

AZ AGRÁRINNOVÁCIÓ TARTÓPILLÉREI

PRECÍZIÓ
DIGITALIZÁCIÓ
FENNTARTHATÓSÁG

Szerkesztette:
Balázs Ervin, Sági László, Rádi Feríz



Martonvásár, 2024

RRF-2.3.1-21-2022-00007

Tartalomjegyzék

Előszó	3
Talaj- és vízgazdálkodás a mezőgazdaságban	4
A talaj vízgazdálkodása.....	7
A talaj kémiája.....	15
A talaj biológiája.....	21
Digitális talajtérképezés.....	28
Az élővilág sokszínűségének megnyilvánulása az agráriumban	37
Növényi génbankok.....	38
Génszerkesztés	45
Mikroorganizmusok biotechnológiai, precíziós átalakítása.....	49
Növényi eredetű élelmiszerek minőségének javítása génszerkesztéssel	54
Vírusrezisztens gazdasági növények létrehozása genomszerkesztés segítségével.....	57
Gombarezisztencia kialakítása genomszerkesztéssel gazdasági növényekben.....	60
Genomszerkesztés az egészségesebb, ellenállóképesebb és termékenyebb haszonállatok létrehozása érdekében.....	63
A génszerkesztés szabályozása (jelen és jövő) az EU-ban, kitekintés a világra.....	71
A precíziós gazdálkodás műszaki-informatikai feltételrendszere	76
Fenntarthatóság az agráriumban	77
Elvárások és a műszaki-informatikai lehetőségek.....	78
Adagyűjtő robotok	85
Drónok a mezőgazdaságban	88
A precíziós, helyspecifikus technológiák műszaki feltételrendszere.....	90
Precíziós növénytermesztés és ökológiai gazdálkodás	96
Precíziós állattenyésztés.....	104
Élelmiszerminőség	110
Termelési láncok – One Health	122
Az innováció a fenntartható fejlődés záloga	128
Csökkenő innováció és gazdasági kilátások Magyarországon.....	128
Románia példája az IT szektorban.....	134
Agrárinnováció Magyarországon.....	138
Az innováció középpontjában a körforgásos és biomassza alapú gazdaság	150
Záró gondolatok	166
Szerzők	169

Agrárinnovációnk jövőjének pillérei: Precízió, Digitalizáció és Fenntarthatóság

Napjaink mezőgazdasága eddig soha nem látott kihívásokkal néz szembe. A szinte exponenciálisan növekedő népesség és a klímaváltozás szélsőséges időjárási eseményei következtében átalakuló környezet számos agrotechnikai változtatást követel. Földünk egyre csökkenő mezőgazdaságilag művelhető területe olyan fontos feladatok megoldását igényli, mint a természetes ökoszisztémákkal harmóniában végzett nagyüzemi gazdálkodás támogatását.

Az „Agrárbiotechnológia és precíziós nemesítés az élelmiszerbiztonságért” Nemzeti Laboratórium kutatásai elősegítik az egészséges élelmiszer előállítását. A biológiai alapok javítása révén megoldásokat javasol a klímaválság hatásainak mérséklésére és a környezetterhelés csökkentésére az „Egy Egészség” (a növény, az állat, az ember és a környezet egészségének egysége) szemléletében. Ennek szellemében foglaljuk össze azt a négy fontos tartóoszlopot, amelyek az agrárinnováció meghatározó tényezői.

Tanulmányunk az Innovatív Mezőgazdasági Biotechnológiai Egyesület aktív támogatásával kerül nyilvánosságra és terjesztésre. Célunk, hogy a társadalom széles rétegei naprakész tudományos elemzést ismerhessenek meg a témában.

Az egészséges talaj- és vízgazdálkodás alapozza meg a biológiai sokféleség kiaknázását biztosító innováció második elemét, hiszen a napjainkban egyre nagyobb szerepet kapó genomszerkesztés eredményei és annak tudatos felhasználása az új mikrobák, növények és állatok tárházát biztosítják az emberiség számára. Ehhez természetesen korszerű és konstruktív szabályozásra is szükség van. Az egyre inkább terjedő informatikai eredmények, a műszaki fejlesztések és a digitalizáció bevonulása hétköznapijainkba mind a precíziós mezőgazdaság jelentőségét húzzák alá. Végezetül a környezetünk megóvását prioritásként figyelembe vevő körforgásos gazdálkodás modellje az agrárinnováció negyedik meghatározó tartóoszlopa.

A jelen tanulmánykötetben összegzett innovációt csak egy megújuló agrárközép- és -felsőoktatás képes hatékonyan támogatni. Ehhez az embert próbáló feladathoz akkor tudunk felnőni, ha az oktatásban e szemléleten alapuló tananyagokat és ahhoz rendelt szakirányokat indítanak egyetemeink. Nem szabad elfelejtenünk arról sem, hogy a képzések alapjait megalapozó tudományágakat magas szinten mutassuk be az agrárium iránt érdeklődőknek, felvázolva később az erős alapon álló specializálódás lehetőségeit. A sikeres innováció követelménye, hogy magasan kiművelt emberfők álljanak rendelkezésünkre napjaink megújuló agrárgazdaságához.

Balázs Ervin

Talaj- és vízgazdálkodás a mezőgazdaságban

Fodor Nándor

A mezőgazdaság – definíciója szerint – a föld megművelése élelmiszerek, takarmányok, rostanyagok, gyógyszeripari alapanyagok és egyéb, az emberi élet fenntartásához szükséges termékek előállítására szolgál. E folyamat középpontjában a talaj áll - egy dinamikus, élő és természetes egység, amely a növények növekedésének elsődleges közegeként szolgál. A talaj szerepét és fontosságát a mezőgazdaságban nem lehet eléggé hangsúlyozni, mivel közvetlenül és közvetve is befolyásolja az élelmezésbiztonságot, a gazdasági jólétet és a környezet egészségét. A talajkészlet Magyarország nemzeti vagyonának több mint egyötödét alkotja. A talaj a levegővel és a vízzel egyenértékű környezeti elemünk, amely azonban lényegesen eltér abban, hogy helyhez kötött, ezért a szennyezések felhalmozódnak benne, így a káros összetevők a mezőgazdasági tevékenységeken keresztül az élelmiszerekbe is beépülhetnek.

Az ENSZ Élelmezésügyi és Mezőgazdasági Szervezete (FAO), a Talajok Nemzetközi Éve (2015) alkalmából a talajok legfontosabb szerepeit tizenegy kategóriába sorolta, melyek majd mindegyike közvetve vagy közvetlenül kapcsolódik valamilyen mezőgazdasági tevékenységhez.

A talaj élelmezésbiztonságunk gerince. Jó minőségű talaj nélkül a gazdák nem lennének képesek ellátni minket élelmiszerekkel, takarmánnyal, üzemanyaggal és más alapanyagokkal. Ez a tevékenység hazánkban több mint 200.000 embernek biztosít közvetlenül munkát és megélhetést.

Ahogy egy ház alapja is kritikus fontosságú, az egészséges talaj a növények számára is alapként szolgál, mivel támogatja a növények gyökereit, és a növények növekedése érdekében függőlegesen tartja őket. A talaj a növények éléskamrájaként működik, tárolja és körforgásban tartja az alapvető tápanyagokat és ásványi anyagokat, amelyekre a növényeknek szükségük van. Szerkezetének köszönhetően, a talaj oxigént biztosít a növények gyökerei számára, valamint a talajban élő egyéb élőlények számára. A talaj vizet is tárol a növények számára. Magyarország szántóterületeinek talajai összesen több mint öt Balatonnak megfelelő vízmennyiséget képesek tárolni. Ráadásul ez a kapacitás a szervesanyag-tartalom 1%-os növelésével hektáronként 100.000 literrel tovább növelhető. A megfelelő talajállapot megakadályozza a pangó víz növénykárosító hatását és csökkenti a talajerózió kockázatát, így a talaj fontos szerepet játszhat a felszíni vizek szabályozásában és az árvízvédelemben.

A talaj hasznos mikrobák élőhelye. Ezek az organizmusok a növények rejtőzködő segítői. Egymást kölcsönösen támogató kapcsolatot alakítanak ki a növényekkel: fontos szerepet játszanak a szerves anyagok lebontásában, a nitrogén megkötésében, a tápanyagok hozzáférhetőségének fokozásában és

a talajban terjedő betegségek elfojtásában. A kutatások szerint egyetlen teáskanál egészséges talajban akár 1 milliárd baktérium is lehet. A talaj sok más élőlénynek is otthont ad, például rovaroknak, amelyek a talajban rakják le és keltetik ki petéiket. A földgiliszták és más nagyobb méretű talajlakók hozzájárulnak a levegőztetéshez, a szervesanyag-lebomláshoz és a talaj ökoszisztémájának általános egészségéhez.

A talaj kiszűri a felszíni vizekből a lebegő üledéket, bizonyos vegyi anyagokat és más szennyeződéseket. Ezért a felszín alatti víz az egyik legtisztább vízforrás. Az olyan természetes folyamatok, mint a talaj abszorpciója, a kémiai szűrés és a tápanyagkörforgás révén a talajok hozzájárulnak a lakosság tiszta vízzel történő ellátásához. Ami pedig az emberi egészséget illeti, a fertőzések leküzdésére szedett antibiotikumok szinte mindegyikét a talajban élő mikrobák segítségével állítják elő.

A talaj segít szabályozni a Föld hőmérsékletét, egészséges állapotában pedig enyhíti a szélsőséges időjárási események hatásait és segít megvédeni a bolygót az éghajlatváltozás ellen. Becslések szerint a talaj a világ fosszilis tüzelőanyag-kibocsátásának mintegy 25 százalékát nyeli el, minden évben.

Agrárvonatkozású szerepein túl a talaj számos más, társadalmilag meghatározó funkcióval bír: szilárd hulladék tárolására helyet biztosít, építkezési alapanyagként szolgál, középületeink, útjaink és házaink alapja. A talajféleség valójában még az épületek tervezését és annak kivitelezését is befolyásolja. A talaj magában hordozza a Föld és civilizációnk történelmét, a dinoszauruszoktól kezdve letűnt korokból megmaradt leletekig, mint egy óriási régészeti raktár. A régészek szerint ezek a maradványok arról is árulkodnak, hogy számos fejlett civilizáció, mint például a maják vagy a harappanok azért buktak el, mert rosszul bántak a talajjal.

A talaj nem, vagy csak feltételesen megújuló, illetve megújítható természeti erőforrás. Egy centiméternyi talaj kialakulásához több száz vagy akár több ezer év is szükséges. Ez az egy centiméter talaj azonban egyetlen év alatt elveszhet az erózió miatt. A talaj megújulásának alapvető feltétele az olyan földhasználat megteremtése, amely egyensúlyban van a térség természeti adottságaival. Ehhez nélkülözhetetlen a terület talajtani adottságainak, a talaj állapotának, a terület jellemzőinek felmérése és olyan térinformatikai adatbázisok, illetve talajtérképek létrehozása, amelyek aktuális, objektív, megbízható és több szinten felhasználható adatokat biztosítanak. Ahhoz, hogy jó minőségű talajaink legyenek, illetve maradjanak, a talaj által biztosított ökoszisztéma-szolgáltatásokon túl, tisztában kell lennünk a természetes és természetett növények talajökológiai igényeivel is.

A mezőgazdasági műveletek kimeríthetik, de gazdagíthatják is a talajt. A talajvédelmi módszerek, mint például a takarónövények termesztése, a talajművelés nélküli gazdálkodás és az faterlepítés megvédi a talajt az eróziótól, javítja a szerkezetét és növelik a szervesanyag-tartalmát és ezen keresztül a talaj termékenységét. A talaj termékenységének és egészségének közvetlen gazdasági hatásai vannak. A termékeny talajok magasabb termés hozamot eredményeznek; csökkentik a külső ráfordítás mértékét,

például a műtrágya mennyiségét. Másfelől a leromlott talajok növelhetik a termelési költségeket és csökkenthetik a gazdálkodás jövedelmezőségét.

Hatalmas jelentősége ellenére a talaj az iparosodás, az urbanizáció és a nem fenntartható mezőgazdasági gyakorlatok miatt számos fenyegetéssel néz szembe. A talajerózió, a szikesedés, a tömörödés és a szerves anyag elvesztése széles körben elterjedt problémák. Alapvető fontosságú, hogy felhívjuk a figyelmet a talaj értékére, és csak olyan fenntartható mezőgazdasági gyakorlatokat támogassunk, amelyek megőrzik és javítják ezt a pótolhatatlan és nélkülözhetetlen erőforrást. A talaj védelme és ápolása nemcsak a gazdálkodók, hanem minden egyes ember felelőssége, a jelenlegi és a jövőbeli generációk megélhetése érdekében.

A következő négy fejezet részletesebb betekintés nyújt a fentiekben csak megemlített témakörökbe, és a jobb megértés révén segítség lehet az agrárvonatkozású talaj- és vízgazdálkodás hatékonyságának javításában annak érdekében, hogy elkerüljük a maják sorsát.

A talaj vízgazdálkodása

A víz jelentősége a magyar mezőgazdaságban

Rajkai Kálmán

A mezőgazdaság élelmiszer előállításra a felszíni és a felszín alatti friss „kék vizet” használja, öntözésre pedig többnyire a felszíni vizeket. A szántóföldi növénytermesztés a csapadék nélküli időszakokban a talajban tárolt „zöldvizet” hasznosítja. A talaj vízkapacitásának és vízraktározásának jelentősége, hogy a talaj a szárazföldi növények fő vízforrása, annak ellenére, hogy azt a csapadék tölti fel. Magyarországon a növénytermesztés 1996 és 2005 között a zöld vízből átlagosan a kék víz százszorosát hasznosította évente (Mekonnen és Hoekstra, 2011; Hoekstra és Mekonnen, 2012). A tisztított szennyvíz (szürke víz) öntözésre egyre jelentősebb mértékben hasznosított. Mértéke Magyarországon 1996 és 2005 között a kék víz hatszorosa volt. A felszín alatti vizek az összes hazai mezőgazdasági vízfelhasználás 10,8%-át adták 2013-ban. A mezőgazdaság vízfelhasználása a klímaváltozással, a csapadékmentes időszakok hosszával, a megemelkedő léghőmérséklettel együtt feltehetően növekedni fog, amit a növekvő élelmiszertermelési igény önmagában is növel majd. A teljes lakossági-, ipari-, és mezőgazdasági vízigénynél nagyobb mennyiségű vízre van szükség a párolgás növeléséhez, hogy az éghajlati víz- és energiamérleg kedvezőtlen változásai fékezhetőek legyenek. A légköri vízigény és a felszíni (természeti és társadalmi) vízigények együttes kezelésére rendszerszemléletű, integrált légkör-vízkör modell kidolgozása szükséges. Ennek érdekében a víz szerepéről alkotott nézeteket is meg kellene újítani, hogy a passzív párolgáshoz képest az ökológiailag szabályozott és hasznosított aktív párolgotatás mennyiségét és arányát növeljük (Báder, 2022). Ugyanakkor a mezőgazdasági és az erdészeti ágazatokban a szemléletváltó, integrált megközelítéssel a hidrológiai ciklus stabilitása és visszaállítása a párolgotatási képesség növelésével támogatható. A csapadékvíz visszatartását is számos hazai kezdeményezés külterületen és belterületeken is sürgeti (Bíró, 2017). A szárazföldek vízellátásának biztonsága nemcsak a beérkező nedvességtől függ, hanem abban lényeges szerepet játszik a kis vízkör működése, a növényborítás, a csapadék és a párolgás helyben történő újrahasonosítása (Kravcik et al., 2007; Spracklen et al., 2018).

A légkörzés és a hidrológiai ciklus összekapcsolódó folyamatai két alrendszer feltételeznek:

- Fizikai alrendszer: feladata közvetlenül a fizikai kényszerek alapján működő energiacsere. A légkörzéssel szállít energiát (advekción). A csapadék párolgásával történő energiaközvetítés, amely kiterjed a vízfelszínre, a talajra és a beépített területekre. Működése a fizikai külső kényszereket követi.

- Ökológiai alrendszer: a külső kényszerek hatását módosítja, csillapítja és/vagy késlelteti. Működése aktív, mert szabályozza az energiacserét. Tárolja a talajban az energia közvetítéshez szükségessé váló vizet és azt megfelelő időben teszi elérhetővé a növényzet gyökerein keresztüli felszívás és a lombzaton keresztüli párologtatás számára. A külső hatások ingadozását ezáltal mérsékli.

A két alrendszer az energiák kiegyenlítését együtt végzi. Az ökológiai alrendszer Magyarországon átlagosan mintegy 29 km³ vizet párologtat évente, míg a fizikai alrendszer 19 km³-t.

A Föld bioszférája a vizet lényegében magában hordozza (Margulis, 2000). A bioszféra így a víz felhasználója, raktározója és saját életfeltételeinek a szabályozója. A talaj által alkalmassá vált a csapadék egy részének tárolására, tartalékolására, a növényzet pedig a talajban eltárolt víz késleltetett felhasználására (Ács et al., 2017). A szárazföldi környezet fenntarthatóságát pedig a párologás biztosítja (Eiseltová et al., 2012).

Az aktív és passzív alrendszer megkülönböztetésével és az elpárolgó víz útjának a két alrendszeren keresztüli követésével a természeti környezet jelentősége válik érthetőbbé. A növényzetnek nem csupán életfeltétele a víz, hanem „működésével” szabályozója is a víz körforgásának. Ha a szabályozó folyamatba kevesebb csapadék jut a szabályozóképeség gyengül, ha viszont az aktív alrendszerbe több csapadék jut, a szabályozóképeség javul. A passzív párologáshoz képest az ökológiailag szabályozott és az éghajlathoz igazított aktív párologtatást kell növelni. Ez azonban nem csak vízügyi feladat. A mezőgazdaságban ezt a talajtakaró és talajjavító gazdálkodás szolgálja a vízbeszívargás, a csapadékmentes időszakokban pedig a párologtatás növelésével. Az erdőgazdálkodásban a folyamatos erdőborítással járó üzemmódok kiterjesztése, a városi területeken pedig a zöld fal, a zöld tető- és az esőkertek elterjesztése járulhat hozzá a szabályozott és fenntartható vízkörforgáshoz.

Alapfogalmak a talaj vízgazdálkodásában

Rajkai Kálmán

Talaj vízgazdálkodása alatt a talaj vízgazdálkodási tulajdonságait értjük (Várallyay, 2002). Általában pedig az adott talajszelvény átlagos vízforgalmát a talajtípus, az évtípus és a földhasználat szerint. A nemzetközi talajfizika a talajhidrológiai jellemzőit, azaz két vízgazdálkodási paramétert, a víztartó- (pF-görbe) és a vízvezető képességet (Ks érték és $k(\Psi)$ függvény) értjük a talaj vízgazdálkodása (soil water management) alatt.

A talaj vízgazdálkodási paramétereinek meghatározási módszere 1978-tól szabványban rögzített (MSz-08 0205-78). A mérési módszerek nemzetközi elfogadottsága ma is érvényes, bár a mérőeszközök változtak. A víztartó képesség mért értékeire 1978 óta a van Genuchten-féle 3 ill. 4-paraméteres függvény használatos (van Genuchten, 1980).

A talajvíztartó képességet meghatározott szívó-, ill. nyomóerővel szemben a talajban visszatartott nedvesség mennyisége jelenti. Három, a gyakorlatban is jelentős értékét tartják kiemelten fontosnak: 1. a víztelített talaj nedvességtartalmát (θ_s V%); 2. a szabadföldi vízkapacitás értékét (VKsz, V%), azaz a 33 kPa szívásnál megtartott vízmennyiséget; és 3. az 1500 kPa szívóerővel szemben megtartott nedvességtartalmat, azaz a hervadáspontról (HP, V%). Fontos növény-vízhasznosítási jellemző a VKsz és a HP különbségeként számított növények általi, a talajrétegből felvehető nedvesség mennyisége (FNT, mm).

A talajok fizikai féleségétől, humusz- vagy szervesanyag-tartalmától függően a talaj víztartó- és vízvezető képessége változik. A homoktalajok kis felvehető víztartalmúak (80 mm/m) és nagy vagy igen nagy vízvezető képességűek (> 100 cm/nap). Az agyag talajok szintén viszonylag kis felvehető víztartalmúak (120 mm/m) és kis vagy nagyon kis vízvezető képességűek (< 1 cm/nap). A vályog fizikai féleségű talajok vízforgalmi (hidrofizikai) jellemzői mezőgazdálkodási szempontból a leginkább kedvezőek (150-250 mm/m vízkészlet, 10-100 cm/nap vízvezető képesség).

A talajok hidrofizikai tulajdonságai a talajműveléssel és a földhasználattal javíthatók. Kedvezően hat a talajt nem tömörítő és a talajszerkezetet nem rontó művelés, valamint a talajok szervesanyag-tartalmának növelése, pl. tarlómaradványok és komposzt bekeverésével.

A talaj nedvességforgalma javítható a talajfelszín szalmatakarásával is, ami a talajpárolgást csökkenti és a csapadék egy részét megkötözi, amivel a vízbeszivárgást a talajba segíti és a felszíni elfolyást mérsékli.

A talaj vízgazdálkodásának mérése

Rajkai Kálmán

A hazai talajtani gyakorlatban a talajok laboratóriumi víztartó- és vízvezető képessége mérésének módszerei szabványba foglaltak (MSZ-08.0205:1978). Ezek a mérési módszerek megfelelnek a nemzetközi szabványoknak, azonban a terepi mintavételek és a víztartó képesség 6-10 hét időtartama miatt azok munka-, idő- és költségigényesek. A talaj víztartó képességét 10 vízpotenciál értéken mért nedvességtartalommal határozzák meg. A mért értékekre illesztett folyamatos függvényekkel a nem mért vízpotenciálok nedvességtartalma is megadható. Víztartó képesség függvényként általánosan a van Genuchten-függvény (VG-függvény) 3- vagy 4-paraméteres változata használt. A 4-paraméteres VG-függvény a következő:

$$\theta = \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + (\alpha \cdot h)^n]^{1-1/n}} + \theta_r$$

ahol: θ_s telítési nedvességtartalom (V%); θ_r reziduális/maradék nedvességtartalom (V%);

α és n illesztési paraméterek.

A paraméterek értéke nemlineáris illesztéssel határozható meg. A terepen mért talajnedvesség-tartalom lehetőséget ad a talaj vízpotenciálja és a növény vízellátása közelítő becslésére. A talaj vízpotenciálját a terepi helyszínen tenziométerrel határozzák meg az ún. tenziométer tartományban, azaz 0–80 kPa között. A hervadásponthoz viszonyított vízpotenciál ennél azonban lényegesen nagyobb (1500 kPa).

A víztelített talaj vízvezető képességét (K_s) a terepen 3 ismétlésben vett, ún. eredeti szerkezetű, bolygatatlan talajmintákon laboratóriumban határozzák meg (MSZ-08.0205:1978). Fontos, hogy a párhuzamosan mért K_s -értékeknek nem a matematikai, hanem a geometriai átlagát kell számítani, mert a talajok vízvezető képesség eloszlása közelítőleg log-normális.

A talaj hidrológiai jellemzőinek így a víztartó-, és a vízvezető képességnek a meghatározása kiemelt fontosságú a talaj nedvességforgalma leírásában vagy annak modellek általi előrejelzésében.

Terepen a telítésközeli vízvezető képesség mérésének több lehetősége is elérhető. A korábbi, a mintegy harminc éve a korong infiltróméter (disk infiltrómeter) módszer, amely kb. 20 cm átmérőjű a talajra terített nagy vízáteresztő képességű vezető rétegen a beállított magasságú vízrétegen átbuborékolatott levegő által a talajba engedett víz sebességének mérését jelenti (Rajkai et al., 1993; Fodor et al., 2011). Az ezt követő, ún. Minidisk infiltróméter módszer kb. 5 cm átmérőjű és általában 2 cm vízrétegen átbuborékolatott levegő általi beszívárgásból megállapított vezetőképesség-érték. Utóbbi mérési módszer előnye a területi és az időbeli ismételhetőség. A módszerek korlátja, hogy a mérhető terület nagysága a néhány négyzetmétertől néhány 10 m²-ig terjed, illetve évente néhány időpontú mérésig.

A talajmintákon meghatározott hidrológiai jellemzők azonban a terület egy – egy pontjára, a talajszelvénynek pedig egy – egy rétegére vonatkoznak. Tekintettel a talajok területi és rétegzettségi változatosságára, a mért pontértékek területi kiterjesztése szükséges. A geostatistikai módszerű víztartó képesség és egyéb talajjellemzők területi kiterjesztését a Herceghalmi Állami Gazdaság 1500 hektáros területén 425 m-es négyzetrács rácspontjaiban 441 mintát gyűjtve végezték el (Farkas et al., 2008). A talaj fizikai féleségét, térfogattömegét, humusztartalmát és víztartó képességét határozták meg a terület mintázásával. A felsorolt talajjellemzők pontértékeinek térbeli interpolációjával (krigeléssel) készítettek térképeket. A térképek pontosságát 153 további mintavétellel és a rácstávolság 212 m-re felezésével, majd a terület hatodán 126 mintavétellel és a rácstávolság 106 m-re csökkentésével, valamint 30 véletlen módon (random) vett talajmintával ellenőrizték. Megállapítható, hogy mind a talajjellemzők, mind a talaj víztartó képesség területi mintázatának geostatistikai módszerű térképezése nagyon munkaigényes. A térképezendő területen a mintavételi helyek célzott kiválasztására és a szükséges mintaszám meghatározására a távérzékelési módszerek adnak lehetőséget.

A talaj vízgazdálkodásának jellemzése távérzékeléssel

Rajkai Kálmán

Műholdakon elhelyezett érzékelőkkel, azaz távérzékeléssel olyan fizikai mennyiségek mérhetők, amikből a földfelszín állapotára, valamint az ott lejátszódó folyamatokra lehet következtetni. Hidrológiai és mezőgazdasági alkalmazásokhoz a leggyakrabban mért fizikai mennyiségek az elektromágneses sugárzás paraméterei (Vekerdy, 2020). A vízzel kapcsolatos paraméterek meghatározásában három fontos, a többi objektumétól eltérő fizikai tulajdonság játszik szerepet: 1. a víz sugárzáselnyelése; 2. a víz hőkapacitása; és 3. a vízpárolgás latens hője, ami szerepet játszik a felszín energiamérlegében. A víz jelenléte vagy hiánya befolyásolja a növénytakaró állapotát. A vízzel kapcsolatos optikai távérzékelési mérésekben a növényzetet ezért lehet alkalmazni. A távérzékelés céltárgyainak a mikrohullámokra gyakorolt hatását a felszín dielektromos állandója és a felszín geometriája határozza meg. A dielektromos állandó az anyag molekuláinak dipól karakterisztikájától függ. Mivel a földfelszín szilárd anyagainak a relatív dielektromos állandója mintegy hússzor kisebb (kb. 3-5), mint a vízé (kb. 80). A víz jelenléte ezért jelentősen megváltoztatja a felszín mikrohullámú sugárzásra mutatott tulajdonságait. A sugárzás beesési szöge nemcsak a terep általános lejtőviszonyainak és a műhold geometriai helyzetének a függvénye, de a helyi beesési szöget a felszín érdessége is jelentősen befolyásolja. Aktív mikrohullámú mérések esetén a visszaszórt energia térbeli- és irány szerinti eloszlása a felszín érdessége és a lejtőviszonyok hatására alakul ki. Passzív mikrohullámú mérésekben a felszín fényességi hőmérséklete a felszín eredő dielektromos állandójától függ. A távérzékelés során a hidrológiai paraméterek jellemzéséhez egy vagy több összetett jelből nyernek ki adatokat (Vekerdy, 2020).

A mezőgazdasági vízgazdálkodás egyik fontos célja a párolgási viszonyok optimalizálása, azaz a növények számára annyi víz biztosítása, ami a transzspirációt, és ezen keresztül a fotoszintézist optimális szinten tartja. A vízhiányos agrohidrológiai helyzetek az aktuális párolgás csökkenésével járnak, aminek részletes területi monitorozására kizárólag a távérzékelési módszerek használhatók. A növények a gyökerükön keresztül felveszik és a sztómákon keresztül párologtatják el a vizet. Ezzel jelentősen befolyásolják a felszínközeli talaj- és légrétegek energetikai- és vízegyensúlyát. Távérzékelte elektromágneses sugárzással a felszíni energiaviszonyok mérhetők, és az azokat befolyásoló tényezőkre is lehet következtetni (Nagy és Tamás, 2013). Az evapotranszspiráció közvetlenül nem mérhető, azonban az energiamérleggel a latens hő számszerűsíthető, és az elpárologtatott víz mennyisége meghatározható (van der Tol & Parodi, 2012). A mezőgazdaságban az aktuális párolgás területi monitorozása kiemelt fontosságú. Ugyanis az tájékoztat a növényzet vízellátásának aktuális szintjéről, annak az optimálistól eltéréséről negatív irányban (aszály), vagy

pozitív irányban (túlnedvesedés/belvíz). A távérzékelte elektromos sugárzás mérésével az öntözési adatok és az aktuális párolgási térképek alapján az öntözés hatékonysága is számszerűsíthető (Vekerdy, 2020).

A talajnedvesség és a párolgás összefüggése igen összetett. Erősen függ a talaj típusától, a növény fajtájától és szárazságtűrő képességétől. Nagy területen, a mezőgazdasági vízgazdálkodási gyakorlatban az egyik legnagyobb bizonytalanságú paraméter (Teuling et al., 2006). A távérzékeléssel mérhető felszíni talajnedvesség csak közelítő információt ad a növény vízellátottságáról, mivel a gyökérszóna mélységéig nem lehet a felszíni talajnedvességből nagy pontossággal következtetést levonni. Ennek ellenére, mély talajvíz esetén, ahol a gyökérszóna benedvesedése csak felülről, beszivárgással történik, a felszíni talajnedvesség jó és közelítő információt nyújt a növény vízellátottságáról.

A talaj vízgazdálkodásának korszerű mérése és becslése

Szabó Brigitta

A talaj vízgazdálkodási tulajdonságok ismerete nélkülözhetetlen a fenntartható, klímatudatos gazdálkodás tervezéshez. A talajra érkező csapadék, illetve öntözővíz mozgásának, talajban történő tározódásának ismeretéhez a talaj aktuális nedvességtartalmának, víztartó- és vízvezető képességének ismerete szükséges. A természeti kívánt növény kiválasztásához, az öntözéstervezéshez, a belvív megjelenésének előrejelzéséhez, a többletvíz kezeléséhez, a talajerózióval szembeni beavatkozás tervezéséhez, a talajművelési munkálatok és tápanyag-kijuttatás időzítéséhez, vízmegtartó intézkedések kiválasztásához és elhelyezéséhez ismernünk kell a talaj hidrológiai tulajdonságait. A talaj vízgazdálkodási tulajdonságok közül leggyakrabban a talaj víztartó és vízvezető képességét mérjük.

A talaj víztartó képességét a maximális vízkapacitás (pF 0), a szabadföldi vízkapacitás (pF 2,5) és a holtvíztartalom (pF 4,2) értékekkel jellemezzük, valamint a víztartó képességet a teljes szívóerő tartományban leíró függvények paramétereivel – például van Genuchten függvényével (van Genuchten, 1980) –, mellyel jellemezhető a talaj víztartó képesség görbéje a telített nedvességi állapottól a növények számára már nem hasznosítható holtvíz tartalomig.

A talaj víztartó képességének mérése olyan eszközzel történik (MSZ-08.0205:1978), amely a telítettől a száraz talajnedvességi állapotig, adott szívóerő értékeken nyújt információt a talaj nedvességtartalmáról. Ezáltal megismerhető, hogy adott nedvességtartalom mekkora erővel kötődik a talajszemcsékhez, a talajban található nedvesség még hozzáférhető-e a természetű növény számára.

A talaj vízvezető képessége függ a talajnedvesség potenciáltól, azonban ennek mérése nagyon időigényes, ezért laboratóriumban a vízzel telített talaj vízvezető képességét, helyszínen pedig a telített állapothoz közeli

vízvezető képességet határozzuk meg (Rajkai, 2004; Fodor et al., 2009). A telített vízvezető képességet a talaj várható vízvezető képességétől függően állandó, illetve csökkenő víznyomásos módszerrel határozzuk meg (Várallyay, 1974). A helyszíni vizsgálat beszivárgásmérő készülékkel történik, ami a talaj mátrix vezetőképességéről nyújt információt, tehát a makropórusok nélküli vízvezetésről (Rajkai, 2004).

A fent említett mérési módszerek időigényesek és költségesek, ezért nagyobb területekre a talaj vízgazdálkodási tulajdonságait becslések segítségével, ún. pedotraszfer függvényekkel számítjuk könnyen mérhető talajtulajdonságok alapján (Tóth, 2010). A könnyen mérhető, illetve már rendelkezésre álló talajtulajdonságok közül azokat vesszük figyelembe a becsléshez, amik befolyásolják a talaj porozitását: a talaj textúráját jellemző agyag-, por- és homoktartalmat, térfogattömeget, humusztartalmat, pH-t és mésztartalmat. A talaj vízgazdálkodási tulajdonságok térbeli kiterjesztéséhez egyéb környezeti információkat is bevonunk bemenő adatként, például a terület domborzati, meteorológiai, vegetációs paramétereit és a talajképző kőzetet (Szabó et al., 2019). A becslő algoritmusok kidolgozását olyan gépi tanulási módszerekkel végezzük, amik jellemezni tudják a talaj vízgazdálkodási tulajdonságok és a rendelkezésre álló környezeti információk közti nem-lineáris összetett kapcsolatokat. A szakértők számára jelenleg a Rajkai-féle becslő egyenletek (Rajkai, 1987; Rajkai és Kabos, 1999), valamint az európai talajokon kidolgozott, web alkalmazásba beépített (<https://ptfinterface.rissac.hu>) becslő algoritmusok (Szabó et al., 2021) érhetők el a talaj vízgazdálkodási tulajdonságok számításához. Országos lefedettséggel hazánk talaj vízgazdálkodási tulajdonságairól egyelőre a 3D európai talajhidrológiai térképek (EU-SoilHydroGrids) nyújtanak kvantitatív információt 250 m felbontásban, hat talajrétegre, 2 m mélységig (Tóth et al., 2017). A hazai adatokon alapuló talajhidrológiai térképek készítése folyamatban van a Balaton vízgyűjtőre kidolgozott térképezési módszertan (Szabó et al., 2019) továbbfejlesztésével.

A talajnedvesség nagyléptékű mérése

Rajkai Kálmán

A talajnedvesség a vízkörforgás egyik kulcsváltozója. Értékét hagyományosan pontszerű helyszíni mérésekkel határozzák meg. A pontmérések hátránya, hogy területi kiterjesztésüket a nagy térbeli változékonyság nehezíti (Dente et al., 2011; Vekerdy, 2020). A helyszíni mérések előnye a mérés vertikális kiterjedésének és sűrűségének a nedvességmérések célja és technikai lehetőségeinek megválasztásában van (Vekerdy, 2020).

Erre példa a 23,5 ha méretű mezőgazdasági táblán kb. 20 km/óra sebességgel vontatott Veris-3100 készülék által 5×5 m-es hálóban felvett látszólagos elektromos vezetőképesség (ECa) adatok alapján a talaj 0-30 cm-es rétege nedvességtartalom térképének elkészítése (Nagy et al., 2013). A

területen pontszerűen vett talajnedvesség minták és az ECa adatok R^2 értéke 0,87. A Veris-3100 készülék területen mozgatása természetesen a precíziós mezőgazdaság helymeghatározási és irányítási eszközrendszerét is használta. A területen felvett 10.791 db ECa adat statisztikai feldolgozása és térképi információvá alakítása korszerű geo-informatikai ismeretekkel és programok használatával lehetséges. Szerzők megállapítása szerint a Veris-3100 mérőeszköz alkalmas nagy területen a nedvességtartalom területi eloszlásának gyors felvételére.

A talajnedvesség-tartalom meghatározására a távérzékelésben az optikai (látható és infravörös) sávban a víz két tulajdonságát használják fel: 1. a rövidebb hullámhosszokon a nagy energiaelnyelését (Nagy et al., 2014); 2. a termális sávban a talaj egyéb alkotórészeinél nagyobb hőkapacitását (Schmugge, 1978). A Föld teljes felszínének talajnedvesség állapotát jelenleg 35-60 km-es felbontású felvételekkel 2–3 naponta passzívan érzékelő SMOS és SMAP radiométerek rögzítik. Az aktív mikrohullámú szóródás-mérők (ERS Scatterometer, ASCAT) adatain alapuló globális felszíni nedvesség adatok is hasonló térbeli felbontásúak (25-50 km).

A mezőgazdasági vízgazdálkodás agrohidrologiai modellezése

Rajkai Kálmán

Az agrohidrologia a hidrológiai, mezőgazdasági, földhasználati folyamatokat és azok kölcsönhatásait vizsgálja (Petrasovits, 1988). Az agrohidrologiai modellek a víz térbeli eloszlását és időbeli változását írják le a talaj-növény-atmoszféra rendszerben. Az agrohidrologiai modellek két fő típusát különböztetik meg: 1. kaszkád modellek a vízmozgást a talaj sorba kötött víztartó rétegeivel írják le, pl. CropWat (Smith, 1992); 2. a Richards egyenlet numerikus megoldásán alapuló modellek, pl. a HYDRUS (Šimůnek et al., 2013). A modellek használatához a talaj hidrológiai jellemzőire, így a víztartóképesség-függvény paraméter értékeire és a telítési vízvezető képesség értékére van szükség (Vekerdy, 2020). A növényzet pedig jó indikátora a gyökérzóna vízellátottságának, mivel a vízstressz negatívan befolyásolja a növényi életműködést, így a klorofillaktivitást (ld. NDVI). Ezek a modellek többek között intelligens öntözésvezérlő rendszerekben is felhasználhatók.

A talaj kémiája

Rékási Márk

A talaj szénforgalma

A talajok a Föld legnagyobb szénraktárai közé tartoznak. Globálisan több szerves szenet tartalmaznak, mint a bioszféra és az atmoszféra együttesen. Mindemellett a talajok átlagos szervesanyag-tartalma mindössze néhány százalék. A talajokban lévő szerves szén körülbelül harmada az erdőtalajokban, harmada gyepterületeken, a maradék vizenyős területeken, mezőgazdasági területeken található. A talaj szénciklusa egyszerűsítve a következő folyamatokból áll: i) a talajba bekerül a növények által a légkör CO₂-tartalmából előállított biomassza; ii) ez az anyag a talajban fizikai kémiai és biológiai degradáción megy keresztül, egyszerűbb szerves molekulákká alakul, melyek a talajban különböző időtartamon keresztül raktározódnak; iii) majd a teljes mineralizációt követően a légkörbe távoznak CO₂-ként. Természetes ökoszisztémákban egy adott helyen a talaj szervesanyag-mennyisége állandónak tekinthető, egyensúlyi értéket mutat. A talajba adott idő alatt annyi szerves maradvány jut be, mint amennyit a benne élő mikroszervezetek elbontanak.

A szerves anyagok lebomlása a talajban

A talaj szerves anyagát alapvetően élő és élettelen csoportba lehet sorolni. Az élő részt a talaj mikrobaközössége, az élő növényi gyökerek, illetve a mezofauna alkotja. A talaj élettelen szerves anyagait elsősorban elhalt állati és növényi maradványok, illetve ezek bomlástermékei képezik. A növényi maradványok, azon belül is a föld feletti növényi biomassza a gyökérbiomasszához képest nagyobb súllyal játszik szerepet a talaj szerves szénkészletének utánpótlásában az állati eredetű szerves anyaghoz képest. A talaj szerves anyaga alapvetően a lebomlás különböző szakaszán álló szerves fragmentumokból és a talaj mikrobaközössége által előállított szerves molekulákból áll. A talaj szerves anyagai dinamikus fizikai, kémiai és biológiai átalakuláson mennek át, melynek során a szerves anyagok energiaszintje a talajban fokozatosan csökken, és egyre egyszerűbb szerkezetű molekulákká alakulnak át. A talajba jutó szerves molekulák, mint cellulóz, lignin, fehérjék vegyületenként változó intenzitású lebomlási folyamatok révén alakulnak egyszerűbb molekulákká. Az egyes vegyületek lebomlási sebessége részben a talaj mikrobaközössége nagyságának és fajösszetételének a függvénye. A diverzitás csökkenésével a talajlégzés intenzitása jelentősen csökken. A lebomlás sebességét a szerves anyag kémiai összetétele is nagyban befolyásolja. Ezek közül kiemelhető a C/N arány. A nagy N-tartalmú anyagok

általában gyorsabban bomlanak le. Ugyanakkor a talaj mikrobaközösségének összetétele függvényében ez a nagy szórást mutathat. A mikrobaközösség aktivitása a környezeti feltételekhez kötött. 30 °C körüli hőmérsékleten, megfelelő nedvességtartalom és semleges közeli pH érték mellett a legintenzívebbek a lebomlási folyamatok.

A lebomlás során a szerves molekulák bomlástermékei egyre több poláris funkciós csoportot tartalmaznak, melyek révén a talaj szervesetlen alkotóival, ásványi szemcséivel egyre szorosabban kapcsolódnak. Ezzel védetté válhatnak a további mikrobiális lebomlással szemben, egyúttal fontos szerepet játszanak a talajaggregátumok, így a talajszerkezet kialakításában is. A korábbi elmélet szerint a lebomlott szerves anyagok a humuszosodás révén összetett, bonyolult szerkezetű szerves molekulákká állnak össze, melyek tartósan megmaradnak a talajban, kedvezővé téve azok termékenységét. Egy újabb elmélet szerint a talajban lévő szerves anyag a lebomlási folyamat különböző stádiumában álló szerves molekulákat jelent. A humuszosodás, a humuszmolekulák talajban való jelenléte megdőlni látszik, mivel ezeket az komplex, gyűrűs szerkezeteket és elágazó szénláncú, nagy molekulású humuszanyagokat a modern analitikai eljárásokkal nem sikerült kimutatni, azok valószínűleg a korábban alkalmazott kivonási eljárások termékei. Ugyanakkor a talaj szerves anyagának pontos összetétele annak eredettől, lebontási folyamatoktól függő heterogenitása miatt nem határozható meg.

A talaj szerves anyaga

A talaj szerves anyaga több szempontból is csoportosítható. A talaj szerves széntartalmát a mikrobiális bontásnak való kitettség szempontjából két csoportra lehet osztani. A talajba került, csak fizikailag aprózódott növényi maradványok, illetve a talajoldatban oldott szerves molekulák a legkitettebbek a biológiai degradációnak. Ezzel szemben a lebomlás bizonyos fokán álló, a talajaggregátumok belsejében megkötött, védett szerves anyag a talajban tartósabban megmarad. A védettség ebben az esetben alapvetően az aggregátumok belsejének oxigénszegény környezetére vezethető vissza.

Funkció szerint három csoportot különböztethetünk meg. A *labilis*, vagy *aktív szerves anyag* rövid, néhány naptól néhány évig terjedő felezési idővel jellemezhető. Ide tartoznak a még élő, vagy még nem degradálódott elhalt szerves anyagok, melyek nagy energiatartalommal bírnak. Fizikailag nem védettek a lebomlással szemben így részt vesznek a talaj kémiai és biológiai folyamataiban. Általában a talajfelszínen, vagy a felszínhez közel helyezkednek el, a talajszerkezet kialakításában szerepük nem tartós. Az *átmeneti szerves anyag* felezési ideje néhány évtől néhány évtizedig terjed. Ez a frakció már fizikailag védett a degradációs folyamatokkal szemben. A *tartós, vagy stabil szerves anyag* felezési ideje évtizedektől évszázadokig terjedhet. Ezek az anyagok kémiai tulajdonságaik vagy fizikai védettségük, ásványi összetevőkkel való kapcsolatuk miatt hosszú ideig maradhatnak meg

a talajban. Az egyensúlyi állapotban lévő talajban a különböző szervesanyag-frakciók aránya állandó.

A szerves anyag mennyisége

A talaj szerves anyag mennyiségének csökkenése az egyik kiemelt degradációs folyamat az erózió, a szennyezés, tömörödés, szikesedés, talajkivonás és a talaj biológiai sokféleségének csökkenése mellett. Korábbi elméletek szerint talajok szerves széntartalmának van egy feltételezhető küszöbértéke, mely alatt kedvezőtlen szerkezeti és tápanyag-szolgáltató képességbeli változások indulhatnak el, amely a termékenység csökkenéséhez, a termelő biomassza mérséklődéséhez vezethet. Kísérleti úton azonban ilyen szervesanyag-koncentráció küszöb nem állítható fel. Általában a talaj textúrájának finomodásával a talaj szerves anyag tartalma is nő. Ez alapján viszont feltehető egy talajtípushoz köthető optimális érték, vagy értéktartomány jelenléte.

A talaj szerves anyagának funkciói

A talajok szerves anyagának számos funkciója van. Biztosítja a talaj szerkezetét, környezeti pufferkapacitását, víztartóképeségét, hőgazdálkodását, biológiai aktivitását és tápanyagot szolgáltat a növények számára. Alapvetően ezek három csoportba sorolhatók, fizikai, kémiai és biológiai funkciókra bonthatók. Fizikai funkciók: a szerves anyag meghatározza a talaj színét, így hatással van a hőgazdálkodására; stabil szerkezetet és vízgazdálkodást biztosít: a talajalkotók közül a legnagyobb vízmegtartó képességgel rendelkeznek, így meghatározóak a kiegyenlített vízháztartásban; az ásványi összetevők közötti ragasztóanyagként működik, az ásványi összetevőkkel agyag-humusz komplexumot hoz létre, amely az alapja a stabil porózus talajszerkezetnek; lehetővé teszi a gázcserét. Kémiai funkciók: kelátkötések révén lehetővé teszi a mikrotápanyagok megtartását és növényi felvételét; sav-bázis pufferképessége révén állandó pH érték alakul ki; növeli a talaj kationcsere-képességét. Biológiai funkciók: mineralizációja révén tápanyagforrásként működnek elsősorban a nitrogén tekintetében; befolyásolja a növényvédő szerek felvehetőségét és hatékonyságát.

Globális léptékben a talaj, ahogy már említésre került, igen jelentős szénraktár és a mezőgazdasági tevékenység következtében ebből a szempontból kihasználatlan kapacitással rendelkezik. Ezeknek a szénraktáraknak a lassú feltöltődése miatt azonban a talajoknak csak mérsékelt szerepe lehet a légköri CO₂-koncentráció növekedésének mérséklésében a következő évszázadban.

A talaj szerves anyagának mennyisége és annak változása

Az utóbbi két évszázadban az emberi populáció körülbelül nyolcszorosára nőtt. Ezzel párhuzamosan az emberiség egyre drasztikusabban módosította a globális szén ciklust. Az egyik változás közvetlenül a talajokhoz, a talajhasználatához köthető, mely a talajok szénkészletének csökkenéséhez, ezzel párhuzamosan a légköri CO₂ koncentráció növekedéséhez vezetett. Egy ökoszisztémában a raktározott szén mennyisége a fotoszintézissel asszimilált szén és a heterotróf szervezetek által végzett lebontó tevékenység során felszabaduló szén mennyiségének egyenlege. Ha a fotoszintézis felülmúlja a lebontást a szén felhalmozódik, ellenkező esetben csökken. Egy terület művelésbe vonásával két módon is csökken a talaj széntartalma. Egyrészt a talaj forgatása következtében fellépő oxidatív folyamatok miatt csökken a széntartalom, másrészt a termesztett növények biomasszájának területről való eltávolítása miatt a talajba kerülő szén mennyisége is csökken. A műveléssel az eredeti széntartalomnak akár 20-30 %-a is rövid idő alatt eltűnhet a talajból.

Mivel a talajok gázkibocsátása hőmérsékletfüggő, a globális felmelegedés pozitív visszacsatolásként tovább növeli a talajok üvegházhatású gázainak kibocsátását, tovább súlyosbítva a problémát.

A talajművelés megzavarja a talaj biodinamikáját, közvetlenül, de rövidtávon növeli meg a talaj CO₂-kibocsátását. A talajlevegőben található CO₂ a talajlégzés eredménye. Ez magába foglalja a gyökérlégzést, a szerves anyagok mikrobiális lebontását, a talajfauna légzését, illetve a szerves anyag kémiai oxidációját. A légkörbe jutó CO₂ mennyisége a talajművelés mélységével mutat arányosságot: a kultivátorozás, tárcsázás, vagy szántás közül ez utóbbi után jelentkezik a legnagyobb emisszió. Az így létrejövő szénvesztés azonban a körülményektől függően változhat. Csapadékmentes időszakban a talaj bolygatását követően, néhány nappal a kibocsátási értékek az eredeti, művelés előtti szintre térhetnek vissza. Nedvesebb időszakban azonban a művelt terület akár egy hónappal a beavatkozás után is nagyobb kibocsátást mutathat, mint a nem bolygatott talaj. A művelés miatt a talajlevegőben a CO₂-koncentráció csökkenésének ugyanakkor pozitív hozadéka, hogy elősegíti a növények víz- és tápanyagfelvételét. Végül soron azonban az intenzív műveléssel a talajba juttatott oxigén a talaj lebontó szervezetei révén a szerves anyagok intenzívebb lebomlását, a talaj széntartalmának csökkenését, degradációját hozza magával, ami végül egy a természetes széntároló kapacitáshoz képest alacsonyabb egyensúlyi széntartalom kialakulásához vezet. Az így kialakult állapot azonban több eszközzel is javítható.

A mezőgazdasági tevékenységek következtében csökkent szerves széntartalmú, degradált talajok javíthatók, a kedvezőtlen folyamatok megfordíthatók. A két egymással akár kombinálható ilyen eljárás a szerves anyagok valamilyen formában történő talajba juttatása, illetve a szántás helyett a talajkímélő művelési módra való átállás.

Közvetlen szervesanyag-visszapótlás

A talaj szerves szénkészletének legkézenfekvőbb növelési módja, ha nagy szerves anyag tartalmú anyagot juttatunk a talajba. Ilyenek lehetnek a szerves trágyaszerek, vagy a bioszén is.

A mezőgazdaságban használható szerves eredetű trágyaszereket három fő csoportba lehet sorolni: állati eredetűek, növényi származékok és biohulladékok. Az állattartás során keletkező szerves trágyák a tápanyag-utánpótlás legrégebben használt anyagai, felhasználásuk évezredes múltra tekint vissza. A tápanyagokat állatfajtól, tartástechnológiától és kezelési módtól függően eltérő mennyiségben és formában tartalmazzák. Az állatok almozásához felhasznált anyagok nagymértékben befolyásolják összetételüket és kezelhetőségüket. A növényi származékok leginkább a különböző komposztok előállításánál kerülnek felhasználásra. Biohulladéknak tekinthető minden olyan szerves hulladék, amely aerob vagy anaerob úton biológiailag lebomlik vagy lebontható. Az ilyen anyagok közül jelentőségénél fogva kiemelhetők a szennyvíziszapok, melyek nagy szerves anyag és növényi tápanyagtartalommal bírnak, ugyanakkor potenciálisan toxikus mikroszennyező tartalmukra is tekintettel kell lenni hasznosításukkor. Az ilyen iszapok talajjavító hatása rossz vízgazdálkodású, alacsony kolloidtartalmú talajokon mutatkozik meg leginkább.

A szerves trágyaszerek fontos csoportja a különböző szerves anyagokból készült komposztok. A komposztok alapanyagai lehetnek olyan hulladékok, amelyek már önmagukban is szerves trágyaként használhatók (pl. szennyvíziszap, istállótrágya stb.), de más szerves anyagok vagy kezelt termékek (pl. bioszén) is felhasználhatók a készítésükkor. A komposztáláshoz felhasználható alapanyagok tulajdonságai már önmagukban is igen nagy szórást mutathatnak (pl. szennyvíziszapok változatossága), ennél fogva a komposzt keverékek összeállításával, a komposztálás technikai paramétereinek széles spektrumával számolva igen változatos tulajdonságokkal rendelkező anyagcsoportról beszélhetünk.

A talajok szerves szénkészletének szerves trágyaszerek alkalmazása révén való növelését tartamkísérletek bizonyítják. Tartamhatás tekintetében a szerves anyagok oxigénszegény környezetben történő pirolízisével előállított bioszén kiemelkedik a többi anyag közül, mivel akár több száz évig is jelen van a talajban, javítva annak víz- és tápanyagkötő képességét, biológiai aktivitását.

Talajmegújító mezőgazdaság

A talajok kialakulása egy adott területen több száz, vagy akár ezer évig is eltart, melynek során a helyi klimatikus, domborzati és földtani viszonyoknak megfelelő termőréteg alakul ki. Ennek részeként a talajban létrejön az arra jellemző szervesanyag-készlet. Ez a szervesanyag-készlet bármilyen beavatkozás, bolygatás hatására csökkenésnek indulhat. A természetes állapotú talajok művelésbe vonásával néhány év alatt akár több 10%-kal is csökkenhet a szervesszén-tartalom. Talajkímélő vagy okszerű talajműveléssel ez azonban mérsékelhető, vagy a már a mezőgazdasági tevékenység során degradálódott talaj javítható, szervesanyag-tartalma helyreállítható.

A talajmegújító művelés öt pilléren nyugszik, melyek a csökkentett talajművelés, változatos növényborítás, talajtakarás, mindig élő gyökerek és az állattartás integrálása. A direktvetéssel és a talajbolygatás minimalizálásával (min-till, vagy no-till) csökken a mineralizáció révén történő szerves anyag veszteség. A megfelelő vetésforgóval, állandóan jelen lévő élő gyökerekkel, a talajtakarással kiegyenlítettebb vízháztartással a talajélet intenzifikálható. Végeredményként a talaj szénmegtartó képessége az ilyen művelés révén jobban kihasználhatóvá válik.

Összességében az okszerű, kevésbé intenzív talajműveléssel, megfelelő vetésforgóval, takarónövények alkalmazásával a talaj szervesanyag-készlete már néhány évtizedes távlatban kimutathatóan növelhető. Egyúttal a megnövekedett szénraktározás révén az üvegházhatású gázok légköri koncentrációja is csökkenthető és ezzel hosszú időtávlatban a globális felmelegedés is mérsékelhető.

A talaj biológiája

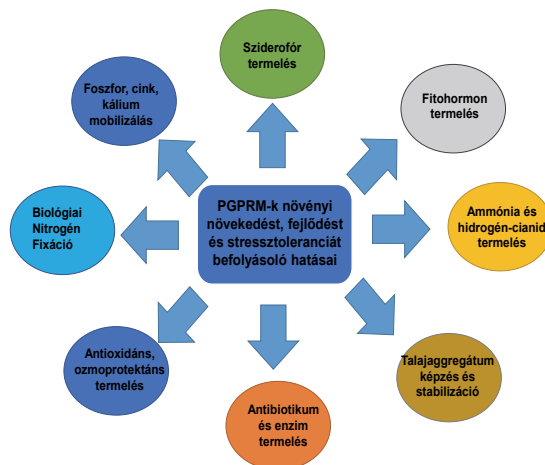
Takács Tünde

Az emberek életminőségét meghatározó tényezők, a megfelelő minőségű és mennyiségű élelmiszer, a tiszta ivóvíz és a kellemes környezet nem elválaszthatók a talajok állapotától. Az észszerű és fenntartható talajhasználat célja a talajok mennyiségének, minőségének és a talajok funkcióinak megőrzése. A talajok termékenységének, minőségének vagy éppen egészségének alakulásában a talajok mikrobiális közösségeinek sokfélesége (biológiai diverzitás), funkcionalitása és kölcsönhatásaik szerepe vitathatatlan. A szárazföldi életközösségekben a talaj mikrobiális diverzitásának jelentős hatása van a talajfunkciókra, az ökoszisztémák szolgáltatásaira, a tápanyagok körforgására, a szerveszén-raktárak mennyiségi és minőségi alakulására, a növények termelékenységére, a víz és levegő tisztaságára.

Egy teáskanálnyi szántó föld több mikroorganizmust tartalmaz, mint bolygónk népeisége. Egyetlen gramm talajban akár 109 baktérium és archea, vírusok billiói, protisták tízezrei és több száz méter gombafonal található. A talajok mikrobiomjának sokfélesége biztosítja azt a genetikai repertoárt, amely a változó környezeti feltételekhez funkcióvesztés nélkül alkalmazkodni képes és kölcsönhatásainak hálózatán keresztül fenntartja a rendszer stabilitását (reziliencia és redundancia).

A talaj mikrobiom szerkezete nagymértékben változik mind a különböző ökoszisztémákban, mind pedig a különböző típusú talajokban, növényzettől és klimatikus viszonyoktól függően. A talajok mikroorganizmus közösségét, sokféleség és biomassza tekintetében is alapvetően a baktériumok és a gombák uralják. A rizoszféra egy gyökerek által kiválasztott gyökérváladékok által befolyásolt, mikrobiológiailag aktív keskeny zóna, talajrész, amelyben a mikroorganizmusok sokfélesége, gyakorisága és aktivitása sokkal nagyobb, mint a gyökerektől távoli talajban. A rizoszféra mikrobiális közösségében egyaránt jelen vannak a kártékony mikroszervezetek, és a növényi növekedést segítő, szabadon élő vagy szimbionta mikroorganizmusok. A növények gyökérkörnyezetében élő mikroorganizmusok a növények táplálkozására, a tápanyagok felvételére, a gyökerek növekedésére és morfológiájára, tápanyagfelvételi mechanizmusára, továbbá a növények különböző élettani és fejlődési folyamataira gyakorolt direkt és indirekt hatásuk révén képesek befolyásolni. A gyökerek környezetében élő mikroorganizmusok és növények között számos, eltérő biológiai jellegű együttműködési forma alakult ki koevolúciós fejlődésük, együttélésük során. A növényi növekedést segítő mikroorganizmusok (Plant Growth Promoting Microbes /PGPRMs/) elsősorban a baktériumok (PGPR, Plant Growth Promoting Rhizobacteria)

vagy gombák (PGPF, Plant Growth Promoting Fungi) közé tartoznak. A PGPR és PGPF mikroorganizmusok számos módon javíthatják a növények vitalitását: (1) növelik a növények tápanyag-ellátását (biotrágya, biofertilizer hatás), (2-3) enyhíthetik a növénybetegségek tüneteit és csökkenthetik a kórokozók fertőzésének mértékét (bioprotektáns, biokontroll, „biopeszticid” hatás), (4) növekedést szabályozó hormonok vagy vitaminok termelése révén a növényi élettani folyamatokat szabályozzák (biostimulátor hatás), illetve (5) serkenthetik az úgynevezett szintetikus anyagok lebontását is (rhizomediátor hatás) (1. ábra). Mindezekon túl a növényi növekedést segítő mikroorganizmusok az élettelen környezeti tényezők (abiotikus stresszfaktorok) ellen is védelmet nyújthatnak, mint például a szárazság, a sóstressz, a magas hőmérséklet, az áradás, az oxidatív stressz vagy az ultrabolya sugárzás. A PGPR és PGPF aktivitás gyakran kiegészül hormonok termelésével, vagy a kórokozó patogének elleni elnyomó képességgel (szupresszióval). A szűken vett PGPR baktérium fajok leginkább a következő nemzetségek tagjai közül kerülnek ki: Acinetobacter, Agrobacterium, Alcaligenes, Arthrobacter, Azoarcus, Azospirillum, Azotobacter, Bacillus, Burkholderia, Enterobacter, Erwinia, Flavobacterium, Herbaspirillum, Klebsiella, Micrococcus, Paenibacillus, Pseudomonas, Rhizobium, Serratia és Thiobacillus. Talán a legismertebb, és mikrobiális oltóanyagként is a legrégebben alkalmazott PGPR mikroorganizmusok a biológiai nitrogénfixációra képes Rhizobiumok. A Rhizobiumok szimbiózisban élnek a hüvelyes (Fabales) növények rendjébe tartozó növényekkel, és képesek a levegő nitrogénjének biológiai úton történő megkötésére és szerves anyagba történő asszimilációjára (1. kép). A talajok nitrogénellátásában a szimbióta nitrogénkötők mellett fontos szerepe van a szabadonélő nitrogénkötő baktériumoknak is. Ezek elsősorban az Azotobacter, Azospirillum, Bacillus, Klebsiella nemzetségek fajai közül kerülnek ki.



1. ábra: A növényi növekedést segítő mikroorganizmusok (PGPRM-k) mechanizmusai

A mezőgazdasági gyakorlatban a nitrogénkötő baktériumok mellett széles körben elterjedt a foszformobilizáló baktériumok és gombák (Phosphate Solubilizing Microorganisms) oltóanyagként történő felhasználása is. A növények számára nehezen hozzáférhető foszforformákat mobilizáló mikroorganizmusokat a Bacillus, Pseudomonas, Aspergillus és Paenibacillus nemzetségek tagjai között találunk. Növénytáplálás szempontjából a legfontosabb tápelemek a foszfor és a nitrogén mellett a kálium. A foszformobilizáló képességgel rendelkező mikrobák többsége a kálium feltárására is képesek.

A PGPF szervezetek elsősorban olyan talajlakó fonalas gombák, amelyek jótékony hatással vannak a növényekre anélkül, hogy bármilyen betegséget okoznának. A Trichoderma, Aspergillus vagy Penicillium nemzetségek fajai és egyes a növények szöveteiben élő endofitonok is PGPF hatással bírhatnak. A növényi növekedést serkentő mikroorganizmusok nagy csoportját teszik ki egyes mikorrhiza gombák. A mikorrhiza (gombás gyökér) amely egy több morfológiai típusba sorolható, szimbiotikus kapcsolaton alapuló funkcionális csoportot takar. Jelen munkában, a növényközösségekben betöltött fontos szerepe és a növény-növekedésre gyakorolt sokrétű hatása szempontjából részletességgel a mikorrhiza gombák legősibb és legelterjedtebb típusát, az arbuskuláris mikorrhiza (AM) gombákat ismertetjük.

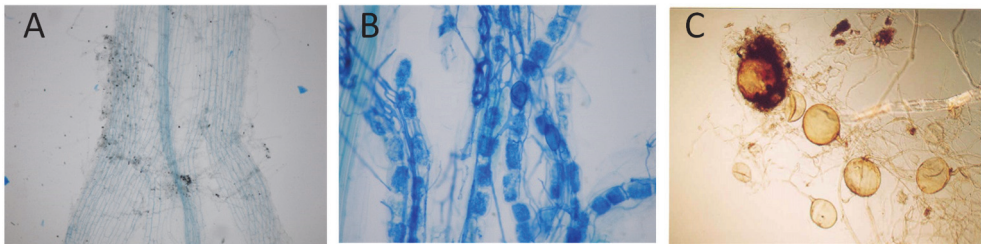


1. kép: Rhizobium törzsekkel (R1 és R2) történő oltás hatása szója gazdanövény gyökérzetének növekedésére (szerző felvétele)

Az AM gombák a leggyakoribb talajgombák közé tartoznak. Az AM gombák és növények kapcsolata egy nagyon ősi, körülbelül 460 millió éves kapcsolat, ami egyidős lehet a szárazföldi növények kialakulásával. Egyes elméletek szerint az AM gombák tették lehetővé a fejletlen gyökérrzel rendelkező növények számára a szárazföld meghódítását.

Az arbuskuláris mikorrhiza gombák endomikorrhiza gombák. A gomba képletei behatolnak a növényi sejtekbe és intracelluláris képleteket hoznak létre (2. kép). Ivartalan szaporítóképleteiket, spóráikat elsősorban a talajt behálózó hifafonalakon (extraradikális) képezik. Az AM gombák és gazdanövényeik kapcsolata nagyon szoros. Az AM gomba obligát biotróf, a növény nélkül nem szaporodik, nem tud növekedni és a spórák sem csíráznak ki a gazdanövény jelenléte nélkül. Az AM gombák klonális szervezetek, osztatlan (szeptum nélküli) hifáikban (cönocitikus) nagyon sok és sokféle sejtmag található. Ez az a tulajdonság, ami lehetővé teszi számukra, azt a genetikai és funkcionális változatosságot, ami miatt néhány száz AM gombafaj tud együtt élni a szárazföldön élő sok ezer növényfajjal. A szárazföldi növények 80-85%-a él együtt AM gombákkal, az AM gombák nem fajspecifikusak.

Az AM gombák a moháktól kezdődően, a páfrány, nyitvatermő, kétszikű és egyszikű növényfajokkal egyaránt együttélnek. Együttélésük elsősorban a lágyszárú növényekre jellemző, obligát szimbiotaként csaknem valamennyi virágos növény és egyes fásszárúak gyökerében megtalálhatóak.



2. kép: Az AM gombák gyökerbeni képletei anilin kékkel festett gyökerekben. Mikroszkópos felvétel. A: AM gombát nem tartalmazó gyökérdarab; B: arbuszkulák és hólyagszerű vezikulumok festett gyökérben; C: talajból izolált spórák extraradikális hifákkal (szerző felvételei)

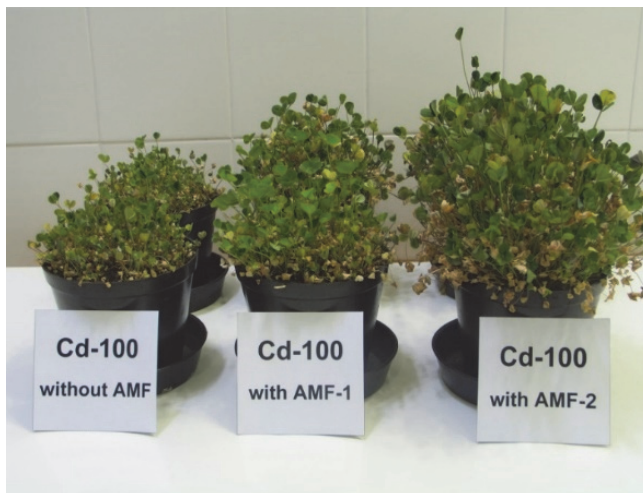
Mivel a szárazföldi növénycsaládok nagy része létesít az AM gombákkal kapcsolatot, köztük azok a növényfajok is, amelyek gazdaságilag nagy jelentőséggel bírnak, mint például a gabonafélék, a zöldségfélék és a különböző gyümölcsfák, ezért a mezőgazdaságban betöltött jelentőségük vitathatatlan. Vannak növénycsaládok (keresztesvirágúak, csalánfélék, keserűfűfélék, libatopfélék stb.), amelyek fajai nem mikotrófok, nem élnek szimbiózisban AM gombákkal. A nem mikotróf növények – például gyakori gyomnövényeink – olyan túlélési stratégiával rendelkeznek, amely miatt vagy a tápanyagfelvételben sikeresek, vagy éppen a talajszennyezésekkel szemben nagyon jó ellenálló képességgel bírnak, ezért nincs szükségük az AM gombákkal való kapcsolatra. A kutatások bizonyították, hogy valaha ezek a növények is együtt éltek az AM gombákkal, viszont evolúciós fejlődésük során ezt a képességüket elveszítették.

Míg az AM gombák nem képeznek fajspecifikus kapcsolatot, a gazdanövények részéről mikorrhiza függésbeli különbségek vannak, különbözőképpen ráutaltak a gombapartnerük jelenlétére. Az erősen mikotróf növények optimális növekedése, fejlődése még jó tápanyag-ellátottság

esetén is csak a gombapartner jelenlétében biztosított. A kevésbé mikotróf növények mikorrhiza függőségét erősen befolyásolja a gazdanövény gyökérmorfológiája és a termőhelyük ökológiai adottságai, nagyobb gyökérsűrűség és kedvező környezeti állapot mellett a növény gombától való függősége csökken. A pillangós növények mikorrhiza függése általában nagyobb, mint a fűféléké.

Az AM gombák gyökérkolonizációja számos direkt és indirekt hatáson keresztül járul hozzá a gazdanövény növekedéséhez, a környezeti stresszel szembeni ellenálló képességének javításához. A tápanyagok felvételéért felelős aktív gyökérfelszínt a gyökereken kívül található extraradikális hifahálózat jelentősen megnöveli, lehetővé téve a tápanyagok, a makro- és mikroelemek felvételét, esetleg hiányának enyhítését, egy a gyökerek által feltárhatónál jóval nagyobb talajtérfogásban.

Az AM gombák legjelentősebb hatása a gazdanövények foszforfelvételének növelésében mutatkozik meg. A gazdanövények a gombának juttatott fotoasszimilátumok mennyiségének szabályozásával a számukra optimális szinten tartják gyökérükben a fertőzöttség szintjét. Ezzel szemben az AM gomba a növény foszforellátását képes kontrollálni. Amennyiben a talaj felvehető foszfortartalma magas, a növény a gomba jelenlétére kevésbé van ráutalva, a gomba kolonizációjának mértéke a gyökerekben csökken. Az AM gomba gazdanövényét olyan hatékonyan tudja ellátni foszforral, hogy akár a növény a saját foszforfelvételi útvonalaival is „kikapcsolhatja”, és csak a gombáét használja. Az AM gombák nemcsak a könnyen felvehető foszforformák felvételét segítik, enzimeik révén a növények számára nem, vagy csak nehezen felvehető foszfátokat is feltárják.



3. kép: A kadmium ($100 \text{ mg Cd kg}^{-1}$) okozta stresszt, - a biomassa csökkenésében is megmutatkozó növényi válaszreakciót - a *Funneliformis mosseae* AM gombatörzsekkel történő oltás (with AMF) jelentősen csökkentette. Különböző talajból izolált AM gombatörzsek (AMF-1 és AMF-2) eltérő effektivitást mutattak fehér here gazdanövényen kadmiummal szennyezett talajban. (szerző felvétele)

Az AM rhizoszféra mikroorganizmus közösségre gyakorolt indirekt hatása sem elhanyagolható. A mikorrhizoszféra, a mikorrhiza gombákkal fertőzött gyökerek rizoszférájának mikrobiális összetétele eltér a nem mikorrhizás növények gyökérkörnyezetének mikrobiális összetételétől, a növények növekedését serkentő baktérium- és gombaközösségben gazdagabb. A mikorrhizás növények gyökérkörnyezetében a foszformobilizáló mikroorganizmusok száma nagyobb, mint a nem mikorrhizás növények rhizoszférájában. Az AM gombák gazdanövényük növekedésére és fotoszintetikus aktivitására gyakorolt kedvező hatása egyéb hasznos mikroszimbionttal (pl. nitrogénfixálók) való egyszeres vagy többszörös oltások esetén is jelentkezik.

A jobb egészségi állapotú mikorrhizás növények ellenállóbbak a kártevőkkel és kórokozókkal szemben, továbbá a gyökérükben jelen lévő mikorrhiza gomba térfoglaló hatás révén is gátolhatja kórokozók fertőzését. A mikorrhizás növények talajszennyezőkkel szembeni ellenállóképességét a gombapartner jelenléte növelheti (3. kép).

A mikorrhiza gombák jelenlétében a növény hormonális viszonyai is megváltoznak. A mikorrhizált növények vízfelvétele is nagyobb a nem mikorrhizáltakéhoz képest, ami többnyire az AM gombák indirekt hatásával, a vízvezető képesség és a növényi transpiráció növekedésével magyarázható. Az AM gombák talajszerkezetre gyakorolt hatása is jelentős, hifáik egy taxonspecifikus fehérjét, glomalint termelnek. A glomalin egy glikoprotein, ami ragasztóként viselkedik a talajban összetapasztva az apró talajszemcséket mikro- és makroaggregátumokat képez. A talajaggregátumok mennyiségének és stabilitásának növekedése a talaj szerkezetének és víztartó képességének javulásához vezet. A glomalin a talajok szervesszén- és nitrogénraktárainak jelentős részét adja. A glomalin bioindikációs jelentősége abban rejlik, hogy viszonylag stabil, szemben más térben és időben dinamikusan változó mikrobiális talajjellemzővel, mindeközben szoros összefüggést mutat fizikokémiai paraméterekkel is és jellemzi a talaj-AM gomba-növény rendszer állapotát. Azáltal, hogy az AM gombák kedvező hatást gyakorolnak a gazdanövényekre, a hifahálózatukon keresztül képesek összekötni az egyes gazdanövényeket, befolyásolják ellenállóképességüket, a növényközösségekben minőségi és mennyiségi értelemben is összetételformáló szerepük van. A szárazföldi ökoszisztémák többségében, extrém talaj (túl alacsony vagy magas pH, sókoncentráció, jelentős talajszennyezés stb.) illetve éghajlati tulajdonságokkal rendelkező területek kivételével az AM gombák a talajok mindegyikében kimutathatóak, amely a növény és gomba közti szimbiózis kialakulásának előfeltétele. A gazdanövény és gomba közti szimbiózis kialakulásához a gombák fertőzőképessége mellett számos egyéb feltételnek is teljesülnie kell egy kölcsönösen előnyös együttélés kialakulásához.

Az intenzív talajművelés szétszabdolja az extraradikális hifahálózatot, a túlzott mértékű trágyázás, növényvédő szerek alkalmazása és egyoldalú növénytermesztés az AM gombák faji diverzitásának és fertőzőképes képleteik talajbani mennyiségének csökkenéséhez vezet. Egyéb

gyökérszaporító gombák ellen alkalmazott fungicidek a patogének mellett az AM gombákat is elpusztítják. Természetes úton történő visszatelepedésük, felszaporodásuk több évtizedes munka eredménye lehet. A természetes, agrár- vagy éppen bolygatott, szennyezett ökoszisztémák „egészségi” állapotának, a talajminőségnek és termékenységnek a megítélésénél, a talajállapot javítását célzó technológiák fejlesztésénél nem hagyhatjuk figyelmen kívül a talajok mikrobiális közösségeinek és köztük a bennszülött arbuskuláris mikorrhiza gombaközösségek szerepét.

Digitális talajtérképezés

Pásztor László

A talajok állapotának jellemzéséhez, a talajképződési- és talajpusztulási folyamatok földrajzi elterjedésének vizsgálatához, illetve a talajok által is érintett környezeti folyamatokhoz kapcsolódó feladatok szempontjából kiemelt fontosságú a talajokra vonatkozó ismeretek folyamatos bővítése, a talaj-környezet rendszer kapcsolatainak elemzése és modellezése, a talajtulajdonságokra, talajfunkciókra és szolgáltatásokra, valamint a talajjal kapcsolatos folyamatokra vonatkozó eredmények regionalizálása.

A talajtérképezés célja a talajtakaróra vonatkozó tematikus ismeretek térbeli viszonyainak feltárása és megjelenítése. A talajtérkép olyan tematikus térkép, amelyen a tematikát valamely, a talajokra vonatkozó információ határozza meg. Ez lehet elsődleges vagy másodlagos (származtatott) tulajdonság, illetve osztály, valamint a talaj funkcióira, folyamataira, szolgáltatásaira vonatkozó ismeret. Az elsődleges (akár kvantitatív, akár kvalitatív) talajtulajdonságokat, osztályokat megjelenítő térképek szerkesztésének legnagyobb és megkerülhetetlen kihívása a lokális ismeretek regionalizálása, azok térbeli kiterjesztése. A talaj egyes tulajdonságainak megismerése mintavételezéssel történik, ami definit módon pontos információt szolgáltat, térkép készítéséhez a pontokra vonatkozó adatokat megfelelően választott módszerrel pedig térben ki kell terjeszteni. A talajtérképezés fejlődése bizonyos szempontból e módszerek tárházának tudatos bővítése a mentális térhasználattól a talaj-táj modellek alapján történő (alap)térképi lehatároláson át a különböző (mechanikus, geometriai, térinformatikai, geostatisztikai) interpolációs módszerekig, illetve a talajképződési folyamatok egyes komponenseire vonatkozó térképi alapú környezeti adatok segédváltozókként való bevonásáig.

A mintavételezésen alapuló térképezés inherens módon prediktív, a fel nem keresett helyekre vonatkozóan csak becsülhető az aktuális változó értéke, illetve osztálya. A térbeli becslés történhet: 1. kizárólag a térképezendő változó figyelembevételével, annak térbeli tulajdonságai alapján; 2. szintén a térképezendő változó alapján, de a kiterjesztés érvényességének korlátait egyéb térképi alapú kiegészítő információk szolgáltatják; illetve 3. minden becslési pontban kiegészítő környezeti segédváltozó(k)ra támaszkodva.

A talajok térbeli változékonyságának leírására alapvetően két, egymásnak látszólag ellentmondó, de egymást kiegészítő koncepció használatos. Az egyik megközelítés lényegében a hasonlóságra épít és alapvetően objektum alapú. Homogén, vagy becsülhető összetételű aggregátumokból álló térképi egységekkel, talajfoltokkal reprezentálja a talajtakarót. Ennek térképi megjelenése a jelentősen nagyobb

hagyományokkal rendelkező klasszikus talaj(folt)térkép. E talajtérképekbe foglalt modell szerint a talajtulajdonságok a térképi egységeken belül az adott felbontásban homogének vagy kartográfiaiban tovább nem bontható formában heterogének; a folthatároknál pedig a térképezendő talajtulajdonság(ok)ban szakadás van. A másik megközelítés a talajtulajdonságok folytonos térbeli változását hangsúlyozza. A térképezendő talajtulajdonságot cellánként becsüljük, a térbeli felbontást pedig a cella mérete határozza meg. A térinformatikai raszteres adatmodellek ezen reprezentációhoz ideális keretet biztosítanak.

A tematikus térképek jellemzően a tematikus ábrázolásból és a topográfiai alapinformációkat szolgáltató térképi alpból állnak. A talajtérképezés is hagyományosan támaszkodik alaptérképi támogatásra egyrészt az ábrázolandó talajtulajdonság térbeli változékonyságának értelmezésére, modellezésére és főképp a talajfoltok lehatárolására; másrészt a véglegesített tematikus térképi információ megjelenítésének is keretét, illetve hátterét adják.

A talajtérkép a talajtakaró célspecifikus térbeli modellje, melynek megalkotása a talajképző folyamatok szem előtt tartásával történik. A talajtérképezésben hatalmas változást hozott az egyes talajképző tényezők szerepének numerikus formalizálása. A digitális talajtérképezés térinformatikai környezetben integrálja a talajtani és környezeti adatokat, a klasszikus talajtani tudást és a modern adatbányászati, geostatistikai módszereket. További lehetőség a célspecifikusan, feladatorientáltan elvégzett elemzések eredményeként a felhasználói igényeket célzottan és optimálisan kielégítő talajtérképek megalkotása, amiben jelentős szerep hárul az archív, de digitálisan már feldolgozott talajtani adatokra.

A talajtérkép fenti definíciójának három központi tényezőjét érintően is jelentős és lényegében egyidejű változások történtek az ezredfordulót követően, amelyek hatásának köszönhető a digitális talajtérképezés megerősödése, majd elterjedése az utóbbi évtizedben.

- A talajképző folyamatok egyes szegmenseire közvetve vagy közvetlenül vonatkozó térinformatikai (térbeli és egyben digitális) információk egyre nagyobb mennyiségben, egyre nagyobb térbeli felbontásban és egyre olcsóbban váltak elérhetővé, köszönhetően a különböző platformokról történő roncsolásmentes technikák (távérzékelés) robbanásszerű terjedésének és információ szolgáltató képességének.
- Az így elérhető, ún. környezeti segédinformációk és a talajok egyes jellemzői közötti, néha igen bonyolult és áttételes kapcsolatok számszerűsítésére determinisztikus modellek híján is hatékony alkalmazható matematikai (geo)statistikai és adatbányászati eszközök jöttek létre. Kidolgozásuk eredendően eltérő szakterületek problémáinak kezelésére tett erőfeszítéseknek köszönhető, de jelen kontextusban, azaz a földfelszín és a felszín közeli rétegek térképezése során is jól adoptálhatóaknak bizonyultak.
- A globalizációs folyamatokkal párhuzamosan nyilvánvaló vált, a világ talajtakarójának ismerete mily nagymértékben inhomogén. Ez egyrészt a

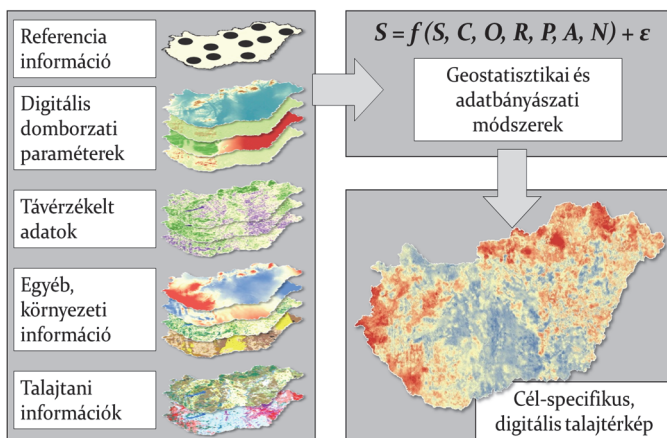
világ nagy részén csak igen korlátozott konkrét talajtani adatok alapján is viszonylag megbízható talajtérképek előállítását és ezzel ezen területek talajtérképi információkkal való legalább minimális lefedettségének elérését indukálta. Másrészt az egységesítés alapjainak kidolgozását, hiszen (legalábbis ahol volt ilyen) a korábbi térképezések nemzetállamok szintjén, független módszertanok alapján történtek, melynek eredményeképpen a természet földrajzilag folyamatosan változó talajtakaró leképezésében az országhatárok mentén mégis mesterséges törések mutatkoznak.

A digitális talajtérképezés (DTT) lényege (2. ábra): a talajra vonatkozó, mintavételből származó információk térbeli kiterjesztése a térképezendő területre teljes fedettséget biztosító, a talajképződési folyamatokkal, illetve azok következményeivel kapcsolatban álló, környezeti tényezőkre vonatkozó térbeli változók segítségével. A DTT az úgy nevezett SCORPAN egyenlet segítségével formalizálható:

$$S_{\text{tulajdonság vagy osztály}} = f(S, C, O, R, P, A, N),$$

ahol a bal oldalon a térképezendő kvantitatív vagy kvalitatív talajtulajdonság, vagy általánosabban vett talajtani jellemző szerepel, a jobb oldalon pedig a talajképző folyamatok (Climate, Organisms, Relief, Parent material, Age and geographic position; azaz: Klíma, Növényzet, Domborzat, Alapkőzet, Kor, Földrajzi helyzet) az adott célváltozóra prediktív realizációi, kiegészítve a talajra vonatkozó (S) egyéb hasznosítható és rendelkezésre álló térképi alapú adatokkal.

A leggyakrabban használt környezeti segédváltozók egyrészt a digitális domborzatmodellekből származtatott morфомetriai deriváltak (melyik közül legismertebbek a lejtés, kitétség, görbület), másrészt a távérzékelés által szolgáltatott többidőpontú, multi- és akár hiperspektrális képi információk. A függő (térképezendő) és független (a térképezést segítő prediktor) változók közti kapcsolat funkcionális realizációjára (f) számos módszer ismeretes, amelyek alapvetően az alábbi három csoport egyikébe tartoznak.



2.ábra: A digitális talajtérképezés koncepciója

- Amikor a prediktív térképezés kizárólag a térképezendő változóra rendelkezésre álló adatok alapján történik, térbeli interpolációról beszélünk, aminek háttérében Tobler Első Földrajzi Törvénye áll, mely szerint „Minden mindennel összefügg, de az egymáshoz közelebbi dolgok közti kapcsolatok erősebbek”, ami a térbeli autokorreláció koncepciójának egy alternatív megfogalmazása. Az ide tartozó módszerek lényege, hogy a földrajzi (geometriai) térben működnek. A különböző interpolációs eljárások közül azokat, amelyeknél a környezeti elem sztochasztikus modellezése dominál, geostatistikai módszereknek hívjuk.
- Amikor a predikciót környezeti segédváltozókra alapozva próbáljuk kivitelezni, a legfőbb kihívást a térképezendő változó és a térképezésben használt prediktor változók közti kapcsolat kvantifikálása jelenti. Különböző általánosított osztályozási, azaz adatbányászati módszerek ezen feladat megoldására megfelelőnek bizonyultak. Ezen eljárások alapvetően a fázisteret vizsgálják, annak szerkezetét elemezve a rejtett és/vagy komplex kapcsolatok feltárása érdekében. Regressziós és osztályozó fákat, véletlen erdőket, neurális hálókat, különböző Bayesi módszereket, support vector machines-t és egyéb további módszereket alkalmaznak sikerrel különböző digitális talajtérképezési feladatokban.
- Vannak továbbá olyan módszerek, amelyek nem kizárólag a földrajzi vagy a fázistérre koncentrálnak. A két leggyakrabban használt eljárás a ko-krigelés, illetve a regresszió krigelés. A ko-krigelés során a geostatistikai interpolációt egy sűrűbben mintavételezett és a térképezendő változattal térben korreláló segédváltozó teszi hatékonyabbá. A regresszió krigelés során a térképezendő változó varianciáját két részre osztjuk: a trendet a segédváltozók segítségével elvégzett többváltozós lineáris regresszió eredményével becsüljük; a magyarázott részen felül megmaradó rezidumokat ezt követően krigelés révén interpoláljuk.

A végeredmény a determinisztikus és a sztochasztikus tényező eredőjeként áll elő. Mind a determinisztikus, mind a sztochasztikus tényező modellezésére újabb és újabb eljárások nyerne teret, illetve ezek lényegében tetszőleges kombinációja kap szerepet legújabbban a digitális talajtérképezés gyakorlatában.

A térbeli kiterjesztés lehetőségeinek és a potenciálisan elérhető környezeti segédváltozók tárházának köszönhetően számos lehetőség adódik egy adott talajtérkép származtatására. Azaz nemcsak egy és kizárólagos módszer alapján készíthető el egy adott adatigényt kielégítő térképi állomány, hanem kompetitív módszercsaládok és háttér-információk számos kombinációja szerint. Másképp fogalmazva egy adott célt kielégítő térkép maga is számos realizáció formájában születhet meg, amelyek tematikus tartalmuk, felbontásuk, pontosságuk, megbízhatóságuk szerint különbözhetnek. Célspecifikus digitális talajtérképezés keretében a térképi termék paraméterei előre specifikálhatók, így a megalkotásához felhasználandó módszerek és segédinformációk az alapján jelölhetők ki, mennyiben képesek az adott elvárást teljesíteni. A DTT alkalmazása túlmutat

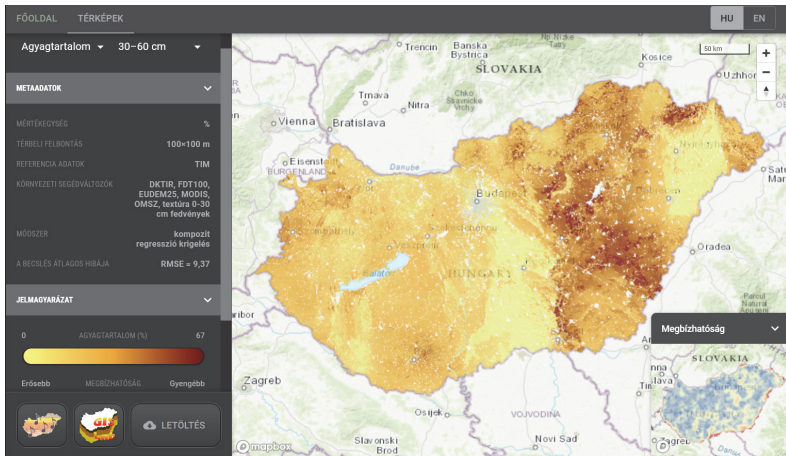
az elsődleges és másodlagos talajtulajdonságok térképezésén, hatékony eszközként lehet rá támaszkodni a talajok magasabb szintű, általánosabb jellemzőinek (folyamatok, funkciók, szolgáltatások) regionalizálásában is. Egy meghatározott területre vonatkozó, talajtani céltérkép előállításához a következőkre van szükség:

- a céltérkép paramétereinek megadására (tematikus tartalom, felbontás, pontosság, megbízhatóság);
- a térképezendő változóra vonatkozó adatokra, amelyek mennyisége és minősége a céltérkép tervezett paramétereivel összhangban áll;
- az adott területre teljes fedettséget biztosító, a cél tematika szempontjából releváns talajképződési folyamatokra vonatkozó, térképi alapú környezeti segédadatokra a céltérkép felbontásával összemérhető térbeli felbontású reprezentációban;
- a SCORPAN egyenlet funkcionális végrehajtását lehetővé tevő módszer(ek) kiválasztására és a rendelkezésre álló térinformatikai-geomatematikai környezetben történő implementálására.

A DTT keretében a talajjellemzők térképi megjelenése kvantitatív térbeli becslés eredménye, melyet a modellezés lényegéből következően kiegészít a predikció globális és lokális bizonytalanságára adott becslés, ami lehetővé teszi az egyes térbeli predikciók összehasonlítását és ennek köszönhetően a térképezés eredményének optimalizálását. A DTT további fontos előnye, hogy az eredmények felülvizsgálhatók és javíthatók új bemeneti (referencia és/vagy segéd) adatok rendelkezésre állása esetén.

A SCORPAN modellen alapuló, legkorszerűbb talajtérképezési technológiákat jellemzően elsődleges talajtulajdonságok nagy felbontású térbeli becslésére dolgozták ki, a DTT alkalmazása azonban túlmutat az elsődleges és másodlagos talajtulajdonságok térképezésén, hatékony eszközként lehet rá támaszkodni a talajok magasabb szintű, általánosabb jellemzőinek (folyamatok, funkciók, szolgáltatások) regionalizálásában is.

A hagyományos talajtérképek megalkotása hosszadalmas folyamat eredménye, kezdve a felvételezéstől, a talaj-táj modellek adott környezetben való leképezésén át, a végtermékek kartografálásáig. Ezért a klasszikus térképek kapcsán fel sem merülhetett gyorsan változó talajjellemzők regionalizálása, illetve a térképek gyakori felülvizsgálata, reambulációja, utólagos javítása, pontosítása. A térképek robosztus információk megjelenítésével hosszabb távú felhasználásra készültek. A digitális talajtérképezés jelentősen lerövidítette az adattól a térképig vezető folyamat időtartamát, lehetővé tette továbbá a felhasználói igények nagyságrendekkel rugalmasabb figyelembevételét. A digitális talajtérképeket a tematikus robosztussággal szemben a feladatorientáltságban, a célspecifikusságban megmutatkozó funkcionalitás jellemzi (3. ábra).

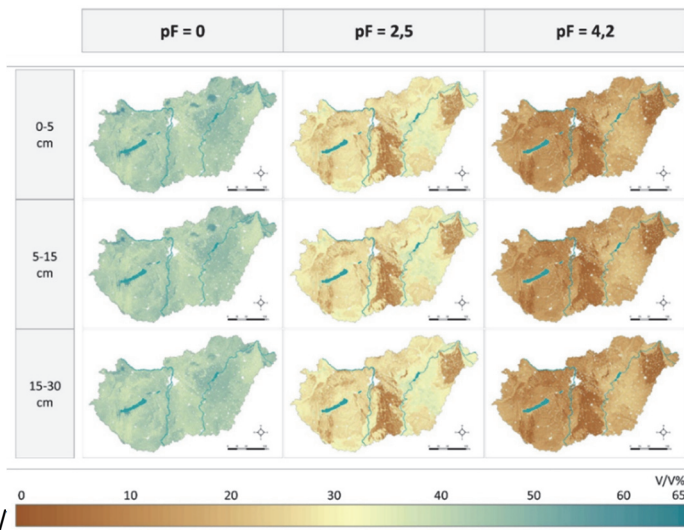


3. ábra: Korszerű, webes környezetben szolgáltatott digitális talajtérkép (www.dosoremi.hu)

Röviden összefoglalva a térbeli talajinformációk (alap és általánosabb értelemben vett talajtérképek) értelmezésének és előállításának új paradigmája a következőkre épül:

- A talajjellemzők térképi megjelenése térbeli becslés eredménye.
- A térbeli becslés alapja a térképezendő területre teljes fedettséget biztosító, a talajképződési folyamatokkal, illetve azok következményeivel kapcsolatban álló, környezeti tényezőkre vonatkozó térbeli változók és a térképezendő talajtulajdonság kapcsolatának modellezése.
- A térbeli modellezés geoinformatikai környezetben történik geostatistikai és adatbányászati módszerek, illetve ezek kombinációinak felhasználásával.
- A korszerű módszerek a térképi eredményen túl a térbeli becslések globális és lokális pontosságát és megbízhatóságát is szolgáltatják.
- A térképi végeredmény a felhasznált referencia és segédadatok, illetve a módszer(ek) hármásának eredménye; minősége és használhatósága ezek függvényében alakul. Ezért a térbeli becsléshez a legteljesebb és egyben az aktuálisan elérhető legpontosabb adatok felhasználása javasolt mind a térképezendő változó, mind a modellezésben használt segédváltozók részéről.
- Az új környezetben előállított talaj téradatak (talajtérképek) tematikájukban, azok reprezentációjában, mélységi vonatkoztatási lehetőségeikben messze túl mutatnak a korábbi térképek által közvetített tematikus tartalmakon.
- Az újonnan előállított talaj téradatak és az azok alapján szerkesztett, kartografált térképek az adott tematikán túl az elkészítésükre és a pontosságukra vonatkozó információkkal együtt alkotnak egységes adatrendszert.
- A térképezett talajtani változókat a tematikai robusztussággal szemben a feladatorientáltságban, a célspecifikusságban megmutató funkcionális jellemzi.

A digitális talajtérképezés keretrendszere lehetőséget biztosít a talajtakaró leírásával kapcsolatban felmerülő és időnként változó, megújuló információigények kielégítésére is. A nemzetközileg elfogadott alapokon standardizált digitális talajtérképek elkészülte után újabb elvárások jelentkeznek azok térbeli és tematikus részletességének növelésére, valamint időbeli jellemzőinek (frissesség, megújíthatóság) javítására. Ezen igények kielégítése céljából a digitális talajtérképezés három pillérének (megfigyelési adatok; a térbeli kiterjesztést támogató, térbelileg teljes fedést biztosító környezeti segédváltozók, illetve a prediktív térbeli modellezés eszközei) bővítése szükséges. Ez az újragondolás teszi lehetővé többek közt egy 3D talaj hidraulikai/hidrofizikai adatbázis kialakítását. A HU-Soil Hydrogrids (4. ábra) Magyarország egész területére, 100 méteres térbeli felbontásban, hat standard mélységi rétegre készült el és szolgáltat adatokat a legfontosabb talaj hidrofizikai jellemzőkre (telítési, szabadföldi és hervadásponthoz viszonyított vízkapacitás, telített hidraulikus vezetőképesség, Mualem-van Genuchten paraméterek a víztartó képesség és hidraulikus vezetőképesség görbéi). A HU-Soil Hydrogrids a kontinentális léptékű EU-SoilHydroGrids minden fontos elemében hazai és nagyobb megbízhatóságú adatokra épülő magyarországi megfelelője, mivel (i) kizárólag magyarországi talajadatokon kidolgozott pedotranszfer függvények és (ii) a megújított hazai talaj téradat infrastruktúra (<https://dosoremi.hu/>) által szolgáltatott elsődleges talajtulajdonság térképek és további, (iii) nagyszámú környezeti prediktor változó, valamint (iv) gépi tanulási módszerek felhasználásával készült.



4. ábra: Az elsődleges talajtérképeken túl: ízelítő a HU-Soil Hydrogrids 3D talaj hidraulikai/hidrofizikai adatbázisból

Irodalom:

- Ács et al. (2017): A talaj léggörré gyakorolt hatásának modellezés-szemponitú áttekintése. In: A talajtakaró geonómiaja. ELTE Meteorológiai Tanszék, 230-248. o. ISBN 978-963-284-918-8 (online)
- Báder, L. (2022): Magyarország vízegyensúlyának változása az éghajlatváltozás tükrében. PhD értekezés. pp.
- Bíró, T., szerk. (2017): Országos települési csapadékvíz-gazdálkodási konferencia tanulmányai, Baja, ISBN 978-615-5845-22-2 https://vtk.uni-nke.hu/document/vtk-uni-nke-hu/Kézikönyv_csapadék.pdf
- Dente, L., Vekerdy, Z., Su, Z., & Ucer, M. (2011). Twente soil moisture and soil temperature monitoring network. Enschede: Faculty of Geo-Information Science and Earth Observation (ITC), University of Twente. http://www.itc.nl/library/papers_2011/scie/dente_twe.pdf
- Eiseltová et al. (2012): Evapotranspiration – A Driving Force in Landscape Sustainability, In: Evaporation – Remote Sensing and Modelling. szerk. Ayse Irmak, IntechOpen. ISBN 978-953-307-808-3
- Farkas, Cs., Rajkai, K., Kertész, M., Bakacsi, Zs. and Meirvenne, M. 2008. Spatial variability of soil hydro-physical properties: A case study in Herceghalom, Hungary. In: Soil geography and geostatistics. Concepts and Applications (JRC Scientific and Technical Reports)
- Fodor, N., Blaskó, L., Éri, L. & Rajkai, K. Hidraulikus vezet ő képesség mérési és becslési eredmények összehasonlítása homoktalajra. *Agrokémia és Talajt.* **58**, 369–380 (2009).
- Fodor, N. Sándor, R., Orfanus, T., Lichner, L., Rajkai, K. (2011) Evaluation method dependency of measured saturated hydraulic conductivity. *Geoderma* 165(1): 60–68.
- Hoekstra, A. Y., Mekonnen, M. M. (2012): The water footprint of humanity. *Environmental Sciences*, 109(9), 3232–3237. DOI: 10.1073/pnas.1109936109
- Krasilnikov, P., Carré, F. and Montanarella, L. (eds.). JRC. 107–128.
- Kravcik et al. (2007): Water for the Recovery of the Climate - A New Water Paradigm. People and Water NGO, Kosice, Slovakia
- Margulis, Lynn (2000): Az együttműködés bolygója. Vince Kiadó, Budapest. ISBN 963 9192 52x
- Mekonnen, M. M., Hoekstra, A. Y. (2011): The green, blue and grey water footprint of crops and derived crop products. *Hydrology and Earth System Sciences*, 15(5), 1577–1600. DOI: 0.5194/hess-15-1577-2011
- Nagy, A., & Tamás, J. (2013). Non-invasive water stress assessment methods in orchards. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 44(1–4), 366– 376.
- Nagy, A., Riczu, P., Gálya, B., & Tamás, J. (2014). Spectral estimation of soil water content in visible and near. *Eurasian Journal of Soil Science*, 3(3), 163–171.
- Petrasovits, I. (1988). Az agrohídroológia főbb kérdései. Budapest: Akadémiai Kiadó. https://library.hungaricana.hu/hu/view/VizugyiKonyvek_186/?pg=4&layout=s
- Rajkai, K. 1987. A talaj víztartó képessége és különböző talajtulajdonságok összefüggéseinek vizsgálata. *Agrokémia és Talajt.* 36–37, 15-30.
- Rajkai, K., Zsembeli, J., Blaskó, L., & Várallyay, G. (1993). Use of tension infiltrometer and water retention characteristics in the assessment of soil structure. *International*

Agrophysics, 07, 141-154.

- Rajkai, K. & Kabos, S. A talaj víztartó képesség-függvény (pF-görbe) talajtulajdonságok alapján történő becslésének továbbfejlesztése. *Agrokémia és Talajtan*. 48., 15–32. (1999).
- Rajkai, K. *A víz mennyiség, eloszlása és áramlása a talajban*. (MTA Talajtani és Agrokémiai Kutatóintézet, 2004).
- Schmugge, T. (1978). Remote-sensing of surface soil-moisture. *Journal of Applied Meteorology*, 17(10), 1549–1557. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1978\)0172.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1978)0172.0.CO;2)
- Šimúnek, J., Šejna, M., Saito, H., Sakai, M., & van Genuchten, M. T. (2013). The HYDRUS-1D software package for simulating the one-dimensional movement of water, heat, and multiple solutes in variably-saturated media, version 4.16. Riverside, California, USA: Department of Environmental Sciences, University of California, Riverside
- Smith, M. (1992). CROPWAT: A computer program for irrigation planning and management. *FAO Irrigation and Drainage Paper* 46.
- Spracklen et al. (2018): The Effects of Tropical Vegetation On Rainfall. *Annu. Rev. Environ. Resour.* 2018. 43:14.1–14.26 <https://doi.org/10.1146/annurev-environ-102017-030136>
- Szabó, B. et al. Mapping soil hydraulic properties using random-forest-based pedotransfer functions and geostatistics. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 23, 2615–2635 (2019).
- Szabó, B. et al. From EU-SoilHydroGrids to HU-SoilHydroGrids: A leap forward in soil hydraulic mapping. *Sci. Total Environ.* 921, 171258. (2024)
- Szabó, B., Weynants, M. & Weber, T. K. Updated European Hydraulic Pedotransfer Functions with Communicated Uncertainties in the Predicted Variables (eupfv2). *Geosci. Model Dev.* 14, 151–175 (2021).
- Teuling, A. J., Seneviratne, S. I., Williams, C., & Troch, P. A. (2006). Observed timescales of evapotranspiration response to soil moisture. *Geophysical Research Letters*, 33(November), L23403. <https://doi.org/10.1029/2006GL028178>
- Tóth, B. Talajok víztartó képességét becslő módszerek. *Agrokémiai és Talajt.* 59, 379–398 (2010).
- Tóth, B., Weynants, M., Pásztor, L. & Hengl, T. 3D soil hydraulic database of Europe at 250 m resolution. *Hydrol. Process.* 31, 2662–2666 (2017).
- van der Tol, C., & Parodi, G. N. (2012). Guidelines for Remote Sensing of Evapotranspiration. In A. Irmak (Ed.), *Evapotranspiration - Remote Sensing and Modeling* (pp. 227–250). Rijeka, Croatia: InTech. www.intechopen.org
- van Genuchten, M.T. 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 44. 892–898.
- Várallyay, Gy. Háromfázisú talajrétegekben végbemenő vízmozgás tanulmányozása. *Agrokémia és Talajt.* 23, 261–296 (1974).
- Várallyay, Gy. (2002): *A mezőgazdasági vízgazdálkodás talajtani alapjai*. Budapest. pp. 169.
- Vekerdy, Z. Optikai és mikrohullámú földmegfigyelési adatok integrációja és agrohidrológiai értékelése. *MTA Doktori értekezés*. 2020. pp. 160. Budapest.

Az élővilág sokszínűségének megnyilvánulása az agráriumban

Balázs Ervin

Földünk természeti gazdagsága tette lehetővé, hogy az emberiség a számára szükséges mennyiségben és változatosságban találjon élelmet. Az évezredek során szerzett tapasztalatok birtokában egyre tudatosabban használta fel a biológiai sokféleség adta kincset. Az agrikultúra elnevezés utal a mezőgazdaságra, mint az egyik legősibb emberi tevékenységre.

Az emberiség történetében kulcsfontosságú szerepet játszott a mezőgazdaság fejlődése. A kezdetekben gyűjtögetésen alapuló élelemellátást az egyes népek, törzsek letelepedésével felváltotta a növénytermesztés, ami hatalmas lépésekkel az emberiség meghatározó tevékenységévé vált. A társtudományok felfedezéseit, a fizika és a kémia századát, a biológia évszázada követte, amely napjainkra belépett az informatika és a digitalizáció korszakába. A mezőgazdaság lépést tartva a társtudományok fejlődésével és azok felfedezéseinek alkalmazásával egyre hatékonyabb termelést valósított meg. Így napjainkra a biológiai sokféleség minél sokrétűbb, de észszerű kiaknázása a világ agrárgazdaságának alapvető pillére lett. A mikrobák, növények és állatok nemesítése meghatározó nemcsak napjaink, hanem a jövő mezőgazdaságára nézve is. A biológiai sokféleség megőrzése és feltárása a világ génbankjai révén zajlik. E hazai és nemzetközi viszonylatban is kiemelkedő jelentőségű értékek korszerű kihasználását a genomikai kutatások határozzák meg. A biotechnológiai technikák széleskörű tudatos felhasználásának fő záloga a természetben is előforduló egyes változatok kiválasztása és felszaporítása annak érdekében, hogy minél jobb minőségű élelem jusson az emberiségnek. Ezt a célt szolgálja a napjainkban Nobel-díjjal is elismert génszerkezeti eljárások bevezetése a mindennapi agrárinnovációba. A génszerkeztés és annak néhány már sikeres példája mutatja meg a génbankok jelentőségét is. A legújabb molekuláris technikák biztonságos gyakorlati alkalmazását az úgynevezett genetikailag módosított szervezetek (GMO) szabályozásának fejlődése is jól bizonyítja.

Növényi génbankok

Mátyás Csaba

Célok és módszerek

A növénytermesztés minden részterületének fejlesztése az élő sokféleség alapjain nyugszik. A génbankok jelentőségét a felgyorsuló generáció jelei támasztják alá. Világszinten, a mezőgazdaságban használatos fajták 75%-a az elmúlt száz évben kikerült a forgalomból. A génbankok feladata nemcsak a változatosság minél nagyobb mértékű megőrzése és potenciális génforrások azonosítása a növénynevelés számára, hanem beletartozik a termesztett fajok vad rokonfajainak megőrzése és új génforrások felkutatása, gyűjtése és dokumentálása is. A génbankok egyre jelentősebb szerephez jutnak a kártevők és időjárási anomáliák elleni tolerancia javításában. A magas idő- és költségigényes nevelési programok mellett donor genotípusok bevonásával a termésbiztonságot nagyságrendekkel kisebb ráfordítással lehet fokozni. A termesztők számára ellenőrzött eredetű szaporítóanyagot is biztosítanak a génbankok.

A génbanki tevékenység *in situ* és *ex situ* módszereket alkalmaz. Előbbi esetben a kiválasztott populációk, fajták és változatok állományainak fenntartása azok kialakulási helyén vagy eredeti termőhelyükön történik. Ez leggyakrabban a tájfajták, populációk gazdálkodók általi (*on farm*) fenntartását jelenti. Az *ex situ* megőrzés keretében a genotípusokat, vagy azok szaporítóanyagát ellenőrzött körülmények között tartják fenn, növényfajtól függő módszerekkel. A magról (ivarosan) szaporított növényfajták, populációk megőrzése a magtételék szárítását követő hűtött tárolás révén oldható meg. A magok $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ -on csírázókéességüket akár 100 évig megőrizhetik, míg $+4(\sim 9)\text{ }^{\circ}\text{C}$ -on maximum 20-30 évig tárolhatók.



1. kép Burgonya klónok steril tenyésztései az NBGK tTápiószelei génbankjában (fotó: Baktay B.)

A vegetatív úton szaporított kultúrnövények (pl. hagyma, burgonya, gyümölcsfák stb.) fajtái, klónjai magvetéssel nem tarthatók fenn. Vegetatív szaporítóanyag (mag, sarj, gumó stb.) formájában őrzik a hagymaféléket, gyök- és gumós növényeket, míg a burgonya és annak rokon vad fajai osztódó (merisztéma) szövetét steril táptalajon, in vitro (laboratóriumi) sejt- vagy szövettenyészetek formájában tartják fenn (1. kép). Egyes növényfajokra az ultramélyhűtött tárolás is alkalmazható, amely egyben a szaporítóanyag vírusmentesítését is lehetővé teszi.

A fenntartás során a tételek életképessége és szaporíthatósága általában leromlik. Még ezt megelőzően gondoskodni kell a magtétélek felújító vetése révén a tételek regenerálásáról, illetve ültetvényben fenntartott fás/évelő növények esetében, vegetatív másolatok (oltványok vagy dugványok) létrehozásával. A megőrzés minden lépését nemzetközileg egységesített módszerekkel folyamatosan ellenőrizni kell, mert csak így biztosítható az adott genotípusra jellemző biológiai tulajdonságok fenntartása.



2. kép A Martonvásári Gabona Génbank több száz kalászos tételének szántóföldi tesztelése és regenerációja a HUN-REN ATK tanúsított ökológiai tenyészterületén (fotó: Mikó P.)

Hazai növényi génbankok

Jánossy Andor kezdeményezésére 1959-ben alakult meg a tápiószelei génbank, amely 2019-től **Nemzeti Biodiverzitás- és Génmegőrzési Központ (NBGK)** néven működik. A génmegőrzés jogszabályi hátterét az agrártárca alakította ki és a szakmai kérdések egyeztetésére 1995 óta működteti a Növényi Génbank Tanácsot (NGT). Az NBGK a hazai agrár génmegőrzés bázisintézménye. Kezeli a Nemzeti Génbank Adatbázist, működteti a Nemzeti Bázis Gyűjteményt, valamint a Nemzeti Biztonsági Duplikátum Tárolót. Fő feladata az évtizedek során létrehozott génbanki gyűjteményeinek megőrzése, fejlesztése, továbbá a

génbanki tételek agrobotanikai értékelő vizsgálata, és folyamatos megújítása, dokumentálása és közreadása nemzetközileg elfogadott módszerekkel. Növényfajtól függően a megőrzés közép- és hosszútávon hűtött magtárolókban, ültetvényekben, esetenként merisztéma kultúrákban történik (1. táblázat). Ehhez kapcsolódik a helyi körülményekhez alkalmazkodott hazai tájfajták, ökotípusok és populációk eredeti termőhelyen (*in situ*, *on farm*) történő fenntartásának és hasznosításának szervezése és irányítása. A NBGK-ban jelenleg közel 55 ezer unikális tételt őriznek, ami a világ 13. legnagyobb génbankjává teszi az intézményt (URL1).

1. táblázat: Az NBGK génbank kultúrnövény gyűjteményének megoszlása a megőrzés formája szerint, 2022. december 31-én

		2022
Generatív	gabonafélék	21.335
	zöldségnövények	10.733
	maghüvelyesek	9.966
	ipari növények	3.031
	takarmánypillangósok	2.818
	fűfélék	2.287
	gyógynövények	1.099
	egyéb	636
Vegetatív	hagymafélék	205
	gyökér- és gumós növények	55
In vitro	burgonya és vad rokon fajai	670
Ültetvény	dísznövények	996
	fás szárú gyümölcs	1.048
	szőlő	119
Összesen		54.998

Valamennyi nemesítéssel foglalkozó agrár kutató intézmény rendelkezik gazdag saját génbankkal is. Például a HUN-REN **ATK Martonvásári Kalászos Gabona Génbankja** a teljes génbanki feladatkört ellátja, vagyis a megőrzést, regenerálást és értékelést. A nemesítői gyűjtemény jelenleg 14.461, főként búza tételt, a rokon fajoké pedig 1.329 tételt tartalmaz. Ezeket *ex situ* hidegtárolóban (magbankban) tartják 2-4 °C-on, regenerálásuk tenyészertben történik (2. kép); az élőlő fajok fenntartása *in situ* kertben is folyik. Az ATK génbank egyedisége a nemesítéssel létrehozott diverzitás megőrzésében rejlik, a tárolt anyagok zöme más gyűjteményekben nem található meg (Tóth et al. 2023).

Erdészeti génmegőrzés

Az erdészeti fajok hosszú életciklusa, aránytalanul nagy helyigénye és erősen hullámzó magtermése korlátozza génbanki megőrzésüket. Ráadásul több erdészetileg fontos faj magja hosszabb tárolásra alkalmatlan. A génmegőrzés ezért elsősorban vegetatív szaporítással létrehozott *ex situ* ültetvényekben történik, de fontos szerepe van a populációk *in situ*, vagyis állományban megőrzésének is (Mátyás és Bordács, 2022).

Az erdészeti génforrások szervezett megőrzésének kérdése először a hazai biodiverzitás védelme kapcsán merült fel (Mátyás, 1979). Az NGT Erdészeti Munkabizottsága dolgozta ki a hazai erdészeti génmegőrzés programját (Bach et al., 1998). A legnagyobb bázis a Sárvár-Bajti nyár genotípus gyűjtemény, amelyet részben egy 1,3 ha-os magastörzsű anyatelepen tartanak fenn (összesen 468 klón, ezek egy része euramerikai és interamerikai nyárhibrid, valamint fajtisza hazai és északamerikai fekete nyár és fehér fűz klónok; 3. kép). A 15 hektáros falakú gyűjteményben ivarérett, keresztezéshez felhasználható klónokat tartanak fenn. A hazai őshonos, fajtisza fekete nyár genotípusok felkutatása és ellenőrzése, *ex situ* megőrzése és elszaporítása nemzetközi szinten is igen jelentős eredmény (Borovics et al., 1999). Az ERTI által fenntartott gyűjtemények, kísérleti ültetvények mellett egyes állami erdőgazdaságok is hoztak létre *ex situ* génarchívumokat gazdaságilag jelentős, vagy ritka, veszélyeztetett fajokból.



3. kép. Az ERTI magastörzsű anyatelepként kezelt nyár klóngyűjteménye Sárvár-Bajti-ban, amely az ellenőrzött törzs- (elit-)szaporítóanyag előállítását is szolgálja (fotó: ERTI archív)

Az EUFORGEN szervezet megalakulását követően indult el a magyar *in situ* erdészeti génrezervátum hálózat kialakítása (Mátyás, 1993). Jelenleg az állományalkotó tölgyfajokból, ill. bükkből rendelkezünk mintegy 50, *in situ*

génmegőrzésre kijelölt állománnyal. A génrezervátumok fenntartását, nyilvántartását a Nébih látja el. Áttekintést a hazai erdészeti génmegőrzésről egy, a FAO részére készített országjelentés ad (Bordács et al., 2013).

Az erdészeti tevékenység jellege miatt a génmegőrzés bevonása a természetvédelembe az erdei fafajok kapcsán jelent meg. A Biodiverzitás Konvenció 1992-es hágai ülésén Mátyás Csaba javaslatára a genetikai diverzitás szint kiemelt figyelembevételét határozták el (URL2). Hazánkban a génforrások védelmét szolgáló természetvédelmi stratégia az ezredforduló körül készült el (Mátyás, 2004).

Nemzetközi együttműködés a növényi génforrások megőrzésére

A Növényi Genetikai Erőforrások Nemzetközi Intézetét (IPGRI) az ENSZ a világ növényi genetikai erőforrásai megőrzésére és hasznosítására hozta létre 1974-ben. Szerepét később a FAO Genetikai Erőforrások Tanácsa, illetve egyezményei vette át. A Biodiverzitás Konvenció alapelveit a biológiai sokféleség védelméről a FAO 1993-ban, az Élelmezési és Mezőgazdasági Génforrások Nemzetközi Szerződését (ITPGRFA) 2001-ben fogadta el. Az egyezmények célja a legfontosabb termesztett növényfajok génforrásaihoz való globális hozzáférés biztosítása, kutatási, oktatási és nemesítési célokra, az előnyök megosztása és a helyi természetők jogainak védelme (URL3).

Európai agrár génbank együttműködések

Az **ECPGR** program az EU támogatásával összeurópai szinten koordinálja 43 ország 392 génbankjának tevékenységét, melyhez Magyarország 2019-ben csatlakozott. Az európai génbankok adatbázis-kezelő és információs rendszere (EURISCO) közel kétfélmillió, ex situ körülmények között megőrzött tételről tárol információt, ami a becsült európai géntartalék 50%-a, míg a világ géntartalékának 16%-a (URL4). Az NBGK és más hazai, génmegőrzést folytató intézmények résztvesznek a génmegőrzési feladatok európai végrehajtásában. Az AEGIS, a SeedNet, valamint a Bioversity International hálózatok regionális projektjei is a génforrások közös európai hasznosítását szolgálják.

A **Spitzbergák Nemzetközi Magbunkert** a jeges-tengeri Svalbardon a norvég kormány hozta létre abból a célból, hogy biztonsági tartalékként megőrizze az ismert élelmiszernövények magját egy esetleges globális katasztrófa esetére. Jelenleg több mint 1 millió 200 ezer tétel található itt, amelyek között 201 fajhoz tartozó 4.863 tétel szerepel Magyarországról (URL5). Megjegyzendő, hogy a tápiószelai NBGK egy saját biztonsági duplikátum tárolóval is rendelkezik, egy bányajáratban, az Aggteleki Nemzeti Park területén.

EUFORGEN – Az európai erdészeti génmegőrzési program

Az EUFORGEN pán-európai szinten hangolja össze a tagországok erdészeti génmegőrzési tevékenységét. A programot szakmapolitikai mandátummal ruházta fel a Forest Europe, az erdőkért felelős miniszterek fóruma. Magyarország a program alapító tagja, feladatkörét 1995-ben, a Sopronban tartott alakuló ülésen határozták meg. Ezek az egyes fafajok elterjedésének genetikai igényű, pontosabb feltárása, az *in situ* génrezervátumok európai hálózatának létrehozása és ajánlások kidolgozása a fontosabb vagy veszélyeztetett fajok részére (Turok és Mátyás, 2000). Több európai irányelv és kiadvány hazai kutatók irányításával, közreműködésével készült el (pl. Bordács et al., 2019). Az utóbbi években a klímaváltozás kihívásaira fókuszáló szakpolitika és a szaporítóanyag-használat optimalizálása kerültek a tevékenység előterébe (Mátyás és Bordács, 2022). A szakterület jelentőségét mutatja, hogy a FAO az erdészeti genetikai erőforrások globális állapotáról jelentést adott ki (FAO 2013).

A fejezet anyagához részletes információval, adatokkal járultak hozzá Hegedűs Attila (MATE GBI), Baktay Borbála (NBGK), Mikó Péter (HUN-REN ATK), Benke Attila és Nagy László (SoE ERTI).

Irodalom:

- Bach I., Bordács S. és Mátyás Cs. (szerk.) 1998: Az erdei fás növények génmegőrzési alapelveinek kidolgozása. FM Növényi Génbank Tanács Erdészeti Munkabizottsága, Budapest, 97 o.
- Bordács S., Nagy L., Pintér B., Bach I., Borovics A., Kottek P., Szepesi A., Fekete Z., Wisnovszky K. és Mátyás Cs. 2013: Az erdészeti genetikai erőforrások állapota és szerepe a XXI. század elején Magyarországon. Erdészettudományi Közlemények 3(1): 21–37.
- Bordács S., Zhelev P. és Schirone B. 2019: EUFORGEN Technical Guidelines for genetic conservation and use for Hungarian oak (*Quercus frainetto*). EUFORGEN, European Forest Institute 6.
- Borovics A., Gergác J., Bordács S., Bach I., Bagaméry G. és Gabnai E. 1999: A fekete nyár génmegőrzésben elért eredmények. Erdészeti Kutatások 89(1): 135–148.
- FAO 2013: State of the World's Forest Genetic Resources. Rome, Italy, 281 o.
- Mátyás Cs. 1979: Erdeink géntartalékai. In: Sterbetz I. (szerk.) 1979: Biológiai környezetünk védelme. Budapest, Mezőgazdasági Kiadó 79–94.
- Mátyás Cs.: 1993: Erdőrezervátum: új koncepció tör utat. Erdészeti Lapok 128:(1) 13-13.
- Mátyás Cs. 2004: Veszélyeztetett fajok, populációk megőrzésének genetikai szempontjai, különös tekintettel fás növényekre. Természetvédelmi Közlemények 11: 55–66.
- Mátyás Cs. és Bordács S. 2022: Evolúció-ökológiai szempontok a génkészletek védelmében és az erdőfelújításban. In: Bartha D., Csóka Gy. és Mátyás Cs. (szerk.): Az erdészeti tudományok története Magyarországon. MTA ETB tanulmánykötet I. Soproni Egyetem Kiadó, Sopron 162-167.

Tóth V., Mikó P., Kuti Cs., Megyeri M., Molnár I., Rakszegi M. és Vida Gy. 2023: ELKH ATK Kalászos Gabona Nemesítési Osztály génbanki tételei. XXIX. Növénynevelési Tudományos Napok, Abstract kötet, 156.

Turok J. és Mátyás Cs. 2000: Collaboration on forest genetic resources in Europe and national implementation in Hungary. NGT Erdészeti Munkabizottság, Sopron http://ngt-erdeszet.emk.nyme.hu/en/turok_matyas.htm

URL1. <https://www.nbgk.hu/>

URL2. <http://www.cbd.int/doc/meetings/cop/cop-06/other/cop-06-min-decl-en.pdf>

URL3. fao.org/plant-treaty

URL4. <https://www.ecpgr.cgiar.org/>

URL5. seedvault.nordgen.org

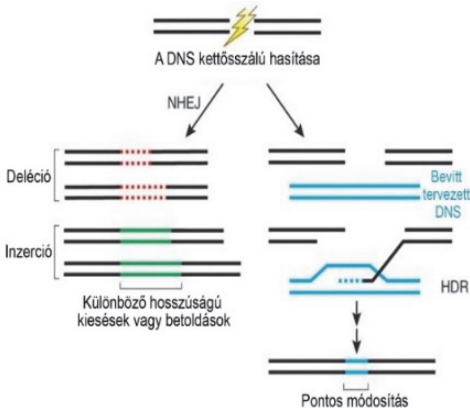
Génszerkesztés

Venetianer Pál

Joshua Lederberg 1959-ben, Nobel-előadásában mondta a következőt: „A genetikusok csalóka lidércfénye mindig az volt, hogy találjanak egy specifikus mutagént, egy olyan reagenst, amely eljut egy adott génhez, felismeri azt, és meghatározott módon módosítja”. Több mint fél évszázaddal később, ezt a „lidércfényt” tette gyakorlatilag is alkalmazható realitássá a modern genetika. Ez a génszerkesztés, vagy genomszerkesztés, amiről a következő fejezetben szó lesz.

Kiindulásképpen tisztázandó, hogy ez az eljárás alapvetően különbözik a – szintén fél évszázados – „in vitro DNS rekombináció”, azaz népszerű nevén génebesztet technológiájától, amelyben idegen fajból (esetleg ugyanazon faj genetikailag különböző egyedéből) származó DNS-t (egy vagy, néhány gént, esetleg géndarabot) visznek be a kísérleti objektum genomjába és így hozzák létre az általában GMO-nak (Genetikailag Módosított Szervezet) nevezett új típusú élőlényeket.

A génszerkesztés első, az ezredforduló utáni években született módszerei, amelyeket az alkalmazott molekuláris eszközökről ZFN (zinc-finger nuclease), illetve TALEN (transcription activator-like effector nuclease) technikáknak neveztek el, ma már csak történelmileg érdekesek, nehézségük, magas költségük és sokszor bizonytalan eredményességük miatt már egyáltalán nem használatosak, noha segítségükkel annak idején több, gyakorlatilag is hasznosnak bizonyult konstrukciót hoztak létre. A két módszer közös nevezője, hogy a nevükben megjelölt módon módosított nukleáz-enzim segítségével, adott szekvenciaelemekben specifikusan hasítják a célpont-DNS mindkét szálát. Ezt a kettősszalú törést azután a sejt saját helyreállító rendszerei újra visszaállíthatják, de ez többnyire hibásan történik, egy-két nukleotidpár kiejtésével vagy betoldásával és ezáltal mutáció keletkezik az adott szakaszon. Van egy másik lehetőség is a törés helyreállításra: ha bevisznek a sejtbe egy rövid kettősszalú DNS-darabot,



amely majdnem teljesen megegyezik a megtámadott DNS szekvenciájával, csak egy adott, kívánt ponton különbözik attól. Ilyenkor homológ rekombináció történhet, a bevitt DNS és a sejt saját DNS-e között (1. ábra).

1. ábra: Mi történik a DNS kettősszalú specifikus hasítása után?

Magyarázat a szövegben. NHEJ = Non-homologous end-joining = Nem-homológ végek összekapcsolása. HDR = Homology-driven repair = Homológia által előidézett helyreállítás

A génszerkesztés forradalmát azonban a CRISPR technológia hozta el, amelynek felfedezéséért Jennifer Doudna és Emmanuelle Charpentier 2020-ban kémiai Nobel-díjban részesültek. A CRISPR betűszó (jelentése: Clustered Regularly Interspersed Palindromic Repeats = halmozottan előforduló, szabályosan ismétlődő palindrom szekvenciák) egy *Escherichia coli* DNS-ben, 1987-ben japán kutatók által felfedezett szerkezeti elemet takar, amelynek biológiai szerepe sokáig ismeretlen volt. A CRISPR név Mojica spanyol kutatótól származik, aki számos más baktérium és Archea-fajban megtalálta ugyanezt az elemet és megsejtette biológiai funkcióját is. E biológiai funkció – védelem az idegen DNS behatolása ellen – létét, és egyben gyakorlati felhasználhatóságát egy dániai élelmiszerbiológiai laboratóriumban Barrangou és Horvath bizonyították, ezután lendült fel a molekuláris mechanizmus kutatása, amelynek eredményeként megszületett 2012-ben Doudna és Charpentier Nobel-díjat eredményező közleménye. Ebben leírják, hogy ha a Cas9 elnevezésű, *Staphylococcus pyogenes* baktériumból származó, DNS-t hasító, endonukleáz enzimet kódoló gént, egy mintegy 100 nukleotid hosszúságú RNS-t kódoló génnel együtt bejuttatják egy baktériumsejtbe, akkor az RNS (amelynek neve guide, azaz vezető-RNS) odavezeti a nukleázt az RNS által determinált, előre kijelölt genomi DNS szakaszhoz és az ott egyetlen ponton elhasítja a DNS mindkét szálát. Nem sokkal később, Church és Feng Zhang kimutatták, hogy ez a rendszer működik eukaryota sejtekben is. A vezető RNS-t úgy kell tervezni, hogy egy kb. 20 nukleotidnyi szakasza megegyezzen a megtámadni kívánt DNS-szakasszal, és attól adott kis távolságra legyen egy rövid, úgynevezett PAM-szekvencia is, ez szükséges a rendszer megfelelő működéséhez. A DNS hasítása után ugyanaz történhet, mint a korábban említett ZFN illetve TALEN módszerek alkalmazásánál, azaz vagy inaktiválódik a megcélzott gén, vagy létrejön benne a kívánt pontmutáció.

Mint korábban már írtam, a CRISPR-módszer valóságos forradalmat idézett elő a géntechnológiában. A megszámlálhatatlan fontos és újszerű alapkutatási alkalmazás mellett számos új, gyakorlatilag hasznos állati, növényi és mikrobiológiai konstrukció köszönhető e módszernek, noha kezdettől fogva nyilvánvaló volt néhány súlyos hátránya. Ezek:

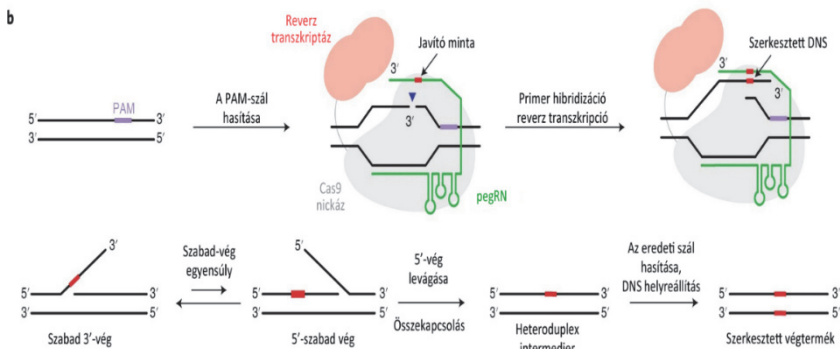
1. A hasítás nem százszázalékosan pontos, csekély valószínűséggel ugyan, de nem célzott helyeken is megtörténhet.
2. A rövid PAM-szekvencia ugyan igen gyakori minden természetes DNS-ben, de a kíváncságnak, hogy ennek jelen kell lennie a célszekvenciától, meghatározott távolságban, némileg korlátozza az alkalmazási lehetőségeket.
3. A hasítás kijávitásának többféle lehetősége megnehezíti a megfelelő, elvárt mutáns azonosítását és izolálását.

E problémák kiküszöbölésére rendkívül intenzív erőfeszítések történtek világszerte. Valóságos új tudományterület született a különböző mikroorganizmusok CRISPR elemeinek, illetve cas-enzimjeinek a tanulmányozására, új, kedvezőbb tulajdonságú variánsok felfedezésére, és a természetes cas-enzimek génjeinek módosítására. E kutatások

eredményeként találtak, illetve mesterséges mutagenezissel konstruáltak olyan cas-variánsokat, amelyek kisebbek és ezért könnyebben kezelhetők az eredeti cas9 enzimnél, más PAM-szekvenciát ismernek fel és ezzel növelik az alkalmazhatóság körét, illetve nagyobb pontossággal ismerik fel a célszekvenciát.

A CRISPR technológia alkalmazása területén a legnagyobb jelentőségű újítás 2016-ban született, ez a „bázis-szerkesztés”-nek is nevezett módszer. Ennek lényege az, hogy a módosított cas-enzim nem hasítja a DNS mindkét szálát, csak egyet (ezt az aktivitását a szakirodalom olykor „nickase”-nak nevezi), vagy egyáltalán nem hasít, csak specifikusan kötődik a vezető-RNS által determinált célszekvenciához. A kívánt kémiai reakciót egy, a cas-enzimmel fuzionált másik enzim végzi el. Ez először egy citozin-deamináz volt, amely a cél-DNS megfelelő helyén egy, vagy néhány CG bázispárt AT-vé konvertált. Később kifejlesztették azt a változatot is, amely AT bázispárt tudott GC bázispárrá konvertálni az adenin-deamináz segítségével.

Ez a technológia már majdnem szó szerint megvalósította Lederberg profetikus vízióját, de csak majdnem. A teljes Lederbergi álom megvalósulását a „prime-editing” (priméres génszerkesztés) módszere hozta el, amelyet Liu és munkatársai dolgoztak ki, amely mind a 12, elvileg lehetséges pontmutáció specifikus előidézésére alkalmas. E technológia egy olyan módosított cas-enzimet használ („nickase”), amelyhez a reverz-transzkriptáz enzimet fuzionálják. A vezető (guide) RNS-t itt primér-szerkesztő RNS-nek nevezik (prime-editing guide RNA = pegRNA), mert némileg más a feladata, mint az eredeti CRISPR-módszerben. A pegRNA nemcsak a megcélzott DNS-szekvenciát tartalmazza, hanem annak nyúlványaként a kívánt módosítást is. Miután a nickase hasította a cél-DNS egyik szálát, a felszabaduló genomi DNS 3'-vége hibridizál a pegRNS-el, egy primer-templát komplexet alkotva, amelyből kiindulva a reverz-transzkriptáz megszintetizálja a kívánt mutációt tartalmazó DNS-szálát, amely kiszorítja az eredeti DNS 5'-végét. Ezt a szabadon lógó egyszálú DNS-véget, egy nukleáz eltávolítja, és egy ligáz enzim befoltozza a hézagot. Így a genomi DNS heteroduplex lesz, egyik szálában az eredeti, a másikban a mutáns szekvenciával. Ezt azután a sejt természetes repair rendszere kijavítja homoduplex-szé. Azt, hogy ez a javítás úgy történjék, hogy a mutáns szál marad meg és az eredeti szekvencia korrigálódik, egy másik, sgRNA-nak nevezett molekula segíti elő (2. ábra).



2. ábra: A „priméres génszerkesztés” mechanizmusa (Magyarázat a szövegben)

Irodalom:

A vonatkozó szakirodalom áttekinthetetlenül óriási, ezért itt csak néhány fontos összefoglaló review-ra hivatkozom:

Eric S. Lander (2016): The heroes of CRISPR. *Cell*, 164. 18-28.

Yoshizumi Ishino, Mart Krupovic and Patrick Forterre (2018): History of CRISPR-Cas from encounter with a mysterious repeated sequence to genome editing technology. *J. of Bacter.*, 200, 1-17.

Andrew V. Anzalone, Peyton B. Randolph, Jessie R. Davis et al. (2019): Search-and-replace genome editing without double-strand breaks or donor DNA. *Nature*, 576, 149-157.

Andrew V. Anzalone, Luke W. Koblan and David R. Liu (2020): Genome editing with CRISPR-Cas nucleases, base editors, transposases and prime editors. *Nature Biotechnol.*, 38, 824-844,

Sophia McDaniel, Alexis Komor and Alon Goren (2022): The use of base editing technology to characterize single nucleotide variants. *Computational and structural biotechnology J.*, 20, 1670-1680.

Mikroorganizmusok biotechnológiai, precíziós átalakítása

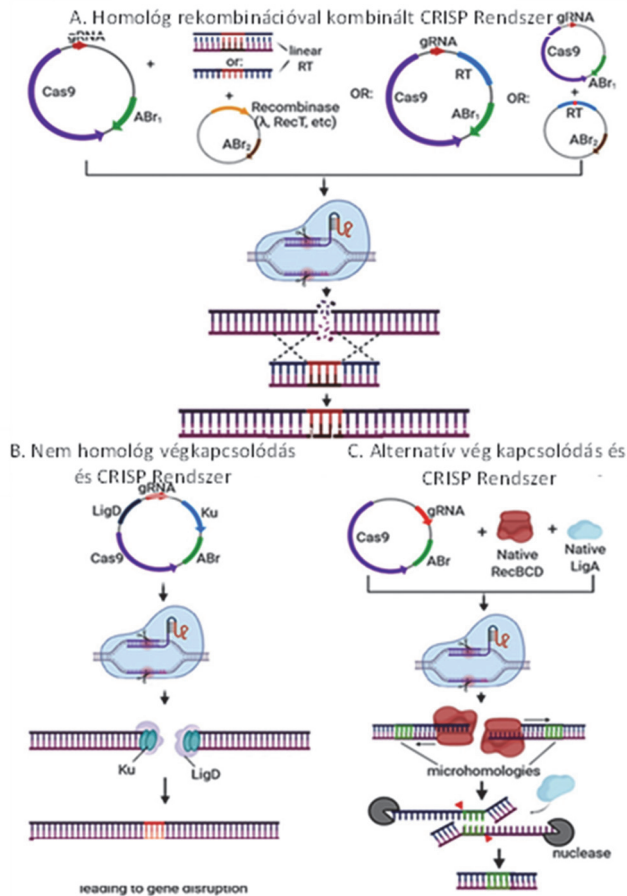
Olasz Ferenc

A mikroorganizmusoknak meghatározó szerepe van a Föld ökoszisztémájának fenntartásában és folyamatos megújulásában, felhasználásuk az emberi civilizáció hajnalára vezethető vissza (pl. bor-, sörerjesztési, kenyérkelesztési eljárások). A mikroorganizmusok hatalmas diverzitásuk révén nagy lehetőséget biztosítanak alkalmazásukra az agrárium, az élelmiszeripar, a humán és állatgyógyászat, a környezetvédelem, sőt az ipar számára is. Napjainkban a mikroorganizmusok (vírusok, baktériumok, gombák, egycellű eukarióta szervezetek) a géntechnológiai hasznosíthatóságuk miatt újra az érdeklődés fókuszába kerültek, köszönhetően két terület nagyon gyors fejlődésének. Ezek egyike a genomika és bioinformatika nagyon gyors fejlődése és alkalmazása, mint például a mikroorganizmusok teljes genomjának meghatározása, egyes fenotípusos tulajdonságok génekhez rendelése, horizontális géntranszfer vizsgálata, ökoszisztémák, populációk vizsgálata. Ezeken a területeken a genomika, transzkriptomika, metagenomika, proteomika, bioinformatika, összekapcsolása is megfigyelhető a klasszikus mikrobiológiai, genetikai, analitikai, fenológiai vizsgálatokkal. Mindehhez szorosan kapcsolódik a biotechnológia fejlődése, amely a hagyományos, tenyésztési, nemesítési, szelekciós, eljárásokon kívül új technikák bevezetése nagymértékben megváltoztatta a biotechnológiai beavatkozások irányát – itt elsősorban a CRISPR/Cas technika alkalmazása emelendő ki.

CRISPR/Cas rendszer és alkalmazása prokariótákban

A CRISPR/Cas rendszer a baktériumok védekező rendszere a sejtbe bejutó „idegen” DNS (pl. plazmid, vírus) ellen, azaz egyfajta immunrendszerként működik. A rendszer széles körben használható az örökítőanyag célzott, precíziós módosítására az élőlények széles körében. A Cas fehérjék a CRISPR-ek közötti helykitöltők (spacer) alapján felismerik a baktérium sejtbe behatoló „idegen” DNS molekulákat és darabokra vágják a nukleinsavat, amit ezt követően a sejt enzimrendszere lebont. A Cas9 enzim és a megfelelő RNS szekvencia sejtbe juttatása után az enzim meghatározott helyen vágja el a DNS-t, amivel lehetővé válik a gének minden korábbinál pontosabb módosítása, beépítése, eltávolítása, azt eredményezve, hogy akár nukleotid-szinten egy adott, meghatározott pozícióban lehessen a DNS-t módosítani.

A CRISPR/Cas rendszer a mikroorganizmusok precíziós átalakításának egyre gyakrabban használt módszere (átfogó tanulmányként Arroyo-Olarte és mtsai, 2021). A baktériumfajok genomjának átalakítására nagyon sok klasszikus genetikai módszert fejlesztettek ki, pl. öngyilkos plazmidok alkalmazását, homológ rekombináción alapuló rendszereket. Azonban ezek a módszerek rendkívül munkaigényesek és részben időigényesek is, és általában egy antibiotikum rezisztencia gén bevitelét igénylik a genomba, ami egyrészt az antibiotikum rezisztencia terjedése miatt problematikus, másrészt akadályozza a precíz átalakítást, mivel egy addicionális gént is beépít a gazdaszervezet genomjába. Ezért is terjed egyre inkább a mikroorganizmusok egyre szélesebb körében a CRISPR/Cas rendszer használata (átfogó tanulmányként Vento és mtsai, 2019). Azonban jelenleg még nem alkalmazható a rendszer a baktériumfajok széles körében (ellentétben az eukarióta rendszerekkel, ahol a már kifejlesztett rendszerek a fajok széles körében alkalmazhatók). Ennek oka, hogy minden egyes prokariota fajra (sőt néha törzsre) külön rendszert kell kidolgozni és fajtól függően különböző beépítési stratégiákat kell optimalizálni (1. ábra).



Biokatalízis során használt biotechnológiai rendszerek

A biokatalízis során teljes mikroorganizmusok végezhetik el enzimszisztémájuk révén a különböző kémiai átalakításokat a vegyi anyagok széles körének előállítására. A CRISPR-alapú technológiák a hagyományos géntechnológiai módszerekhez képest nagyfokú specifikitást, széles körű alkalmazhatóságot és nagyobb hatékonyságot biztosítanak megfelelő gének beépítésével, illetve gének célzott módosításával (átfogó tanulmányként Mulet és mtsai, 2023). Tehát a precíziós CRISPR rendszerek használatának elterjedése nagy lehetőségeket nyújt a mikroorganizmusok célzott és hatékony átalakítására a biokatalízis területén.

Vakcina fejlesztés új biotechnológiai módszerek felhasználásával

A kórokozó baktériumok és vírusok elleni küzdelem nagy hagyományokra vezethető vissza a humán- és állategészségügyben. Az utóbbi évtizedekben meghatározó szerepet töltenek be a különböző biotechnológiai eljárások a vakcinafejlesztésekben, s számos jelentős eredményt értek el. Sajnos azt is meg kell jegyeznünk, hogy a vírusok és baktériumok nagyfokú változékonysága, alkalmazkodása a vakcinákhoz újabb és újabb kihívások elé állítja a kutatókat és fejlesztőket.

A nagyon sok biotechnológiai eljárás közül ki kell emelni egyet, s ez az mRNA alapú vakcinák fejlesztését és az egészségügyben való alkalmazását (átfogó tanulmányként Sparmann és Vogel, 2023). Ez a forradalminak tekinthető eljárás nagymértékben segítheti modern vakcinák kialakítását és alkalmazását, amelyek a COVID-19 világjárvány elleni mRNA-vakcinák rendkívül gyors kifejlesztésében csúcspontot értek el, és váltak emberi életek millióinak megmentőjévé. Ennek a fejlesztésnek kiemelkedő szereplője, az mRNA vakcinák ötletének kezdeményezője, s hosszas küzdelmekkel teli kutatások után sikeres megvalósítója, egy magyar kutató, Karikó Katalin, akit teljes közmegegyezésre ezért 2023-ban Nobel-díjra érdemesítették. Napjainkban egy olyan sarkalatos ponthoz érkeztünk, amikor a kutatások, fejlesztések az mRNA vakcinák terén készen állnak arra, hogy széles körű hatást gyakoroljanak a vakcina fejlesztésekre, s ebben nemcsak a kórokozók elleni védekezést, hanem például bizonyos rákfajták elleni vakcinák kifejlesztését is értjük.

Az élesztőgombák és a biotechnológia kapcsolatának eredményei

Az élesztők voltak azok az eukarióta mikroorganizmusok, melyeket az ember legkorábban a saját szolgálatába állított. Így nem véletlen, hogy a hosszú időn át felgyülemlett empirikus megfigyelések, s a sok rendelkezésre álló élesztőtörzs inspirációt adott az élesztők biotechnológiai felhasználására.

Így a technológiák széles skáláját fejlesztették ki, amely hagyományos és nem hagyományos élesztőtörzseket vett célba. A „hagyományos” élesztőkben, melyeken elsősorban a *Saccharomyces* rokonsági körbe tartozó mikroorganizmusokat kell érteni, intenzív precíziós rendszerek kerültek kidolgozásra (átfogó tanulmányként Mitsui és mtsai, 2019), melyek például a *S. cerevisiae* rekombináns sejtjeit különböző bioalapú vegyi anyagok előállítására használták fel. A nem „hagyományos” élesztőgombák (pl. *Pichia* fajok), amelyeket a különböző abiotikus és biotikus stresszorokkal szembeni nagyon nagy ellenálló képességük, „különleges” anyagcsere-útvonalai és sajátos szabályozási mechanizmusaik jellemeznek, rendkívül ígéretes alternatívaként jelentek meg a különböző ipari alkalmazások számára.

Probiotikumok fejlesztése biotechnológiai, precíziós eljárásokkal

A probiotikumokról bebizonyosodott, hogy fontos szerepük van a normál bélflóra betegségekkel szembeni ellenállásának fokozásában, sőt az egész szervezetre jótékony hatást fejtenek ki, pl. vitamintermelő képességük révén. A CRISPR-Cas rendszert használták különböző tejsav baktériumok precíziós átalakítására – pl. *Lactobacillus*, *Lactococcus*, és *Streptococcus* fajok (átfogó tanulmányként Roberts és Barrangou, 2020)). Azonban az élő sejteket tartalmazó, biotechnológiailag módosított készítmények felhasználása akadályokba ütközik, ezért precíziós módosításukra más lehetőségeket kellett találni (Singh és mtsai, 2022). Ilyen lehetőség az előtt, élő sejtet nem tartalmazó probiotikus kivonatok alkalmazása, melyek elnevezése posztbiotikum.

Precíziós biotechnológia szerepe a bioremediációban

A bioremediációs technológia a környezetszennyező anyagok kezelésére, ipari, kommunális és mezőgazdasági anyagok, melléktermékek kezelésére szolgál, ami nagymértékben elősegíti az élhető környezet, a körforgásos gazdaság megteremtését. Az elmúlt évtizedben számos hagyományos és új technikán alapuló megközelítést alkalmaztak a bioremediáció szempontjából fontos mikroorganizmusok genomjának módosítására. (átfogó tanulmányként Sharma és Shukla, 2022). Több módosított mikrobiális közösség együttes felhasználására is sor került, és ez

a megközelítés kulcsfontosságú lehet több és összetett szennyezőanyag bioremediációjában. Az elsődleges genomszerkesztő eszközök a Zinc finger nukleázok (ZFN-ek), az effektor nukleázok (TALEN-ek), CRISPR-Cas rendszer, mint a nukleinsav-vezérelt genomszerkesztő rendszerek. Ezeknek a technikáknak az alkalmazása elsősorban gén(ek) knock-in és knock-out módosításokkal új anyagcsere útvonal(ak) létrehozása a célja különböző eredetű anyagcsere modulok integrálásával. Bár ezen a téren még sok a teendő, de a genom precíziós módosítása ígéretes változásokat fog eredményezni a bioremediációban is.

Irodalom:

- Arroyo-Olarte R.D., Rodríguez R.B., Morales-Ríos E.: Genome Editing in Bacteria: CRISPR-Cas and Beyond. *Microorganisms*. 2021 Apr 15;9(4):844. doi: 10.3390/microorganisms9040844.
- Mitsui R., Yamada R., Ogino H.: CRISPR system in the yeast *Saccharomyces cerevisiae* and its application in the bioproduction of useful chemicals. *World J Microbiol Biotechnol*. 2019 Jul 6;35(7):111. doi: 10.1007/s11274-019-2688-8. PMID: 31280424.
- Mulet A.P., Ripoll M., Betancor L.: CRISPR Tools in Bacterial Whole-Cell Biocatalysis *ACS Sustainable Chemistry & Engineering* 2023 DOI: 10.1021/acssuschemeng.3c05735
- Roberts A., Barrangou R.: (2020) Applications of CRISPR-Cas systems in lactic acid bacteria. *FEMS Microbiol Rev*. 2020 Sep 1;44(5):523-537. doi:10.1093/femsre/fuaa016.
- Sparmann A., Vogel J.: RNA-based medicine: from molecular mechanisms to therapy *EMBO J*. 2023 Sep 20:e114760. doi: 10.15252/embj.2023114760. Online ahead of print.
- Singh P.R, Shadan A., Ma Y.: Biotechnological Applications of Probiotics: A Multifarious Weapon to Disease and Metabolic Abnormality *Probiotics Antimicrob Proteins*. 2022; 14(6): 1184–1210. Published online 2022 Sep 19. doi: 10.1007/s12602-022-09992-8
- Vento J.M., Crook N., Beisel C.L.: Barriers to genome editing with CRISPR in bacteria. *J. Ind. Microbiol. Biotechnol*. 2019;46:1327–1341. doi: 10.1007/s10295-019-02195-1.
- Xia Y., Li Y., Shen W., Yang H., Chen X.: CRISPR-Cas Technology for Bioengineering Conventional and Non-Conventional Yeasts: Progress and New Challenges. *Int J Mol Sci*. 2023 Oct 18;24(20):15310. doi: 10.3390/ijms242015310. PMID: 37894990.
- Sharma B., Shukla P.: Futuristic avenues of metabolic engineering techniques in bioremediation. *Biotechnol Appl Biochem*. 2022 Feb;69(1):51-60. doi: 10.1002/bab.2080.

Növényi eredetű élelmiszerek minőségének javítása génszerkesztéssel

Bánfalvi Zsófia

Nem barnuló csiperke

A kétsporás csiperke (*Agaricus bisporus*) vagy, ahogy a mindennapokban mondjuk, egyszerűen csak csiperke, a legnagyobb mennyiségben termesztett és fogyasztott gombafaj a világon. Magyarországon évente több mint 40.000 tonna gombát termesztünk (<https://www.fao.org/faostat>), aminek 90%-a csiperke. Magas ásványianyag- és vitamintartalma, értékes fehérjei és rostanyagai, valamint kedvező zsírsav összetétele miatt a gombafogyasztás az egészséges táplálkozás része. Kalória- és glükóztartalma rendkívül alacsony, így a gombát a fogyni vágyók és cukorbetegség is fogyaszthatják. A forgalomba kerülő csiperke 75%-a frissáru. Komoly gondot jelent azonban, hogy az áruházi polcokon a gomba csak rövid ideig tartható, mert gyorsan barnul és így eladhatatlanná válik.

A csiperke barnulását a benne működő polifenol-oxidázok (PPO-k) okozzák. Az enzim katalizálja a monofenol molekulák hidroxilezését, a difenolok oxidációját és a kinonok polimerizációját, aminek eredményeként színes pigmentek, polifenolok keletkeznek. Ezek festik barnára a gombát. Kézenfekvő tehát a gondolat, hogy a PPO mennyiségét csökkentve a barnulás mértéke csökkenthető, a gomba eladhatósági ideje növelhető. Ez a gondolat vezérelte Yinong Yang-ot, a Pennsylvania State University munkatársát is, amikor a génszerkesztés adta lehetőséggel élve, csökkentette a csiperke PPO aktivitását.

A gomba életciklusa a bazídiumból kiszabaduló spórákkal kezdődik, melyeket azután szétszór a szél. Amikor a spórák megfelelő környezetbe érnek, kicsíráznak, és fonalszerű struktúrákká, hifákká nőnek. A hifák később összeolvadnak, és micéliumot képeznek, ami a gomba földalatti vegetatív része. Ahogy a micélium fejlődik, termőtestet hoz létre. Ez a gomba földfeletti része. A CRISPR/Cas9 rendszeren alapuló génszerkesztésre a spórák, a micéliumok vagy az azokból nyert fal nélküli sejtek, a protoplasztok alkalmasak. A Cas9 és a guide-RNS a protoplasztokba polietilén-glikol segítségével, mint ribonukleoprotein is bejuttatható, így idegen DNS nem kerül a sejtekbe. A ribonukleoprotein egy idő után elbomlik, és nem marad más nyoma a beavatkozásnak, mint a kívánt változás. A protoplaszt micéliummá regenerálható, amiből azután termőtest fejlődik.

A csiperkének hat PPO enzimet kódoló génje van. A CRISPR/Cas9 rendszer segítségével Yinong Yang-nak 30%-kal sikerült csökkentenie a PPO aktivitást, ami elegendő volt ahhoz, hogy a gomba rövid időn belül ne barnuljon meg a polcokon. Mivel semmilyen idegen DNS-t nem tartalmazott,

az USA Mezőgazdasági Minisztériuma (USDA) megállapította, hogy a gomba az ügynökség engedélyeztetési eljárása alá vonása nélkül termeszthető és értékesíthető. Így ez lett az első CRISPR/Cas9 szerkesztett organizmus, ami zöld utat kapott az Egyesült Államok kormányától (Waltz, 2016).

Egészségesebb burgonya

A burgonya (*Solanum tuberosum*) (1. kép), a búza, rizs és kukorica után, a legnagyobb mennyiségben termesztett élelmiszer növény. Magyarországon csaknem 240.000 tonna burgonyát termesztünk még most is évente (<https://www.fao.org/faostat>), bár sajnos a termőterületek nagysága, és így a megtermelt mennyiség is, egyre csökken. Ezért ma már a burgonyából importra szorulunk. A burgonya alapélelmiszer és értékes tápanyagforrás. A tápanyagok közül szénhidrátot tartalmaz a legnagyobb mennyiségben keményítő formájában. Fehérje csak minimálisan, zsír pedig szinte alig van benne. Kiváló lizin és triptofán aminosav-forrás, de jelentős mennyiségű C-vitamint is tartalmaz, aminek mennyisége, bár főzés hatására csökken, de még így is jelentős. A burgonyából változatos ételeket készíthetünk. Tesszük levesbe, készítünk belőle főzeléket, pürét, pogácsát és persze sütjük is. A legkedveltebb vendéglői köret a hasábburgonya, de sült burgonyát esznek gyerekeink is a gyorséttermekben a burgerek mellé. A burgonya forró olajban vagy zsírban sütve azonban rákkeltő anyagot is tartalmazhat, főleg, ha az étel tárolt burgonyából készült.

A burgonyagumókat betakarítás után hűtőházakban tároljuk, hogy a betakarítás utáni élettartamot akár egy évig is meghosszabbítsuk. Az alacsony hőmérséklet azonban kiváltja a hideg által indukált édesítés nevű hatást, így a gumóban a redukáló cukrok felhalmozódnak. A redukáló cukrok a gumóban lévő aszparagin aminosavval is reakcióba lépnek, ami enzimikus barnulást és akrilamid termelést eredményez magas hőmérsékleten, az úgy nevezett Maillard-reakció következtében. Az akrilamid rákkeltő hatása bizonyított. Az akrilamid létrejöttének, és egyben a szeletelt burgonya barnulásának a lehetőségét is, sikerrel csökkentették ausztrál kutatók az aszparagin szintáz és a vakuólumban működő, a szacharózt glükózzá és fruktózzá bontó, invertáz enzimet kódoló gén CRISPR/Cas9 rendszeren alapuló célzott inaktiválásával.



1. kép *In vitro* körülmények között fejlődő burgonyanövények
A fénykép a MATE Genetika és Biotechnológia Intézetében készült. A Burgonyakutatás Csoport az NKFIH RRF-2.3.1-21-2022-00007 számú Nemzeti Labor projektének keretén belül a *Ralstonia solanacearum* karantén baktériummal szemben, CRISPR/Cas9 rendszeren alapuló célzott mutagenézissel, rezisztens burgonyavonalak létrehozásán dolgozik.

Irodalom:

- Waltz, E. (2016). Gene-edited CRISPR mushroom escapes US regulation. *Nature* 532, 293–293. doi: 10.1038/nature.2016.19754
- Ly DNP, Iqbal S, Fosu-Nyarko J, Milroy S, Jones MGK. (2023) Multiplex CRISPR-Cas9 gene-editing can deliver potato cultivars with reduced browning and acrylamide. *Plants (Basel)* 12, 379. doi: 10.3390/plants12020379.

Vírusrezisztens gazdasági növények létrehozása genomszerkesztés segítségével

Havelda Zoltán

A vírusos fertőzések során kialakuló betegségtünetek – csökkent termés képződés, a fertőzött ültetvények gyors leromlása, a termények esztétikai és minőségi károsodása – miatt jelentős károkat szenved a mezőgazdaság. A gazdasági veszteség megközelítően 10-15%, amely világviszonylatban kb. 20.000 milliárd forintnyi összegnek felel meg évente. **A vírusfertőzött növény megvédése**, ellentétben a gombás vagy baktériumos megbetegedésekkel, **növényvédő szerek használatával nem lehetséges**. A védekezés egyik megoldása azoknak a rovaroknak vagy más vektorszervezeteknek a gyérítése, amelyek hordozóként felelősek a vírusok egyik növényről a másra történő terjedéséért. Ez a kultúrák kémiai védelmét jelenti komoly gazdasági és környezeti terheléssel. **A legjobb védekezési stratégia a vírusfertőzésnek ellenálló gazdasági fajták termesztése.**

Termesztett növényeink nemesítési folyamata során elsődlegesen a termés minőségének és mennyiségének növelése volt a cél. A nemesítés során azonban a vad növényekre jellemző kórokozókkal, így a különböző vírusokkal, szembeni ellenálló képesség nagy része elveszett. Ennek következtében modern, értékes, fajtáink védtelenül állnak a globalizáció és a klímaváltozás miatt egyre sokfélébb és az adott területen soha nem látott növényi vírusokkal szemben. **A megoldás a vírus-ellenállóságért felelős tulajdonság átvitele a már nemesítés során kialakult értékes, termesztett fajtákba.** Az egyik lehetőség, hogy régebbi, a kor igényeinek már nem megfelelő, de ellenálló fajtákhoz nyúlunk vissza és a **hagyományos keresztezéses nemesítés** eszközeivel az azokban még meg található rezisztenciaforrásokat bevisszük az új fajtákba. Ez a feladat munkaigényes, költséges és ami még fontosabb, akár **évtizedeket is igénybe vevő folyamat** lehet.

A hatékony megoldást egyes esetekben a **biotechnológia** kínálhatja. A **GMO technológiák** hatékony vírus-ellenállóságot képesek előidézni azonban használatuk társadalmi szinten jelenleg **nem kívánatos és nem lehetséges**. Ezt a problémát oldhatja fel a biotechnológia **új vívmánya a genomszerkesztés**. A genomszerkesztés célzott genetikai megváltozásokat képes előidézni, amelyek nem járnak idegen génszakaszok beépítésével.

Munkafolyamatok, amelyek szükségesek a genomszerkesztéssel előállított új fajták létrehozáshoz.

1. Alap- vagy feltáró kutatások

Az alapkutatások során vizsgálni kell a vírusok molekuláris felépítését, szaporodását és a vírus-növény kapcsolat bonyolult és komplex egymásra hatását. A különböző vírus-gazda kapcsolatok vizsgálata feltárhatja, hogy az adott vírus milyen gazdanövény

komponenseket/fehérjéket használ fel saját szaporodásához és terjedéséhez. Különösen fontos a **természetes rezisztenciák** molekuláris hátterének vizsgálata. Ezek a kutatások olyan géneket képes azonosítani, amelyek alkalmasak hatékony vírusrezisztenciák előidézésére.

2. **Alkalmazott kutatások**

Az alapkutatások eredményeit felhasználva, pl. az azonosított rezisztenciagén elsődleges szerkezetének ismeretében, képesek lehetünk a genomszerkesztés segítségével a **rezisztenciát biztosító génváltozat kialakítására gazdaságilag fontos fajtáinkban**. Gyakran a rezisztencia egy növényi gén aktivitásának hiánya miatt alakul ki, így a változtatások nem adnak semmit hozzá genomtartalomhoz csak egy természetben is előforduló mutációs variánst hoznak létre. A létrehozott új, **nem GMO** variánst tesztelni kell a kialakított vírus-rezisztenciára és egyéb, a fajtára jellemző jellegekre.

Két példa, az árpanövény vírus-ellenállóságának fokozására genomszerkesztéssel:

- Az eukarióta translációs iniciációs faktor 4E (EIF4E) jól ismert érzékenységi faktor potyvirus, az egyik legnépesebb növényi víruscsalád, fertőzésekkel szemben. Az árpa sárgamozaik vírus (BaYMV) és az árpa enyhemozaik vírus (BaMMV) bymovírusok által okozott betegségek akár 50%-os termésveszteséget is előidézhetnek őszi árpában. A fertőzés ősszel a fiatal árpanövények gyökerein keresztül történik egy vírusvektor talajparazita által. A vírusfertőzés kezdeti szisztemikus szakasza során sárgamozaik betegség tünetek jelennek meg majd később levélhalás és fokozott fagykárérzékenység alakul ki. A *HvEIF4E* gén *rym4* és *rym5* variánsainak köszönhetően a jelenlegi európai ősziárpa-fajták több mint kétharmada ellenáll a BaYMV és a BaMMV fertőzéseknek. Azonban a BaYMV és a BaMMV számos törzse képes áttörni a *rym4* és *rym5* variánsokon alapuló rezisztenciát. Ezért égető szükség van új, rezisztenciát előidéző EIF4E variánsok létrehozására. **Az „Igr1” ősziárpa-fajta fogékony a BaMMV/BaYMV fertőzésekre.** A kísérletekben ezt a fogékony fajtát használták fel az *EIF4E* gén célzott megváltoztatására CRISPR/ Cas9 genomszerkesztési rendszer felhasználásával. **A célzott genomszerkesztés során kis változtatásokat idéztek elő a *EIF4E* gén elsődleges szerkezetében megakadályozva cél fehérje képződését.** A célzottan előidézett génmódosítások EIF4E fehérje funkcióvesztéses mutáns árpanövényeket hoztak létre. Ezek a **módosított „Igr1” árpanövények genetikailag stabilak voltak és teljesen ellenállóak a BaMMV-vel történő, provokált fertőzésekkel szemben.** Az EIF4E hiányos növények normális növekedést mutattak, azonban bevitt mutáció hatására a termésmennyiség csökkent.

- A BaYMV és BaMMV fertőzésekkel szembeni küzdelem egy újabb eljárás kidolgozáshoz is vezetett. Ahogy előzőleg tárgyaltuk, egyes vírustörzsek képesek hatékonyan áttörni a legszélesebb, az *EIF4E* gén mutációin alapuló, rezisztenciát. A rezisztenciatoró vírustörzsek megjelenése **új típusú rezisztencia faktorok** azonosítását követeli. Az **őszi árpa tájfajták és az árpa vadon élő rokonainak vizsgálatával egy új rezisztencia forrást azonosítottak**, a *PROTEIN DISULFIDE ISOMERASE LIKE 5-1 (PDIL5-1)* gén variánsainak formájában. **PDIL5-1** variánsok képesek **teljes rezisztenciát** biztosítani minden BaYMV és BaMMV törzssel szemben. A *PDIL5-1* gén minden eukarióta esetében erősen konzervált, azonban eddig az árpa az egyetlen olyan faj, amelynél PDIL5-1-alapú vírusrezisztenciát tártak fel. Míg a **PDIL5-1 alapú rezisztenciaforrás** hagyományos keresztezéssel történő **átvitel** értékes fajtákba nehéz és időigényes, a nem kívánt kapcsolt tulajdonságok problémája miatt, **genomszerkesztéssel ez a feladat gyorsan és költséghatékonyan megoldható**. A CRISPR/Cas9 genomszerkesztő rendszer felhasználásával **célt mutációkat hoztak létre két fogékony árpa fajtában a PDIL5-1 génben**. Ezek változtatások hasonlóak voltak az ellenálló tájfajtákban található *PDIL5-1* gén variánsokhoz. Kísérletek során létrehozott genetikailag stabil, **GMO mentes**, árpanövények **nagyfokú rezisztenciát mutattak a BaMMV fertőzésekkel szemben**. Fontos további eredmény, hogy üvegházi körülmények között a **vírusrezisztens mutánsok nem mutattak változást a növekedés és a termőképesség szempontjából**.

Irodalom:

Hoffie *et al.* (2021) *Front. Genome Ed.* 3, 784233.

Hoffie *et al.* (2023) *Plant Biotechnol J.* 21(2):331-341. 1.

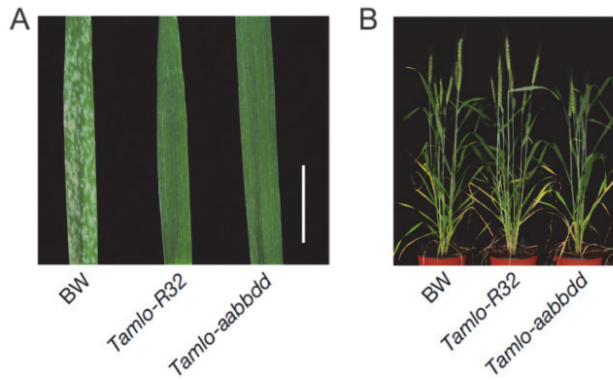
Gombarezisztencia kialakítása genomszerkesztéssel gazdasági növényekben

Kis András

A növénygenetikai kutatások már korábban is nagy hangsúlyt fektettek az úgynevezett fogékonysági (S – susceptibility) gének feltérképezésére, azok elrontására, vagy valamilyen módon történő csendesítésére tartós és széles spektrumú rezisztencia elérése érdekében. Az S-gének általában valamilyen, a kórokozók által a fertőzés és/vagy a kolonizáció során hasznosított terméket kódolnak, melyek hiányában nem képes létrejönni a gazda-patogén kapcsolat.

Burgonyában (*Solanum tuberosum* cv. 'Desiree') korábban sikeresen alakítottak ki ellenállóságot a *Phytophthora infestans* gomba által okozott burgonyavész betegséggel szemben RNS interferencia (RNSi) alkalmazásával. Ennek során az *StDMR6* S-gén mRNS kódja alapján készített RNSi génkonstrukciót építettek a növény genomjába. A konstrukcióról átíródó RNS molekuláról nem kódoló, kis interferáló RNS-ek (small interfering, siRNS) keletkeznek, melyek a növényi génszabályozási- és immunrendszerként is szolgáló RNSi útvonalba csatornázódnak és felismerik a velük komplementer *StDMR6* génről átíródó RNS-eket, ami azok lebomlásához, a gén lecsendesítéséhez vezet. A genomszerkesztés elterjedésének köszönhetően a különböző transzgénikus úton történő géncsendesítések helyét átvették a gén közvetlen elrontását, kiütését (knock-down) lehetővé tevő technikák, melyek nem igénylik egy idegen génkonstrukció jelenlétét a növényben. A fentebb leírt rezisztenciát CRISPR/Cas9 technológiával is sikerült kialakítani az *StDMR6* génen létrehozott célzott mutációkkal.

Kutatások során számos, a növénynemesítésben felhasznált, recesszíven öröklődő rezisztenciagénről kiderült, hogy azok valójában egy S-gén természetes úton létrejött inaktív (mutáns) változatai. Ilyen az árpában azonosított *MLO* (*Mildew resistance locus O*) gén mutáns, funkcióvesztett változata, amely széles spektrumú rezisztenciát okoz a *Blumeria graminis* f. sp. *hordei* lisztharmatgombával szemben. A génről kiderült, hogy az evolúció során a funkciója konzerválódott, tehát mind kétszikűekben (pl. *Arabidopsis thaliana* L.), mind egyszikűekben (pl. *Triticum aestivum* L.) azonos szerepet tölt be. A gén homológját búzában (*TaMLO*) is azonosították és TALEN (Transcription activator-like effector nucleases) génszerkesztési technológiával kiütötték. A búza hexaploid növény ($2n=6x=42$), ami azt jelenti, hogy három különböző gabonafaj hibridizációjának eredményeként jött létre. Emiatt a kutatóknak mind a három genomon (A, B, D) kódolt *MLO* gént szükséges volt kiütniük a lisztharmat-rezisztencia kialakításához (1. kép).



1. kép: *Tamlo* mutáns búzánövények. A) Mutáns búzánövények levelei a lisztharmatfertőzést követően. B) A mutánsok növekedésének összehasonlítása. BW – Bob white búza kontroll; *Tamlo-R32* – Tamlo deléciós mutáns, *Tamlo-aabbdd* – deléció mentes Tamlo mutáns búzavonal (Li et al., 2022 nyomán)

A különböző S-géneknek, mint ahogy az *MLO* génnek is természetesen nem az az elsődleges szerepük, hogy kapuként szolgáljanak az egyes kórokozók számára, hanem alapvetően a növényi szervezetben valamilyen fontos vagy kevésbé fontos biológiai szerepet töltenek be. Inaktivációjuk során ezért akár gazdaságilag hátrányos tulajdonságok is kialakulhatnak. Az *MLO* gén esetében ez a növény magasságának, és maghozamának csökkenésében nyilvánul meg. Ugyanakkor felfedeztek olyan *MLO* génmutánsokat (*mlo-11*) is, melyek lisztharmatrezisztensek, de nem mutatnak fenotípusos eltérést a vad típusú növényhez képest. A genomszerkesztéssel létrehozott búza *Tamlo* mutánsok esetében is jelentkezett ez a negatív pleiotróp hatás, ugyanakkor felfedeztek egy olyan vonalat (*Tamlo-R32*), amely szabályos növekedést és a vad típushoz képest valamivel még magasabb terméshozamot is mutatott. E növény esetében a TALEN-nel indukált mutáció egy nagyobb DNS darab (304.374 bázis) kiesését (deléció) eredményezte a búza B genomján jelenlévő *TaMLO* génből. A DNS deléció következtében létrejött kromoszóma átrendeződésnek köszönhetően aktiválódott egy szomszédos gén (*TaTMT3B*), amelyről bizonyították, hogy a *Tamlo* mutánsban létrejött negatív pleiotróp hatásokat kompenzálja. A kutatók később ezt a speciális *Tamlo-R32* mutánst CRISPR/Cas9 rendszerrel is létrehozták, több, gazdaságilag jelentős elit búzavonalban, DNS mentes technológiával.

A *Fusarium graminearum* gomba által okozott gabona kalászfuzáriózis nemcsak a jelentős termésvesztés kialakítása miatt tölt be fontos szerepet a rezisztencianemesítésben, hanem az élelmezési szempontból veszélyes gombatoxinok (pl. DON) jelenléte miatt is, melyek káros hatásait (pl. mérgezés, rákkeltő hatás, hormonális változások, termékeltenség stb.), bizonyították az állati és humán szervezetre tekintettel egyaránt. Ezen felül az egyes gombatoxinok határérték feletti mennyisége esetén a termés értékesítése sem lehetséges. A növénynemesítés számára rendelkezésre állnak különböző *F. graminearum* gombával szemben ellenállóságot biztosító rezisztencia lókuszok, ugyanakkor ezek átvitele egy korszerű, elit

búzavonalba hosszú éveket vesz igénybe. Legtöbb esetben nem ismert, hogy a rezisztencia lókuszon mely gén/gének okozzák a rezisztenciát és az milyen mechanizmus során valósul meg. Egy friss kutatásban az *Fhb1* nagy hatású rezisztencia lókuszt esetében bizonyították, hogy az a *TaHRC* gén, inaktív, deléciós mutánsát tartalmazza, majd CRISPR/Cas9 technológiával egy fogékony fajtában (Bobwhite) sikerült a gén kiütésével magas fokú ellenállóságot mutató vonalat létrehozniuk (2. kép).



2. kép: Kalászfuzáriózis-ellenálló búzavonalak. A) *Fhb1* rezisztencia lókuszt tartalmazó (Rezisztens) és nem tartalmazó (Fogékony) búzavonal termése fuzárium fertőzést követően. B) Fuzárium fertőzésen átesett kalászkok. *CRISPR* – *TaHRC* gén kiütött mutáns, *BW* – Bobwhite fogékony búzafajta (Su et al., 2019 nyomán)

Az itt bemutatott biotechnológiai stratégiák jelentősen hozzájárulhatnak a mezőgazdasági vegyszerfelhasználás globális szintű csökkentéséhez és a rohamosan növekvő élelmiszerigény kiszolgálásához az ellenállóbb és ez által nagyobb termőképességű növényfajták létrehozásával.

Irodalom:

- Sun, K., Wolters, A. M. A., Vossen, J. H., Rouwet, M. E., Loonen, A. E., Jacobsen, E., ... & Bai, Y. (2016). Silencing of six susceptibility genes results in potato late blight resistance. *Transgenic research*, 25, 731-742.
- Kieu, N. P., Lenman, M., Wang, E. S., Petersen, B. L., & Andreasson, E. (2021). Mutations introduced in susceptibility genes through CRISPR/Cas9 genome editing confer increased late blight resistance in potatoes. *Scientific Reports*, 11(1), 4487.
- Li, S., Lin, D., Zhang, Y., Deng, M., Chen, Y., Lv, B., ... & Gao, C. (2022). Genome-edited powdery mildew resistance in wheat without growth penalties. *Nature*, 602(7897), 455-460.
- Su, Z., Bernardo, A., Tian, B., Chen, H., Wang, S., Ma, H., ... & Bai, G. (2019). A deletion mutation in *TaHRC* confers *Fhb1* resistance to *Fusarium* head blight in wheat. *Nature genetics*, 51(7), 1099-1105.

Genomszerkesztés az egészségesebb, ellenállóképesebb és termékenyebb haszonállatok létrehozása érdekében

Gócza Elen

A genetikai és genomikai technológiák fejlődése évtizedek óta kulcsszerepet játszik a mezőgazdasági haszonállatok termelékenységének javításában. A genomszekvenálás, és genomszerkesztés területén bekövetkezett fejlődés, az adatgyűjtés és adattárolás területén bevezetett digitalizáció, az analitikai eljárásokban alkalmazott technológia fejlesztések, az automatizált tartási körülmények lehetőséget teremtettek a precíziós állattenyésztés bevezetésére. Ezzel együtt lehetőség nyílt a környezeti hatások csökkentésére, az állatok egészségének és jólétének növelésére (Tait-Burkard et al., 2018).

A genetikai fejlesztések eredményeként hatékonyabb állattermék-előállítás valósulhatott meg úgy, hogy közben kisebb káros hatást gyakoroltak a környezetre. A funkcionális genomikai kutatások is felgyorsultak. Mára sikerült a legfontosabb mezőgazdasági haszonállatok genomját is megszekvenálni (Jones and Wilson, 2022).

A haszonállatok hatékony genetikai módosításának megvalósítása évtizedek óta a kutatások középpontjában áll. A legfontosabb célok a táplálékellőállítás hatékonyságának növelése, az állatok egészségének és jólétének javítása, a betegségekkel szembeni jobb ellenállóképeség kialakítása, valamint a környezeti lábnyom csökkentése (Raza et al., 2022).

A genetikai módosítások területén nagy előrelépést jelentett olyan új genomszerkesztési technológiák megjelenése, mint a cink-ujj nukleázok (ZFN, Zinc Finger Nucleases) (Urnov et al., 2010), a TALEN (Transcription Activator-Like Effector Nucleases) (Joung and Sander, 2013), illetve a CRISPR (Clustered Regularly Interspaced Short Palindromic Repeats) /Cas9 nukleáz technikák. Ezzel pontosabb és hatékonyabb genomszerkesztés vált lehetővé, mint a hagyományos transzgenikus technikák alkalmazásával (Knight et al., 2015). A genomszerkesztési technológia lehetővé teszi azt, hogy az állatok genomjába egyetlen generációs ciklus alatt hasznos szekvencia-variánsok kerülhessenek be. A célzott genetikai változtatást el lehet végezni sejtenyészetekben, majd ezekből a sejtekből sejtmagátültetéses klónozást alkalmazva lehet létrehozni állatokat. A klónozási lépés azonban nagyon rossz hatékonysággal működik, és az utódokban gyakran fejlődési problémák jelennek meg. Az egysejtes embriók (zigóták) közvetlen módosítása is lehetséges, ezzel a klónozás során felmerülő problémák kiküszöbölhetővé válnak.

A fejezet következő részeiben néhány, a haszonállatok esetében a közelmúltban létrehozott sikeres genomszerkesztési példát fogunk bemutatni.

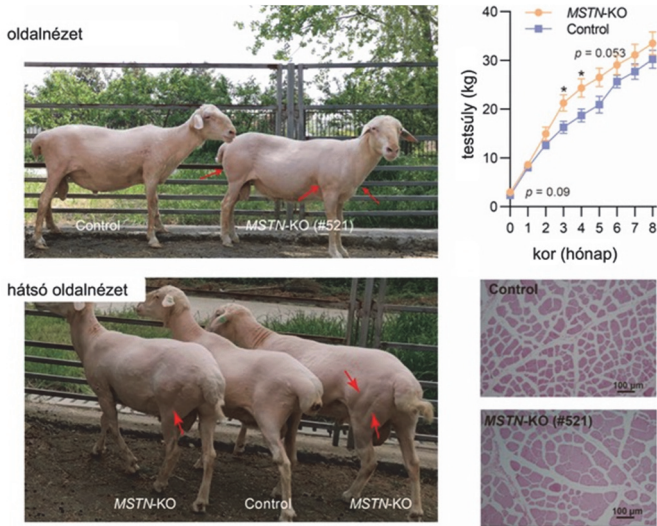
A miosztatin gén (MSTN) módosításával létrehozott genomszerkesztett állatok

A genomszerkesztés lehetőséget kínál arra, hogy helyspecifikus, pontosan megtervezett változtatásokat hajtsunk végre az állatok genomjában a termelékenység, a betegségekkel szembeni ellenállóság növelése érdekében.

A miosztatin gén (MSTN) gyakori célpontja a növekedés és izomfejlődés fokozására irányuló kutatásoknak (Grobet et al., 1997; Han et al., 2014; Mosher et al., 2007; Roberts and Goetz, 2003; Wang et al., 2015). Elsőként a szuperizmoltságot mutató fehér-kék belga, majd a piemonti szarvasmarhákban, valamint a texel juhajtában sikerült azonosítani azt, hogy a miosztatin génben található mutáció okozza a fokozott izomnövekedést. A genetikai változások közvetlenül a miosztatin génben történnek, egy 11 bázispáros deléció fehér-kék belga, egy bázist érintő nukleotid polimorfizmus a piemonti szarvasmarhákban. Érdekes módon a texel juhajtája esetében a miosztatin gén nem kódoló régiója (UTR) tartalmaz olyan mutációt, ami megzavarja a miosztatin mRNS-éről történő fehérje átírást reguláló mikroRNS-ek általi szabályozását (Ge et al., 2020).

A fent említett kutatások ismértében nem meglepő, hogy a miosztatin gén lett az elsődleges célpontja a genomszerkesztési eljárásoknak a haszonállatok körében, mivel a miosztatin esetében egyetlen gén működési hibájának jelentős hatása van egy gazdaságilag fontos tulajdonságra. Számos közlemény jelent meg a miosztatin gént célzó sikeres genomszerkesztésről: juhok (Guo et al., 2023), halak (Gutási et al., 2023), nyulak (Zheng et al., 2022), szarvasmarhák (Hai et al., 2023) esetében. A sertés miosztatin génben is sikerült deléciókat létrehozni cink-ujj nukleázt alkalmazva a miosztatin gén 3-as exonjára tervezett próbával. Az eljárás hatékonysága azonban alacsony volt, a miosztatin LOF (MSTN^{-/-}) genotípussal rendelkező malacok nem voltak életképesek (Dilger et al., 2022).

Kínában a magas termelékenységéről ismert Hu juhok estében számos próbálkozás történt arra, hogy javítsák a növekedési paramétereiket, illetve a húsminőségüket. Guo és munkatársai 2023-ban számoltak be arról, hogy sikerült miosztatin génkiütött Hu juhok létrehozása (Guo et al., 2023). 70 embriót injektáltak Cas9 mRNS-sel és olyan shRNS-el, amely a juh miosztatin (MSTN) gén 3. exonját célozta meg. Az injektált embriókat 13 recipiensbe ültették vissza. Öt recipiensből összesen tíz bárány született meg. Ezek közül kilenc MSTN génkiütött bárány volt. Off-target hatásokat nem találtak. Ezek az MSTN-KO Hu juhok „kettős izmoltságú” (DM) fenotípust mutattak, amelyet magas testsúly, erős izmoltság, jól látható izomhipertrófia jellemez (1. ábra). Az MSTN génkiütött Hu juhok esetében potenciális lehetőség van arra, hogy emberi fogyasztásra alkalmasnak minősítsék azokat alapos molekuláris jellemzés, a fenotípusos adatok értékelése, állatjóléti, élelmiszerbiztonsági és környezeti kockázatok elemzése után.



1. ábra: MSTN-KO és kontroll juhok (Guo et al., 2023)

A madárinfluenza-fertőzés elleni védettség kialakítása az ANP32 gén genom szerkesztésével

A CRISPR/Cas rendszerek segítséget nyújthatnak vakcinák és diagnosztikai alkalmazások kifejlesztésében is. Az állati genomok közvetlen szerkesztésével a gazda-vírus interakciók tanulmányozhatók, illetve a vírusfertőzésekkel szemben ellenálló állatokat lehet létrehozni. Ezáltal javulhat az állatjólét, és csökkenhetnek a gazdasági veszteségek (Dmochewitz and Wolf, 2015; Söllner et al., 2021; Whitworth et al., 2016).

CRISPR/Cas9 rendszert alkalmazva sikerült Marek-betegségnek ellenálló tyúkok létrehozása, rekombináns vakcinák kifejlesztése a Pseudorabies vírus (PRV) és a madárinfluenza ellen is (Park et al., 2020; Söllner et al., 2021).

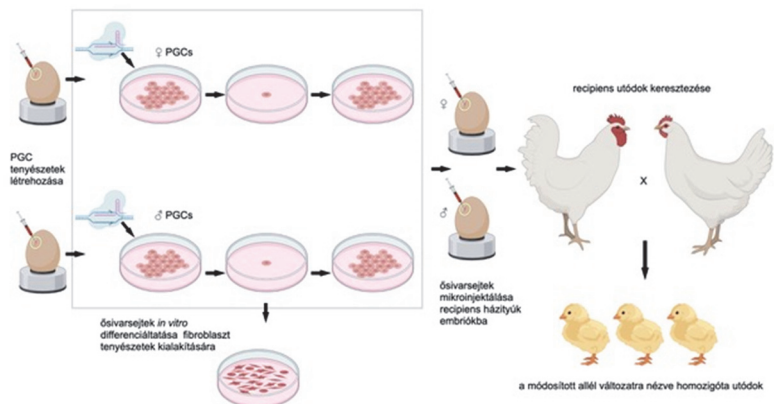
A madárinfluenza komoly globális fenyegetést jelent mind a házi kedvencekre, mind a vadmadár populációkra. Egyedül az Egyesült Királyságban a jelenlegi H5N1 madárinfluenza járvány több millió tengeri madarat pusztított el, és hatalmas veszteséget okoz a baromfiiparnak. Ugyan ritkán, de előfordulhat, hogy a madárinfluenza vírusban létrejövő mutációk lehetővé teszik, hogy embereket is megfertőzzön a vírus, súlyos betegséget okozzon. A génmódosítás ígéretes lehetőséget kínál vírusrezisztencia kialakítására, amely generációról generációra öröklődhet, védelmet nyújtva a baromfiakra, csökkentve a kockázatokat az emberekre és a vadmadarakra nézve.

Mike McGrew csoportjának sikerült az ANP32A fehérje génjének kiütésével (Idoko-Akoh et al., 2023) madárinfluenza-rezisztens házityúkok létrehozása. Az ANP32A egy, a gazdasejtet megtámadó madárinfluenza-vírus szaporodásában fontos fehérjét kódol. Megakadályozva az ANP32A fehérje

termelődését, a vírus nem tud osztódni. Az ANP32A génszerkesztett tyúkok esetében nem mutatkozott káros egészségügyi, vagy a termelésben hátrányos hatása a módosításnak. A sikeres genomszerkesztés eredményeként a génszerkesztett utódok ellenállóak voltak a madárinfluenza-fertőzéssel szemben más fertőzött madarakkal való érintkezést követően is. Ezek az adatok tehát azt mutatják, hogy ez a stratégia ígéretes lehetőséget nyújt a madárinfluenza terjedésének csökkentésére a baromfitelepeken, s megvéd a vándorló madarak által esetlegesen behozott fertőzésekkel szemben is.

Ha direkt fertőztek tyúkokat, 103 fertőzött tyúkból csak egyetlen egy fertőződött meg. Azonban a magasabb dózissal történő közvetlen beoltást követően a génmódosított madarakban is fertőzés következett be. Ez rámutatott arra, hogy minden esetben fontos a rezisztens génszerkesztett állatok tüzetes vizsgálata, hogy kizárhassák az utólagosan alkalmazkodó vírus evolúciójának lehetőségét. A kutatók ezt követően mindhárom ANP32 családtagot kiűtötték a PG sejtekben. A 3-as gént kiűtött PGC tenyészetekből fibroblaszt tenyészeteket hoztak létre. Ezekben a sejtekben már nem volt képes a madár influenza vírus felszaporodni. Ezekből a PGC tenyészetekből jelenleg még nem hoztak létre genomszerkesztett tyúkokat (2. ábra).

Ahhoz, hogy hatékonyan lehessen létrehozni genomszerkesztett madarakat, fontos olyan recipiens nőstények létrehozása is, amelyek sterilek. Ehhez is a genomszerkesztés technikája nyújtott segítséget. Az iCaspase9 genom szerkesztett tyúkvonalat szintén Mike McGrew és munkatársai hozták létre (Ballantyne et al., 2021). Ezt az indukálható kaszpáz-9 (iCaspase9) fehérje segítségével, a PGC vonalban a DAZL gén utolsó kódoló exonjának 3'-végére tervezett a CRISPR/Cas9 génkiütéssel és az iCaspase9 konstrukciónak annak helyére történő beépítésévé sikerült elérni. Ezekben az iCaspase9 recipiens tyúkokban az embrionális fejlődés során indukálni lehet a DAZL gén kivágását, így az ezekből kifejlődő, génkiütött embrióknak nem lesznek saját ivarsejtjei, csak a beinjektált donorsejtekéből jöhetnek létre ivarsejtek.



2. ábra: Homozigóta ANP32A N129I-D130N csirke tenyésztési stratégiája

A hím és női PCG-kultúrák egyedi csirkeembriókból izolált vérből lettek létrehozva. A PG sejtekben végrehajtott módosítást követően azokat felszaporították, majd elemezték a génszerkesztés sikerességét. Az editált PCG-eket fibroblaszt-szerű sejtekké differenciáltatták a madárinfluenza teszthez. A letesztelt PG sejteket iCaspasi9 gazdaembriókba fecskendezték, amelyeket kikelésig inkubáltak. Az utódokat ivarérett korban párosították egymással. A genetikai módosítást homozigóta formában tartalmazó utódokat kaptak (Idoko-Akoh et al., 2023; Panda and McGrew, 2022).

Világos szőrszínű Holstein-fríz szarvasmarhák létrehozása embrió közvetítette genomszerkesztéssel

A tejtermelő gazdaságokban különféle stratégiákat alkalmaznak, hogy az állatok kevésbé legyenek kitéve a magas környezeti hőmérséklet okozta negatív hatásoknak, például árnyékolás, szellőztetés, vízhűtés, ivóvíz kihelyezése, ventilátorok beépítése, permetezők alkalmazása révén. Azonban ezek a stratégiák rendkívül költségesek ahhoz, hogy gyakorlatban gazdaságosan alkalmazhatók legyenek kisüzemi körülmények között is. A globális felmelegedés hatása azonban egyre nyilvánvalóbb, és a tejtermelő gazdák szenvedhetik el a legnagyobb gazdasági veszteségeket. Ezért jobb hőtűrő képességgel rendelkező szarvasmarhafajták tenyésztése került előtérbe. Sajnos azonban nehéz hőtűrő, egyben jól tejlő szarvasmarhákat találni. Bár előrelépés történt a hőtűrésben szerepet játszó gének feltérképezésében, de a jó tejtermelő és hőtűrő képességre történő együttes szelekció nem egyszerű. Az köztudott, hogy a fekete szőrzettel rendelkező változatok kevésbé tolerálják a hőstresszt. A hőtűrő trópusi marhafajták többsége általában világos színű, olyan bundával, amely visszaveri a beérkező napfény nagy részét. Egy természetben előfordulású gént találtak, amelyben meglévő mutáció befolyásolja a színárnyalat alakulását, világosítja az adott színt. Ezt a variánst a premelanoszóm fehérje (PMEL) esetében talált mutáció befolyásolja a színárnyalat alakulását, világosítja az adott színt. Ezt a variánst először a Highland és Galloway fajta szarvasmarhákban azonosították, később a zimbabwei Tuli marhában is kimutatták. A PMEL p.Leu18del típusú del/del jellegű változat miatt világosabb színű a japán barna marha bundaszíne (Kimura et al., 2022). A heterozigóták bundaszíne köztes volt különböző arányokkal. Mivel a p.Leu18del del allélt genetikailag távoli szarvasmarhafajtákban is észlelték, úgy gondolták, hogy ez a polimorfizmus felhasználható lehet a szarvasmarha szőrzet színének módosítására.

Korábban már próbálkoztak p.Leu18del PMEL szekvenciavariánst létrehozni genomszerkesztett sejtekből, sejtmag átültetéses klónozással Holstein-fríz szarvasmarhákban. Egy szürke és fehér színű Holstein-fríz borjút kaptak (Laible et al., 2021). A borjú négy hét után elpusztult, feltehetően a klónozással kapcsolatos komplikációk miatt.

Később Wei és munkatársai embrióközvetített TALEN genomszerkesztést alkalmaztak, illetve biopsziát is végrehajtottak a fejlődő

embriókban, annak ellenőrzésére, hogy a genomszerkesztés sikeres volt-e (Wei et al., 2022, 2023).

Ugyan találtak a mutációra mozaikos utódokat is, de több nem mozaikos p.Leu18del mutációra homozigóta genotípussal rendelkező borjút is sikerült létrehozni (1. kép). Ezek között a borjak között voltak magas genetikai értékű szülőktől származó borjak is. A borjak szőrzete világosbarna foltokat tartalmazott, igazoltan alacsonyabb hőenergia-elnyelést mutatott, mint a kontroll csoport egyedei.

2023-ban az Egyesült Államok Élelmiszer- és Gyógyszerügyi Hivatala (FDA) bevezette az "alacsony kockázatú besorolást", annak elősegítésére, hogy engedélyezhessék később azoknak az élelmiszereknek a forgalmazását, amelyeket olyan szarvasmarhákból származnak, amelyeket annak érdekében hoztak létre, hogy jobban tudjanak alkalmazni a klímaváltozás következtében fellépő negatív hatásokhoz. Erre az alacsony kockázatú besorolásra akkor lenne lehetőség, ha az a génváltozat, amit genomszerkesztéssel hoztak létre, megtalálható génváltozat lenne a természetben is előforduló, ugyanabba a fajba tartozó állatok esetében is.



1. kép: A mozaikos embrióból származó 25-ös állat csak néhány kisebb szürke és fehér folttal rendelkezett, de a szőrzete nagyobb részt sötét színezetet mutatott, ami azért észrevehetően világosabb volt, mint a kontroll állaté. A teljesen p.Leu18deldel génkiütött borjak 23, 26 és 27 világosszürke-fehér foltosak lettek, a várt fenotípust mutatva.

Irodalom:

Ballantyne, M., Woodcock, M., Doddamani, D., Hu, T., Taylor, L., Hawken, R. J. and McGrew, M. J. (2021). Direct allele introgression into pure chicken breeds using Sire Dam Surrogate (SDS) mating. *Nat Commun* 12,.

Dilger, A. C., Chen, X., Honegger, L. T., Marron, B. M. and Beever, J. E. (2022). The potential for gene-editing to increase muscle growth in pigs: experiences with editing myostatin. *CABI Agriculture and Bioscience* 3,.

Dmochewitz, M. and Wolf, E. (2015). Genetic engineering of pigs for the creation of translational models of human pathologies. *Animal Frontiers* 5, 50–56.

- Ge, L., Dong, X., Gong, X., Kang, J., Zhang, Y. and Quan, F. (2020). Mutation in myostatin 3'UTR promotes C2C12 myoblast proliferation and differentiation by blocking the translation of MSTN. *Int J Biol Macromol* 154, 634–643.
- Grobet, L., Martin, L. J. R., Poncelet, D., Pirottin, D., Brouwers, B., Riquet, J., Schoeberlein, A., Dunner, S., Mnissier, F., Massabanda, J., et al. (1997). A deletion in the bovine myostatin gene causes the double-muscling phenotype in cattle. *Nat Genet* 17,.
- Guo, R., Wang, H., Meng, C., Gui, H., Li, Y., Chen, F., Zhang, C., Zhang, H., Ding, Q., Zhang, J., et al. (2023). Efficient and Specific Generation of MSTN-Edited Hu Sheep Using C-CRISPR. *Genes (Basel)* 14,.
- Gutási, A., Hammer, S. E., El-Matbouli, M. and Saleh, M. (2023). Review: Recent Applications of Gene Editing in Fish Species and Aquatic Medicine. *Animals* 13,.
- Hai, C., Bai, C., Yang, L., Wei, Z., Wang, H., Ma, H., Ma, H., Zhao, Y., Su, G. and Li, G. (2023). Effects of Different Generations and Sex on Physiological, Biochemical, and Growth Parameters of Crossbred Beef Cattle by Myostatin Gene-Edited Luxi Bulls and Simmental Cows. *Animals* 13,.
- Han, H., Ma, Y., Wang, T., Lian, L., Tian, X., Hu, R., Deng, S., Li, K., Wang, F., Li, N., et al. (2014). One-step generation of myostatin gene knockout sheep via the CRISPR/Cas9 system. *Front Agric Sci Eng* 1,.
- Idoko-Akoh, A., Goldhill, D. H., Sheppard, C. M., Bialy, D., Quantrill, J. L., Sukhova, K., Brown, J. C., Richardson, S., Campbell, C., Taylor, L., et al. (2023). Creating resistance to avian influenza infection through genome editing of the ANP32 gene family. *Nat Commun* 14, 6136.
- Jones, H. E. and Wilson, P. B. (2022). Progress and opportunities through use of genomics in animal production. *Trends in Genetics* 38, 1228–1252.
- Joung, J. K. and Sander, J. D. (2013). TALENs: A widely applicable technology for targeted genome editing. *Nat Rev Mol Cell Biol* 14,.
- Knight, S. C., Xie, L., Deng, W., Guglielmi, B., Witkowsky, L. B., Bosanac, L., Zhang, E. T., Beheiry, M. E., Masson, J. B., Dahan, M., et al. (2015). Dynamics of CRISPR-Cas9 genome interrogation in living cells. *Science* (1979) 350,.
- Laible, G., Cole, S. A., Brophy, B., Wei, J., Leath, S., Jivanji, S., Littlejohn, M. D. and Wells, D. N. (2021). Holstein Friesian dairy cattle edited for diluted coat color as a potential adaptation to climate change. *BMC Genomics* 22,.
- Mosher, D. S., Quignon, P., Bustamante, C. D., Sutter, N. B., Mellersh, C. S., Parker, H. G. and Ostrander, E. A. (2007). A mutation in the myostatin gene increases muscle mass and enhances racing performance in heterozygote dogs. *PLoS Genet* 3,.
- Panda, S. K. and McGrew, M. J. (2022). Genome editing of avian species: implications for animal use and welfare. *Lab Anim* 56, 50–59.
- Park, J. S., Lee, K. Y. and Han, J. Y. (2020). Precise genome editing in poultry and its application to industries. *Genes (Basel)* 11, 1–14.
- Raza, S. H. A., Hassanin, A. A., Pant, S. D., Bing, S., Sitohy, M. Z., Abdelnour, S. A., Alotaibi, M. A., Al-Hazani, T. M., Abd El-Aziz, A. H., Cheng, G., et al. (2022). Potentials, prospects and applications of genome editing technologies in livestock production. *Saudi J Biol Sci* 29, 1928–1935.
- Roberts, S. B. and Goetz, F. W. (2003). Myostatin protein and RNA transcript levels in adult and developing brook trout. *Mol Cell Endocrinol* 210,.

- Söllner, J. H., Mettenleiter, T. C. and Petersen, B. (2021). Genome editing strategies to protect livestock from viral infections. *Viruses* 13,.
- Tait-Burkard, C., Doeschl-Wilson, A., McGrew, M. J., Archibald, A. L., Sang, H. M., Houston, R. D., Whitelaw, C. B. and Watson, M. (2018). Livestock 2.0 - Genome editing for fitter, healthier, and more productive farmed animals. *Genome Biol* 19,.
- Urnov, F. D., Rebar, E. J., Holmes, M. C., Zhang, H. S. and Gregory, P. D. (2010). Genome editing with engineered zinc finger nucleases. *Nat Rev Genet* 11, 636–646.
- Wang, K., Ouyang, H., Xie, Z., Yao, C., Guo, N., Li, M., Jiao, H. and Pang, D. (2015). Efficient Generation of Myostatin Mutations in Pigs Using the CRISPR/Cas9 System. *Sci Rep* 5,.
- Wei, J., Brophy, B., Cole, S. A., Moormann, J., Boch, J. and Laible, G. (2022). Cytoplasmic Injection of Zygotes to Genome Edit Naturally Occurring Sequence Variants Into Bovine Embryos. *Front Genet* 13,.
- Wei, J., Brophy, B., Cole, S.-A., Leath, S., Oback, B., Boch, J., Wells, D. N. and Laible, G. (2023). Production of light-coloured, low heat-absorbing Holstein Friesian cattle by precise embryo-mediated genome editing. *Reprod Fertil Dev.* 36(2) 112-123
- Whitworth, K. M., Rowland, R. R. R., Ewen, C. L., Tribble, B. R., Kerrigan, M. A., Cino-Ozuna, A. G., Samuel, M. S., Lightner, J. E., McLaren, D. G., Mileham, A. J., et al. (2016). Gene-edited pigs are protected from porcine reproductive and respiratory syndrome virus. *Nat Biotechnol* 34, 20–22.
- Zheng, Y., Zhang, Y., Wu, L., Riaz, H., Li, Z., Shi, D., Rehman, S. ur, Liu, Q. and Cui, K. (2022). Generation of Heritable Prominent Double Muscle Buttock Rabbits via Novel Site Editing of Myostatin Gene Using CRISPR/Cas9 System. *Front Vet Sci* 9,.

A génszerkesztés szabályozása (jelen és jövő) az EU-ban, kitekintés a világra

Divéki Zoltán

Az európai GMO szabályozás alapjai

A génszerkesztés EU-s szabályozása előtt álló kihívások megértéséhez rendkívül fontos az európai jogi keretrendszer történetének és működési elveinek ismerete. Már az 1970-es évek közepén több európai ország fogadott el intézkedéseket a rekombináns DNS technikák biztonságosságának garantálására, azonban ezek az intézkedések még főleg laboratóriumi tevékenységekre korlátozódtak. Az európai egységes piac megteremtésének érdekében egyre égetőbbé vált egy minden országra nézve kötelező szabályozási keretrendszer létrehozása, mely egyszerre védi az emberi egészséget és a természeti környezetet, ugyanakkor lehetővé teszi az áruk szabad mozgását. E cél érdekében jött létre az Európai Tanács 90/219/EGK¹ irányelve GM mikroorganizmusok zárt rendszerben történő felhasználásáról, illetve az 90/220/EGK irányelv a GMO-k környezetbe történő szándékos kibocsátásáról. Bár az eltérő célú felhasználások szabályozása láthatóan elválik egymástól, azonban mindkettőre igaz, hogy a mutagenezissel előállított GMO-kra nem terjed ki a hatályuk. Az évek során szerzett tapasztalatokat felhasználva mindkét irányelv számos felülvizsgálaton és kiegészítésen esett át. A zárt rendszerű felhasználásról szóló jogszabály jelenleg hatályos változata az 2009/41/EK² rendelet, mely fokozza az átláthatóságot, a várható kockázatokhoz arányosítja az adminisztratív terheket, figyelembe veszi az új génmódosítási technikákat és igyekszik megőrizni az európai biotechnológiai ipar versenyképességét. Hasonló elvek mentén fejlődött a szándékos kibocsátásról szóló irányelv is, melynek a jelenleg hatályos változata a 2001/18/EK³. Ebben – többek között – világosabban definiálták a jogszabály hatályát és a GMO-k mibenlétét; általános alapelveket fektettek le az eseti alapú ('case-by-case') kockázatértékelésre különös tekintettel a közvetlen, illetve közvetett káros hatásokra; kiterjedt piaci felügyeleti tervet írtak elő; nyilvános konzultációval növelték az eljárás átláthatóságát; adatbázist hoztak létre az engedélyezett GMO-król; világos címkézési és kimutathatósági követelményeket írtak elő. A 2001/18/EK irányelv minden GMO-ra vonatkozik felhasználási területtől függetlenül, így több, ágazat-specifikus rendelet egészíti ki. Ezek közül az 1829/2003/EK⁴ rendelet vonatkozik a géntechnológiával módosított

¹ <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/HU/TXT/PDF/?uri=CELEX:31990L0219>

² <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/HU/TXT/PDF/?uri=CELEX:32009L0041>

³ <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/HU/TXT/PDF/?uri=CELEX:02001L0018-20210327>

⁴ <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/HU/TXT/PDF/?uri=CELEX:02003R1829-20210327>

élelmiszerekre és takarmányokra, amely azért is különösen jelentős, mert az engedélyezési eljárást EU-szinten központosítja, illetve egy új, független tudományos intézményt jelöl ki az európai szintű kockázatértékelésre és kommunikációra: az Európai Élelmiszerbiztonsági Hatóságot (EFSA).

Az EU-s GMO szabályozásnak kezdettől fogva központi eleme az elővigyázatosság elve. Ez a GMO-kkal összefüggésben lényegében azt jelenti, hogy ha egy adott GMO vagy GMO-val kapcsolatos tevékenység biztonsága alapos aggodalomra ad okot, az EU korlátozhatja vagy megtilthatja annak használatát vagy kibocsátását mindaddig, amíg a további tudományos kutatások jobban fel nem derítik a lehetséges kockázatokat.

A génszerkesztés szabályozása az EU-ban

Az EU-s GMO szabályozás alappilléreinek ismeretében könnyebb megérteni a génszerkesztés szabályozása körül kialakult élénk vitát. A 2001/18/EK direktíva úgy definiálja a GMO-t, mint olyan szervezet, az ember kivételével, amelyben a genetikai anyagot olyan módon változtatták meg, amely nem fordulna elő a természetben párosodás, illetve természetes rekombináció útján. Mivel a direktíva kiadásának időpontjában már több évtizede a piacon voltak különböző fizikai és kémiai mutagenezissel nemesített növényfajták, ezért – bár nyilvánvalóan igaz rájuk a GMO fenti definíciója – az így előállított élőlények mentesülnek az irányelv hatálya alól. Mentésüket – a növényi sejtfúzióval együtt – a hosszú ideje tartó, biztonságos használat indokolta. E szempont mentén a direktíva vízvonalas: EU-s értelemben minden, a hatályba lépése után megjelent génmódosítási technikát 'új genomi technikának' (NGT) nevezünk. A teljesség igénye nélkül ilyenek a ciszgenézis, az intragenézis és az irányított mutagenézis. Természetesen a folyamatosan megjelenő új módszerek szabályozási vonzatait hamar felismerte az EU, ezért már 2007-ben a felkérték a tagországok az EFSA-t, hogy állítson fel egy olyan munkacsoportot, mely egyrészt azonosítja azokat a technikákat melyről nem egyértelmű, hogy GMO-t eredményeznek, másrészt vizsgálja meg biztonságosságukat. Hasonlóképp az Európai Bizottsághoz tartozó Közös Kutatóközpont (JRC) is elkészítette a saját értékelését az NGT-kről 2011-ben. Az ügy további menetének az adott hatalmas lökést, hogy 2018-ban – egy repcefajta franciaországi piacra vitelén keresztül – az EU bírósága úgy döntött, hogy a génszerkesztéssel előállított élőlények is GMO-nak tekintendők, ugyanakkor nem mentesülnek a 2001/18/EK irányelv hatálya alól a hosszú ideje tartó, biztonságos használat hiánya miatt. Az ítéletre válaszul az EU Tanácsa felkérte az Európai Bizottságot, hogy 2021-ig készítse el egy tanulmányt, melyben információkat gyűjt a különböző uniós intézményektől az NGT-kkel kapcsolatban (pl. szabályozási státusz a tagállamokban, kimutatási technikák, kockázatértékelés, piaci folyamatok, etikai megfontolások stb.). Bár az

elkészült tanulmány tisztázta, hogy az NGT-ekkel nyert szervezetek az EU GMO-jogszabályainak hatálya alá tartoznak, arra a következtetésre jutott, hogy a biotechnológia legújabb eredményei, továbbá az egyes fogalmak nem egyértelmű definíciója szabályozási bizonytalansághoz vezet. Ugyanakkor az NGT-k rendkívül változatos csoportot alkotnak, ezért a biztonsági megfontolások az adott technikától, annak használatától és a keletkező termék jellemzőitől kell, hogy függjenek; így bizonyos esetekben a jelenlegi GMO szabályozás aránytalan vagy nem megfelelő. A tanulmány azt is megerősítette, hogy a jelenlegi szabályozás végrehajtási és jogérvényesítési kihívásokkal jár, különösen az idegen genetikai anyagot nem tartalmazó NGT termékek esetében. A megbízható kimutatási módszerek rendelkezésre állása ugyanis a GMO-k forgalomba hozatali engedélyezésének előfeltétele, ugyanakkor ilyen módszer nem minden NGT termék esetében biztosítható. Társadalmi szempontból a tanulmány arra a következtetésre jutott, hogy az NGT-kből nyert növényi termékek hozzájárulhatnak az EU zöld megállapodásának célkitűzéseéhez, különösen a „termelőtől a fogyasztóig” és a biodiverzitási stratégiához, valamint a fenntarthatósági célokhoz. Többkörös hatásvizsgálatot és társadalmi egyeztetést követően 2023. júliusában készült el az Európai Bizottság rendelet-tervezete⁵, mely bizonyos NGT-vel előállított élőlényekhez adna új szabályozási keretet. A tervezet hatóköre a célzott mutagenézissel és ciszgenézissel (beleértve az intragenézist is) előállított növényekre, az e növényeket tartalmazó vagy belőlük álló termékekre, valamint az e növényeket tartalmazó, belőlük álló vagy belőlük előállított élelmiszerekre és takarmányokra terjed ki. Mivel a későbbiekben ténylegesen elfogadandó rendelet több elemében is eltérhet a tervezettől, ezért itt csak a lényegesebb elemeit emeljük ki.

A tervezet definíciója szerinti NGT növények nem tartalmaznak a nemesítői génállományon kívülről származó genetikai anyagot. Azon NGT növények, melyek a természetben előfordulhatnak vagy hagyományos nemesítési technikákkal is előállíthatók (továbbá ezek utódai) az 1. kategóriába kerülnek. E növényeket hagyományos nemesítési technikákkal előállított növényekként kell kezelni, mivel egyenértékűek azokkal és kockázataik is hasonlóak. Ezáltal gyakorlatilag kikerülnek a GMO szabályozás követelményei alól, ugyanakkor bejelentési kötelezettség vonatkozik rájuk és vetőmagjukat/szaporító anyagukat jelölni kell. Az 1. kategóriába sorolhatóság feltételei molekuláris jellegűek; ezeket a tervezet egyik melléklete rögzíti. A 2. kategóriába tartozik minden olyan NGT termék, mely nem felel meg az 1. kategória követelményeinek. Ezek továbbra is a GMO szabályozás hatálya alá esnek; engedélyezésük nagy vonalakban a jelenlegi eljárás alapján történik, számos jelentős kiegészítéssel és változtatással. Ilyen például a kockázatértékeléshez szükséges információk mennyiségének eseti alapon történő meghatározása. Fontos újdonság a 2. kategóriába tartozó NGT

⁵ https://food.ec.europa.eu/document/download/c03805a6-4dcc-42ce-959c-e4d609010fa3_hu?filename=gmo_biotech_ngt_proposal_2023-411_hu.pdf

termékek engedélyezése során, hogy ha a módosított tulajdonság hozzájárul a fenntartható agrár-élelmiszeripari rendszerekhez (pl. megnövelt termés hozam; biotikus és abiotikus stresszel szembeni rezisztencia; erőforrások hatékonyabb felhasználása), akkor a rendelet szabályozási ösztönzőket vezet be (pl. gyorsított ügyintézés), továbbá lehetővé teszi a fenntarthatóságra utaló szöveg megjelenítését a termékek csomagolásán. Mind az 1., mind a 2. kategóriára vonatkozó korlátozás, hogy ezen termékek használata tilos ökológiai gazdálkodásban.

A tervezethez számos kritikai észrevétel és módosítási javaslat érkezett a tagországok részéről. Az EU Tanácsban vitatott kérdésként merült fel a biogazdálkodás és az NGT-növények együttes létezése (coexistence), annak a rendelkezésnek a hiánya, amely lehetővé tenné az uniós országok számára, hogy területükön betiltsák az NGT-növények termesztését (opt-out), valamint a szabadalmak kezelése (amely jelenleg nem szerepel a tervezet szövegében). Több miniszter hangsúlyozta, hogy a tárgyalások eredményeinek minőségét kell előtérbe helyezni a gyorsaság helyett. A spanyol elnökség számos kompromisszumos szöveget terjesztett elő, és folytatni kívánta a munkát annak érdekében, hogy a 2023. év végéig egységes álláspont születhessen. Az EU Környezetvédelmi, Közegészségügyi és Élelmiszer-biztonsági Bizottságában (ENVI) 2024. januárjára ütemezték a tervezet végszavazását.

Nemzetközi kitekintés

Észak-Amerika – Az Egyesült Államokban a GMO-szabályozást három szövetségi hivatal végzi: az USDA (US Department of Agriculture), az FDA (Food and Drug Administration) és az USEPA (United States Environmental Protection Agency), amelyek mindegyike a GMO felügyelet más-más aspektusáért felelős. Munkájuk összehangolását az OSTP (Office of Science and Technology Policy) végzi az Elnöki Hivatalban. A közelmúltban az USDA jelentős újításokat vezetett be, amely a fenntartható, ökológiai, következetes, egységes, felelős, hatékony (SECURE betűszó) biotechnológiai szabályozás néven lett ismert. A reform célja, hogy egyértelművé tegye és kezelje a biotechnológiával előállított termékek fejlődésével járó új kihívásokat, így a SECURE hatálya a génszerkesztéssel előállított növényekre is kiterjed. A SECURE értelmében a géntechnológiával módosított növények mentesülhetnek a hatósági felügyelet alól, ha az alábbi feltételek bármelyikének megfelelnek: olyan módosítások, melyek célzott DNS-törések sejt általi javításával keletkeznek, hozzáadott javító templát nélkül; célzott egy bázispárnyi cserék; olyan gén bejuttatása, vagy olyan allél kialakítása, amely már jelen van a növény génállományában; bizonyos esetekben az USDA ügyintézője mentességet javasolhat a növény számára, ha az olyan módosításokat tartalmaz, melyek hagyományos módszerekkel is elérhetőek lennének. Kanadában a növények szabályozása az 1990-es növényvédelmi törvényen alapul, és kizárólag a növény újszerű tulajdonságait

veszi figyelembe, függetlenül attól, hogy milyen technológiával állították elő. A Kanadai Élelmiszer-felügyeleti Ügynökség egy új tulajdonságot úgy határoz meg, mint „olyan tulajdonság, amely új a kanadai környezet számára, és hatással lehet a növény adott felhasználására és biztonságára a környezet és az emberi egészség tekintetében.

Dél-Amerika – A dél-amerikai országok, köztük Argentína, felkarolják a génszerkesztési eljárásokat. 2015-ben Argentína volt az első ország, amely rendeletben kezelte az NGT-k helyzetét és bevezette az "előzetes konzultációs eljárást" a génszerkesztési technikákkal előállított növényekre. A konzultáció során megvizsgálják, hogy az engedélyeztetni kívánt növény genomjában maradt-e genetikai állomány új kombinációja, azaz idegen gének. Amennyiben ilyen már található, akkor a növény nem tartozik a GMO szabályozás hatálya alá, ugyanakkor az illetékes kormányhivatal még ez esetben is további felügyeleti intézkedéseket írhat elő, ha növényben kialakított tulajdonság újdonsága azt indokolja. Az előzetes konzultáció eredményét nem hozzák nyilvánosságra, hogy megelőzzék egyes technológiák hátrányos megkülönböztetést. Brazíliában a GMO-kra vonatkozó biztonsági előírásokat a Biológiai Biztonság Nemzeti Technikai Bizottsága (CTNBio) határozza meg. Minden egyes újonnan kifejlesztett növény vagy élelmiszer kockázati szintjét eseti alapon határozzák meg. Az Egyesült Államokhoz hasonlóan az értékelés a végtermék jellemzőire összpontosít, nem pedig a létrehozásához használt eljárásra. Az NGT-k révén nyert, idegen DNS-t nem tartalmazó génszerkesztett növényeket tehát hagyományos növényként szabályozzák, és mentesülnek a GMO-szabályozási keretrendszer alól.

Ázsia – Kínában a Mezőgazdasági és Vidéki Ügyek Minisztériuma (MARA) 2022. januárjában adta ki az „Irányelvek a mezőgazdasági felhasználásra szánt génmódosított növények biztonsági értékeléséhez (próba)” című dokumentumot. Az irányelvek leegyszerűsítik a génszerkesztett növények kereskedelmi termesztésének engedélyezését: ha a kockázat alacsony, elegendő kis léptékű szántóföldi teszt elvégzése. A teszt eredménye alapján adhatják ki a termék biztonsági tanúsítványát vagy írhatnak elő nagyobb léptékű tesztet a biztonságosság megfelelő vizsgálatára. Indiában a GMO-kra az 1989-es „Szabályok a veszélyes mikroorganizmusok, génmanipulált szervezetek vagy sejtek gyártására, felhasználására, behozatalára, kivitelére és tárolására” c. törvény vonatkozik. A törvény előírásait több, specifikus útmutató egészíti ki, pl. a zárt rendszerű felhasználásra, az elkerített szántóföldi kísérletekre, az élelmiszerbiztonsági értékelésre és a környezeti kockázatértékelésre vonatkozóan. 2022-ben India Környezetvédelmi, Erdészeti és Klímaváltozási Minisztériuma bejelentette, hogy az idegen géneket nem tartalmazó, génszerkesztett növényeket mentesíti a biológiai biztonsági értékelés alól.

A precíziós gazdálkodás műszaki-informatikai feltételrendszere

Neményi Miklós

„A rohamosan fejlődő műszaki-informatikai környezet a fenntartható agrárium hatékonyságát jelentősen növeli.”

„Tápláld az emberiséget és regeneráld a termőföldet”.

Általános gondolatok

A mezőgazdaság alappillérei: a genetika, a környezet és a menedzsment. A menedzsment a természetstechnológiára és a környezetre egyaránt hat, befolyásolja, de a genotípus kiválasztásánál is érdemes figyelembe venni a rendelkezésére álló technológiai és azon belül a műszaki-informatikai feltételeket.

A menedzsment az, amely összegyűjti és feldolgozza az adatokat, figyelembe veszi a korábbi tapasztalatokat (adatbázisokat), és ezen információk alapján hoz döntéseket, alkalmazkodva a genotípushoz és a környezetvédelmi, ill. fenntarthatósági elvárásokhoz. Ma még a mesterséges intelligenciát elsősorban döntéstámogatásra használjuk, de nincs messze az idő, amikor számos feladatnál megjelenik az M2M, vagyis a géptől (a számítógéptől) a gépig (számítógépig) történnek az elemzések, a technológiai műveletek előkészítése, és az ember kimarad a döntési folyamatból. Egy ilyen rendkívül bonyolult, sztochasztikus elemeket is tartalmazó (meteorológiai hatások) rendszerrel elsősorban a mesterséges intelligencia alkalmas a nagy adatbázisok feldolgozására, és a fenntarthatósági elvárásoknak megfelelő döntésekre.

Az ún. helyspecifikus, precíziós technológiáknál szükségünk van pontos pozicionálásra, és a táblán belüli változatosságokhoz igazodó műszaki háttérre: talajművelő, vető-, ültető- és palántázó, növényvédő, tápanyagpótló és betakarító gépekre. Ezek a gépek nemcsak a művelés mélységét tudják „előírás szerint” változtatni, de a növényvédő szert, a szaporítóanyagot, a tápanyagot stb. az adott művelési elektronikus térkép alapján, vagy szenzorok használatával, pl. a növényről, annak környezetéről, a táblát körülvevő területekről, ill. a talajról szerzett információkat követve, online, vagyis számítógépes háttérrel, valós időben ki is juttatják. *Ez a precíziós, menedzserzónára alapozott, hely- és növény-specifikus növénytermesztési technológia.*

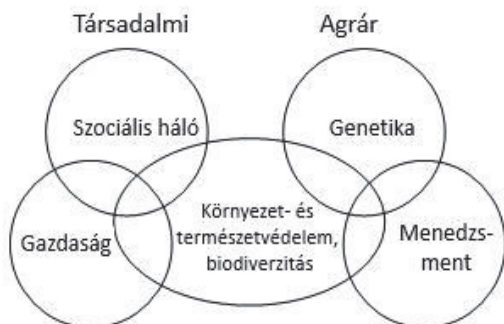
A precízió világszervezet elnöksége a következőben foglalta össze a precíziós gazdálkodás lényegét: „A Precíziós Mezőgazdálkodás olyan vezetési stratégia, amely időbeli, térbeli és egyedi adatokat gyűjt, feldolgoz és elemez, majd ezeket más információkkal összevetve a vezetési döntések támogatása érdekében, figyelembe veszi a becsült változékonyságot, az erőforrás-felhasználás hatékonyságát, a termelékenységet, a minőséget, a jövedelmezőséget és a mezőgazdasági termelés fenntarthatósági szempontjait.” Állattenyésztés területén ezt a definíciót a következőkkel lehet kiegészíteni: A *Precíziós Állattenyésztés* egy intelligens gazdálkodási forma, amely javíthatja, vagy legalább objektíven dokumentálhatja az állatjólétet a gazdaságokban.

Fenntarthatóság az agráriumban

Az általános fenntarthatóság és az agrárgazdaság fenntarthatóságának kapcsolata

A társadalmi és agrárgazdasági fenntarthatóság „oszlopainak” harmóniája több komplex rendszer koordinációját, sőt integrációját jelenti. A fenntarthatóságra általánosan elfogadott megfogalmazás: a társadalmi (szociális) fejlődés, a gazdasági növekedés és a környezetvédelem egysége.

Ezt az integrációt össze kell hangolni az agrárgazdasági fenntarthatóság „oszlopaival”: a *genetika* (kapcsolódik a termesztett genomokhoz, pl. vetésforgó), a *környezet* (amely magában foglalja a termelési egységeket, mint például növénytermesztési, kertészeti és erdészeti területeket, valamint a természetes és féltermészetes környezetünket és a közvetlen életterületünket), és a *fenntartható gazdálkodás*, ahogyan az 1. ábrán látható: a környezet és a természetvédelem, beleértve a biodiverzitást, kulcsfontosságú szerepet játszanak. Bármilyen jelentős változás történik bármelyik másik területen, legyen az pozitív vagy negatív, azt általában környezeti változások kísérik. A kérdés az, hogy milyen jellegű változások zajlanak le a szűkebb és távoli környezetünkben, hogyan lehet ezeket időben érzékelni vagy jellemzőkkel leírni, valamint hogyan lehet nyomon követni ezen jellemzők változásait. A kutatók számára külön gondot jelent, hogy a fenti elvárások folyamatosan, néha ugrásszerűen szigorodnak.



1. ábra: A társadalmi- és agrár-fenntarthatóság pilléreinek egysége

A Green Deal, a Zöld Megállapodás

Az EU 2022 utáni elvárásai az ökológiai gazdálkodással kapcsolatban: Az ökológiai jogszabályok alapján történt változások, amelyek között szerepel a minőség ellenőrzési rendszer megerősítése, amely segít tovább növelni a fogyasztók bizalmát az EU ökológiai rendszerében; új szabályokhoz kell alkalmazkodni továbbá, amelyek megkönnyítik a kistermelők számára az átállást az ökológiai termelésre; új előírások jelentek meg az importált ökológiai termékekre, amelyek biztosítják, hogy az EU-ban értékesített összes ökológiai termék azonos szabványoknak feleljen meg; az EU továbbá szélesebb körű ökológiai termékválasztékot szeretne.

Az EU 2030-ra 55%-kal kívánja csökkenteni a kibocsátásokat az 1990-es szinthez képest. Az energia-elvárások: 2030-ra Európa energiafelhasználásának 40%-át megújuló forrásokból kell előállítani. *Mezőgazdasági vonatkozások:* a program olyan célokat tartalmaz, mint a szántók 25%-án ökológiai gazdálkodás folytatása, a növényvédő szer (peszticid) használat 50%-os, a műtrágya-felhasználás 20%-os csökkentése 2030-ig. Végül a **Zöld Megállapodás** tartalmazza a **Nulla Szennyezés Akciótervet** is, amelynek célja 2050-re minden levegő-, víz- és talajszennyezés forrást meg kell szüntetni. Természetesen az EU-nak figyelembe kell vennie általános elvárásokat és követelményeket is. A Fenntartható fejlődés 2030-as Programja (Fenntartható Fejlődési Célok: SDG-s), amit az ENSZ valamennyi tagállama elfogadott 2015-ben, globális társadalmi, gazdasági és környezeti reformot képzel el.

Elvárások és a műszaki-informatikai lehetőségek

Bevezetés a precíziós növénytermesztési technológiákba

A menedzserzónák

Hagyományosan a táblán belüli domborzati, talajkémiai, -fizikai, tömörödöttségi, textúra és mikroklímikus eltéréseket és egyéb változatosságokat (pl. egy határoló erdőszáv hatását) nem vettünk figyelembe, átlagos kezelések és anyagkijuttatások történtek. Ma már a táblát *menedzserzónákra* osztjuk. A menedzserzónákon belül az egyes változók eloszlását homogénnek tekintjük. Ez azt jelenti, hogy bizonyos szóráson belül nem vesszük figyelembe az említett változásokat ezen termelési egységben. A menedzserzóna mérete 1 ha-tól akár egy növényre is csökkenhet (per plant management: egy növény kezelés). Különleges, pl. nagy homoktartalmú talajoknál a menedzserzóna lehet 1 ha-nál nagyobb. Az optimális menedzserzóna méretének meghatározásához mesterséges intelligencia: gépi tanulás, mély tanulás stb., ill. fuzzy logika használható. [1] Itt azzal a

filozófiai ténnyel találjuk magunkat szemben, hogy a részek optimuma nem azonos az egész optimumával. Amikor beavatkozunk, akkor az egész, a tábla (gazdaság) optimumát is figyelembe kell venni.

Műholdas helymeghatározó rendszerek

A földön mozgó járművek vezetővel, vagy vezető nélkül (UGV: ember nélküli, talajon mozgó jármű) és a levegőben repülő tárgyak, beleértve az UAV-kat (ember, ill. pilóta nélküli repülőgépek, drónok) helyzetének és személyek, állatok stb. pozíciójának meghatározására erre a célra működtetett műhold rendszereket használunk.

A helymeghatározásnál a pontosság szubméteren belüli, ill. **RTK-nál (Real Time Kinematics)** $\pm 1.0-1.5$ inch, $\pm 2.54, \pm 3.81$ cm. A pontos helymeghatározásnál visszatérhetünk korábbi helyünkre, ahol az adatokat felvételeztünk, és érzékelhetjük a változásokat.

A precíziós szó azt is jelenti, hogy az előírt kijuttatási tervet, ill. kezelést precízen, pontosan végrehajtjuk. Meg kell jegyezni, hogy korábban is erre törekedtünk, azonban itt egy másik tényező is megjelenik: a menedzserzőna hatásán elvárt anyagáram-változtatás (műtrágya, növényvédő szer, szaporító anyag stb.) pontosan történjen.

Az első globális, vagyis az egész bolygóra kiterjedő helymeghatározó rendszer kifejlesztését az USA Védelmi Minisztériuma kezdeményezte 1972-ben. Hivatalosan 1995-ben nyilvánították a rendszert véglegesen elkészültnek. Ettől számítható a **2. Zöld Forradalom**, illetve a helyspecifikus **precíziós növénytermelés**. Segítségével gyorsan és pontosan meghatározható egy személy vagy objektum tartózkodásának a helykoordinátája, pillanatnyi sebessége és az érzékelés időpontja. Mindez bárhol (földön, vízen és levegőben), bármikor és bármely időjárási körülmények között. Másrészről a műtrágyák és kemikáliák felhasználása a helyi körülmények, a menedzserzőnák jellemzőinek a figyelembevételével optimalizálható.

Az első **Zöld Forradalom** a Nobel békedíjas **Norman Borlaug** nevéhez fűződik, akinek a közreműködésének köszönhetően a Rockefeller alapítvány támogatásával a legkorszerűbb gabona genotípusok, műtrágyák, növényvédő szerek és gépek felhasználásával, az addig a gabona igényének csak felét termelő Mexikó önellátóvá vált. A 90-es években a precíziós gazdálkodás lehetőségeinek kihasználásával megteremtődtek a feltételek a „zöld forradalom kizöldítésének”, vagyis elindulhattunk a környezetkímélő gazdálkodás felé.

„A digitalizáció nem cél, hanem eszköz.”

A digitalizációnál az adatokat (*elektromos jelek, RGB, Infrared és termo képek, hozam és egyéb információkat adó képek, hangok, szagok, kémiai elváltozások stb.*) **bináris számokként** (0 és 1) rögzítik, illetve

átalakítják, és ezáltal a különböző formában megjelenő nagy adatbázisok (Big Data) a számítógépekkel feldolgozhatók, tárolhatók a különböző helyeket, különböző körülményeknél (pl. meteorológiai) nyert adatok kapcsolatrendszere elemezhető. A digitális készülékek, okos telefonok, laptopok vagy tabletek mindenhol jelen vannak az életünkben, lehetővé téve a hozzáférést az információhoz, és az egymással történő kommunikációt bármikor és bárhol. *A digitális technológia hatással van a társadalomra is. A már említett digitális eszközöket, valamint az applikációkat és szoftvereket használják a szociális médiák az elektronikus kereskedelem és az online bankolás is.*

Itt ki kell emelni a **felhő alapú számítástechnológiát**, amely az interneten, a később tárgyalandó **IoT (Internet of Things: a dolgok internete)** érhető el. A lényege, hogy a fájlok tárolása és a szoftverek futtatása nem a mi számítógépünkön történik. Ugyanakkor, annak ellenére, hogy az adatainkat egy „távoli” gépen tárolják, azokhoz bármikor, bárhol – ahol van internetkapcsolat – hozzáférhetünk. A növényekről, állatokról, klímáról, talajról, talaj és felszíni vizekről meghatározott időintervallumban rögzített adatok alapján az egymástól távol eső, akár több 10 km-re tőlünk megjelenő kórokozók, vagy kártevők „fogadására” fel tudunk készülni. Ezzel a korai felismeréssel pl. a növényvédelmi beavatkozások hatékonysága jelentősen növelhető, a szintetikus vegyszerek felhasználása jelentősen csökkenthető.

Ha a mezőgazdasági termelőegységet és annak természetes, vagy természetközeli környezetét vizsgáljuk, akkor egy nagyon bonyolult rendszerről beszélünk, ahol az élő-élő és az élő-élettelen egyedek közötti kapcsolatok feltárására az eddigi tapasztalataink szerint nagy adatbázisok, ún. **Big Data** szükségesek. A Big Data három alapvető jellemzővel rendelkezik:

- az eddigieknél nagyságrendekkel nagyobb adatbázis; az ilyen adatbázisok már alkalmasak az adatbányászatra, a mesterséges intelligenciára alapozott adatelemzésre;
- változatos adatok;
- nagy adatáramlási sebesség.

A digitális technológia bevezet a virtuális világba is.

A virtuális valóság alkalmazása

A *Cambridge dictionary* szerint a **virtuális valóság** a számítástechnológia által létrehozott valóság, közösségi környezet, amely a fizikai valóságban nem, vagy csak részben jelenik meg. A 3D változatnál azt a látszatot kelti ez a technológia, mintha a felhasználó is a térben lenne. Klasszikus példa a repülőgép-szimulátor, amelynek használatával a világ bármely „repülőterén” lehet a felszállást és a leszállást gyakorolni.

A mezőgazdaságban hasonlóan lehet alkalmazni a gépek üzemeltetésének gyakorlásánál, de a különböző technológiai változatok

(hová mit vessünk, milyen műszaki kiszolgálás szükséges ehhez, milyen logisztika stb.) optimalizálásánál is hasznos technológiáról van szó. A *virtuális valóság* és a *kiterjesztett valóság* között az a különbség, hogy virtuális valóságnál a virtuális szemüveg felvétele után teljesen bekerülünk az adott térbe, pl. képzeletben ülhetünk a traktoron. A *kiterjesztett rendszernél* az adott térbe „kívülről” nézünk bele, igaz, számos kiegészítő információt kaphatunk, pl. olyan tárgyat is a térbe helyezhetünk, amely akkor nincs is ott, vagy megjelenik előttünk olyan alkotórész, amely a vizsgált térben van, de nem látjuk (pl. traktormotor). Össze lehet hangolni pl. a betakarítógép és a szállítójármű munkáját stb.

A virtuális tervezésnél több felhasználó is részt vehet. Ma még a lehetőségek egyik technológiánál sincsenek kihasználva. Különösen vonatkozik ez a megjegyzés az oktatásra. Ezeknek a rendszereknek nagy előnye, hogy a felhasználók is bővíthetik, hatékonyságukat fokozhatják.

Felmerül a kérdés: hogyan járulhat hozzá az IKT (Információs és Kommunikációs Technológia) fejlődésének legújabb állomása, a *Dolgok Internete* a fenntarthatósághoz? Hogyan tud megoldást kínálni az előbbieken vázolt problémákra? Milyen módon tud a fenntarthatóság elvárásainak egyidejűleg megfelelni a fejlett és a fejlődő, de különösen a legkevésbé fejlett országokban? Ez azért is kihívás, mert a fejlett országokban a mezőgazdaságban át kell állni környezetkímélő, fenntartható technológiákra úgy, hogy a hozamok ne változzanak. Ehhez egyben a lakosság szemléletét is jelentősen meg kell változtatni, míg a fejlődő országokban az alapvető probléma az élelmiszerbiztonság és az egészséges ivóvíz.

A Dolgok Internete (IoT)

A *Dolgok (objektumok) Internete* a mesterséges intelligencia támogatásával kommunikációt tesz lehetővé ember-ember, ember-dolog és a dolog-dolog (m2m, machine-machine: számítógép és számítógép) között. A Dolgok Internete számítástechnikai és kommunikációs forradalom: a vezeték nélküli technológiától a nanotechnológiára alapozott érzékelőkig. Forradalminak lehet az IoT-t nevezni olyan értelemben is, hogy teljesen megváltoztatja az életkörülményeinket. Olyan összefüggések feltárására lesz lehetőség, amelyekre eddig az adatbázisok és modellezési módszerek nem adtak lehetőséget

Az **IoT és a Big Data** elválaszthatatlanok egymástól, tulajdonképpen a Big Data előzte meg az IoT-t. A dolgokat (tárgyakról, élőlényekről, rendszerekről: pl. talaj, mikroklíma stb., jövő adatokat) azonosítani lehet valós időben, és az internethez lehet kapcsolni. A valós idő itt közvetlen összeköttetést jelent, ill. azonnali feldolgozást és döntést.

Az IoT intenzív fejlődése egyre jobban abba az irányba viszi az internet fejlődését, hogy a különböző helyekről, különböző formában (kép, hang,

egyéb digitális adatok stb.) érkező információkat egységes szemlélettel dolgozza fel a döntéshozatal megalapozása céljából.

A Dolgok Internete új kihívásokat jelent a mezőgazdasági termelők számára. Ez az IKT (Információs és Kommunikációs Technológia) rendszer nemcsak növelheti a hozamot, de javíthatja a termékek minőségét, csökkenti a humán munka költségeit, növeli a jövedelmet, és ténylegesen hozzájárul a mezőgazdaság korszerűsítéséhez és az intelligens gazdálkodáshoz.

Az Internet of Things (IoT) lehetőségei még nem tisztázottak ugyanolyan alaposan, mint ahogy precíziós mezőgazdaság esetében ez megtörtént.

Az egyénekről és tárgyokról származó adatokat érzékelők biztosítják vezetékkel, de főleg vezeték nélküli kapcsolattal. Ezen szenzorok egy része programozható, képesek az adatok elemzésére, és képesek az így keletkezett, ekkor már információ-detektálására és -továbbítására (edge és kód számítástechnika), jelentősen csökkentve a rendszerválasz idejét.

Az IoT alkalmazásának egyik alapvető célja, hogy a kultúrnövényről, a talajról és mikroklímáról valós idejű (real time) információkat gyűjtsünk, és ezen adattömbök (Big Data) összefüggéseinek a feltárásával, figyelembe véve a korábban felvett adatbázisokat, az eddig használt döntéstámogató modellrendszert pontosítsuk.

IoT rendszert ki lehet építeni (LoRaWAN: long range vast area network: nagy hatótávolságú kiterjedt hálózat), ill. azt lehet GSM alapú, mobil telefonhálózatra alapozott rendszerrel is üzemeltetni (NB-IoT). Ebben az esetben azonban számolni kell azzal, hogy nincs mindenhol lefedettség. A LoRaWAN vezeték nélküli hálózat előnye, hogy a vezeték nélküli szenzorok energia felhasználása minimális. Az IoT lehetőséget ad arra, hogy nem csak a táblára helyezzük ki a szenzorokat, hanem annak környezetébe is (2.c ábra).

Az IoT architektúrájában nincs egységes egyetértés. Különböző kutatók és csoportok különböző felépítést javasolnak. A legalapvetőbb a protokollokon alapuló 3 rétegű hierarchia. Ennek a rendszernek a három rétege a következő:

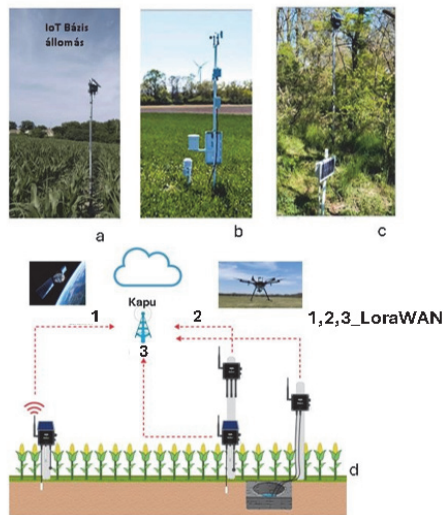
Réteg 1 — Érzékelés: ez a fizikai réteg érzékelőkből (szenzorokból) gyűjti az adatokat/információkat a környezetről.

Réteg 2 — Hálózat: ez a réteg az, ahol a kapcsolatok más dolgokkal, eszközökkel és szolgáltatásokkal megvalósulnak, és a szenzor adatokat is feldolgozzák és továbbítják.

Réteg 3 — Alkalmazás: ez a réteg felelős az IoT alkalmazások meghatározásáért, amelyekben az IoT telepíthető, és alkalmazásspecifikus szolgáltatásokat nyújt a felhasználóknak. Ez a 3 rétegű architektúra csak az IoT alapvető igényeit fedi le, de nem tér ki a részletesebb funkciókra, amelyeket további rétegek használatával lehet tanulmányozni. Például egy 5 rétegű struktúra a következő rétegeket foglalja magában: érzékelés, szállítás, feldolgozás, alkalmazás és üzleti réteg. Az érzékelés- és alkalmazásrétegek a fent említett funkciókat látják el, míg a szállítás-, feldolgozás- és üzleti rétegek a következőképpen működnek:

- Szállítási réteg: ez a réteg megvalósítja az érzékelési rétegből származó szenzoradatok kétirányú átvitelét a feldolgozási rétegbe és vissza.
- Feldolgozási vagy Middleware réteg: ez a réteg tárolja, szervezi és feldolgozza a szállítási rétegtől kapott nagy mennyiségű adatot.
- Üzleti réteg: ez a réteg kezeli az egész IoT rendszert, amely magában foglalja a felhasználók magánszféráját, alkalmazásokat, profitot és üzleti folyamatokat.

Az IoT egyik alapvető feladata a monitoring (talaj, víz, levegő /~~mikroklíma~~/, növény, ill. állat). Ezen információk alapján szabályozó (vezérlő) funkciókat is elvégez: öntözésnél, műtrágyák és peszticidek kijuttatásánál, zárt térben történő természetnél fényerő és a növények különböző életciklusaihoz tartozó fényösszetétel szabályozást, és végül az adatok hozzáférését. Az IoT nyújtotta adatbázisok jelentősen növelik az előrejelzések pontosságát meteorológiai jellemzőknél, hozambecslésnél, a növények növekedésének és fejlődésének leírásánál. Végül az IoT fontos szerepet játszik a logisztikai feladatoknál.



2. ábra: a) IoT bázisállomás; b) IoT meteorológiai állomás; c) Szenzorok a termőhelyet körülvevő erdőszávbán; d) Felhő alapú számítástechnika, információ a telepített szenzorokról, a drónokról és a műholdakról [URL1]

A monitorozási paraméterek: a talaj elektromos vezetőképessége, a talaj víztartalma és a talaj hőmérséklete különböző mélységeken (5, 20, 40, 60 és 80 cm), a levegő hőmérséklete, páratartalma és nyomása, a levél felületének páratartalma és a szárvastagság.

További eszközök érzékelik a környezeti tényezőket: a talajvíz pH-ját és nitrit-, nitrát-tartalmát, a talaj CO₂- és ammónia-kibocsátását, valamint az oxigéntermelődést. A komplex IoT állomás tíz paramétert elemez (2. ábra). Ugyanakkor adatszolgáltatás történik a műholdas-, repülőgépes-, ill.

drónfelvételek kiértékelésekor is. A rendszer része egy ragadólapos rovarcsapda is, amelyen megjelenő rovarok felismerését mesterséges látást használó szoftver végzi.

A jelenlegi kutatások az on-the-go (mozgás közben érzékelő) mérőrendszerek, pl. robotok, a talajban vontatott mérőegységek, vagy a távérzékelés által (műhold, drón) szolgáltatott adatok rendszerbe integrálására irányulnak. Az IoT evolúciós fejlődése hozzájárulhat az emberiség gondolkodás módjának a megváltoztatásához, a humán központú szemléletnek az ökológiai szemlélettel történő felváltásához.

Adagyújtó robotok

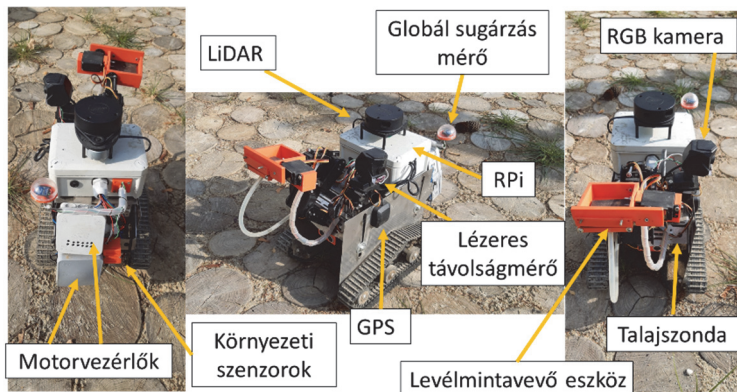
Ambrus Bálint

Minden olyan működő entitás, amely képes érzékelni, értelmezni és adaptívan reagálni a folyamatosan változó környezet jellemzőire, robotnak tekinthető. További fontos tulajdonsága az együttműködés és a kommunikáció képessége. Mielőtt cselekedne, az autonóm berendezésnek információt kell szereznie a helyes döntések meghozatalához. Ha az autonóm rendszer pontatlan információkat kap, helytelen döntéseket hoz és hibásan reagál. A fenntartható fejlődés a robotika fejlesztésének egyik legfontosabb kritériuma, amely nagy felelősséget ró a fejlesztőkre. Mint minden robotnak, a mezőgazdasági robotnak is három alapvető összetevőre van szüksége a működéshez: az információgyűjtés és -értelmezés képessége, a döntéshozatal és a feladatvégzés. A mezőgazdasági robotok különböző típusai közé tartoznak az adatgyűjtésre, gyomirtásra, növényvédelemre, betakarításra használt robotok és ezek megfelelő kombinációi, valamint az állattenyésztésben alkalmazott robotok (például fejőrobotok, etetőrobotok és az állomány egészségét figyelő robotok). A mezőgazdasági robotrendszerek gépi működése valós idejű korrekciót igényel, mivel a térbeli koordinátákat a lehető leghamarabb pontról pontra, nagy pontossággal kell meghatározni. Az úgynevezett valós idejű differenciális korrekció (RTK) nagymértékben növelheti a GPS-adatok pontosságát. A robotok és a robotika fejlődésével a mezőgazdaságban, mint az élet minden területén, jelentős átalakulás következik be. Az eddig kifejlesztett rendszereket a jövőben felváltják az emberi beavatkozást nem igénylő autonóm rendszerek, amelyek nemcsak egy célterületre lesznek használhatók, hanem a fejlesztéseknek megfelelően egyre több érzékelő rendszerrel is felszerelhetők lesznek. Emellett a műszerpark új szenzorokkal (hiperspektrális és akusztikus szenzorok, elektronikus nyelv, elektronikus orr) bővíthető. A ma használatos robusztus, nagy energiájú berendezéseket (pl. kombájn, erőgépek) felváltják majd a kisméretű berendezések, amelyek az adott munkafolyamat lehetséges megosztásával működnek. A térbeli teljesítménytényezőket és a fenntarthatósági szempontokat figyelembe véve a robotrajok kapcsolatban lesznek. Az összegyűjtött információk, adathalmazok segítségével kronologikusan visszamenőlegesen is rendelkezésre állnak majd, amelyek a mesterséges intelligencia (AI) adta lehetőségeket kihasználva adaptívan alkalmazkodnak a feladat elvégzéséhez, kiegészítve a terepen elhelyezett stabil és mobil mérőállomások adataival. Ezek a fejlesztések hozzájárulnak az átlagosnál kisebb, de a termelési körülményekhez alkalmazkodó, pilóta nélküli traktorok kifejlesztéséhez. Az IoT (Internet of Things) és a vele együttműködő kis intelligens robotok révén a termelési egységről és annak közeli és távoli természeti és természetközeli környezetéről is folyamatosan adatokat lehet

gyűjteni. Napjainkban számos olyan megoldás áll rendelkezésre, amelyek megkönnyítik a nagyméretű adatbázisok információinak feldolgozását. A gépi tanulás folyamatosan új lehetőségeket nyit meg. Mivel a mesterséges neurális hálózatok felülmúlják a hagyományos módszereket, számos mezőgazdasági alkalmazásban is integrálták őket.

A neurális hálózatok fő előnye az információk kölcsönhatásán alapuló előrejelzési képességük. A mezőgazdasági robotok esetében a probléma nem csupán a folyamatosan változó környezet, hanem az élő és sérülékeny anyagok kezelése is. A gépi tanulás nyújtotta lehetőségek az alkalmazott mesterséges intelligenciában is integrálódnak. A legtöbb mezőgazdasági robot a gépi tanulást használja, hogy a bonyolult feladatokat gyorsabban és hatékonyabban végezze el. A mesterséges látást a növényi betegségek, kártevők és kórokozók szindrómáinak azonosítására használják, számos vizuális jellemzőt figyelembe véve, amelyek három általános kategóriába sorolhatók: biológiai (morfológia), spektrális visszaverődési jellemzők és vizuális struktúra. Ezen adatokat a mellettük történő elhaladáskor gyűjtik, hogy környezetkímélő technológiai műveleteket tudjunk végezni.

A fenti fejlesztések forradalmasítják a WSN (Wireless Sensor Net)-t, a vezeték nélküli szenzor hálózat hatékonyságát. Az eddig telepített szenzorokat small-smart (kis-okos robotok) robotrajokon elhelyezett szenzorok helyettesítik, és folyamatosan a sorok között mozogva gyűjtik az adatokat a talajról a növényről és a mikroklímáról (3. ábra). Ha pl. a növényen elváltozást észlelnek, akkor elküldik a koordinátáikat a közelben lévő drónnak, amely az adott helyre repül, és egy nagyobb felbontású, esetleg hiperspektrális kamerával pontosabb adatokat tud gyűjteni, mint a kis robot RGB kamerája. Ezen adatok feldolgozása történhet helyben, ill. a felhőben, és a kórokozó, vagy kártevő azonosítása után a kis robot, vagy egy központi „agy”, olyan drónt, vagy permetezőzt utasíthat, amelynek a tartályában a védekezésre alkalmas vegyszer van. Ha ez a művelet a fertőzés korai stádiumában van, akkor a vegyszer-megtakarítás, akár 90%-os is lehet. Ha a fertőzés már nagyobb területre terjedt ki, akkor az okos kis robot egy másik platformot követve egy UGV-t, egy önvezető traktort riaszt, elküldi a koordinátáit, és a UGV lepermetezi a fertőzött területet. Még itt is jelentős vegyszer megtakarítás érhető el.



3. ábra: Adatgyűjtő és mintavevő robot

Egyre jobban tudjuk az aktuális „világképet” érzékelni, megjeleníteni, egyre több információ, ill. tudás áll a rendelkezés, hogy a valóságról reális képet kapjunk, amely hozzájárulhat a szemléletünk és a cselekedetünk pozitív befolyásolásához.

Az IoT rendszerbe 2022 májusában 12.2 milliárd „dolog” (ún. aktív végpont) került. Ez a szám folyamatosan nő [ULR²].

Ez a nagyságrend lehetővé teszi, hogy lokális (akár menedzserzóna szinten, de nagyobb mértékekben is: pl. gazdaság, tájegység, régió stb.) végezzünk elemzéseket. Eddig egy tábláról megfelelő műszerezettségűnél a vegetációs időben pár száz adat állt rendelkezésre, most már milliós, vagy akár ennél nagyobb adatbázisokról beszélünk. Ennek a lehetőségnek az egyik nagy előnye, hogy a növényvédelmi, állat- és humán-járványügyi intézkedések hatékonysága jelentősen növelhető. De az élelmiszeriparban az egyes feldolgozó üzemeknél is azonos minőségi előírások valósíthatók meg az IoT alkalmazásával.

Drónok a mezőgazdaságban

Teschner Gergely

A mezőgazdaság hagyományos módszerei egyre inkább hajlamosak arra, hogy helyüket átengedjék a modern technológiának. A drónok különösen élen járnak ebben a változásban, az agrárium területén egyre fontosabb szerepet játszanak. A mezőgazdasági drónok rendkívül sokoldalúak. Logikai felosztásuk több dimenzió mentén lehetséges, de három alapvető kategóriát különböztetnék meg: *megfigyelés*, *adatgyűjtés*, illetve *beavatkozás*.

Az első kategória lényegében a *monitoring drónokat* jelenti. A monitoring drónok rendkívül hasznosak a mezőgazdasági területek részletes és gyors felmérésében, és a növények állapotának nyomon követésénél. Azok a drónok, melyek kamerákkal, multispektrális szenzorokkal és infravörös érzékelőkkel vannak felszerelve, lehetővé teszik a gazdák számára, hogy részletes információkat szerezzenek a talajminőségről, és a növények egészségi állapotáról is. Ez a precíziós mezőgazdaságnak nevezett megközelítés lehetővé teszi a gazdák számára, hogy optimalizálják a termesztési folyamatokat, csökkentsék a termelési költségeket és maximalizálják a hozamot. A monitoring drónok alkalmazásának egyik indoka, hogy a rajtuk elhelyezett kamerák, illetve szenzorok térbeli felbontása nagyságrenddel jobb a műholdak felvételeinél. Az eltérő felbontások (műhold 10x10 m-es képpontélesség) láthatóan más képminőséget és ezzel más adattartalmat jelentenek a mezőgazdaság számára.

Monitoring drónok által gyűjtött adatok felhasználási területe lehet a gyomfoltok azonosítása, tápanyag-utánpótlási terv készítése, növényegészségügyi felmérés, gyom-csíránövény azonosítás, erodáltság térképezés.

A második nagy kategóriába tartoznak a *beavatkozó drónok*. Jellemzően kijuttatás, és permetezés történik, amely célja lehet a növényvédelem, vagy a tápanyag-utánpótlás.

A *permetező drónok* forradalmasíthatják a növényvédelmet. Ezek a drónok hatékonyan kezelik a növényeket, kiküszöbölve a hagyományos permetezőgépekkel járó nehézségeket és költségeket. Folyékony és szilárd szemcsék, granulátumok kijuttatására alkalmas eszközök, melyek automatikus, félautomatikus és manuális vezérléssel irányíthatók nagy pontossággal.

A permetező drónok szerepet játszhatnak a jövőben a peszticid-felhasználás csökkentésében és az ebből eredő kedvezőtlen környezeti hatások minimalizálásában. Permetező drónok alkalmazása napjainkban is indokolt lehet a felázott területek, megkésett kezelések esetében, továbbá a növényállományok levél alá permetezésénél, foltkézelésnél (4. ábra). Újabban megjelentek a gyümölcsbetakarító drónok is.



a



b



c

4. ábra: Monitoring (multispektrális és hiperspektrális kamerával felszerelt): a, b; és beavatkozó (pl. permetező) drónok: c (URL³,URL⁴,URL⁵)

A multispektrális kamerák a visszavert fény spektrumot 30-50 nanométeres sávokra bontják, míg a hiperspektrális kameráknál ezek a sávok 3-10 nanométeresek.

A drónok alkalmazása a mezőgazdaságban tehát nemcsak a termelékenység növelését szolgálja, hanem a fenntarthatóság és a környezetvédelem terén is komoly előrelépést jelent.

Ahogy a mezőgazdasági drónok egyre elterjedtebbek és elérhetőbbek lesznek, úgy válnak a modern mezőgazdaság elengedhetetlen eszközévé. A technológia folyamatos fejlődése további innovációkat ígér, amelyek még hatékonyabbá és fenntarthatóbbá teszik majd a mezőgazdasági termelést. A mezőgazdasági drónok tehát nem csupán egy újabb technológiai trendet jelentenek, hanem egy olyan eszközrendszert, amely a mezőgazdaság jövőjét meghatározóan formálja és alakítja.

A jövőt tekintve elképzelhető, hogy a drónok mezőgazdasági adatgyűjtés területén új felhasználási esetek jelennek meg. Ilyen típusú újszerű szenzorálási technológia, a *lebomló szenzorok* alkalmazása például a talajnedvesség meghatározása során. Rezgőkör kialakításával és földre helyezésével, továbbá drónon történő RF (rádiófrekvenciás) sugárzó és vevő használatával a talajnedvességétől függő frekvencia mérhető. Ezzel összefüggő terület a lebomló energiaforrás kérdése is, mely területen megtörténtek a kezdeti sikerek. Komposztálható kondenzátort fejlesztettek a kutatók szénből, cellulózból, glicerinnél és konyhasóból, amely a talajban néhány hónap alatt szinte teljesen lebomlik. Ilyen típusú kutatások révén fejlődhet a szerzorika és ezzel összefüggésben szintet léphet a drónok szerepe. A drónoknak az itt a szerepe, hogy bizonyos idő intervallumonként a lebomló egységekhez repülnek, és 1-2 méter magasságban „leolvassák” ezen különleges szenzorok adatait (5. ábra).



5. ábra: A drón a chip-nélküli, a talajban lebomló szenzorok jeleit „gyűjti”

A precíziós, helyspecifikus technológiák műszaki feltételrendszere

Neményi Miklós

A labortól a szántóföldig: Lab2Field

Egyre jobban alkalmazzák az IoT információs és kommunikációs rendszert az anyagvizsgáló laborokban is (talaj, növény, élelmiszer). Ennek az az előnye, hogy a laborban és a szántóföldön mért adatok kapcsolatrendszere elemezhető. A technológiai beavatkozások, illetve az előrejelzések megalapozásához mindkét adathalmazra szükség van.

A gazdaságtól a villáig (az étkező asztalig): Farm to Fork

Az EU szeretné, ha az ökológiai gazdálkodásnál előírt megkötések tovább szigorodnának, és szélesebb körben elterjedne a regeneratív gazdálkodás, amelynek egyik eleme a *Farmtól a Villáig*, vagyis a termelő egységtől az étkező asztalig, a villáig). IoT-re alapozható informatikai rendszerrel teljes átláthatóság biztosítható: a talajművelési technológiákról, a tajba juttatott szintetikus kémiákról, a vegyszeres gyomszabályozástól, a fejtrágyázásról, a közben megjelent kórokozókról és kártevőkről és az ellenük történt védekezésről, a betakarításról, a tárolásról, a szállításról és az élelmiszeripari feldolgozásról, a kereskedelmi műveletekről és a konyhai beavatkozásokról. Ezek az adatok hasznos információkat alapoznak meg mind a kutatóknak, mind a gazdálkodóknak, de természetesen a vásárlóknak is.

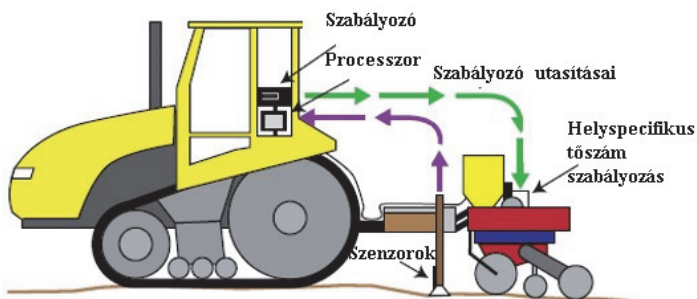
Mielőtt áttérünk a helyspecifikus technológiára, több lényeges kérdést is tisztázni kell. A legtöbb kérdés a jövedelmezőség területén jelentkezik, ugyanakkor vannak agronómiai környezetvédelmi és technológiai (technikai) kérdések is. Itt a szerző kénytelen hangsúlyozni azon véleményét, hogy a VRA (Variable Rate Application: változó arányú alkalmazás) technológia elterjedésének egyik alapvető gátja, hogy a gazdálkodóknak nehéz bebizonyítani, hogy a beruházások valóban megtérülnek. A *VRA módszerhez* GPS pozicionálásra van szükség. Másrészt a kijuttató rendszer szabályozása vagy elektronikus térkép (tápanyagellátottsági, gyom stb.) vagy szenzorok érzékelői alapján történik. Elvileg itt nincs szükség GPS pozicionálásra, ugyanakkor az érzékelők által szolgáltatott adatok megjelenítésénél szükség van pozicionálásra, a későbbi adatfeldolgozás céljából. Vonatkozhat ez a tápanyag- és a vetőmag-kijuttatásra, a kórokozók és kártevők elleni védekezésre, és a gyomszabályozásra egyaránt.

A növénytermesztők és szaktanácsadók szerint a következő jellemzőket kell figyelembe venni: talajtípus, talajszín és -textúra, topográfiai jellemzők, hozam adatok, egyéb: távérzékeléssel gyűjtött adatok és adatbázisok. A rendszernek a saját pozícióját pontosan meg kell határoznia, hogy a térkép nyújtotta információt le tudja „olvasni”.

A valós idejű szenzorok olyan gyorsan érzékelik az adott jelenséget, hogy közben a rendszer a szükséges anyagkijuttatást el tudja végezni. Tudni kell, hogy pl. egy 7,2 km/óra sebességgel mozgó jármű 1 mp alatt 2 m-t halad előre; értelemszerűen a 14,4 km/órával haladó jármű 1 mp alatt 4 m utat tesz meg. A valós idő tehát azt jelenti, hogy az érzékelés, az utasítás és az anyagkijuttatás a sebességhez igazodva történik. Klasszikusnak számít a Green Seeker, amely a növények által visszavert sugárzás alapján juttatja ki a tápanyagot. Miután a „látási viszonyok” változhatnak, pl. felhőzet jelenik meg, xenon kiegészítőlámpával igyekeznek a fényforrást állandósítani.

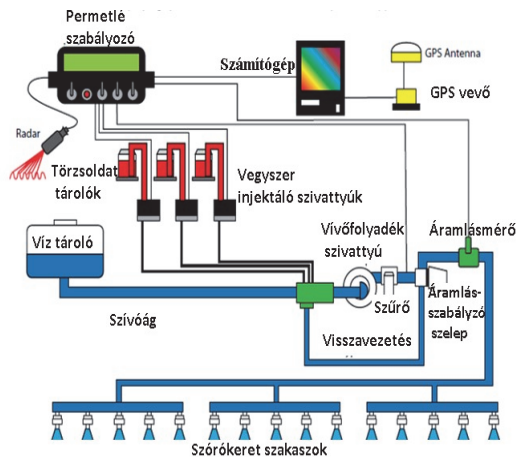
Autonóm rendszerek

A vető- és ültetőgépek vetőszerkezetének a meghajtása a hagyományos gépeknél a talajról történik. Ilyen esetben a vetőszerkezetet hajtó keréknél csúszással kell számolni. Másrészt munka közben nem változtatható a területegységre kijuttatott szaporítóanyag mennyisége. A VRA-nál a kijuttatott anyag szabályozása elektrohidraulikus módon történik, vagyis a vetőszerkezet hajtását hidrosztatikus rendszer biztosítja, a hidraulikaolaj-áramot pedig elektromos, ún. léptetőmotor szabályozza. Mindez a talajtextúra, a talaj elektromos vezetőképessége és szervesanyag tartalma stb. folyamatos mérése alapján történik. Természetesen a „korábbi adatokat” is figyelembe lehet venni (6. ábra).



6. ábra Helyspecifikus szemenként vetés, a vetőszerkezet előtt a talaj textúrájának, elektromos vezetőképességének (ECa) és szervesanyag-tartalmának mérése: ezen jellemzők alapján történik a tőszámszabályozás.

A korszerű növényvédő gépek lehetővé teszik, hogy akár egyidőben, az adott táblán 3 féle gyomfaj ellen védekezzünk térkép alapján, vagy a szenzorok által nyújtott információk figyelembevételével, helyspecifikusan juttatva ki a gyomirtó szert. A vegyszert nem keverik be előre a vívőanyagba (víz), hanem az adott helyen injektálják a törzsoldatot a folyadékáramba, és juttatják el a szórófejekhez (7. ábra).



7. ábra: Törzsoldatok közvetlen injektálása a permetlébe

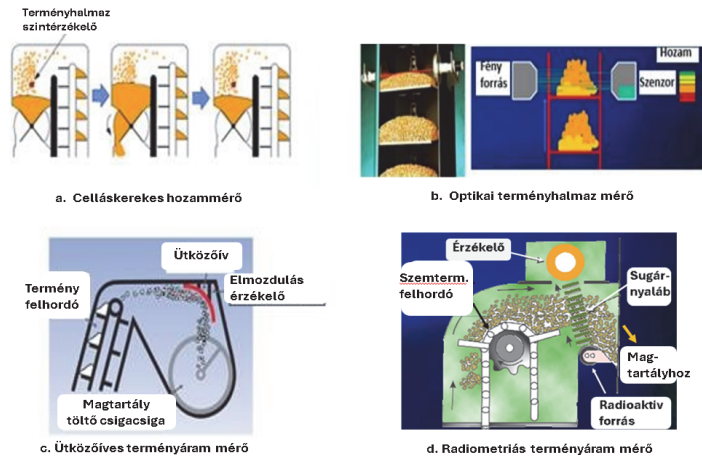
Korábban már jeleztük, hogy a kezelések akár egy növénynél is lehetségesek (per plant management: növényenkénti kezelés) a modulált permetezési technológiánál, de az adott szórófejet is tudjuk szabályozni, hogy mikor nyisson és mennyi ideig permetezzen. A folyadék nyomásának csökkentésével növelni tudjuk a cseppméretet, ami az elsodródás mérséklését jelentheti.

Hozamtérképezés szemestermény betakarításkor

Az arató-cséplőgépekre szerelt hozammérőket a műholdas pozicionálással egyesítve készíthető a hozamtérkép, amely a következő vegetációs időszak egyik alapvető információ bázisa. A cellás kerek megoldásnál szenzor érzékeli, hogy mikor telítődik a cella és ennek alapján mikor fordul egy negyed. A fordulások száma alapján határozható meg az adott helyre a hozam. (8.a ábra) Az optikai terményhalmaz mérő fényforrást használ, és a maximális pontját érzékeli a tálcán lévő halmaznak. Korszerűbb kivitelben a halmaz teljes keresztmetszetét detektálni lehet. (8.b ábra) Az ütközőíves anyagáram mérő az ütköző ív elmozdulásából következtet a hozamra. (8.c ábra) A radiometrikus elven működő hozammérők előnye, hogy a szenzor és a termény között nincs mechanikai kapcsolat. (8.d ábra)

Az arató-cséplőgépre további szenzorok szerelhetők, amelyek a NIT (Near -Infrared Transmission) elvén működő spektroszkópiával folyamatosan

mérik a termény fehérje-, olaj- és keményítőtartalmát. Ezen adatok alapján térkép készíthető a minőségi jellemzők táblán belüli eloszlásáról [14].



8. ábra: A szemterméshozam folyamatos mérése arató-cséplőgépen [URL⁶].
 Forrás: AGRIVI: Grain Yield Monitoring Systems

5G: 5. generációs adatáramlás

Az 5G, vagyis ötödik generáció mintegy százszor nagyobb adatáramlási sebességet tesz lehetővé, mint a 4G. A gyorsabb és nagyobb adatbázisok a gazdálkodók számára sokkal szélesebb körű háttérrel biztosít a döntéshozatalnál: a kórokozók és kártevők időbeni felfedezésénél, az állatok betegségeinek megjelenésekor. Az önvezető járművek biztonságos közlekedésénél elengedhetetlen az 5G. De szükséges ahhoz is, hogy a drónoktól, és UGV robotokról és az önvezető járművek által szolgáltatott adatokat a mesterséges intelligencia segítségével fel tudjuk dolgozni a felhő alapú számítástechnika felhasználásával. Ugyanakkor sok tekintetben tisztázatlanok a rádiófrekvenciás elektromágneses hatások az élő környezetünkre, és a természetben élőkre, mindenekelőtt a rovarokra [15].

Epilógus

A fenti tények a mezőgazdaság digitalizációs fejlődésének egy pillanatképet mutatják egy adott időszakban kiragadott példaként. A fejlődés nem áll meg, hiszen akár csak a Green Deal, a Zöld megállapodás elvárásaira gondolunk, számos kérdés, szakmai vita kapcsolódik a jelen ismereteinkkel szinte teljesíthetetlen elvárásoknál. Mind nemzeti szinten, mind EU szinten növelni kell az idevonatkozó kutatási programok anyagi feltételrendszerét és azok hatékonyságát. A szerzők igyekeztek rámutatni a tárgyalt témákkal, hogy csak a korszerű műszaki-informatikai rendszerekkel valósítható meg a környezetkímélő, átlátható (nyomon követhető), vegyszertakarékos, a biodiverzitás növekedését segítő, a környezetével szimbiózisban élő

agrártechnológia. Ez természetesen egy újabb kihívást is jelent, hiszen az ember folyamatosan kiszorul a döntéshozás folyamatából, mert a mesterséges intelligenciának ezen a területen is egyre meghatározóbb szerepe lesz.

Irodalom:

- Mikéné Hegedüs F. (2006). A fuzzy logika és a neurális hálók alkalmazása a precíziós növénytermelés adatbázisának értékelésében. PhD disszertáció a Precíziós növénytermesztési módszerek Doktori Iskola keretében, Nyugat-magyarországi Egyetem, Mezőgazdaság és Élelmiszertudományi Kar, Mosonmagyaróvár
- Tilman, D. (1998). The greening of the green revolution. *Nature* 96, 211-212.
- Spyros G T. Synergy of IoT and AI in Modern Society: The Robotics and Automation Case. *Robot Autom Eng J.* 2018; 3(5): 555621. DOI: [10.19080/RAEJ.2018.03.555621](https://doi.org/10.19080/RAEJ.2018.03.555621)
- Zain, M. et al. (2023). Nanotechnology based precision agriculture for alleviating biotic and abiotic stress in plants. *Plant stress.* Volume 10, December, <https://doi.org/10.1016/j.stress.2023.100239>
- Xu,J., Gu,B., Tian, G. (2022). Review of agricultural IoT technology. *Artificial Intelligence in Agriculture.* <https://doi.org/10.1016/j.aiia.2022.01.001>
- Irmak, E., Bozdal, M. (2018). Internet of Things (IoT): The Most Up-To-Date Challenges, Architectures, Emerging Trends and Potential Opportunities. *International Journal of Computer Applications (0975 – 8887) Volume 179 – No.40, May 2018*
- Nyéki, A. et al. (2021). Application of spatio-temporal data in site-specific maize yield prediction with machine learning methods. *Precision Agriculture,* <https://doi.org/10.1007/s11119-021-09833-8>
- [Nyéki, A., & Neményi, M. (2022). Crop Yield Prediction in Precision Agriculture. *Agronomy,* 12(2460). doi.org/10.3390/agronomy12102460.
- [Bhatnagar, V.,Singh, G.,Kumar, G.,Gupta, R. (2020).Internet of things in smart agriculture: applications and open challenges. *International Journal of Students' Research in Technology & Management* eISSN: 2321-2543, Vol 8, No 1, 2020, pp 11-17 <https://doi.org/10.18510/ijstrtm.2020.812>
- Neményi, M., et al. (2023).Challenges of ecocentric sustainable development in agriculture with special regard to the internet of things (IoT), an ICT perspective. *Progress in Agricultural Engineering Sciences.* Volume 19: Issue 1/113-122, DOI: <https://doi.org/10.1556/446.2023.00099>
- Ambrus, B., Teschner, G., Kovács, A. J., & Neményi, M. (2022). Development of small smart data logger robots embedded in IoT system for crop production. In *International scientific conference „agricultural mechanization and technology in Europe an perspectives”* May (pp. 27-28).
- Gopalakrishnan, S., Waimin, J., Zareei, A. *et al.* A biodegradable chipless sensor for wireless subsoil health monitoring. *Sci Rep* 12, 8011 (2022). <https://doi.org/10.1038/s41598-022-12162->

- Grisso,R., Alley,M., Thomason, W. (2011): Precision farming tools: Variable-rate application. Virginia cooperative extension:442-505
- Singh, M., Paulsen, M.,Tian,L.F., Yao, H.(2005): Site-Specific Study of Corn Protein, Oil, and Extractable Starch Variability using NIT Spectroscopy. Applied Engineering in Agriculture. DOI: [10.13031/2013.18138](https://doi.org/10.13031/2013.18138)
- Thielens, A. et al. (2020): Radio-Frequency Electromagnetic Field Exposure of Western Honey Bees. Nature doi: [10.1038/s41598-019-56948-0](https://doi.org/10.1038/s41598-019-56948-0)
- [URL¹] <https://www.libelium.com/libeliumworld/success-stories/hungarys-first-field-monitoringlaboratory-relies-on-libeliums-iot-technology/>
- [URL²] <https://iot-analytics.com/number-connected-iot-devices/>
- [URL³] <https://www.dji.com/hu/p4-multispectral>
- [URL⁴] <https://www.cubert-hyperspectral.com/knowledge-base/uav-hyperspectral-mapping>
- [URL⁵] <https://ddc.sze.hu/portfolio/5g-dron-mi-technologiai-integrator/>

Precíziós növénytermesztés és ökológiai gazdálkodás

Mikó Péter, Árendás Tamás

Precíziós növénytermesztés

A cím két fogalmának társítása csak első olvasatra ambivalens. Az élelmiszer-termelésnek a látszólag futurisztikus és a látszólag avult történelmi eszközrendszerei nemcsak egymástól függetlenül segíthetik napjainkban a társadalom elvárásainak teljesítését, de összehangoltan, együttesen is.

Természeti erőforrásaink túlhasználata, a környezetet érő káros hatásoknak a mérséklése napjaink globális feladata. A termőföldek minőségromlása, az időjárási feltételek növényfejlődést hátráltató tényezőinek növekvő mértéke és gyakorisága, a kémiai szerek használatából adódó terhelés, a környezeti diverzitás csökkenése egyaránt változó szemléletet, bővülő tudást és korszerűsödő eszközrendszereket szükségeltet. Mindezekhez társulnak az agráriumban a szűkülő munkaerőpiac, az elöregedő munkavállalói kör, a termelési költségek növekedése, az értékesítési árak hektikus, sokszor nagyságrendi változásai okozta negatív hatások. Ilyen körülmények között a hatékonyság folyamatos javítása, kontrollja lehet a versenyképesség megtartója.

Az elvárások teljesítéséhez, vagyis a növekvő népesség minőségi élelmezés-biztonságának javításához nagyban hozzájárult az agráriumban is a műszaki és az infokommunikációs technológiák '90-es évektől meginduló látványos fejlődése.

A precíziós növénytermesztés alapját a hely- és időspecifikus kezeléseket biztosító, az eredetileg katonai célra kifejlesztett GPS-rendszer alkalmazása teremtette meg, ami intenzív műszaki fejlesztésekkel társítva a szántóföldi növénytermesztés agrotechnikai elemeinek, beavatkozásainak hatékonyságát jelentős mértékben növelte, a környezeti terhelések mérséklésével. A műszaki-térinformatikai lehetőségek fejlődése azonban továbbra sem váltja ki, nem nélkülözheti a termesztett új fajok, fajták képességeinek, tulajdonságainak, különböző hatásokra adott válaszainak ismeretét, ami a jövőben is folyamatos növényvizsgálatokat tesz szükségessé a változó környezetben.

Növénytáplálás

A szántóföldi növénytermesztéssel hasznosított földterületeink -- a vizuálisan sokszor homogénnek, egyöntetűnek ítélt hazai talajaink esetében is -- kis területegységeket tekintve is igen változatos fizikai, kémiai, biológiai jellemzőkkel bírnak, ami jelentős mennyiségi és minőségi különbségeket okoz a növények teljesítményében, főként szélsőséges időjárási feltételek kialakulása során. Napjainkban a precíziós technológiáknak már alapeszköze

a betakarítás során a termés folyamatos mennyiségi és főbb minőségi paramétereinek mérésére alkalmas kombájnok használata, amelyek a mért paraméterek és a nagypontosságú helymeghatározás összekapcsolásával ún. hozamtérképek létrehozását biztosítják. Az adott terület sokéves, változatos évről évre reprezentáló hozamtérképei alapján, valamint műholdfelvételeknek a növények fejlődését jellemző, ún. vegetációs indexeinek (pl. NDVI), továbbá a domborzati adottságokat jellemző digitális magasságmodellek adatainak felhasználásával talajmintavételi zónák alakíthatók ki. A különböző zónákat reprezentáló minták laboratóriumi vizsgálatának eredményei és egyéb paraméterek (termesztendő növényfaj, tervezett termésmennyiség stb.) figyelembevételével digitalizálható a terület növénytáplálási térképe, mely alapján a nagypontosságú, helyspecifikus kezelések elvégzésére alkalmas, GPS-vezérlésű gépkapcsolásokkal (traktor+trágyaszóró) juttatható ki a tervezett mennyiség. A pontos adagoláson túl a precíziós kivitelezést biztosító eszközrendszerek az összetett, többkomponensű tápanyagokat folyamatosan változtatható arányokban is képesek kijuttatni, ami egyrészt a talaj hiányban lévő tápelemeinek pótlását, a túladagolás elkerülését és a növények igényeihez igazított optimális tápelemarányok megteremtését biztosítja.

A kikelt, fejlődésben lévő növények tápláltsági állapotának jellemzésére, a hiány észlelésére és egyidejű pótlására a műtrágyát kijuttató traktorokon olyan szenzorokat helyeznek el, amelyek a növényállomány klorofillsűrűségének mérésével közvetlenül vezérli az erőgép mögött elhelyezkedő műtrágyaszórót, az azzal kiadott mennyiséget.

Vetés

A növénytermesztés termelési költségeit tekintve napjainkban a tápanyag-pótlás mellett a vetőmagok ára is jelentős arányt képvisel, így például a kukorica esetében eléri a 12-15%-ot. A vetett mennyiség nemcsak a költségekre van hatással, de az árbevétel mértékére is. Az optimálisnál nagyobb növényszám a kiadásokat növeli, a csökkenő termés és a járulékos költségek (plusz tápanyag- és növényvédelem) növekedése okán a jövedelmezőséget jelentősen ronthatja. Ezért tekinthetők fontos láncszemeknek a precíziós technológiát támogató eszközrendszerek sorában a GPS-vezérlésű, növényszám kísérletek eredményei alapján beállított vetőgépek. Ezek segítségével egyrészt centiméteres pontossággal tartható a már elvetett sávhoz való csatlakozás, az egész területre vonatkozó azonos sortávolság, továbbá a táblavégi fordulóknál a gép vetőelemeinek egyedi ki- és bekapcsolásával elkerülhető az adott ponton már bevetett terület rész felülvetése, az optimálist többszörösen meghaladó magmennyiség használata.

A legkorszerűbb, szemenként vető gépek a térinformatikai eszközök valós idejű, felhő alapú használata révén ma már olyan elvárások megvalósítását is lehetővé teszik, hogy a terület változó növényeltartó képességét, ugyanazon tábla változó víz- és tápanyag-ellátottságát figyelembe véve, menetközben változzon a vetett mag mennyisége, ezáltal a

kifejlődő növényállomány sűrűsége, az egyes növények egymástól való távolsága.

Növényápolás

A növények fejlődését gátló biotikus tényezők (kártévők, kórokozók, versenytárs gyomok) visszaszorításában a precíziós eszközrendszerek új dimenziót nyitottak. A nagy érzékenyséű szenzorok telepítése, a hálózati technológiák rohamos fejlődése a táblarésztől egészen a globális szintig egyre szélesebb lehetőségeket biztosít az előrejelzésben, ezáltal a célzott beavatkozások, kezelések időzítésének, módszerének és eszközének megválasztásában.

A gépek nagy pontosságú, valós idejű vezérlése napjaink gyakorlati lehetőségévé tette a környezet vegyszerterhelésének csökkentését a széles sortávú növények (kukorica, napraforgó stb.) mechanikai gyomirtása során a gépi kultivátorozás, sorköz kapálás révén. A nagy sebességgel, a természetett növény 1 cm-es környezetében és többnyire nem sík, vízszintes felületen végzett gépi kapálás során ehhez a művelethez az egymástól részben független mozgást végző precíziós eszközök pontos összhangját kellett a traktor és a kultivátor helyspecifikus, különálló vezérléseivel megvalósítani.

A kártévők és kórokozók, valamint a gyomok gyérítését, szabályozását szolgáló anyagok kijuttatása során a szenzorok és a kezelést szabályozó automatikák együttesen biztosítják, hogy csak ott és csak olyan készítménnyel történjen kezelés, ahol a károsítás egy adott kártételi küszöböt meghalad (pl.: herbicid kijuttatás csak a gyomos területrészeken, a gyomösszetétel felismerése révén egy- vagy/és kétszikű növények elleni hatóanyaggal).

Ökológiai gazdálkodás

Az ökológiai gazdálkodás, más néven biogazdálkodás, a fenntartható mezőgazdasági termelés egyik legeredményesebb és leggyorsabban fejlődő formája. Ennek a biológiai sokféleség fenntartására törekvő termelési módnak pozitív hatása nem csak a gazdálkodásban, hanem a környezet fenntarthatóságában, a táj regenerációjában és a helyi közösségek fejlődésében is kimutatható. Az öko gazdálkodás, a szintetikus inputanyagok mellőzése folytán, a zavartalan természetes körforgás és a talajélet fenntartására törekszik, melynek végeredményeként egészséges, biológiailag értékes élelmiszerek születnek. A környezetkímélő gazdálkodás részeként elsősorban a természetes, a helyi és a megújuló energiatartalékok feltárására és használatára törekszik, így csökkentve a gazdálkodás ökológiai lábnyomát és egyben a gazdasági kitettséget. Nem véletlen tehát, hogy az Európai Unió is egyik kiemelt innovatív eszközként tekint a biogazdálkodásra a klímaváltozás ellen, illetve az energia- és nyersanyag-kitettség csökkentéséért vívott harcban. Ezt a „Zöld Megállapodás” elnevezésű stratégiai dokumentumban is kiemelte, célul tűzve ki az európai

mezőgazdasági területek negyedének bioterületté való átállítását az évtized végére. Mivel ez az érték EU-szinten jelenleg 10% körüli (közel 16 millió hektár) és hazánkban is mindössze 6%, jelentős, hatékonyságot növelő további innovációra van szüksége az ágazatnak, hogy azok is meglássák az öko gazdálkodásban rejlő lehetőséget, akik a gazdasági profitabilitás mellett talán kevésbé figyelnek oda gazdálkodásuk környezeti hasznosságára, fenntarthatóságára. Kézenfekvő tehát a hagyományos növénytermesztésben egyre jobban terjedő precíziós művelési módszereket az öko gazdálkodásba is átültetni, arra speciálisan fejleszteni. A szintetikus gyomirtószerek helyett elsősorban a vetésforgó, a faj- és fajtaválasztás, valamint a mechanikai gyomirtás alkalmazására alapozó biogazdálkodók által végzett gyomszabályozásra több, speciális, GPS-vezérlésű gépkapcsolatot és robotot is fejlesztettek az elmúlt években, amelyek az Európa-szerte tapasztalt mezőgazdasági kézi munkaerőhiányt is képesek lesznek orvosolni a jövőben. Emellett ezek a modern megoldások a természetes forrásból származó trágyák (pl. pelletált csirketrágya) precíz és hatékony kijuttatásában is segíthetik az öko gazdákat, mely mennyiségi kijuttatásának alapját ugyancsak képezhetik a precíziós aratás révén felállított hozamtérképek.

Ökológiai növénynemesítés

A természetes tápanyag-utánpótlásban, a mechanikai gyomszabályozásban sőt a vetésben és aratásban is használható precíziós technológiák az öko gazdálkodás hatékonyságát is nagymértékben képesek növelni, azonban e gazdálkodási mód esetén a választott fajtának is kiemelt szerep jut e tekintetben. Tehát hasonlóan innovatív fejlesztési irány az ökológiai növénynemesítés is, hiszen a gazdálkodási eredményesség növelésére törekvő ökológiai mezőgazdasági termelők egyre inkább igénylik a szélsőségekhez jól alkalmazkodó növényfajtákat, populációkat. A hagyományos körülmények között nemesített fajták nem minden esetben tolerálják az ökológiai gazdálkodásra jellemzőbb, szélsőségesebb termesztési körülményeket, melyek egyre nagyobb fokú elterjedésére lehet számítani, szintén az EU Zöld Megállapodásban ismertetett, növényvédő szer (-50%)- és műtrágya(-20%)-csökkentési tervezet 2030. évi teljesülése esetén. E stratégiai tervezetben a precíziós tápanyag- és növényvédőszer-kijuttatásnak, valamint a precíziós mechanikai gyomszabályozásnak felértékelődik a szerepe, a jobb tápanyag- (és víz) hasznosító-képességű fajták mellett. Ebből kiindulva, az ökológiai növénynemesítés által kifejlesztett új fajták a jövő hagyományosan művelt agrárterületeinek jelentős részén is sikerrel lesznek majd termesztetők, így szolgálva az egész növénytermesztési ágazat fenntarthatóságának növelését.

Az ökológiai nemesítés tanúsított ökológiai területen folyó szelekcióból és egyes tiltott nemesítési eljárások elkerüléséből álló nemesítési módszer, mely segíti a fenntarthatóság és a biodiverzitás, a biológiai sokszínűség, növelését. Ez utóbbit elsősorban új fajok és fajták termesztésbevonásával, populációk és fajtakeverékek előállításával, vad rokon fajok nemesítésbe történő beemelésével, illetve növénytársítások alkalmazásával lehet elérni.

A professzionális növénynemesítők munkájuk során egy jól definiált nemesítési célnak megfelelően fejlesztik ki az új növényfajtákat, ahol a hozamnak, a beltartalmi minőségnek és különböző biotikus (pl. gomba kórokozók) és abiotikus (pl. szárazság) stresszekkel szembeni ellenállóságnak van a legnagyobb szerepe. Sok növényfaj esetében (pl. kalászos gabonák) szoros kapcsolat van a termesztési környezet és az azt célzó nemesítési (szelekciós) környezet között, tehát az ökológiai gazdálkodás körülményei közé legcélravezetőbb öko területen szelektált fajtákat, populációkat helyezni.

Egyre inkább előtérbe kerülő cél a széleskörű alkalmazkodóképességgel rendelkező fajták előállítására, így a speciálisan pár helyen jól szereplő vonalak, törzsek hamar kiesnek a nemesítési folyamat során. A növénynemesítés erőforrás-igényes tevékenység, ezért a befektetések megtérülését, a nemesítési program fenntartását leginkább a széleskörűen termesztethető fajták, hibridek előállítása tudja szolgálni. Nemesítés során a növények genetikai potenciáljának minél hatékonyabb kiaknázása a cél, mely során, széleskörű tudományos ismeretekre alapozva, egy genetikailag változatos populációból szelekcióval új, jobb teljesítményű növényfajtát állítanak elő. Számos módszer létezik e cél elérésére, melyek közül egy, a részvételi kutatások körébe tartozó részvételi nemesítés.

Részvételi növénynemesítés

Akiknek a növénytermesztési adottságai és lehetőségei nagyban különböznek az adott régióra jellemző átlagtól, vagy különleges preferenciáik vannak (pl. íz-és főzési tulajdonságok, a termésérés sebessége, a növényi maradványok állattartásban való felhasználhatósága stb.), választhatnak és kipróbálhatnak már regisztrált és termesztésre ajánlott fajtákat, de előfordulhat, hogy a kínálat és a megfogalmazott igények távol állnak egymástól. A klímaváltozás egyre nagyobb kihívásainak megfelelni, különösen az ökológiai növénytermesztés speciális adottságai és lehetőségei mellett, újfajta megközelítést igényel. Az ilyen esetek hívták életre a részvételi növénynemesítést, mely a nemesítők és gazdálkodók (esetleg feldolgozók, értékesítők) együttműködésével valósul meg. Ennek során a gazda egy tapasztalt nemesítővel együttműködve halad végig a növénynemesítés folyamatán úgy, hogy a kísérleti parcellák gyakran a gazda földjén vannak és az agronómiai és beltartalmi tulajdonságokra történő szelekciós lépések a gazda igényeihez igazodnak. Attól függően, hogy hol kezdődik a gazdálkodóval történő együttműködés, különbséget tehetünk a részvételi fajtaválasztás és a részvételi nemesítés között (Witcombe és mtsai. 1996). Előbbi esetében a termelő részvétele a kísérleti fajták tesztelése során kezdődik, míg az utóbbinál a gazda végigkíséri a teljes nemesítési folyamatot. A részvételi fajtaválasztás, a könnyű kivitelezhetősége miatt, kiválóan alkalmas a gazdával történő együttműködés elindítására, amelyre hazai példák az Ökológiai Mezőgazdasági Kutatóintézet (ÖMKI) 2012 óta zajló on-farm fajtatesztjei, illetve a 2021 óta zajló ÖMKI-VSZT-Nébih posztregisztrációs ökológiai fajtatesztek.

Evolúciós növénynemesítés

A professzionális növénynemesítés által előállított fajták (a fajtaregisztráció követelményeinek megfelelően) azonos genetikai állományú egyedekből állnak, így a genetikailag meghatározott adaptációs képességükön túl már nem képesek tovább alkalmazkodni a termesztési környezetükben bekövetkezett változások esetén (időjárási szélsőségek, új betegségek), ami miatt mindig újabb és újabb fajtákat kell létrehozni. Erre nyújt innovatív megoldást a populációk alkalmazása, melyek egyrészt lehetnek a részvételi nemesítés eredményei, másrészt pedig úgynevezett evolúciós populációk. Ez utóbbi, változatos egyedekből álló, hasadó (genetikailag nem stabil) populáció az élőhelyéhez alkalmazkodik a természetes szelekció által. E szelekciót kifejtő termőhelyi tényezők (pl. szárazság, epidémia) jelentős genetikai változást képesek előidézni egy populációban az érzékeny egyedek arányának csökkenésén keresztül. Ezzel párhuzamosan a legrátermettebb egyedek szaporodnak tovább a rákövetkező nemzedékekben. Tehát az evolúciós populáció nem egy adott körülményhez (pl. száraz termőhely) alkalmazkodik, hanem egy, az élőhelyére jellemző dinamikához, amely ahhoz vezet, hogy egyensúlyba kerülnek az egyes évjáratokban legjellemzőbb egyedek. Emiatt figyelhető meg, hogy egy diverz populáció terméshozama kiegyenlítettebb, évenkénti termésstabilitása jobb, mint a homogén fajtáknak, amik sokszor jelentős termésdepressziót mutatnak kedvezőtlen körülmények között. Összegezve, az evolúciós nemesítés tehát egy populációt érintő, természetes szelekció hatására, magától létrejövő és működő fejlődési folyamat. Ezzel szemben a részvételi nemesítés eredményeként egy új alpopuláció („ökológiai heterogén szaporítóanyag”), vagy akár homogén fajta is létrejöhethet.

Ökológiai növénynemesítés Martonvásáron

Az Agrártudományi Kutatóközpont Mezőgazdasági Intézetében kezdődött hazai ökológiai növénynemesítés immár közel 20 éve folyik Martonvásáron. Kiemelt céljuk a diverzitás növelése, melyet egyrészt alternatív fajok (pl. alakor, tönke) nemesítésével és termesztésbe vonásával, másrészt interspecifikus hibridek és kompozit populációk előállításával, illetve növénytársítások alkalmazásával érnek el. Az alakor és tönke nemesítésének eredményeként létrejött martonvásári fajták bevezetésével a szántóterületek növénydiverzitása megnövekedett és számos felhasználási formájuk fogyasztásán keresztül hozzájárultak egy egészségesebb és diverz étrend kialakításához is. Az öko nemesítési célok megvalósítására számos hazai kutatási projekt nyújtott támogatást az elmúlt években, többségük piacorientált üzleti együttműködés keretében, melyekből megszületett Magyarország első bio (alakor) söre, emelt telítetlen zsírsavtartalmú bio tejtermék-családja, illetve hazánk első sörbúza fajtái (Mv Tajték, Mv Naszád), valamint sör- és malátaital termékcsaládja (Elixbeer), továbbá a növénytársítások gyakorlati (üzemi) hasznosítását és az ökológiai növénynemesítés tanúsítási eljárásrendjét leíró protokollok. Európai szinten

elsőként egy EU FP7 projekt (2010-2014) keretében végeztek kutatásokat, mellyel hazánk is hozzájárult az európai ökológiai növénynemesítési stratégia kialakításához és fejlesztéséhez. Ennek eredményeként (a tisztán ökológiai növénynemesítés elterjedéséig) egy legalább részben különálló nemesítési programot javasoltak az ökológiai és low-input (alacsony tápanyagellátottságú) termesztési körülmények közé szánt fajták előállításán, melyben a késői generációk szelekciója a célkörnyezetben mutatott teljesítményük alapján történik (Mikó et al. 2014, Rakszegi et al. 2016, Mikó et al. 2017). A nemzetközi kutatómunka további 4 EU H2020 és 1 EU Horizont Europe projekt keretében folytatódott/folytatódik, ahol hatékony európai ökológiai fajtatesztelési módszereket fejlesztenek, valamint kimagasló termésstabilitással és technológiai minőséggel rendelkező kalászos gabonafajtákat és kompozit populációkat állítanak elő. Emellett a talajjelővilág és növény kapcsolatának szelekcióban hasznosítható összefüggéseinek vizsgálata is elindult, melynek eredményeként a növénytársításokban jól teljesítő fajták szelekciója is megkezdődött. Mindegyik kutatási projektben innovatív ökológiai nemesítési és tesztelési módszereket fejlesztettek, melyek az ökológiai, illetve fenntartható mezőgazdasági gyakorlat elterjedését és térnyerését segítik, valamint eredményeikkel támogatják az európai és hazai döntéshozókat. Az ehhez hasonló tapasztalatok által is megalapozott EU Zöld Megállapodás stratégiai terv és az új KAP stratégia is kiemelten kezeli az ökológiai gazdálkodásra történő átállást és a fenntartható mezőgazdaság irányába mutató innovatív módszerek fejlesztését, adaptálását. Ennek mentén, újabban kísérletek kezdődtek az ÖMKi és az ATK együttműködésében a távérzékelés (drón által hordozott multispektrális kamerával) ökológiai nemesítésben való hasznosításával kapcsolatban.

Jövőkép

Unió szinten deklarált elvárás napjainkban, hogy csökkenjen a növénytermesztés okozta környezetterhelés, miközben annak hosszútávú versenyképességgel, fenntarthatóan kell jó és elegendő élelmiszer-alapanyagot biztosítania. Az összetett megfeleltetés során csak azok a gazdaságok (legyenek akár konvencionális akár ökológiai termesztést folytatók) maradnak életképesek, amelyek hasznosítani tudják a Mezőgazdaság 3.0 korszakának eszközeit, vagyis a precíziós technológiák, eljárások adta előnyöket. Ehhez önmagában a műszaki, technológiai, informatikai háttér kiépítése kevés, mindez szemléletváltást és célirányos szakmai felkészültséget is igényel. A precíziós gazdálkodás terjedését lassítják a szükséges feltételek megteremtésének nehézségei, miközben megkezdődött a Mezőgazdaság 4.0 korszaka, a digitális gazdálkodás, amelyben a precíziós megoldások tervezése és kivitelezése már mesterséges intelligenciával támogatott nagy adattömeg feldolgozására épül, automatizált gépek, szántóföldi robotok segítségével, melyek egyben a növénynemesítési munka fejlődését is szolgálják.

Köszönetnyilvánítás

A fejezetben ismertetett innovatív technológiák, eljárások megismerését és fejlesztését szolgáló kutatómunkánkat a TKP2021-NKTA-06 számú projekt támogatja.

Irodalom

- Mikó, P., Löschenberger, F., Hiltbrunner, J., Aebi, R., Megyeri, M., Kovács G., Molnár-Láng, M., Vida, G., Rakszegi, M. (2014): Comparison of bread wheat varieties with different breeding origin under organic and low input management. *Euphytica*, 199, 69-80.
- Rakszegi, M., Mikó, P., Löschenberger, F., Hiltbrunner, J., Aebi, R., Knapp, S., Tremmel-Bede, K., Megyeri, M., Kovács, G., Molnár-Láng, M., Vida, Gy., Láng, L., Bedő, Z. (2016): Comparison of quality parameters of wheat varieties with different breeding origin under organic and low-input conventional conditions. *Journal of Cereal Science*, 69, 297-305.
- Mikó, P., Vida, G., Rakszegi, M., Lafferty, J., Lorentz, B., Longin, C.F.H., Megyeri, M. (2017): Selection of winter durum genotypes grown under conventional and organic conditions in different European regions. *Euphytica*, 213, 169.
- Witcombe, J.R., Joshi, A., Joshi, K.D., Sthapit, B.R. (1996): Farmer participatory crop improvement I: Varietal selection and breeding methods and their impact on biodiversity. *Expl. Agric.*, 32, 445-460.

Precíziós állattenyésztés

Halas Veronika és Szendrő Zsolt

Az állattenyésztés és takarmányozás előtt két, egymással részben ellentétes elvárás van. Egyrészt a Föld növekvő és egyre jobb körülmények közt élő népességének elegendő állati eredetű élelmiszerral történő ellátása, másrészt megfelelés az állatjóléti elvárásoknak és a fenntarthatóság követelményének, mindezek mellett az állattenyésztés környezeti terhelésének csökkentése. A precíziós állattenyésztés erre megoldás lehet.

Az élelmiszer-előállítás és ezen belül az állattenyésztés egy új „forradalom” küszöbén áll. A 2000-es évek elején „precíziós állattenyésztés” (precision livestock farming: PLF) alapját az állatok elektronikus azonosítása és az egyedi kezeléséhez használt szenzorok és automatizálás teremtette meg. A precíziós állattartás során a hagyományos mérés mellett megfelelő eszközök, szenzorok, hang-, kép- és videofelvétel, informatika segítségével folyamatosan nagy mennyiségű adatot gyűjtenek, dolgoznak fel és olyan naprakész információt adnak az állattenyésztőknek, ami segít az optimális döntések meghozatalában. Az 5G kapcsolat komoly segítséget nyújt a gyors adattovábbításhoz. A felvett hatalmas adatmennyiség tárolása és értékelés érdekében a felhőalapú számítástechnikára tértek át. Ma már kiterjed a robotika, a nagy adathalmazok elemzése (big data), a gépi tanulás és a mesterséges intelligencia (AI) használata. Ezek a lehetőségek nem külön-külön, hanem együtt, egymásra épülve kerülnek alkalmazásra.

A precíziós állattenyésztéssel és takarmányozással kapcsolatban néhány példát mutatunk be.

Az állattenyésztésben az automatizálás egyik csúcspontjának a *fejőrobotok* tekinthetők. A csoportosan tartott, egyedileg azonosított tehének akkor mennek be a fejőállásba, amikor a tőgyük megtelt tejjel. A műveletsor a tehén belépésével (az egyedi azonosító leolvasásával) kezdődik. A fejőrobot a teljes fejési folyamatot automatikusan elvégzi: a tőgy előkészítését (pl. a tőgy tisztítása), a fejőkészülék felhelyezését (ehhez hőérzékelő diódákat, lézert, radart, CCD kamerát stb. alkalmaznak), a fejest (egyedi tejfolyás vezérelt vákuum és optimalizált pulzáció), a fejőkészülék levételét (tisztítását és fertőtlenítését) és a tőgy fertőtlenítését. A fejőrobot tőgynegyedenként szolgáltat adatot: méri a kifejt tej mennyiségét, a fejési sebességet, a vezetőképeséget, a vértartalmat, a szomatikus sejtszámot, ami jelzi a tőgygyulladás, a nem megfelelő minőségű tejet elkülöníti. Automatikusan észleli a tehének vemhességét és egyéb szaporodási eseményeket, a beteg egyedeket. A fejőállásban adagolt abrak (koncentrátum) – az egyedi tejtermeléshez igazodva – kiegészíti a jászolban megkapott takarmánymennyiséget. A telepi központi PC-ről bármilyen adat lekérdezhető, de vezérli pl. a klimatizálást, a tömegtakarmány-kiosztást, a trágyaeltávolító

berendezést stb. A gazdálkodó a nap 24 órájában üzeneteket kap a robot működéséről, bármilyen rendellenességről. Egyes intézkedések akár távolról is elvégezhetők (1. kép).



1. kép: A tehenek önként besétálnak a fejőállásba és amikor a karusszal körbeér, addigra befejeződik az automatikus fejés

Legelőn tartott *hízómarháknál* más feladatok vannak. A legelő hozamának és minőségének becslését talajérzékelők mellett leggyakrabban műholdfelvételek vagy drónok által készített képek elemzésével végzik (legelőhasználat tervezése). Az egyed nyomonkövethetősége itt is fontos követelmény, amire pl. a GPS-szel felszerelt nyakörv (egyben helymeghatározó) szolgál. Az aktivitást és pihenést lépésszámlálóval követik. Virtuális kerítés jelzi a legelőterület határát. Ha az állatok az irányítótornyok által kijelölt láthatatlan határvonalhoz közelítenek, akkor a nyakörv egy figyelmeztető hangjelzést bocsát ki, vagy a villanypásztorhoz hasonló elektromos ütetést ad, ha az egyed át akarja lépi a virtuális határt.

Még sok más lehetőség van adat és információ nyerésére. Ezek közül csak egyet emelünk ki. A tejelő- és a húsmarháknál egy *bóluszt* lehet a bendőbe juttatni, amely a bendőben zajló folyamatokról szolgáltat adatokat. Ilyenek a bendőmozgás, a bendő pH-ja és hőmérséklete, vízfelvétel stb. Vagyis már nemcsak a testen, a testen kívül lehet az állatokról adatokat nyerni, hanem belülről is.

Sertéseknél is számos mérő és érzékelő eszköz segíti az állatok ellenőrzését (2. kép). Az egyedi azonosítás itt is fontos követelmény. Az automatikus takarmány- és vízfogyasztás (evés és ivás gyakorisága, időtartama, elfogyasztott mennyiség), valamint a testsúly az egyedek és az állomány megfelelő és kiegyenlített növekedéséről, vagy betegség (emésztőszervi problémák) várható fellépéséről. A jóllét és egészség/betegség követhető az állatok viselkedésének elemzéséből (fekvés, ülés, mozgási aktivitás), testhőmérsékletéből és változásából (hideg, fájdalom, éhség, szomjúság), hangjából (stresszhangok: kezelés, hideg, meleg, fájdalom, éhség és szomjúság vagy légúti betegségek: köhögés).

Részben videofelvételek elemzése mutatja a rendellenes viselkedést (sántaság, agresszió, farokrágás).



a
b
2. kép: Mesterséges intelligenciával támogatott állatmonitorozási rendszer (Serket, Vítafort)
a) amit mi látunk; b) amit az MI lát

Baromfitenyésztésben (hús- és tojástermelésben), mint más istállózott állatok tartásában (pl. sertés) folyamatosan méri az istálló levegőjének hőmérsékletét, a légsebességet, a pára-, a CO₂- és a metánszintet, és a külső meteorológiai adatok figyelembevételével automatikusan vezérlik a szellőztetést, a fűtő-, a hűtő- illetve párásító berendezéseket, és ha szükséges, riasztást küldenek. Az etető- és itatórendszer automatizált, de a különleges, pelletált alom bejuttatása is gépesített. Az elfogyasztott takarmány- és ivóvíz mennyiségének, a testsúly változásának és a madarak viselkedésének követésével, akár mozgás- és hangérzékelők alkalmazásával is, sürgősen be lehet avatkozni, ha valamilyen rendellenességet észlelnek (pl. sántaság, légzőszervi- vagy emésztőszervi megbetegedések korai felismerése). A brojlerhízlalásban az istálló kiürítéséhez csirkekombájnt használnak, a fertőtlenítést pedig speciális ködfejlesztővel végzik. A tojóházakban automatizált a tojásgyűjtés és a telepen belüli futószalagon történő szállítás, valamint a válogatás és a csomagolás

Egy izraeli startup cég olyan kaptárakat (több család befogadásra alkalmas „dobozt”) gyárt, amely precíziós robotikát, számítógépes látást és mesterséges intelligenciát tartalmaz. Folyamatosan figyelik a *méhek* igényét és valós időben reagál a problémákra. Szabályozható a hőmérséklet és a páratartalom. Szükség esetén a robotok automatikusan cukrot, vizet és gyógyszereket tudnak adni. Elpusztítják a kártevőket, és még a méz pergetését is elvégzi. Probléma esetén azonnal riasztja a méhészt.

A CT (komputer röntgen tomográfia) az egyes szövetek és szervek eltérő röntgensugár elnyelő képességének mérésén alapul. Sok millió pixelből (voxelből – kockákból) nyert információja alapján különbözteti meg például az állatok izom- és zsírszövetét. Nyúltenyésztésben Kaposváron több mint 30 éve szelektálnak a hústermelés növelésére. A technika fejlődésével kezdetben még csak néhány szelet vizsgálata történt meg, ma már akár 2 mm-es szeletek készíthetők az egész testről (3. kép). Ez lehetőséget biztosít az apai vonal hústermelésének, vagy az anyai vonal kondíciójának (zsírdepók mennyisége) javítására. Más országokban például sertés- vagy juhtenyésztésben használják szelekciós céllal a CT-t. Egy brojler szelekciós

központban a testsúly mérése után a teljes pedigré állományt az istálló végére telepített mobil CT-vel mellizom-tömeg alapján választják ki. CT-vizsgálatokkal állapították meg például, hogy a libák tömésének befejezése után a zsíros máj teljesen visszaalakul. Kaposváriakkal együttműködve fejlesztették azt a dán sertés vágóvonalat, ahol a levágott testekről részletes CT-felvételek készülnek, majd a darabolást robotok végzik, pontosabban, mint a hentesek.



3. kép: A teljes testet lefedő, 2 mm-es szeletvastagsággal készülnek a felvételek egyszerre három nyúlról

A *genomika* már most is sokat profitál abból, hogy nagy adathalmazokat rögzít és elemez. A 21. század elején bevezették a genomikus szelekciót. A becsült genomikus tenyészték már fiatal, akár embrionális korban megállapítható. Segítségével a gyengén öröklődő tulajdonságok, pl. a termékenység és az egészség is gyorsabban javíthatók. A genomiális szelekció bevezetése után az amerikai holsteinnél a tejhozamban hét év alatt kétszer nagyobb lett a genetikai előrehaladás. A módszert sertés, húsmarha, juh, kecske, baromfi esetében is alkalmazzák. A takarmányértékesítés, a CO₂- vagy a metánkibocsátás is szelekciós szempont lett. Szelekciós indexbe építve, 2050-re akár 24%-kal is csökkenhet a metánkibocsátás. Elkezdődött a mikrobiom összetétel figyelembevétele, aminek az egészség és a termelés szempontjából is nagy a jelentősége. Az epigenetikában rejlő előnyöket is csak most kezdjük hasznosítani. A génszerkesztés újabb távlatokat nyit a kimagasló tenyésztékű állatok előállításában.

A CRISPR technológia, mint precíziós nemesítési módszer lehetővé teszi egy adott tulajdonság génjének célzott módosítását. A *génszerkesztés*, a CRISPR/Cas9 rendszer használata Magyarországon még nem engedélyezett, pedig hatékony és olcsó módszer, hatalmas lehetőséget rejt magában. Más országokban egymás után érnek el ennek alkalmazásával szép eredményeket. Egyik ilyen lehetőség a szuperizmoltság, amely

természetes mutációval szarvasmarhában és juhban is kialakult. CRISPR/Cas9 rendszerrel a miosztatin gén blokkolásával sertésben és kecskében is létrehoztak szupeizmolt változatot, sőt Gödöllőn nyúlban is. Az USA-ban már évek óta fogyasztható gyors növekedésű lazac. Genomszerkesztéssel a jobb hőűröképesség érdekében extrém rövid szőrzetű szarvasmarhát, vagy biztonságosabban kezelhető, szarvnélküli bikaborjakat állítottak elő. Tyúktenyésztésben dolgoznak az alacsony allergéntartalmú tojásokat tojó állomány kialakításán, amelyet ezekre a fehérjékre érzékeny emberek is nyugodtan fogyaszthatják. Talán legnagyobb gazdasági jelentősége a betegségekkel szemben rezisztens állatok létrehozása lesz, aminek különös szerepe várható az újonnan megjelenő betegségek, pl. a sertéspestis legyőzésében.

Az automatizálás, a robotika vagy a mesterséges intelligencia (AI) szinte felfoghatatlan lehetőségeket nyújt az állattenyésztés számára. Mindezek a termelés és az állatjóllét javítását, a környezeti terhelés és az állatbetegségek radikális csökkentését fogják eredményezni. Ugyanakkor a rendkívül heterogén állattenyésztés (faj- és fajtagazdagság, nagyon eltérő termelési feltételek, szakértelem, pénzügyi lehetőségek stb.) miatt, az Agriculture 4.0 elvi lehetősége sok területen csak lassan fog megvalósulni.

Irodalom:

- Aquilani C., Confessore, A. Bozzi R., Sirtori F., Pugliese C. 2022. Precision Livestock Farming technologies in pasture-based livestock systems. *Animal*, 16, 100429
- De Koning, C.J.A.M. 2010. Automatic milking—Common practice on dairy farms. First North American Conference on Precision Dairy Management. Guelph, Ontario, Canada, 52-67.
- Donkó T., Csóka Á., Petneházy Ö., Repa I. 2022. Komputertomográfia alkalmazása nyúltenyésztésben. *Állatteny. Tak.*, 71, 139-147.
- Lázár B., Gócsa E. 2024. Precíziós nemesítési eljárások alkalmazása a fenntartható és felelős állattenyésztés elősegítésére. *Állatteny. Tak.*, 73, 30-46.
- Olejnik, K.; Popiela, E.; Opalinski, S. 2022. Emerging Precision Management Methods in Poultry. *Agriculture*, 12, 718.
- Rodenburg J. 2016. Robotic milking: Technology, farm design, and effects on work flow. *J. Dairy Sci.*, 100, 7729–7738.
- Szendró Zs., Romvári R., Nagy I., Andrásy-Baka G., Metzger Sz., Radnai I., Biró-Németh E., Szabó A., Vígh Zs., Horn P. 2004. Selection of Pannon White rabbits based on computerised tomography. 8th World Rabbit Congress, Puebla, Mexico, 175-180.
- Tzanidakis C., Simitzis P., Arvanitis K., Panagakis P., 2021. An overview of the current trends in precision pig farming technologies. *Livest. Sci.*, 249, 104530.
- Vranken E., Berckmans D. 2017. Precision livestock farming for pigs. *Anim. Front.*, 7, 32-37.
- Xin H., Liu K. 2017. Precision livestock farming in egg production. *Anim. Front.*, 7, 24-31.

Yin M., RMa R., Luo H., Jun Li a, Zhao Q., Zhang M. 2023. Non-contact sensing technology enables precision livestock farming in smart farms. *Comput. Electron. Agric.*, 212, 108171

URL1: <https://www.france24.com/en/live-news/20220518-robot-hives-in-israel-kibbutz-hope-to-keep-bees-buzzing>

Élelmiszerminőség

*Friedrich László Ferenc, Nguyen Duc Quang, Kovács Zoltán, Jónás Gábor,
Mohácsiné Farkas Csilla*

Az élelmiszeripar jelentős szerepet tölt be a világ, illetve az egyes országok élelmiszerellátásában. Az élelmiszer mindig stratégiai termékként jelent meg nemzetgazdasági és szuverenitási tekintetben, külön kiemelve a nemzetközi piacokon való megjelenést és versenyképességet. Az utóbbi évek erőteljesen rávilágítottak a versenyképes termelés alapjául szolgáló hatékonyságnövelésre és az élelmiszerminőségre, amelyben a digitalizációnak több tekintetben jelentős szerepe van. Az Ipar 4.0 megjelenésével új lehetőségek és információk kerültek az élelmiszeriparba, amelyek a modern, versenyképességet, nagyobb kapacitást jelentő hardver eszközökön túl szemléletváltást is eredményeztek. Első lépésben jellemzően a digitalizáció a robotok, robotkarok, automata rendszerek alkalmazásában lévő lehetőségeket jelentette. A digitalizáció azonban ennél jóval több, ezekre a modern eszközökre elsősorban beavatkozóként kell tekinteni. A tényleges digitalizáció a termelésből származó adatok gyűjtését, feldolgozását, és ezekből eredően döntéselőkészítést jelent, amely az adatalapú döntés alapja. Az elmúlt 4-5 év során az élelmiszeripar hasonlóan más iparágakhoz ezen a fejlődési folyamaton ment keresztül, és eljutott az adatalapú döntéstámogató rendszerek alkalmazásáig. Ez a fejlődés viszonylag hosszú folyamat. Több élelmiszeripari üzem már ilyen módon irányítja a termelését, de számos üzem esetében ezen folyamatok lassabban érik el az adatvezérelt irányítási rendszert. Ez a digitalizációs szintbeli különbség az élelmiszeripari alágazattól, az üzemmérettől és az előállított terméktípustól és minőségtől függ. Ezért az élelmiszeripar számára kiemelt fontosságú az élelmiszeripari digitalizáció minél magasabb szintű megvalósítása a teljes vertikumban. Ebben szerepet játszik a 2022-ben elfogadott hazai Digitális Élelmiszeripari Stratégia, amely a teljes ellátási láncot magába foglaló digitalizációt valósít meg. Ebbe beletartozik a mezőgazdasági alapanyag-minősítés és nyomonkövetés, az élelmiszeripari feldolgozás, az élelmiszerlogisztika- és kereskedelem egészen a fogyasztóig. Ehhez a rendszerszintű gondolkodáshoz és irányításhoz az egyes területeken képződő termelési és termékminőségi adatok összekapcsolására van szükség. Vagyis a mezőgazdasági termelésből származó alapanyag minőségre és mennyiségre, eredetre vonatkozó adatoknak kompatibilisnek kell lenniük az élelmiszeripar számára, majd azoknak az élelmiszerlogisztika- és kereskedelem számára, és visszafelé. Ez jelenti az adatok interoperabilitását, összekapcsolhatóságát. Ez az alapja az adatalapú teljes ellátási láncot lefedő adatrendszernek, valamint az adatalapú termelésnek. Erre számos példa található a nemzetközi élelmiszeripari vállalkozások, üzemek esetében Lengyelországban, Németországban és a Távol-Keleten egyaránt. A

nemzetközi szintű élelmiszertermelésben és forgalmazásban nagy jelentősége van a komplex, határokön átívelő adatalapú élelmiszer-biztonsági rendszereknek.

Ennek megfelelően az élelmiszer-biztonság (food safety) fogalma az utóbbi években nagymértékben felértékelődött. Codex Alimentarius általános élelmiszerhigiéniai irányelveinek fogalom-meghatározása között található meg az élelmiszer-biztonság fogalma, az alábbiak szerint: „Az élelmiszer-biztonság annak biztosítása, hogy az élelmiszer nem okoz egészségi ártalmat a fogyasztónál, ha azt a tervezett módon készítik el és fogyasztják el.”

Annak meghatározása, hogy az élelmiszer fogyasztásának mi a kockázata, mennyi lehet az elfogadható kockázat szintje, a kockázatelemzés módszerén alapul, amelyhez a digitalizáció alapját képező adatbázisok szükségesek. Az élelmiszerekre, takarmányokra, állati eledelre vonatkozó előírások betartásáért elsődlegesen az adott vállalkozás vezetője felelős, akinek az előírásoknak való megfelelést bizonyítani is kell. Ehhez a termék nyomon követése különböző digitalizációs megoldások (pl. QR kód, RFID-tag, vonalkód) alkalmazásokkal valósítható meg.

Az Európai Unió „élelmiszertörvénye” (178/2002 EC Regulation) szerint a biztonságos, és minden szempontból megfelelő élelmiszerek szabad áramlása a belső piac alapja, mely a fogyasztók egészségét, szociális és gazdasági érdekeit kedvezően befolyásolja. Ugyanakkor az élelmiszer eredetű megbetegedések világszerte jelentős, és egyre növekvő problémát jelentenek. Azok az országok, ahol megbízható bejelentési rendszer működik, olyan adatbázist tudnak létrehozni, amely a predikciót lehetővé teszi. Ezen adatok feldolgozásának eredményei szerint a megbetegedések számának folyamatos emelkedése mutatkozik. Egyre gyakrabban fordulnak elő a mikrobiológiai ágensek által előidézett élelmiszerfertőzések, melyeket sok esetben élelmiszerben eddig nem szokásos, vagy új tulajdonságokat mutató kórokozók idéznek elő. A kémiai veszélyek nem kevésbé jelentősek, csak a megbetegedések késői kialakulása miatt sokkal nehezebb igazolni az ilyen megbetegedések eredetét, egy bizonyos élelmiszerral való összefüggését. A fejlődő országokban az élelmiszerekkel terjesztett parazitózisok, helminthiasisok (egysejtű véglények, bélférgesek által okozott megbetegedések) is jelentős arányt képviselnek. Az élelmiszer-eredetű megbetegedések előfordulásának gyakoriságát a WHO még a fejlett ipari országok vonatkozásában is évente 10-30%-ra becsüli, melynek csak töredéke kerül bejelentésre.

Látható tehát, hogy adatok gyűjtése és feldolgozása által képezhető olyan adatgyűjtési hálózat és adatbázis, amely mikrobiológiai veszélyforrások előrejelzését teszi lehetővé. Ezért fontos, hogy világszinten minél több ország megfelelő adatszolgáltatást és monitorozást biztosítson. Amelyhez rendkívül jól szervezett hardver- és szoftverrendszert kell kiépíteni. Ehhez illeszkedik az EU tagországokban működő, az élelmiszerekre és a takarmányokra vonatkozó gyorsvészjelző rendszer (RASFF, Rapid Alert System for Food and Feed) létrehozása és működtetése, amelyet a 178/2002/EK rendelet ír elő. Az élelmiszerek minőségét, fizikai, kémiai és

mikrobiológiai biztonságát leíró adatok az élelmiszer- és takarmánybiztonsági riasztási rendszer működésének központi elemei. A szervezet egyes tagországainak élelmiszerbiztonsági szervezetei által gyűjtött adatainak egy rendszerbe történő integrálásával az európai uniós élelmiszerbiztonsági adatrendszer kompatibilitása és áttekintése lehetővé válik.

A Magyar Köztársaság Kormánya a Nemzeti Élelmiszerlánc-biztonsági Hivatalról (Nébih) szóló 22/2012. (II. 29.) Korm. rendeletének 9. § (2) d) pontja szerint a Nébih kijelölt kapcsolattartó pont az Európai Unió élelmiszerekre és takarmányokra vonatkozó gyors vészjelző rendszerének hálózatában. A Hivatalon belül a nemzeti kapcsolattartó pont az Élelmiszerbiztonsági Kockázatértékelési Igazgatóság (ÉKI).

A tagállamok haladéktalanul jelentik a Bizottságnak a sürgősségi riasztórendszeren keresztül az élelmiszerekből és takarmányokból származó, az emberi egészséget közvetve vagy közvetlenül érintő veszélyt. A rendszer kiterjed a tagállamokra, a Bizottságra és a Hatóságra (Európai Élelmiszerbiztonsági Hatóság). Amennyiben a hálózat valamelyik tagja élelmiszerekből és takarmányokból eredő, az emberi egészséget veszélyeztető, súlyos, közvetlen vagy közvetett kockázatról szerez tudomást, ezt az információt a sürgősségi riasztórendszer keretében haladéktalanul jelenti a Bizottságnak, amely haladéktalanul továbbítja az információt a hálózat tagjainak. Ennek feltétele a teljes nyomonkövetési RASFF rendszer működtetése, amellyel a kereskedelemtől a feldolgozón át egészen az alapanyag-beszállításig nyomon követhetővé és kiszűrhetővé válik az emberi egészségre káros veszélyforrás. Ez a működő rendszer jó példa arra, hogy a tagországok adatrendszerei eredményesen összekapcsolhatók, és visszacsatolást biztosítanak. A RASFF rendszerben megjelenő értesítések összesítése heti rendszerességgel történik. A kapcsolódó dokumentumként letölthető magyar nyelvű tájékoztató a heti riasztásokat tartalmazza. A RASFF rendszerben közzétett értesítések között a nyilvánosan hozzáférhető adatbázisban kereshet bejelentési kategória, tárgy, időpont, értesítési, származási, valamint célország, továbbá értesítés típusa és termék kategória szerint.

A riasztási rendszerek mellett az agrárszektorban, így az élelmiszertermelés folyamán is növekvő igény mutatkozik az élelmiszerek származásának ismerete iránt. Ennek eszköze a nyomonkövetési rendszerek alkalmazása, amelyek segítségével könnyen és hatékonyan lehet követni és ellenőrizni a termékek, állatok vagy más erőforrások mozgását és eredetét. Jó példa az élőállat nyomon követésére az állattenyésztéstől a kereskedelmi hűtőbútorban megtalálható friss hús a sertés, marha, kecske és juh esetében az Egységes Nyilvántartási és Azonosítási Rendszer (ENAR) és a baromfi esetében a Baromfi Információs Rendszer (BIR) szerinti azonosítás. A szürkemarhánál ENAR szám (1. ábra) alapján egyedi azonosítás biztosított a fogyasztók számára. A tejtermékek és húskészítmények esetében a sarzszám szerinti beazonosítás történik. Továbbá a tengeri halak nyomonkövetése a kifogástól a fogyasztóig.

ENAR-SZÁM

A Szomor Húszem minden szürkemarha-tenyésztőjének megalkotója és tulajdonosa, amely a Magyar Szürkemarha-tenyésztők Egyesületének nyilvános adatait tartalmazza, így ez az ENAR-SZÁM.

Küldje el SMS-ben a termék címet az ENAR-SZÁMra, és a szürkemarha-tenyésztők adatai alapján a gyártási számmal megadott információkat, és a vásárlói megelégedéséről, hogy valóban magyar szürkemarhából készült terméket vásárolt.

Azt is megtudhatja, ki volt az állat tenyésztője, mikor született, mikor szüretelt és hol dolgozott fel.

3212480585
Eredeti „magyar szürkemarha hús”
SZOMORHU 1074

EREDETVÉDELEM
ENAR KÓD + SMS SMS: + 36-30-469-1425

The image shows a smartphone screen displaying an SMS message. The message text is: "Eredeti „Magyar szürkemarha hús”! Vásárlásnál megadott gyártási és állomány-azonosítási szám alapján a termék eredetét megismerheti. A termék címet az ENAR-SZÁMra küldve megadhatja az állat tenyésztőjének nevét, születési idejét, mikor szüretelt, és hol dolgozott fel. A termék címet az ENAR-SZÁMra küldve megadhatja az állat tenyésztőjének nevét, születési idejét, mikor szüretelt, és hol dolgozott fel." The phone's status bar at the top shows the time as 10:08 and the sender as "Szomor HU".

1. ábra: Az ENAR szám alapján a magyar szürkemarha hús eredetét igazoló SMS üzenet (Forrás: <https://szomordezso.eu/>)

Az alapanyag, félkész- és késztermék eredete mellett azok minősége, valamint a technológiai folyamatoknak a validálása klasszikus és modern szenzoros mérés technikákkal, folyamatos ellenőrzést biztosító online rendszerek alkalmazásával monitorozható. Az objektív méréseken alapuló termékminőség és a feldolgozás során alkalmazott technológiai paraméterek korreláltatásával az alapanyag és a gyártási paraméterek termékminőségre gyakorolt hatása feltárásra kerül, amely a minőség és a gyártástechnológia optimalizálását biztosítja. A modern mérés technikai és automatizálási eszközök összehangolt működésükkel az adatgyűjtéstől a minőség-ellenőrzésen át a beavatkozásig csökkentik a humán erőforrás igényt. Továbbá kiküszöbölik a humán munkaerő fáradásából származó hibákat, és ezáltal biztosítják az objektivitáson alapuló állandó termékminőséget. A termékminősítésben jellemző mérőeszközök a tömegmérés eszközei, a hőmérők, a pH mérés, a kamerák és különböző hullámhosszú látórendszerek (látható tartomány, közeli-infravörös tartomány, hiperspektrális rendszerek), a mesterséges érzékszervek, mint az elektronikus orr és nyelv. Ezen mérések során képződött adatok minőségirányítási rendszerekbe való beillesztésével adatbázisok épülnek fel, amelyek lehetővé teszik a termelés naplózását, hozzájárulva ezzel a visszakereshetőséghez. Továbbá ezek segítségével prediktálható a termék minőségváltozása az alapanyagminőség és termelési paraméterek változása mellett. Erre jó példa a mikrobiológiai predikció a Combase program alkalmazásával, amelynél adott élelmiszer mátrix minőségi paramétereinek, mint pH, vízkivétel mellett adott mikroorganizmus kiválasztásával tárolási hőmérséklet függvényében prediktálható a mikrobaszám a tárolás során.

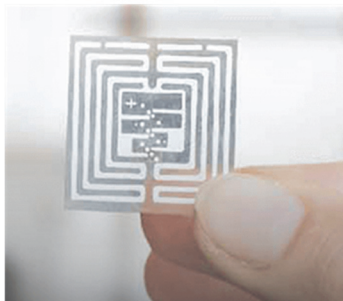
A minőségbiztosításban a termelési folyamatok mellett az ellátási lánc további elemeinek az ellenőrzése olyan komplex információt biztosít a termékről, amely nagymértékben hozzájárul a fogyasztói bizalom növeléséhez. Ennek megfelelően az élelmiszerlánc mentén a termék nyomon követhetőségében nemzetközi szinten széles körben alkalmazottak a GS1 szabványok. Ebben a rendszerben az egyedi vonalkódok és az elektronikus adatcserék lehetővé teszik az információk egységes kezelését a különböző

gyártók, szállítók és kereskedők között. A GS1 vonalkódok segítik a pontos és gyors adatgyűjtést, valamint az automatizált raktározást és készletkezelést. Az élelmiszerek csomagolásán található egyedi kódok lehetővé teszik az azonosítást és nyomon követést a termelőtől a fogyasztóig. A vonalkódok egyszerű felépítésű, ún. egy dimeziós (1D) vizuális kódok. A fogyasztók számára ezek nem, vagy csak hozzáértők számára hordoznak érdemi információt. Az utóbbi években megjelent kétdimenziós (2D) kódok, mint a QR kód, vagy Datamatrix több információ tárolására képes, továbbá marketing célokra is felhasználható (2. ábra).



2. ábra: Vonalkód és QR kódok

A vonalkóddal együtt egyre elterjedtebb az RFID (rádiófrekvenciás azonosítás) technológiák alkalmazása az azonosításban és szélesebb körű információ áramlására. Az RFID technológia lehetővé teszi az élelmiszerek egyedi azonosítását és nyomon követését rádióhullámok segítségével. Az RFID címkéket a termékeken el lehet helyezni. Az címkékben lévő antenna segítségével olvasóeszközökkel (antennákkal) kinyerhetők a benne eltárolt információk (3. ábra). Az RFID eszközök kombinálhatók például hőmérséklet és páratartalom érzékelőkkel. Az RFID előnye a vonalkódokhoz és adatmátrixokhoz képest, hogy az olvasó eszköznek nem kell fizikailag „rálátnia” a termékre, és nagyobb távolságból történő adatkinyerést tesz lehetővé



3. ábra: Rádiófrekvenciás azonosító címke (RFID Tag) (Forrás: <https://www.aeologic.com/>)

A termékazonosítók alkalmazása mellett az élelmiszerbiztonság elérésére érdekében veszélyelemzés és kritikus ellenőrzőpontok (HACCP) rendszert alkalmaznak az élelmiszerelőállításban és forgalmazásában, amelyet az 1970-es években fejlesztettek ki az űrutazáshoz kapcsolódóan. A

HACCP-rendszerben fontos a fogyasztói termékláncszemlélet, amely két meghatározó fő elemet tartalmaz: a jól átgondolt tevékenységet, valamint a jól tervezett és alkalmazott ellenőrzést a teljes élelmiszerláncban. Az élelmiszer előállításában, szállításában és forgalmazásában a HACCP-rendszer gördülékeny működéséhez tartoznak a dokumentálási tevékenységek, amelyek terveket, utasításokat és naplózásokat foglalnak magukba. Az üzemek és logisztikai láncok digitalizálásával a HACCP rendszer dokumentumai elektronikus formában adatbázisokká köthetők össze. Számos hazai és nemzetközi cég szállítja a megoldásokat (okos HACCP, eHACCP, DigitalHACCP, FoodReady, iFoodDS, SynergySuite, stb.) az elektronikus HACCP rendszer megvalósítására. Döntő többségük a felhőtechnológiát alkalmazza az adatok tárolására és online szolgáltatás biztosítására. Az elektronikus HACCP rendszer kiépítése és üzemeltetése a 61/2023. (XI. 20.) AM rendelet szerint 2024. március 1-től kötelező minden élelmiszerrel foglalkozó vállalkozás számára a kis- és középvállalkozások kivételével.

A riasztási, a nyomonkövetési és a HACCP rendszerekhez kapcsolódóan a blokklánc (blockchain) technológia egyre növekvő népszerűségnek örvend az élelmiszer nyomonkövetési rendszerekben. Ez a decentralizált adatbázisrendszer lehetővé teszi az összes résztvevő számára, hogy valós idejű hozzáférést kapjon az információkhoz, és biztosítja az adatok integritását. A blokklánc segítségével könnyebb azonosítani és megszüntetni a hamisított termékeket, valamint javítani a fogyasztói bizalmat. Számos digitalizációs fejlesztés történik a blockchain technológia kiszélesítésére az élelmiszertermékek körében, mint például az EBSI (European Blockchain Services Infrastructure – Európai Blockchain Szolgáltatási Infrastruktúra) rendszer fejlesztésén belül a burgonya, a sertéshús és a tojás nyomonkövetése. Az EBSI rendszeren belüli élelmiszertermékek adatbázisának bővítése folyamatosan történik az európai rendszerben, ezért minden tagország közös feladata a termékkör és a hozzá tartozó adatbázis bővítése. Ebben Magyarország is jelentős szerepet vállal, segítve az élelmiszer eredetének nyomon követését és minőségének növelését.

Élelmiszerláncok – a szántóföldtől és az istállótól az asztalig

Az élelmiszer nyomon követés az folyamat, amely során az élelmiszerek útját követjük nyomon a szántóföldtől vagy istállótól egészen a fogyasztóig. Ez magában foglalja az élelmiszerek termesztését, takarmányozását, feldolgozását, csomagolását, szállítását és értékesítését. Az élelmiszer nyomonkövetése fontos szerepet játszik az élelmiszerbiztonság és -minőség biztosításában és fejlesztésében egyaránt. Az élelmiszer nyomonkövetése lehetővé teszi, hogy az élelmiszerek eredetét, gyártási folyamatát és szállítási útvonalát dokumentáljuk. Ez segít az élelmiszeripari vállalatoknak és hatóságoknak az esetleges élelmiszerbiztonsági problémák gyors azonosításában és kezelésében. Ha például egy élelmiszerrel

kapcsolatba hozható járvány vagy szennyeződési eset történik, a nyomon követés lehetővé teszi a gyors visszahívást és az érintett termékek azonosítását. Emellett az élelmiszer nyomonkövetése lehetővé teszi a fogyasztók számára, hogy tájékozott döntéseket hozzanak az élelmiszerek vásárlásakor. A nyomon követés révén a fogyasztók betekintést nyerhetnek az élelmiszer előállítási folyamatába, és megbizonyosodhatnak arról, hogy az élelmiszer megfelel az előírt minőségi és biztonsági kritériumoknak.

A teljes élelmiszerellátási láncban az élelmiszeripari feldolgozás közepén helyezkedik el, összekötő szerepet tölt be a mezőgazdasági alapanyagtermelés, az élelmiszerlogisztika és a kereskedelemen át egészen a fogyasztóig. A mai szélesebb értelemben vett ellátási láncok az élelmezés fontosságára való tekintettel egészen a lakosság táplálkozásától függő egészségi állapotáig értendők. A digitalizáció adatalapú eszközrendszerével az ellátási lánc egyes területei összeköthetők. Ebben a rendszerszintű adattérben a termelési, termékminőségi és értékesítési adatok összekapcsolhatók. Látható, hogy az adatok meghatározó szerepet játszanak az ellátási lánc hatékony működtetésében. Ezért a termelési folyamatok optimalizálása megfelelő adatgyűjtő mérőrendszer alkalmazásával, valamint az automata beavatkozók, mint a robotok és robotkarok termelési rendszerbe való integrálásával megvalósítható. Több hazai üzem esetében meg is valósított. Ennek a szélesebb körben való megvalósítása üzemméret és terméktípus szerint fejlesztési lehetőséget jelent. Emellett a teljes ellátási láncot összekapcsoló, adatalapú termelésirányításban az egyes területek, mint alapanyag és logisztika-kereskedelem, még sok fejlesztést igényelnek az adatok összekapcsolhatósága tekintetében. Számos jó példával találkozunk a nyomon követésben, ahol a szántóföldtől az asztalig nyomon tudjuk követni a termék eredetét.

A halászlé iparban már ma is használatos nyomonkövetési rendszerek komoly előrelépést jelentenek az illegális halászlé és a tengeri erőforrások fenntartható kezelése terén. Az ilyen rendszerek lehetővé teszik a halak útjának nyomon követését a fogás helyétől a feldolgozó üzemekig. Az ENAR kód alkalmazása a szürkemarhák és más állatok esetében különösen fontos, mivel segít a tenyésztőknek és termelőknek betartani az állat- és növényegészségügyi előírásokat. A rendszer működése egyszerű, a terméken elhelyezett kódot egy fogyasztó vagy érdekelt fél könnyen beolvassza egy mobiltelefonnal vagy egyéb eszközzel. Ezután az ENAR rendszer visszaküldi az eredet információit, amelyek részletes képet adnak a termék útvjáról és származásáról. Ez nemcsak a fogyasztóknak biztosítja a termék iránti bizalmat, hanem a vállalatoknak is lehetőséget nyújt a minőségi ellenőrzésre és a folyamatok optimalizálására. Az ENAR kód tehát nem csupán egy egyszerű kódsor, hanem egy hatékony eszköz a termék nyomon követéséhez és az átláthatóság növeléséhez. A rendszer alkalmazása hozzájárul a fogyasztók és az iparágak közötti bizalom megerősítéséhez, miközben elősegíti a fenntartható gazdálkodást és az ágazatok fejlődését. Az ENAR kód így kiemelkedő példája a modern technológia és az információs

rendszerek hasznos alkalmazásának a fenntartható fejlődés és az átláthatóság elősegítésére.

Az alapanyagbeszállítási és termelési rendszerek által képzett adatok adattavai, adatsilói és a vállalatirányítási rendszerek, által generált adatok adattavai, adatsilói közötti kapcsolat kialakítása jelenti a legnagyobb kihívást az élelmiszeripari digitalizáció számára. A nagy élelmiszergyártó vállalatoknál általában két párhuzamos digitális rendszert üzemeltetnek: a vállalatirányítási rendszert (pl. SAP) és a termelésirányítási rendszert. Ebben kiemelt szerepe van a digitális készletgazdálkodási rendszer működtetésének és vállaltirányításba való integrálásának. A vállalatirányítási rendszer tartalmazza azon információkat (adatokat), amelyek meghatározóak a vállalatműködésében: alapanyag forrása, minősége, ára, beszerzési mennyisége, a készletgazdálkodás, a gazdasági folyamatok, gyártott mennyisége, vevők stb.

A termelésirányítási rendszerek általában egyediek, amelyek a technológiai folyamatokat, aktuális gyártási paramétereket, a gépek állapotát, anyagáramot, energiaáramot, vízáramot stb. foglalják magukba. Számos szenzortípust (hőmérséklet, tömeg, pH, rotaméter, NIR stb.) alkalmaznak az adatok gyűjtésére és központi adattárolókban való tárolására pedig szerverközpontokat. Szintén egyre jobban alkalmazzák a modern beavatkozó egységeket is (automata szelepek, robotkarok) a fizikai alkalmazottak helyett.

A leírtak alapján látható, hogy adatokra van szükség, amelyek a termelésből származnak mérőrendszerek alkalmazásával. Ilyenek az alapanyag minősítő módszerek és eszközök, a színmérők, a látórendszerek, a kamerák, a kihozatalt mérő tömegmérlegek, az egyéb fizikai, kémiai, mikrobiológiai és érzékszervi tulajdonságokat vizsgáló laboratóriumok. Továbbá a termelési technológiai paraméterek, mint a hőmérséklet, a nyomás, a technológiai idő stb., amelyek az élelmiszertermék minőségét a termelés hatékonyságát határozzák meg. Valamint a vállalatirányítás, a logisztika- és kereskedelem tekintetében az alapanyag- és árukészlet és a vevői és szállítói megrendelések összessége.

Látható, hogy ebben a rendszerben számos adat képződik, amelyek nagy része feldolgozásra kerül. Vannak azonban olyan technológiai folyamatok, amelyben a termékminőség javítása, a minőség nyomonkövetése és a hatékonyság növelése érdekében további méréseket kell elvégezni. Ezek között szerepelnek az online és a szakaszos, valamint a roncsolásos és a roncsolásmentes mérési módszerek. A roncsolásmentes méréstechnikák az élelmiszeriparban rendkívül fontosak, mivel lehetővé teszik a termékek minőségének, összetételének és tulajdonságainak roncsolásmentes vizsgálatát. Manapság az ipar, ahol lehet a roncsolásmentes, online, folyamatos információt biztosító mérőrendszereket alkalmazza. Ilyenek például az ultrahangos állománymérők a sajtgyártásban az alvadék felvágásánál, vagy a sertéshús sütési fokozatának meghatározásában. A savfok és pH mérők a kovászolásnál, a folyamatos mérlegek a szeletelt sajtok, húskészítmények csomagolásánál, a közeli infravörös technika alkalmazása fehérje, zsírtartalom meghatározására, illetve élelmiszerek

eredetének meghatározására. A hőképalkotás infravörös sugárzást használ a hőmérsékleti eloszlás megjelenítésére a termékeken. Hőképalkotással ellenőrizhető például a hűtőberendezések hatékonysága, vagy figyelemmel kísérhető a folyamatok során keletkezett hő. Az MRI (Mágneses rezonancia képalkotás) a mágneses mezők és rádióhullámok egyidejű alkalmazásával készíti el a képeket, lehetővé téve a belső struktúrák részletes vizsgálatát. Az élelmiszeriparban például az MRI segíthet a gyümölcsök belső minőségének, például a víztartalomnak a meghatározásában, vagy szemestermények esetében olaj és nedvesség mérésre is. A színvizsgálat az élelmiszerek színének értékelésére szolgáló vizsgálati technika. Széles körben alkalmazzák például a gyümölcsök és zöldségek érettségének meghatározására és a frissesség vizsgálatára. Például a megfelelő színjelzés segít eldönteni a paradicsom érettségi szintjét.

A kamerás minőségellenőrzés olyan technika, amelyben kamerákat használnak az élelmiszerek megjelenésének, színének, formájának és egyéb vizuális jellemzőinek értékelésére. Ez a mérési módszer kihasználja a kamerák képalkotó és érzékelő képességeit, hogy részletesen vizsgálja és dokumentálja az élelmiszerek megjelenését. Az élelmiszeriparban a kamerás minőségellenőrzéseket széles körben alkalmazzák a termékek megjelenésének és minőségének ellenőrzésére. A kamerás minőségellenőrzések segítik a csomagolási folyamatokat, ellenőrizve a csomagolás integritását, címkék helyes elhelyezését és a termékek általános megjelenését. A kamerás minőségellenőrzések kulcsfontosságúak a színkonzisztencia ellenőrzésében. Különböző gyártási tételek közötti színek összehasonlítására, illetve a színhibák vagy eltérések azonosítására alkalmazzák. A termékek minőségének értékelése során a kamerás minőségellenőrzések segítik az élelmiszerek esztétikai vonzerejének, méretének és egyéb jellemzőinek értékelését. A kamerás minőségellenőrzések alkalmazhatók a termékek formájának és méretének ellenőrzésére, különösen olyan iparágakban, ahol a kozmetikai megjelenés kritikus szerepet játszik. A kamerás minőségellenőrzések segíthetnek a folyamatokban előforduló hibák, például szennyeződések vagy deformációk azonosításában, ezáltal javítva a termelési hatékonyságot.

Ezen roncsolásmentes méréstechnikák alkalmazása az élelmiszeriparban hozzájárul a hatékonyabb gyártási folyamatokhoz, a termékek minőségének javításához és a végfelhasználói bizalom növeléséhez. Azok a vállalatok, amelyek ezeket a technológiákat alkalmazzák, gyorsabb és pontosabb információkat kaphatnak termékeikről anélkül, hogy károsítanák azokat, így elősegítve a fenntartható és minőségi termelést.

A roncsolásmentes méréstechnikák alkalmazása mellett az élelmiszeriparban számos innovatív technológia játszik szerepet az üzemen belüli anyagmozgás és nyomon követés folyamataiban. Az élőképes technológiai megoldások közé tartoznak az RFID (rádiófrekvenciás azonosítás) címkék, amelyek lehetővé teszik a termékek egyedi azonosítását és követését az egész gyártási láncban. Emellett a QR-kódok, NFC (Near

Field Communication) és az intelligens szenzorok alkalmazása is növeli a termékek nyomon követhetőségét.

Az érzékelő technológiák és az Internet of Things (IoT) együttes alkalmazása lehetővé teszi az intelligens gyártási környezet kialakítását. Intelligens érzékelők monitorozzák a hőmérsékletet, páratartalmat, szállítási feltételeket és más kritikus paramétereket, miközben az IoT eszközök összekapcsolják az adatokat az élelmiszeripari vállalkozások informatikai rendszereivel. Így egy-egy üzem esetében percenként több ezer adat képződik, amelyek összegyűjtése, adatfeldolgozása informatikai és élelmiszermérnöki feladat.

Ezen adatok alapján optimalizálhatóak a gyártási folyamatok, legyen az egy baromfivágás, csontozás, egy joghurtgyártás, kenyérgyártás, vagy egy söripari erjesztési folyamat. Mind azt a célt szolgálja, hogy a termék minősége minél jobb és egyenletes legyen a gazdaságossági szempontok figyelembevételével. Az adatfeldolgozáshoz, értékeléshez és döntéselőkészítéshez jelentős élelmiszeripari és statisztikai ismeretekre van szükség, ezért az adatalapú döntéssirányítást alkalmazó üzemek alkalmazásában az élelmiszermérnökök mellett informatikus, matematika-statisztikus is dolgozik. A statisztikailag értékelt adatok ismeretében az élelmiszermérnök feladata az optimális döntés kiválasztása a termékminőség és termelékenység figyelembevételével. Az utóbbi években a mesterséges intelligencia alkalmazása megjelent az adatfeldolgozásban és döntéselőkészítésben. A mesterséges intelligencia az adatok összehasonlítását és értékelését modellek alapján az input adatok mennyiségétől függően különböző szinteken képes elvégezni. Ez sokat segít a folyamat optimalizálásában és a különböző döntési lehetőségek felvázolásában, amelyet a vezető választ ki, és dönt. Az utóbbi 2-3 évben a mesterséges intelligencia terjedése jelentősen hozzájárult az élelmiszeripar digitalizációjához és versenyképességének növekedéséhez.

Az élelmiszerfeldolgozásban az alapanyag és a technológia mellett meghatározó az energia, a hulladék, a víz és szennyvíz kérdése. Ennek megfelelően az utóbbi években a folyamatirányítás egyik fő területe a termelési folyamatok energia- és vízszükségleteinek, valamint a szennyvíz mennyiségének és minőségének a monitorozása lett az energiagazdálkodás digitális feltételrendszerének fejlesztésével. Így a mai kor digitalizációs eszközeinek köszönhetően folyamatosan mérhető az energiafelhasználás, a vízfogyasztás és szennyvízkibocsátás az egyes technológiai lépések során. Ezáltal látható, hogy például egy sonka hőkezelése során mennyi gőzenergiát használ az üzem. Vagy a zuhanyoztatásos hűtés során mennyi a vízfelhasználás és mennyi a keletkezett szennyvíz mennyisége egységnyi termék előállításánál. A folyamatos adatgyűjtés lehetővé teszi a technológiai lépések optimalizálását, csökkenthető az energia- és vízfelhasználás és a szennyvízkibocsátás. Utóbbira jó példa a zöldség és gyümölcsfeldolgozásban a mosóvíz mennyiségének csökkentése a mosóvíz szennyezettségének mérése által. Az élelmiszerelőállítás mellett az élelmiszerlogisztika- és szállítmányozás energiafelhasználásának

csökkentésében a hőmérsékletmonitorozással a tárolási hőmérséklet optimalizálása, valamint a GPS alapú szállítási útvonaloptimalizálással a szállítási távolság rövidíthető. Az eddigi eredmények alapján a digitalizáció eszközével az energia és vízfelhasználás és a szennyvízkibocsátás 30%-kal csökkenthető.

A kereskedelem és termelés közötti digitalizációs kapcsolatban a fogyasztói igények által generált adatok ismerete meghatározó. A mai digitalizációs rendszerek az ellátási lánc szemléletben ezt az információt teremtik meg. A vevői igények folyamatos monitorozása, az adatok ezirányú gyűjtése a termékek típusát, minőségét, mennyiségét, földrajzi és időbeli gyakorisági eloszlását tekintve tervezhetővé teszi a termelést terméktípus és mennyiség vonatkozásában. Tehát a fogyasztói, kereskedelmi igények pontosabb felmérése, predikciója lehetővé teszi a termelés optimalizálását, amely a versenyképességet, a hatékony technológia kialakítását és az optimális üzemméret meghatározását biztosítja. Továbbá segítséget nyújt a termék- és technológiafejlesztésben és az élelmiszerlogisztikai rendszerek méretének kialakításában figyelembe véve a digitális élelmiszerkereskedelmi lehetőségeket, amelyek az utóbbi években jelentős mértékben nőttek.

Az élelmiszeripari digitalizációnak feladata a digitális eszközökkel való tájékoztatás a lakosság körében. Ez elsősorban a mobil eszközökön alkalmazott különböző applikációk fejlesztésében és alkalmazásában valósul meg. A lakosság körében fokozatosan nő az egészséges és tudatos táplálkozás iránti érdeklődés. Általánossá vált, hogy a kondícióért, az egészségügyi állapotért nagymértékben felelős a táplálkozás. Ezért az élelmiszertermékek tápértékét, összetevőit tartalmazó adatbázisok felhasználásával különböző kalóriaértéket számító applikációk segítenek a fizikai igénybevételnek megfelelő energiabevitel a főbb komponensek, mint a fehérjék, a szénhidrátok és a zsírok figyelembevételével. A minél hatékonyabb számítás érdekében az élelmiszeradatbázis bővítése elengedhetetlen. Az USA-ban minden élelmiszerre vonatkozóan teljes élelmiszertápérték és összetétel adatbázis működik, amely segíti az egészségtudatos fogyasztókat és a közétkeztetőket az optimális, akár egyénre szabott táplálás biztosításában. Ez a tendencia európai és hazai környezetben is megvalósítás alatt van, ezért ezen adatbázisok folyamatos bővítése és aktualizálása közösségi cél élelmiszertápérték- adatközpontok működtetésével. A digitalizációs eszközök további igen meghatározó feladata a fogyasztók edukálása az élelmiszerekkel kapcsolatos hiteles információk átadásával. Ezek közé tartoznak az élelmiszerelőállításról szóló rövid filmek, az élelmiszerkönyvi ismeretek és a hazai rövid ellátási láncból származó kisüzemi és térségi élelmiszerek bemutatása és azok digitális élelmiszerkereskedelmi úton történő megvásárlásának lehetősége.

Látható, hogy az adatok gyűjtése, elemzése a teljes ellátási láncban számos előnyt rejt, tervezhető termelést és fogyasztást valósít meg. Az élelmiszeripari digitalizáció azonban nem áll meg a kereskedelemnél, nem áll meg a fogyasztói igények kielégítésénél. Az élelmiszerdigitalizációs rendszerek fejlesztése jelenleg a fogyasztói egészségügyi állapotot is

figyelembe veszik. A fogyasztási szokások, az elfogyasztott élelmiszerek mennyiségének és minőségének hatását összevetve az adott települések, személyek egészségi állapotával, megállapítható a táplálkozás és egészségi állapot közötti kapcsolat. Ennek ismeretében a megbetegedések megelőzésére a preventív táplálkozás jelentős egészségi állapot javulást eredményezhet. Továbbá ezáltal a társadalombiztosítási költségek csökkenthetők, amely megtakarítások a közétkeztetésben a minőségi táplálást szolgáló fejlesztéseket biztosítják.

Az élelmiszertermelésben, kereskedelemben és fogyasztásban az egyik legnagyobb probléma az élelmiszerhulladék. A WHO becslése szerint a megtermelt élelmiszerek egyharmada hulladékként kerül a környezetbe, amely terheli a környezetünket, a forgalmazó és a fogyasztók pénztárcáját, és növeli az üvegházhatású gázok mennyiségét. A SPAR vállalat a Too Good To Go dán céggel együttműködve méri a vásárlói magatartást, és figyelembe veszi a szezonalitást. Ezek alapján megbecsüli, hogy az élelmiszertermékeket milyen valószínűséggel vásárolják. Ezt követően az adott termék fogyaszthatósági idejének figyelembevételével mesterséges intelligenciát alkalmazva javaslatot tesz a cég szempontjából optimális kedvezmény mértékére. Ezen megoldás csökkenti a veszteséget a lejárat közeli, főleg az ultrafriss, viszonylag rövid fogyaszthatósági idővel rendelkező élelmiszertermékek, mint a tejtermékek, a húsok, a zöldségek és a gyümölcsök esetében.

A termelési folyamatok optimalizálásában, az energia, a víz, a szennyvíz- és hulladékkibocsátás csökkentésében, az élelmiszerfogyasztás és az egészségi állapot közötti összefüggések vizsgálatában a mesterséges intelligencia (AI) és az adatelemzés alkalmazása lehetővé teszi a nagy mennyiségű adat hatékony feldolgozását és értelmezését. Az AI algoritmusok segítenek a mért adatok elemzésében, a rendszerek prediktív karbantartásában, az üzemi hatékonyság növelésében, a készletgazdálkodásban, a vállalatirányításban és az alapanyagtermeléstől a fogyasztóig történő ellátási lánc adatvezérelt működtetésében. Az adatok széleskörű alkalmazása mellett az adatbiztonság és a szabályozásoknak is kiemelt figyelmet kell szentelni. Az ellátási lánc résztvevőinek biztosítaniuk kell, hogy a cégen belüli és a cégek közötti adatok hitelesek, biztonságosak és védettek legyenek.

Ennek tükrében a jövőben várható fejlesztések közé tartoznak az adatbázis fejlesztések, az adatrendszerek kialakítása és interoperabilitásának kidolgozása. Valamint az IoT alkalmazások, a gépi tanulás és mesterséges intelligencia szélesebb körben való alkalmazásának megvalósítása, amelyek még hatékonyabbá tehetik az élelmiszertermelési folyamatokat az ellátási láncban.

Termelési láncok – One Health

Kovács Melinda

Az „Egy Egészség” (One Health) koncepció alapját az a felismerés adta, amely szerint az ember egészsége nem választható el a környezettől, a legtöbb emberi megbetegedés az ember és a környezet interakciójára vezethető vissza. Az egészség tehát holisztikus megközelítést, multidiszciplináris megoldásokat és problémakezelést igényel. Globalizált világunkban különösen fontos az egyes tudományterületek (orvos- és állatorvos-tudomány, kockázatbecslés és kommunikáció, társadalom- és környezettudományok stb.) összefogása mellett a tudomány, az oktatás, a civil és állami szervezetek stb. együttműködése is. A koncepció a humán- és állategészségügy, valamint az élelmiszer-tudomány területéből nőtt ki, kezdetben az állatokról az emberekre terjedő betegségekből (zoonózisok) kiindulva. Aztán fokozatosan fejlődve kiterjedt további tudományterületekre, így a környezettudományra, sőt a társadalomtudományokra is. Az új megközelítés, a tudományterületek együttműködése számos előnnyel járt. A koncepciót 3 nagy világszervezet (FAO, WHO, Állategészségügyi Világszervezet) felkarolta és intézményesítette, számos EU-s stratégiai programba beépítésre került.

A One Health kiemelten foglalkozik azokkal a fő problémákkal és azok komplex megoldási lehetőségeivel, amelyek napjainkban meghatározóak, abból adódóan, hogy az *emberi tevékenységeknek nagy hatása van a bolygó éghajlatára és ökoszisztémáira, ezzel együtt* környezetünk folyamatosan változik, és ezek a változások globálisak.

A legfőbb kihívások: új, vagy ismételten felbukkanó fertőző betegségek, antimikrobiális rezisztencia, élelmiszerbiztonság, a biodiverzitás és az élőhely beszűkülése, környezetszennyezés, klímaváltozás, társadalmi, gazdasági és kulturális környezetünk átalakulása.

Ezek közül mutatunk be néhány példát.

Élelmiszerbiztonság - mikotoxinok

„Az vagy, amit megeszel” fogalmazta meg Feuerbach német filozófus és antropológus (1804-1872), aki szerint az elfogyasztott étel kihat az ember mentális és lelki állapotára is. Az állati és növényi eredetű élelmiszerek fogyasztása hatással van az emberek egészségére. Ismeretes, hogy az egészségünket kockáztató toxikus anyagoknak kb. 70% a táplálékkal (és ivóvízzel) jut be a szervezetünkbe. Ennek megelőzését szolgálja az élelmiszerbiztonság, amelynek lényege, hogy az élelmiszer ne legyen ártalmas a fogyasztó egészségére, ha azt a szokásos módon készíti és fogyasztja el. Az élelmiszer-előállításban és az élelmiszerbiztonsági

kockázatok csökkentésében kulcs szerepe van az „Egy Egészség” (One Health) koncepciónak, a termelés gazdaságosságának növelése, ugyanakkor az emberek és a környezet egészségének megóvása érdekében.

Az élelmiszerbiztonsági kockázatok nagy része kémiai vagy mikrobiológiai szennyeződésre vezethető vissza. A kémiai szennyeződések ipari, mezőgazdasági vagy környezeti eredetűek, lehetnek a technológia során keletkező átalakulási termékek, gyakran azonban nem megfelelő alkalmazások (pl. csomagolóanyag, élelmiszeradalék, maradványanyagok) eredményeként kerülnek élelmiszereinkbe. A növényeket fertőző és mikotoxinokat termelő penészgombákkal való fertőzés eredményeként a növényi takarmány- és élelmiszer-alapanyagokba kerülő toxikus anyagok ma még nem kiiktathatók az élelmiszerláncból, súlyos állat- és humánegészségügyi kockázatot jelentenek. Hazánkban a gabonafélék jelenthetnek (időjárástól függően) nagyobb kockázatot, mert azokból fogyasztjuk a legtöbbet és a *Fusarium* penészgombák már a szántóföldön fertőzhetik a növényeket. Akut mikotoxikózisok emberben ritkán, inkább a gazdaságilag elmaradott országokban fordulnak elő. Gyakoribb a kis dózisú, hosszan tartó toxinhatás (szubakut, krónikus toxikózis), amelynek felismerése és beazonosítása nagyon nehéz. Szinte lehetetlen egzakt módon, pontosan meghatározni az eltérő területeken élő, eltérő szociális helyzetben lévő és táplálkozási szokásokkal rendelkező lakosság napi toxinfelvételét, és az okozati összefüggés bizonyítása is nagyon nehéz. A legtöbb mikotoxin befolyásolja a szervezet antioxidáns és/vagy immunrendszerének működését, amely számos másodlagos kórfolyamat elindítója lehet – ezek tünetileg elfedik a mikotoxinok elsődleges kóroki szerepét.

A mikotoxinok problémájának kezelése komplex megközelítést igényel, amely érinti a megelőzést (növénynevelés, növényvédelem, agrotechnika), a kárcsökkentés lehetőségeinek megismerését (közömbösítés, takarmánykezelések és adalékanyagok, élelmiszerfeldolgozás), a káros hatások pontosabb megismerését, és a kockázatbecslést. A kockázat pontos felmérése azért is nagyon nehéz, mert számos mikotoxin többféle módosult formában lehet jelen az alapanyagokban (pl. fehérjéhez vagy keményítőhöz kötve, vagy a növények védekező mechanizmusa révén, ún. maszkolt formában). Ezek rutin analitikai módszerekkel többnyire még nem kimutathatóak, viszont elfogyasztásuk után a tápcsatornában felszabadulhatnak és felszívódhatnak. Szinte forradalmi a fejlődés az analitika területén, a mai modern és érzékeny nagyműszeres analitikai módszerekkel több száz vegyület mutatható ki egyszerre, jelentős analitikai fejlesztések folynak a módosított formák kimutatásában is. Számos modern élelmiszeripari technológiáról (pl. gamma sugárzás, ózon kezelés, hideg plazma kezelés) igazolták a mikotoxin-csökkentő hatást, az viszont még nem ismert, hogy az intakt vegyület koncentrációjának csökkenése nem módosulás eredménye-e, nem keletkeznek-e esetleg még toxikusabb metabolitok. A klímaváltozással megváltozik az egyes penészgomba fajok elterjedése és toxintermelése, a hőstresszre érzékeny növényfajták még

kitettebbé válnak a fertőzésnek. Ezen komplex problémák csak multidiszciplinárisan, One Health szemlélettel kezelhetők.

Élelmiszerbiztonság és zoonózisok

Az élelmiszerbiztonsági problémák másik nagy körét a mikrobiális szennyeződés adja, amely számos okra vezethető vissza: a nyersanyagok eredete, betakarítás, az állatok vágása, a termékek feldolgozása, csomagolása, tárolása, forgalmazása, a fogyasztásra történő előkészítésük, végül a tálalásuk és elfogyasztásuk. A két leggyakoribb ételszennyező és emberi megbetegedést okozó mikroorganizmus a *Campylobacter* (forrása: baromfihús, nyers tej, víz, 2005 óta az esetek 60%-át adja) és a *Salmonella* (forrása: hús, főleg baromfihús, tojás, tojáspor, tojáslé, tojás alapú élelmiszerek, fűszerek). Szerencsére az általuk okozott megbetegedés általában nem súlyos és a betegek gyorsan meggyógyulnak.

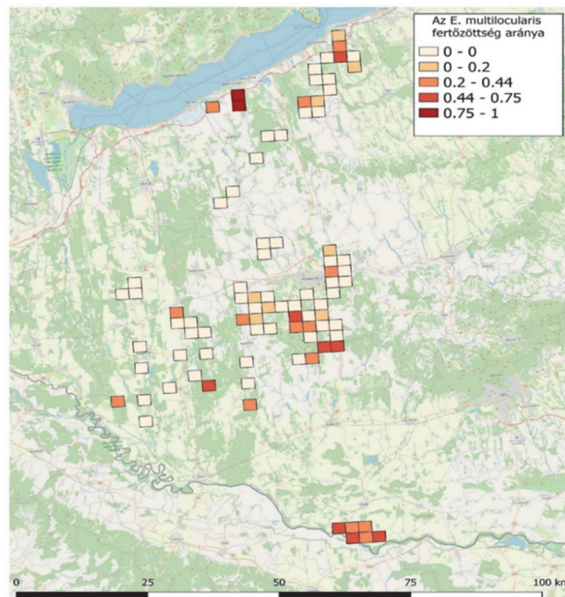
A salmonellosis betegséget többféle *Salmonella* faj okozza. Ezek a baktériumok természetes körülmények között számos vad-, illetve háziállat béltraktusában jelen vannak és a bélsárral ürülnek a környezetbe. Jelen van szinte minden gerinces állat bél mikrobiótájában, így pl. a kétéltűekben, hüllőkben is, ami felhívja a figyelmet arra, hogy otthon, kedvtelésből tartott kígyók, teknősbékák rezervoárok és fertőzés forrást jelenthetnek. A bélsárral a környezetbe jutó *Salmonella* sokáig túlél a talajban és a természetes vizekben, de nem szaporodik a környezetben. A salmonellosis, mint élelmiszer eredetű zoonózis esetében kiemelt figyelmet érdemel az állattartó telepek, vágóhidak higiénias állapota, a vágási, fejési, termelési, szennyvízkezelési, személyi higiénia, a rágcsálóktól való mentesség. A növények is fertőződhetnek a baktériummal trágyával, vagy fertőzött öntözővízzel, de a baktériumot terjeszthetik vérszívó rovarok is, valamint a testfelszínen a legyek bárhová elszállítják a kórokozókat.

Emberbe a mikroorganizmus döntően élelmiszer eredetűen, hús-, tojás, illetve zöldségek és gyümölcsök elfogyasztásával kerülhet be. Ennek különösen kedvez az az élelmiszerfogyasztási trend, amely szerint a nyers élelmiszerfogyasztás egészséges. A fertőzés további forrás lehet a bélsár, közvetlen kontaktus ember-ember és ember-állat között.

Mindezekből talán egyértelműen érezhető, hogy a védekezésnek komplexnek, az élelmiszerlánc egészét lefedőnek kell lennie. Nagyon nagy szerepe van az oktatásnak, a felvilágosításnak, mert nagyon sok esetben a háztartásokban követik el azokat a hibákat, amelyek fertőzéshez vezetnek.

A zoonotikus betegségek közül az élelmiszerekkel terjedő baktériumok állnak általában a figyelem központjában, ugyanakkor számos új vizsgálati eredmény hívja fel a figyelmet a paraziták okozta, állatról emberre terjedő megbetegedésekre. Az *echinococcus* nem élelmiszertermelő fajok terjesztik, de élelmiszerbiztonsági kockázatot jelentenek, a hetedik leggyakoribb fertőzés, évente 500-600 esetet jelentenek be. Az *Echinococcus multilocularis* galandféreg lárvái az ún. alveolaris echinococcosis

megbetegedést okozzák, amely egy nagyon lassan kifejlődő, nehezen diagnosztizálható, késői stádiumban már nem gyógyítható betegség. A 80-as években Európában még csak néhány országban fordult elő endémiásan (Franciaország, Svájc, Ausztria, Németország), ma már az európai országok döntő többségében igazolták a parazita jelenlétét. Fő gazdája a vörös róka (*Vulpes vulpes*), amely populációja a veszethez elleni sikeres védekezés eredményeként jelentősen megnőtt, és ez a paraziták feldúsulását is eredményezte a környezetben. Az agglomeráció erősíti a rókák további urbanizációját, közelsége az emberhez pedig a humán fertőzések kockázatát. A peték az ürülékkel kerülnek a szabadba, ahol fertőzőképesek és akár egy évig is életben maradnak, ami alatt szétszóródhatnak. Magyarországon, a déldunántúli régióban végzett felmérések eredménye azt mutatja, hogy az ugyancsak növekvő létszámú aranysakál (*Canis aureus*) szintén fertőzésforrás. Egy Somogy és Baranya vármegyére kiterjedő vizsgálatban a Balaton déli partján, Kaposvár környékén és a Drávasíkon a vörös róka és aranysakál populációkban jelentős *E. multilocularis* fertőzöttséget állapítottak meg (1. ábra). Endémiás területeken a szabad földben termesztett kertészeti növények (zöldség- és gyümölcsfélék), az erdőben a földközeli bogycsüszk elfogyasztása kockázatos, de szennyezett lehet a víz is. A galandféreggel az ember közelében élő kutya is fertőződik, ezért fontos a rendszeres féregtelenítés és a megfelelő higiéniai szabályok betartása (alapos kézmosás!).



1. ábra: Somogy és Baranya vármegyében igazolt vörös róka és aranysakál *Echinococcus multilocularis* fertőzöttség térbeli elhelyezkedése. (Moloi et al., 2023. cikke alapján)

Forrás: Moloi S, Tari T, Halász T, Gallai B, Nagy G, Cservincsik Á, 2023. Global and local drivers of *Echinococcus multilocularis* infection in the western Balkan region. Scientific Reports. 13(1), 21176. doi: 10.1038/s41598-023-46632-9

Antimikrobiális rezisztencia

Az Európai Betegségmegelőzési és Járványvédelmi Központ jelentése szerint az antimikrobiális rezisztencia (AMR) az EU-ban évente kb. 33.000 halálesetért felelős. A prognózis szerint 2050-re vezető halálökká válhat, évente akár 10 millió ember halálát okozva, hatalmas anyagi terheket róva az egészségügyre, nem is említve a gazdasági károkat. Az antibiotikum-rezisztencia nemcsak a mikrobiális fertőzések kezelését veszélyezteti, hanem számos más orvosi beavatkozást is (rákterápiás kezelések, transzplantációk és más immunszuppressziós eljárások, az invazív sebészeti beavatkozások vagy a koraszülöttek ellátása). Az is ijesztő, hogy az antimikrobiális rezisztenciához kapcsolódó halálesetek közel 40%-át a legújabb fejlesztésű antibiotikumokkal (pl. karbapenem és kolisztin) szemben rezisztens baktériumok okozzák. Az AMR hátterében a mikroorganizmusok természetes adaptációja áll. A nagymértékű antibiotikum-alkalmazás miatti szelekciós nyomás azonban evolúciós előnyhöz juttatja a rezisztenciagént hordozó baktériumokat és így a rezisztens egyedek válnak dominánssá. A rezisztenciagéneket a mikroorganizmusok egymásnak is átadják. Nemcsak egy, hanem több antibiotikumra is kiterjedően multi-, sőt pánrezisztens mikroorganizmusok jöttek létre.

Az AMR komplex ökológiai probléma, interakció az állat-ember-környezet és az ezek egészségét veszélyeztető mikrobiális közösségek között. A probléma forrása az állatok és emberek, kisebb arányban a növények antibiotikummal való kezelése. A rezisztens mikroorganizmusok vagy a rezisztenciát hordozó gének a kórházak szennyvizével, az állattartó telepek trágyájával a felszíni vizekbe, talajba juthatnak, majd a szántóföldi növényekkel, vagy az élelmiszertermelő állatok termékeivel, de akár a vadon élő állatok húásával és az akvakultúrákból származó halhússal is visszajuthatnak az emberi közösségbe.

Az antibiotikum-rezisztencia kialakulásában sok kritika éri az állattenyésztést, az állatiermék-előállításban évtizedekig szinte korlátlanul folyó antibiotikum felhasználás miatt. Míg az európai uniós országokban tiltott az antibiotikumok hozamfokozóként való felhasználása, addig az állategészségügyi világszervezet legújabb felmérése szerint még mindig jelentős számban vannak országok, ahol nincs erre vonatkozóan adat, vagy minden szabályozás nélkül alkalmaznak még ma is antimikrobiális szereket a takarmányban.

Ma már világméretű programok léteznek az antibiotikumok felhasználásának ellenőrzésére, a visszaszorítás érdekében (pl. WHO Global Action Plan, 2015; One Health Joint Plan of Action, 2022-2026), ezek jelentős eredményeket értek el, de még mindig komoly a veszély és a programok hatékonysága elmarad a szükségéstől.

Az állattenyésztés a megfelelő menedzsmenttel, takarmányozással, a környezet optimalizálásával, az állatok ellenállóképességének növelésével, a

digitalizációval (Precision Livestock Farming, PLF) tud hozzájárulni az AM szerek felhasználásának csökkentéséhez. A mai modern genetikai módszerek lehetővé teszik a termelékenység megtartása mellett a nagyobb ellenállóképességre való szelekciót is. A modern biotechnológiai módszerek (pl. génszerkesztés) specifikusan biztosíthatnak védelemet bizonyos betegségekkel szemben (pl. sertés PRRS, afrikai sertéspestis, madárinfluenza). A PLF-on belül egyre nagyobb szerep kapnak a mesterséges intelligencia (AI) technológiák és azon belül a gépi tanulás (ML) eszközei. Ezek a technológiák egyre inkább nélkülözhetetlenek lesznek olyan komplex rendszerek kölcsönhatásának előrejelzésére, mint pl. klimatikus tényezők (hőmérséklet, páratartalom), a mikroorganizmusok szaporodása és az élelmiszerlánc folyamatainak hatása az élelmiszerek mikrobiológiai biztonsága.

Az innováció a fenntartható fejlődés záloga

Popp József, Oláh Judit

Csökkenő innováció és gazdasági kilátások Magyarországon

Az innovációs rendszer hatékonysága azt hivatott megmutatni, hogy a K+F ráfordítások, a kutatói létszám, milyen hatékonysággal képesek új tudást, új szabadalmakat, új tanulmányokat létrehozni. Az innováció a munkatermelékenység egyik legfontosabb hajtóereje, amiben a szabadalmak, valamint a védjegy és formatervezési oltalmak számának növekedése különös szerepet játszik. Az innováció szoros összefüggést mutat a gazdasági eredményekkel. A KSH legfrissebb innovációs adatai 2022-ben több területen is romló értékeket mutatnak. Többek között csökkent a nemzetgazdasági beruházásokon belül a kutatás-fejlesztési, vagyis tudásberuházások aránya, továbbá a kutatás-fejlesztési ráfordítások aránya a GDP százalékában, valamint az összes foglalkoztatott létszámon belül a kutató-fejlesztők aránya (1. táblázat). 2018-2022 között a K+F beruházások a nemzetgazdasági beruházások százalékában folyamatosan romlott érzékeltetve a beruházásokon belül a fizikai, gépi és infrastrukturális beruházások növekvő arányát a tudásberuházások kárára. A másik két mutató – a kutatás-fejlesztési ráfordítások aránya a GDP százalékában és a kutató-fejlesztők aránya az összes foglalkoztatott létszámon belül – esetében a 2020-2021 évi javulás után 2022-ben jelentős romlás következett be (1. táblázat).

1. táblázat: A kutatás-fejlesztés főbb mutatói (2018-2022, %)

Évek	K+F ráfordítás a GDP arányában (%)	K+F beruházások a nemzetgazdasági beruházások százalékában (%)	K+F létszám az összes foglalkoztatott százalékában (%)
2018	1,51	1,03	0,99
2019	1,47	0,93	1,05
2020	1,57	0,87	1,10
2021	1,64	0,72	1,14
2022	1,33	0,68	1,08

Forrás: Központi Statisztikai Hivatal (2023a)

A három évtizeden át tartó, csaknem folyamatos növekedést követően 2022-ben mérséklődtek a K+F-ráfordítások hazánkban. A közel 887 milliárd forint összegű ráfordítás folyó áron 2,3%-kal elmaradt az egy évvel korábbi értéktől. A K+F-ráfordítások GDP-hez mért aránya az előző évi 1,6-ról 1,3%-ra csökkent. A K+F-ráfordítások 72%-át a vállalkezési kutatóhelyek, további 16%-át a felsőoktatás, 12%-át pedig az államháztartási szektorba tartozó kutató-fejlesztő intézetek és egyéb költségvetési kutatóhelyek költötték el. 2022-ben közel 3 ezer kutató-fejlesztő hely működött Magyarországon, ezek közel 60%-a a vállalkezési szektorban. A kutatás-fejlesztéssel foglalkozók összlétszáma közel 92 ezer főt tett ki, 74%-uk kutató volt. A kutatóhelyek száma 20%-kal csökkent, a K+F tevékenységet végző dolgozók létszám kismértékben (0,9%-os) emelkedett, miközben a K+F-ráfordítások csökkentek. A K+F-re fordított összegek mérséklődése a kutatóhelyek számának csökkenése és a teljes K+F-létszám kismértékű emelkedése mellett az előző évinél koncentráltabb K+F-tevékenységet mutatott. A táblázatból kitűnik, hogy a vizsgált két kategóriában (K+F ráfordítás és K+F létszám) a 2020-2021. évi átmeneti javulás után 2022-ben jelentős visszaesést tapasztalunk. A harmadik kategória, vagyis a K+F beruházások a nemzetgazdasági beruházások százalékában kifejezve viszont folyamatosan csökkenő értéket mutatnak, ami a beruházásokon belül a fizikai, gépi és infrastrukturális beruházások növekvő arányát jelzi a humántőke beruházások kárára (KSH, 2023a).

A három kategória természetesen szoros kapcsolatban áll egymással. A vizsgált mutatók alakulását két alapvető okra vezethetjük vissza: egyrészt az új beruházások tipikusan nem innovatív, hanem összeszerelő tevékenységeket (lásd autógyártás) helyeznek előtérbe, így nem, vagy alig hoznak létre új tudásalapú munkahelyeket. Ez azt is jelenti, hogy rövid távon jelentős innovációs teljesítményjavulásra a meglévő gazdasági szerkezeten belül nem számíthatunk. A jelentősebb előre lépéshez az ágazati szerkezet dinamizálására, újabb feltörekvő ágazatok megjelenésére, sok kezdő, új vállalkozásra lenne szükség. Ilyen új és feltörekvő ágazat a környezetgazdaság, amely magában foglalja az új anyagok, új energiaforrások, új eljárások, például digitális megoldások elterjedését a gazdaságban. Ezekben a területeken azonban Magyarország jelenleg nagyon gyengén teljesít.

Általánosan megállapítható, hogy az innovációs teljesítmény jelentős javulására a jelenlegi gazdasági szerkezet figyelembevételével rövid- és középtávon valószínűleg nem számíthatunk. Ezen a helyzeten az ágazati szerkezet dinamizálása segíthetne, vagyis új, feltörekvő ágazatok megjelenése számos kezdő vállalkozás létesítése. Ide tartozik a környezetgazdaság, amely magában foglalja az új bioalapú anyagok, a megújuló energiaforrások, új termelési eljárások (biofinomító) és a digitalizáció térhódítását a gazdaságban. Ezekben a területeken Magyarországon egyelőre óriási lemaradást tapasztalunk az EU tagországaival szemben.

2014-óta az Európai Bizottság a tagországok digitális fejlettségét a Digital Economy and Society Indicators (DESI) segítségével méri és hasonlítja össze. A DESI és egyes összetevőinek különbségét, valamint az egymáshoz való közeledését a tagországok között elemezve megállapították, hogy Magyarország a digitális fejlettség szempontjából a tagállamok között az utolsó negyedben helyezkedik el és a felzárkózás üteme is sajnálatosan lassú (Kovács et al., 2022).

Magyarország helye az Európai Unió innovációs rangsorban

A Eurostat adatai szerint Magyarországon az általános innovációs pozíció 2023-ban nem változott 2022-hez képest, továbbra is a 21. helyen állunk. A rangsorban az EU-t megelőzi Ausztrália, az USA, Kanada és Dél-Korea, Kína pedig elérte az EU mutató 95%-át. Európában Svájc, az EU-ban Dánia a leginnovatívabb ország. 2023-ban az EU-ban 8 tagországban, többek között Németországban is romlott az innovativitási index értéke. A V4-ek országaiban javult ez az érték, legjobban, 10,5 ponttal Csehországban és legkevésbé, 2,4 ponttal Magyarországon. Egyébként Csehország az IMD nemzetközi versenyképességi rangsorban is 8 helyet lépett előre 2023-ban (European Commission, 2023a).

Érdekes eredményt mutatnak a vizsgált 12 innovációs dimenzió 32 mutatói az egyes tagországokban. Magyarország pozíciója 2022-ről 2023-ra 3 dimenzió esetén javult, 2 dimenziónál romlott és 8 dimenzió vonatkozásában változatlan maradt. Magyarország pozíciója javult a digitalizáció és a digitális technológiák alkalmazása, valamint a vállalatok innovációs befektetései nagysága területén. Ugyanakkor romlott Magyarország helyezése az innováció állami támogatása és az exportált termékek innováció tartalma területén. Ez utóbbi azt jelenti, hogy az export relatíve alacsony hozzáadott értéket és innovációt képviselő termékekkel bővült. Az innovatív termékek nagyon alacsony aránya az exportban talán a leggyengébb pont Magyarországon. Ez azt is jelenti, hogy a gazdasági szerkezeten belül nagy arányt képviselő, helyi összeszerelésre épülő feldolgozóipari export mellett új, innovációs megoldásokra is szükség van. Ezzel párhuzamosan a hozzáadott érték előállítására is nő a sok új, tudást igénylő munkahelyek létrehozása mellett. A legrosszabb helyezést továbbra is a humán vagyon és a tudás területe mutatja. A humán erőforrás és az innovációs ráfordításokkal előállított intellektuális javak területén a rangsorban a 25-dik helyen állunk. De ugyanez a helyzet a tudásalapú munkahelyek aránya és a jövőt formáló új környezeti technológiák kifejlesztése területén is (European Commission, 2023a).

A V4 országok helyezését is elemezzük összehasonlítva a rangsort vezető Dánia értékeivel. Nagyon alacsony teljesítménynek az EU átlag 50% alatti érték, gyenge teljesítménynek pedig az 50-60% közötti értéket tekintjük. A 2. táblázatban látható, hogy a vizsgálatba vont hét mutató tekintetében a magyar pozíció az EU átlaghoz viszonyítva a leggyengébb. Magyarországnál

gyengébb teljesítményt csak Lengyelország esetében találunk két területen (doktori végzettségű lakosság aránya, környezeti technológiai innovációk). Az EU-ban a leginnovatívabb Dánia magasan vezet a környezeti technológiai innovációk területén, de a humán vagyon területén is kiugró értéket mutat. Ez azt bizonyítja, hogy a dán gazdasági szerkezetben elsősorban a nagy hozzáadott értéket előállító új technológiák fejlesztése a jellemző. A magyar mutatók között az alacsony foglalkoztatás az innovatív cégekben, az innovációval létrejövő szellemi javak és a gyenge üzleti folyamatinnováció területe különösen alacsony értéket tükröz. Magyarországon nagyon alacsony a foglalkoztatottak között az innovatív, tudásalapú munkahelyeken dolgozók aránya, ugyanis alacsony az innovatív vállalatok aránya, mert a munkahelyek többsége elsősorban összeszerelő üzemekben található (2. táblázat).

2. táblázat: Innovációs dimenziók összehasonlítás a V4 országban és Dániában

Mutatók	Magyarország	Csehország	Lengyelország	Szlovákia	Dánia
	Az EU innovációs index %-ában (EU átlag=100)				
Felsőfokú végzettségű lakosság aránya	41,6	56,6	91,3	83,2	140,5
Doktori végzettségű lakosság aránya	40,7	114,8	25,8	85,2	144,5
Innováció az állami szektorban	43,8	96,9	64,1	45,3	146,9
Foglalkoztatás innovatív cégekben	33,3	114,1	44,0	45,4	97,5
Üzleti folyamatinnováció a KKV szektorban	32,2	139,8	39,6	41,8	114,5
Innovációval létrejövő szellemi tulajdon (valamennyi típus)	47,7	63,1	84,2	49,4	136,9
Környezeti technológiai innovációk	46,9	93,7	34,3	97,6	190,8

Forrás: European Commission (2023a)

A legnagyobb hátráltató tényező Magyarországon az innovációs rendszer töredezettsége, ugyanis egyrészt alacsony a tudástermelő ágazatok és a többi ágazat termelési kapcsolatának a mértéke, másrészt pedig magas a termelésbe kerülő tudásimport hányada. A külföldi tulajdonú vállalatoknál nem mutatható ki érdemi innovációs prémium, ami a kkv-k alacsony innovációs teljesítményével párosul. Az innovációs rendszer töredezettsége megnehezíti a tudástranszfer folyamatát, azaz az innovációs outputok növekedését. A gyakorlatban a legtöbb innováció a kutatóhelyek falain belül marad, így nincs tovagyűrűző (spillover) hatásuk, ezért az aggregált innovációs output is gyengébb lesz. A Magyarországon található multinacionális vállalatok K+F ráfordításai nem növelik pozitív hozadékkal a termelékenységet, sőt egyes vállalatok esetében gyenge a kapcsolat a két változó között. A külföldi vállalatok innovációs tevékenységeiket globálisan optimalizálják, azaz térben és időben válogathatnak a különböző termelési egységeik között (MNB, 2022). Az EU ösztönzi az innovációt a különböző ágazatokban is, melynek egyik fontos dokumentuma a Sustainable and Smart Mobility Strategy (Tóth et al., 2022).

A fentebb említett arányokon a jelenlegi gazdasági szerkezetben nem várhatunk érdemi javulást, hiszen a működő vállalatok innovációs tevékenységeket nagy arányban aligha fognak Magyarországra hozni. A hazai állami innovációösztönzés is nagyon alacsony hatékonysággal párosul, ezért indokolt a gazdasági szerkezet dinamizálása, új és innovációs célú tevékenységek ösztönzése. E területen számos lehetőség kínálkozik, a mai helyzetből történő elmozdulás is jelentős innovációs teljesítményjavulást hozhat a magasabb hozzáadott érték előállításával, ezzel együtt a tudásalapú munkahelyek arányának növelésével.

A hatékonyságot ronthatja egyébként az innováció menedzsment hiánya vagy gyengesége is. Egy-két mutató javításától nem várható előrelépés, hiszen az innovációs folyamat bonyolult, szerteágazó rendszer, amelynek sikeres működését számos vállalaton kívüli és belüli tényező segíti elő. Elsősorban az export innováció tartalmának növelésére, a felnőttképzés elterjesztésére vagy az egy munkavállalóra jutó vállalati innovációs ráfordítások növelésére indokolt nagyobb figyelmet fordítani Magyarországon innovációs pozíciójának javításához. Mindez azért is sürgető feladat, mivel ezzel függ össze Magyarország termelékenységének, ezen keresztül pedig versenyképességének növelése. A sikeres innovációhoz három feltételnek is teljesülnie kell: egyrészt szükség van olyan munkahelyekre, ahol lehetőség és igény mutatkozik az innovatív tevékenységekre, másrészt igény van az innovációra képes szakemberekre, végül nélkülözhetetlen az innovációt támogató, bátorító általános társadalmi és vállalati környezet is. Az üzleti környezet bonyolulttá vált - tele van kockázatokkal és bizonytalansággal, amelyek a vállalatok ellenőrzésén kívül esnek -, ezért a vállalatoknak olyan mechanizmusokat kell találniuk, amelyekkel növelhetik teljesítményüket az instabilitás fényében. A stratégiai rugalmasság pozitívan befolyásolja a vállalatok teljesítményét. A kereslet és a kínálat bizonytalansága mérsékli a stratégiai rugalmasság és a vállalatok teljesítménye közötti kapcsolatot

(Yousuf et al., 2021). Eredményt csak akkor várhatunk, ha a problémák tárgyilagos feltárásával keresünk hatékony megoldásokat. Az elemzés azt mutatja, hogy az innovatív vállalatok és innovációt igénylő munkahelyek arányának növelése, a tudásberuházások szintjének emelése mellett a regionális szakadékok csökkentése a legégetőbb feladat.

Az innovatív termékek nagyon alacsony aránya az exportban azt jelzi, hogy a gazdasági szerkezeten belül nagy arányt képviselő, helyi összeszerelésre épülő feldolgozóipari export mellett új, innovációs megoldásokra is szükség van a hozzáadott érték növekvő előállítására és új, tudást igénylő munkahelyek létrehozására érdekében. Összességében elmondható, hogy a meglévő gazdasági szerkezetben az innováció fokozása is már eredmény lenne, de igazi áttörést csak új, innovatív ágazatok meghonosítása jelentene. Ez komoly lehetőséget kínál az ország számára, ezáltal az erős gazdasági függőség csökkenthető, a válságálló képesség erősíthető, ráadásul ez a fenntartható gazdasági növekedés javulásával is jár

Kevés a hazai szabadalom

A kis- és közepes vállalkozások körében vizsgálták az innovációs környezetet és vállalati eredményeket az innovációs állami támogatások eredményessége szempontjából. A kutatás eredménye alapján minimális volt a cégek körében a létrejött szabadalmak és egyéb szellemi javak száma, annak ellenére, hogy jelentős állami forrásokkal gazdálkodhattak az innováció felpörgetése céljából. Az innovációs típusokat tekintve pedig leginkább termék- és technológiai innovációkat hajtottak végre a cégek, mivel forrást is erre lehetett kapni. Ezek a problémák tükröződnek az EU innovációs mutatók Magyarországra vonatkozó alacsony értékeiben is. Az innovációs ráfordítások hatékonysági vizsgálata nem történt meg, az állami támogatás többnyire gépbeszerzésre, épületbővítésre, külföldi technológia megvételére vonatkozott, így nem folytatódott belső szervezeti-, humán-, üzleti modell és üzleti folyamatinnováció, vagyis nem épült ki az innováció menedzsment teljes folyamata. Ezek a problémák tükröződnek az EU innovációs mutatók Magyarországra vonatkozó alacsony értékeiben is (Csath - Nagy, 2023). Napjainkban a stratégiai rugalmasság és annak a szervezeti teljesítményre gyakorolt hatása kiemelt szempont. Ezenkívül a szervezeteknek, különösen az ipari vállalatoknak indokolt felmérni, hogy a rugalmasság, mint mechanizmus hogyan javíthatja a szervezeti teljesítményt. A stratégiai rugalmasságot más vezetői technikák mellett kell alkalmazni a vállalati teljesítmény fokozása érdekében (Yousuf et al., 2022).

Az állami támogatásokban döntően eszközfinanszírozás dominál a projektfinanszírozás helyett, ami az együttműködési hajlandóságot is befolyásolja. A magyar vállalatok – hasonlóan a régiós országokhoz – döntően eszközvásárlásra költik a K+F forrásaikat, szemben az uniós vállalatokkal, ahol a kutatóhelyek jellemzően a működési költségeket igyekeznek finanszírozni. Az EU tagországokban a külső források tekintetében jellemzően

a brüsszeli központi források (például Horizont 2020) jelentik a finanszírozási alternatívát, amelyek elnyeréséhez határokon átnyúló együttműködéseket szükséges felmutatni, ezért az innovációs eredmények is könnyebben tudnak terjedni az EU nyugat-európai tagállamaiban. A magyar innovációs teljesítmény alacsony megtérüléssel valósul meg, hatékonysága pedig nemzetközi összehasonlításban érdemi lemaradást mutat az uniós átlaghoz képest, a kutatás-fejlesztési ráfordítások egyre kevesebb szabadalmat képesek eredményezni, így a magyar érték már nem éri el a V4 átlagát sem. Az ország innovációs teljesítményének javát adó külföldi vállalatok innovációs ráfordításai nem növelik pozitív hozadékkal ezen cégek termelékenységét, emellett innovációs tevékenységük eredménye valószínű vállalatcsoporton belül marad érdemleges tovagyűrűző hatás nélkül (MNB, 2022). 2021-ben került elfogadásra a 2021-2030-as időszakra vonatkozó magyar K+F stratégia, mely még nagyobb állami szerepvállalást vetít előre, továbbá célul tűzi ki az innováció eredményeinek nagyobb hasznosulását és önfenntartó, piaci alapú működési modellek létrejöttét (ITM-NKFIH, 2021).

Románia példája az IT szektorban

Magyarország közvetlen szomszédságában, Romániában az informatikai szolgáltatási szektor ösztönzése jelentős előnyökkel jár a teljes gazdaság számára, ahol az IT-forradalom előzménye, hogy 2001-ben teljes személyijövedelemadó-mentességet vezetett be a szoftvergyártó vállalatoknál programozói vagy hasonló infokommunikációs (IT) szolgáltatási munkakörben dolgozó munkavállalók számára. A felső-középosztályt támogató szoftveripari politika sosem volt kifejezetten népszerű a lakosság körében, ugyanakkor jelentősen felgyorsította a román IT-szektor fejlődését, sőt pozitív gazdasági és jóléti eredményeinek hatására már az "európai Szilícium-völgyként" emlegetik a 13 ezer IT-cégnek otthont adó Kolozsvárt. Ez egyértelműen jelzi, hogy az iparpolitika nemcsak a gyárak állami finanszírozásáról szól, hanem a felzárkózás a 21. században innovatívabb szakpolitikai beavatkozásokat igényel (Manelici - Pantea, 2021).

A román szabályozás egy független parlamenti képviselő, az örmény kisebbséget képviselő matematikus, Varujan Pambuccian ötlete volt, aki relatíve korán észrevette, hogy az IT a jövő egyik húzóágazata lesz, ezért a legmagasabb szja-kulcs csökkentését javasolta. A kormányzat arra a következtetésre jutott, hogy adminisztratív szempontból egyszerűbb eltörölni az szja-t az érintettek számára. Az adómentesség az akkori progresszív, 18-40% közötti szja-kulcsok mellett hatalmas kedvezményt jelentett a jobban fizető munkakörök számára. A kedvezményezettnek körének korlátozása céljából a mentességet számos követelményhez kötötték: a munkavállaló alapszakos diplomával rendelkezik IT-területen (informatika, számítástudomány, matematika, kibernetika, elektronika, automatizáció); főtevékenységként szoftverfejlesztéssel foglalkozó munkavállalóként legalább évi 10.000 USD bevételt elérő cég alkalmazottja, végül

szoftverfejlesztéssel foglalkozó vállalati részlegesen programozói vagy fejlesztői munkakörben dolgozik. 2013-ban a kedvezményezett diplomák, vállalati tevékenységi körök és munkakörök spektrumát kiterjesztették, bár továbbra is az IT-szektorra korlátozták a kedvezményt. Ha a programozók adómentessége foglalkoztatási szempontból nem is hozott megváltást Romániának, az akkor még kezdetleges IT-szektor támogatása hozzájárult a magas hozzáadott értékű munkahelyek számának növeléséhez, ezzel együtt csökkentette a potenciális nyugati „agyelszívás” ütemét, vagyis lassította annak folyamatát, hogy jól képzett román munkavállalók tömegei hagyják el az országot. Ehhez jó alapot nyújtott a román oktatási rendszer, mert (a keleti blokk többi államához hasonlóan) relatíve erős természettudományi és matematikai ismeretekkel volt képes felruházni a diákokat, azaz Romániának látens komparatív előnye volt a szektorban, amit az állami támogatáspolitikai is felismert (Manelici - Pantea, 2021).

Kedvezményezett IT szektor sikere

Vállalati adatok alapján elemezték a reform hatásait. Megvizsgálták, hogyan változott a dolgozói adókedvezményben részesülő cégek eredménye a dolgozói adókedvezményt nem élvező hasonló profilú, tudásalapú tevékenységgel foglalkozó cégekhez képest. A 2001. évi reformot megelőzően a két csoport között nem volt jelentős eltérés, de 2005-re a dolgozói adómentességben részesülő vállalatok átlagosan 24%-kal magasabb bevételt értek el 13%-kal több munkavállaló alkalmazásával, mint a dolgozói adókedvezményből kimaradó cégek. Az adómentesség 2013. évi bővítésének hatását is elemezték. Azokat a vállalatokat vizsgálták, ahol a törvénymódosítás előtt 5% alatt volt az adómentességet élvező munkavállalók aránya, de azt követően 20% fölé emelkedett. A kontrollcsoportot azok a hasonló profilú vállalatok képezték, ahol 2013 után is 5% alatt maradt ez az arány. Ebben az esetben is az eredmény a célzott adómentesség gyors és jelentős hatását bizonyítja. 2015-re 2012-höz viszonyítva 20%-kal nőtt a kedvezményezett vállalatok bevétele és 10%-kal a foglalkoztatása, pedig 2005 óta már egykulcsos, 16%-os sziya volt hatályban, azaz a dolgozói adómentesség relatív értéke csökkent az eredeti, 2001. évi reformhoz képest (Manelici - Pantea, 2021).

Ez az eredmény azzal is magyarázható lenne, hogy az adókedvezményekben részesülő román cégek megkaparintották más, hasonló profilú román vállalatok magasan képzett dolgozóit, mindezt pedig adómentesség formájában az állam fizeti. Ebből kiindulva a kutatók azt is elemezték, hogy hogyan alakult a román IT-szektor teljesítménye a térség hasonló fejlettségű és gazdaságszerkezetű országaihoz, Bulgáriához, Csehországhoz, Észtországhoz, Magyarországhoz, Lettországhoz, Litvániához, Lengyelországhoz, Szlovákiához, Szlovéniához, valamint Írországhoz és Portugáliához képest. A felsorolt országok adatai alapján létrehoztak egy szintetikus kontrollváltozót, ami leírja, hogy hogyan alakult

volna a romániai IT-szektor termelése, ha a térség többi országokéval azonos pályán mozog. Az eredményből kiderül, hogy 2000-hez képest 2015-re a román IT-szektor bevétele több mint tízszeresére, foglalkoztatása ötszörösére nőtt. Bár a térségben mindenhol jellemző volt az IT-szektor növekedése, Románia esetében a bevételek 6,5-ször, a foglalkoztatás 1,8-szor akkora mértékben emelkedett, mint az a vizsgált régiós országok adataiból képzett szintetikus kontrollból következett volna. Ez azt jelenti, hogy sokkal gyorsabban fejlődött a IT-szektor Romániában, mint a többi vizsgált országban (Manelici - Pantea, 2021).

A szakpolitikai beavatkozás tágabb gazdasági hatásainak felmérése érdekében még azt is tanulmányozták, hogy Romániában hogyan változott az adókedvezményben nem részesülő, de az infokommunikációs technológiáktól erősen függő szektorok teljesítménye a kevésbé IT-függő szektorokhoz képest. Az adatokat itt is a régiós szintetikus kontrollváltozóval hasonlították össze. A modellezés szerint az IT-intenzív szektorok sokkal nagyobb ütemben nőttek, bevételeik 75%-kal, foglalkoztatásuk 61%-kal volt magasabb a szakpolitikai beavatkozás nélküli scenárióhoz képest. Más szóval az IT-szektorok ösztönzése más ágazatok fejlődéséhez is hozzájárult, annak ellenére, hogy utóbbiak nem kaptak közvetlen állami adókedvezményt (Manelici - Pantea, 2021).

Az iparpolitika, azaz egyes konkrét növekedési szektorok fejlődésének állami ösztönzése messze nem csak a feldolgozóiparról szól, hanem jelentheti a fontosabb szolgáltatási ágazatok bővülésének ösztönzését is. Egy ágazat hatékony fejlesztésének eszköztára pedig nem csupán a közvetlen állami támogatásokra, például az akkumulátorgyárakra fordított költségvetési hozzájárulásra vagy a vállalati adók csökkentésére korlátozódhat, hanem a gazdasági szabályozás egyéb eszközei, vagy akár az oktatáspolitikai részek lehetnek. Sőt, a közvetlen állami támogatás és egyes nemzeti zászlóshajók felemelésének kísérlete a legújabb kínai kutatások szerint gyakran nem jár hatékonyságnövekedéssel, vagy legalábbis egyenetlen előnyökkel és hátrányokkal bír, ezáltal a felzárkózást sem igazán segíti (Branstetter et al., 2022). Más kérdés, hogy a konkrét román adómentesség mennyiben véletlen szerencse és mennyiben a jól és tudatosan megtervezett szakpolitikai beavatkozás eredménye. A román szabályozás nem elterjedt szakpolitikai eszköz, ugyanis a munkavállalók adóterheinek célzott csökkentése nem számít bevett iparpolitikai eszköznek. Az adómentességet Európában inkább a strukturális okokból nehezen elhelyezkedő, alacsony keresetű munkavállalók foglalkoztatásának ösztönzésére szokás használni. A korábbi elemzések szerint például kutatók esetében mindez nem jár komoly gazdasági előnyökkel, mivel a kutatók kínálata nem rugalmas, vagyis nem lehet a kutatók számát és tudását hirtelen növelni anyagi ösztönzéssel.

Ettől jelentősen eltér a román szoftveripari tapasztalat, ahol a többletjövedelem nem pusztán az IT-vállalatoknak és a programozóknak kedvezett, hanem a kezdetben a felső-középosztály támogatását célzó reform a tágabb gazdasági fellendüléshez is hozzájárult. A szakpolitika vélhetően megfelelt a jólét növelését jelző elméleti kritériumoknak. A kalkulációk szerint

adószempontból is megtérült a kedvezmény, ugyanis az szja-mentességnek köszönhetően a gazdasági fellendülésből (többlettevékenységből) származó állami bevételek meghaladták a kieső szja értékét. A román példa egyedi jellegét szemlélteti, hogy az adómentesség mind a dolgozók, mind az őket alkalmazó vállalatok, mind az elvégzett munka jellegére vonatkozóan tartalmazott megkötéseket. Ebből fakadóan nem pusztán vállalatok vagy ágazatok támogatásáról volt szó, hanem a munkavállalók és vállalatok gazdaságpolitikai szempontból hatékonynak tekintett kombinációját ösztönözte. Ezzel sikerült a magas hozzáadott értékű és magas jövedelmű munkakörök felé terelni a munkavállalókat, ami minden feltörekvő gazdaságban fontos prioritás. Az IT-szektor felkarolása a Romániába érkező nemzetközi befektetésekre is pozitív hatással volt, például több K+F befektetés érkezett az országba az IT-szektornak köszönhetően, mint általános fejlettségi szintjéből adódna (Manelici - Pantea, 2021).

A pozitív hatásokkal együtt a román kormány az állami költségvetés csökkentése érdekében a 104 ezer munkavállalónak járó teljes adómentességet kivezette 2023 végéig, he havi 10.000 román lej (kb. 2000 EUR) fizetésig továbbra is fennmaradt az adókedvezmény (az IT-szektorban az átlagfizetés 2023-ban havi 2.600 EUR volt) Az IT-szolgáltatások növekvő nemzetközi kiszervezése mellett az elérhető bérprémium még mindig jelentősnek mondható (Manelici - Pantea, 2021; Accace, 2024). A teljes tényezőtermelékenység alakulását is befolyásolja a szelektív támogatási politika, amit Kína példája alapján elemeztek (Chen et al., 2022). A vizsgálatból kiderült, hogy az alacsony munkaerő termelékenységű vállalatok támogatása a magas munkaerő termelékenységű vállalatokkal szemben negatív hatást gyakorol a teljes tényező termelékenységre.

A román példa tanulsága

Az iparpolitika célja a kedvezményezett szektor megerősítése, hogy átmeneti idő után állami támogatás nélkül is működni tudjon. Az is tény, hogy sok tekintetben a szoftveripar globális tagozódása is leköveti a feldolgozóiparét, azaz az új tagországok vállalkozásai gyakran nagyobb nyugati cégektől kiszervezett munkát átvevő beszállítóként jelennek meg az értékláncban, mert egyelőre kevesebb a sikeres hazai innovációs kísérlet. Arra nem következtethetünk a kutatásból, hogy a programozók támogatása jelenti a nemzet felemelkedésének zálogát, vagy hogy nincs szükség már feldolgozóiparra. Az viszont igen, hogy ha adott ország a magas fejlettségi szintre akar lépni a 21. században, akkor magas hozzáadott értékű termelést segítő innovatív szakpolitikákra van szüksége (Manelici - Pantea, 2021).

Az EU számára is tanulságos a román példa. Az európai IT-szektor alulfejlettsége az egyik fő oka annak, hogy Európa jövedelmi szintje és termelékenysége erősen elmarad az Egyesült Államok mögött. Az IT-szektor az európai kontinens nyugati felén is később alakult ki, lassabban fejlődött, mint az USA-ban, vagy a villámgyorsan felzárkózó Kínában. Míg az uniós

politika manapság a feldolgozóipart félti az Egyesült Államok iparpolitikájától, ennél sokkal kevesebb figyelem jut arra, hogy mekkora lemaradásban van a digitalizáció és az informatikai szolgáltatászektor. Napjainkban a feldolgozóiparra összpontosító iparpolitika egyre kevésbé tűnik hatékonynak a felzárkózás szempontjából. Az utóbbi három-négy évtizedben tapasztalt globalizáció következtében ma már nem beszélhetünk nemzeti iparról, legfeljebb a multinacionális cégek globális ellátási láncba képes bekapcsolódni egy-egy feltörekvő ország, de ezen keresztül sem lehet reális cél behozni a fejlett országokat. Továbbá a gyártási technológia fejlődésével egyre kisebb az igény a közepesen képzett munkaerőre, azaz egyre kevesebb lesz a képzett munkavállaló az iparban, ehelyett alacsony hozzáadott értékű, robottal felszerelt gyártósori munkára, vagy magas képzettséget igénylő tervezői, mérnöki, IT-s szolgáltatói feladatok elvégzésére van szükség.

Ennek jeleként ma már a magyar exportban is fontosabb a szolgáltatászektor hozzáadott értéke, mint például az autópáré. Ez nem meglepő annak fényében, hogy a szolgáltatászektor termeléséből sokkal nagyobb a hazai dolgozók részesedése, mint az importált alkatrészekből, importált gépeken autókat vagy akkumulátorokat összeszerelő ipari üzemekben. Magyarországon az ipar nemzetgazdasági súlya a 2015-2022 között 27%-ról 24%-ra csökkent, miközben a foglalkoztatott munkaerő aránya alig változott (22,3-ról csupán 21,9%-ra esett vissza). A hazai ipar gerincét a döntően az exportra termelő, külföldi nagyvállalatok jelentik, a járműgyártás részesedése a feldolgozóipari kibocsátásból 23,6%-ot tett ki 2022-ben (KSH, 2023b).

Agrárinnováció Magyarországon

Az innováció új, vagy jelentősen javított termék (áru vagy szolgáltatás), vagy eljárás, új marketingmódszer, vagy új szervezési-szervezeti módszer biztosítása az üzleti gyakorlatban, munkahelyi szervezetben vagy a külső kapcsolatokban. A K-F eredményesebb hasznosítása azért is kiemelt szempont, mert a Föld lakóinak száma gyors ütemben nő, az élelmiszerek iránti igény mennyiségi és minőségi tekintetben egyaránt fokozódik, a klíma kedvezőtlen változása és a technika mérséklődő fejlődése pedig korlátozza a termés hozamok növelését, így a mezőgazdasági termelés felértékelődik, az élelmiszerek árai emelkednek, a mezőgazdasági termékek iránti verseny világméretűvé válik. A mezőgazdaságra váró problémákat pedig csak a jelenleginél jobb, hatékonyabb, a gyakorlati munkát az eddiginél eredményesebben segítő kutatás-fejlesztéssel lehet megoldani az egyre szigorúbb környezetvédelmi előírások tükrében.

Az innováció a mezőgazdaságban több szinten értelmezhető, mivel az az ágazat egymásra épülő tevékenységeken keresztül működik, ezért meg kell különböztetni az alapanyag-termeléshez (talaj- és tápanyag-gazdálkodás, növény- és állatnemesítés, biotechnológia, növényvédelem,

állategészségügy, tartás- és termesztéstechnológia, takarmányozás, időjárás-előrejelzés, kockázatkezelés), feldolgozáshoz (technológia, logisztika) és értékesítéshez (marketing, piacszerzés- és -megtartás, szervezeti innovációk) kapcsolódó területek innovációs potenciálját. A feldolgozáshoz köthető élelmiszer-technológiai fejlesztések növelik az exportpotenciált, mert új, speciális, magas hozzáadott értékű, kiváló minőségű termékek értékesítése piaci rések igényeit elégíti ki.

Magyarországon a mezőgazdaság és az élelmiszeripar nagy általánosságban még a legkevésbé digitalizált szektor. Ezért aztán tág tere van az innovációnak, hogy versenyképesebbé, fenntarthatóbbá és környezettudatosabbá tegye az iparágat, gyorsabbá, hatékonyabbá, olcsóbbá a termelést. Habár itthon az agrárinnováció helyett inkább adaptációról beszélhetünk, vagyis külföldön vagy más iparágakban már használt technológiákat veszünk át. A gazdák nagy részének még nincs szüksége innovációra. A mezőgazdaság szereplőinek 80%-a (mikrovállalkozást, őstermelőt is beleértve) a saját munkaerejével biztosít megélhetést a háztartásának, vagyis nem tőkés vállalkozóként gondolkodik, tervezi a tevékenységét. Az életkor is korlátozza a mezőgazdaságban az innovációs hajlandóságot, ezért egyre sürgetőbb feladat a generációváltás. A mikrovállalkozóktól legfeljebb a már bevált innovációk alkalmazását várhatjuk el.

A hazai mezőgazdaságban az innovációs tevékenységhez kapcsolódnak a tudásközpontok, azaz a kutatóintézetek, egyetemek. Mentorprogram, pályázati támogatás, állami kockázati-tőke-befektető alap is segíti a startupokat a fejlesztésben, ennek ellenére az ötlettől a termékig vezető út így is túl hosszú, gyakran reménytelen folyamat. A hazai innovációs közegben a pályázati rendszer és a tőkepiac komoly forrásokat kínál projektek finanszírozására, de a sok jó ötlet ellenére kevés a jó projekt. Az élelmiszergazdaságnak nincs abszorpciós képessége a jó ötletek felkarolására. Tovább nehezíti a projektek megvalósítását az együttműködési készség hiánya, ami megnehezíti az uniós pályázatokon történő közös részvételt is. Pedig az innováció olyan tevékenység, amihez partner, nyitottság és együttműködés szükséges. A piacon hasznosítható ötletekhez tehát az eszköztrendszer és a feltételek megteremtése az egyetemi, főiskolai hallgatók számára (életkori sajátosságuk az innováció) a szakpolitika feladata. Az agrárstartupok célba juttatásához – külföldi mintára – innovációs brókerekre lenne szükség, hogy a kutatóintézetekben született eredményt összekapcsolják az üzleti igényekkel.

A hazai gazdálkodó inkább a járt utat választja, vagyis lassabban áll át egy évtizedek alatt megszokott rutinszerű működésről innovatív megoldásokra. Így a magyar gazdák versenyképessége nagyrészt a máshol bevált technológiai, műszaki és genetikai újdonság átvételétől függ, például a növénytermesztésben a precíziós gazdálkodás több eleméből azokat (gépberuházás, hűtőtároló) veszik meg, amire uniós támogatás jár. A precíziós gazdálkodásra, (termő)helyspecifikus művelésre alkalmas nagytraktor, kombájn, önjáró hidas permetezőgép 120-180 millió forintba kerül

a beruházáshoz kapcsolódó szerszámok, eszközpark nélkül. A precíziós növénytermesztés lényege, hogy a földi állomásokkal pontosított műholdas GPS-koordinátás helymeghatározással – a táblán belül az egyes – a digitális térképen elkülönített, nagyon hasonló adottságú kisebb területet egyedileg kezeljék. Ezt az egységet speciális mikrotalaj-, (öntöző)víz- és tápanyagigénye szerint külön-külön kezelik. A helyspecifikus művelés során a még pontosabb helymeghatározással az egyes növény termőhely igénye szerint művelik meg előre a talajt, juttatják ki a tápanyagot, a növényvédő szert, a vetőmagot, az öntözővizet. Ezzel a termelő még kevesebb inputot (vetőmagot, vegyszert, energiát stb.) használ fel a művelésnél, növényápolásnál, betakarításnál a talajművelés során, ezáltal a legolcsóbban, tehát versenyképebben állíthatja elő a terményt, amiből következik, hogy a legújabb technológiát és eszközt mellőzve a termelő költség- és versenyhátrányba kerül.

A precíziós géprendszerek horribilis beruházási igénye miatt a hazai kisgazdaságokban – tisztelet a kivételnek – inkább csak a korábbi csúcstechnikát vagy annak egy-egy elemét használják. A növénytermesztésben például a műholdas helymeghatározással vezérelt robotkormányt és csak nagyobb foltokban művelik precíziósan a területet. Az átlag családi gazdaságban a legfrissebb innovációkhoz képest sokéves a lemaradás, növekszik a költség, ezzel együtt a versenyhátrány is. Ezzel is magyarázható, hogy uniós támogatások nélkül a gazdák döntő többsége nem tud nyereségesen termelni. A szükséges innovációk már rendelkezésre állnak a mezőgazdaságban, ugyanakkor a fogadókészséggel és a tudással van baj. E csúcstechnológiák alkalmazásához egészen más szintű és képzettségű munkaerőre van szükség, mert a feladatok többsége szellemi tevékenységet is igényel. Kérdés azonban, hogy az oktatás, képzés hogyan tud ehhez alkalmazkodni, ugyanis a precíziós gazdálkodás adatait értelmezni is kell. A precíziós gazdálkodás már az állattenyésztésben is jelen van, ahol az informatikai rendszerek segítségével egyedenként takarmányozzák az állatokat. A képzett munkaerő hiányában a mezőgazdasági csúcsinnováció, a robotizálás itthon kényszer is azon túl, hogy az európai, észak-amerikai országokhoz képest jelentős a hazai lemaradás e téren.

A mezőgazdaság – és az egész élelmiszer-értéklánc – az innováció szempontjából is különleges, mert befolyásolja a támogatási rendszer. Az egyes pilléres közvetlen támogatások kevésbé, míg a kettes pilléres pályázati források kifejezetten támogatják az innovációkat. Közben a fejlesztések üteme immár évtizedes távlatban gyorsul, innovációs teljesítményünk jócskán elmarad az uniós átlagtól. A gazdák nyitottsága az innovációkkal szemben mára szigorú életképességi kritériummá vált. Ezt egyik oldalról a sokasodó kihívások (pl. klímaváltozás, ÜHG-kibocsátás, hatékonysági kényszer, szigorodó szabályok), másik oldalról a gazdák szemlélete és felkészültsége határozza meg. Az agrárinnováció messze nem csak a termelés technikai, technológiai hátterére korlátozódik. A sikeres gazdálkodók a precíziós gazdálkodás fogalomkörét kiterjesztik tevékenységük számos területére, így javítva például adminisztrációs, emberi erőforrás, tárolási, folyamatszervezési

és piaci potenciált a hatékonyság növelése céljából. Az innovációk az átalakuló élelmiszerpiacok legfőbb mozgatórugói. Az élelmiszerpiac a jövőben két irányba mozdul el, egyrészt a hagyományos, természeteshez közeli, másrészt az új típusú élelmiszerek értékesítése lesz a meghatározó a kereslet és kínálat függvényében. A tömegcikkek továbbra is fontos szerepet játszanak az értékláncban, de az innovációs potenciált a két irány hozzáadottérték-növelési lehetősége határozza meg.

Mára a digitalizáció gyökeresen megváltoztatott minden korábbi folyamatot szinte az összes ágazatban, a termeléstől kezdve az értékesítésen át a fogyasztásig bezárólag. A hatékonyság és a versenyképesség gyorsan elértéktelenedik, ezért a digitalizáció folyamatos fejlesztése került a figyelem középpontjába. A folyamatos és rendkívül gyors változásokkal az innováció is tartotta a lépést, amely a korábbi könyveléshez vagy a karbantartáshoz hasonlóan alapvető folyamat lett a vállalkozások életében. A stratégiai szintű tevékenység alaptevékenység lett. Az innováció megvalósítása nem pusztán az egyes szakmai szereplők feladata egy vállalkozáson belül, hanem erre külön menedzsmentek alakulnak az üzletvitel közvetlen részeként.

A mezőgazdaság és agrártudományok részaránya a K+F ráfordításokból

A mezőgazdaságra jutó GDP 3,7%-ot, a foglalkoztatás 4,9%-ot tett ki a 2017-2022 közötti időszak átlagában, miközben a vizsgált időszakban a mezőgazdaság részaránya az összes állami K+F támogatásból 7,2%, az agrártudományokra eső összes állami és nem állami K+F ráfordítás az összes tudományág %-ban 5,7% volt a felújítások és a kutatóhelyekre nem bontható K+F-ráfordítások nélkül. Ez azt jelenti, hogy a közelmúltban a GDP és foglalkoztatás részesedéséhez képest a K+F ráfordítás magasabb volt a mezőgazdaságban és agrártudományokban, ennek ellenére lemaradásunk a fejlett országokhoz viszonyítva számottevően nem csökkent. A gyakorlat eredményeiben tehát a relatíve magas K+F ráfordítás nem tükröződik, mert nem hoz létre a termelésben hasznosítható megfelelő mennyiségű és minőségű innovációt a mezőgazdaságban (KSH 2023c).

Ehhez hozzájárul az is, hogy a jelenlegi agrárkörnyezetben (a törpe gazdaságok nagy száma párosulva az alacsony képzettséggel és elégtelen ösztönzési mechanizmussal stb.) nem lehet realitás a K+F tevékenység egyébként értékes elméleti és gyakorlati eredményeinek hasznosítása széles körben. Az agrártudományok terén kifejtett K+F tevékenység eredményei is mind a gazdaságok, mind az ágazat vezetése részéről az eddiginél sokkal nagyobb figyelmet érdemelnek. Hazánkban az egyes tudományágak között a K+F célú beruházások megoszlása a nemzetközi trendekhez hasonlóan alakul. A mérnöki- és természettudományok aránya nagyon magas, akár 80%-ot is elér, míg agrártudományoké 6% körül alakul (KSH 2023c). 2014-től működik a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Hivatal (NKFI) a

kutatásfinanszírozás kiszámítható és fenntartható rendszeréért felelős központi költségvetési szervezet (korábban Nemzeti Innovációs Hivatal).

Az élelmiszerekkel szemben egyre növekvő fogyasztói elvárások, az éghajlatváltozás, a szigorodó környezetvédelmi elvárások, valamint a munkaerőhiány kíséretében különösen fontos a hatékonyság növelése. Az EU legfejlettebb mezőgazdasággal rendelkező tagországaikhoz viszonyított lemaradás csökkentéséhez elengedhetetlen a mezőgazdaság tudás- és technológiaalapú modernizálása. A hazai mezőgazdaság hatékonyságának növelése a várhatóan mérséklődő uniós támogatás és a klímaváltozás által okozott egyre súlyosabb károk mellett óriási kihívás. A másik oldalon Európában elsőként Magyarország alkotta meg a Digitális Agrár Stratégiáját, amely a rendelkezésre álló környezeti erőforrások hatékony felhasználása mellett, az információk gyűjtésével, feldolgozásával, a technológiai műveletek automatizálásával és robotizálásával nagymértékben hozzájárul a mezőgazdasági termelés, az élelmiszeripar jövedelmezőségének növeléséhez (Digitális Jólét Program, 2019). A kutatás-fejlesztés megerősítése érdekében a kormány létrehozta a Digitális Agrár Innovációs Központot, a Digitális Élelmiszerlánc Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Központot.

A magyar mezőgazdaság jövője, a gazdák megélhetése nagymértékben attól függ, hogy a takarékos, gazdaságosabb termelést biztosító, korszerű technikai eredményeket hogyan tudják átvenni, elsajátítani. Az ágazat egyre inkább az innovációra épül, a digitalizáció eszközei pedig egyre gyorsabban terjednek, sőt hatékony és precíz művelést tesznek lehetővé. A magyar mezőgazdaság egyik kulcskérdése, hogy tud-e alkalmazkodni a megváltozott körülményekhez. A számítógépes háttér, a precíziós műszerek és technológiák alkalmazása ma már elengedhetetlen a sikeres, gazdaságos termeléshez. A világszerte tendenciákhoz igazodó versenyképességhez elengedhetetlen a technológiai fejlesztés, mert az értéknövelés feltétele az innovatív, modern technológiai fejlesztés. Ehhez az is hozzájárul, hogy az uniós vidékfejlesztési támogatásokhoz társuló nemzeti kiegészítő forrás mértékét Magyarország a korábbi 17,5%-ról 80%-ra emelte, így a korábbi időszakhoz képest jóval nagyobb fejlesztési keretre pályázhatnak a mezőgazdasági és élelmiszeripari szereplők. A példátlan mértékű forrásnak is köszönhetően várhatóan komoly fejlesztések várnak az ágazatra.

A Magyar Innovációs Szövetség (MISZ) Agrár Tagozata az aktív mezőgazdasági termelővállalkozások számának növelését tartja elsődleges céljának. Több aktív termelővállalkozásra van szükség, hiszen ezek a cégek valósítják meg az igazi innovációs fejlesztéseket. Az 1990-ben alapított MISZ célja az innováció gazdaságélénkítő szerepének erősítése. Az Agrár Tagozat fontosnak tartja a Magyarországon létrehozott, illetve hasznosított szellemi termékek számának és értékének növelését. A magyar ipar képes magas hozzáadott értéket képviselő termékek előállítására, amelyeket az agrárágazat is hasznosítani tud. Az Európai Unió tagországaik közül a magyar exportban a legmagasabb a high-tech rész, erre az alapra pedig szerinte a

jövőben is lehet építkezni. Kiemelten prioritás a hazai és a nemzetközi együttműködés is, mert partnereket kell találni az eredményes részvételhez a kutatás-fejlesztés-innováció területén. A magyar mezőgazdaságigép-gyártás fejlesztésének megvalósítását erősen hátráltatta az agrártámogatási rendszer, amely nem segíti a versenyképes termelés kialakítását.

Az Európai Innovációs Partnerség (EIP) egy tagállami innovációs projekteket gyűjtő hálózat, amely összeköti az innovációval és mezőgazdasággal foglalkozó különféle szereplőket (gazdák, tanácsadók, kutatók, agrárvállalkozások, nem kormányzati szervezetek). Ezen keresztül megoszthatják egymással gyakorlati igényeiket, kutatási eredményeiket, innovációs ötleteiket, ezáltal az új tudás gyakorlati hasznosítását segíti elő. A célok között szerepel a tudásalapú mezőgazdaság, az erdőgazdálkodási ágazat, az akvakultúra fenntartható fejlődésének elősegítése és az innovatív gazdálkodói szemlélet kialakítása.

Sikeres magyar agrárinnovációs fejlesztések

Az innováció a piac megtartásának feltétele is. Magyarországon agrárinnováció főleg a már bevált újdonságok átvételéről szól, ugyanakkor a friss ötletekből született innovatív megoldások is megtalálják a helyüket a hazai agrárszektorban a versenyképesebb, fenntarthatóbb és környezettudatosabb gazdálkodás érdekében.

OkosFarm: a jövő mezőgazdaságának szállítója

Az OkosFarm telepfelügyeleti, automatizációs rendszer, amely ipari eszközök segítségével lehetőséget nyújt az üzemszerű mezőgazdasági telepeken az égető problémák megoldására, mint például, a csökkenő emberi erőforrás, a felügyelet nélküli órák vesztesége, a nem látható géphibák és az adatok figyelmen kívül hagyása. Az OkosFarm egy központ a mezőgazdasági cég telephelyén, amelyre minden meglévő gépészet és rendszer csatlakozik, sőt képes minden ágazatra és teleptípusra személyre szabott rendszert is létrehozni. Ez a projekt összességében digitális távfelügyeletet kínál növénytermesztőknek, állattartóknak egyaránt, ugyanis az azonnali, magas szintű kontrollal mielőbb beavatkozhat a gazda, ha baj van, mert a kamerarendszer és a saját fejlesztésű szenzor jelzi a változásokat. A mérőközpont például az állat életterébe helyezve éjjel-nappal olyan méréseket végez, amelyek figyelembevételével a megfelelő állatjóléti körülmények megteremthetők, de fontos elem a betegségek felfedezése, a sikeres ellés és az elhullások megakadályozása a nap akár 24 órájában (okosfarm, 2023).

Growberry: Növénytermesztő tesztkamra

A Growberry startup mesterséges megvilágítással kiegészített tápoldatos, termőföld nélküli, hidropóniás kontrollált növénytermesztést kínál a maximális nyereség elérése érdekében. Havi vagy sikerdíjas rendszerben teljes körű szolgáltatást nyújt, melybe beletartozik az ingatlan és az eszközök bérleti díja, a szakértelem és az üzemeltetés egyéb költségei. Gyakorlatilag ipari növénytermesztésről van szó termőföld nélkül. A modulszerű berendezés könnyen használható, bővíthető és többféle növénykultúrára is alkalmazható, de leginkább paradicsom, paprika, szamóca, különféle zöldség, leveles zöldség, salátafélék, uborka és padlizsán termeszthető ezzel az eszközzel. A kontrollált növénytermesztéssel a mesterséges termőhely feltételeit, így a hőmérsékletet, a tápoldatot, a fény spektrumát is ellenőrizni és irányítani lehet. Az optimális környezetben a beltartalmi értékek akár 30%-os javításával hamarabb lehet megtermelni bizonyos növényeket. A szamócát a fényspektrummal és a tápoldat-összetétellel még arra is serkentik, hogy levelek, zöldség részek helyett inkább több termést hozzon. A mezőgazdaságot és kertészetet a klímaváltozáson kívül az elöregedés és az elvándorlás is egyre inkább sújtja, de az utódlás is sokszor problémát jelent, így egyre többen érdeklődnek a kiszámítható, innovatív megoldások iránt (Takács, 2022; TERMÉKmix, 2013).

PigBrother: okos kamerák a sertésstelepen

A PigBrother rendszer távfelügyeletet kínál sertésstelepekre 0-24 órás kamerás megfigyeléssel, amely az automatikus beavatkozás mellett lehetővé teszi a gazda számára a nyílt beavatkozást a mért adatok figyelembevételével. A kamerák a hizlalás teljes időszakában figyelik a sertéseket, ezáltal biztosítják a naprakész információkat a gyors és megfelelő döntések meghozatalához. A rendszer központi eleme egy automatikus súlybecslő szolgáltatás, ami kamerák segítségével figyeli a sertéseket, és képeket készít a súlyuk meghatározásához. Ezzel a megoldással emberi beavatkozás nélkül nyerhető ki az automatikusan kielemezhető adat. A rendszer lehetőséget biztosít a sertésállományban rejlő genetikai potenciál optimalizálására, folyamatos betekintést nyújt a sertések és környezetük állapotába, ezzel párhuzamosan az előállított hús minősége is javul. Továbbá hozzájárul az elhullási arány javításához és az állatok egészségének megőrzéséhez, az emberi beavatkozástól mentes, stresszmentes állattartáshoz, ugyanakkor csökkenti a vállalati adminisztrációs terhet és a munkaerő-igényt (Takács, 2022; PigBrother, 2023).

Led Lighting Kft.: LED világítástechnika

A baromfifélek tenyésztésében nemcsak a genetikai tervezésnek, hanem a tartástechnológiának is döntő szerepe van a végtermékek, illetve az állatok életminőségének szempontjából. A mesterséges világítási programok

létrehozása lehetővé tette, hogy akár szezonálisan is szaporodjanak az állatok a kialakított mesterséges környezetben, így a fogyasztói igényeket (tojás, hús) egész évben ki lehessen szolgálni. A baromfifajok fényigénye kettős, szükségük van a fényre nemcsak látásukhoz, de az a belső neuro-endokrin rendszeren keresztül kihat az állatok anyagcsere-folyamataira és szaporodásbiológiájára is. Így tehát az állatokra a szemükön keresztül nagymértékben tudunk hatni, ezért körültekintően és gondosan kell megválasztanunk a technológiai elemeket, melyeket alkalmazni kívánunk tartásuk és termelésük során. Zárt tartási rendszerekben, megfelelő világítási programok alkalmazásával szabályozható az ivaréret ideje és üteme, maximalizálható a tojástermelés, a növekedés, valamint számos, a viselkedéssel és más értékmérőkkel összefüggő tulajdonságot is befolyásolni lehet. A mai modern, jó minőségű LED költséghatékonyabb, mint az izzó, hosszabb élettartamú, mint bármely más fényforrás, dimmerelhető és képes elkerülni a stroboszkóp hatást.

A Led Lighting Kft. távvezérelt LED-es megvilágítást kínál az elavult rendszerek kiváltására, így a gazdának nem kell éjjel vagy hajnalban le- és felkapcsolni a lámpákat. Elsősorban a brojlertelepekhez fejlesztett LED-es világítással a hagyományos izzókhoz képest 80%-os költségmegtakarítás érhető el az alacsonyabb fajlagos termelési költség mellett. A LED-es technika fejlődésével lehetővé vált a stroboszkóphatás (lámpák/égők vibrálása) csökkentése, akár teljes megszüntetése, megkímélve a stressztől az állatokat. Ezzel a megoldással csökken az állatok stresszterhelése, az állomány kiegyensúlyozottabbá válik, ami kedvező hatást fejt ki az állatok élettani funkcióira és a fejlődésére egyaránt. Ez a LED-technológia energiatakarékos, programozható és biológiai többlethozam érhető el vele (issuu, 2023).

bedrock.farm: beltéri növénytermesztő rendszer

Időjárástól, évszaktól függetlenül termelő, beltéri precíziós növénytermesztési rendszerek, melyek a piaci igények szerint optimalizált termelési paraméterek mentén állítanak elő mikrozöldeket, leveles zöldeket, fűszernövényeket és ehető virágokat. A bedrock.farm platformkártyájának segítségével a szigetesen működő beltéri növénytermesztéshez szükséges technológiai eszközök összehangolhatók. Ennek köszönhetően a szabadon versenyző piacról a legjobb ár/érték arányú eszközökkel szerelik fel a beltéri növénytermesztő egységeket. A platformkártya a termesztésből származó adatokat is aggregálja, így a gyűjtött adatokra támaszkodva a termelés prediktíven, a piaci igényekhez optimalizáltan történhet. Továbbá a folyamatosan reprodukálható környezeti paraméterek segítségével a piaci igényekre szabva, akár évekkel korábban termesztett alapanyagok is újra előállíthatók az akkori konzisztens minőségi szinten. A kikísérletezett és optimalizált termesztési körülmények az egységes mérésvezérlési rendszereknek köszönhetően újra és újra reprodukálhatók. Megvalósult az első termesztőház, a partnerek igényeit követve folyamatosan

növekvő forgalommal. 2022-ben a nettó árbevétel meghaladta a 35 millió Ft-ot (Takács, 2022; hvg.hu, 2022).

Robotkormány: automata kormányzási rendszer traktorokra

A MachineryGuide AutoSteer termék egy 100%-ban hazai fejlesztésű robotkormányzás rendszer, fejlesztése 2019-ben indult és 2021-ben került piacra. A termék régi és új traktorokba is beszerelhető, így a gazdaságok modernizálására kiválóan alkalmas. Hosszabb távon a kézi kormányzáshoz képest pontosabb, hatékonyabb, gyorsabb és tehermentesebb megoldást jelent a gazdák számára. A termék a viszonteladói partnereken keresztül már hat külföldi országban elérhető. A mezőgazdaságban használt bármilyen, traktorra utólag felszerelhető automatika, amely a kiegészítő RTK (Real Time Kinematic – valós idejű kinematikus helymeghatározás) korrekció szolgáltatással centiméteres pontossággal vezeti végig a traktort a földek optimális útvonalán, ezzel minimalizálja a felesleges átfedéseket, megszünteti az esetleges kihagyásokat, és lecsökkenti a munkavégzéssel kapcsolatos kiadásokat. Kézi kormányzással a navigáció pontossága és ennek érdekében a munkagép sebessége erősen korlátozott, miközben a gazda folyamatos koncentrációját és figyelmét igényli. Ezzel szemben az automata kormányzás pontosabban kormányoz nagyobb sebesség mellett, s közben a gazda más fontos körülményekre (pl. munkagép, föld állapota) is tud figyelni, ezáltal a tehermentesítés mellett költséghatékonyabb és gyorsabb művelést is eredményez. A tapasztalatok alapján a munkavégzés ideje a kézi kormányzáshoz képest általában a kétharmadára csökken. Gyakorlatilag minden munkához használható a rendszer, legyen szó permetezésről, talajlazításról, tarlóhántásról vagy vetésről (Takács, 2022; Agroinform.hu, 2023).

Creaveg: táplálkozásunkon keresztüli értékteremtés

A kétféle főzésre alkalmas alaptermék (Veganmeat) és a négyféle ízesített, formázott kényelmi Veganfood termék már 100 SPAR üzletben kapható Magyarországon. Az innováció társadalmi hasznossága a globális élelmezésbiztonság megteremtése és az élelmiszerfogyasztás környezeti terheinek jelentős csökkentése. A Creaveg fejlesztésének célja a borsó- és bab-fehérjéből olyan húsmentes élelmiszer előállítás, ami textúrájában és funkcionalitásában a hússal megegyező tulajdonságokkal rendelkezik, így bármely húsos étel húsmentes megfelelője elkészíthető belőle. A fejlesztés során fontos szempont volt, hogy olyan alternatív fehérjeforrásból valósítsák meg termékeiket, melyet a hazai mezőgazdaság is elő tud állítani. A Creaveg termékek a 14 legfőbb allergéntől és tartósítósztól mentesek. A húshelyettesítő terméket a Food Control vállalatcsoport fejlesztette ki, mely termék a Creaveg nevet kapta, utalva annak kreatív jellegére, széleskörű felhasználhatóságára, hiszen bármilyen étel elkészíthető belőle, a rántott szelettől kezdve, a bolognain és a töltött káposztán át egészen a rakott

zöldbabig bezárólag. Hús nélkül is lehet finom és változatos ételeket készíteni, melyeket nemcsak a vegetáriánusok és a vegánok, de a húsevők és flexitáriánusok is örömmel fogyasztanak. A termék már országszerte elérhető az üzletekben (Takács, 2022; Creaveg, 2023).

HUMIN AQUA: magyar innováció a Marson?

30 éves kutatási projekt eredményeként méhbarát, bio, emberi szervezetre veszélytelen huminsav-koncentrátumot gyártanak védett, egyedi eljárással, amely rövid idő alatt visszaállítja a talajéletet, és akár 50 százalékkal csökkenti a növény vízszükségletét. Minden növénykultúrában kihozza azok genetikai potenciálját, min. 20 százalék hozamnövekedést eredményez, mindemellett javítja a beltartalmi értékeket, abszolút vegyszermentes természettest tesz lehetővé. A HUMIN AQUA huminsav-koncentrátum kíméletes, ipari méretű gyártása 2017-ben indult el. A Gömör-féle kivonási eljárás a világon egyedülállóan képes koncentráltan kivonni és vízdoldhatóvá tenni a huminanyagok három frakcióját, hogy az mind a növények, mind az állatok, mind pedig az emberi szervezet számára egyaránt jó hatásfokkal hasznosítható legyen. Ez a formula azért átütő sikerű megoldás, mert így mindhárom területen képes sejtszinten építeni, vízzel szabadon mozogni és tökéletesen hasznosulni. Az innovatív mezőgazdasági startup már több ezer hektáron, négy földrészen bizonyított. Ázsiától Dél-Amerikáig, Afrikától Európa sok országán át hazánk minden tájegységéig, sivatagi és normál körülmények közt is tesztelték a rendszert. Folyamatban van a piacra lépés az EU-ban, az Öböl-országok és az USA területén. A vállalat célja, hogy a 2030-as években a Mars terraformálásához magyar huminsav utazzon egy új világ felé. 2017 óta a cég az Elon Musk belső kör csoportjának is tagja (Takács, 2022; HUMIN AQUA, 2023)

Living Foods: csíráztatott, komplex növényi élelmiszerek

A 10 éves technológiával és gyártási folyamattal készült alapanyagokat a Living Foods vállalat már most is több nemzetközi piacon forgalmazza önállóan, vagy késztermékekben használják fel. A csíráztatással és fermentálással készülő termékek komplex növényi élelmiszerek, illetve alapanyagok, amelyek megoldást jelentenek magas minőségű élelmiszerektől kezdve a hiánybetegségben szenvedők étkezési megoldásáig bezárólag, így egy egészségesebb társadalom alapját is megteremthetik. A termékek a világ több országában megtalálhatóak már, rendszeresen szállítanak nyugat-európai, ázsiai és arab partnereknek. Az elmúlt 10 évben csíráztatott magokból nyert olajat (len, kender, feketekömény) palackozzák, sőt csíráztatott magliszteket és ezekre épülő funkcionális keverékeket is készítenek pékségeknek, de magas fehérje- és rosttartalmú shake-et is kevernek. A cég által gyártott termékek zöme bio minősítésű, ráadásul üzemükben mindent hasznosítani tudnak, így a veszteségek nélküli működés (zero waste) is hozzájárul egy élhetőbb világhoz. Az egyedi csíráztatási-

szárítási-fermántálási eljárások során zajló természetes biokémiai folyamatok – az antinutritívek lebontásával egyidejűleg – feltárják és aktiválják a magokban lévő rendkívül értékes tápanyagokat, amelyekből kiemelkedő tápértékű és magas hasznosulású olajakat, őrleményeket és funkcionális élelmiszereket készítenek. Így válik a csíráztatott alapanyag aktív vitamin- és tápanyagforrássá. A cég több évtizedes kutatási tapasztalatokra építve dolgozta ki egyedi technológiáját, amely egy csíráztatási-szárítási folyamat nagy tömegben és szinkronizált módon, amelyet magtól függően, 24-48 óra tartományban, 40 °C körüli hőmérsékleten végzett vákuumszárítással megállítanak (Takács, 2022; Living Foods, 2023).

Okos Élelmiszerek: finom és egészséges élelmiszerek

A Hajdúsági Sütődék-csoport – amelynek tagja az Okos Élelmiszerek Kft. is – 23 éve indította útjára a Smart Food® (Okos Élelmiszerek®) elnevezésű vállalati kutatási projektet, melynek célja innovatív élelmiszerek kifejlesztése volt. Mindezt a sütőiparban, amely közismerten gyenge jövedelmezőségű, ráadásul a rugalmatlan fogyasztói szokások erősen megkötik az innovátorok kezét a termékfejlesztés terén. Mitől okos egy élelmiszer? Az okos élelmiszernek öt szakmai és egy etikai normának kell megfelelnie egyszerre. A termék legyen tudományosan tervezett, finom és teljes gasztronómiai értékű, tudományosan igazoltan biztonságos és kedvező élettani hatású, konkrét élettani igénnyel rendelkező célcsoportoknak készüljön, végül engedélyezett egészségügyi, élettani hatásokat lehessen hirdetni. Ha ezek a szempontok együttesen érvényesülnek, abból automatikusan következik az etikai szempont érvényesülése is, miszerint: az okos élelmiszer nem hazudik, azaz nem csapja be a fogyasztóit. A kutatások révén négy brandcsalád született.

Ezek közül a Vitajó® brandnek a cipó- és kalácsformátumai, valamint a bake-off (fagyasztott) termékei vannak jelen a piacon. A Ritmus® termékcsaládnak kenyér- és cipóformátumai érhetőek el. Az okos élelmiszereknek jelenleg évi közel hárommilliárd forintos piaca van és három multinacionális lánc egységeiben, valamint közel háromezer hazai boltban kapható. Nemzetközi piacra lépést is terveznek, ezért már több országban bejegyezték az okos cipók védjegyét. A speciális gyártói-piaci franchise-rendszer kiterjesztése mind a hazai, mind a nemzetközi piacokon lehetővé teszi, hogy más sütőipari cégek is gyárthassák az okos élelmiszereket. A cégcsoport volt az első Magyarországon, amely sikeresen folytatott le Novel Food (Új Élelmiszer) eljárást az Európai Unióban. Több régióban és országban már bejegyzett, illetve bejegyzés előtt álló szabadalmakkal rendelkezik. Szabadalmi bejelentéseket tettek az USA-ban, Kanadában, az EU-ban és Euráziában (Takács, 2022; Vitajó, 2023).

K2: új csúcson a növénykondicionálásban

A Huminisz Kft. évente egymillió liter felett értékesít kiváló minőségű növénykondicionálókat (Kondisol-termékcsalád és K2), valamint lombtrágyákat (Solvitis-termékek), így több éve a hazai piac meghatározó szereplője. Magyarországon elsők voltak az EDDHSA (szerves, jól hasznosuló kelátképző) bevezetésében, gyártásában, hasonlóan a humin- és fulvosavas növénykondicionálás technológiai szintre emelésében. A cég 2011 óta értékesíti a folyamatosan fejlesztett, bővített Huminisz-technológia keretében termékeit. Több éve drónos kísérleteket is végeznek a termék-kombinációkkal. A K2-vel új csúcsra törnek a humin-, fulvo- és az aminosavas növénykondicionálásban. A Huminisz Kft. tapasztalata alapján ezek a növénykondicionálók (Kondisol-termékek és a K2) még eredményesebbek, ha a növény számára könnyen felvehető, szerves kelátokkal és komplexképzőkkel készülő Solvitis-lombtrágyákkal együtt juttatják ki a termelők. A folyamatos termékfejlesztés eredményeként a cég már több, mint 22 termékkel segíti a magyar gazdák munkáját, ugyanis a hatékonyság és környezetvédelem kiváló megtérülési mutatók mellett is érvényesülhet (Takács, 2022; Huminisz, 2023).

DKS 2.0: laborfejlesztés a kármentesítés szolgálatában

Az eszközfejlesztés tudományos kutatásokat támogat és szénhidrogénnel szennyezett talajok és felszín alatti vizek kármentesítésének tervezését segíti. A DKS permeabimétert az 1980-as években természetes agyagszigetelések szennyezőanyag-vissza-tartó képességének vizsgálatára hozták létre a Ruhr Egyetem kutatói. A Miskolci Egyetemen az eszköz átalakításával és korszerűsítésével a szennyezett területek kármentesítése során általános rediffúzió folyamatának jobb megértését célzó laboreszközt fejlesztettek ki. A szennyezett területek kármentesítése kiemelt környezetvédelmi prioritás világszerte, de különösen Magyarországon, mivel ivóvízbiztonságunk döntően a felszín alatti vízkészleteink mennyiségi és minőségi állapotától függ.

A DKS-permeabiméter megalkotásának fő célja egy olyan eszköz kifejlesztése volt, amivel lehetségessé válik az anyagtranszport-folyamatokat befolyásoló paraméterek laboratóriumi mértékben való jobb megismerése, mivel korábban csak kevés erre a célra használható berendezés létezett. A DKS szavak, melyekből az eszköz neve is áll, szintén ezeket a folyamatokat tükrözik: Diffusion – Konvektion – Sorption (diffúzió – konvekció – szorpció). A szennyezéssel érintett területeken fellépő rediffúziós jelenség laboratóriumi környezetben történő vizsgálatára a Miskolci Egyetem többéves eszköz- és mérés módszertani fejlesztési tevékenységet folytat. A rediffúziós vizsgálatokhoz kiváló eszköznek bizonyul a módosított elrendezésű DKS-permeabiméter. Az eszköz és a mérési metódus is számos ponton változtatásra került oly módon, hogy nem a beépített agyag mintatest szennyezőanyag visszatartó képességét mérik, hanem szennyezett

mintatestből kilépő (rediffúzió) szennyezőanyag mennyiségét és dinamikáját határozzák meg (Takács, 2022; Miskolci Egyetem, 2023).

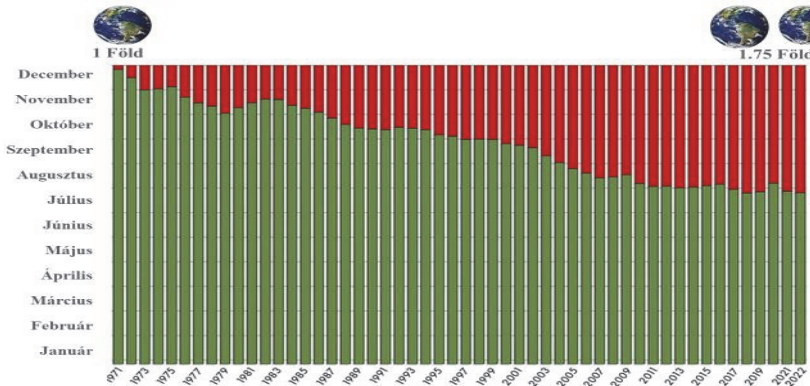
VízŐr: a talaj párolgási veszteségének csökkentése

A magyar Water&Soil Kft. fejlesztése a Water Retainer (VízŐr), mely organikus alapokon nyugvó talajkondicionáló készítmény, amelyet kémiával, mikrobiológiával, állattenyésztéssel és növénytermesztéssel foglalkozó szakemberek fejlesztettek. A termék azáltal, hogy megőrzi a nedvességet a talajban, csökkenti az öntözővíz-felhasználást és az aszály okozta kiszáradást. Továbbá segít abban, hogy a talajban stabilabb nedvességszintet tartsunk fenn, de elősegítheti az adagolt tápanyagok hasznosulását, és a talaj mikrobiológiai életéhez egészségesebb feltételeket biztosít. A talajba kerülő összes víz 40-60 százaléka elpárolog, de a talajkondicionáló folyadékot a talaj felszínére permetezve a talajból kipárolgó és a levegőben lévő vízpárát megkötí, vízzé visszaalakítja és a talajban tartja. Ezáltal segíti, hogy elegendő víz álljon rendelkezésre, mely a növények fejlődésének kulcskérdése. Maradék nélkül lebomlik, így a biogazdálkodásban is engedélyezett a használata. A termék gyártásba és kereskedelmi forgalomba került. Négy kontinensen tesztelték. Igazolást nyert, hogy öntözés esetén 25-50 százalék vizet lehetett megtakarítani. Öntözés nélkül akár 25 százalékkal nőtt a talaj nedvességtartalma, mely 10-30 százalék terméshozadékot eredményezett. Öntözés nélküli művelésben történő alkalmazás esetén jelentősen – akár duplájára – nő a növények aszálytűrő képessége, az aszálytűrés ideje, ezáltal jobb minőségű és nagyobb mennyiségű termés várható (Takács, 2022; Water&Soil Kft., 2023).

Az innováció középpontjában a körforgásos és biomassza alapú gazdaság

Az emberiség szükségleteinek kielégítéséhez elegendő erőforrást jelenleg 1,75 Föld biokapacitása tudná megújítani. Minden évben egyre korábban használjuk fel a Föld adta erőforrásokat. Az óceáni szemétsziget is az eddig feltételezettnél jóval nagyobbra duzzadt. Az ENSZ jelenlegi becslése alapján 2050-ben 9,8 milliárd ember él majd a Földön, mely a jelenleginél nagyobb nyersanyag-és energiafelhasználást jelent, változatlan fogyasztási struktúra mellett. Ugyanakkor erőforrásainkat gyorsabb ütemben éljük fel, mint ahogy azok újratermelődnek. Ha ez a tendencia a jövőben is így folytatódik, akkor 2050-re három Földnyi erőforrásra lenne szükség. Az Earth Overshoot Day minden évben meghatározza az ökológiai „Túllövés Napját” amikor a Föld lakossága elfogyasztja azt a természeti erőforrásmennyiséget, ami egy fenntartható világban egész évre jutna.

Az ökológiai túllövés napja 1971. december 25. volt, majd fokozatosan egyre korábbra került az évben, így 2022-ben már július 28-ára esett, 2023-ban pedig július 27-re (1. ábra).



1. ábra: A globális túllövés napja (1971-2022)
 Forrás: Global Footprint Network (2023)

Kizárólag a körforgásos, illetve biomassza alapú gazdaság kiépítése jelent kiutat ebből a helyzetből, mert eszközöket ad az éghajlatváltozás és a biológiai sokféleség csökkenése leküzdéséhez, fontos társadalmi szükségletek kielégítéséhez, valamint a jólét, a munkahelyek és rugalmasság elősegítéséhez, miközben csökkenti az üvegházhatású gázok kibocsátását, a hulladékot és a környezetszennyezést. Ma még az új erőforrások és nyersanyagok folyamatos bevonását igénylő növekedés tartja mozgásban a világgazdaságot (lineáris gazdaság). Ez azt jelenti, hogy a nyersanyagok kitermelését követi a termékek gyártása, ezek a fogyasztók használatába kerülnek, végül hulladékká válnak. A helyzet súlyát mutatja, hogy évi 100 milliárd tonna nyersanyagot – ásványok, fémek, fosszilis tüzelőanyagok és biomassza – használnak fel világszerte, ennek 75%-a véges készlet (ásványok, fémércek és fosszilis tüzelőanyagok). Az évente feldolgozott nyersanyag 93%-a az újonnan kitermelt alapanyag és mindössze 7%-át hasznosítják újra nyersanyag formájában 2021-ben a világ 7,2%-ban volt körforgásos (az EU 11,7%-ban) – vagyis a globális gazdaság anyagforgalmának 7,2%-át hasznosítottuk újra – míg 2020-ban még 8,6% és 2018-ban 9,1% volt a körforgás aránya (Circle Economy, 2023).

A biomassza alapú gazdaságot magában foglaló teljes körforgásos gazdaság elérése technikailag nem lehetséges, mert a termelésbe visszaforgatható anyagok mennyiségének gyakorlati korlátja van. Technikai korlát például, hogy egyes anyagokat a használatuk során elégetnek (fosszilis tüzelőanyagok), míg más anyagok hosszú távú készletet képeznek (épület, infrastruktúra, nehézgép stb.) hosszú évtizedekre, így évtizedekig nyersanyagént sem hasznosíthatjuk újra. A termelésbe visszaforgatható anyagok közül például a fémet, a műanyagot és üveget csak néhányszor tudunk újrahasznosítani, mert minden körforgással romlik a minőség. A felhasznált anyagok pusztta mennyisége is kihívást jelent, mert ha az

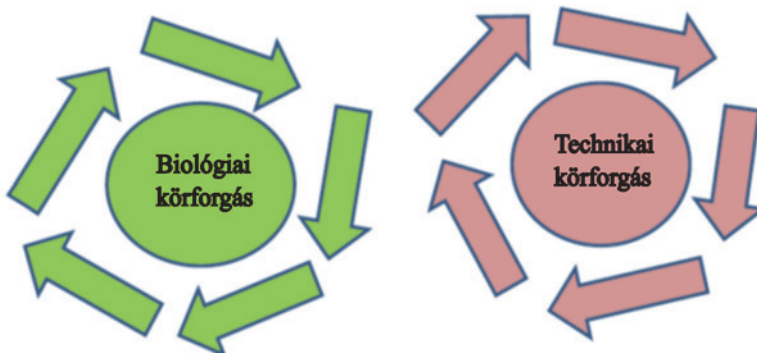
anyagfelhasználást az újrahasznosítási kapacitáshoz igazítjuk, akkor nagyon lassú gazdasági növekedéssel számolhatnánk. A körforgásos gazdaság optimalizálásához számos tényezőt figyelembe kell venni, például azt is, hogy fosszilis tüzelőanyagoknak nincs helye a körforgásos gazdaságban. Az energiaátmenet viszont erősen anyagigényes lesz, de a nyersanyag kitermelésének növekedésével csökken a körforgásos arány. A körforgásos gazdaság megvalósításával a jelenleg használt nyersanyag 70%-a kielégíti a globális népesség igényét (Circle Economy, 2023).

Az üvegházhatású gázok kibocsátásának csökkentése érdekében is egyre nagyobb politikai, társadalmi nyomás nehezedik a gazdákra, főleg a metánt kibocsátó állattartás miatt. A kimerülő termőtalajok regenerálásához elengedhetetlen a szerves anyag és istállótrágya. A fenntartható trágyatermeléshez, -kezeléshez és -felhasználáshoz új innovációkra van szükség. A növénytermesztés energiaellátása egyre nagyobb mértékben a mezőgazdaságban előállított biomasszára és egyéb megújuló energiára fog épülni. A szintetikus vegyszerek (növényvédő szer, műtrágya stb.) kiváltása bioalapú szerekkel szintén nagy kihívás a mezőgazdaságban. A mezőgazdasági gépek üzemanyaga még középtávon sem a zöld áram, hanem a hidrogén, bioüzemanyag vagy földgáz lesz a gázolaj helyett. A globális felmelegedéssel járó gyakoribb időjárási szélsőségeket, aszályokat, hőstresszt, agresszívebb járványokat elviselő genetika is szükséges a növénytermesztésben és az állattenyésztésben egyaránt. A gyors fajtaelőállítás forradalmát jelenti a genomszerkesztés technológiai innovációja. Ezzel a módszerrel – akár külső gének bevitelével nélkül – a természetes spontán mutációt másoló irányított pontmutációval, precíziós nemesítéssel hoznak létre célirányosan új fajtákat. Ezen a területen a hazai kutatók is élen járnak.

Üzleti modellek a körforgásos gazdaságban

A keresletoldali, platformalapú, együttműködő gazdaság gyors terjedése és annak különböző formái már több mint egy évtizede a mindennapi élet részei (Kovács et al., 2021). A fenntartható üzleti modellek a környezeti és társadalmi célokat az üzleti tevékenység középpontjába helyezik, sőt képesek a társadalmi és környezeti problémák jövedelmező megoldására azáltal, hogy versenyelőnyt és értéket teremtenek a társadalom számára (Szigeti et al., 2022). Ezek a modellek az innováció prioritásainak függvényében változó mértékben fektetnek hangsúlyt a környezeti, társadalmi vagy gazdasági dimenzióra. A körforgásos gazdaság öt fő üzleti modellre épül, melyeket már számos vállalat sikeresen alkalmaz a gyakorlatban. Ez az öt modell – körforgásos beszállítás, erőforrás visszanyerés, termék élettartam meghosszabbítás, megosztásos platform és termék, mint szolgáltatás – önmagában vagy egymással kombinálva is alkalmazható, attól függően, hogy melyek illeszkednek a legjobban a cég profiljához, tevékenységéhez. A körforgásos beszállítás (megújuló, bioalapú inputok) és az erőforrás

visszanyerés (hulladék, melléktermék, iparági szimbiózis) modellek elsősorban a biomassa alapú gazdasághoz kapcsolódnak, ezzel szemben a termék élettartam meghosszabbítás, a megosztásos platform és a termék, mint szolgáltatás üzleti modellek kiegészítik a biomassa alapú gazdaságot. Míg a biomassa alapú gazdaság biológiai körforgást, a körforgásos gazdaság technikai körforgást jelent (2. ábra).



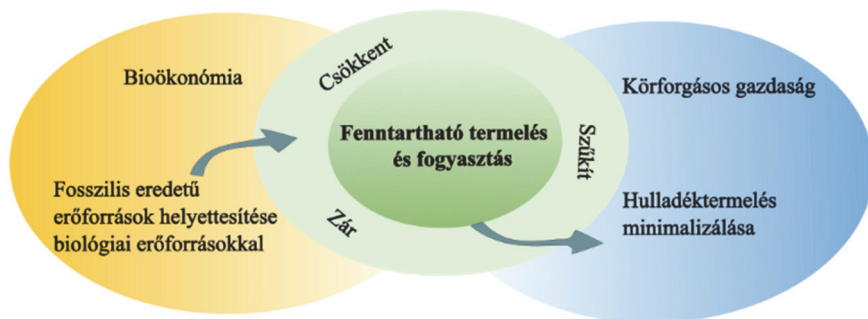
2. ábra: Biológiai körforgás a bioökonómiában és technikai körforgás körforgásos gazdaságban
 Forrás: Saját szerkesztés

A körforgásos beszállítás üzleti modell alapja a megújuló, újrafeldolgozható vagy biológiailag lebomló erőforrások beszerzése. A körforgásos beszállítási modellt alkalmazó vállalatok kiváltják a lineáris jellegű erőforrás felhasználást, minimalizálják vagy teljesen megszüntetik a hulladékképződést, miközben javítják a termelés hatékonyságát. A körforgásos beszállítás modell lehetőségeit leginkább a szűkös, vagy korlátozottan elérhető erőforrásokat felhasználó, illetve jelentős környezeti lábnyommal rendelkező cégek tudják elsősorban kihasználni. A biológiai eredetű erőforrás körforgásos beszállítása a biomassa alapú gazdaság része.

Az erőforrás visszanyerés modell célja a termékekben megtestesülő értékek – anyag, munka és energia – visszanyerése az életciklus végén és egy másik termékbe történő újrafelhasználása. Mindez egyrészt az értéklánc kialakulását segíti elő, másrészt innovatív újrafeldolgozási és értéknövelt (upcycling) folyamatokon keresztül a hulladékot felértékeli. Az erőforrás visszanyerés üzleti modell alapja a hagyományos újrafeldolgozási (anyagában történő újrahasznosítási) tevékenységekből ered, de az új technológiákat és lehetőségeket felhasználva képes újrahasznosítani bármilyen felhasznált erőforrást az eredeti termék értékén, vagy akár annál magasabb értékszínten is. A megoldások az ipari szimbiózistól az integrált körforgásos újrafeldolgozáson át a bölcsőtől a bölcsőig (cradle-to-cradle) dizájnig terjednek (anyag életciklusának önmagába zárása). Ez az üzleti modell lehetővé teszi a vállalatok számára az ún. anyagszivárgás

megszüntetését, az anyag visszaáramoltatás gazdasági értékének maximalizálását. Jól alkalmazható azon cégek számára, melyek nagy mennyiségben gyártanak mellékterméket, vagy ahol a termékekből származó hulladékanyag visszanyerhető és költséghatékonyan újrafeldolgozható. A biológiai eredetű erőforrás visszanyerés is főleg a biomassza alapú gazdasághoz sorolható.

Világszerte számos bioalapú iparág óriási energiát fektet a körforgásos gazdálkodás előnyeinek (újrahasznosítás, biológiai úton való lebomlás) kiaknázásába. Az EU-ban a körforgásos gazdaságról és bioökonómiáról szóló intézkedéscsomag felgyorsítja a körforgásos bioökonómia való átállást a globális versenyképesség javítása érdekében. Mindez elősegíti a fenntartható gazdasági növekedést és új munkahelyeket teremt. A körforgásos biomassza alapú gazdaság (bioökonómia) kiváltja a fosszilis eredetű erőforrásokat/termékeket. A bioökonómia a fosszilis eredetű erőforrások biológiai (megújuló) erőforrásokkal történő helyettesítéséről szól, ami azt jelenti, hogy a fosszilis szén megújuló szénrel helyettesítjük a főbb iparágakban: az energia-, közlekedési-, vegyipari- és építőipari ágazatokban. Ez történhet biomasszából származó szénrel (bioszféra), a szén újrahasznosításával (technoszféra) és szén-megkötéssel CO₂-ből az atmoszférában és/vagy a technoszférában (füstgázok). A bioökonómia tehát elsősorban a biomassza termeléséről, míg a biomassza alapú gazdaság a bioökonómia része, ugyanis a biomassza élelmiszer- és nem élelmiszer célú feldolgozásáról szól. A körforgásos gazdaság az anyag és termék magas fokú újrahasznosításával és a hulladék minimalizálásával kiegészíti a bioökonómiát. Továbbá jelentős szinergikus kapcsolat fedezhető fel a bioökonómia és körforgásos gazdaság metszéspontjának eredményeképpen, ezért a két koncepció integrációjáról van szó (3. ábra). A bioökonómia térhódításával a mezőgazdaságban folyamatosan nő az elsősorban nem élelmiszer célú hozzáadottérték termelés (GDP) és új munkahelyek száma (Oláh - Popp, 2023).



3. ábra: A körforgásos bioökonómia sematikus ábrázolása
 Forrás: Saját szerkesztés, Tan-Lamers (2021) alapján

A termék élettartam meghosszabbítás üzleti modell lehetővé teszi a vállalatoknak, hogy a termékek és eszközök hasznos élettartamát különböző

módon meghosszabbítsák. A termékekben megtestesülő értéket, amely máskülönben hulladék formájában örökre elveszne, javítással, felújítással, újragyártással, vagy újraértékesítéssel meg lehet tartani, sőt akár növelni is. A kiterjesztett használatnak köszönhetően pedig addicionális árbevételre is lehetőség nyílik. E modell alkalmazásával elérhető, hogy a terméket minél tovább használják célzott termékfelújítás (pl. egy elavult alkatrészt lehessen pótolni egy újjal a termék teljes cseréje helyett) mellett.

A megosztásos platform üzleti modell a felhasználók – legyenek azok magánszemélyek vagy szervezetek – közötti együttműködésre épít. Ezek a platformok segítenek a túlkapacitás, vagy az alulkihasználtság megosztáson keresztüli kiegyenlítésében, növelve ezáltal a gazdaságosságot és a felhasználói értékteremtést. Ez a modell a kihasználtság maximalizálására törekszik, ezért azoknak a cégeknek jelenthet előnyt, amelyek termékei vagy eszközei alacsony kihasználtsággal vagy tulajdonlási aránnyal rendelkeznek. Manapság egyre több szolgáltató cég specializálódik a termékek és eszközök kihasználtságának növelésére, amely azonban kihívást is jelent egyúttal a hagyományos gyártóvállalatok számára, hiszen ezáltal csökken a termékeik iránti kereslet.

A termék, mint szolgáltatás üzleti modell alternatívát nyújt a hagyományos „vedd meg és birtokold” modellel szemben, mely a tulajdonláshoz köti a használatot. Ebben az üzleti modellben a termékeket, tartós használati eszközöket egy vagy több fogyasztó használhatja bérlettel vagy használat alapú fizetéssel. A modell a termék tartósságát és korszerűsíthetőségét a minél hosszabb ideig tartó teljesítmény és szolgáltatás nyújtásán keresztül kívánja elérni. A gyártó cég szempontjából a hangsúly nem a termék értékesítésen van, hanem a termék minél hosszabbideig tartó és megbízható teljesítményére alapozott szolgáltatáson. Az üzleti modell révén a termék tartóssága, újrahasználatossága és megosztása nem a cég növekedésére és termékértékesítésére negatívan ható kockázatos tényezők (angolul cannibalization), hanem az árbevételt növelő és a költségeket csökkentő hajtóerők kerülnek előtérbe. Vonzó lehet azon cégek számára, amelyek termékeinek működési költsége relatíve magas, és a karbantartásukhoz speciális szakértelemre van szükség. Számukra a versenylőny a szolgáltatás nyújtásában van, a terméket pedig a használat végén visszaveszik, amit azután korszerűsítve vagy újragyártva megint fel lehet használni.

A felsorolt utóbbi három körforgásos üzleti modell jelentős szinergikus kapcsolatot mutat a bioökonómiával és biomassza alapú gazdasággal, ezért a két koncepció integrációjáról beszélhetünk. Másként fogalmazva a körforgásos gazdaság az anyag és termék magas fokú újrahasznosításával és a hulladék minimalizálásával hozzájárul a biomassza étel- és nem étel-célú feldolgozásának maximális fenntarthatóságához.

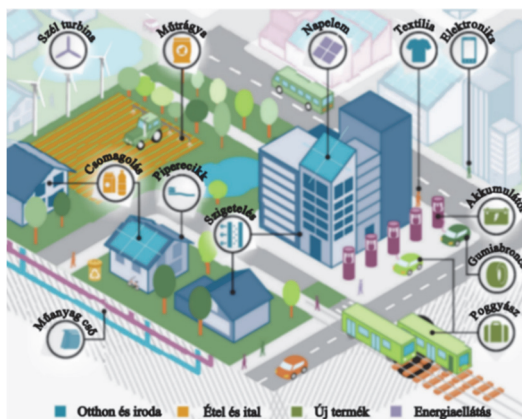
A biomassza alapú gazdaság kihívásai

A körforgásos biomassza alapú gazdaságra való áttérés nagy társadalmi változásokat igényel, elsősorban jogalkotás, az üzleti modellek és a fogyasztói magatartás területén. A vállalatok kiemelt szerepet játszanak, mivel képesek körforgásos biomassza alapú üzleti modelleket kifejleszteni, ezzel együtt pedig a termelési mintákat megváltoztatni. A vállalkozásoknak nem feltétlenül kell egyenként lezárniuk az erőforrás-hurkokat (körforgást), hanem más vállalattal együttesen is lezárhatnak egy-egy anyagkörforgást. A körforgásos gazdaság legfőbb előnyének a korlátok nélküli növekedés lehetőségét tekintik. A hosszútávú növekedés egyik alapfeltétele viszont a folyamatos technológiai fejlődés és innováció (Kerekes, 2022). Megfigyelhető, hogy számos pozitív vállalati kezdeményezés létezik támogató jogszabályi közegben, és növekvő fogyasztói érdeklődés is megfigyelhető a körforgásos biomassza alapú megoldások iránt.

Az egyik fontos szempont a körforgásos gazdaság létrehozásában a szűkös erőforrás, ezért a minimális energia- és anyagvesztéssel működő termelési rendszer kialakítása mellett a másik szempont a növekvő hulladék kezelése, amivel egyre kevésbé birkózik meg a társadalom. A körforgásos gazdasági modellben az anyagcsere-folyamatok zárt körben történnek, a hulladék szinte 100%-ban hasznosul, a biológiai, illetve technológiai alkotórészek veszteség nélkül visszakerülnek a körfolyamatokba. A kibocsátások 45%-a termékgyártásból ered, amiből az következik, hogy a fogyasztói szokások megváltoztatása elengedhetetlen. A lakosság lakhatási, táplálkozási és mobilitási szokásainak megváltoztatásával jelentős, akár 70%-os kibocsátás-csökkenés érhető el. A körforgásos modell elsődleges célja tehát az erőforrások körforgásban tartása a gazdasági folyamatokban, így a hulladék keletkezését szinte teljes egészében kizárja, miközben bevételnövelő és költségmegtakarítási előnyökkel is jár a vállalat számára. Időközben az is kiderült, hogy a fenntarthatóságot szolgáló üzleti modellek nemcsak ökológiai, hanem gazdasági szempontból is hatékonyabbak lettek, ezért a fenntartható növekedés szükséges eszközeként az EU-ban prioritást élveznek (Oláh - Popp, 2023).

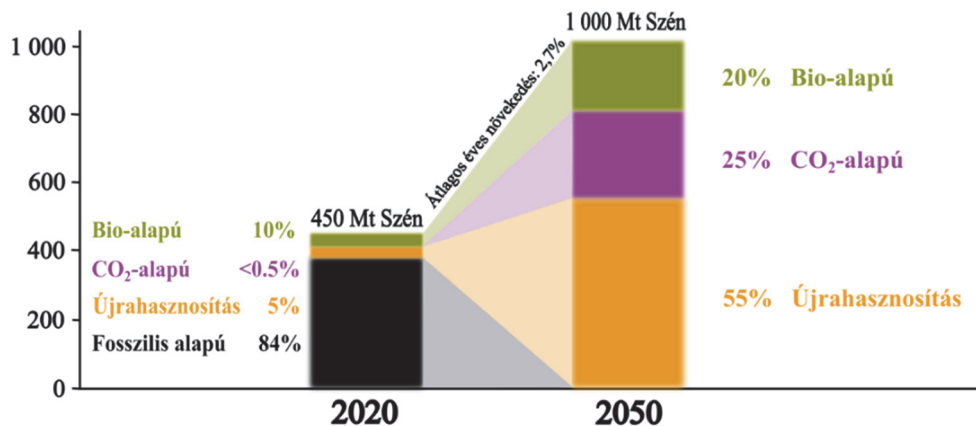
Az egyik legnagyobb kihívás a műanyagtermékek újrahasznosítása, illetve a bioműanyag előállítás. A műanyagok nem vagy nagyon nehezen bomlanak le, ezért korunk egyik legnagyobb környezeti fenyegetését jelentik, ráadásul túlnyomó része nem újrahasznosítható, sőt a hulladék nagy része a harmadik világban köt ki, ahol gödrökbe dobálják és elégetik. Nincs a világnak olyan pontja, amely mentes lenne a mikroműanyagoktól. A mikroműanyagok a talajvízbe kerülnek, így a növények öntözésére használt vízbe vagy ivóvízbe juthatnak, de a levegőben is található mikroműanyag, ami az emberi egészségre jelent komoly veszélyt. A globális műanyag hulladék mindössze 9%-át hasznosítják újra, sőt még ebben az esetben is jelentős mennyiségű mikroműanyag kerül a levegőbe és a vízbe. A szennyezés egyik fő oka, hogy a műanyag hulladékot többször is átmossák, de a legjobb szennyvízszűrők

sem képesek a 40 mikron és annál kisebb részecskék kiszűrésére, amikor az 5-10 mikron alatti műanyag darabok teszik ki a szennyezés döntő hányadát. Műszaki megoldásokkal sem tudjuk egyelőre megoldani ezt a problémát. Az egyetlen megoldás a műanyagok előállításának és felhasználásának csökkentése, illetve bioműanyagokkal történő helyettesítése (4. ábra).



4. ábra: A kemikália szerepe a modern társadalomban
 Forrás: Saját szerkesztés

Ma a vegyipari termékekben található szén csupán 10%-a származik biomasszából, de 2050-re ez az arány eléri a 20%-ot, míg a fennmaradó 80%-ot a CO₂-alapú szénforrás és újrahasznosításból származó szénforrás teszi ki (5. ábra). Ezzel párhuzamosan a kemikáliák előállításához szükséges biomassza mennyisége a globális biomasszatermelés 0,9%-áról mintegy 2%-ára nő 2020-2050 között (Kähler et al., 2021). Ez azt jelenti, hogy a szénforrás (kőolaj, földgáz és szén) föld alóli kitermelését a Föld felszínén (bioszféra) és a felszín felett (atmoszféra) található szénforrásokkal fogják helyettesíteni, beleértve a biomasszát is. Ma a mezőgazdasági termények (mezőgazdasági biomassza egy része) 2%-át hasznosítja a bioüzemanyagipar, ezáltal verseny alakult ki a bioüzemanyagipar által felhasznált termékekért az élelmiszer- és bioüzemanyagipar között, ami a termelői árak növekedéséhez vezetett. A biomassza alapú gazdaságban a biomassza szerepe a vegyipari ágazat mellett az energia-, közlekedési- és építőipari ágazatokban is nő (bioenergia, csomagolóanyag, bioműanyag, faalapú termékek stb.). A felsorolt ágazatokban egyre nagyobb arányban használnak fel biomasszát a bioalapú alapanyagok gyártásához, ezért ezen a területen várható a legtöbb innováció, már a közeljövőben.



5. ábra: A kemikáliák előállításához szükséges globális szénigény alapanyagának megoszlása 2020-2050 között

Forrás: Saját szerkesztés Kähler et al. (2021) alapján

A körforgásos biomassza alapú gazdaság ösztönzése

A körforgásos gazdaság alaplogikáját az EU Taxonómiarendelete határozza meg, hiszen a kedvezőbb finanszírozással és a jelentéstételi kötelezettségekkel teljes mértékben összhangban álló tevékenységeket fogják körforgásosnak tekinteni. A taxonómiai rendelet (2020/852) uniós jogszabály 2020. júliusában lépett hatályba. Küldetése a környezetileg fenntartható gazdasági tevékenységek meghatározása, és a tőkét elsősorban olyan tevékenységek irányába mozgatni, amelyek jelentősen hozzájárulnak az európai Zöld Megállapodás célkitűzéseéhez: klímaseglegesség, nulla szennyezés, a biológiai sokféleség megőrzése, körforgásos gazdaság és magas fokú energiahatékonyság. A tevékenység taxonómiájának összehangolását technikai átvilágítási kritériumokkal (Technical Screening Criteria: TSC) kell meghatározni – azokat a konkrét követelményeket és küszöbértékeket, amelyeket minden tevékenységnek teljesítenie kell a fenntarthatósági célkitűzés hozzájárulásához, miközben nem okoznak jelentős kárt másoknak. A TSC teljesítése továbbra is választható egyes vállalatok számára, de bárki profitálhat zöld teljesítményének javításából. Végül minden vállalkozásnak alkalmazkodnia kell a fenntarthatóbb munkamódszerekhez, amit sokan „zöld átmenetnek” tekintenek (European Commission, 2023b).

A termékek környezeti fenntarthatóságára vonatkozó egyértelmű és harmonizált szabályozási keret megteremti a szükséges feltételeket, hogy az uniós piacokon vásárló és értékesítő vállalatokat a körforgásos üzleti modell-innovációra ösztönözze. Mindez jelentősen bővítené az uniós fogyasztók számára előállított fenntartható termékek körét, ugyanis az ilyen termékek piaci részesedése ma még korlátozott, ami szintén befolyásolja megfizethetőségüket a fogyasztók számára. 2021-ben az energiafogyasztást

befolyásoló termékek környezettudatos tervezésére vonatkozó követelmények 120 milliárd euró összegű megtakarítást jelentettek a fogyasztók számára, még akkor is, ha beleszámítjuk a beszerzési költségeket (Európai Bizottság, 2022). A fenntartható termékek normává tétele a végső cél. A fenntartható termékek környezettudatos tervezéséről szóló rendelettervezet (Ecodesign for Sustainable Products Regulation, a továbbiakban: ESPR) a környezeti szempontból fenntarthatóbb és körforgásos termékekre vonatkozik. Meghatározza az egyes termékkategóriákra vonatkozó környezettudatos tervezési követelményeket a körforgásos jelleg, az energiahatékonyság és egyéb környezeti fenntarthatósági szempontok jelentős javítása céljából. A termékek előállításának módjára vonatkozó követelmények előírása mellett az ESPR keretet biztosít a termékek környezeti fenntarthatóságával kapcsolatos tájékoztatási követelmények meghatározásához. Az érintett terméktől függően ez magában foglalhatja az energiefelhasználásra, az újrafeldolgozott tartalomra, a veszélyes anyagok jelenlétére, a tartósságra, a javíthatóságra, a tartalék alkatrészek kínálatára és az újrafeldolgozhatóságra vonatkozó információkat (European Commission, 2023b).

A textilgyártás, a ruhák festéséből és gyártásából adódóan a globális vízszennyezés 20%-áért felelős, sőt becslések alapján évi 0,5 millió tonna mikroszál kerül a tengerekbe, óceánokba. A ruhák mosása során, a bennük lévő szintetikus anyagok miatt kerül a környezetbe az elsődleges mikroműanyagok 35%-a. Egy poliészterből készült ruha mosásakor mintegy 700 ezer darab mikroműanyag szál szabadul fel és kerül be akár az élelmiszerellátási láncba is. A fenntartható és körforgásos textíliák uniós stratégia azt a célt kívánja biztosítani, hogy a forgalomba hozott textiltermékek 2030-ig hosszabb élettartamúak, újrafeldolgozhatóak legyenek, és minél nagyobb arányban újrahasznosított/újrafeldolgozott szálakból készüljenek, illetve azokat veszélyes anyagoktól mentesen állítsák elő a munkavállalói jogok teljes körű tiszteletben tartása mellett. A „fast fashion” iparág népszerűségét csökkenteni szeretnék és a ruházati ágazatban is gazdaságilag jövedelmezővé szeretnék tenni az újrahasználati és javítási szolgáltatásokat annak érdekében, hogy a lakosság hosszabb ideig használja a megvásárolt ruhadarabokat. Ma a ruházati cikkek előállítására használt anyagok kevesebb, mint 1%-át hasznosítják újra, a legtöbb ruha szeméttégetőbe vagy hulladéklerakókba kerül. Az uniós tagállamoknak 2025. január 1-jéig létre kell hozniuk a háztartásokból származó textilanyagok elkülönített hulladékgyűjtési rendszerét (European Commission, 2023b). Az építési termékek felülvizsgálata lehetővé teszi, hogy az építési termékeket a legkorszerűbb technológiákkal tervezzék meg és gyártsák, hogy körforgásos modellben lehessen őket forgalomba hozni. Fontos célkitűzés, hogy ezen termékek is tartósabbak, javíthatók, újrahasznosíthatók legyenek, és hatékonyabban lehessen azokat újragyártani. A biomassa szerepe a fentebb említett ágazatokban is rohamosan nő.

Karbonköltség kiegyenlítő mechanizmus

Az EU-ban az Innovációs és Modernizációs Alap elősegíti az energiaszektor és az energiaintenzív ipari ágazatokat, hogy alacsony CO₂-kibocsátású technológiákra térjenek át. A rendszer legfontosabb eleme a CO₂-kibocsátási egységek (kvóták) ingyenes kiosztása az ETS-ben szereplő létesítmények számára: kvótánként egy tonna károsanyag-kibocsátásra jogosultak. Az ingyenes kvótakiosztás rendszerét meghosszabbítják, de az ingyenes kiosztásnál azokra az ágazatokra összpontosítanak, amelyeknél a legnagyobb a kockázata annak, hogy termelésüket az EU-n kívülre helyezik, így hozzájárulnak a szénszivárgás jelenségéhez. A szénszivárgásnak kevésbé kitétt ágazatok esetében az ingyenes kvótakiosztás 2026 után fokozatosan megszűnik. A szénszivárgás megakadályozása érdekében az ETS kiegészül a határmenti karbonköltség kiegyenlítő mechanizmusával (Carbon Border Adjustment Mechanism – CBAM), amely a vállalatok növekvő karbonköltségét, így az importtal szemben jelentkező csökkenő versenyképességét ellensúlyozza. Az importőrök többletköltsége megegyezik azzal, mintha a terméket belföldön állították volna elő, vagyis az import karbontartalma után megfizetik a mindenkorai karbonkvóta uniós piaci árát kvótavásárlással. Az importált fogyasztási cikkek karbonintenzitását ellensúlyozó mechanizmus (karbonadó) bevezetése a kibocsátásáthelyezés kockázatát csökkenti. A CBAM alkalmazásával megszűnik az ingyen kvóta kiosztás. Az ingyen kvóta és a villamos áram közvetett CO₂-kibocsátási költsége miatt az EU-ban versenyképességi hátrányt szenvednek el az érintett ágazatok, mert a CO₂-kibocsátás árát a termelési költségbe beépítik. A globális karbonvám bevezetése megakadályozza a szénszivárgást, mivel a karbonadó ellensúlyozza a termelési költségtöbbletet. A klímasemleges célkitűzés eléréséhez a CO₂-kibocsátás árának az előrejelzések szerint tonnánként 250-500 euróra kellene emelkedni a következő 30 évben (Verde, 2020).

Jelenleg a körforgásos gazdaságra történő átállás és a bevezetésre kerülő karbonköltség kiegyenlítő mechanizmus lehetőséget jelent a biomassza alapú gazdaságban az újabb innovációra, értékteremtésre és új fogyasztók megnyerésére. Ezzel párhuzamosan világszerte számos kormány tesz erőfeszítéseket a körforgásos gazdaságra történő átállás elősegítésére, mind támogatások, mind szabályozások formájában. A legnagyobb vállalatok számára pedig a körforgásos üzleti modell az új társadalmi felelősségvállalás (Corporate Social Responsibility: CSR), de ez a trend már nemcsak egy lehetőség, hanem követendő példa is. Ebbe az irányba mutat a növekvő fenntarthatósági szabályozások száma, amelyek egyre nagyobb arányban kötelező jellegűek lesznek.

Összefoglalás

Az innováció a munkatermelékenység egyik legfontosabb hajtóereje, amiben a szabadalmak, valamint védjegyek és formatervezési oltalmak számának növekedése különös szerepet játszik. A magyar innovációs ráfordítások folyamatosan emelkedtek, ugyanakkor 2022-ben csökkent a GDP arányában mért K+F-ráfordítás, az innovációs rendszer hatékonysága nemzetközi összehasonlításban továbbra is alacsony. Ez a mutató az EU-átlag 30%-a körül alakul. A magyar innovációs hatékonyságot nemzetközi összehasonlításban érdemi lemaradást mutat az uniós átlaghoz képest, a kutatás-fejlesztési ráfordítások egyre kevesebb szabadalmat képesek eredményezni, így a magyar arányszám már nem éri el a V4 átlagát sem.

A legnagyobb hátráltató tényező az innovációs rendszer töredezettsége, ugyanis egyrészt alacsony a tudástermelő és a többi ágazat termelési kapcsolatának mértéke, másrészt pedig magas a termelésbe kerülő tudásimport hányada. Mindez megnehezíti a tudástranzfer folyamatát, azaz az innovációs outputok növekedését. Az ország innovációs teljesítményének javát adó külföldi vállalatok innovációs ráfordításai nem növelik pozitív hozadékkal ezen cégek termelékenységét, emellett innovációs tevékenységük eredménye nagy valószínűséggel vállalatcsoporton belül marad érdemleges tovaggyűrűző hatás nélkül, ami a kkv-k alacsony innovációs teljesítményével párosul. A külföldi vállalatok innovációs tevékenységeiket globálisan optimalizálják, azaz térben és időben válogathatnak a különböző termelési egységeik között. A gyakorlatban a legtöbb innováció a kutatóhelyek falain belül marad, így nincs tovaggyűrűző (spillover) hatásuk, az aggregált innovációs output is gyengébb lesz. A Magyarországon működő multinacionális vállalatok K+F ráfordításai nem növelik pozitív hozadékkal a termelékenységet, sőt egyes vállalatok esetében kimondottan gyenge a kapcsolat a két változó között. 2021-ben került elfogadásra a 2021-2030-as időszakra vonatkozó magyar K+F stratégia, mely még nagyobb állami szerepvállalást vetít előre, továbbá célul tűzi ki az innováció eredményeinek nagyobb hasznosulását és önfenntartó, piaci alapú működési modellek létrejöttét. Az új stratégia hatása néhány év múlva kerülhet elemzésre.

Az együttműködési hajlandóságot befolyásolja az állami támogatások természete is, amelyekben döntően eszközfinanszírozás dominál a projektfinanszírozás helyett. A magyar vállalatok – hasonlóan a régiós országokhoz – főleg eszközvásárlásra költik a K+F forrásaikat, szemben az uniós vállalatokkal, ahol a kutatóhelyek jellemzően a működési költségeket igyekeznek finanszírozni. Az EU tagországaiban a külső források tekintetében jellemzően a brüsszeli központi források (például Horizont 2020) jelentik a finanszírozási alternatívát, amelyek elnyeréséhez határokon átnyúló együttműködések szükséges felmutatni, ezért az innovációs eredmények is könnyebben tudnak terjedni a nyugati EU tagállamokban.

Magyarországon a mezőgazdaság részaránya a GDP-ből 3,7%-ot, a foglalkoztatásból 4,9%-ot tett ki a 2017-2022 közötti időszak átlagában,

ugyanakkor a mezőgazdaság részaránya az összes állami K+F támogatásból 7,2%, az agrártudományokra eső összes állami és nem állami K+F ráfordítás az összes tudományág %-ban 5,7% volt a felújítások és a kutatóhelyekre nem bontható K+F-ráfordítások nélkül. Tehát a GDP és foglalkoztatás részesedéséhez képest a K+F ráfordítás magasabb volt a mezőgazdaságban és agrártudományokban, ennek ellenére lemaradásunk a fejlett országokhoz viszonyítva számottevően nem csökkent. A gyakorlatban a relatíve magas K+F ráfordítás nem hozott létre megfelelő mennyiségű és minőségű, a termelésben hasznosítható innovációt a mezőgazdaságban.

Az EU legfejlettebb mezőgazdasággal rendelkező tagországaihoz viszonyított lemaradás csökkentéséhez viszont elengedhetetlen a hazai mezőgazdaság tudás- és technológiaalapú modernizálása, annál is inkább, mert a termelés hatékonyságának növelése, a várhatóan mérséklődő uniós támogatás és a klímaváltozás által okozott egyre súlyosabb károk mellett óriási kihívás. Az innováció egyben a piac megtartásának feltétele is. Magyarországon agrárinnováció főleg a már bevált újdonságok átvételéről szól, ugyanakkor a friss ötletekből született innovatív megoldások is megtalálják a helyüket a hazai agrárszektorban a versenyképesebb, fenntarthatóbb és környezettudatosabb gazdálkodás érdekében.

A körforgásos gazdaság megvalósítása pozitívan hat a versenyképességre, az innovációra, serkenti a gazdasági növekedést, például új munkahelyeket teremt (2030-ig 700 ezer munkahelyet az EU-ban). A megbízhatóbb, újrafelhasználható, korszerűsíthető és javítható termékekre való átállás csökkenti a hulladék mennyiségét is. A magyar körforgásos gazdaság stratégiájának fő prioritási területe a biomassza- és élelmiszeripar, az építőipar és a műanyagipar. Az anyagfelhasználás korlátozása érdekében Magyarország növeli a K+F forrásokat, ösztönzőrendszer segítségével támogatja az innovációt, ökodesign, azaz környezettudatos tervezést, valamint a termékek megosztását és újrafelhasználását az erőforráshatékonyság javítás érdekében.

A magyar körforgásos stratégia kiemelt területe a biomasszaipar is. A bioökómia térhódításával egyre több biomasszát igényel a nem élelmiszer célú feldolgozás, például az energia-, közlekedési-, vegyipari- és építőipari ágazat. A biomassza alapú gazdaságban folyamatosan nő a mezőgazdaság nem élelmiszer célú – folyékony bioüzemanyag, biomassza alapú villamosenergia, bioalapú textil, bioalapú vegyszer, bioalapú gyógyszer, bioalapú műanyag és bioalapú gumi, fatermék és bútor – termelése, ezzel párhuzamosan a mezőgazdaság hozzáadott termelése (GDP) és az új munkahelyek száma. Úgy is fogalmazhatunk, hogy az innovációs forradalom küszöbén állunk.

Köszönetnyilvánítás

A 132805 számú projekt a Nemzeti Kutatási Fejlesztési és Innovációs Alapból biztosított támogatással, a K_19 pályázati program és a A TKP2021-NKTA-

32 számú projekt a Kulturális és Innovációs Minisztérium Nemzeti Kutatási Fejlesztési és Innovációs Alapból nyújtott támogatásával, a TKP2021-NKTA pályázati program finanszírozásában valósult meg.

Irodalom:

- Accace (2024): Tax Guideline for Romania, <https://accace.com/tax-guideline-for-romania/>
- Agroinform.hu (2023). MachineryGuide RTK AutoSteer robotkormány. https://www.agroinform.hu/aprohirdetes_adatlap/gep/agrarinformatika-gps/machineryguide-rtk-autosteer-robotkormany/h_7274756
- Chen, G., Herrera, A. M., Lugauer, S. (2022). Policy and misallocation: Evidence from Chinese firm-level data. *European Economic Review*, 149, 104260, <https://doi.org/10.1016/j.euroecorev.2022.104260>
- Circle Economy (2023). The circularity gap report 2023. 1-64., Amsterdam: Circle Economy, <https://www.circularity-gap.world/2023>
- Creaveg (2023). Creative. Conscious. Creaveg. <http://creaveg.eu/>
- Csath M., Nagy B. (2023). Innovációs sikerfeltételek a kis- és közepes vállalkozások (mkkv-k) körében. Pázmány Péter Katolikus Egyetem, Budapest, 376. p, ISBN: 9789633084540
- Digitális Jólét Program (2019). Magyarország Digitális Agrár Stratégiája 2019-2022. <https://digitalsjoletprogram.hu/files/24/2e/242e263bd2b441f6f30cf400e06e1e4a.pdf>
- European Commission (2023a). European Innovation Scoreboard 2023, Directorate-General for Research and Innovation, Hollanders, Hugo, Publications Office of the European Union, 2023, <https://data.europa.eu/doi/10.2777/119961>
- European Commission (2023b). Implementing and delegated acts - Taxonomy Regulation, https://finance.ec.europa.eu/regulation-and-supervision/financial-services-legislation/implementing-and-delegated-acts/taxonomy-regulation_en
- Európai Bizottság (2022). A Bizottság (EU) 2022/1214 felhatalmazáson alapuló rendelete (2022. március 9.). Az (EU) 2021/2139 felhatalmazáson alapuló rendeletnek egyes energiaágazatbeli gazdasági tevékenységek tekintetében, valamint az (EU) 2021/2178 felhatalmazáson alapuló rendeletnek az ezekre a gazdasági tevékenységekre vonatkozó különös közzétételek tekintetében történő módosításáról (EGT-vonatkozású szöveg). Az Európai Unió Hivatalos Lapja, L 188/1, <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/HU/TXT/?uri=celex%3A32022R1214>
- Global Footprint Network (2023). Ecological Footprint, <https://www.footprintnetwork.org/our-work/ecological-footprint/>
- Huminsz (2023). Növénykondicionálás és növénytáplálás. <https://huminsz.hu/>
- HUMIN AQUA (2023). huminsav alapú termesztési rendszer. <https://huminaqua.hu/>
- hvg.hu (2022). Egy ikeás doboztól jutottak el egy hipermodern belvárosi pincefarmig, mára sэфeknek szállítanak zöldsegeket, https://hvg.hu/zhvg/20220617_bedrockfarm_vertikalis_farm
- Innovációs és Technológiai Minisztérium (ITM), Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Hivatal (NKFIH) (2021). Magyarország kutatási, fejlesztési és innovációs stratégiája 2021-2030. <https://nkfi.gov.hu/hivatalrol/strategia-alkotas/kutatasi-fejlesztési-innovacios-strategia>

- issuu (2023). Velünk új megvilágításba kerül a világ. https://issuu.com/agronaplo/docs/2020_ismert_termek_az_allattenyesztesben/s/11274269
- Kerekes S. (2022). A körkörös gazdaság és megvalósításának néhány kőszegi tapasztalata. In: Catherine R. Feuerverger (szerk): A Gazdaságföldrajzi és Településmarketing Központ 2022. évi kutatásai tanulmánykötet, Magyar Gazdaságföldrajzi és Településmarketing Műhely elektronikus tanulmánykötet sorozat 4., ISSN: 2939-516X, ISBN: 978-615-6435-20-0, Kiadó: Neumann János Egyetem MNB Tudásközpont Gazdaságföldrajzi és Településmarketing Központ, Kecskemét, https://start.uni-neumann.hu/telemarket/kiadvanyok/2022-4/01_Feuerverger_Eloszo_Tartalom.pdf
- Kähler, F., Carus, M., Porc, O., vom Berg, C. (2021). Turning off the Tap for Fossil Carbon: Future prospects for a global chemical and derived material sector based on renewable carbon. *Industrial Biotechnology*, 17(5), 245-258. <https://doi.org/10.1089/ind.2021.29261.fka>
- Kovács, T.Z., Bittner B., Nagy A., Nábrádi A. (2022). Digital Transformation of Human Capital in the EU According to the DESI Index. *Issues in Information Systems*, 23(4), 293-311. https://doi.org/10.48009/4_iis_2022_125
- Kovács, T. Z., David, F., Nagy, A., Szűcs, I., Nábrádi, A. (2021). An Analysis of the Demand-Side, Platform-Based Collaborative Economy: Creation of a Clear Classification Taxonomy. *Sustainability*, 13(5), 2817, 1-20. <http://doi.org/10.3390/su13052817>
- KSH (2023a). Helyzetkép, 2022 – Kutatás-fejlesztés, Összefoglaló táblák (STADAT), Tudomány és technológia, <https://www.ksh.hu/stadat?lang=hu&theme=tte>, <https://www.ksh.hu/stadat/files/tte/hu/tte0001.html>
- KSH (2023b). Magyarország számokban 2022- Központi Statisztikai Hivatal, https://www.ksh.hu/docs/hun/xftp/idoszaki/mosz/mosz_2022.pdf
- KSH (2023c). Az állami költségvetés K+F-előirányzatából kifizetett pénzüsszegek (GBARD) társadalmi gazdasági célok szerint [millió forint]. <https://www.ksh.hu/stadat/files/tte/hu/tte0002.html>
- Living Foods (2023). LIVING FOODS: Az egészség még sosem volt ilyen finom. <https://livingfoods.hu/>
- Manelici, I., Pantea, S. (2021). Industrial policy at work: Evidence from Romania's income. <https://doi.org/10.1016/j.euroecorev.2021.103674>
- Miskolci Egyetem (2023). Innovatív megoldások a felszín alatti vízkészletek fenntartható hasznosítása érdekében. https://www.hidrotanszek.hu/files/15268/V%C3%89GLEGES_Innoviz_2021_210x20_0_48o_HU_OK_Screen.pdf
- MNB (2022). Termelékenységi jelentés. Magyar Nemzeti Bank, ISSN 2732-3889, <https://www.mnb.hu/letoltes/termelekenysegi-jelentes-2022-julius.pdf>
- okosfarm (2023). Mi az OkosFarm? <http://okosfarm.com/hu>
- Oláh J., Popp J. (2023). Körforgásos gazdaság - üzleti modellek. Szaktudás Kiadóház Zrt., Budapest, 1-122., ISBN: 978-963-575-117-4
- PigBrother (2023). Hatékonyságnövelő szoftvercsalád sertésfarmok számára. <https://pigbrother.hu/index.html>
- Popp J., Oláh J. (2022). Kihívások: Az Európai zöld megállapodás hatása a körforgásos bioökonómiára az EU-ban, *Gazdálkodás*, 66(5), 444-453. https://doi.org/10.53079/GAZDALKODAS.66.5.t.pp_444-453

- Szigeti C., Szegedi K., Győri Zs., Körtvési D. (2022). Körforgásos modell a divatiparban. *Polgári Szemle*, 18(1-3), 98-112., <https://doi.org/10.24307/psz.2022.1108>
- Takács, Z. (2022). 100 magyar agrárinnováció 2022. Sprinter Plusz kft. ISSN 2786-4456, <https://www.mnvh.hu/sites/default/files/2022-04/100%20Magyar%20Agrar%20Innovacio%202022.pdf>
- Tan, E. C., Lamers, P. (2021). Circular bioeconomy concepts—a perspective. *Frontiers in Sustainability*, 2, 701509, 1-8. <https://doi.org/10.3389/frsus.2021.701509>
- TERMÉKmix (2013). Growberry: Ipari növénytermesztés termőföld nélkül, <https://termekmix.hu/magazin/innovacio/4132-growberry-ipari-novenytermesztes-termofold-nelkul>
- Tóth Sz., Bittner B., Kovács T., Nagy A. (2022). Digital Transformation Possibilities in Public Transportation in Debrecen. *Issues in Information Systems*, 23(3), 305-319. https://doi.org/10.48009/3_iis_2022_125
- Yousuf, A., Lorestani, V. Z., Oláh, J., Felföldi, J. (2021). Does uncertainty moderate the relationship between strategic flexibility and companies' performance? evidence from small and medium pharmaceutical companies in Iran. *Sustainability*, 13(16), 9157, 1-17. <https://doi.org/10.3390/su13169157>
- Yousuf, A., Kozlovskiy, S., Leroux, J. M., Rauf, A., Felföldi, J. (2022). How does strategic flexibility make a difference for companies? An example of the Hungarian food industry. *Problems Perspective in Management*, 20, 374-386. [http://dx.doi.org/10.21511/ppm.20\(3\).2022.30](http://dx.doi.org/10.21511/ppm.20(3).2022.30)
- Verde, S. F. (2020). The impact of the EU emissions trading system on competitiveness and carbon leakage: the econometric evidence. *Journal of Economic Surveys*, 34(2), 320-343. <https://fsr.eui.eu/publications/?handle=1814/66267>
- Vitajó (2023). Cipók, Péksütemények. <https://vitajo.hu/>
- Water&Soil Kft. (2023). Water Retainer (VízŐr) <https://waterandsoil.eu/>

Záró gondolatok

Balázs Ervin, Sági László, Rádi Feríz

A XX. és XXI. század tudományos fejlődése a világgazdaság minden területén mélyreható átalakulásokat indukált, ami a hazai agrárgazdaság permanens átalakulásához is vezet. Ma, amikor a Föld népességének sosem látott növekedése a szemünk előtt zajlik, elkerülhetetlenné vált a természeti erőforrások tudatos és fenntartható kiaknázása. Kiemelt célként fogalmazható meg, hogy kiváló minőségű élelmiszer álljon rendelkezésre amellett, hogy mezőgazdasági termelés sokféle ipari alapanyagot is előállít. Jelen tanulmány azon alapvető, a mezőgazdaságot meghatározó tartóoszlopok innovációs kérdéseit dolgozza fel, amelyek a precízió, a digitalizáció és a fenntarthatóságon alapulnak.

A növénytermesztésben az elmúlt évszázadok során számos jelentős technológiai újítást vezettek be, mint például a talajaink termőképességét biztosító fizikai és tápanyagutánpótlási módszereket, a vetőmagok csávázását vagy növényvédelmének széleskörű alkalmazását. A Mendeli öröklődési összefüggések megértése, később a hibridhatás jelenségének tudatos felhasználása átalakította a növénynevelést. A felfedezések eredményei mennyiségi termésnövekedést biztosítottak. A kutatások gyakran arra is rámutattak, hogy a mezőgazdaságunkat nem szabad a természetes ökoszisztémáinktól elszakítani. A tartóoszlopoknak az ökológiai szempontokat messzemenően figyelembe vevő fenntarthatóság és innováció közös talaján kell álljanak.

A talaj élelmezésbiztonságunk egyik gerincét alkotja. Ez a közeg a növények éléskamrájaként működik, tárolja és körforgásban tartja az alapvető tápanyagokat és ásványi anyagokat, amelyekre a növényeknek szükségük van. Szerkezetének köszönhetően, a talaj oxigént biztosít a növények gyökerei számára, valamint a talajban élő egyéb élőlényeknek. A víztárolási feladata mellett hasznos mikrobák élőhelyeként is szolgál. Ezek az organizmusok gyakran a növények kulcsfontosságú szimbiotái, központi szerepet játszanak a szerves anyagok lebontásában, a nitrogén megkötésében, a tápanyagok hozzáférhetőségének fokozásában és a termőrétegben terjedő betegségek elfojtásában. A talaj kiszűri a felszíni vizekből a lebegő üledéket, bizonyos vegyi anyagokat és más szennyeződéseket. Ezért a felszín alatti vizek sokszor a legtisztább vízforrásaink.

A mezőgazdasági műveletek kimeríthetik, de gazdagíthatják is a talajt, amely nem, vagy csak feltételesen megújuló, illetve megújítható természeti erőforrás. A művelésbe vont földterületeink megújulásának alapvető feltétele az olyan földhasználat megteremtése, ami egyensúlyban van a térség természeti adottságaival. A korszerű talajvédelmi módszerek, megvédik a

termőföldet az eróziótól, javítják a szerkezetét és növelik a szervesanyag-tartalmát továbbá ezen keresztül a közeg termékenységét. Hatalmas jelentősége ellenére, a talaj az iparosodás, a városiasodás és a nem fenntartható mezőgazdasági gyakorlatok miatt számos fenyegetéssel néz szembe. A talajerózió, a szikesedés, a tömörödés és a szerves anyag elvesztése széles körben elterjedt, ismert problémák. A fenntartható mezőgazdaság megteremtéséhez ezeket a jelenségeket korszerű módszerekkel, új innovációkkal kell kezeljük.

A gondos gazdálkodók mindig szem előtt tartották, hogy a művelésbe vont termőföld a lehető legjobb állapotban szolgálja az adott kultúrnövényt. A Kárpátok ölelte terület geográfiai adottságainak köszönhetően biztosít akár 25 millió embernek magas minőségű élelmiszert. Ehhez igen nagymértékben járulnak hozzá a nemzetközi, de elsősorban a hazai génbankok. Stratégiai és nemzetszuverenitási érdek, hogy a hazánk éghajlati körülményeihez évszázadok óta alkalmazkodó, magyar szellemi terméként továbbfejlesztett genetikai anyagok biztosítsák agráriumunk hatékony működését. Ezen felbecsülhetetlen biológiai erőforrás egyre tudatosabb kiaknázása a mezőgazdasági tudományok elmúlt évszázadának fejlődését mutatja.

A múlt század hatvanas éveinek biokémiai és később molekuláris biológiai felfedezései nagymértékben járultak hozzá ahhoz, hogy az egyre növekvő lakosság élelmiszerellátása hatékonyabbá váljon. Az örökítő anyag, a DNS szerkezetének modellje, majd az azon alapuló kutatások elvezettek a molekuláris biológia forradalmához. Az első sikeres génátviteli kísérletek egyrészt bizonyították, hogy a különböző tulajdonságok más élő szervezetben is megnyilvánulhatnak, másrészt megalapozták a transzgenikus (GM) technológia alapjait, amre számos gazdaságilag fontos növény sikeres fejlesztése épül. Napjainkban egy új, még korszerűbb nemesítési technológia került középpontba. Míg a genetikailag módosított szervezetekbe idegen szervezetből származó géneket, génszakaszokat építenek be a kutatók, a génszerkesztés (NGT1) során már csak célzott báziscserét hajtanak végre a növények saját génállományát felhasználva. A génszerkesztés nem szabadalmaztatható technológia és idegen gén átvitele sem történik a folyamat során, így két olyan fontos ellenérv kűszöbölődik ki, ami központi gátja volt a GM technológia mezőgazdasági alkalmazásának Európában. A génszerkesztést és génterápiás módszereket már rutinszerűen alkalmazzák a humán gyógyászatban, számos emberi életet mentve meg nap mint nap. A gerincvelői izomsorvadás, a retinális disztrófia, a béta thalasszémia, vagy a sarlósejtes vérszegénység hamarosan a múlt betegségeivé válhatnak a technológiának köszönhetően.

A növénynemesítésben a génszerkesztés egy precíziós nemesítési technológiának számít, ahol a természetes, autonóm evolúciós folyamatokat indukálva, felgyorsítva fejlesztik tovább az adott növényfajt. A fejlesztés eredményeként kapott növények a természetben maguktól is bármikor kialakulhatnak, így az ökológiai kockázat jelentősen csökken.

A korszerű és modern mezőgazdaság létrejöttéhez többek között olyan műszaki fejlesztések is hozzájárulnak, mint a precíziós gazdálkodás, és

az agrárdigitalizáció. Az önjáró, műholdas kapcsolatban irányított munkagépek megváltoztatták napjaink mezőgazdaságát. Az egyre szélesebb körben összegyűjtött és kiértékelt adatok által olyan döntéshozatali lehetőségek kerültek a gazdálkodók kezébe, amelyek a precíziós növénytermesztéshez és állattenyésztéshez ma már elengedhetetlenek. Az automatikus technológiák irányította repülő szerkezetek, közismerten drónok, a tudatos környezetkímélő agrotechnika kapuját nyitják meg. Az optimalizált és hatékony tápanyag- és növényvédő szer kijuttatása alapvető feltétele a fenntartható és környezetkímélő mezőgazdaságnak.

Napjainkban az állattenyésztésben is kiemelkedő szerepet kap az egyedekre kidolgozott takarmányozás biztosítása: tejelő szarvasmarhák esetében például a precíziós növénytermesztéshez hasonlóan központi figyelmet érdemel a minél szélesebb körű adatgyűjtés és -értékelés a maximális laktáció eléréséhez.

A biológiai sokféleség fenntartása a mezőgazdasági ökoszisztémákban ma már alapvető célkitűzés. Az alternatív ökológiai gazdálkodás olyan megoldást nyújt erre a kérdésre, ami a természetből kikerült növényfajták, állatfajták ismételt gazdálkodásba vonásával színesíti a mezőgazdasági termelést. Az élelmiszerbiztonsági kutatások eredményeinek alkalmazása a biztonságos bio-ipart támogatja.

A tudásalapú beruházások egyik legszemléletesebb példája az úgynevezett „Okos Élelmiszerek”. Az okos élelmiszereknek szakmai és erkölcsi normáknak is meg kell felelniük egyszerre. A termék legyen tudományosan tervezett, finom és teljes értékű, valamint kedvező élettani hatású, ami ténylegesen kimutatható a fogyasztás révén. Az előállítás során a környezetterhelés csökkenjen, a fenntarthatóság, az ökológiai lábnyom csökkentése központi szerepet kell játsszon. Ha ezek a szempontok együttesen érvényesülnek, abból automatikusan következik az etikai normának való megfelelés is. Az agrárinnováció a precízió és a digitalizáció korszerű eredményei együttesen szolgálják a fenntartható és környezetbarát agrárgazdaságot.

Egy ország működő innovációs rendszerét jól példázza, hogy a K+F ráfordítások, milyen hatékonysággal képesek új tudást, új szabadalmakat és új tanulmányokat létrehozni.

Az innováció a munkatermelékenység egyik legfontosabb hajtóereje, amiben a szabadalmak, valamint a védjegy és formatervezési oltalmak számának növekedése kiemelkedő szerepet játszik. Az innováció szoros összefüggésben van a gazdasági eredményekkel, így a nemzeti szellemi termékek folyamatos fejlesztése nélkülözhetetlen egy jól működő gazdaságban.

Szerzők

HUN-REN Agrártudományi Kutatóközpont

Divéki Zoltán PhD

HUN-REN Agrártudományi Kutatóközpont Mezőgazdasági Intézet

Balázs Ervin, az MTA tagja

Árendás Tamás PhD

Fodor Nándor PhD

Mikó Péter PhD

Sági László PhD

HUN-REN Agrártudományi Kutatóközpont Talajtani Intézet

Pásztor László DSc

Rajkai Kálmán, az MTA tagja

Rékási Márk PhD

Szabó Brigitta PhD

Takács Tünde PhD

HUN-REN Szegedi Biológiai Kutatóközpont

Venetianer Pál, az MTA tagja

Magyar Agrár- és Élettudományi Egyetem Élelmiszertudományi és Technológiai Intézet

Friedrich László Ferenc PhD

Jónás Gábor PhD

Kovács Zoltán PhD

Mohácsiné Farkas Csilla PhD

Nguyen Duc Quang PhD

Magyar Agrár- és Élettudományi Egyetem Élettani és Takarmányozási Intézet

Halas Veronika PhD

Kovács Melinda, az MTA tagja

Szendrő Zsolt, az MTA tagja

**Magyar Agrár- és Élettudományi Egyetem
Genetika és Biotechnológia Intézet**

Bánfalvi Zsófia DSc
Gócza Elen, az MTA tagja
Havelda Zoltán DSc
Kiss András PhD
Olasz Ferenc PhD

Neumann János Egyetem

Oláh Judit DSc
Popp József, az MTA tagja

Pannon Genetic Kft.

Rádi Feríz PhD

Soproni Egyetem Erdőmérnöki Kar

Mátyás Csaba, az MTA tagja

**Széchenyi István Egyetem
Albert Kázmér Mosonmagyaróvári Kar**

Ambrus Bálint PhD
Neményi Miklós, az MTA tagja
Teschner Gergely PhD

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Ezúton kívánok köszönetet mondani a kötet szerzőinek a magas tudományos színvonalon, de ugyanakkor közérthetően megírt fejezetekért.

Köszönöm Nagy Gabriella technikai szerkesztő lelkiismeretes munkáját és Bajzáth Judit borítóterveit.

Nagyon köszönöm az Innovatív Mezőgazdasági Biotechnológiáért Egyesület támogatását a kiadvány megjelentetéséhez, hozzájárulva ahhoz, hogy a társadalom szélesebb rétegei is tájékozódhassanak az agrárinnovációt előremozdító tudományos eredményekről.

Balázs Ervin
projektvezető

