic and translational toxicology. *Toxicological Sciences*, 120(1), 28-48.
- Kim, Y. T., Lee, Y. R., Jin, J., Han, K. H., Kim, H., Kim, J. C., Lee, T., Yun, S. H. & Lee, Y. W. (2005). Two different polyketide synthase genes are required for synthesis of zearalenone in *Gibberella zeae*. *Molecular Microbiology*, 58(4), 1102-1113.
- Kos, J., Mastilović, J., Hajnal, E. J., & Šarić, B. (2013). Natural occurrence of aflatoxins in maize harvested in Serbia during 2009–2012. *Food Control*, 34(1), 31–34. doi:10.1016/j.foodcont.2013.04.004
- Kovács Jr, G., Kovács, K., & Mesterházy, A. (1988). Kukoricahibridek cső-és szárfuzáriummal szembeni ellenállósága és mechanikai szilárdsága. (Resistance of corn hybrids to fusarial stalk rot and ear rot and their mechanical stalk characteristics). *Növénytermelés*, 37, 1-12.
- Kovács, G., Gáborjányi, R., & Toldi, É. (1994). Inheritance of resistance to maize dwarf mosaic virus and sugarcane mosaic virus in maize. *Cereal Research Communications*, 22(4), 361-368.
- Kuhnem, P. R., Del Ponte, E. M., Dong, Y., & Bergstrom, G. C. (2015). *Fusarium graminearum* isolates from wheat and maize in New York show similar range of aggressiveness and toxigenicity in cross-species pathogenicity tests. *Phytopathology*, 105(4), 441-448.
- Lanubile, A., Pasini, L., Lo Pinto, M., Battilani, P., Prandini, A., & Marocco, A. (2011). Evaluation of broad spectrum sources of resistance to *Fusarium verticillioides* and advanced maize breeding lines. *World Mycotoxin Journal*, 4(1), 43-51.
- Lanubile, A., Bernardi, J., Marocco, A., Logrieco, A., & Paciolla, C. (2012). Differential activation of defense genes and enzymes in maize genotypes with contrasting levels of resistance to *Fusarium verticillioides*. *Environmental and Experimental Botany*, 78, 39-46.
- Lanubile, A., Ferrarini, A., Maschietto, V., Delledonne, M., Marocco, A., & Bellin, D. (2014). Functional genomic analysis of constitutive and inducible defense responses to *Fusarium verticillioides* infection in maize genotypes with contrasting ear rot resistance. *BMC Genomics*, 15(1), 1-16.
- Lanubile, A., Maschietto, V., De Leonardis, S., Battilani, P., Paciolla, C., & Marocco, A. (2015). Defense responses to mycotoxin-producing fungi *Fusarium proliferatum*, F.

- subglutinans, and *Aspergillus flavus* in kernels of susceptible and resistant maize genotypes. *Molecular Plant-Microbe Interactions*, 28(5), 546-557.
- Lanubile, A., Maschietto, V., Battilani, P., & Marocco, A. (2017). Infection with toxigenic and atoxigenic strains of *Aspergillus flavus* induces different transcriptional signatures in maize kernels. *Journal of Plant Interactions*, 12(1), 21-30.
- Leggieri, M. C., Bertuzzi, T., Pietri, A., & Battilani, P. (2015). Mycotoxin occurrence in maize produced in Northern Italy over the years 2009-2011: focus on the role of crop related factors. *Phytopathologia Mediterranea*, 54(2), 212-221.
- Logrieco, A., Mule, G., Moretti, A., & Bottalico, A. (2002). Toxigenic *Fusarium* species and mycotoxins associated with maize ear rot in Europe. *Mycotoxins in Plant Disease*, 108, 597-609.
- Logrieco, A.F., Battilani, P., Leggieri, M. C., Jiang, Y., Haesaert, G., Lanubile, A., Mahuku, G., Mesterházy, Á., Beltran, A. O., Pasti, M., Smeu, I., Torres, A., Xu, J. & Munkvold, G. (2021). Perspectives on global mycotoxin issues and management from the MycoKey Maize Working Group. *Plant Disease*, 105(3), 525-537.
- Löffler, M., Kessel, B., Ouzunova, M., & Miedaner, T. (2008). Covariation of resistance to *F. graminearum* and *F. verticillioides* and their related mycotoxin contents in early European maize. *Cereal Research Communications*, 36, 125-126.
- Löffler, M., Miedaner, T., Kessel, B., & Ouzunova, M. (2010). Mycotoxin accumulation and corresponding ear rot rating in three maturity groups of European maize inoculated by two *Fusarium* species. *Euphytica*, 174(2), 153-164.
- Löffler, M., Kessel, B., Ouzunova, M., & Miedaner, T. (2011). Covariation between line and testcross performance for reduced mycotoxin concentrations in European maize after silk channel inoculation of two *Fusarium* species. *Theoretical and Applied Genetics*, 122(5), 925-934.
- Luo, M., Brown, R. L., Chen, Z. Y., Menkir, A., Yu, J., & Bhatnagar, D. (2011). Transcriptional profiles uncover *Aspergillus flavus*-induced resistance in maize kernels. *Toxins*, 3(7), 766-786.
- Marasas, W. F. O., Nelson, P. E., & Toussoun, T. A. (1984). Toxigenic *Fusarium* species. Identity and mycotoxicology. Pennsylvania State University Press, Pennsylvania, 328 pp.
- Marasas, W. F. O., Kellerman, T. S., Gelderblom, W. C., Thiel, P. G., Van der Lugt, J. J., & Coetzer, J. A. (1988). Leukoencephalomalacia in a horse induced by fumonisin B₁ isolated from *Fusarium moniliforme*. *Onderstepoort Journal of Veterinary Research*, 55, 197- 203
- Marasas, W. F. (1996). Fumonisin: history, world-wide occurrence and impact. *Advances in Experimental medicine and Biology, Fumonisin in food*, 392, 1-17.
- Maresca, M., & Fantini, J. (2010). Some food-associated mycotoxins as potential risk factors in humans predisposed to chronic intestinal inflammatory diseases. *Toxicon*, 56(3), 282-294.
- Marin, S., Sanchis, V., Vinas, I., Canela, R., & Magan, N. (1995). Effect of water activity and temperature on growth and fumonisin B1 and B2 production by *Fusarium proliferatum* and *F. moniliforme* on maize grain. *Letters in Applied Microbiology*, 21(5), 298-301.
- Marín, P., Magan, N., Vázquez, C., & González-Jaén, M. T. (2010). Differential effect of environmental conditions on the growth and regulation of the fumonisin biosynthetic gene FUM1 in the maize pathogens and fumonisin producers *Fusarium verticillioides* and *Fusarium proliferatum*. *FEMS Microbiology Ecology*, 73(2), 303-311.

- Martin, M., Schipprack, W., Miedaner, T., Dhillon, B. S., Kessel, B., Ouzunova, M., & Melchinger, A. E. (2012). Variation and covariation for Gibberella ear rot resistance and agronomic traits in testcrosses of doubled haploid maize lines. *Euphytica*, 185(3), 441-451.
- Martins, M. L., & Martins, H. M. (2002). Influence of water activity, temperature and incubation time on the simultaneous production of deoxynivalenol and zearalenone in corn (*Zea mays*) by *Fusarium graminearum*. *Food Chemistry*, 79(3), 315-318.
- Masuoka, P., Chamberlin, J., & Elias, M. (2010). Modeling the distribution and probability of aflatoxin occurrence using environmental data. International Food Policy Research Institute (IFPRI), Washington, USA, 11 pp.
- McLaughlin, J., Padfield, P. J., Burt, J. P., & O'Neill, C. A. (2004). Ochratoxin A increases permeability through tight junctions by removal of specific claudin isoforms. *American Journal of Physiology-Cell Physiology*, 287(5), 1412-1417.
- Medina, A., Rodríguez, A., Sultan, Y., & Magan, N. (2015). Climate change factors and *Aspergillus flavus*: effects on gene expression, growth and aflatoxin production. *World Mycotoxin Journal*, 8(2), 171-179.
- Menkir, A., Brown, R. L., Bandyopadhyay, R., & Cleveland, T. E. (2008). Registration of six tropical maize germplasm lines with resistance to aflatoxin contamination. *Journal of Plant Registrations*, 2(3), 246-250.
- Menyhért, Z. (1979). *Kukoricáról a termelőknek*. Mezőgazdasági Könyvkiadó, Budapest, 271 pp.
- Mesterházy, Á., & Vojtovics, M. (1977). Survey of *Fusarium* spp. diseases of maize in 1972-1975. *Növénytermelés*, 26(5), 367-378.
- Mesterházy, Á. (1978). Comparative analysis of artificial inoculation methods with *Fusarium* spp. on winter wheat varieties. *Journal of Phytopathology*, 93(1), 12-25.
- Mesterházy, Á. (1982). Resistance of corn to *Fusarium* ear rot and its relation to seedling resistance. *Journal of Phytopathology*, 103(3), 218-231.
- Mesterházy, Á. (1983). Relationship between resistance to stalk rot and ear rot of corn influenced by rind resistance, premature death and the rate of drying of the ear. *Maydica*, 28(5), 425-437.
- Mesterházy, Á., & Kovács, K. (1986). Breeding corn against fusarial stalk rot, ear rot and seedling blight. *Acta Phytopathologica et Entomologica Hungarica*, 21(3), 231-249.
- Mesterházy, Á. (1988). Gabonafélék rezisztenciára nemesítésének kórtani és módszertani alapjai fuzáriózissal szemben. Akadémiai doktori értekezés, Szeged
- Mesterházy, Á., Bartók, T., Mirocha, C. G., & Komoroczy, R. (1999). Nature of wheat resistance to *Fusarium* head blight and the role of deoxynivalenol for breeding. *Plant Breeding*, 118(2), 97-110.
- Mesterházy, Á., Kovács Jr, G., & Kovács, K. (2000). Breeding resistance for *Fusarium* ear rot (FER) in corn. *Genetika*, 32, 495-505.
- Mesterházy, Á., Lemmens, M., & Reid, L. M. (2012). Breeding for resistance to ear rots caused by *Fusarium* spp. in maize—a review. *Plant Breeding*, 131(1), 1-19.
- Mesterházy, Á., Oláh, J., & Popp, J. (2020). Losses in the grain supply chain: Causes and solutions. *Sustainability*, 12(6), 2342, 1-18.

- Mesterházy, Á., Toldiné Tóth, É., Szél, S., Varga, M., & Tóth, B. (2020). Resistance of maize hybrids to *Fusarium graminearum*, *F. culmorum*, and *F. verticillioides* ear rots with toothpick and silk channel inoculation, as well as their toxin production. *Agronomy*, 10(9), 1283, 1-29.
- Mesterházy, Á., Szieberth, D., Szabó, B., Berényi, A., & Tóth, B. (2022). Mycotoxin contamination of maize (*Zea mays* L.) samples in Hungary, 2012–2017. *Cereal Research Communications*, 2022, 1-9. <https://doi.org/10.1007/s42976-022-00258-1>
- Mideros, S. X., Windham, G. L., Williams, W. P., & Nelson, R. J. (2012). Tissue-specific components of resistance to *Aspergillus* ear rot of maize. *Phytopathology*, 102(8), 787-793.
- Minto, R. E., & Townsend, C. A. (1997). Enzymology and molecular biology of aflatoxin biosynthesis. *Chemical Reviews*, 97(7), 2537-2556.
- Miraglia, M., Marvin, H. J. P., Kleter, G. A., Battilani, P., Brera, C., Coni, E., Cubadda, F., Croci, L., De Santis, B., Dekkers, S., Filippi, L., Hutjes, R.W.A., Noordam, M.Y., Pisante, M., Piva, G., Prandini, A., Toti, L., van den Born, G.J. & Vespermann, A. (2009). Climate change and food safety: an emerging issue with special focus on Europe. *Food and Chemical Toxicology*, 47(5), 1009-1021.
- Mukanga, M., Derera, J., Tongoona, P., & Laing, M. D. (2010). A survey of pre-harvest ear rot diseases of maize and associated mycotoxins in south and central Zambia. *International Journal of Food Microbiology*, 141(3), 213-221.
- Munkvold, G. P., & Desjardins, A. E. (1997). Fumonisin in maize: can we reduce their occurrence?. *Plant disease*, 81(6), 556-565.
- Munkvold, G. P., Hellmich, R. L., & Showers, W. B. (1997). Reduced *Fusarium* Ear Rot and Symptomless Infection in Kernels of Maize Genetically Engineered for European Corn Borer Resistance. *Phytopathology*, 87(10), 1071–1077. doi:10.1094/phyto.1997.87.10.1071
- Munkvold, G. P. (2003). Epidemiology of *Fusarium* diseases and their mycotoxins in maize ears. *European Journal of Plant Pathology*, 109(7), 705-713.
- Munkvold, G. P. (2014). Crop management practices to minimize the risk of mycotoxins contamination in temperate-zone maize. *Mycotoxin reduction in grain chains*, John Wiley & Sons, Inc., Kansas, 376 pp., 59-75.
- Munkvold, G. P., & White, D. G. (2016). *Compendium of corn diseases* (Vol. 165). APS Press, St. Paul, 165 pp.
- Myroie, J.E., Warburton, M.L., Wilkinson, J.R. (2013). Development of a gene - based marker correlated to reduced aflatoxin accumulation in maize. *Euphytica*, 194, 431-441.
- Naef, A. & Défago, G. (2006). Population structure of plant-pathogenic *Fusarium* species in overwintered stalk residues from Bt-transformed and non-transformed maize crops. *European Journal of Plant Pathology*, 116(2), 129-143.
- Nelson, P. E., Toussoun, T. A., & Marasas, W. F. O. (1983). *Fusarium species: an illustrated manual for identification*. Pennsylvania State University Press, Pennsylvania, 206 pp.
- Nelson, P. E., Plattner, R. D., Shackelford, D. D., & Desjardins, A. E. (1992). Fumonisin B1 production by *Fusarium* species other than *F. moniliforme* in section *Liseola* and by some related species. *Applied and Environmental Microbiology*, 58(3), 984-989.
- Ni, X., Wilson, J. P., Buntin, G. D., Guo, B., Krakowsky, M. D., Lee, R. D., Cottrell, T. E., Scully, B. T., Huffaker, A., Schmelz, E. A. (2011). Spatial Patterns of Aflatoxin Levels in

Relation to Ear-Feeding Insect Damage in Pre-Harvest Corn. *Toxins*, 3(7), 920–931. doi:10.3390/toxins3070920

Nirenberg, H. I., & O'Donnell, K. (1998). New *Fusarium* species and combinations within the *Gibberella fujikuroi* species complex. *Mycologia*, 90(3), 434-458.

O'Donnell, K., Cigelnik, E., & Nirenberg, H. I. (1998). Molecular systematics and phylogeography of the *Gibberella fujikuroi* species complex. *Mycologia*, 90(3), 465-493.

O'Donnell, K., Kistler, H. C., Cigelnik, E., & Ploetz, R. C. (1998). Multiple evolutionary origins of the fungus causing Panama disease of banana: concordant evidence from nuclear and mitochondrial gene genealogies. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 95(5), 2044-2049.

O'Donnell, K., Kistler, H. C., Tacke, B. K., & Casper, H. H. (2000). Gene genealogies reveal global phylogeographic structure and reproductive isolation among lineages of *Fusarium graminearum*, the fungus causing wheat scab. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 97(14), 7905-7910.

O'Donnell, K., Ward, T. J., Geiser, D. M., Kistler, H. C., & Aoki, T. (2004). Genealogical concordance between the mating type locus and seven other nuclear genes supports formal recognition of nine phylogenetically distinct species within the *Fusarium graminearum* clade. *Fungal Genetics and Biology*, 41(6), 600-623.

Ogundero, V. W. (1987). Temperature and aflatoxin production by *Aspergillus flavus* and *A. parasiticus* strains from Nigerian groundnuts. *Journal of Basic Microbiology*, 27(9), 511-514.

Oldenburg, E., & Ellner, F. (2015). Distribution of disease symptoms and mycotoxins in maize ears infected by *Fusarium culmorum* and *Fusarium graminearum*. *Mycotoxin Research*, 31(3), 117-126.

Otsuki, T., Wilson, J. S., & Sewadeh, M. (2001). What price precaution? European harmonisation of aflatoxin regulations and African groundnut exports. *European Review of Agricultural Economics*, 28(3), 263-284.

Parsons, M. W., & Munkvold, G. P. (2010). Associations of planting date, drought stress, and insects with *Fusarium* ear rot and fumonisin B1 contamination in California maize. *Food Additives and Contaminants*, 27(5), 591-607.

Paterson, R. R. M., & Lima, N. (2010). How will climate change affect mycotoxins in food?. *Food Research International*, 43(7), 1902-1914.

Paul, C., Naidoo, G., Forbes, A., Mikkilineni, V., White, D., & Rocheford, T. (2003). Quantitative trait loci for low aflatoxin production in two related maize populations. *Theoretical and Applied Genetics*, 107(2), 263-270.

Payne, G. A. (1998). Process of contamination by aflatoxin-producing fungi and their impact on crops. *Mycotoxins in Agriculture and Food Safety*, 9, 279-306.

Pel, H. J., de Winde, J. H., Archer, D. B., Dyer, P. S., Hofmann, G., Schaap, P. J. & Stam, H. (2007). Genome sequencing and analysis of the versatile cell factory *Aspergillus niger* CBS 513.88. *Nature Biotechnology*, 25(2), 221-231.

Pepó, P., & Sárvári, M. (2011). *Gabonanövények termesztése*. Debrecen, 86 pp.

Peterson, S. W. (2008). Phylogenetic analysis of *Aspergillus* species using DNA sequences from four loci. *Mycologia*, 100(2), 205-226.

- Pérez Brito, D., Jeffers, D. P., González de León, D. I. E. G. O., Khairallah, M. M., Cortés, M., Velázquez, G., Azpíroz-Rivero, S. & Srinivasan, G. (2001). QTL mapping of *Fusarium moniliforme* ear rot resistance in highland maize, Mexico. *Agrociencia*, 35, 181-196.
- Pleadin, J., Sokolović, M., Perši, N., Zadavec, M., Jaki, V., & Vulić, A. (2012). Contamination of maize with deoxynivalenol and zearalenone in Croatia. *Food Control*, 28(1), 94-98.
- Presello, D. A., Reid, L. M., & Mather, D. E. (2004). Resistance of Argentine maize germplasm to *Gibberella* and *Fusarium* ear rots. *Maydica*, 49, 73-82.
- Presello, D. A., Iglesias, J., Botta, G., Reid, L. M., Lori, G. A., & Eyherabide, G. H. (2006). Stability of maize resistance to the ear rots caused by *Fusarium graminearum* and *F. verticillioides* in Argentinian and Canadian environments. *Euphytica*, 147(3), 403-407.
- Presello, D. A., Pereyra, A. O., Iglesias, J., Fauguel, C. M., Sampietro, D. A., & Eyherabide, G. H. (2011). Responses to selection of S 5 inbreds for broad-based resistance to ear rots and grain mycotoxin contamination caused by *Fusarium* spp. in maize. *Euphytica*, 178(1), 23-29.
- Reid, L. M., Hamilton, R. I., & Mather, D. E. (1996). Screening maize for resistance to *Gibberella* ear rot. Agriculture & Agri-Food Canada, Research Branch, Eastern Cereal & Oilseed Research Centre, National government publication, Ottawa, 40 pp.
- Robertson, A. E., Munkvold, G. P., Hurburgh, C. R., & Ensley, S. (2011). Effects of natural hail damage on ear rots, mycotoxins, and grain quality characteristics of corn. *Agronomy Journal*, 103(1), 193-199.
- Robertson-Hoyt, L. A., Kleinschmidt, C. E., White, D. G., Payne, G. A., Maragos, C. M., & Holland, J. B. (2006). Heritabilities and correlations of *Fusarium* ear rot resistance and fumonisin contamination resistance in two maize populations. *Crop Science*, 46(1), 353-361.
- Robertson-Hoyt, L. A., Jines, M. P., Balint-Kurti, P. J., Kleinschmidt, C. E., White, D. G., Payne, G. A., Maragos, C. M., Molnar, T. L. & Holland, J. B. (2006). QTL mapping for *Fusarium* ear rot and fumonisin contamination resistance in two maize populations. *Crop Science*, 46(4), 1734-1743.
- Robertson-Hoyt, L. A., Betrán, J., Payne, G. A., White, D. G., Isakeit, T., Maragos, C. M., Molnar, T. L. & Holland, J. B. (2007). Relationships among resistances to *Fusarium* and *Aspergillus* ear rots and contamination by fumonisin and aflatoxin in maize. *Phytopathology*, 97(3), 311-317.
- Ross, P. F., Rice, L. G., Osweiler, G. D., Nelson, P. E., Richard, J. L., & Wilson, T. M. (1992). A review and update of animal toxicoses associated with fumonisin-contaminated feeds and production of fumonisins by *Fusarium* isolates. *Mycopathologia*, 117(1-2), 109-114.
- Ross, P. F., Nelson, P. E., Owens, D. L., Rice, L. G., Nelson, H. A., & Wilson, T. M. (1994). Fumonisin B2 in cultured *Fusarium proliferatum*, M-6104, causes equine leukoencephalomalacia. *Journal of Veterinary Diagnostic Investigation*, 6(2), 263-265.
- Russin, J. S., Guo, B. Z., Tubajika, K. M., Brown, R. L., Cleveland, T. E., & Widstrom, N. W. (1997). Comparison of kernel wax from corn genotypes resistant or susceptible to *Aspergillus flavus*. *Phytopathology*, 87(5), 529-533.
- Scarpino, V., Reyneri, A., Sulyok, M., Krska, R., & Blandino, M. (2018). Impact of the insecticide application to maize cultivated in different environmental conditions on emerging mycotoxins. *Field Crops Research*, 217, 188-198.

- Scauflaire, J., Mahieu, O., Louvieaux, J., Foucart, G., Renard, F., & Munaut, F. (2011). Biodiversity of *Fusarium* species in ears and stalks of maize plants in Belgium. *European Journal of Plant Pathology*, 131(1), 59–66. doi:10.1007/s10658-011-9787-1
- Schaafsma, A. W., Miller, J. D., Savard, M. E., & Ewing, R. J. (1993). Ear rot development and mycotoxin production in corn in relation to inoculation method, corn hybrid, and species of *Fusarium*. *Canadian Journal of Plant Pathology*, 15(3), 185-192.
- Schaafsma, A. W., Nicol, R. W., & Reid, L. M. (1997). Evaluating commercial maize hybrids for resistance to gibberella ear rot. *European Journal of Plant Pathology*, 103(8), 737-746.
- Schjøth, J. E., Visconti, A., & Sundheim, L. (2009). Fumonisin in maize in relation to climate, planting time and hybrids in two agroecological zones in Zambia. *Mycopathologia*, 167(4), 209-219.
- Schollenberger, M., Müller, H. M., Rühle, M., Suchy, S., Planck, S., & Drochner, W. (2005). Survey of *Fusarium* toxins in foodstuffs of plant origin marketed in Germany. *International Journal of Food Microbiology*, 97(3), 317-326.
- Shim, W. B. (2000). Regulation of fumonisin biosynthesis in *Gibberella fujikuroi*. Purdue University.
- Shin, J. H., Han, J. H., Lee, J. K., & Kim, K. S. (2014). Characterization of the maize stalk rot pathogens *Fusarium subglutinans* and *F. temperatum* and the effect of fungicides on their mycelial growth and colony formation. *The Plant Pathology Journal*, 30(4), 397-406.
- Silva, E., Mora, E. A., Medina, A., Vásquez, J., Valdez, D., Danial, D. L., & Parlevliet, J. E. (2007). *Fusarium* ear rot and how to screen for resistance in open pollinated maize in the Andean regions. *Euphytica*, 153(3), 329-337.
- Small, I. M., Flett, B. C., Marasas, W. F. O., McLeod, A., & Viljoen, A. (2012). Use of resistance elicitors to reduce *Fusarium* ear rot and fumonisin accumulation in maize. *Crop Protection*, 41, 10-16.
- Smith, C. A., Woloshuk, C. P., Robertson, D., & Payne, G. A. (2007). Silencing of the aflatoxin gene cluster in a diploid strain of *Aspergillus flavus* is suppressed by ectopic aflR expression. *Genetics*, 176(4), 2077-2086.
- Starkey, D. E., Ward, T. J., Aoki, T., Gale, L. R., Kistler, H. C., Geiser, D. M. & O'Donnell, K. (2007). Global molecular surveillance reveals novel *Fusarium* head blight species and trichothecene toxin diversity. *Fungal Genetics and Biology*, 44(11), 1191-1204.
- Stevens, R.B. (1960). *Plant Pathology, an Advanced Treatise*. Academic Press, New York, 3, 357-429
- Stewart, D. W., Reid, L. M., Nicol, R. W., & Schaafsma, A. W. (2002). A mathematical simulation of growth of *Fusarium* in maize ears after artificial inoculation. *Phytopathology*, 92(5), 534-541.
- Streit, E., Schatzmayr, G., Tassis, P., Tzika, E., Marin, D., Taranu, I., Tabuc, C., Nicolau, A., Aprodu, I., Puel, O. & Oswald, I. P. (2012). Current situation of mycotoxin contamination and co-occurrence in animal feed—Focus on Europe. *Toxins*, 4(10), 788-809.
- Strosnider, H., Azziz-Baumgartner, E., Banziger, M., Bhat, R. V., Breiman, R., Brune, M. N., & Wilson, D. (2006). Workgroup report: public health strategies for reducing aflatoxin exposure in developing countries. *Environmental Health Perspectives*, 114(12), 1898-1903.

- Sun, W., Van Montagu, M., & Verbruggen, N. (2002). Small heat shock proteins and stress tolerance in plants. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA)-Gene Structure and Expression*, 1577(1), 1-9.
- Sutton, J. C., & Baliko, W. (1981). Methods for quantifying partial resistance to *Gibberella zeae* in maize ears. *Canadian Journal of Plant Pathology*, 3(1), 26-32.
- Sváb, J. (1981). *Biometriai módszerek a kutatásban*. Mezőgazdasági Kiadó, Budapest, 557 pp.
- Szabó, B., Tóth, B., Tóth Toldiné, E., Varga, M., Kovács, N., Varga, J., Kocsubé, S., Palágyi, A., Bagi, F., Budakov, D., Stojšin, V., Lazić, S., Bodroža-Solarov, M., Čolović, R., Bekavac, G., Purar, B., Jocković, D., Mesterházy, A. (2018). A New Concept to Secure Food Safety Standards against *Fusarium* Species and *Aspergillus Flavus* and Their Toxins in Maize. *Toxins*, 10(9):372, 1-25. <https://doi.org/10.3390/toxins10090372>
- Tabuc, C., Marin, D., Guerre, P., Sesan, T., & Bailly, J. D. (2009). Molds and mycotoxin content of cereals in southeastern Romania. *Journal of Food Protection*, 72(3), 662-665.
- Tirado, M. C., Clarke, R., Jaykus, L. A., McQuatters-Gollop, A., & Frank, J. M. (2010). Climate change and food safety: A review. *Food Research International*, 43(7), 1745-1765.
- Toldi, É., Bartók, T., Varga, M., Szekeres, A., Tóth, B., & Mesterházy, Á. (2008). The role of breeding in reducing mycotoxin contamination in maize. *Cereal Research Communications*, 36, 175-177.
- Torkar, K. G., & Vengušt, A. (2008). The presence of yeasts, moulds and aflatoxin M1 in raw milk and cheese in Slovenia. *Food Control*, 19(6), 570-577.
- Tóth, B., Mesterházy, Á., Nicholson, P., Téren, J., & Varga, J. (2004). Mycotoxin production and molecular variability of European and American isolates of *Fusarium culmorum*. In *Molecular Diversity and PCR-detection of Toxigenic Fusarium Species and Ochratoxigenic Fungi*, 587-599.
- Tóth, B., Mesterházy, Á., Horváth, Z., Bartók, T., Varga, M., & Varga, J. (2005). Genetic variability of central European isolates of the *Fusarium graminearum* species complex. *European Journal of Plant Pathology*, 113(1), 35-45.
- Tóth, B., Varga, J., Szabó-Hevér, Á., Lehoczki-Krsjak, S., & Mesterházy, Á. (2008). Reproductive mode of central European *Fusarium graminearum* and *F. culmorum* populations. *Cereal Research Communications*, 36, 625-629.
- Tóth B, Török O, Kótai É, Varga M, Toldiné Tóth É, Pálfi X, Háfra E, Varga J, Téren J, Mesterházy Á. (2012): Role of *Aspergilli* and *Penicillia* in mycotoxin contamination of maize in Hungary. *Acta Agronomica Hungarica*, 60(2), 143-149.
- Turner, P. C., Sylla, A., Gong, Y. Y., Diallo, M. S., Sutcliffe, A. E., Hall, A. J., & Wild, C. P. (2005). Reduction in exposure to carcinogenic aflatoxins by postharvest intervention measures in west Africa: a community-based intervention study. *The Lancet*, 365(9475), 1950-1956.
- Ullstrup, A. J. (1970). Methods for inoculating Corn ears with *Gibberella zeae* and *Diplodia maydis*. *Plant Disease Reporter*, 54(8), 658-662.
- Vardon, PJ., McLaughlin, C., Nardinelli, C. (2003). Potential economic costs of mycotoxins in the United States. Council of Agriculture, Science, and Technology; Ames(IA). *Mycotoxins: Risks in plant, animal and human systems (Task force report)*, 1, 136-142.

- Varga, J., Kocsubé, S., Suri, K., Szigeti, G. Y., Szekeres, A., Varga, M., Tóth, B. & Bartók, T. (2010). Fumonisin contamination and fumonisin producing black *Aspergilli* in dried vine fruits of different origin. *International Journal of Food Microbiology*, 143(3), 143-149.
- Venturini, G., Assante, G., & Vercesi, A. (2011). *Fusarium verticillioides* contamination patterns in Northern Italian maize during the growing season. *Phytopathologia Mediterranea*, 50(1), 110-120.
- Wakelin, S. A., Warren, R. A., Kong, L., & Harvey, P. R. (2008). Management factors affecting size and structure of soil *Fusarium* communities under irrigated maize in Australia. *Applied Soil Ecology*, 39(2), 201-209.
- Wang, C., Yang, C., Gao, C., & Wang, Y. (2009). Cloning and expression analysis of 14 lipid transfer protein genes from *Tamarix hispida* responding to different abiotic stresses. *Tree Physiology*, 29(12), 1607-1619.
- Warburton, M. L., Brooks, T. D., Windham, G. L., & Williams, W. P. (2011). Identification of novel QTL contributing resistance to aflatoxin accumulation in maize. *Molecular Breeding*, 27(4), 491-499.
- Warburton, M. L., Williams, W. P., Windham, G. L., Murray, S. C., Xu, W., Hawkins, L. K., & Duran, J. F. (2013). Phenotypic and genetic characterization of a maize association mapping panel developed for the identification of new sources of resistance to *Aspergillus flavus* and aflatoxin accumulation. *Crop Science*, 53(6), 2374-2383.
- Ward, T. J., Bielawski, J. P., Kistler, H. C., Sullivan, E., & O'Donnell, K. (2002). Ancestral polymorphism and adaptive evolution in the trichothecene mycotoxin gene cluster of phytopathogenic *Fusarium*. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 99(14), 9278-9283.
- Weber, E. (1967). *Grundriss der Biologischen Statistik (Fundamentals of the Biological Statistics)*, Fischer Verlag, Stuttgart, 706 pp.
- Wicklow, D. T., & Donahue, J. E. (1984). Sporogenic germination of sclerotia in *Aspergillus flavus* and *A. parasiticus*. *Transactions of the British Mycological Society*, 82(4), 621-624.
- Wicklow, D. T., Horn, B. W., Burg, W. R., & Cole, R. J. (1984). Sclerotium dispersal of *Aspergillus flavus* and *Eupenicillium ochrosalmoneum* from maize during harvest. *Transactions of the British Mycological Society*, 83(2), 299-303.
- Williams, L. D., Glenn, A. E., Bacon, C. W., Smith, M. A., & Riley, R. T. (2006). Fumonisin production and bioavailability to maize seedlings grown from seeds inoculated with *Fusarium verticillioides* and grown in natural soils. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 54(15), 5694-5700.
- Williams, L. D., Glenn, A. E., Zimeri, A. M., Bacon, C. W., Smith, M. A., & Riley, R. T. (2007). Fumonisin disruption of ceramide biosynthesis in maize roots and the effects on plant development and *Fusarium verticillioides*-induced seedling disease. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 55(8), 2937-2946.
- Williams, W. P., Windham, G. L., & Buckley, P. M. (2003). Enhancing maize germplasm with resistance to aflatoxin contamination. *Journal of Toxicology: Toxin Reviews*, 22(2-3), 175-193.
- Williams, W. P., & Windham, G. L. (2009). Diallel analysis of fumonisin accumulation in maize. *Field Crops Research*, 114(2), 324-326.

- Williams, W. P., Alpe, M. N., Windham, G. L., Ozkan, S., & Mylroie, J. E. (2013). Comparison of two inoculation methods for evaluating maize for resistance to *Aspergillus flavus* infection and aflatoxin accumulation. *International Journal of Agronomy*, 2013, 1-6.
- Widstrom, N. W., Butron, A., Guo, B. Z., Wilson, D. M., Snook, M. E., Cleveland, T. E., & Lynch, R. E. (2003). Control of preharvest aflatoxin contamination in maize by pyramiding QTL involved in resistance to ear-feeding insects and invasion by *Aspergillus* spp. *European Journal of Agronomy*, 19(4), 563-572.
- Wogan, G. N., Kensler, T. W., & Groopman, J. D. (2012). Present and future directions of translational research on aflatoxin and hepatocellular carcinoma. A review. *Food Additives & Contaminants: part A*, 29(2), 249-257.
- Wu, F. (2006). Economic impact of fumonisin and aflatoxin regulations on global corn and peanut markets. *The mycotoxin factbook*, 1, 83-93.
- Wu, F., & Guclu, H. (2012). Aflatoxin regulations in a network of global maize trade. *Plos One*, 7(9), 1-8.
- Wu, L., Wang, X., Xu, R., & Li, H. (2013). Difference between resistant and susceptible maize to systematic colonization as revealed by DsRed-labeled *Fusarium verticillioides*. *The Crop Journal*, 1(1), 61-69.
- Xiang, K., Zhang, Z. M., Reid, L. M., Zhu, X. Y., Yuan, G. S., & Pan, G. T. (2010). A meta-analysis of QTL associated with ear rot resistance in maize. *Maydica*, 55(3-4), 281-290.
- Xue, A. G., Armstrong, K. C., Voldeng, H. D., Fedak, G., & Babcock, C. (2004). Comparative aggressiveness of isolates of *Fusarium* spp. causing head blight on wheat in Canada. *Canadian Journal of Plant Pathology*, 26(1), 81-88.
- Yabe, K., & Nakajima, H. (2004). Enzyme reactions and genes in aflatoxin biosynthesis. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 64(6), 745-755.
- Yates, I. E., Widstrom, N. W., Bacon, C. W., Glenn, A., Hinton, D. M., Sparks, D., & Jaworski, A. J. (2005). Field performance of maize grown from *Fusarium verticillioides*-inoculated seed. *Mycopathologia*, 159(1), 65-73.
- Yin, Z., Wang, Y., Wu, F., Gu, X., Bian, Y., Wang, Y., & Deng, D. (2014). Quantitative trait locus mapping of resistance to *Aspergillus flavus* infection using a recombinant inbred line population in maize. *Molecular Breeding*, 33(1), 39-49.
- Young, H. C. (1943). The toothpick method of inoculating corn for stalk and ear rots. *Phytopathology*, 33, 16.
- Yu, J., Whitelaw, C. A., Nierman, W. C., Bhatnagar, D., & Cleveland, T. E. (2004). *Aspergillus flavus* expressed sequence tags for identification of genes with putative roles in aflatoxin contamination of crops. *FEMS Microbiology Letters*, 237(2), 333-340.
- Yuan, J. (2010). Molecular approaches to analyze horizontal resistance among plant species (maize, soybean, and *Arabidopsis*) to syntenic fusarial pathogens (*F. graminearum* and *F. virguliforme*). Southern Illinois University, Carbondale.

9. ÖSSZEFOGLALÁS

Vizsgálataink során mesterséges fertőzési módszerrel vizsgáltuk a kukorica hibridek mikotoxin termelő gomba fajokkal szembeni ellenállóságát. Mindkét kísérlet sorozatban fajonként több izolátummal is dolgoztunk. Szignifikáns különbségeket fedtünk fel a kukorica hibridek ellenállóságának tekintetében. A 2012.-2013. évi kísérletekben a kísérleti átlagokat tekintve hétszeres, a második sorozatban (2017-2018) ötszörös ellenállóságbeli különbségeket fedtünk fel. A toxin vizsgálatok eredményei hasonló képet mutattak. Ezek alapján megállapítható:

- A természetes fertőződést reprezentáló kontroll sorok és a mesterségesen inokulált sorok fertőződésének mértéke között gomba fajtól függően akár negyvenszeres különbségek is voltak. A természetes fertőződés alacsony szintjének hátránya, hogy a hibridek közötti ellenállóságbeli különbségek nem annyira kifejezettek, így a felállított rezisztencia sorrend téves szelekciós döntések meghozatalát okozhatja.
- Magyarország klimatikus viszonyai között eredményeink alapján a *F. graminearum* a legpatogénebb faj a kukorica esetében. A *F. verticillioides* ennél nagyságrendileg is alacsonyabb fertőzöttségi szintet tudott előidézni. A *F. culmorum* patogenitása az általunk vizsgált időszakban magasabb volt a *F. verticillioides*-nél. A vizsgált fajok közül az *A. flavus* volt a leggyengébb fertőzőképességű, általában a *F. verticillioides* fertőzöttségi átlagának felét tapasztaltuk. A 2012-2013. évi kísérletek esetében a minták fumonizin szennyezettsége jelentősen meghaladta a mért DON koncentrációkat, tekintettel a magasabb átlaghőmérsékletű, szárazabb nyarakra. A 2017-2018. évi kísérletekben a DON koncentrációja közel ötszöröse volt a fumonizin analógok mennyiségének, míg az aflatoxin mennyisége nagyjából század része.
- Ugyanazon gomba faj izolátumai között akár tizennyolcszoros különbségek is lehetnek patogenitásuk terén. Mind a négy faj, mindkét izolátuma esetében szignifikáns különbségek voltak az általuk kiváltott fertőződés tekintetében. A Hibrid X Izolátum kölcsönhatás magas fokon szignifikáns volt, ezért az izolátumok esetében nincs éveken átnyúló, stabil szintű agresszivitás. Ezért a szűrési vizsgálatok alkalmával legalább kettő, de leginkább 3 izolátum alkalmazása célszerű. Az azonos fajba tartozó izolátumok esetében akár háromszoros különbségek is lehetnek a toxintermelő képesség vonatkozásában.
- A szerbiai helyszín átlaghőmérsékletei éves szinten valamennyivel alacsonyabbak voltak a magyarországihoz képest, de a csapadékos napok száma és a lehullott csapadék

mennyisége pedig több volt. A fertőzöttségi adatokat tekintve a szerbiai helyszínen a *F. graminearum* fertőződés közel másfélszeres átlaggal rendelkezett, míg a *F. culmorum* is némileg patogénebb volt, mint Kiszomboron. A 2012-es adatok alapján az egyik *F. verticillioides* izolátum jelentősebb járványhelyzetet tudott modellezni Szerbiában, de ennek ellenére a faj Kiszombor klimatikus viszonyai között eredményesebben tudott fertőzni. Az *A. flavus* patogenitása nem mutatott jelentősebb eltéréseket a két kísérleti helyszínen. A Helyszín főhatás magasfokú szignifikáns különbségeket mutatott. A fumonizin koncentrációk alapján a kiszombori kísérlet toxin szennyezettsége közel húszszorosa volt a bácskertesinek. A DON tartalom a szerb mintákban volt nagyobb, melynek mértéke összesen százszoros volt a *F. graminearum*-mal fertőzött csövek esetén, míg tízszeres a *F. culmorum*-mal fertőzött csövek esetében. A mikotoxinok koncentrációi között a két kísérleti helyszínen szintén magas fokon szignifikáns ($p=0,001$) különbségeket tudtunk kimutatni.

- A 2012-2013. évi kísérletekben magasfokú szignifikáns összefüggést mutattak a *F. graminearum* és *F. culmorum* fertőzöttségi adatok, mely arra enged következtetni, hogy a két fajjal szembeni rezisztencia genetikai háttere közel azonos lehet. A *F. verticillioides* fertőződés gyengébb, ám de ennek ellenére szignifikáns kapcsolatot mutatott az előbbi két faj által kiváltott fertőzéssel, de ez csak a 2012-2013-as kísérletekben volt igaz. Az *A. flavus* rezisztencia látszólag csak a *F. verticillioides* fajjal szembeni rezisztencia genetikai hátterével hozható összefüggésbe.
- A vizsgálatok eredményei alapján a *F. graminearum* fertőződés és DON kontamináció mértéke között ($r=0,9655$) szoros összefüggést kaptunk. A *F. culmorum* esetében szintén szoros összefüggést kaptunk a toxin adatokkal ($r=0,81$). A *F. verticillioides* esetében, a kísérlet egészét tekintve nem találtunk szignifikáns összefüggést a csőpenész borítottság és a toxintartalom között. A természetes fertőződés mértékéből és általánosan a csőpenész borítottságból nem lehet a toxin felhalmozódással szembeni rezisztencia mértékére nézve következtetést levonni.
- A hibridek közötti 5-10-szeres ellenálláságbeli különbségek monitorozásával és a rezisztensebb hibridek termesztésével minimálisra lehet csökkenteni az élelmiszer-és takarmánybiztonsági veszélyt. A fajonként több izolátummal történő rezisztencia szűrési tesztek elvégzése és az ehhez kapcsoló toxin vizsgálatok kivitelezése hasznos információkat nyújt, mely eredmények alapján a nemesítési szelekciós munkát segíthetjük.

10. SUMMARY

In our studies, we tested the resistance of maize hybrids to mycotoxin producing fungal species by an artificial infection method. In both experiments we have worked with two isolates per species. We found significant differences in the resistance of maize hybrids. In the experiment between 2012-2013, sevenfold differences were found in terms of experimental means and fivefold in the second field trial (2017-2018). The toxin results were similar. Based on these results the following statements can be determined:

- There were up to forty-fold differences regarding infection severity between control rows, representing natural infection and rows infected with artificial inoculation. The disadvantage of low infection percentages of natural infestation is that the differences in resistance between hybrids are not so pronounced and the established ranking of hybrid resistance may lead to erroneous selection decisions.
- Based on the climatic conditions of Hungary, *F. graminearum* was the most pathogenic fungal species of maize according to our results. *F. verticillioides* was able to cause a lower level of infection. *F. culmorum* had a slightly higher pathogenicity than *F. verticillioides* during the studied period. Of the species studied, *A. flavus* was the least pathogenic, usually half of the mean infection severity of *F. verticillioides*. In the experiments in 2012-2013, the amount of fumonisin in the samples exceeded the concentration of DON significantly due to the higher average temperature and drier summers. In the 2017-2018 experimental years, the concentration of DON was nearly five times higher than the amount of fumonisin analogs, while the values of aflatoxin were nearly a hundredth.
- Isolates of the same fungal species can differ in their pathogenicity by up to eighteen times. There were significant differences in infection severity for both isolates of all four species. The Hybrid X Isolate interaction was also highly significant and because of this there is no stable level of aggressiveness of the isolates throughout the years. Therefore, at least two but preferably 3 isolates should be used in the screening assays. Isolates of the same species can have up to threefold differences in toxin producing ability.
- The average temperature values of the Serbian trial site were slightly lower than in Hungary but the number of rainy days and the amount of precipitation was higher. In terms of pathogenicity, *F. graminearum* infections at the Serbian site were almost one

and a half times higher, while *F. culmorum* was also slightly more pathogenic compared to Kiszombor. Based on the infection data of 2012, one of the *F. verticillioides* isolates was able to model a more significant epidemic situation in Serbia, but nevertheless the species was able to infect maize more effectively under the climatic conditions of Kiszombor. The pathogenicity of *A. flavus* did not show significant differences at the two experimental sites. The Location main effect showed highly significant differences. Based on the fumonisin concentrations, the toxin contamination of the experiment carried out in Kiszombor was almost twenty times higher than that of Bácskertes. The DON content was one hundred times higher in the Serbian samples in the ears infected with *F. graminearum* and ten times higher in the case of ears infected with *F. culmorum*. There were also highly ($p = 0.001$) significant differences between the concentrations of mycotoxins at the two experimental sites.

- In the experiments of 2012-2013, the infection values of *F. graminearum* and *F. culmorum* showed highly significant correlation, which allows us to conclude that the genetic background of resistance to the two species may almost be the same. *F. verticillioides* infection showed a weaker but nonetheless significant association with the infection of the former two species, but this was only the case in the 2012-2013 experiments. *A. flavus* resistance appears to be related only to the genetic background of resistance to *F. verticillioides*.
- In the present study we found a strong correlation between the severity of *F. graminearum* infection and DON contamination ($r = 0.9655$). In case of *F. culmorum*, we also found a strong correlation with the toxin results ($r = 0.81$). No significant correlation was found between *F. verticillioides* ear rot coverage and fumonisin content. No degree of resistance to toxin accumulation can be inferred from the extent of natural infection and from the extent of infection severity in general.
- By monitoring the 5 to 10-fold differences in resistance level between hybrids and cultivating more resistant genotypes, food and feed safety hazards can be minimized. Carrying out resistance screening tests with several isolates per species and the related toxin tests provide useful information that can be used to support selection in breeding.

11. MELLÉKLETEK

1. melléklet: A kísérlet fertőzöttségi adatai és az ezzel összefüggésbe hozható toxin koncentrációk, a FAO szám függvényében, 2012-2013

A fehér-piros színátmenetes skála a hibridek teljesítményét jelzi, mely esetben a fehér a legellenállóbb, a piros pedig a legfogékonyabb genotípust jelöli.

Hibrid	Toxikus faj csőpenész (%)			Mesterséges toxin koncentrációk			FAO szám
	Fc	Fg	Fv	Fc DON mg/kg	Fg DON mg/kg	FUM B ₁ +B ₂ mg/kg	
SzeTC465	1,33	1,66	0,73	0,72	1,19	30,60	450
Sze521	1,20	2,83	1,65	1,19	2,75	20,47	560
NS6030	4,97	3,18	1,64	4,52	2,34	10,91	660
Sarolta	2,83	3,28	2,70	3,18	3,07	8,71	290
NS3014	2,02	3,44	1,92	1,85	3,56	4,56	380
Kenéz	3,30	3,79	3,59	2,31	2,45	4,41	410
GKT288	2,17	4,07	4,84	3,22	4,47	15,95	290
NS6102	3,42	4,82	2,12	3,15	3,97	2,88	610
Sze386	3,08	5,38	4,08	2,21	6,19	5,50	390
Sze363	2,10	5,42	2,60	1,83	2,76	19,21	400
NS5051	2,41	6,04	2,59	3,06	3,49	43,83	580
NS4015	2,79	6,87	2,87	2,53	6,14	3,84	460
NS640	3,71	8,32	1,89	5,60	6,55	5,90	660
SzeTC367	5,71	8,41	7,95	5,76	8,46	28,67	380
Sze349	5,16	9,85	6,60	4,55	8,86	7,07	370
NS6010	5,42	11,73	4,33	6,07	12,05	10,77	690
NS4023	2,90	12,27	7,01	4,80	12,00	7,23	480
GKBoglár	4,56	13,59	6,43	5,02	10,89	7,85	370
NS4030	8,00	15,96	7,33	9,47	14,52	3,23	440
NS5043	6,31	17,92	4,97	13,28	15,20	3,18	550
Átlag	3,67	7,44	3,89	4,22	6,55	12,24	

2. melléklet: A kísérlet fertőzöttségi adatai és az ezzel összefüggésbe hozható toxin koncentrációk, a FAO szám függvényében, 2017-2018

A fehér-piros színátmenetes skála a hibridek teljesítményét jelzi, mely esetben a fehér a legellenállóbb, a piros pedig a legfogékonyabb genotípust jelöli.

Hibrid	Toxikus faj csőpenész (%)			Mesterséges toxin koncentrációk			Kontroll csőpenész (%)		Kontroll toxin koncentráció			FAO szám
	Fg	Fv	Af	DON mg/kg	FUM B ₁ +B ₂ mg/kg	AFB ₁ µg/kg	<i>Fusarium</i> csőpenész	<i>Aspergillus</i> csőpenész	DON mg/kg	FUM B ₁ +B ₂ mg/kg	AFB ₁ µg/kg	
Szegedi 521	5,50	0,20	0,11	14,68	2,70	289,75	0,42	0,01	0,15	0,65	90,50	560
Korimbos	8,48	0,04	0,05	14,99	0,81	298,75	0,12	0,00	2,40	0,42	27,50	575
DKC4590	11,18	0,36	0,15	6,56	2,31	21,50	0,50	0,05	0,19	2,76	1,65	360
P9537	11,64	0,32	0,14	10,39	3,05	21,75	0,25	0,00	0,00	1,53	11,00	370
4517	12,09	0,87	0,17	14,17	11,45	77,75	0,60	0,00	0,00	7,05	32,00	520
P9241	12,21	0,25	0,10	8,20	1,79	19,75	0,23	0,00	0,00	0,71	14,00	350
DKC4717	13,29	0,45	0,24	11,59	1,11	40,25	0,35	0,00	0,05	1,92	29,50	390
Cardixio Duo	13,88	0,23	0,29	10,56	1,22	29,50	0,26	0,00	0,18	0,18	2,50	470
DKC5542	14,04	0,32	0,10	14,85	1,29	338,50	0,37	0,00	0,00	2,71	33,00	540
Fornad	14,34	1,18	0,29	14,65	4,47	137,25	0,63	0,09	1,05	1,55	6,50	420
SilóStar	15,05	0,26	0,16	17,61	1,06	202,25	0,20	0,00	1,30	0,31	38,90	490
DKC4943	15,22	0,32	0,39	13,95	0,94	44,25	0,32	0,05	0,32	0,43	21,50	400
P9903	15,27	0,32	0,21	5,46	1,69	38,50	0,44	0,00	0,10	0,41	2,50	390
P9911	19,18	0,30	0,13	17,04	6,47	59,25	0,49	0,17	0,00	1,60	10,50	450
DKC4541	19,79	1,12	0,35	8,97	3,18	57,50	0,68	0,04	0,05	1,30	8,50	370
DKC5830	20,38	0,27	0,30	12,99	0,98	322,00	0,21	0,00	0,00	0,09	2,50	560
Valkür	21,83	0,14	0,03	47,46	1,64	13,00	0,03	0,00	0,61	0,51	5,00	730
PR37F80	26,20	0,86	0,48	19,34	7,66	135,25	0,58	0,00	0,00	0,91	19,00	420
Átlag	14,98	0,43	0,20	14,63	2,99	119,26	0,37	0,02	0,36	1,39	19,81	

3. melléklet: A rezisztencia vizsgálat szántóföldi és toxin eredményeit összesítő korrelációs vizsgálat eredményei, 2017-2018

	Fg M, %	Fv M, %	Af M, %	DON, mg/kg	FUM B ₁ +B ₂ , mg/kg	AFB ₁ , µg/kg	Fus T, %	Asp T, %	DON, mg/kg	FUM B ₁ +B ₂ , mg/kg	AFB ₁ , µg/kg
Fv M, %	0,3180										
Af M, %	0,5128*	0,5747**									
DON, mg/kg	0,4182	-0,1589	-0,2713								
FUM B ₁ +B ₂ , mg/kg	0,2092	0,5909***	0,1778	0,0384							
AFB ₁ , µg/kg	-0,1725	-0,1706	-0,1368	0,0049	-0,1684						
Fus T, %	0,1234	0,8271****	0,4918*	-0,4169	0,6379***	-0,1407					
Asp T, %	0,1518	0,2355	0,0704	-0,0368	0,2706	-0,2007	0,4280				
DON, mg/kg	-0,2613	-0,1847	-0,2958	0,2147	-0,2706	0,3510	-0,3720	-0,0459			
FUM B ₁ +B ₂ , mg/kg	-0,1905	0,4177	-0,1408	-0,1130	0,7157*****	-0,1167	0,4861*	0,0475	-0,2590		
AFB ₁ , µg/kg	-0,5201	-0,1623	-0,2289	0,0181	0,0516	0,5095*	0,0104	-0,2047	0,0997	0,0980	
FAO szám	0,0712	-0,3664	-0,4533	0,7699***	-0,0623	0,4786*	-0,5052*	-0,2322	0,3420	-0,0429	0,2670

***p= 0,001, **p= 0,01, *p= 0,05