

A TALAJTANI TÉNYEZŐK SZEREPE AZ AFLATOXIN-KOCKÁZAT ALAKULÁSÁBAN

Halász Judit¹

¹ Nyíregyházi Egyetem, Környezet- és Természettudományi Intézet, Biológia Intézeti Tanszék, 4400 Nyíregyháza, Sóstói u. 31/B., e-mail: halasz.judit@nye.hu

<https://doi.org/10.71066/FTTMK.2.08>

Bevezetés

Az aflatoxin-szennyeződést sokáig elsősorban a trópusi és szubtrópusi régiók problémájának tekintették, napjainkra azonban Európában is egyre nagyobb élelmiszer- és takarmánybiztonsági kockázatot jelent. A gyakoribb hőhullámok és tartós aszályos időszakok kedvező feltételeket teremtenek az aflatoxintermelő *Aspergillus* fajok számára, miközben a hő- és vízstressz gyengítheti a növények védekezőképességét. E két folyamat együttesen növeli a termények aflatoxinnal való szennyeződésének kockázatát (Battilani et al., 2016; Cotty & Jaime-Garcia, 2007).

Az aflatoxinok a mezőgazdaság és az élelmiszerlánc szempontjából legjelentősebb mikotoxinok közé tartoznak. Közülük az aflatoxin B₁ (AFB₁) a leggyakrabban előforduló és egyben a legtoxikusabb vegyület. A Nemzetközi Rákkutató Ügynökség (International Agency for Research on Cancer, IARC) az emberre bizonyítottan rákkeltő, 1. csoportba tartozó anyagként sorolja be (IARC, 2002). Az aflatoxinok hosszú távú bevitele növeli a májkárosodás és a hepatocelluláris karcinóma kialakulásának kockázatát, nagy mennyiségük rövid időn belüli elfogyasztása pedig akut aflatoxikózist okozhat (Williams et al., 2004). Súlyos egészségkárosító hatásuk miatt az élelmiszerekben és takarmányokban előforduló mennyiségüket világszerte szigorú határértékek korlátozzák.

A termények aflatoxinnal való szennyeződését elsősorban az időjárási tényezőkkel és a növényeket érő stresszhatásokkal hozzák összefüggésbe. Az aflatoxintermelő *Aspergillus* fajok azonban természetes módon jelen vannak a talajban. Szaporítóképleteik itt hosszabb ideig fennmaradhatnak, majd kedvező körülmények között a növényi fertőzés forrásává válhatnak. A kutatások ezért egyre nagyobb figyelmet fordítanak arra, hogy a talaj fizikai, kémiai és biológiai tulajdonságai miként hatnak a gombák fennmaradására és szaporodására, a növények stressztűrő képességére, valamint a fertőzésre és a toxintermelésre (Cotty & Jaime-Garcia, 2007; Horn, 2003).

Jelen áttekintő tanulmány célja annak bemutatása, hogy a talaj pH-ja, tápanyag-ellátottsága és biológiai állapota milyen módon befolyásolhatja az aflatoxintermelő *Aspergillus* fajok előfordulását, valamint a termények aflatoxinnal való szennyeződésének kockázatát. A rendelkezésre álló szakirodalom alapján a tanulmány arra is rámutat, hogy ezek a tényezők nem egymástól függetlenül, hanem a talaj–növény–mikroorganizmus rendszer egymással kölcsönhatásban álló elemeiként fejtik ki hatásukat. A tényezők közötti összefüggések feltárása segítheti az aflatoxin-kockázat kialakulásának jobb megértését és a megelőzési lehetőségek azonosítását.

Irodalmi áttekintés

1. Az aflatoxinok kialakulása és a környezeti tényezők szerepe

1.1. A mikotoxinok fogalma és jelentősége

A mikotoxinok egyes fonalas gombák által termelt másodlagos anyagcseretermékek, amelyek már kis mennyiségben is káros hatást gyakorolhatnak az emberek és az állatok egészségére. Napjainkig több száz különböző mikotoxint azonosítottak, közülük azonban csak néhány fordul elő rendszeresen az élelmiszer- és takarmányláncban. Kémiai stabilitásuk miatt a betakarítást, a tárolást és egyes feldolgozási eljárásokat követően is fennmaradhatnak, ezért jelenlétük jelentős

élelmiszer- és takarmánybiztonsági, valamint gazdasági kockázatot jelent világszerte (Xue et al., 2025).

1.2. Az aflatoxinok jelentősége

Az aflatoxinok elsősorban az *Aspergillus* nemzetség egyes fajai, mindenekelőtt az *Aspergillus flavus* és az *Aspergillus parasiticus* által termelt mikotoxinok. A természetben leggyakrabban az AFB₁, AFB₂, AFG₁ és AFG₂ fordul elő, amelyek közül toxikológiai szempontból az AFB₁ a legjelentősebb (EFSA CONTAM Panel, 2020). Az aflatoxinok számos mezőgazdasági terményt, többek között gabonaféléket, olajos magvakat, dióféléket és fűszereket is szennyezhetnek. A szennyeződés már a termesztés során kialakulhat, de nem megfelelő körülmények között a betakarítást követően és a tárolás alatt is fokozódhat (EFSA CONTAM Panel, 2020). Az aflatoxinok viszonylag hőstabil vegyületek, ezért a hagyományos élelmiszer-feldolgozási eljárások és a főzés csökkenthetik ugyan a mennyiségüket, de általában nem eredményezik teljes lebomlásukat (Kabak, 2009).

1.3. Az aflatoxin B₁ toxikológiai jelentősége

Az aflatoxinok közül az aflatoxin B₁ (AFB₁) jelenti a legnagyobb élelmiszer- és takarmánybiztonsági kockázatot. Akut és krónikus toxicitása mellett genotoxikus és rákkeltő hatással is rendelkezik, ezért a Nemzetközi Rákkutató Ügynökség az emberre bizonyítottan rákkeltő anyagok közé sorolta (IARC, 2002). A szervezetbe jutva elsősorban a májban alakul át, amelynek során egy rendkívül reakcióképes metabolit, az AFB₁-8,9-epoxid képződik. Ez a vegyület a DNS-hez kötődve genetikai károsodást idézhet elő, és szerepet játszhat a májsejtes karcinóma kialakulásában (EFSA CONTAM Panel, 2020). Jelentős egészségügyi kockázata indokolja az aflatoxinok élelmiszerekben és takarmányokban megengedett koncentrációjának szigorú szabályozását.

1.4. A klímaváltozás szerepe az aflatoxin-kockázat növekedésében

Az aflatoxinvaló szennyeződést hosszú időn keresztül elsősorban a trópusi és szubtrópusi régiók mezőgazdasági problémájának tekintették. Az elmúlt évtizedekben azonban az aflatoxintermelő *Aspergillus* fajok előfordulásának és a termények szennyeződésének kockázata Európában is növekedett. Ebben meghatározó szerepet játszanak a klímaváltozással összefüggő környezeti változások (Battilani et al., 2016).

Az aflatoxin-kockázat előrejelzése nem alapozható kizárólag egyetlen környezeti változóra. Az aflatoxin-kockázat megértéséhez egyaránt figyelembe kell venni a hőmérséklet, a vízellátottság és a növényi stressz összefüggéseit, valamint a gomba növekedését és toxintermelését befolyásoló körülményeket. Ezeknek az összefüggéseknek a vizsgálata alapozhatja meg a klímaváltozási forgatókönyvekhez kapcsolódó, térben és időben változó mikotoxin-kockázat megbízhatóbb előrejelzését (Magan et al., 2011).

Az emelkedő hőmérséklet, a gyakoribb aszályos időszakok és a csapadéeloszlás megváltozása kedvezőbb feltételeket teremthet az aflatoxintermelő gombák fejlődéséhez és toxintermeléséhez (Medina et al., 2014). A magas hőmérséklet és a korlátozott vízellátás ugyanakkor a gazdanövényben is stresszt idéz elő, amely gyengítheti annak természetes védekezőképességét, és növelheti a fertőzéssel szembeni fogékonyságát (Cotty & Jaime-Garcia, 2007).

Magyarország számára az éghajlati előrejelzések a hőmérséklet emelkedését, valamint a nyári csapadék csökkenését és időbeli eloszlásának kedvezőtlen változását vetítik előre (Pongrácz et al., 2011). Az újabb, módosított Pálfi-féle aszályindexen alapuló vizsgálatok szerint az aszály gyakoriságának és súlyosságának növekedése különösen az Alföldet, azon belül annak déli területeit érintheti. Az aszályindex és a kukorica terméshozama között kimutatott erős negatív kapcsolat arra utal, hogy a fokozódó vízhiány a termesztett növények stresszterhelését és terméshozamának kockázatát is növeli (Kis et al., 2025). A tartósan meleg és száraz időszakok egyúttal kedvezőbb feltételeket teremthetnek az *Aspergillus flavus* fertőzéséhez és az aflatoxin-felhalmozódáshoz (Battilani et al., 2016).

1.5. Az aflatoxinnal való szennyeződést meghatározó tényezők

A termények aflatoxinnal való szennyeződése összetett folyamat, amelyet az aflatoxintermelő gomba, a gazdanövény és a környezeti feltételek közötti kölcsönhatások alakítanak. A fertőzés és a toxintermelés mértéke ezért nem vezethető vissza egyetlen tényezőre, hanem számos biotikus és abiotikus hatás együttes eredményeként alakul ki.

A környezeti tényezők közül különösen fontos a hőmérséklet, a vízellátottság, a relatív páratartalom és a növényt érő stresszhatások szerepe. Az aszály és a magas hőmérséklet nemcsak az *Aspergillus flavus* fejlődésének és aflatoxintermelésének kedvezhet, hanem a növény természetes védekezőképességét is gyengítheti. A fertőzés kockázatát tovább növelhetik a rovarok és más kártevők által okozott sérülések, amelyek megkönnyítik a gomba bejutását a növényi szövetekbe (Cotty & Jaime-Garcia, 2007).

A gazdanövény fogékonyságát a növényfaj, a genotípus, a fejlődési állapot és az általános fiziológiai állapot is befolyásolja. A víz- és tápanyaghiány tovább fokozhatja a növény érzékenységét, de a talajból származó egyéb kémiai stresszhatások is módosíthatják a növény szerkezeti és életteni állapotát. Simon és munkatársai (2022) szennyvíziszap-alapú anyagokkal és fahamuval kezelt talajon termesztett energiafű vizsgálatát során kimutatták, hogy a kezelések növelték több tápelem és potenciálisan toxikus elem felvételét, valamint a klorofillfluoreszcencia értékeit is befolyásolták. Az ehhez kapcsolódó későbbi vizsgálatban Tóth és munkatársai (2024) azt is megállapították, hogy a potenciálisan toxikus elemek fokozott felvétele a levelek mikroanatómiai tulajdonságainak megváltozásával járt. Bár ezek az eredmények nem az aflatoxinnal való szennyeződésre vonatkoznak, jól szemléltetik, hogy a talaj kémiai állapota módosíthatja a növény szerkezeti és életteni jellemzőit, ezáltal pedig közvetetten a növény-kórokozó kapcsolatok feltételeit is. Az aflatoxin-kockázat értékelésekor ezért a klimatikus és növényéletteni tényezők mellett a talaj fizikai, kémiai és biológiai tulajdonságait is figyelembe kell venni.

2. A talaj mint az aflatoxintermelő gombák természetes élőhelye

A termények aflatoxinnal való szennyeződése gyakran már a betakarítást megelőzően, a termesztés során megkezdődik. Ebben a folyamatban a talajnak kiemelt szerepe van, mivel az nemcsak a növények növekedési közege, hanem az aflatoxintermelő *Aspergillus* fajok természetes élőhelye és egyik legfontosabb inokulumborrása is (Cotty & Jaime-Garcia, 2007; Horn, 2003).

Az aflatoxintermelő fajok – elsősorban az *Aspergillus flavus* és az *Aspergillus parasiticus* – természetes módon előfordulhatnak a talajban. Konídiumaik, szkleróciumaik és más túlélőképseik hosszabb időn keresztül fennmaradhatnak, majd kedvező környezeti feltételek között újra aktívvá válhatnak. A talajban fennmaradó gombaképletek ezért a fejlődő növények fertőzésének lehetséges kiindulópontjai (Horn, 2003; Abbas et al., 2009).

A gomba szaporítóképletei a széllel, a porral és a felverődő csapadékkal juthatnak el a növény felszíni részeire. Terjedésüket különböző talajlakó és növénykárosító rovarok is elősegíthetik, az általuk okozott sérülések pedig megkönnyíthetik a növényi szövetek fertőződését. A betakarítást követően a fertőzött növényi maradványok visszakerülhetnek a talajba, és hozzájárulhatnak a gombapopuláció fennmaradásához. Így a talaj és a termesztett növény között olyan fertőzési körforgás alakulhat ki, amely hosszabb távon is befolyásolja az adott terület fertőzési nyomását (Horn, 2003; Abbas et al., 2009).

A talaj tehát nem tekinthető pusztán a növénytermesztés közegeként, hanem olyan dinamikus ökológiai rendszer, amely befolyásolja az aflatoxintermelő *Aspergillus* fajok fennmaradását, szaporodását és terjedését. Mindez felveti azt a kérdést, hogy a talaj egyes tulajdonságai milyen módon alakítják e gombák életfeltételeit és a termények aflatoxinnal való szennyeződésének kockázatát. A következő fejezet ezért a talaj pH-jának szerepét tekinti át.

3. A talaj pH-jának szerepe az aflatoxin-kockázat alakulásában

A talaj pH-ja az aflatoxin-kockázattal összefüggésben gyakran vizsgált talajtani tényező, szerepének megítélése azonban a szakirodalomban nem egyértelmű. A rendelkezésre álló eredmények alapján a pH önmagában nem alkalmas a termények aflatoxinnal való szennyeződésének megbízható előrejelzésére. Hatása elsősorban közvetetten, más talajtulajdonságokkal és környezeti tényezőkkel kölcsönhatásban érvényesül.

A talaj pH-ja alapvetően meghatározza a tápanyagok oldhatóságát és felvehetőségét, ezáltal hatással van a növények fejlődésére, kondíciójára és stressztűrő képességére. Emellett befolyásolja a talaj mikrobiális közösségének összetételét és aktivitását is. Zhang és munkatársai (2022) földimogyoró-termesztő területeken végzett vizsgálatukban azt találták, hogy az alacsonyabb átlagos pH-jú agyagos vályogtalajokban nagyobb volt az *Aspergillus* fajok telepszáma és az aflatoxintermelő izolátumok aránya, mint a magasabb átlagos pH-jú homokos vályogtalajokban. A vizsgált talajok azonban több más tulajdonságukban is különböztek, ezért az eredmények alapján nem különíthető el a pH önálló hatása, és nem igazolható közvetlen ok-okozati kapcsolat a talaj pH-ja és a termények aflatoxinnal való szennyeződése között.

A talaj pH-ja ezért nem önálló kockázati tényezőként, hanem a talaj működését szabályozó egyik alapvető tulajdonságként értelmezhető. Jelentősége abban rejlik, hogy befolyásolja a tápanyagok hasznosulását, a talaj mikrobiális folyamatait és a növények stressztűrő képességét, ezáltal közvetve alakíthatja az aflatoxintermelő *Aspergillus* fajok megtelepedésének és terjedésének feltételeit. A pH hatása tehát a talaj–növény–mikroorganizmus rendszer más elemeivel együtt értékelhető megfelelően.

4. A tápanyag-gazdálkodás szerepe az aflatoxin-kockázat alakulásában

4.1. A kiegyensúlyozott tápanyagellátás jelentősége

A tápanyag-gazdálkodás és az aflatoxin-kockázat kapcsolatát nem célszerű egyetlen tápelem hatására leszűkíteni. A növény tápanyagellátottsága elsősorban a növény általános élettani állapotán, stressztűrő képességén és természetfejlődésén keresztül befolyásolhatja a fertőzés kialakulását. Az aszály- és hőstressznek kitett, legyengült növények általában fogékonyabbak az *Aspergillus flavus* fertőzésére és az aflatoxin-felhalmozódásra (Fountain et al., 2014).

A megfelelő tápanyagellátás elősegíti a gyökérzet fejlődését, a fotoszintetikus aktivitás fenntartását és a szemek megfelelő kitelítődését. A kiegyensúlyozatlan vagy elégtelen tápanyagellátás ezzel szemben fokozhatja a növény környezeti stresszhatásokkal szembeni érzékenységet. A tápanyaghiány ezért nem feltétlenül közvetlenül növeli az aflatoxintermelést, hanem olyan növényi állapotot alakíthat ki, amely kedvezőbbé teszi a gombás fertőzést.

Az egyes tápelemek és az aflatoxin-szennyeződés kapcsolatát vizsgáló kutatások eredményei ugyanakkor nem mutatnak egységes képet. Manóza és munkatársai (2017) különböző nitrogén- és foszfortrágyázási kombinációkat, valamint kukoricahibrideket vizsgáltak. A trágyázási kezelések nem okoztak szignifikáns különbséget sem az *A. flavus* kolonizációjában, sem az aflatoxin-felhalmozódásban, bár szuboptimális tápanyagellátás mellett nagyobb átlagos gombafelhalmozódást mértek. A termőhely és a hibrid hatása szintén jelentősnek bizonyult. Mindezek alapján a kiegyensúlyozott tápanyagellátás az integrált megelőzés fontos eleme lehet, közvetlen és általánosan érvényes aflatoxincsökkentő hatása azonban önmagában nem igazolható.

A tápanyag-utánpótlás és a gombás növénybetegségek kapcsolata nem írható le minden kórokozóra és gazdanövényre egyaránt érvényes, egyszerű összefüggéssel. Egy metaanalízis szerint a trágyázás hatását a kijuttatott tápelem mellett a kórokozó életmódja, a gazdanövény és a környezeti feltételek is befolyásolják (Veresoglou et al., 2013). Az aflatoxin-kockázat szempontjából ezért nem önmagában a műtrágya mennyisége, hanem a növény kiegyensúlyozott tápanyagellátása, élettani állapota és stresszterhelése lehet meghatározó.

4.2. A nitrogén szerepe

A nitrogén alapvető szerepet játszik a növények növekedésében, a fehérjeszintézisben és a fotoszintetikus működés fenntartásában. Az aflatoxin-kockázattal való kapcsolata azonban nem írható le egyszerű, lineáris összefüggéssel. Hatása elsősorban a növény fejlődésének, kondíciójának és stressztűrő képességének alakításán keresztül érvényesül, miközben a fertőzés és a toxinfelhalmozódás mértékét számos más környezeti és termesztési tényező is befolyásolja. Blandino és munkatársai (2008) több éven keresztül vizsgálták a nitrogéntrágyázás módjának és adagjának hatását a kukorica csöpenészesedésére és mikotoxin-szennyeződésére. Eredményeik szerint az elégtelen nitrogénellátás általában növelte a csöpenészesedés gyakoriságát és súlyosságát. Az aflatoxin B₁ koncentrációja és a nitrogénadag között negatív összefüggést találtak azokban az évjáratokban, amelyek időjárása kedvezett az aflatoxin képződésének. A szerzők ugyanakkor hangsúlyozták, hogy az egyes mikotoxinok eltérően reagáltak a nitrogénellátásra. Egy magyarországi tartamkísérletben Nyandi és Pepó (2024) szintén összetett, évjáratától és hibridtől függő kapcsolatot mutatott ki. A nitrogénadag növelése 2022-ben nagyobb aflatoxin B₁-szennyeződéssel társult, míg 2023-ban egyik kezelésben sem mutattak ki aflatoxin B₁-et. Az eredmények alapján a nitrogéntrágyázás hatása nem választható el a hibrid tulajdonságaitól és az adott év környezeti feltételeitől.

A jelenlegi ismeretek alapján ezért nem állítható, hogy a nitrogénellátás növelése önmagában minden körülmény között csökkenti vagy növeli az aflatoxinnal való szennyeződés kockázatát. A túlzott és az elégtelen nitrogénellátás egyaránt kedvezőtlen lehet; jelentősége elsősorban a termőhelyhez, a hibridhez és a várható termésszinthez igazított, kiegyensúlyozott tápanyag-gazdálkodás részeként értelmezhető.

4.3. A foszfor szerepe

A foszfor nélkülözhetetlen a növények energiaforgalmához, gyökérfejlődéséhez és számos anyagszere-folyamatához. Megfelelő ellátottsága elősegíti az erőteljes gyökérzet kialakulását, valamint a rendelkezésre álló víz és tápanyagok hatékonyabb hasznosítását. A foszforhiány ezzel szemben visszafoghatja a növekedést, és fokozhatja a növények környezeti stresszhatásokkal szembeni érzékenységet.

A foszforellátás és az aflatoxinnal való szennyeződés közötti közvetlen kapcsolatot viszonylag kevés kutatás vizsgálta. Manóza és munkatársai (2017) különböző nitrogén–foszfor-kezeléskombinációk hatását értékelték. A kezelések nem okoztak szignifikáns különbséget sem az *Aspergillus flavus* kolonizációjában, sem az aflatoxin-felhalmozódásban, bár szuboptimális tápanyagellátás mellett átlagosan nagyobb gombafelhalmozódást mértek. Mivel a két tápelemet kombinációban alkalmazták, a foszfor önálló hatása az eredményekből nem különíthető el egyértelműen.

A rendelkezésre álló bizonyítékok alapján ezért nem jelenthető ki, hogy a foszforadag növelése önmagában mérsékelné az *A. flavus* kolonizációját vagy az aflatoxin-felhalmozódást. A megfelelő foszforellátás jelentősége inkább a növény kiegyensúlyozott fejlődésének és stressztűrő képességének fenntartásában ragadható meg.

4.4. A kálium szerepe

A kálium fontos szerepet játszik a növények vízháztartásának szabályozásában, a sztóma működésben, az ozmotikus egyensúly fenntartásában és számos enzim működésében. Megfelelő káliumellátás mellett a növények hatékonyabban alkalmazkodhatnak a vízhiányhoz és más abiotikus stresszhatásokhoz. A káliumhiány ezzel szemben ronthatja a fotoszintetikus működést, és fokozhatja az oxidatív stressz káros hatásait (Cakmak, 2005).

A hő- és vízstressz növelheti a kukorica *Aspergillus flavus* fertőzéssel szembeni fogékonyságát, valamint elősegítheti az aflatoxin-felhalmozódást (Fountain et al., 2014). Ebből következően a megfelelő káliumellátás a növény vízháztartásának és stressztűrő képességének fenntartásán keresztül közvetve mérsékelheti az aflatoxin-kockázatot. Ez azonban közvetett összefüggés, és

nem jelenti azt, hogy a kálium kijuttatása önmagában megakadályozná a fertőzést vagy az aflatoxin képződését.

A káliumellátás és a termények aflatoxinnal való szennyeződése közötti kapcsolatot kevés célzott vizsgálat elemezte. A jelenlegi szakirodalom ezért nem teszi lehetővé általánosan érvényes dózis–hatás kapcsolat meghatározását. A kálium jelentősége elsősorban a növény megfelelő kondíciójának és stressztűrő képességének fenntartásában játszik szerepet, míg az aflatoxinnal való szennyeződésre gyakorolt közvetlen hatása egyelőre nem tekinthető bizonyítottnak.

4.5. A tápanyag-gazdálkodás integrált szerepe

A nitrogén-, foszfor- és káliumellátás szerepének áttekintése alapján egyik tápelem mennyisége sem határozza meg önmagában a termények aflatoxinnal való szennyeződésének kockázatát. Jelentőségük elsősorban abban rejlik, hogy együttesen alakítják a növények fejlődését, élettani állapotát, vízháztartását és stressztűrő képességét.

A növény igényeihez és a talaj adottságaihoz igazodó tápanyagellátás elősegíti a megfelelő növényi kondíció fenntartását, és mérsékelheti a tápanyaghiányból vagy a tápelemek aránytalanságából eredő stresszt. Ez közvetve csökkentheti a növény *Aspergillus flavus* fertőzéssel szembeni fogékonyságát. A túlzott vagy aránytalan tápanyag-kijuttatás ugyanakkor nem jelent nagyobb védelmet, és önmagában nem tekinthető az aflatoxinnal való szennyeződés megelőzésére alkalmas beavatkozásnak (Blandino et al., 2008; Manóza et al., 2017; Nyandi & Pepó, 2024).

A rendelkezésre álló kutatások mennyisége és eredményei tápelemenként jelentősen eltérnek. A nitrogén hatását több vizsgálat elemezte, míg a foszfor és különösen a kálium közvetlen szerepéről lényegesen kevesebb bizonyíték áll rendelkezésre. A jelenlegi ismeretek alapján ezért a kiegyensúlyozott tápanyag-gazdálkodás elsősorban a talaj–növény rendszer megfelelő működésének és a növény stressztűrő képességének fenntartásán keresztül járulhat hozzá az aflatoxin-kockázat mérsékléséhez. Hatása szorosan összekapcsolódik a talaj biológiai állapotával, amelyet a következő fejezet tárgyal.

5. A talaj szervesanyag-tartalmának közvetett szerepe az aflatoxin-kockázat alakulásában

5.1. A szerves anyag szerepe a talaj vízgazdálkodásában

A talaj szervesanyag-tartalma a talajszerkezet, az aggregátumstabilitás és a vízgazdálkodás alakításán keresztül befolyásolja a növények számára hozzáférhető víz mennyiségét. A nagyobb szervesanyag-tartalom általában kedvezőbb pórusszerkezettel, jobb vízbeszívárgással és nagyobb hozzáférhető vízkapacitással társulhat, bár a hatás mértéke jelentősen függ a talaj fizikai féleségétől és a szerves anyag mélységi eloszlásától (Hudson, 1994; Franzluebbers, 2002). Újabb, nagy adatállományon alapuló eredmények arra is utalnak, hogy a talaj szerves széntartalma nemcsak az átlagos terméshozammal, hanem a termés kedvezőtlen körülmények közötti stabilitásával is kapcsolatban állhat (King et al., 2026).

5.2. Kapcsolat a növényi vízstresszel és az aflatoxin-kockázattal

Az aflatoxin-kockázat szempontjából a talaj szerves anyagának jelentősége elsősorban közvetett. A kedvezőbb talajszerkezet és vízgazdálkodás mérsékelheti a növény vízhiányát, miközben a tartós szárazság és a magas hőmérséklet növeli a kukorica stresszterhelését, és kedvezőbb feltételeket teremthet az *Aspergillus flavus* fertőzéséhez és az aflatoxin-felhalmozódáshoz (Fountain et al., 2014; Battilani et al., 2016). A talaj szervesanyag-tartalma ezért nem tekinthető az aflatoxin-kockázat közvetlen előrejelzőjének, de a talaj vízmegtartó képességén és a növény stresszállapotán keresztül hozzájárulhat a kockázatot alakító környezeti feltételek módosításához.

5.3. A vetésforgó lehetséges szerepe

A vetésforgó a talaj fizikai és kémiai tulajdonságainak alakítása mellett a mikrobiális közösségek összetételét és a talajban fennmaradó növényi kórokozók mennyiségét is befolyásolhatja. Kukorica–szója vetésforgóban a talaj gombaközösségének összetétele eltért a folyamatos termesztés során kialakult közösségtől, és több potenciálisan kórokozó gombacsoport relatív gyakorisága is csökkent (Dou et al., 2025). Ez az általános hatás azonban nem terjeszthető ki automatikusan az aflatoxintermelő *Aspergillus* fajokra. Az *Aspergillus flavus* esetében végzett vizsgálatok szerint az elővetemény és a talaj fizikai tulajdonságai összefügghetnek a talajban élő populáció mennyiségével és az S-, illetve L-törzsek arányával (Jaime-Garcia & Cotty, 2006). A termesztett növény hatása a talajhőmérséklettel is kölcsönhatásba léphet, ezért a vetésforgó nem minden termőhelyen és minden évben módosítja azonos módon az *A. flavus*-közösséget (Jaime-Garcia & Cotty, 2010). A rendelkezésre álló eredmények alapján így nem jelölhető meg általánosan alkalmazható „aflatoxincsökkentő vetésforgó”, de az elővetemény a talajbeli inokulum mennyiségét és toxintermelő képességének összetételét alakító tényező lehet.

5.4. A talajművelés és a növényi maradványok kezelése

A talajművelés és a növényi maradványok kezelése a talajszerkezet, a szervesanyag-tartalom és a nedvességi viszonyok módosításán keresztül befolyásolhatja a növények vízellátását. Kukoricával végzett szántóföldi vizsgálatban a csökkentett talajművelés és a növényi maradványok visszaforgatása növelte a talaj víztartalmát, javította a gyökérzet egyes tulajdonságait és kedvezően hatott a termésre az átlagosnál szárazabb tenyészidőszakokban (You et al., 2017). Ezek a változások mérsékelhetik a növényi vízstresszt, de a talajművelés és az aflatoxin-szennyeződés közötti közvetlen kapcsolat jelenleg nem tekinthető kellően bizonyítottnak. A növényi maradványok visszahagyása emellett az *A. flavus* fennmaradásának lehetőségét is befolyásolhatja, ezért az egyes művelési rendszerek hatása nem ítélt meg kizárólag a talajnedvesség alapján.

6. A talaj biológiai állapotának szerepe az aflatoxin-kockázat alakulásában

6.1. A talaj biológiai állapotának jelentősége

A talaj nem csupán fizikai és kémiai rendszer, hanem rendkívül összetett élőhely is. A benne élő mikroorganizmusok közössége – a talajmikrobiom – alapvető szerepet játszik a szerves anyagok lebontásában, a tápanyagok körforgásában, a talajszerkezet kialakulásában és a növények egészségi állapotának fenntartásában. A talaj biológiai állapota ezért nemcsak a talaj termékenységét, hanem a teljes talaj–növény rendszer működését is befolyásolja (De Corato, 2020; Schlatter et al., 2017).

Az aflatoxintermelő *Aspergillus* fajok természetes módon jelen lehetnek a talajban, amely szaporítóképleteik fennmaradásának és a növényi maradványok kolonizációjának egyik fontos közege. A talajban fennmaradó populációk ezért a növényi fertőzés lehetséges inokulumforrását jelenthetik (Horn, 2003; Cotty et al., 2008). Talajbeli jelenlétük azonban önmagában nem jelenti azt, hogy minden esetben növényi fertőzés és aflatoxin-felhalmozódás alakul ki. A fertőzés kimenetelét az időjárási és növényi tényezők mellett a talajban élő mikroorganizmusok közötti kölcsönhatások is befolyásolhatják.

Az aktív és változatos mikrobiális közösség a tápanyagokért és az élettérért folytatott versengéssel, valamint egyes mikroorganizmusok antagonista hatásán keresztül korlátozhatja a talajeredetű növényi kórokozók megtelepedését és elszaporodását (Schlatter et al., 2017). Ezeket a mechanizmusokat az aflatoxintermelő *Aspergillus* fajok esetében még nem tárták fel teljes körűen. Ennek alapján a talaj biológiai állapota szerepet játszhat az aflatoxin-kockázat alakulásában, pontos mechanizmusa és jelentősége azonban még nem kellően feltárt.

6.2. A szupresszív talaj fogalma

A talajmikrobiom kórokozókat korlátozó működésének egyik legfontosabb megnyilvánulása az úgynevezett talaj szupresszivitás. Szupresszívnek azokat a talajokat nevezzük, amelyekben a növényi kórokozó és a fogékony gazdanövény egyaránt jelen van, továbbá a környezeti feltételek is kedveznének a fertőzésnek, a betegség mégsem alakul ki, vagy lényegesen kisebb mértékben jelentkezik. A jelenség hátterében rendszerint a talaj mikrobiális közösségének természetes szabályozó működése, valamint a talaj biotikus és abiotikus tulajdonságainak kölcsönhatása áll (De Corato, 2020; Schlatter et al., 2017). A szupresszivitás nem állandó tulajdonság, és nem minden kórokozóval szemben érvényesül azonos módon.

A szupresszív hatás kialakulásában megkülönböztethető a teljes mikrobiális közösség által létrehozott általános gátló környezet, valamint egyes mikroorganizmusok vagy mikrobiális csoportok célzott antagonista hatása. A talajlakó mikroorganizmusok versenghetnek a kórokozókkal a rendelkezésre álló tápanyagokért és az élettérért, gátló hatású vegyületeket termelhetnek, továbbá serkenthetik a növény saját védekező folyamatait. Ezek a mechanizmusok külön-külön és egymást kiegészítve is korlátozhatják a kórokozók megtelepedését, szaporodását és fertőzőképességét (De Corato, 2020; Schlatter et al., 2017).

A talaj szupresszív működése nem feltétlenül egyetlen mikroorganizmus jelenlétéhez, hanem a mikrobiális közösség összetételéhez, sokféleségéhez és tagjainak kölcsönhatásaihoz kapcsolódik. A talaj mikrobiális közössége fungisztatikus hatást fejthet ki, ezáltal korlátozhatja egyes gombák spóráinak csírázását és micéliumának növekedését (de Boer et al., 2003). A rizoszféra közösségének kialakulását ugyanakkor a növényfaj, a talajtípus és a korábbi területhasználat egyaránt befolyásolja (Garbeva et al., 2008). A szupresszív talajok vizsgálata arra is rámutatott, hogy a kórokozókkal szembeni védelem a rizoszféra mikrobiomjának meghatározott összetételéhez és összehangolt működéséhez köthető (Mendes et al., 2011).

A szupresszivitás kialakulását és fennmaradását a mikrobiális közösség mellett a talaj pH-ja, szervesanyag-tartalma, tápanyag-ellátottsága, nedvességi viszonyai és az alkalmazott gazdálkodási gyakorlat is befolyásolja. Ezért nem egyetlen mikroorganizmus vagy talajtulajdonság hatásaként, hanem a talaj ökológiai rendszerének összetett működéseként értelmezhető.

6.3. A talajmikrobiom és az aflatoxin-kockázat kapcsolata

A talaj mikrobiális közössége többféle mechanizmuson keresztül befolyásolhatja az aflatoxintermelő *Aspergillus* fajok fennmaradását és szaporodását. A mikroorganizmusok versenghetnek a gombával a rendelkezésre álló tápanyagokért és az élettérért, egyes baktériumok és gombák pedig a kórokozók növekedését gátló anyagcseretermékeket állíthatnak elő. A talajmikrobiom közvetetten, a növény tápanyagellátásának és védekező folyamatainak támogatásán keresztül is alakíthatja a fertőzés feltételeit. Ezek a mechanizmusok általánosan ismertek a talajeredetű növényi kórokozók szabályozásában, aflatoxintermelő fajokra való alkalmazhatóságuk azonban külön vizsgálatot igényel (Schlatter et al., 2017).

Az *Aspergillus flavus* talajbeli visszaszorításában különböző antagonista mikroorganizmusok vehetnek részt. Kukoricatáblák talajából izolált *Pseudomonas chlororaphis* és *Pseudomonas fluorescens* törzsek jelentősen gátolták az *A. flavus* növekedését a talajban, és ezzel csökkentették a levegőbe jutó konídiumok mennyiségét is (Palumbo et al., 2010). Talajból származó antagonista élesztők illékony szerves vegyületei szintén gátolhatják a gomba növekedését és aflatoxintermelését (Natarajan et al., 2022). Ezek az eredmények arra utalnak, hogy a baktériumok és élesztők közvetlen antagonista hatása egyaránt szerepet kaphat az *A. flavus* biológiai korlátozásában.

Ellenőrzött laboratóriumi vizsgálatok igazolták, hogy egyes, a rizoszférából származó baktériumtörzsek képesek lehetnek az *Aspergillus flavus* növekedésének és aflatoxintermelésének gátlására. Wu és munkatársai (2022) a tea (*Camellia sinensis*) rizoszférájából izolált *Bacillus velezensis* B2 törzs esetében jelentős antagonista hatást mutattak ki. A baktériumtörzs jelenlétében az aflatoxin-bioszintézis génklaszterének 16 génje csökkenő kifejeződést mutatott. Az eredmények alátámasztják, hogy egyes rizoszférában élő

mikroorganizmusok közvetlen antagonista hatást fejthetnek ki az aflatoxintermelő gombákkal szemben. Az egyedi törzsekkel, ellenőrzött körülmények között kapott eredmények azonban nem terjeszthetők ki automatikusan a természetes talajmikrobiom egészének működésére.

Az atoxigén *Aspergillus flavus* törzsek alkalmazásán alapuló biológiai védekezés során a kijuttatott törzsek versenybe lépnek a természetes, aflatoxintermelő populációkkal, és ezáltal módosíthatják a talajban élő *A. flavus*-közösség genetikai összetételét (Lewis et al., 2019). Az újabb eredmények szerint az atoxigén izolátumok biokontroll-hatékonysága törzsenként eltérhet, alkalmazásuk pedig a talaj teljes gombaközösségének szerkezetére is hatással lehet (Zhang et al., 2025).

A mikrobiális közösség és az *Aspergillus flavus* kapcsolata ugyanakkor kétirányú: nemcsak a talaj mikroorganizmusai befolyásolhatják a gomba fennmaradását, hanem maga a fertőzés is átalakíthatja a rizoszféra közösségét. Földimogyoróval végzett tenyészedényes vizsgálatban az *A. flavus* fertőzése idő- és törzsfüggő változásokat idézett elő a rizoszféra baktériumközösségének összetételében és diverzitásában (Lin et al., 2026). Mivel a vizsgálat sterilizált talajon zajlott, és az aflatoxin mennyiségét nem határozták meg, az eredmények elsősorban a növény–kórokozó–mikrobiom kapcsolat értelmezéséhez nyújtanak alapot.

Szántóföldi körülmények között a mikroorganizmusok közötti kapcsolatok lényegesen összetettebbek. Monda és munkatársai (2020) két, eltérő éghajlati és termesztési adottságú kenyai agroökológiai régió talajainak vizsgálatakor csak gyenge összefüggést találtak az *A. flavus*, valamint a potenciálisan antagonista *Bacillus* és *Pseudomonas* fajok előfordulása között. Ez arra utal, hogy valamely mikroorganizmus jelenléte önmagában nem bizonyítja a talaj szupresszív működését. A mikroorganizmusok mennyisége mellett azok funkcionális tulajdonságai, aktivitása, egymással kialakított kapcsolatai és a környezeti feltételek együttesen határozzák meg, hogy kialakul-e tényleges gátló hatás.

A rendelkezésre álló eredmények alapján a talajmikrobiom hozzájárulhat az aflatoxintermelő *Aspergillus* fajok természetes szabályozásához, a talaj mikrobiális összetétele és a termények tényleges aflatoxin-szennyeződése közötti közvetlen kapcsolat azonban még nem kellően feltárt. A talaj biológiai állapotát fenntartó gazdálkodási gyakorlatok kedvezően befolyásolhatják a talaj általános működését és a növény stressztűrő képességét, aflatoxin-kockázatra gyakorolt hatásuk azonban jelenleg nem számszerűsíthető egyértelműen. A további kutatásokban ezért a talaj mikrobiális közösségét, a talajtulajdonságokat, a növény állapotát és az aflatoxinnal való szennyeződést együttesen, szántóföldi körülmények között célszerű vizsgálni.

7. Következtetések

A termények aflatoxinnal való szennyeződésének vizsgálata hagyományosan elsősorban az éghajlati tényezőkre, a növényeket érő stresszhatásokra és az aflatoxintermelő gombák jelenlétére összpontosított. Az áttekintett szakirodalom alapján azonban az aflatoxin-szennyezés kockázata nem vezethető vissza egyetlen környezeti vagy talajtani tényezőre. Kialakulása az aflatoxintermelő gomba, a gazdanövény és a környezeti feltételek összetett kölcsönhatásának eredménye, amelyben a talaj állapota közvetett szerepet tölthet be.

A talaj pH-ja, tápanyag-ellátottsága és biológiai állapota önmagában nem tekinthető a termények aflatoxinnal való szennyeződését közvetlenül meghatározó tényezőnek. Jelentőségük elsősorban abban rejlik, hogy egymással kölcsönhatásban alakítják a tápanyagok hozzáférhetőségét, a talaj mikrobiális folyamatait, a növény élettani állapotát és stressztűrő képességét, valamint az aflatoxintermelő *Aspergillus* fajok fennmaradásának és szaporodásának ökológiai feltételeit. Hatásuk ezért a talaj–növény–mikroorganizmus rendszer egészében értelmezhető megfelelően.

Az áttekintett szakirodalom több olyan kérdést is feltárt, amelynek megválaszolásához további kutatások szükségesek. A talaj pH-jának közvetlen szerepéről nem állnak rendelkezésre egyértelmű eredmények, a foszfor és különösen a kálium önálló hatását pedig kevés célzott vizsgálat elemezte. A talajmikrobiom egyes tagjainak *Aspergillus flavus*-gátló hatását laboratóriumi kísérletek igazolták, de még nem tisztázott, hogy ezek a kapcsolatok természetes talajban és szántóföldi körülmények között milyen mértékben befolyásolják a termények tényleges aflatoxin-szennyeződését. A további vizsgálatokban ezért indokolt a

talajtulajdonságok, a mikrobiális közösségek, a növény élettani állapota és az aflatoxin-felhalmozódás együttes értékelése.

A klímaváltozás következtében várhatóan gyakoribbá váló hőhullámok és aszályos időszakok tovább növelhetik az aflatoxinnal való szennyeződés kockázatát, különösen a korábban kevésbé érintett mérsékelt égövi területeken (Battilani et al., 2016). Ez felértékeli azoknak a talajgazdálkodási módszereknek a jelentőségét, amelyek elősegítik a növények kiegyensúlyozott tápanyagellátását, javítják a vízháttal szembeni stressztűrő képességüket, és támogatják a talaj biológiai működését. Ezek az intézkedések önmagukban nem akadályozzák meg az aflatoxinnal való szennyeződést, de egy összetett megelőzési stratégia részeként hozzájárulhatnak a növényeket érő stresszhatások és ezáltal a fertőzés kockázatának mérsékléséhez.

Az aflatoxin-kockázat mérséklése nem zárul le a betakarítással. A talajállapotot és a növényi stresszt mérséklő termesztéstechnológiai intézkedések elsősorban a betakarítás előtti fertőzési és toxinfelhalmozódási kockázatot mérsékelhetik. Ezt követően a termés gyors szárítása, megfelelő nedvességtartalmának beállítása és a biztonságos tárolás szükséges annak megakadályozásához, hogy az aflatoxinnal való szennyeződés a tárolás során tovább növekedjen.

Összefoglalás

A klímaváltozással összefüggő gyakoribb hőhullámok és aszályos időszakok Európa mérsékelt égövi területein is növelik a termények aflatoxinnal való szennyeződésének kockázatát. A szennyeződés kialakulását az aflatoxintermelő *Aspergillus* fajok, a gazdanövény állapota és a környezeti feltételek kölcsönhatása határozza meg. A tanulmány azt tekinti át, hogy a talaj pH-ja, nitrogén-, foszfor- és káliumellátottsága, szervesanyag-tartalma és biológiai állapota miként befolyásolhatja a gombák fennmaradását, a növényi fertőzést és az aflatoxin-felhalmozódást. A szakirodalmi eredmények alapján egyetlen talajtulajdonság sem tekinthető az aflatoxin-szennyeződés önálló előrejelzőjének, mivel hatásuk a növény stresszállapotával és az időjárási viszonyokkal összefüggésben érvényesül. A kiegyensúlyozott tápanyagellátás, a talaj kedvező vízgazdálkodásának és biológiai működésének fenntartása, valamint a növényi stressz mérséklése hozzájárulhat a betakarítás előtti kockázat csökkentéséhez. Ezt a betakarítást követően gyors szárítással és biztonságos tárolással szükséges kiegészíteni. Az eredményes megelőzés ezért a termőhelyi adottságok, a talajállapot, a növény stressztűrő képessége, valamint a termesztési és tárolási gyakorlat együttes értékelését igényli.

Kulcsszavak: aflatoxin, *Aspergillus flavus*, talaj pH-ja, tápanyag-gazdálkodás, talajmikrobiom

Irodalom

- Abbas, H. K., Wilkinson, J. R., Zablotowicz, R. M., Accinelli, C., Abel, C. A., Bruns, H. A., & Weaver, M. A. (2009). Ecology of *Aspergillus flavus*, regulation of aflatoxin production, and management strategies to reduce aflatoxin contamination of corn. *Toxin Reviews*, 28(2–3), 142–153. <https://doi.org/10.1080/15569540903081590>
- Battilani, P., Toscano, P., Van der Fels-Klerx, H. J., Moretti, A., Camardo Leggieri, M., Brera, C., Rortais, A., Goumperis, T., & Robinson, T. (2016). Aflatoxin B₁ contamination in maize in Europe increases due to climate change. *Scientific Reports*, 6, 24328. <https://doi.org/10.1038/srep24328>
- Blandino, M., Reyneri, A., & Vanara, F. (2008). Influence of nitrogen fertilization on mycotoxin contamination of maize kernels. *Crop Protection*, 27(2), 222–230. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2007.05.008>
- Cakmak, I. (2005). The role of potassium in alleviating detrimental effects of abiotic stresses in plants. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 168(4), 521–530. <https://doi.org/10.1002/jpln.200420485>
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2007.07.060>
- Cotty, P. J., Probst, C., & Jaime-Garcia, R. (2008). Etiology and management of aflatoxin contamination. In J.F. Leslie, R. Bandyopadhyay, & A. Visconti (Eds.), *Mycotoxins: Detection methods, management, public health and agricultural trade* (pp. 287–299). CABI. <https://doi.org/10.1079/9781845930820.0287>

- de Boer, W., Verheggen, P., Klein Gunnewick, P. J. A., Kowalchuk, G. A., & van Veen, J. A. (2003). Microbial community composition affects soil fungistasis. *Applied and Environmental Microbiology*, 69(2), 835–844. <https://doi.org/10.1128/AEM.69.2.835-844.2003>
- De Corato, U. (2020). Disease-suppressive compost enhances natural soil suppressiveness against soil-borne plant pathogens: A critical review, *Rhizosphere*, 13, 100192, ISSN 2452-2198, <https://doi.org/10.1016/j.rhisph.2020.100192>.
- Dou, Y., Yu, S., Liu, S., Cui, T., Huang, R., Wang, Y., Wang, J., Tan, K., & Li, X. (2025). Crop rotations reduce pathogenic fungi compared to continuous cropping. *Rhizosphere*, 34, 101074. <https://doi.org/10.1016/j.rhisph.2025.101074>
- EFSA Panel on Contaminants in the Food Chain (CONTAM). (2020). Risk assessment of aflatoxins in food. *EFSA Journal*, 18(3), e06040. <https://doi.org/10.2903/j.efsa.2020.6040>
- Fountain, J. C., Scully, B. T., Ni, X., Kemerait, R. C., Lee, R. D., Chen, Z.-Y., & Guo, B. (2014). Environmental influences on maize-*Aspergillus flavus* interactions and aflatoxin production. *Frontiers in Microbiology*, 5, 40. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2014.00040>
- Franzluebbers, A. J. (2002). Water infiltration and soil structure related to organic matter and its stratification with depth. *Soil and Tillage Research*, 66(2), 197–205. [https://doi.org/10.1016/S0167-1987\(02\)00027-2](https://doi.org/10.1016/S0167-1987(02)00027-2)
- Garbeva, P., van Elsas, J. D., & van Veen, J. A. (2008). Rhizosphere microbial community and its response to plant species and soil history. *Plant and Soil*, 302(1–2), 19–32. <https://doi.org/10.1007/s11104-007-9432-0>
- Horn, B. W. (2003). Ecology and Population Biology of Aflatoxigenic Fungi in Soil. *Journal of Toxicology: Toxin Reviews*, 22(2–3), 351–379. <https://doi.org/10.1081/TXR-120024098>
- Hudson, B. D. (1994). Soil organic matter and available water capacity. *Journal of Soil and Water Conservation*, 49(2), 189–194. <https://doi.org/10.1080/00224561.1994.12456850>
- International Agency for Research on Cancer. (2002). *Some traditional herbal medicines, some mycotoxins naphthalene and styrene* (IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans, Vol. 82). <https://pure.johnshopkins.edu/en/publications/iarc-monographs-on-the-evaluation-of-carcinogenic-risks-to-humans-3/>
- Jacoby, R., Peukert, M., Succurro, A., Koprivova, A., & Kopriva, S. (2017). The role of soil microorganisms in plant mineral nutrition—Current knowledge and future directions. *Frontiers in Plant Science*, 8, 1617. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.01617>
- Jaime-Garcia, R., & Cotty, P. J. (2006). Spatial relationships of soil texture and crop rotation to *Aspergillus flavus* community structure in South Texas. *Phytopathology*, 96(6), 599–607. <https://doi.org/10.1094/PHYTO-96-0599>
- Jaime-Garcia, R., & Cotty, P. J. (2010). Crop rotation and soil temperature influence the community structure of *Aspergillus flavus* in soil. *Soil Biology and Biochemistry*, 42(10), 1842–1847. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2010.06.025>
- Kabak, B. (2009). The fate of mycotoxins during thermal food processing. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 89(4), 549–554. <https://doi.org/10.1002/jsfa.3491>
- King, A. E., Choi, E., Burkhardt, J., & Mueller, N. D. (2026). Soil organic carbon improves crop yield and yield resilience. *Global Change Biology*, 32(5), e70909. <https://doi.org/10.1111/gcb.70909>
- Kis, A., Szabó, P., & Pongrácz, R. (2025). Analysis of detected and future drought conditions—A case study for the Great Hungarian Plain. *Theoretical and Applied Climatology*, 156, Article 303. <https://doi.org/10.1007/s00704-025-05510-2>
- Lewis, M. H., Carbone, I., Luis, J. M., Payne, G. A., Bowen, K. L., Hagan, A. K., Kemerait, R., Heiniger, R., & Ojiambo, P. S. (2019). Biocontrol strains differentially shift the genetic structure of indigenous soil populations of *Aspergillus flavus*. *Frontiers in Microbiology*, 10, Article 1738. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2019.01738>
- Lin, Q., Wu, X., Li, L., Peng, T., Zou, X., Li, G., Wang, J., Tang, X., Yue, X., & Li, P. (2026). Impact on *Aspergillus flavus* infection on the rhizosphere bacterial microbiota of peanut (*Arachis hypogaea* L.). *Toxins*, 18(3), 131. <https://doi.org/10.3390/toxins18030131>
- Magan, N., Medina, A., & Aldred, D. (2011). Possible climate-change effects on mycotoxin contamination of food crops pre- and postharvest. *Plant Pathology*, 60(1), 150–163. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3059.2010.02412.x>
- Manoza, F. S., Mushongi, A. A., Harvey, J., Wainaina, J., Wanjuki, I., Ngeno, R., Damell, R., Gnonlonfin, B. G. J., & Massomo, S. M. S. (2017). Potential of using host plant resistance, nitrogen and phosphorus fertilizers for reduction of *Aspergillus flavus* colonization and aflatoxin accumulation in maize in Tanzania. *Crop Protection*, 93, 98–105. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2016.11.021>
- Medina, Á., Rodriguez, A., & Magan, N. (2014). Effect of climate change on *Aspergillus flavus* and aflatoxin B₁ production. *Frontiers in Microbiology*, 5, 348. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2014.00348>
- Mendes, R., Kruijt, M., de Bruijn, I., Dekkers, E., van der Voort, M., Schneider, J. H. M., Piceno, Y. M., DeSantis, T. Z., Andersen, G. L., Bakker, P. A. H. M., & Raaijmakers, J. M. (2011). Deciphering the rhizosphere microbiome for disease-suppressive bacteria. *Science*, 332(6033), 1097–1100. <https://doi.org/10.1126/science.1203980>

- Monda, E., Masanga, J., & Alakonya, A. (2020). Variation in occurrence and aflatoxigenicity of *Aspergillus flavus* from two climatically varied regions in Kenya. *Toxins*, 12(1), 34. <https://doi.org/10.3390/toxins12010034>
- Muthuraja, R., Muthukumar, T., & Natthapol, C. (2023). Drought tolerance of *Aspergillus violaceofuscus* and *Bacillus licheniformis* and their influence on tomato growth and potassium uptake in mica amended tropical soils under water-limiting conditions. *Frontiers in Plant Science*, 14, 1114288. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1114288>
- Natarajan, S., Balachandar, D., Senthil, N., Velazhahan, R., & Paranidharan, V. (2022). Volatiles of antagonistic soil yeasts inhibit growth and aflatoxin production of *Aspergillus flavus*. *Microbiological Research*, 263, 127150. <https://doi.org/10.1016/j.micres.2022.127150>
- Nyandi, M. S., & Pepó, P. (2024). *Aspergillus* and *Fusarium* mycotoxin contamination in maize (*Zea mays* L.): The interplay of nitrogen fertilization and hybrids selection. *Toxins*, 16(7), 318. <https://doi.org/10.3390/toxins16070318>
- Palumbo, J. D., O’Keeffe, T. L., Kattan, A., Abbas, H. K., & Johnson, B. J. (2010). Inhibition of *Aspergillus flavus* in soil by antagonistic *Pseudomonas* strains reduces the potential for airborne spore dispersal. *Phytopathology*, 100(6), 532–538. <https://doi.org/10.1094/PHYTO-100-6-0532>
- Pongrácz, R., Bartholy, J., & Miklós, E. (2011). Analysis of projected climate change for Hungary using ENSEMBLES simulations. *Applied Ecology and Environmental Research*, 9(4), 387–398. https://doi.org/10.15666/aecr/0904_387398
- Schlatter, D., Kinkel, L., Thomashow, L., Weller, D., & Paulitz, T. (2017). Disease suppressive soils: New insights from the soil microbiome. *Phytopathology*, 107(11), 1284–1297. <https://doi.org/10.1094/PHYTO-03-17-0111-RVW>
- Simon, L., Makádi, M., Uri, Z., Vigh, S., Irinyiné-Oláh, K., Vincze, G., & Tóth, C. (2022). Phytoextraction of toxic elements and chlorophyll fluorescence in the leaves of energy willow (*Salix* sp.), treated with wastewater solids and wood ash. *Agrokémia és Talajtan*, 71(1), 77–99. <https://doi.org/10.1556/0088.2022.00122>
- Tóth, C., Simon, L., & Tóth, B. (2024). Microanatomical properties of energy willow (*Salix* spp.) leaves after exposure to potentially toxic elements from wastewater solids and wood ash. *Agronomy*, 14(8), 1625. <https://doi.org/10.3390/agronomy14081625>
- Veresoglou, S. D., Barto, E. K., Meneses, G., & Rillig, M. C. (2013). Fertilization affects severity of disease caused by fungal plant pathogens. *Plant Pathology*, 62(5), 961–969. <https://doi.org/10.1111/ppa.12014>
- Williams, J. H., Phillips, T. D., Jolly, P. E., Stiles, J. K., Jolly, C. M., & Aggarwal, D. (2004). Human aflatoxicosis in developing countries: A review of toxicology, exposure, potential health consequences, and interventions. *The American Journal of Clinical Nutrition*, 80(5), 1106–1122. <https://doi.org/10.1093/ajcn/80.5.1106>
- Wu, Q., Li, H., Wang, S., Zhang, Z., Zhang, Z., Jin, T., Hu, X., & Zeng, G. (2022). Differential expression of genes related to growth and aflatoxin synthesis in *Aspergillus flavus* when inhibited by *Bacillus velezensis* strain B2. *Foods*, 11(22), 3620. <https://doi.org/10.3390/foods11223620>
- Xue, M., Qu, Z., Moretti, A., Logrieco, A. F., Chu, H., Zhang, Q., Sun, C., Ren, X., Cui, L., Chen, Q., An, Y., Li, C., Zhong, H., Cao, Z., Wang, F., Sun, Y., Wang, L., Hou, J., Zhang, C., . . . Zhu, Y.-G. (2025). *Aspergillus* mycotoxins: The major food contaminants. *Advanced Science*, 12(9), 2412757. <https://doi.org/10.1002/advs.202412757>
- You, D., Tian, P., Sui, P., Zhang, W., Yang, B., & Qi, H. (2017). Short-term effects of tillage and residue on spring maize yield through regulating root–shoot ratio in Northeast China. *Scientific Reports*, 7, 13314. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-13624-5>
- Zhang, S., Wang, X., Wang, D., Chu, Q., Zhang, Q., Yue, X., Zhu, M., Dong, J., Li, L., Jiang, X., Yang, Q., & Zhang, Q. (2022). Discovery of the relationship between distribution and aflatoxin production capacity of *Aspergillus* species and soil types in peanut planting areas. *Toxins*, 14(7), 425. <https://doi.org/10.3390/toxins14070425>
- Zhang, Y., Wang, W., Piao, C., Li, W., Cotty, P. J., Shan, S., Rasheed, U., Migheli, Q., & Kong, Q. (2025). Exploring the characteristics of atoxigenic *Aspergillus flavus* isolates and their biocontrol impact on soil fungal communities. *Journal of Fungi*, 11(7), 491. <https://doi.org/10.3390/jof11070491>

THE ROLE OF SOIL FACTORS IN SHAPING AFLATOXIN RISK

¹Judit Halász,

¹University of Nyíregyháza, Institute of Environmental and Natural Sciences, Department of
Biology, 4400 Nyíregyháza, Sóstói út 31/B, Hungary
judit.halasz@nye.hu

Summary

Climate change-related increases in the frequency of heatwaves and drought periods are raising the risk of aflatoxin contamination of crops, including in the temperate regions of Europe. Contamination is determined by interactions among aflatoxin-producing *Aspergillus* species, host plant condition and environmental factors. This review examines how soil pH, nitrogen, phosphorus and potassium availability, organic matter content and biological condition may influence fungal survival, plant infection and aflatoxin accumulation. The available literature indicates that no single soil property can be considered an independent predictor of aflatoxin contamination, as its effects depend on interactions with plant stress and weather conditions. Balanced nutrient supply, the maintenance of favourable soil water conditions and biological functioning, and the mitigation of plant stress may help reduce pre-harvest risk. After harvest, these measures must be complemented by rapid drying and safe storage. Effective prevention therefore requires the combined evaluation of site conditions, soil status, plant stress tolerance, and crop production and storage practices.

Keywords: aflatoxin, *Aspergillus flavus*, soil pH, nutrient management, soil microbiome