

Választ jelenthetnek a növényi kivonatok (fitokemikáliák) a mikotoxinok okozta kihívásokra?

Kovács Melinda ^{1,2}, Szabó András ^{1,2}, Omeralfaroug Ali ¹, Naeem Sheik Abdul ³,
Docrat Taskeen Fathima ⁴, Marnewick Jeanine L. ⁴

¹ Agrár-biotechnológia és precíziós nemesítés az élelmiszerbiztonságért Nemzeti Laboratórium, Élettani és Állategészségügyi Tanszék, Élettani és Takarmányozástani Intézet, Magyar Agrár- és Élettudományi Egyetem, Kaposvári Campus

² HUN-REN-MATE Mikotoxinok az Élelmiszerláncban Kutatócsoport, Kaposvár

³ Department of Biochemistry, Stellenbosch University, Stellenbosch, South Africa

⁴ Applied Microbial and Health Biotechnology Institute, Cape Peninsula University of Technology (CPUT), Bellville, South Africa

Összefoglalás

*A mikotoxinokkal való szennyezettség elkerülésének elsődleges lehetősége a penészgombákkal való fertőződés megakadályozása. A takarmányokban és az élelmiszerekben a megengedett határértékként meghatározott és szabályozott toxinkoncentrációk alatti expozíció káros hatásainak megelőzése érdekében cél az állati, illetve az emberi szervezet ellenálló képességének (antioxidáns-védelem, immunválaszkészség) fokozása. A növényi anyagok, mint például az illóolajok, fűszerek, gyógynövények és nyers kivonatok jó alternatívát jelentenek a biofungicidok és nutraceutikumok révén a penészgomba-fertőzés és a kapcsolódó mikotoxikózisok káros hatásainak enyhítésére. A növényi kivonatok farmakológiai hatásai kedvezően felhasználhatók a gazdasági állatok mikotoxikózisok okozta kártételének csökkentésében is. A biológiailag aktív komponensek csökkenthetik a mikotoxinok biológiai hozzáférhetőségét, antioxidáns hatásukkal csökkentik a mikotoxinok által kiváltott oxidatív stressz károsító hatását, védik a bél integritását, növelve a bélbarriert, szabályozzák a gyulladásos citokinek termelődését és befolyásolják az apoptózist. A tanulmány összefoglalja a dél-afrikai rooibos (*Aspalathus linearis*) kedvező hatásait, és azon saját kísérletes eredményeinket, amelyek igazolták a rooibos polifenolok májvédő hatását magas fumonizin B₁ expozíciónak kitett patkányokban.*

Kulcsszavak: mikotoxinok, fitokemikáliák, antioxidáns, rooibos, fumonizin B₁

1. Bevezetés

Az élelmiszerekben és a takarmányokban előforduló természetes környezetszennyező anyagok közül a mikroszkopikus penészgombák által termelt mikotoxinok egyelőre nem kiiktathatók az élelmiszerláncból. Kártételükről a tanulmánykötet számos egyéb fejezete szól. Az általuk okozott hatalmas gazdasági veszteség mellett állat- és humán egészségügyi, valamint élelmiszer-biztonsági kockázatot jelentenek, a környezetre, az ökoszisztémára gyakorolt hatásuk viszont még alig ismert.

A mikotoxinokkal való szennyezettség elkerülésének elsődleges lehetősége a penészgombákkal való fertőződés megakadályozása. A növény-nemesítés és a megfelelő agrotechnika a növények elsődleges védelmét szolgálja. Vannak lehetőségek a toxinképző gombák növekedésének és a kapcsolódó mikotoxinok termelődésének megelőzésére a betakarítás előtti időszakban és azt

követően is, az élelmiszerek és a takarmányok tárolása során. A már szennyezett takarmánytétel esetében a mikotoxinok semlegesítése a cél, amelyre számos fizikai, kémiai és biológiai módszer ismert. Ezek egyike sem jelent azonban tökéletes megoldást egyik mikotoxin esetében sem. Tekintettel arra, hogy ezek a mérgező vegyületek nagyon eltérő kémiai szerkezetűek, más a hatásmechanizmusuk és az érzékenyséjük, nincs olyan közömbösítési módszer, amelyik a leggyakrabban előforduló mikotoxinok együttesével szemben védelmet adhat. A takarmányokban és az élelmiszerekben a megengedett határértékként meghatározott és szabályozott toxinkoncentrációk alatti expozíció káros hatásainak megelőzése érdekében cél az állati, illetve az emberi szervezet ellenálló képességének (antioxidáns-védelem, immunválaszkészség) fokozása.

A növényi anyagok, mint például az illóolajok, fűszerek, gyógynövények és nyers kivonatok jó alternatívát jelentenek a biofungicidek és nutraceutikumok révén a penészgomba-fertőzés és a kapcsolódó mikotoxikózisok enyhítésére. A fitokemikáliák olyan bioaktív növényi vegyületek, amelyek jótékony hatással vannak az állati, illetve emberi szervezetre olyan módon, hogy megerősítik azokat a védelmi vonalakat, amelyek a mikotoxinok leggyakoribb támadáspontjai. A fitokemikáliák különböző forrásokból származhatnak, így például teljes kiőrlésű gabonákból, gyümölcsökből, zöldségekből, diófélékből és gyógynövényekből. A mai napig több mint ezer fitokemikáliát azonosítottak, ezek többek között lehetnek karotinoidok, polifenolok, izoprenoidok, fitoszterolok, szaponinok, élelmi rostok és bizonyos poliszacharidok. Legnagyobb részük erős antioxidáns-aktivitással rendelkezik, de antimikrobiális, antiparazitás, allergiaellenes és vírusellenes hatást is mutatnak (KUMAR ÉS MTSAL, 2023). Befolyásolják a géntranszkripciót, a sejt-sejt közötti kommunikációt, továbbá megváltoztathatnak onkogén jelátviteli útvonalakat, így rákellenes hatásúak is lehetnek (MANOGARAN ÉS MTSAL, 2023).

2. Növényi kivonatok alkalmazásának lehetőségei az egészségkárosító hatások megelőzésében

Egyes növények gyógyító hatásának felismerése több ezer évre nyúlik vissza. Az ókorban és a középkorban a gyógynövényeken alapuló gyógyítás gyakran túlmutatott a betegség konkrét tüneteinek kezelésén, a beteg teljes fizikai és mentális egyensúlyának elérését célozták (holisztikus gyógyítás) (CHIHOMVU ÉS MTSAL, 2024). A tapasztalati úton szerzett információk szájhagyomány és írásos források útján adódtak tovább generációról generációra. Az etnofarmakológia mint interdiszciplináris tudomány célja a konkrét fitovegyületek hatásmechanizmusának feltárása (TÓTH ÉS PAPP, 2014). Ennek keretében a kutatás ötvözi a farmakológia, a kémia, az antropológia és a botanikai ismereteket annak érdekében, hogy tudományos magyarázatot adhasson a tradicionális gyógy módok mögött álló biológiai hatásokra.

A WHO adatai szerint a világ népességének körülbelül 80%-a támaszkodik a hagyományos gyógy módokra vagy gyógyszerekre (MUMTAZ ÉS MTSAL, 2016). A gazdaságilag elmaradottabb országok vidéki térségeiben, ahol a korszerű orvosi ellátás nehezen vagy egyáltalán nem hozzáférhető, a hagyományos gyógyszerek továbbra is a gyógyítás alapvető részét képezik. A 2016-ban létrehozott és online elérhető Medicinal Plants Database for Drug Designing (MPD3) adatbázis több mint 5000 fitovegyületről tartalmaz információt, amelyek körülbelül 1000 gyógynövényből származnak. Az adatbázis 80 különféle biológiai aktivitást, több mint 900 irodalmi hivatkozást és több mint 200 célmolekulát foglal magában (lásd: <https://mpd3.com/>) (MUMTAZ ÉS MTSAL, 2016).

Mind a fejlődő, mind a fejlett társadalmakban érzékelhető az egyre növekvő érdeklődés a természetes alapanyagok iránt, így a növényekből nyert gyógyászati termékek iránt is, ami új utat nyitott meg a funkcionális élelmiszerek és a nutraceutikumok fejlesztésében.

A növényi kivonatok kedvező farmakológiai hatásai felhasználhatók a gazdasági állatok mikotoxikózisok okozta kártételének csökkentésében is. A biológiaiailag aktív komponensek

csökkenthetik a mikotoxinok biológiai hozzáférhetőségét, antioxidáns hatásukkal csökkentik a mikotoxinok által kiváltott oxidatív stressz károsító hatását, védik a bél integritását, növelve a bélbarriert, szabályozzák a gyulladásos citokinek termelődését és befolyásolják az apoptózist (ZHANG ÉS MTSAL, 2025). Néhány növényi kivonat mikotoxikózisban kimutatott védő hatását az 1. táblázat foglalja össze, ZHANG ÉS MTSAL. (2025) alapján.

1. táblázat. Néhány növényi kivonat mikotoxikózisban kimutatott védő hatása

Növényi kivonat/ osztályozása	Vizsgált mikotoxin	Kísérleti állat	Hatás
kurkumin/polifenol	ochratoxin A (OTA)	kacsa, egér	TJ fehérjeszintézis ↑, az Nrf2/p53 és az NF-kB/MLCK-útvonalak szabályozása révén bélbarriervédő hatás ↑
rezveratrol/polifenol	Dezoxinivalenol (DON)	bélsejtvonal	bélbarrier-diszfunkció ↓ (IL-6, IL-8, claudin-4 komplex termelés)
dihidromiricetin/flavon	DON	IPEC-J2-sejtvonal	antioxidáns hatás, gyulladáscsillapítás
szőlőmag proantociandin/glikozid	afatoxin B ₁ (AFB ₁)	patkány	oxidatív stressz ↓, immunválasz ↑
vörös narancs és citrom kivonat/glikozid	OTA	patkány	oxidatív stressz ↓, vesekárosodás ↓
Chromola odorata flavonoid/flavon	AFB ₁	patkány	gyulladáskeltő citokinek (TNF-alfa, IL-1β) ↓
ferulinsav	AFB ₁	patkány	bélbarrier-diszfunkció ↓ (CYP450, GST↓)
quercetin	DON	egér	bélkárosító hatás ↓ (TRL4/NF-kB-útvonal és ferroptózis ↓)
Hericium gomba/poliszacharid	DON	IPEC-J2-sejtvonal	oxidatív stressz ↓, apoptózis ↓,
teofilin/alkaloid	DON	malac	gyulladás ↓, bélbarrier ↑, immunválasz ↑, oxidatív stressz ↓ (NF-kB/MAPK-útvonal)
Melaleuca alternifolia/illóolaj	AFB ₁	ezüst cápaharcsa	ROS-képződés ↓, májkárosodás ↓

Magyarázat: ↑: növekvő / fokozó hatás, ↓: csökkentő / gátló hatás

(Forrás: ZHANG ÉS MTSAL. [2025] alapján, saját szerkesztés)

3. A rooibos (*Aspalathus linearis*) polifenolok hatása

A rooibostea a Dél-Afrikából származó cserjés, hüvelyes növény, a vörös fokföldirekettye (*Aspalathus linearis*, *Fabaceae* növény család) leveleinek főzete. Szemben a kedvelt és egészségesnek tartott zöld és fekete teákkal, a rooibos koffeinmentes és alacsony tannintartalmú, ami lágyabb, ízletesebb teaélményt eredményez. Emellett egyedülálló a polifenol-összetétele és ennek köszönhetően antioxidáns, gyulladáscsillapító hatású, továbbá kedvező hatású az inzulinrezisztencia kialakulásának megelőzésében. Számos kedvező hatását tapasztalták mentális és egyes szervi betegségek megelőzésében és terápiájában is (SPEER ÉS MTSAL, 2024). A zöld rooibos a nyers változat, míg a vörös rooibos a levél és a szár fermentációjával készül, ami némi veszteséget okoz az aktív hatóanyagok koncentrációjában és az antioxidáns-kapacitásban. A fermentáció körülbelül 30%-kal csökkenti az összpolicenol-tartalmat és az antioxidáns-kapacitást (oxygen radical absorbance capacity, ORAC) (MARNEWICK, 2014). Jelenleg a rooibos az egyetlen ismert természetes forrása az aszpalatin flavonoidnak, amely a fermentáció során nagymértékben dihidro-izo-orientinné oxidálódik, emiatt az aszpalatin koncentrációja akár egy nagyságrenddel csökkenhet (MCKAY ÉS BLUMBERG, 2007). BRAMATI ÉS MTSAL. (2003) leírása szerint az aszpalatin koncentrációja a zöld és a fermentált (vörös) rooibosteák összehasonlításakor 49,9 mg/g-ról 1,2 mg/g-ra csökkent. Figyelembe véve a rooibostea számos bioaktív összetevőjét, valószínű, hogy ezek a komponensek eltérő, ugyanakkor szinergens módon aktiválhatnak különböző metabolikus és jelátviteli molekuláris útvonalakat, amelyek együttesen fejtik ki az adott élettani hatást.

Antioxidáns hatás

SCHULZ ÉS MTSAL. (2003) szerint a zöld rooibos relatív aszpalatin-tartalma jól korrelál a szárított növényi anyag teljes antioxidáns-aktivitásával ($R^2 = 0,81$).

A rooibostea szignifikánsan növelte patkányok májában a glutation-S-transzferáz-alfa enzim aktivitását. Az oxidált glutation (GSSG) szintje csökkent, míg a redukált glutation (GSH) szintje jelentősen megnőtt a gyógyteával kezelt állatok májában, ami növelte a GSH/GSSG arányt, növelve ezáltal a máj oxigénigény-elimináló kapacitását. A nyers rooibos szignifikánsan növelte a mikroszomális UDP-glükuronozil-transzferáz (UDP-GT) aktivitását a májban, ami elősegíti a kémiai karcinogének bioszintetikus konjugációját inaktív, könnyen kiürülő termékekké, ezáltal csökkentve azok lehetséges kölcsönhatását a DNS-sel. A II. fázisú xenobiotikum-metabolizáló enzimek és az oxidatív státusz májbeli módosulása fontos szerepet játszhat a mutagenézissel és az oxidatív károsodással összefüggő kedvezőtlen hatások elleni védelemben (MARNEWICK ÉS MTSAL, 2003). INANAMI ÉS MTSAL. (1995) a rooibostea hosszú távú fogyasztásának hatását vizsgálták a lipidperoxidációra patkánygyanban. Megállapították, hogy az életkorral nőtt az egyik lipidperoxidációs marker (thiobarbituric acid reactive substances, TBARS) koncentrációja a frontális és occipitális kéregben, a hippocampusban és a kisagyban. Ugyanakkor azoknál a patkányoknál, amelyek 3 és 24 hónapos koruk között korlátlan mennyiségben fogyaszthattak rooibosteát, nem mutatkozott szignifikáns változás a TBARS-értékekben.

ULICN ÉS MTSAL. (2003) a rooibos májvédő hatását mutatták ki patkányban, amelyet szintén az antioxidáns-védelmi rendszer erősítésének tulajdonítottak.

Mutagenézis gátlása

A zöld rooibosteát fogyasztó patkányok májából izolált citoszolfrakciók szignifikáns védelmet nyújtottak a 2-acetilaminofluorén (2-AAF) által kiváltott mutagenézissel szemben a *Salmonella* TA 98 törzsén végzett mutagenitási tesztben. Az aflatoxin B₁ (AFB₁) által kiváltott mutagén hatást a zöld és a vörös teát fogyasztó patkányok májának citoszol frakciói egyaránt gátolták (MARNEWICK ÉS MTSAL, 2004).

Antikarcinogén hatás

A nyers és fermentált rooibos kemoprotektív tulajdonságait vizsgálták a fumonizin B₁ (FB₁) mikotoxin által kiváltott májtumor kialakulásával szemben patkánymodellben, ahol a dietil-nitrozamin (DEN) szolgált a daganatképződést előidéző anyagként. A nyers rooibos csökkentette a májban a preneoplasztikus elváltozások számát, és a nagyobb fókuszok relatív mennyiségét (MARNEWICK ÉS MTSAL, 2009). Egy egérbőrön végzett vizsgálat pedig kimutatta, hogy a rooibos kivonata gátolja a daganatpromóció folyamatát, ezáltal csökkenti a papillómák kialakulását (MARNEWICK ÉS MTSAL, 2005).

Immunmoduláló hatás

A rooibostea kivonata elősegítheti az antigén-specifikus ellenanyag-termelést azáltal, hogy szelektíven fokozza az IL-2 termelődését mind *in vitro*, mind *in vivo* körülmények között. Fogyasztása emiatt hasznos lehet olyan betegségek megelőzésében, amelyek súlyos Th1 immunválaszzavarral járnak, például tumorok, allergia, AIDS és más fertőzések (KUNISHIRO ÉS MTSAL, 2002). A tea vizes kivonata *in vitro* fokozta az ovalbuminnal (OVA) stimulált egér lépsejtekben a specifikus immunoglobulin M (IgM) termelését (ICHIYAMA ÉS MTSAL, 2007).

Metabolikus hatás

Számos tanulmány kimutatta, hogy a rooibos-polifenolok befolyásolják egyes szervek/szövetek (máj, vázizom, szívizom) energiatermelő folyamatait, szubsztrát preferenciáját. Egy vizsgálat szerint a rooibos csökkentette a máj inzulinrezisztenciáját az adenosin-5'-monofoszfát-aktivált protein-kináz (AMPK) útvonal modulálásán keresztül. Egy másik kutatócsoport kimutatta, hogy a rooibos fokozza az AMPK aktivitását a májban. A vázizomzatban növeli az AMPK aktivitást, a glükóz-oxidációt, a mitokondriális aktivitást és az ATP-termelést. Az AMPK a szív energiaállapotának fő érzékelője is. Feltételezhető, hogy a rooibos aktiválja az AMPK-GLUT-4-glükózoxidációs (szívre jellemző) útvonalat, ezzel megőrzi és fenntartja a szív energia-homeosztázisát (MAARMAN, 2019).

Humán vizsgálatok

A rooibos gyógyteát a népi gyógyászatban régóta alkalmazzák, és egyes hagyományos orvoslási rendszerek asztma, kólika, ekcéma, fejfájás, hányinger és enyhe depresszió kezelésére ajánlják. Emellett a rooibost használják vérnyomáscsökkentőként, immunrendszer-erősítőként, hashajtóként, nyugtatóként, görcsoldóként, valamint az érlemeszesedés és a cukorbetegség kezelésére is (MCKAY ÉS BLUMBERG, 2007).

Egy nyolchetes, randomizált, placebo kontrollált vizsgálat számolt be az ólomgyárban dolgozók antioxidáns-státuszáról fermentált rooibos fogyasztását követően. A vizsgálat kimutatta, hogy a rooibos befolyásolta a dolgozók redoxállapotát: csökkent a lipidek peroxidációjának mértéke (amit a plazma malondialdehid [MDA] szintjével mértek), miközben nőtt a vérplazma glutathion- (GSH) szintje (NIKOLOVA ÉS MTSAL, 2007).

Egy másik vizsgálatban 40 önkéntes napi hat csésze fermentált/hagyományos rooibost fogyasztott hat héten keresztül, amit egy kontrollidőszak követett, ami alatt az alanyok tea helyett vizet fogyasztottak. Megállapították, hogy a plazma összes antioxidáns-kapacitása nem változott ugyan, de a plazma összes polifenolszintje a kontrollértékekhez képest szignifikánsan megemelkedett a rooibos fogyasztását követően. Ennek kedvező hatása megmutatkozott a lipidperoxidációt jelző markerek (konjugált diének, malondialdehid) szintjének csökkenésében, a redukált glutathion és a GSH/GSSG arány növekedésében. Csökkent továbbá a szérum LDL-koleszterin és triglicerid, míg nőtt a HDL-koleszterin szintje. A redoxstátusz és a lipidadanyagcsere ilyen irányú változása mindenképpen kedvezőnek mondható a szív- és érrendszeri megbetegedések megelőzése szempontjából (MARNEWICK ÉS MTSAL, 2011).

Vizsgálták még a rooibostea fogyasztásának hatását a vas biológiai hozzáférhetőségére és allergiás (asztma, szénanátha) esetekben is (MCKAY ÉS BLUMBERG, 2007).

Esetleges negatív hatásokról nem ír a szakirodalom.

Gazdasági állatfajokkal kapcsolatos eredmények

Nagyon kevés olyan szakirodalom áll rendelkezésre, amely a rooibos-hatóanyagoknak a gazdasági állataink termelésére vagy élettani állapotára vonatkozó hatásait vizsgáló kísérleti eredményekről számol be. A rooibos fő hatóanyagának, az aszpalatinnak a felszívódását és metabolizmusát vizsgálták sertésben (KREUZ ÉS MTSAL, 2008). A zöld (nyers) rooiboskivonatot sertéseknek 11 napon keresztül adagolták szájon át (157-167 mg aszpalatin/ testtömeg kg) és kimutatták az aszpalatin glükuronidációját és metilációját a szervezetben.

Ezenkívül egyetlen baromfira vonatkozó kísérleti eredmény áll rendelkezésünkre. Broiler tenyészkakasokban 1,5, és 3%-os rooibosteapor-kiegészítés pozitív hatással volt a szaporodásbiológiai mutatókra (spermiumok száma, motilitása, életképessége, tesztoszteronkoncentráció) (ADABI ÉS MTSAL, 2023). A szerzők ezt a kedvező hatást az aszpalatin antioxidáns hatására vezették vissza.

3.1. A rooibos májvédő hatása fumonizin B₁ (FB₁) expozíciónak kitett patkányokban – saját vizsgálati eredmények

A szfingolipid-anyagcsere zavara kulcsfontosságú tényező az FB₁-hez kapcsolódó toxicitás és karcinogenitás kialakulásában, mivel az FB₁ kompetitíven gátolja a ceramid-szintáz (MERRILL ÉS MTSAL, 2001). Közelmúltbeli tanulmányok ugyanakkor más lehetséges toxicitási mechanizmusokra is rámutattak, többek között epigenetikai szabályozási zavarokra, DNS-károsodásra, mitokondriális diszfunkcióra és oxidatív stresszre (ABDUL ÉS MARNEWICK, 2023).

Kimutatták, hogy az oxidatív stressz során keletkező reaktív oxigéngyökök (ROS) károsítják a sejtek makromolekuláit FB₁-expozíció során (CAO ÉS MTSAL, 2022). Az oxidatív stressz valószínűleg hozzájárul az FB₁ toxicitásához, különösen a membránlipidek károsítása révén, azonban az ezt fokozó mechanizmusok jelenleg még nem teljesen tisztázottak, és abban feltehetően több folyamat is közrejátszhat. A FB₁ által okozott májmembrán-lipidek torzulását több tanulmány is dokumentálta. Egyre nagyobb figyelmet kap az az elképzelés, hogy az oxidatív stressz célzott csökkentése hatékony stratégia lehet az FB₁-nek kitett sejtrendszerekben gyakran megfigyelt sejtkárosodás mérséklésére (ALI ÉS SZABÓ, 2024).

MARNEWICK ÉS MUNKATÁRSAI egy korábbi tanulmányukban kimutatták, hogy a rooibos képes megelőzni a rákkeltő hatások kialakulását FB₁-nek kitett patkányokban az antioxidáns válasz javításán keresztül (MARNEWICK ÉS MTSAL, 2009).

A fentiek indokolták annak tanulmányozását, hogy miként hatnak a rooibos-polifenolok fumonizinexpozíciónak kitett patkányok májában. Kutatásainkat az Agrár-biotechnológia és precíziós nemesítés az élelmiszerbiztonságért Nemzeti Laboratórium projekt, valamint az MTA Vendégkutatói Programja támogatta.

Kísérletünkben a fermentált (FR) és a nem fermentált (GR) rooiboskivonatok májvédő hatását vizsgáltuk patkányokban, amelyeket öt napon keresztül 50 mg/takarmány kg dózissal megfelelő fumonizin B₁ mikotoxinnal kezeltünk, a tisztított toxin hasüregbe fecskendezésével (intraperitonealis applikáció). A kísérleti kezelések: kontroll, FB₁, FB₁ + FR és FB₁ + GR voltak. A rooibosteát a humán fogyasztásban általánosan alkalmazott módon készítettük. A kétféle tea polifenoltartalmát és antioxidáns-kapacitását a 2. táblázat mutatja.

2. táblázat. A zöld és a fermentált rooibostea polifenol-tartalma és oxidatív kapacitása

Főbb összetevők / tulajdonságok	GR (mg/L)	FR (mg/L)
TP (mg GAE/L)	1042 ± 58	573 ± 18
FRAP (μmol AAE/L)	775 ± 8.9	338 ± 9.2
ABTS (μmol TE/L)	711 ± 5.4	275 ± 19.6
ORAC (μmol TE/L)	3233 ± 137	2171 ± 173
Aspalathin	307 ± 1.21	4.31 ± 0.03
Orientin	23.9 ± 0.09	11.42 ± 0.03
Isoorientin	34.1 ± 0.13	17.6 ± 0.04
Isovitexin	4.73 ± 0.03	3.81 ± 0.02
Vitexin	7.65 ± 0.04	4.59 ± 0.01
Hyperoside	24.1 ± 0.11	4.34 ± 0.02
Rutin	33.9 ± 0.10	10.1 ± 0.03
Luteolin	ND	0.39 ± 0.00
Quercetin	ND	0.29 ± 0.00
Crysoeriol	0.79 ± 0.01	0.79 ± 0.04

GR: zöld rooibos, FR: fermentált rooibos, TP: összpolicenol-tartalom, FRAP: ferric reducing antioxidant power (Vas(III)-ion redukáló antioxidáns kapacitás), ABTS: 2,2'-azino-bis(3-etilbenzotiazolin-6-szulfon-sav), ORAC: oxygen radical absorbance capacity (Oxigéngyök-elnyelő kapacitás), ND: nem detektált

Az eredmények azt mutatták, hogy az FB₁ csökkentette a patkányok növekedését, takarmány-felvételét és májműködését, megváltoztatta továbbá az antioxidáns-védekezést (magnövekedett GSH-szint) és a mitokondriális/sejtes stresszvázásokat (emelkedett Nrf2, Sirt3, PGC-α, TRX1, HSP70 és LONp1 génexpresszió). Minden FB₁-kezelt patkány magas szérum-enzimaktivitást mutatott (AST, ALT, ALP, GGT), valamint magas koleszterinszinteket (összes, LDL és HDL), bár a hepatociták vakuoláz degenerációja nem mutatott szignifikáns eltérést.

Az FR-ral való együttes expozíció fokozta a GPx aktivitását, valamint csökkentette az IL-1β és a PGC-α koncentrációját a májban. A GR-ral történő együttes expozíciócsökkenést eredményezett a Sirt3 koncentrációjában. Mindkét rooiboskivonat jelentősen növelte az Nrf2 és HSP70 expresszióját, továbbá jelentősen csökkentette a májban a lipidperoxidációt (MDA) és a fehérje-karboxilációt.

Ugyanakkor egyik rooiboskivonat sem tudta visszafordítani a FB₁ által okozott változásokat a máj foszfolipid zsírsavösszetételében (C18:0, C18:1n9, C20:5n3, C22:4n6 és C22:6n3), illetve az ezekből számított indexekben (összes telítettség, egyszeresen telítetlen, omega-3 zsírsavak és telítetlenségi index).

Összefoglalva, ezek az eredmények rámutatnak a rooiboskivonatok májvédő, funkcionális élelmiszerként való potenciáljára, és ígéretes természetes lehetőséget kínálnak az FB₁ által kiváltott oxidatív károsodásból eredő kedvezőtlen anyagcserehatások mérséklésére (3. táblázat).

3. táblázat. A fumonizin B₁, valamint a toxin és a rooibos együttes hatása a májra

oxidatív marker			gyulladásos marker			mitochondrium- és stressz- marker			membránlipidek		
	FB ₁	FB ₁ + R		FB ₁	FB ₁ + R		FB ₁	FB ₁ + R		FB ₁	FB ₁ + R
GSH	↑	nh	IL-1β	nh	↓	PGC1-α	↑	↓	SFA	↓	nh
GPx	↑	↑	IL-6	↑	nh	Sirt3	↑	↓	MUFA	↑	nh
MDA	↑	↓	IL-10	↓	nh	TRX1	↑	↑	PUFA	nh	nh
PCs	↑	↓	TNF-α	nh	nh	Hsp70	↑	↓	n6	nh	nh
SOD2	nh	↓				LONp1	↑	nh	n3	↑	nh
NFR2	↑	↑									

Magyarázat: FB₁: fumonizin B₁, FB₁+R: fumonizin B₁ + rooibos,

↑: növekvő / fokozó hatás, ↓: csökkentő / gátló hatás, a zöld nyilak a zöld (GR), a piros nyilak a fermentált (FR) rooibos hatását mutatják, a kék nyilak jelzik azt, ha mindkét tea azonos hatással bírt, nh: nincs hatás.

GSH: glutation, GPx: glutation-peroxidáz, MDA: malondialdehid, PCs: protein karbonil, SOD: szuperoxid-dizmutáz, NRF: nuclear factor erythroid 2-related factor 2, IL: interleukin, TNF: tumornekrózis faktor, PGC: peroxisome proliferator-activated receptor gamma coactivator, Sirt: sirtuin, TRX: thioredoxin, Hsp: heat shock protein, LONp: lon protease homolog, SFA: saturated fatty acid, MUFA: monounsaturated fatty acid, PUFA: polyunsaturated fatty acid

4. Zárszó

Megoldást jelenthetnek a növényi kivonatok a mikotoxikózisok okozta egészségkárosító hatások megelőzésében, kivédésében? Erre a kérdésre sajnos jelenleg még nem tudunk egyértelmű választ adni.

Alkalmazásuk korlátjai:

- Bár kísérletesen, *in vivo* is igazolható többszintű hatásuk, a molekuláris szintű pontos hatásmechanizmusok, az egyes mikotoxinokkal való molekuláris kölcsönhatásuk még nem feltárt.
- Toxikus hatást ugyan nem tapasztaltak, de ennek még szükséges részletes toxikológiai vizsgálatokkal történő alátámasztása. Egy toxicitást becslő számítógépes modellezés, valamint csirkeembriókon végzett vizsgálat például jelentős fejlődési toxicitási kockázatot mutatott ki a luteolinnal kapcsolatban. A quercetin és a luteolin alacsony dózisban is enyhe ösztrogénszerű hatást fejtett ki (mindkét flavonoid jelen volt az általunk vizsgált fermentált rooibosban is) (ZHANG ÉS WU, 2022).
- Potenciális veszélyt jelenthet az is, hogy egyes polifenol-antioxidánsok befolyásolhatják egyes gyógyszer hatóanyagok lebontását. Így például a zöld és a fermentált rooiboskivonatok és az aszpalatin gátolta egyes citokróm P450 enzimek aktivitását *in vitro*, így befolyásolhatják egyes antidiabetikumok (pl. szulfonilurea) vagy zsírsanyagcserét szabályozó gyógyszerek (atorvasztatin) hatását (PATEL ÉS MTSAL, 2016). Később ezt a szerzők részben *in vivo* is igazolták, mert patkányban a zöld rooiboskivonat (12% aszpalatin) és az atorvasztatin együttes alkalmazása magasabb plazmakoncentrációhoz, ezáltal az atorvasztatin expozíciójának növekedéséhez vezetett (PATEL ÉS MTSAL, 2019).
- A felhasználásuk gyakorlati oldalát tekintve problémát jelent alacsony felszívódási arányuk, gyors (és nem ismert) metabolizmusuk, hajlamosak a lebomlásra fény, hő és alkalikus pH hatására. Mindezek kiküszöbölésére olyan új technológiák szükségesek (pl. nanohordozó kifejlesztése), amelyek javítják a hatóanyagok felszívódását, célzott eljuttatását és hatékonyságát.

- A nagy tisztaságú aktív összetevők kivonási folyamata bonyolult és költséges. A növényi alapanyagok elérhetősége általában regionális és szezonális, összetételük nem konstans, számos környezeti tényező (pl. talaj, időjárás) befolyásolja. Szükség van alacsony költségű, fenntartható ipari előállítási eljárások optimalizálására.

Ezen problémák megoldására, a felhasználhatóság biztonságának és célzott voltának javítása elérhetőnek tűnik a mai modern multiomikai eljárásoknak, a rendkívül fejlett és gyorsan fejlődő analitikai technikáknak köszönhetően. Az új, elérhető digitális technikák, mint például a molekuláris dokkolás, kvantitatív szerkezet-hatás összefüggés-vizsgálatok, a gépi tanulás és a hálózati farmakológia, olyan új eszközök, amelyek lehetővé teszik a természetes anyagok lehetséges hatásainak és célpontjainak minél pontosabb feltárását.

Összességében a növényi hatóanyagok alkalmazása jelentős ígéretet hordoz a modern gyógyászatban, de potenciáljuk még nem teljes mértékben kiaknázott. Ugyanakkor további kutatások szükségesek ahhoz, hogy felhasználásuk tudományosan megalapozott, pontosan szabályozott és biztonságos legyen.

Köszönetnyilvánítás

Kutatásainkat az Agrár-biotechnológia és precíziós nemesítés az élelmiszerbiztonságért Nemzeti Laboratórium projekt (RRF-2.3.1-21-2022-00007), valamint az MTA Vendégkutatói Programja (VK-10/2023) támogatta.

Irodalom

- ADABI, S. G., TORSHIZI, M. A. K., RAEI, H., & MARNEWICK, J. L. (2023). Effect of dietary n-3 fatty acid and rooibos (*Aspalathus linearis*) supplementation on semen quality, sperm fatty acids and reproductive performance of aged male broiler breeders. *Journal of Animal Physiology and Animal Nutrition*, 107(1), 248–261. <https://doi.org/10.1111/jpn.13705>
- ALI, O., & SZABÓ, A. (2024). Fumonisin distorts the cellular membrane lipid profile: A mechanistic insight. *Toxicology*, 506, 153860. <https://doi.org/10.1016/j.tox.2024.153860>
- BRAMATI, L., AQUILANO, F., & PIETTA, P. (2003). Unfermented rooibos tea: quantitative characterization of flavonoids by HPLC-UV and determination of the total antioxidant activity. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 51(25), 7472–7474. <https://doi.org/10.1021/jf0347721>
- CAO, C., XIAN, R., LIN, F., LI, XINTING, LI, XIAOWEN, QIANG, F., & LI, XINRAN. (2022). Fumonisin B1 induces hepatotoxicity in mice through the activation of oxidative stress, apoptosis and fibrosis. *Chemosphere*, 296, 133910. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.133910>
- CHIHOMVU, P., GANESAN, A., GIBBONS, S., WOOLLARD, K., & HAYES, M. A. (2024). Phytochemicals in drug discovery—A confluence of tradition and innovation. *International Journal of Molecular Sciences*, 25(16), 8792. <https://doi.org/10.3390/ijms25168792>
- DOCRAT, T. F., ABDUL, N. S., & MARNEWICK, J. L. (2022). The Phytotherapeutic potential of commercial South African medicinal plants: current knowledge and future prospects. *Physical Sciences Reviews*, 9(1), <https://doi.org/10.1515/psr-2022-0136>
- ICHIYAMA, K., TAI, A., & YAMAMOTO, I. (2007). Augmentation of antigen-specific antibody production and IL-10 generation with a fraction from Rooibos (*Aspalathus linearis*) tea. *Bioscience, Biotechnology and Biochemistry*, 71(2), 598–602. <https://doi.org/10.1271/bbb.60536>
- INANAMI, O., ASANUMA, T., INUKAI, JIN, T., SHIMOKAWA, S., KASAI, N., NAKANO, M., SATO, F., & KUWABARA, M. (1995). The suppression of age-related accumulation of lipid peroxides in rat brain by administration of Rooibos tea (*Aspalathus linearis*). *Neuroscience Letters*, 196(1–2), 85–88. [https://doi.org/10.1016/0304-3940\(95\)11853-o](https://doi.org/10.1016/0304-3940(95)11853-o)
- KREUZ, S., JOUBERT, E., WALDMANN, K.-H., & TERNES, W. (2008). Aspalathin, a flavonoid in *Aspalathus linearis* (rooibos), is absorbed by pig intestine as a C-glycoside. *Nutrition Research*, 28(10), 690–701. <https://doi.org/10.1016/j.nutres.2008.08.002>

- KUMAR, A., NIRMAL, P., KUMAR, M., JOSE, A., TOMER, V., OZ, E., PROESTOS, C., ZENG, M., ELOBEID, T., SNEHA, K., & OZ, F. (2023). Major Phytochemicals: Recent Advances in Health Benefits and Extraction Method. *Molecules*, 28(2), 887. <https://doi.org/10.3390/molecules28020887>
- KUNISHIRO, K., TAI, A., & YAMAMOTO, I. (2001). Effects of rooibos tea extract on antigen-specific antibody production and cytokine generation in vitro and in vivo. *Bioscience, Biotechnology and Biochemistry*, 65(10), 2137–2145. <https://doi.org/10.1271/bbb.65.2137>
- MAARMAN G. J. (2019). Cardioprotection conferred by rooibos (*Aspalathus linearis*): A mini review to highlight a potential mechanism of action. *South African Journal of Science*, 115(7/8), Art. #4653, 1–4. <https://doi.org/10.17159/sajs.2019/4653>
- MANOGARAN, P., BEERAKA, N. M., PAULRAJ, R. S., SATHIYACHANDRAN, P., & THAMMAIAPPA, M. (2023). Impediment of cancer by dietary plantderived alkaloids through oxidative stress: Implications of PI3K/AKT pathway in apoptosis, autophagy, and ferroptosis. *Current Topics in Medical Chemistry*, 23(10), 860–877. <https://doi.org/10.2174/1568026623666230111154537>
- MARNEWICK, J. L. (2014). Antioxidant Properties of Rooibos (*Aspalathus linearis*) – In Vitro and in Vivo Evidence. In: Laher, I. (ed.) *Systems Biology of Free Radicals and Antioxidants*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, https://doi.org/10.1007/978-3-642-30018-9_164
- MARNEWICK, J. L., BATENBURG, W., SWART, P., JOUBERT, E., SWANEVELDER, S., & GELDERBLOM, W. C. A. (2004). Ex vivo modulation of chemical-induced mutagenesis by subcellular liver fractions of rats treated with rooibos (*Aspalathus linearis*) tea, honeybush (*Cyclopia intermedia*) tea, as well as green and black (*Camellia sinensis*) teas. *Mutation Research*, 558(1–2), 145–154. <https://doi.org/10.1016/j.mrgentox.2003.12.003>
- MARNEWICK, J. L., JOUBERT, E., JOSEPH, S., SWANEVELDER, S., SWART, P., & GELDERBLOM, W. C. A. (2005). Inhibition of tumour promotion in mouse skin by extracts of rooibos (*Aspalathus linearis*) and honeybush (*Cyclopia intermedia*) unique South African herbal teas. *Cancer Letters*, 224(2), 193–202. <https://doi.org/10.1016/j.canlet.2004.11.014>
- MARNEWICK, J. L., JOUBERT, E., SWART, P., VAN DER WESTHUIZEN, F. H., & GELDERBLOM, W. C. (2003). Modulation of hepatic drug metabolizing enzymes and oxidative status by rooibos (*Aspalathus linearis*) and honeybush (*Cyclopia intermedia*), green and black (*Camellia sinensis*) teas in rats. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 51(27), 8113–8119. <https://doi.org/10.1021/jf0344643>
- MARNEWICK, J. L., RAUTENBACH, F., VENTER, I., NEETHLING, H., BLACKHURST, D. M., WOLMARANS, P., & MACHARIA, M. (2011). Effects of rooibos (*Aspalathus linearis*) on oxidative stress and biochemical parameters in adults at risk for cardiovascular disease. *Journal of Ethnopharmacology*, 133(1), 46–52. <https://doi.org/10.1016/j.jep.2010.08.061>
- MARNEWICK, J. L., VAN DER WESTHUIZEN, F. H., JOUBERT, E., SWANEVELDER, S., SWART, P., & GELDERBLOM, W. C. (2009). Chemoprotective properties of rooibos (*Aspalathus linearis*), honeybush (*Cyclopia intermedia*) herbal and green and black (*Camellia sinensis*) teas against cancer promotion induced by fumonisin B1 in rat liver. *Food and Chemical Toxicology*, 47(1), 220–229. <https://doi.org/10.1016/j.fct.2008.11.004>
- McKAY, D. L., & BLUMBERG, J. B. (2007). A review of the bioactivity of South African herbal teas: Rooibos (*Aspalathus linearis*) and honeybush (*Cyclopia intermedia*). *Phytotherapy Research*, 21(1), 1–16. <https://doi.org/10.1002/ptr.1992>
- MERRILL, A. H., SULLARDS, M. C., WANG, E., VOSS, K. A., & RILEY, R. T. (2001). Sphingolipid metabolism: roles in signal transduction and disruption by fumonisins. *Environmental Health Perspectives*, 109, 283–289. <https://doi.org/10.1289/ehp.01109s2283>
- MUMTAZ, A., ASHFAQ, U. A., UL QAMAR, M. T., ANWAR, F., GULZAR, F., ALI, M. A., SAARI, N., & PERVEZ, M. T. (2016). MPD3: A useful medicinal plants database for drug designing. *Natural Product Research*, 31(11), 1228–1236. <https://doi.org/10.1080/14786419.2016.1233409>
- NIKOLOVA, V., PETROVA, S., PETKOVA, V., PAVLOVA, A., & GEORGIEVA, T. (2007). Antioxidant effects of rooibos tea on workers occupationally exposed to lead (abstract). *Toxicology Letters*, 172, 120–121. <https://doi.org/10.1016/j.toxlet.2007.05.320>
- PATEL, O., MULLER, C., JOUBERT, E., LOUW, J., ROSENKRANZ, B., & AWORTWE, C. (2016). Inhibitory Interactions of *Aspalathus linearis* (Rooibos) Extracts and Compounds, Aspalathin and Z-2-(β-d-Glucopyranosyloxy)-3-phenylpropenoic Acid, on Cytochromes Metabolizing Hypoglycemic and Hypolipidemic Drugs. *Molecules*, 21(11), 1515. <https://doi.org/10.3390/molecules21111515>
- PATEL, O., MULLER, C. J. F., JOUBERT, E., ROSENKRANZ, B., TAYLOR, M. J. C., LOUW, J., & AWORTWE, C. (2019). Pharmacokinetic interaction of green rooibos extract with atorvastatin and metformin in rats. *Frontiers in Pharmacology*, 10, 1243. <https://doi.org/10.3389/fphar.2019.01243>
- SCHULZ, H., JOUBERT, E., & SCHUTZE, W. (2003). Quantification of quality parameters for reliable evaluation of green rooibos (*Aspalathus linearis*). *European Food Research and Technology*, 216, 539–543. <https://doi.org/10.1007/s00217-003-0696-1>

- SPEER, K. E., MARNEWICK, J. L., DAVIES, S. E. H., TURNER, M., NIKOLOVA, V. L., DAY, R., MCKUNE, A. J., & NAUMOVSKI, N. (2024). The effect of rooibos tea (*Aspalathus linearis*) consumption on human health outcomes: A systematic literature review. *Beverages*, 10(4), 113. <https://doi.org/10.3390/beverages10040113>
- TÓTH, M., & PAPP, N. (2014). Ethnopharmacological data from Túrterebes, Szatmár county (Etnofarmakológiai adatok a Szatmár-megyei Túrterebesről). *Journal of History of Culture, Science and Medicine* (Művelődés-, Tudomány- és Orvostörténeti Folyóirat), 5(9), 117–129. <https://doi.org/10.17107/KH.2014.9.117-129>
- ULICH, A. O., GREKSAK, M., VANCOV, A. O., ZLATOS, L., GALBAVY, S., BOZEK, P., & NAKANO, M. (2003). Hepatoprotective effect of rooibos tea (*Aspalathus linearis*) on CCl₄-induced liver damage in rats. *Physiological Research*, 52, 461–466. <https://doi.org/10.33549/physiolres.930340>
- ZHANG, X., CHEN, J., MA, X., TANG, X., TAN, B., LIAO, P., YAO, K., & JIANG, Q. (2025). Mycotoxins in feed: Hazards, toxicology, and plant extract-based remedies. *Metabolites*, 15(4), 219. <https://doi.org/10.3390/metabo15040219>
- ZHANG, X., & WU, C. (2022). In Silico, In Vitro, and In Vivo Evaluation of the Developmental Toxicity, Estrogenic Activity, and Mutagenicity of Four Natural Phenolic Flavonoids at Low Exposure Levels. *ACS Omega*, 7(6), 4757–4768. <https://doi.org/10.1021/acsomega.1c04239>

Plant extracts (phytochemicals) as potential solutions to mycotoxin-induced challenges

Melinda Kovács ^{1,2}, András Szabó ^{1,2}, Ali Omeralfaroug ¹, Sheik Abdul Naeem ³,
Taskeen Fathima Docrat ⁴, Jeanine L. Marnewick ⁴

¹ Agrobiotechnology and Precision Breeding for Food Security National Laboratory, Department of Physiology and Animal Health, Institute of Physiology and Nutrition, Hungarian University of Agriculture and Life Sciences, Kaposvár, Hungary

² HUN-REN-MATE Mycotoxins in the Food Chain Research Group, Kaposvár, Hungary

³ Department of Biochemistry, Stellenbosch University, Stellenbosch, South Africa

⁴ Applied Microbial and Health Biotechnology Institute, Cape Peninsula University of Technology (CPUT), Bellville, South Africa

Summary

*The primary means of avoiding contamination with mycotoxins is to prevent the infection of plants by molds. In order to prevent the harmful effects of exposure to toxin concentrations below the regulated maximum limits in feed and food, it is essential to enhance the resistance of animal and human organisms (e.g., antioxidant protection and immune responsiveness). Plant-derived substances—such as essential oils, spices, medicinal herbs, and crude extracts—represent promising alternatives for the discovery of biofungicides and nutraceuticals aimed at mitigating mold infections and related mycotoxicoses. The pharmacological effects of plant extracts can be advantageously applied to reduce the damage caused by mycotoxins in livestock. Biologically active compounds may decrease the bioavailability of mycotoxins, mitigate the oxidative stress induced by mycotoxins due to their antioxidant capacity, and protect intestinal integrity by strengthening the gut barrier. They also may regulate the production of inflammatory cytokines and influence apoptosis. This chapter summarizes the beneficial effects of South African rooibos (*Aspalathus linearis*) and presents our own experimental results demonstrating the hepatoprotective effect of rooibos polyphenols in rats exposed to high levels of fumonisin B₁.*

Kulcsszavak: mycotoxins, phytochemicals, antioxidants, rooibos, fumonisin B₁