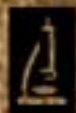


HOGYAN SEGÍTHETIK A MIKROBÁK A FÖLD ÉLELMISZER-ELLÁTÁSÁT

• Az Amerikai Mikrobiológiai Akadémia beszámolója

HOW MICROBES CAN HELP FEED THE WORLD

A REPORT FROM THE AMERICAN ACADEMY OF MICROBIOLOGY



AMERICAN
SOCIETY FOR
MICROBIOLOGY



ELŐSZÓ

Az ENSZ Világélelmezési Programjának becslése szerint a Föld több mint 870 millió lakosa alultáplált, köztük rengeteg a gyermek. A fejlődő világban ez az alultápláltság évente 2,6 millió gyermek halálához vezet és hatból egynek korához képest abnormálisan alacsony a testsúlya. Miközben az élelmiszerre egyre nagyobb mennyiségben van szükségünk, a termőföld és azok megműveléséhez szükséges erőforrások, mint a műtrágya és a víz csak korlátozottan állnak rendelkezésünkre, ezen kívül a szikesedés és a klímaváltozás miatt sok termőterület válik művelésre alkalmatlanná. Ahhoz, hogy a Föld 2050-re 9 milliárdosra duzzadó népességét elegendő élelmiszerral el lehessen látni, a mezőgazdaságnak 70-100%-kal többet kellene termelnie.

Egy adott növény terméshozama még egy régió belül is a különböző földeken nagy szórást mutat. Az agrárszakemberek ezt „terméshozam-hiánynak” (yield gap) nevezik. Ez az a különbség, ami az adott terméshozam és az elérhető legnagyobb hozam között van. Elméletileg, ha a terméshozam-hiány (más szóval kiesés) megszüntető lenne, vagyis minden gazda a legnagyobb elérhető hozamot produkálná, akkor a Föld mezőgazdasági termelékenységé 45-70%-kal emelkedhetne. A terméshozam-hiány gyakran magyarázható az elégtelen trágyázással/műtrágyázással, vízhiánnyal illetve kártevők vagy betegségek pusztításával, de a mértékelt műtrágyázás, öntözés és vegyszerezés nem csak gazdaságtalan, de számos negatív hatása lehet a környezetre. A manapság folytatott intenzív mezőgazdaságban pedig a további hozamnövelés hagyományos módszerekkel már nehezen biztosítható.

**TÖBB ÉLELMISZERT
TERMELNI KEVESEBB
ERŐFORÁS FELHASZ-
NÁLÁSÁVAL. EZ EL-
SŐRE TÚL SZÉPNEK
HANGOZHAT, HOGY
IGAZ LEGYEN, DE A
VILÁG GAZDÁI SOK
MILLIÁRD SEGÍTŐRE
LELHETNEK, HOGY
ELÉRJÉK EZT A
NAGYRATÖRŐ CÉLT,
EZEK A SEGÍTŐK
PEDIG NEM MÁSOK,
MINT A MIKROBÁK.**

Több élelmiszert termelni kevesebb erőforrás felhasználásával. Ez elsősorban túl szépnek hangozhat, hogy igaz legyen, de világ gazdái sok milliárd segítőre lehetnek, hogy elérjék ezt a nagyratörő célt, ezek a segítőik pedig nem mások, mint a mikrobák.

2012 decemberében az Amerikai Mikrobiológiai Akadémia összehívott 26, a növények és a mikrobák kölcsönhatásainak vizsgálatában jártas szakértőt, hogy megvitassák, hogyan segíthetik a mikrobák a világ élelmiszer-ellátását. Ez a szakértőgárda a tudomány különböző területeit képviselte: voltak kutató-fejlesztők, akik új technológiákat vezetnek be és alkalmaznak fejlődő országokban, részt vettek a mikrobiális termékeket gyártó cégek képviselői, illetve a területen illetékes rendeletalkotók is. A konferencia két napja alatt a résztvevők számos növény-mikroba-kölcsönhatást vizsgáltak meg. Egy általános elvet alkottak arról, hogy ezeket milyen módon lehet a gyakorlatba átültetni, ezzel felhajtva a mezőgazdaság produktivitását, közben szem előtt tartva a takarékosságot és a környezet védelmét. Az ő meglátásaikat taglalja ez a beszámoló. Az Amerikai Mikrobiológiai Akadémia köszönetét fejezi ki a Nemzeti Tudomány Alapítványnak és az Egyesült Államok Mezőgazdasági Minisztériuma Élelmiszeripari és Mezőgazdasági Intézetének ezért a lehetőségért.



BEVEZETÉS

A mikrobák már most is nagyban hozzájárulnak a világ élelmiszer-ellátásához, nélkülük valójában nem is létezhetnének sem növények, sem állatok, minthogy az egész földi élethez elengedhetetlen a mikrobák hasznos tevékenysége. A biológusok egyre több példán mutatják be, hogy minden többsejtű organizmus, a tengeri szivacsoktól a természeteken át az emberig rendelkezik egy - az evolúció során kialakult - közvetlen függőséggel bizonyos rá jellemző mikrobáktól. A növények számára, amik természetüknél fogva sebezhetőek, révén hogy nem tudják megváltoztatni közvetlen környezetüket, a mikrobák „szolgáltatásai” kulcsfontosságúak. A természetes, emberi beavatkozásoktól mentes környezetükben minden növényt támogat egy hatalmas, láthatatlan világ, benne baktériumokkal, vírusokkal és gombákkal, amik a gyökérzetben, szárban, levelekben, magokban, virágporban, virágokban, termésekben és ezek körül élnek. Ehhez hozzáteendő az az összetett és sokszínű mikroba-kolónia, ami a bogarak, madarak, gerinctelenek és egyéb állatok révén kerül kapcsolatba a növényvilággal. Ezeknek az egymásba fonódó, kölcsönösen függő társulásoknak mély evolúciós gyökerei vannak, amik egészen a többsejtű élőlények eredetéig, a növények és állatok felemelkedéséig mutatnak vissza. Összegezve tehát, a mikrobákban rejlő sokféleség és rengeteg adottság elképesztő távlatokat nyithat a mezőgazdaságban.

A mikrobák több fronton is segítik a növényeket; hozzáférhetővé teszik a tápanyagokat, fokozzák a gyökérzet növekedését, semlegesítik a földben jelenlévő vagy bekerülő mérgező anyagokat, támogatják az ellenálló-képességet a betegségekkel, hősokkal, szárazsággal és belvízzel szemben, továbbá távol tartják a patogéneket és a kártevőket. A mikrobák és a növények szoros szimbiózisban élnek életük szinte minden szakaszában.

Hogyan lehetséges az, hogy növények nőnek a Yellowstone Nemzeti Park égetően forró talajában? Hogyan élnek túl a növények a sivatagban? Áradások idején hogyan élnek túl szárazföldi növények heketet víz alatt? Hogy képesek nőni ott, ahol sós és nehézfémekkel szennyezett a talaj, vagy éppen ott, ahol minden tápanyagban szegény? A válasz minden esetben az, hogy mikrobák segítségével képesek a növények leküzdeni ezeket a környezeti kihívásokat. Már régen leírták a növények és mikrobák szimbiózisának rengeteg fajtáját, de manapság is folyamatosan találnak új példákat ezekre a jelenségekre. Az utóbbi időben erősödött az a felismerés, hogy ezek a kapcsolatrendszerek sokkal kiterjedtebbek és fontosabbak, mint ahogy azt ezelőtt gondolták. Az elmúlt 20 évben halatlatlan mértékben fejlődtek azok a technológiák, amik segítségével lehetőség nyílik az összetett mikroba-növény-társulásokban zajló folyamatok feltárására, azok pontos mechanizmusainak megismerésére.

**A MIKROBÁK
ÉS NÖVÉNYEK
SZOROS
SZIMBIÓZISBAN
ÉLNEK ÉLETÜK
SZINTE MINDEN
SZAKASZÁBAN.**



A MIKROBÁK ÉS A MEZŐGAZDASÁG SZOROS KAPCSOLATA

A mikrobák és a növények együttélésével kapcsolatos növekvő ismereteink komoly ráhatással lehetnek a mezőgazdaságra. Amikor az ember több ezer évvel ezelőtt növényeket és állatokat házasított, még semmit nem tudott arról, hogy azok milyen mikrobákkal élnek szimbiózisban, és hogy ez a kapcsolat a növények és állatok egészséges fejlődéséhez elengedhetetlen. Világszerte számos búza-, kukorica-, rizs- és egyéb gabonafajt telepítettek olyan földbe, ahol más volt a mikroflóra, mint a faj eredeti termőhelyén vagy ahol új környezeti körülmények fogadták. Az adaptációhoz pedig más mikrobák jelenlétére lett volna szükséges, mint amik az új termőhelyen jelen voltak. Eleddig hagyományos nemesítést, génmódosítást, öntözést és kémiai kezeléseket (műtrágyázást, rovarirtókat) használtak, a változatos területeken meghonosított növényeknek terméshozamának fokozása érdekében. A mikroflóra optimalizálása egy teljesen új megközelítése a produktivitás növelésének, sőt tulajdonképpen pont az ellentéte annak a bánásmódnak, ahogy régen, tévesen betegségek okozójaként kezelték és válogatás nélkül irtották a mikrobákat.

Néhány hasznos mikrobát már régóta ismernek, például a hüvelyesek gyökérzetében kolonizálódó rhizóbiumokat, melyek hasznosítható nitrogénnel látják el a gazdanyövényt, ahogy azt már Martinus Beijerinck, holland biológus 1888-ban leírta. (Beijerinck sokkal kevésbé híres, de hasonlóan kiváló tudós volt, mint a kortársaként tevékenykedő Koch vagy Pasteur. Szintén az ő nevéhez fűződik több szulfát-redukáló baktérium és vírus felfedezése.) Olyan jelenségeket is megfigyeltek a földművesek, hogy egy adott betegség sokkal ritkábban fordult elő az egyik földön, mint egy másikon. Ez inspirálta azokat a kutatásokat, amik később elvezettek a megállapításhoz: a „betegség-elnyomást” élő szervezetek okozzák. Még mielőtt azonosították volna a felelős mikrobákat, a földművelők már elkezdték áthordani a termőföldet egyik szántóról a másikra, hogy kihasználják ezt a mikrobák nyújtotta védelmet.

Az utóbbi tíz évben hatalmasat lépett előre a tudomány eme rendkívüli sokféleséget mutató mikrobavilág leírásának területén; elkezdődött a növények és a környezetükben élő más növények, rovarok, legelő állatok, gerinctelenek és mikrobák közti bonyolult kommunikációs és kooperációs kapcsolatrendszer kibogozása és az ebben résztvevő molekuláris szintű mechanizmusok meghatározása. Ezen felfedezések eredményeit már ma is alkalmazzák a gyakorlatban, elősegítve a növények egészséges növekedését és fokozva a terméshozamot. Mindemellett az ismert, de eddig mesterségesen nem reprodukált növény–mikroba-együttműködések még témérdek lehetőséget rejtene magukban. Pusztán az a tény, hogy a legfontosabb haszonnövényeinket anélkül nemesítik és termesztik, hogy odafigyelnének arra, hogy milyen ősi mikrobiális környezetben éltek eredetileg, önmagában forradalmi eredményekkel kecsegtetheti azokat, akik változtatnának ezen a gyakorlaton. A mezőgazdasági folyamatok és termékek számát tekintve a produktivitás növelésére szolgáló gazdaságosan megvalósítható és környezetbarát eszközök tárháza a mikrobák révén szinte végtelennek tűnik, függetlenül attól, hogy milyen növényről és környezetről van szó.



MARTINUS BEIJERNICK

Habár a tudomány még csak a felszínét kapargatja ennek a témának, tanulmányunk számos példát bemutat arról, hogy a mikrobák milyen szerepet játszanak a növények egészségének megtartásában és, hogy hogyan segítenek növelni a terméshozamot. Bár a tanulmány hangsúlyosan foglalkozik azzal a hatalmas ösztársadalmi haszonnal, amit egy mikrobákat alkalmazó mezőgazdaság hozhat, de ez az aspektus talán még több figyelmet és befektetést érdemelne.

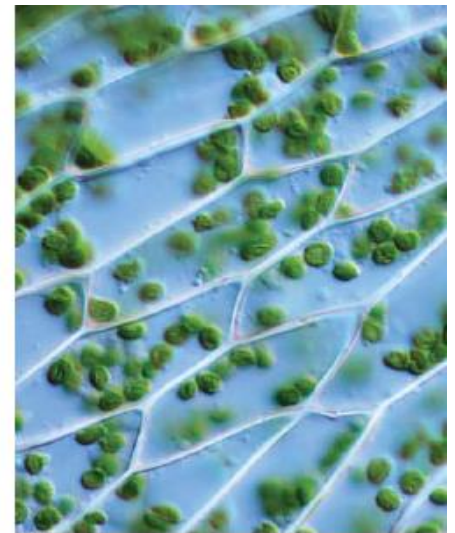


MIÉRT VAN SZÜKSÉGÜK A NÖVÉNYEKNEK MIKROBÁKRA?

A NÖVÉNYBI- OLÓGIA GYA- KORLATILAG MINDEN APRÓ SZELETE ÉRINTETT A MIKROBÁK- KAL VALÓ KÖLCSÖNHA- TÁSBAN.

Egy kukoricanövényre vagy egy almafára gondolva egyszerűnek tűnik összeírni azt a listát, ami az egészséges fejlődésükhöz kell: napsütés, víz, mérsékelt hőmérséklet és termékeny talaj. Nos, a természetben ezek a körülmények ritkán vannak mind együtt és folyamatosan jelen. Hogy éli túl a növény az egyik ilyen meghatározó faktor folyamatos vagy átmeneti hiányát? A válasz az, hogy ezeken a közismert faktorokon kívül van még egy, láthatatlan alkotóelem, ami minden növény jóllétéért felel. A növénybiológia gyakorlatilag minden apró szelete érintett a mikrobákkal való kölcsönhatásban. A természeti viszonyok folyamatos változása miatt szó szerint egyetlen növény se lenne képes túlélni a mikrobák nélkül, emiatt mindegyikük kapcsolatok és függőségi viszonyok sokaságát alakította ki megannyi mikrobafajjal. Ezek egy része tartós és létfontosságú, mások átmenetiek, mert csak bizonyos körülmények között szükségesek. Többségük ősi, az evolúció során kialakult, de folyamatosan alakulnak ki új kapcsolatok is, mert a környezet folyamatos szelekciós nyomás alatt tartja mind a növényeket, mind a mikrobákat.

A növények és mikrobák közti kapcsolat a növények kialakulásának idejére nyúlik vissza. A növények evolúciója egy rendkívül sokszínű mikrobiológiájú világban kezdődött; a baktériumok, ősbaktériumok (archeák) és vírusok már több milliárd éve fejlődtek és benépesítették minden elképzelhető zugát a Földnek. Az eukarióta sejtek a cianobaktériumokkal való társulásuk révén tettek szert kloroplasztizsra (zöld színtestre), ezzel indult a növények kialakulása. Ez az átalakulást jelentő evolúciós esemény tette lehetővé a növényeknek, hogy betörjenek a mikrobák által telített világba, mert magukba olvasztották a cianobaktériumoknak azt a képességét, hogy a napsugárzásból és a szén-dioxidból könnyen emészthető cukrokat állítsanak elő. Ennek a képességnek a felhasználásával aztán többsejtes organizmusok tízezrei alakultak ki, amik méretüknél fogva nagyobb léptékben is tudtak cukrokat gyártani, amit szénforrásként el is raktároztak és átadták a következő generációknak. Noha a kloroplasztizsok a növények és mikrobák evolúciós összefonódásainak legősibb bizonyítékai, számos más régóta fennálló kapcsolat is állhat példaként, a legismertebb (de semmiképp sem a legszokványosabb) talán a hüvelyesek és nitrogén fixáló rhizóbiiumok szimbiózisa.



A növény–mikroba–kölcsonhatások nincsenek csupán a baktériumokra korlátozva. A növények nagy múltú és szoros kapcsolatot ápolnak a vírusokkal és a gombákkal is.

Az, hogy a növények raktározni tudják a fotoszintézis segítségével nyert energiát a leveleikben, gyümölcsökben, gumóikban és szárukban, nagyon csábító tápanyagforrássá teszi őket. Hogy tudják elkerülni, hogy ne fogyasszák el őket, tekintve, hogy nem tudnak például elfutni?

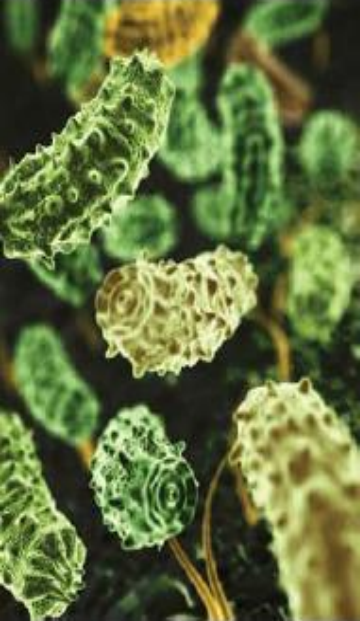
Ezen kívül a napfény és szén-dioxid csak szükséges, de nem elégséges feltétele az életnek. A növények a rendszeres vízellátást épp úgy igénylik, mint a nitrogént és a foszfort, továbbá a nyomelemeket, mint például a vasat. Hogy tudják ezeket mind magukhoz venni, úgy hogy helyhez kötöttségükből kifolyólag nem tudnak egyszerűen elmenni és megkeresni őket? Ugyanígy felmerülhet az a probléma is, hogy miközben szexuális úton szaporodnak, partnert keresni nem tudnak.

A választ a fenti kérdésekre megtalálhatjuk magában a növényi genomban; a számtalan különböző virágforma, illat és szín vonzza a beporzó állatokat, a levelek alakja és az ágak elrendezése maximalizálja a fotoszintetizáló felületet, a légzőnyílások kinyílása és bezáródása szabályozza a víz- és gázcserét: ezek a tulajdonságok mind a növények génjeibe vannak kódolva. A kérdések másik részére viszont a mikrobákkal való társulásuk adja meg a választ. Kölcsönösen előnyös viszonyok sokasága alakult ki az idők során, melyekben a növény élőhelyet és cukrokat kínál, míg a mikroba más tápanyagokkal és patogének elleni védelemmel látja el a növényt. Ilyen viszonyokból sokat ismerünk, számuk egyre nő és több szempont szerint is osztályozhatók. Fontos megjegyezni, hogy miközben egyre jobban ismerjük a kölcsönösen előnyös viszonyokat, a növény–mikroba–kölcsonhatások lehetnek semlegesek és károsak is. Azt szemléltetváltás kellene elsajátítani, hogy a növények egészsége közvetlen, elválaszthatatlan kapcsolatban van azzal az őt körülvevő hatalmas, láthatatlan és komplex ökoszisztémával, amiben a szó szoros értelmében több ezer faj verseng és kooperál, hogy válaszolni tudjanak a folyamatosan változó környezetet jelentette kihívásokra.

**A NÖVÉNY-
MIKROBA
KÖLCSÖNHATÁ-
SOK NINCSENEK
CSUPÁN A
BAKTÉRIUMOKRA
KORLÁTOZVA.
A NÖVÉNYEK
NAGY MÚLTÚ ÉS
SZOROS KAP-
CSOLATOT
ÁPOLNAK A
VÍRUSOKKAL ÉS
GOMBÁKKAL IS.**

NÖVÉNYEKET SEGÍTŐ MIKROBÁK: KIKICSODA?

A növényekkel kapcsolatos mikrobák három fő csoportra oszthatók. Az általuk nyújtott szolgáltatások sok szempontból átfednek: van, hogy egy mikroba több módon segít egy adott növényt és van, hogy egy szolgáltatást több mikroba biztosít, ilyenkor a különböző fajok közötti viszony lehet kölcsönösen hasznos, semleges, de ellenséges is.



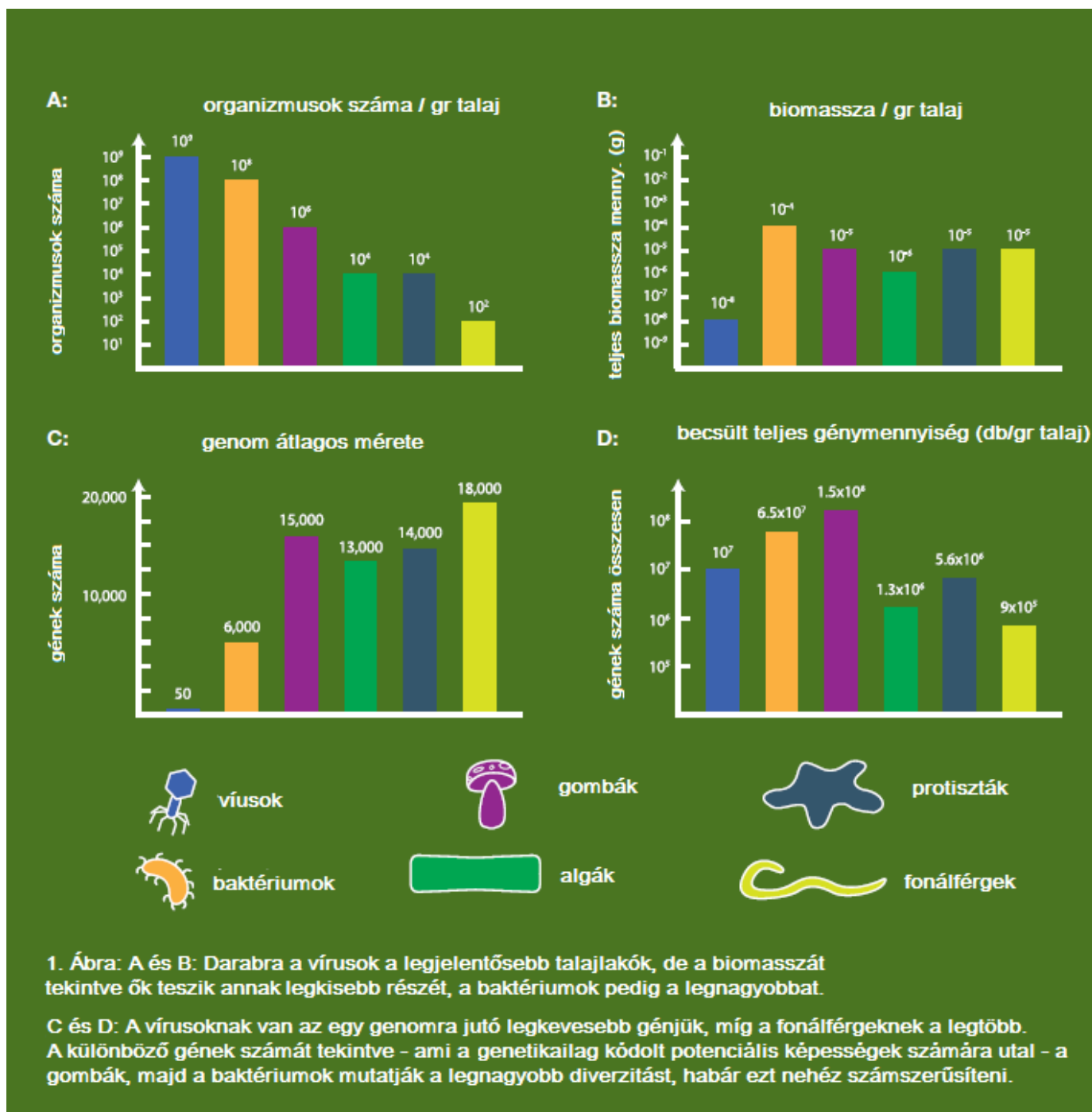
BAKTÉRIUMOK

A baktériumok rendkívül sűrűn képesek élni; a növény gyökérzetének közelében, a rhizoszférában, a talaj egyetlen grammjában 10^{10} sejt is előfordulhat, eközben hihetetlenül sokszínűek is, ugyanabban a grammban akár 10 000 különféle faj is fellelhető. A talajon kívül a növény talajszint feletti részeit is számos baktériumfaj népesítheti be. A baktériumok hasznos tevékenységei közül néhányat megemlítve: tápanyagok és ásványi anyagok felvétele, antibiotikumok termelése a patogének és toxinok termelése a kártevők távoltartására, valamint hormonok és más olyan anyagok előállítás, amik például gyorsítják a gyökérnövekedést, stimulálják az immunrendszert vagy segítik a stressztűrést. A baktériumok ezen kívül részeseik olyan komplex társulásoknak, amiknek az egyik szereplője például olyan jelző anyagot választ ki, ami vonz bizonyos hasznos organizmusokat, egy másik távol tartja a patogéneket és megint egy másik pedig tápanyaggal lát egy –a növény számára hasznos– negyediket. Ezek a társulások van, hogy egy összefüggő sűrű szerkezetbe tömörülnek, amit biofilmnek hívunk. A biofilmnek több különböző, de jól meghatározott tagja és feladata van, ami lehet például a növény szállítórendszerének kiszolgálása.



GOMBÁK

Csak az utóbbi években vált nyilvánvalóvá, hogy a növényekhez kötődő gombákból sokkal többféle van és azok sokkal inkább különböznek egymástól, mint ahogy azt korábban gondolták. A termőföldben átlagosan 10^5 - 10^7 gombasejt található. Ez csak egy részük, mert a gombák nem csak a növények körül élnek, hanem bennük is; minden valaha vizsgált növényben találtak legalább egy, de inkább több endofita gombát. A gombafélék a növény szinte minden részével kapcsolatba hozhatók, kiterjedt hálózatot kialakítva élnek azok sejtjeiben és sejtjei között. Ezen rendszerek szerepeinek csak kis része ismert egyelőre. Az arbuszkuláris mikorrhiza (*szimbiózis, mely során a gyökér kéregsejtjeibe behatolnak gombafonalak – a szerk.*) megtalálható a szárazföldi növények 80%-ánál (a növények egy másik 10%-hoz, többnyire fákhoz más gombaféle társítható). Ezek a szimbionta gombák hosszú fonalakat vagy hifákat képeznek, amik a növény meghosszabbított gyökereként funkcionálnak és kulcsfontosságúak a tápanyag-, ásványianyag- és vízfelvételben.



Ahogy korábban említettük, a gombák a növények talajszint feletti részeiben is megtalálhatók. A *Clavicipitaceae* család tagjai például a gazdanövény sejtei között építenek ki hálózatot (tehát szintén endofiták) és toxinokat termelnek, amivel távol tartják a károsító rovarokat és a legelő állatokat. Egyre erősebb az az általános vélekedés, miszerint számos növény csak a gombafélékkel alakított szimbiózis révén képes túlélni extrém hőssokkot, szárazságot, só- és nehézfém mérgezéseket és egyéb környezeti stresszhatásokat.

Nem minden hasznos gombaféle endofita: számos fajok él szimbiózisban olyan ektomikorrhiza-gombákkal (az ilyen gombák hifái nem hatolnak be a növény gyökerének sejtfalába – a szerk.), amik sűrű hálót képeznek a fák gyökerei köré, mellyel hasonló funkciót láthatnak el, mint az arbuszkuláris mikorrhizák: patogének elleni védelem, tápanyag- és vízfelvétel.



VÍRUSOK

Azok közül a mikrobák közül, amiktől a növények nagyban függnek, talán a vírusok a legmeglepőbbek. A vírusok messze a legnagyobb számban jelenlévő biológiai entitások a Földön. Minden élő organizmust meg tud támadni legalább egy-, de inkább többféle vírus, sőt a legtöbbjük folyamatosan fertőzött különféle, eddig felfedezetlen vírusok egész sorával. A vírusokra többnyire patogénként tekintenek, ami érthető is, hiszen e tulajdonságuk révén váltak ismertté. Csak lassan kezdett teret nyerni az az elgondolás, hogy az egészséges élet fenntartásában is közre tudnak működni; ha lassanként is, de kezdenek sokasodni azok a példák, amikor a vírusok nem csak hasznosak, hanem egyenesen nélkülözhetetlenek egy-egy növény számára.

A növénynemesítők számára közismert a vírusok azon tulajdonsága, hogy képesek befolyásolni a növények fenotípusát (megjelenését); vírusok okozzák például a tulipánok virágzatában a csíkok vagy lágcsóvaszerű mintázatok megjelenését. A 17. századi holland tulipántermesztési láz alatt a gazdák tudták, hogy úgy alakíthatnak ki új mintázatokat, ha keresztezik mintás és egyszerű tulipánok hagymáit. Azt is felismerték, hogy a mintás szirmokat hozó fajták fokozatosan elbetegednek, ezért nem tarthatók fenn örökké, de csak az 1920-as években nevezték meg a „tulipán romboló vírust”, mint a mintás szirmok kiváltóját. Az első vírus, amit felfedeztek, az a dohány mozaik vírus volt 1898-ban, azóta kb. 1000 növénypatogén ismert. A növényvírusok nagy részét azért fedezték fel, mert valamilyen kárt okoznak. Viszonylag új elgondolás az, hogy bizonyos növények pont amiatt lehetnek sikeresek, mert egy vírust hordoznak.

A kevés eddig talált példa azt sugallja, hogy a vírus gyakran nélkülözhetetlen partnerei az extrém környezetben élő növényeknek. Több tanulmány rámutatott arra, hogy sok olyan vírus létezik, ami enyhe körülmények között betegséget okoz, de aszály idején segíti a szárazságtűrést. Egyes esetekben egyenesen nélkülözhetetlenek a túléléshez, erre egy példa a Yellowstone Nemzeti Park forró talajában növekvő köles, ami csak akkor marad életben, ha hordozója egy olyan gombafajnak, ami maga vírusfertőzött. Sok növény és gomba hordoz maradandó (perzisztens) vírusokat, amiket a gazda korlátlan ideig utódról utódra örökít. Ezeknek a vírusoknak valószínűleg az a szerepük, hogy növény vagy gomba génkészletén túl extra genetikai információkat biztosítsanak gazdáiknak.

A növény–mikroba-együttműködésekre hozott fenti példák, azt a célt szolgálták, hogy egy rövid betekintést nyerjünk ezeknek a szimbiotikus kapcsolatoknak a sokoldalúságába, több milliárd éves múltjába és a jelenben is kihasználható előnyeibe. Amikor kevés a víz vagy a tápanyag, hőség vagy nagy hidegek járnak, versenytársak, patogének, vagy kártevők fenyegetnek, a növények gyakran csak a mikrobákra számíthatnak ezen kihívások leküzdésében. Ebből következően komoly jelentőségű ezeknek az együttműködéseknek a kihasználása a mezőgazdaságban, ezek a lehetőségek a mezőgazdasági gyakorlatot alapjaiban változtathatják meg. Évezredek óta a földművesek igyekeztek megtalálni az egyes haszonnövények ideális növekedési körülményeit; mind a gépesítés (öntözés), mind a kémia (műtrágyázás), mind a genetika (nemesítés) eszközeivel igyekeztek növelni a termés hozamot. Az ökológus megközelítést, miszerint a növények maguktól is képesek leküzdeni környezeti kihívásokat, mindeddig szinte teljesen figyelmen kívül hagyták.

**AZ ÖKOLOGIKUS
MEGKÖZELÍTÉST,
MISZERINT A NÖVÉ-
NYEK MAGUKTÓL IS
KÉPESEK LEKÜZDENI
KÖRNYEZETI KIHÍVÁ-
SOKAT, MINDEDDIG
SZINTE TELJESEN FI-
GYELMEN KÍVÜL
HAGYTÁK.**

MIFÉLE SZOLGÁLTATÁSOKAT KÉPESEK NYÚJTANI A MIKROBÁK?

A mikrobák a növénybiológia (vagy más szóval botanika) szinte minden területére hatással vannak, ráadásul többféle módon. A mikrobiális aktivitás bár-mikor fontos lehet lényeges élettani funkciók ellátá-sában. Legfőképpen valamilyen hiány vagy stressz estén tölthetnek be kulcsfontosságú szerepet a mik-robák az alábbiakban ismertetett mechanizmusokon keresztül.

TÁPANYAGFELVÉTEL

A vízen kívül nitrogén, foszfor, kálium, kén valamint vas és számos más mikroelem szükséges a növények optimális fej-lődéséhez. Ezek felvétele folyamatos feladatot jelent a növé-nyeknek, amiben a mikrobák aktív részesek, sőt a gázfázisú nitrogént egyedül a baktériumok képesek a növények szá-mára is elérhető nitráttá, ammóniává alakítani. Az ipari nitro-génfixálási módszerek feltalálása előtt a növények teljesen alá voltak rendelve ezeknek, a nitrogént átalakító mikrobák-nak.

A gombák és a baktériumok is elősegítik a növények meg-felelő foszforellátását. Tudva, hogy a növények csak a szer-vetlen foszfort (P_i) képesek felvenni, előnyös, hogy egyes baktériumok olyan szerves savakat termelnek, amik megkötik a szerves foszfort és olyan foszfatázokat választanak ki, ami felszabadítják a P_i -t a szerves formákból, ezzel növelve a növények számára is elérhető forma mennyiségét. A mikorhizát alkotó gombák hifafonalai túlnyúlnak a gyökerek által elérhető talajzónán, hogy onnan is foszforral lássák el a gazdanövényt; erre jó példa a manióka, ami ha be van oltva arbuszkuláris mikorhizzával, akkor 10-20-szor nagyobbra nő, mint a steril talajban nőtt, mikorhizza nélküli társai.

AZ ARBUSZKULÁRIS MIKORHIZZA GOMBÁK ÉS A MANIÓKA

A manióka vagy kasszava a trópusok egyik fő haszon-növénye, a térség élelmiszerellátás-biztonsága ennek a növénynek az emelkedő terméshezámra alapszik, pro-dukálva ezt úgy, hogy a foszforalapú műtrágyázást igye-keznek a gazdálkodók minimalizálni annak emelkedő ára, környezetszennyező mivolta és a korlátozott földi készletei miatt. Az arbuszkuláris mikorhizza gombái (AMG-k) közvetlen kapcsolatban vannak a növény gyö-kerével, behatolnak annak külső rétegébe így juttatják a gazdát a hifáikkal felvett foszforhoz, nitrogénhez, kén-hez és egyéb nyomelemekhez. Elméletileg az AMG-k maniókaföldeken való alkalmazása tovább erősíthetné az eddig természetesen kialakult növény-gomba-együtt-működést, ezáltal csökkentve a termelés külső foszfor-műtrágya-függését. Az AMG-eket viszont hagyományo-san nagyon nehéz a gazdanövényeik nélkül, magukban növesztetni, tehát a termőföldek ellátására is elegendő AMG-t csak nagy mennyiségű gazdanövény termeszté-sével együtt lehet előállítani. Ezt a megközelítést ár-nyalja az a tény is, hogy az AMG spóráit, illetve sarjait kísérhetik olyan talajlakó mikrobák is, amik viszont po-tenciálisan károsak.

Nemrégiben kialakításra került egy olyan tömegterme-lésre alkalmas biotechnológiai eljárás, mely során az AMG-t *Agrobacterium tumefaciens*-szel fertőzött sárga-répagyökéren növesztik, *in vitro*, steril, mesterséges médiumon. Egy *In vitro* termelt AMG-t, a *Rhizophagus irregularis*-t tesztelték már ipari méretekben is külön-böző fekvésű és különböző foszfortrágyázású kolumbiai maniókaföldeken; a kísérlet minden esetben magasabb száraz terméshezámot hozott az AMG-vel inokulált nö-vények esetén. Sőt, ennek a kezelésnek eredményeként bármekkora foszforműtrágya-adagolás esetén szignifi-kánsan nagyobbra adódott a száraz biomassza tömeg, mint a kezeletlenek esetén. Ezek a biztató eredmények felhívják a figyelmet az AMG-inokuláció gazdaságos és környezetbarát előnyeire a foszforalapú műtrágyázással szemben és előre vetíti annak más területen való alkal-mazását is.



A TALAJ- MIKROFLÓRA OPTIMALIZÁLÁSA LEHETŐVÉ TENNÉ A GAZDÁK SZÁMÁRA, HOGY KEVESEBB MŰTRÁGYÁT HASZNÁLJANAK, EZÁLTAL PÉNZZT SPÓROLJANAK ÉS LECSÖKKENTSÉK A FÖLDEKRE KI- SZÓRT, MAJD AZ IVÓVÍZBÁZISBA BELEMOSÓ TÁPANYAGOK FELESLEGÉT.

A baktériumok és gombák más tápanyagok átalakításában és transzportjában is szerepet játszhatnak; ilyen a kén, a kálium és vas is. A talajlakó mikrobatársulások, vagy rövidebben talajmikroflóra optimalizálása lehetővé tenné a gazdák számára, hogy kevesebb vegyszert használjanak a termeléshez, ezáltal pénzt spóroljanak és lecsökkentsék a földekre kiszórt, majd az ivóvízbázisba belemosódó tápanyagok feleslegét.

PATOGÉNEK ÉS KÁRTEVŐK ELLENI VÉDELEM

A növények számos más, ellenséges élőlény céltáblái, beleértve a baktériumokat, gombákat, patogén vírusokat, rovarokat, madarakat és legelőállatokat. A mikrobákkal való társulás viszont megvédheti őket ezektől a fenyegető veszélyforrásoktól. Ennek legegyszerűbb esete az, hogy a mikroba-partner pusztán csak elfoglalja a sebezhető helyeket a patogének előtt, ilyen, amikor például egy baktérium biofilmet képez a gyökéren (*kolonizáció- a szerk.*), ezzel hozzáférhetlenné téve a gazdanövényt a kártevő mikrobák és a talajlakó paraziták számára. A hasznos mikrobák gyakran nem állnak meg ennyinél, hanem még egy, vagy akár több kémiai anyagot is termelnek, ami célzottan hat a patogének ellen. Számos, általunk fertőzések ellen használt antibiotikumot olyan baktériumból vagy gombából nyernek, amik a versenytársaik kiirtására termelik azokat. Más, mikrobák által termelt anyagok arra hivatottak, hogy álcázzák a növények jelenlétét a leendő paraziták és kártevők felé, vagy odavonzzanak hasznos organizmusokat, illetve támogassák a növény immunrendszerét. A bakteriofágok (*vagyis olyan vírusok, amik baktériumokat támadnak meg – a szerk.*), közvetlenül képesek megsemmisíteni a patogén baktériumokat. Még olyanra is van bizonyíték, hogy egyes mikrobák elektromos teret létrehozva vonzanak vagy riasztanak el más mikrobákat és talajlakó gerincteleneket, mint például fonálférgeket.

Talajszint felett és alatt is fontos szolgálatot tehetnek a jótékony mikrobák azzal, hogy egyszerűen csak betöltenek olyan élettereket, amik patogének támadási pontjai lehetnének. A növényi szöveteken kívül működő (epifita) és endofita mikrobák egyaránt képesek kiválasztani: olyan hasznos kémiai anyagokat, beleértve a toxinokat is, amik távol tartják a legelő állatokat; olyan illékony vegyületeket, amik figyelmeztetik a szomszédos növényeket valamilyen veszély jelenlétére; és olyan kismolekulájú anyagokat, amik beindítanak olyan védekező válaszokat, mint a légzőnyílások bezárása.

Áthallás is van a növények és mikrobáik közti „társalgás” között talaj felett és alatt egyaránt: egy felszín alatti esemény kiválthat választ a levelekben is és *vice versa*. Például, ha egy paradicsomnövényen megjelenik az alternáriás szárazfoltosság, akkor az aktiválódott immunrendszere kémiai stressz szignálokat termel, amit a gyökérzetben élő gombák felfognak és a hifafonalaikon keresztül közvetítik ezt a szomszédos növényeken élő társaiknak, azt üzenve, hogy a gazdanövények készítsék fel védekező rendszereiket a megpróbáltatások átvészelésére.

A mikrobák egész sora képes előállítani olyan anyagokat, amelyek inhíbeálnak (elnyomnak) vagy elpusztítanak más mikrobákat. Ha egy baktérium, vírus vagy gomba távol tud tartani egy káros mikrobát, akkor a növénynek érdekében áll a szolgálataiért cserébe befogadnia és táplálékkal ellátnia azt. Becslések szerint egy növény az általa termelt szerves szénforrás akár 30%-át is a talajba választja ki, ezért úgy tűnik, hogy a mikrobák nagyon jó szolgálatot tehetnek, ha kiérdemlik a növény erőforrásainak ekkora hányadát.

A NÖVÉNY–MIKROBA-EGYÜTTMŰKÖDÉSEK RÁFORDÍTÁS–HASZNOSSÁG SZERINTI ELEMZÉSE

Akár csak a házasságokban, a növények és a mikrobák esetében is sokféleképpen származhat előnye a két partnernek a kapcsolatból. A rhizobium baktériumok általában nitrogént adnak a növénynek egy olyan szervért (*gümő - a szerk.*) cserébe, amiben kizárólagos hozzáférésük van a gazda szénhidrátjaihoz. Ezzel szemben, némelyik rhizobium szintén rá tudja venni a növényt, hogy ilyen szervet képezzen, de alig ad érte cserébe kötött nitrogént. A hüvelyesek és a rhizobiumok teljes egymásra utaltsága miatt a növények az ilyen rhizobiumokkal is együttműködnek. Ezeken a „csaló” mikrobákon nagy az evolúciós nyomás, hiszen a növényeknek a takarékos működés lenne a célja, ezért érdekükben állna felismerni ezeket a csalókat vagy jutalmazni azokat a társakat, akik komolyabb előnyöket biztosítanak.

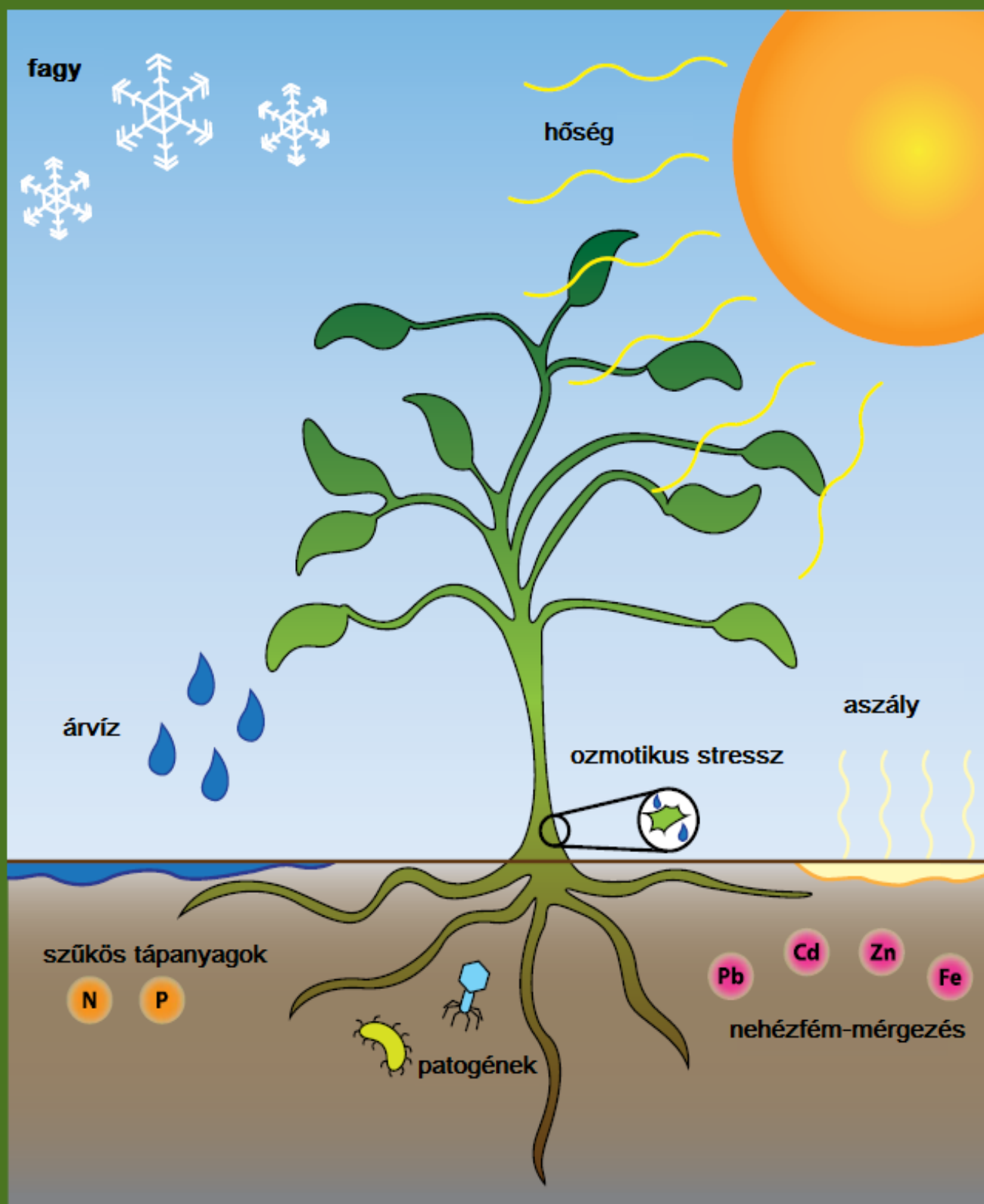
Egy növényt egyszerre gyakran több AMG (arbuszkuláris mikorrhiza gomba) -faj is kolonizál és egy adott gomba is képes egyszerre több növényrel együttműködni, így a gyökereket összekötő hifafonalak egy egész földalatti hálózatot hozhatnak létre. Minden AMG többféle mikrotápanyaggal látja el gazdáját a szénhidrátokért cserébe, ennek a szolgáltatásnak a mértéke azonban fajonként eltérő, ugyanúgy ahogy a növények szénhidrát-ráfordítása is az AMG-k felé. Kutatások rámutattak, hogy mindkét partner olyan rendszer szerint dolgozik, melynek a kölcsönös jutalmazás a kulcsa: a növények több szénhidrátot juttatnak olyan AMG-knek, amelyek több foszfort adnak és az AMG fajok is több foszfort adnak az olyan növényeknek, amik bőségesebben látják őket. Hasonló ellenszolgáltatás-rendszert írtak le a nitrogén esetén is. Ezen túlmenően azt is megállapították, hogy a növény és az AMG közti kölcsönös felismerés már az érintkezéskor kialakulhat, bizonyítva, hogy a növény–mikroba-együttműködésekben az aktív kommunikáció is szerepet játszik: ez biztosítja, hogy kezdettől fogva csak a mindkét fél számára előnyös kapcsolatok jöjjenek létre. A kölcsönös előnyök eme viszonyrendszere remek alapot ad egy stabil, hosszú távú és gyümölcsöző házasságnak.

ELLENÁLLÁS A KÖRNYEZETI STRESSZNEK

Amennyiben – ahogy korábban megjegyeztük – a mikrobák teljes ellátást kapnak, amiért megvédik a növényeket az őket elfogyasztani vágyó állatoktól, akkor magától értetődik az is, hogy miért áll érdekükben segíteni a gazdáikat a környezeti kihívások leküzdésében. A mikrobák csakugyan fontos szerepet játszanak tulajdonképpen minden – a növényeket érhető – stressz hatásainak enyhítésében:

- **Szárazság** – A növényeknek vízre van szükségük, hogy épségben tartsák sejtjeiket, és hogy fotoszintetizálni tudjanak. Aszályos időkben a növény a légzőnyílásait bezárva igyekszik csökkenteni az elpárolgó vízmennyiséget, de ennek hátulütője is van, hisz ilyenkor a fotoszintézishez szükséges szén-dioxidot sem tudják felvenni és hőmérséklet-szabályozás is akadályozott. Az epifita (kültakarón élő) és endofita gombák egyaránt képesek enyhíteni ezen a megpróbáltatásokon úgy, hogy stimulálják a gyökérnövekedést, mely révén a növény több vízhez tud jutni a talajból. Bizonyos akut, normál körülmények közt betegséget okozó növényvírusokról is kiderült, hogy segítik a szárazságtűrését a fertőzött gazdanövényeknek.





2. Ábra: A növényeket érhető környezeti kihívások: valamennyi leküzdésében segíthetnek a mikrobák.

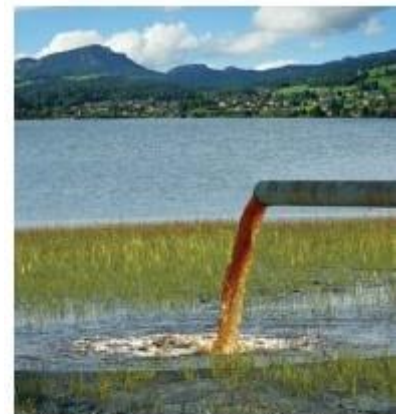
- **Árvíz / belvíz** – A növényeknek nagy szükségük van a vízre, de túlzott mennyiség már ártalmas; az elárasztott növényeknél *hypoxia*, vagyis oxigénhiány lép fel. Számos stresszhatás esetén, beleértve az árvizet, belvizet vagy túllöntözést, a növények etilént termelnek, ami aktiválja a védekező mechanizmusait, de ezzel párhuzamosan leállíthatja a gyökerek és a hajtások növekedését. Sok baktériumfaj termel ACC-deamináz enzimet, ami lebontja az ACC-t, az etilén prekursorát (előanyagát), így nem tud etilén képződni, vagyis a fejlődés nem áll meg árvíz vagy aszály esetén sem.
- **Szikes talaj** – A talaj túl magas sótartalma, hatásait tekintve megegyezik a szárazsággal, mint hogy ezek a vegyületek megkötik a vizet. A szikes talaj többek közt ellehetetleníti a csírázást, a palánták növést, a virágzást és gyümölcs hozást. Egy, a Csendes-óceán partján élő homoki fűféléből izolált endofita gomba sótűrővel ruhazza fel gazdáját, de szintén ilyen tulajdonsággal bír több rhizobaktérium is, melyek olyan poliszacharidokat választanak ki, amik képesek megkötni a nátriumot és egyéb kationokat, így azokat nem tudja felvenni a növény.
- **Nehézfém-szennyezés** – A talajban vagy a talajvízben levő nehézfémek felboríthatják a növények ionháztartását, ráadásul oxidáló hatásuk miatt károsíthatják a sejteket. A baktériumok képesek csökkenteni ezen káros anyagok toxicitását, az által, hogy magukba zárják és biológiailag inaktívvá, hozzáférhetetlenné teszik őket, emellett az imént ismertetett módon meggátolják az etilén kiválasztását.
- **Szerves szennyezőanyagok** – A baktériumok által megvalósítható bioszintézisek és biodegradációk száma hallatlanul magas, mindegy milyen szennyezőről beszélünk, valahol bizonyosan találhatunk egy olyan törzset, ami képes az adott szerves vegyületet átalakítani vagy lebontani. Amikor a talaj szennyezett, akkor az baktériumtársulás, ami képes a szennyező anyagot lebontani – és ezzel párhuzamosan a növények növekedését segíteni – még gyorsabban elszaporodik. Másfelől, a növényekkel való együttműködésük miatt, a gyökérzetben élve még könnyebben hozzáférhetnek a szennyezőanyagokhoz azáltal, hogy a növény a már felvett szennyező anyagokat le tudja juttatni a talajszint alá.
- **Magas hőmérséklet** – Minden enzimnek megvan az optimális hőmérséklet-tartománya, ahol megfelelően tud működni, afelett az enzim deaktiválódhat vagy tönkremehet, ezzel a növény fejlődése is megrekedhet. A rizs esetében az éjszakai hőmérséklet egyetlen Celsius-fokos csökkenése is 10%-kal visszavetheti a termés mennyiségét. Ezzel szemben a rhizobaktériumokkal kolonizált burgonyanövény fokozott gyökér-, hajtás- és gumónövekedést mutat hőstressz hatására.
- **Alacsony hőmérséklet** – A hideg általánosságban lassítja a növekedést és károsíthatja a sejteket is. Annak ellenére, hogy a hideg elleni mikrobiális védekezés mechanizmusai még tisztázatlanok, ismerünk rá példát: a *Burkholderia*-val beoltott szőlőtőkék a kontrollhoz képest hidegben intenzívebben fotoszintetizáltak és csökkent az elektrolitjaik elszívargása (ami a membránok jobb állapotát tükrözi).



ASZÁLY



BELVÍZ



KÖRNYEZETSZENNYEZÉS



FAGY

A MIKROBIÁLIS DIVERZITÁSBAN REJLŐ KIAKNÁZATLAN LEHETŐSÉGEK

Még ma is naponta fedeznek fel új többsejtű fajokat, például csak 2011-ben több mint 3000 új bogarat. Az eddig leírt és még fel nem fedezett makroorganizmusok elképesztő változatossága eltörpül a mikrobiális világhoz képest. Ennek a világnak a feltárása során már eddig is több olyan új és érdekes fajt fedeztek fel, amikben megvan a lehetőség, hogy változásokat indítson el a mezőgazdasági termelésben, a biotechnológiában vagy az orvostudományban.

A növénylakó *Muscodoralbus* gombát egy hondurasi fahéjfa kérgében fedezték fel. Ez a mikroba számos olyan illékony gázt állít elő, ami képes elpusztítani különféle növény- és humánpatogén gombákat, sőt, Gram-negatív és Gram-pozitív baktériumokat is. Azon túl, hogy elképzelhető ennek a gombának a gyakorlati mezőgazdasági alkalmazása a patogének elleni védelemben, a tudósok azt is elkezdték vizsgálni, hogy a gomba által termelt alkoholok, észterek és egyéb gázok egyedi keveréke hogyan használható esetleg a burgonyamoly ellen is.

NORMÁL NÖVEKEDÉS ÉS FEJLŐDÉS

A kutatók napjainkban is azon dolgoznak, hogy kibogozzák azt a számos utat-módot, ahogy a mikrobák képesek javítani a tápanyagok hozzáférhetőségét, és ahogy távol tudják tartani a patogéneket. Meglepő lehet, de egyre több felfedezés születik annak ráeszmélésnek a nyomán, hogy a mikrobáknak kulcsszerepük van a növényfejlődésben, fiziológiában és anyagcserében. Ezeket a funkciókat gyakran úgy töltik be, hogy anyagokat szintetizálnak, amik utánóznak, felerősítenek, megváltoztatnak vagy gátolnak egyes növényi hormonokat. Például, egyes baktériumok és gombafélék több olyan fitohormont is termelnek, amik serkentik a hajszálgökök növekedését, növelve ezzel a gyökérszövet tápanyag- és vízfelszívó kapacitását.

Vannak olyan magok, amiknek baktériumokra van szükségük, hogy kicsírázzanak. Egyes mikrobiális vegyületek fokozzák a gyökérlégzést vagy hatással vannak a leveleken található légzőnyílásokra.

Ezen vegyületek hatása nem is korlátozódik feltétlenül arra a növényre, amivel a mikroba közvetlen kapcsolatban van; főleg a gombák termelnek olyan anyagokat, amik távolra is hatnak; akár a szomszédos növényekre, akár az ökoszisztéma más lakóira is, például rovarokra.





ZAMAT

A mikrobák még a gyümölcsök ízét, zamatát is képesek befolyásolni; a földieper esetében a metilobaktériumok (*Methylobacterium*) fokozzák a növény által előállított furanon nevű vegyület termelését, ami a földieper jellegzetes ízét adja. Az egyik ilyen a furanon, a 2,5-dimetil-4-hidroxi-2H-furanon (DMHF), stimulálja is a növény védekező rendszerét, hogy az különféle antimikrobiális anyagokat termeljen, amivel távol tarthatja a káros mikrobákat.

Ezek a példák mind igazolják, hogy a növények világában sokkal több dolog történik, mint amit első ránézésre gondolnánk. Egy összetett, de többnyire láthatatlan ökoszisztéma veszi körbe a növényeket, aminek tagjai; a baktériumok, gombák, vírusok és talajlakó gerinctelenek, köztük pedig gyakran egymásba fonódott kiterjedt kapcsolatrendszer van, aminek ugyanúgy része lehet egymás elpusztítása, mint a kooperáció vagy a kölcsönös egymásrautaltság.

Lábaink alatt többféle, egymással párhuzamos és élénk „beszélgetés” folyik, amikben előfordulnak átfedő szókészletek, de egyértelmű jelzések is, emellett akadnak kísérletek a titkosításra, lehallgatásra és becsapásra is. Az ilyen üzenetváltások kötik össze a növényeket egymással, a növényeket a mikrobákkal, a növényeket a fonálférgekkel, a mikrobákat egymással, a fonálférgeket egymással és így tovább minden lehetséges kombinációban, a vírusok pedig lehetőségeik szerint több módon tudnak bekapcsolódni a társalgásba. Az ökoszisztémák lakói képesek belehallgatni egymás beszélgetéseibe, keresztbe tenni egymásnak, másnak kiadni magukat és képesek a jeleket felerősíteni vagy legyengíteni is: egyetlen kémiai anyag mást és mást jelenthet különféle organizmusoknak. Összefoglalva, terjedelmes információ csere folyik tehát, és mi csak az elején vagyunk annak a folyamatnak, hogy megértsük a jelentőségét, de a cél a jövőre nézve az, hogy mi magunk is belehallgathassunk ezekbe a beszélgetésekbe.

LÁBAINK ALATT
TÖBBFÉLE,
EGYMÁSSAL
PÁRHUZAMOS ÉS
ÉLÉNK
„BESZÉLGETÉS”
FOLYIK...



A NÖVÉNYEK
OLYAN
MOLEKULÁKAT
IS ELŐ TUDNAK
ÁLLÍTANI,
AMIKKEL KÉPE-
SEK ÁTVERNI A
LÉTSZÁM-
SZENZOROKAT,
MIND POZITÍV,
MIND NEGATÍV
IRÁNYBAN,
EZZEL OLYAN
IRÁNYBAN
ELTORZÍTVA A
BAKTÉRIUMOK
TERMÉSZETES
VISELKEDÉSÉT,
HOGY AZ
KEDVEZZEN A
NÖVÉNYNEK.



HOGYAN HATNAK EGYMÁSRA A NÖVÉNYEK ÉS A MIKROBÁK?

A növény–mikroba-kölcsönhatások nem korlátozódnak kizárólag a kémiára, habár a kismolekulájú anyagok fontos „közös nyelvet” jelentenek. A növények termelnek flavonoidokat amik vonzanak vagy visszatartanak különböző mikrobákat, a mikrobák pedig Nod-faktorokat választanak ki, hogy indukálják a gyökér differenciálódását. A növények és a mikrobák is állítanak elő olyan illékony szerves anyagokat, amik vagy helyben, vagy egy bizonyos távolságon belül hatnak.

A baktériumok számos olyan kis molekulát választanak ki, amiket „létszám-szenzorként” használnak. Ez azt jelenti, hogy a baktériumok ilyen anyagok mennyisége alapján tudják felmérni, hogy a környezetük mennyire belakott, és hogy a környéken mennyi az azonos fajú társ. A baktériumok összegyűjtik ezeket a jeleket egymástól, hogy le tudjanak vezényelni olyan csoportos tevékenységeket, mint a biofilmképzés vagy a toxintermelés. A növények azonban olyan molekulákat is elő tudnak állítani, amikkel képesek átverni a létszám-szenzorokat, mind pozitív, mind negatív irányban, ezzel olyan irányban eltorzítva a baktériumok természetes viselkedését, hogy az kedvezzen a növénynek. A dél-amerikai virág, az óriáslapu (*Gunnera*), a hüvelyesekben gümőket képző folyamathoz hasonlóan, egy kis molekulát termel, ami arra készíti a nitrogénfixáló baktériumokat, hogy váljanak szét a mozgékony, szálasként formájukba, és ezáltal fel tudjanak költözni a növény szárában lévő üregekbe. Itt letelepedve kötött nitrogénnel látják el a gazdájukat cukrokért cserébe.

Egy másik útja annak, ahogy a mikrobák hatással lehetnek egymásra és a növényekre, az az örökítő anyag közvetlen átadása. A baktériumok a konjugációnak nevezett folyamattal cserélnek plazmidokat, és a vírusok is rendszeresen visznek át géneket egyik élőlényből a másikba. Az *Agrobacterium*-ok közvetlenül a növényeknek is képesek átadni örökítő anyaguk egy kis részét. A különböző élőlények genomját elemezve, azok számos példát szolgáltatnak az evolúció során bekövetkezett géncserékre, de azok gyakoriságát, idejét és ezek kiváltó okát nem ismerjük.

Az *Agrobacterium*ok nemzetsége képes plazmidok formájában olyan kis egységekkel kiegészíteni a növény genomját, amelyek a kifejeződéskor hatással vannak az auxinokra és citokinekre, aminek eredményeképpen daganatszerű képződmények, tumorok alakulnak ki a növényen. Ezt az adottságát a biotechnológia is kihasználja, azzal a céllal, hogy bejuttasson számára kívánatos géneket növényekbe. A vírusokat szintén lehet úgy módosítani, hogy ugyanezt a funkciót betöltsék.

Még egy módja az interakciónak a fehérjék átvitele az élő szervezetek között: a baktériumok és a gombák is termelnek olyan, effektoroknak nevezett fehérjéket, amiket injektálni tudnak a növényi sejtekbe. A legtöbb, eddig leírt effektort, paraziták és patogének termelik, hogy elnyomják a növények vele-született immunrendszerét. Egy érdekes kutatási területet jelenthet a jövőben annak kérdésnek a megválaszolása, hogy léteznek-e növények számára hasznos effektor-szerű kölcsönhatások.

Ahogy fentebb, a kémiai és genetikai transzferek-nél említettük, a kölcsönhatások jó részben a növényi hormonok révén zajlanak; a mikrobák elő is állítják ezeket, de enzimeik segítségével is képesek alakítani a növényi hormonok szintjét. Válaszul a növények is termelnek olyan vegyületeket, amik blokkolják vagy módosítják a baktériumok által szintetizált hormonokat.

Végül megemlítendő, hogy vannak olyan növény–mikroba-kölcsönhatások, amik tisztán mechanikusak vagy fizikálisak; egyes hasznos mikrobák egyszerűen csak betöltik azokat az élettereket, amik támadáspontjai lehetnének a patogéneknek. A levelek, virágok és gyökök alakja szerepet játszhat abban, hogy melyik mikroba képes túlélni: például a mikrobiális nitrogénfixálás gátolt, ha oxigén van jelen, ezért kulcsfontosságú, hogy a növény egy ilyen szempontból védett helyet biztosítson a partnerként működő mikrobáknak.

A BIOTECHNOLÓGIA MINDENESEI: MÉG EGY OK, HOGY TANULMÁNYOZZUK A NÖVÉ- NYEKEL KAPCSOLATOS MIKROBÁKAT

Ez a beszámoló azokra a szerepekre fókuszál, amiket a mikrobák a növényekkel kapcsolatosan betölthetnek, de egy másik hozadéka ezek vizsgálatának az, hogy gyakran kiderül, hogy a mikrobák képességei más kontextusban is érdekessé és hasznosíthatóvá válnak.

Példaként említhető, az *Agrobacterium*ok nemzetsége, amiket patogénként, növényi daganatok okozójaként ismertünk. 1975-ben írták le, hogy a baktérium egy Ti-nek elnevezett plazmiddal viszi át genetikai anyagát a növényekbe, beindítva ezzel a gu-bacsképzést. A '80-as években a biotechnológia-ipar a genetikai módosítás fő vektoraként kezdte el használni. Valójában az első génmódosított növény előállításához nem csak ezt az egy mikrobát használták; a gén, amit a Ti hordozott, a *Bacillus thuringiensis*-é volt és egy rovarölő hatású protein kódolt, amit dohány-növényekbe ültettek be.

Ezzel a kis történettel csak az a mondanivalónk, hogy akármi is legyen egy mikroba szerepe egy adott növény-nyel kapcsolatban vagy általában a környezetben, lehetnek olyan adottságai, amit széleskörűen ki tud használni a mezőgazdaság egy része vagy egésze.



A BAKTÉRIUMO-
KAT, GOMBÁKAT
ÉS A VÍRUSOKAT IS
ALKALMAZZÁK ÉS
ÁRULJÁK MÁR
MEZŐGAZDASÁGI
FELHASZNÁLÁSRA;
PATOGENEK ÉS
KÁRTEVŐK ELLENI
VÉDELEMRE,
ÁLTALÁNOS
EGÉSZSÉGVÉDE-
LEMRE ÉS
TERMÉSHOZAM-
NÖVELÉSRE.

JELENLEGI ALKALMAZÁSOK

Annak ötlete, hogy mikrobákat használjanak a növények megvédésére vagy a terméshozam növelésére, nem új keletű, sőt, már évezredek óta alkalmaznak olyan földművelési praktikákat, mint a vetésforgó vagy a hüvelyesek és nem hüvelyesek együtt termesztése. Ha nem is nagy, de jelentős piaca van a biológiai takarmánynövény-kezeléseknek. A biopeszticidek éves piaca egy 2,1 milliárd dolláros üzletág, ami kb. 5%-a a kémiai vegyszer-alapú növényvédő szerek piacának. Ebbe a kategóriába tartoznak a biológiai alapú rovarirtók, gyomirtók és gombaölők. Ezeknek a termékeknek kicsit több mint felét adják az élő mikrobák, a másik részét pedig olyan egyéb biopeszticidek, mint a rovarok, vagy a biológiai eredetű kivont vegyületek, mint a feromonok. A műtrágyák világpiaca 150 milliárd dollár nagyságrendű, ennek egy részét felválthatják vagy kiegészíthetik a mikrobiológiai megoldások.

A baktériumokat, gombákat és a vírusokat is alkalmazzák és árulják már mezőgazdasági felhasználásra; patogének és kártevők elleni védelemre, általános egészségvédelemre és terméshozam-növelésre. A kategorizálás becsapós lehet: ha egy mikroba azzal segíti a gazdanövényt, hogy akadályozza a konkurensok gyökérnövekedését, akkor arra gyomirtóként kell tekinteni? Ha pedig egy mikroba serkenti a gyökérzet növekedését, ezáltal elősegíti a növény fejlődését, akkor a műtrágyák / hozamnövelők közé tartozik? Egyes esetekben nem ismert a segítő mechanizmus, vagy több is van belőle. Néha a törvényi szabályozások vagy a marketing miatt szükséges kihangsúlyozni a mikroba egy bizonyos tulajdonságát a többi rovására. Példának okáért, amíg a rovarirtóként árult termékek egy hosszú engedélyeztetési eljárásnak néznek elébe, addig ezt el lehet kerülni, ha azt helyezzük előtérbe a mikrobáról, hogy fokozza a terméshozamot.

Sokat tanulhatunk a mezőgazdaságnak szánt mikrobaalapú termékek értékesítésének kezdeti sikereiből. Az alábbi jellemzők rendre kulcsfontosságúnak bizonyultak:

- Jól leírt mikrobák, világosan értelmezett hatásmechanizmusokkal.
- Nagyfokú specifitás a növényekkel való együttműködésben, pl. a rhizobium-hüvelyes szimbiózis.
- Biológiai szempontú egyszerűség, pl. a Bt toxint egyetlen gén kódolja, amit könnyű beültetni a növények genomjába.



- Meghatározott keretek között tartott hajlam – Az *Agrobacterium* sikeresen tud géneket átadni a növénynek, ha azt a felsértés utáni az első 24 órában kíséreljük meg.
- Stratégia felállítása, melynek része a léptéknövelés és engedélyeztetés megoldása, továbbá megfelelő eltarthatóság biztosítása.
- Azoknak a körülményeknek a meghatározása, amik a termék maximális hatékonysághoz és állandó minőségéhez kelljenek.
- A természettudományos szaktudás, a kutatás - fejlesztés és az értékesítés gyakorlati együttműködése.
- A végfelhasználókig elérő szakmai segítségnyújtás és oktatás, melyben a megelőzést hangsúlyozzuk, ahelyett, hogy megvárnánk egy esetleges járvány kitörését és azt csak tüneteiben kezelnénk.

Nem alkalmaznak minden mikrobaalapú készítményt egyformán, ennek a felhasználási formának a kiválasztása pedig hatással van a fejlesztés hosszára és összköltségére. A leg-időigényesebb és legdrágább a rovarirtóként való bejegyeztetés, ami ugyanazon az úton halad, mint a vegyszeralapú társaik bejegyzése.

Ha egy organizmust kizárólag azzal akarunk elfogadtatni, hogy az rovarokat és patogéneket irt, akkor ez a helyes út, de ennek költsége több-százezer euro nagyságrendű és a procedura hat évig is eltarthat. A növényerősítési- vagy biotrágya-célzatú mikrobás kezelést nem kell engedélyeztetni, így a költségek a tizedére eshetnek, a piacra dobáshoz pedig egy vagy két év is elég lehet. Egy másik modell a helyben való termelés, melyben a mikrobiális anyagokat és kivonataikat helyben termelik meg és használják fel, ahelyett, hogy külső beszállítótól vennék. Ez a modell egy win-win szituáció a közösségek számára, vagyis a szereplők kölcsönösen jól járnak: a helyi fermentáló üzemek munkahelyeket biztosítanak, a gazdák pedig helyben, a saját egyedi igényeikre szabott készítményekhez juthatnak. Ilyen üzemek létrehozását több országban is közvetlenül támogatta a kormányzat, például Kubában és Venezuelában.

A MIKROBÁK MUNKÁRA FOGÁSA

A MIKROSZKOPIKUS
MÉRETŰ
ÉLŐLÉNYEKRE NEM
SZOKTUNK AZ
ÖKOSZISZTÉMA
TAGJAIKÉNT
TEKINTENI, PEDIG
–BÁR TÉNYKEDÉSÜK
AZ EMBERI SZEMNEK
LÁTHATATLAN–
JELENLÉTÜK
NÉLKÜLÖZHETETLEN
A TÁRSULÁS
MŰKÖDÉSÉHEZ.

A hasznos mikrobák mezőgazdasági felhasználásának lehetőségei határtalannak tűnnek, de a fejlődéshez szükség van továbblépésre a növény–mikroba–kölcsonhatások megismerésében. Ez a tudás vezet el a gyakorlati felhasználási lehetőségekhez. Ennek a feladatnak részei még a technológia, a jog, a marketing, és a végfelhasználói oktatás. Egy egységes megközelítés tűnik a legcélravezetőbbnek a problémakör kezelésében. Ez alatt az értendő, hogy elismerjük; a különböző kihívások egyenként is sokoldalúak, nem érdemes őket külön kezelni.

A tudomány oldalán felmerülő feladatok megoldáshoz meg kell változnia annak a régi szokásnak, hogy a tanulmányok csak konkrét növény–mikroba–kölcsonhatásokat vizsgálnak. Az ilyen redukcionista, részleteket elemző szemlélet is nagyon fontos és számos ilyen tanulmányra lenne még szükség, hogy megértsünk egyes növény–mikroba–együttműködések. Azonban az előrehaladáshoz szükség lenne arra is, hogy minden élőlényre úgy gondoljunk, mint –egymásra is ható– ökoszisztémák egész sorának tagjaira. Jól ismerünk olyan széles vertikumú ökoszisztémákat, mint például a legelőket, ahol a növényevők, ragadozók, dögevők, növények, stb., közösen alkotnak egy összetett tápláléklánc-hálót. Környezettani tanulmányok számos esetben bemutatták már, hogy milyen összetett hatással van az ilyen makro-ökoszisztémákra egy faj kiesése vagy egy új beillesztése. A mikroszkopikus méretű élőlényekre nem szoktunk az ökoszisztéma tagjaként tekinteni, pedig –bár ténykedésük az emberi szemnek láthatatlan– jelenlétük nélkülözhetetlen a társulás működéséhez.





A TUDOMÁNY KIHÍVÁSAI

A SZEREPLŐK AZONOSÍTÁSA

A talajlakó mikrobák elképesztő változatossága elkeserítően nehéz feladattá teszi az összes szereplő azonosítását. Minden egyes mikroba azonosítása minden környezetben egyértelműen elérhetetlen célt jelent, különösen, hogy ezek a rendszerek nemcsak változatosak, de változékonyak is. Mindazonáltal, egy adott növény körüli társulás tagjainak szisztematikus áttekintése *metagenomikus* megközelítéssel lehetővé válhat. (*Metagenomika: a genetikai kutatás új ága, mely során természetes környezetből vett mintákból lehetővé válik olyan élőlények genetikai elemzése, melyek nehezen vizsgálhatók laboratóriumi körülmények között, illetve lehetőséget nyújt eddig ismeretlen életformák feltárására – a szerk.*) Eddig még nem készült átfogó gyűjtemény a növényekhez kötődő mikrobákról, beleértve a fő haszonnövényeket is, ezért egy ilyen népszámlálásszerű munka jelenleg általános mintaként szolgálhatna. Baktériumok esetében már igen fejlett metagenomikus módszereket írtak le, de a növényeket lakó gombák és vírusok összegzése ezzel a technikával még gyermekcipőben jár. A gerinctelenek ide vétele az összetettség egy újabb fokát jelentené: a rovarok és fonálférgek ugyanis számos úton-módon vannak kapcsolatban a növényekkel és az azokat körülvevő mikrobákkal.

A VÁLTOZATOSSÁG FONTOSÁGÁNAK MEGÉRTÉSE

A technológia fejlődésével könnyebb lesz összeírni a talajlakó közösségek tagjait, de a tagok azonosítását olyan törekvésnek is kísérni kell, hogy megtudjuk, hogy egy adott környezetben a mikrobiális sokféleségnek melyek azok az elemei, amik valóban fontosak a növények szempontjából. A talajban élő mikrobák hatalmas diverzitásáért, valószínűleg az a képesség felel, hogy számos mikroba nagyon alacsony populációban is életképes marad és később készen áll szaporodni, ha jobbra fordulnak a körülmények. A növények számára ez azt jelenti, hogy egy sereg olyan mikroba áll rendelkezésre, ami adott esetben fel tudja ruházni őket olyan képességekkel, amik segítségével le tudják küzdeni a változó körülmények adta kihívásokat. A rendszerek mozgatórugóit kutató tudósok számára ez a változatosság rémisztőnek hathat. Kétségtelen, a talajban élő mikrobák funkciói között temérdek a felesleg, de ha nem így lenne, akkor sokkalta nehezebb lenne a növényeket őshonos környezetükön kívül termesztetni.

A TAGOK
AZONOSÍTÁSÁT
OLYAN
TÖREKVÉSNEK IS
KÍSÉRNI KELL,
HOGY MEGTUDJUK,
HOGY EGY ADOTT
KÖRNYEZETBEN A
MIKROBIÁLIS
SOKFÉLESÉGNEK
MELYEK AZOK
AZ ELEMEI,
AMIK VALÓBAN
FONTOSAK
A NÖVÉNYEK
SZEMPONTJÁBÓL.

Másrészről az arbuszkuláris mikorhizákat tárgyaló kutatás rámutatott, hogy bár a mani-
óka egyáltalán nem tud létezni a természetben AMG nélkül, a különböző AMG fajoknak a
hatása a terméshozamra 0% és 20% között szóródik, ami igencsak számottevő. Úgy tűnik
tehát, hogy amíg egy feladatot több különféle faj is el tud látni, mint például a foszfátfelszí-
vást az AMG-k, vagy a nitrogénfixálást a baktériumok, addig az egy funkciót ellátni képes
csoportokon belül is adódhatnak különbségek. Ráadásul az egyes mikrobáknak a fő fel-
adatukon kívül is lehetnek más hatásaik a növényekre vagy egymásra. Annak meghatáro-
zása, hogy az egyes esetben melyik mikroba-genotípus az optimális és miért, komoly tu-
dományos kihívást jelent.

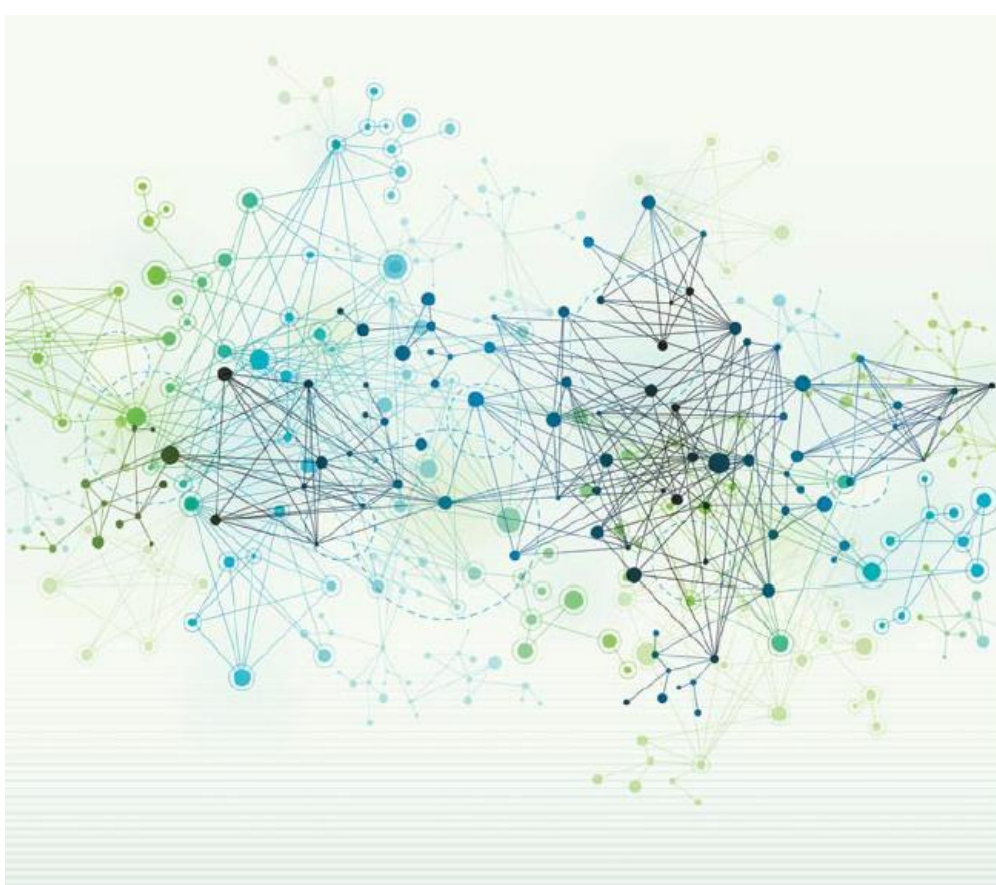
Egy adott pillanatban a mikrobák sokféle adottságainak nagy része valószínűleg éppen
nincs működésben, ezért általában egy fajnak vagy csoportnak a hiánya csak csekély
mértékben érinti a növényt. Egyes mikrobák segítőkészsége rejtve maradhat, ha az élet-
feltételek kedvezőek, vagy a hiányzó tápanyagokat vagy vizet a termelő maga pótolja. An-
nak a kérdésnek a megválaszolása, hogy létezik-e a növények számára egy közös „mini-
mum-mikrobiom” –vagyis egy kis mikrobacsoport (mikroflóra), ami ellátja a kulcsfontos-
ságú funkciókat– komoly ráhatással lehetne a növénytermesztés körülményeinek optimali-
zálására.

A KIAKNÁZHATÓ KÉPESSÉGEK JELLEMZÉSE

A metagenomika és a transzkriptomika (*transzkriptomika = az mRNS-állomány vizsgálá-
lata- a szerk.*) technikáival információt nyerhetünk a génszekvenciákról, ezek ismeretében
pedig tudomást szerezhetünk arról, hogy „ki van ott” és még arról is lehet némi fogalmunk,
hogy „mit csinálnak”. Azonban minden esetben hatalmas a különbség aközött, hogy ismer-
jük valaminek a génszekvenciáját, és aközött, hogy tudjuk, hogy a géntermékek mit csinál-
nak, melyik élőlényből származnak, és mi szabályozza az aktivitásukat. Ezt a feladatot to-
vább nehezíti a talajlakó társulások kivételes diverzitása. Igen nagy kihívás megállapítani,
hogy milyen adottságok vannak jelen egy társulásban, és abból a rengeteg különféleből,
melyek azok, amik elengedhetetlenek egy bizonyos feladat betöltéséhez. Fogást találni
ezen a működését tekintve nagyon sokrétű rendszeren, nagy előrelépés lenne abba az
irányba, hogy ezzel a mikrobákban rejlő lehetőségeket kiaknázva, növelhető legyen a nö-
vények terméshozama.

A KÖLCSONHATÁSOK DINAMIKÁJÁNAK MEGÉRTÉSE

Ismerünk már néhány elszigetelt növény–mikroba–kölcsonhatást, de még nagyon mesz-
sze vagyunk attól, hogy mindet teljesen feltérképezzük vagy, hogy ki tudjuk számítani,
hogy a különféle kölcsonhatások eredője milyen fenotípusokat hoz létre. Ahogy korábban
megjegyeztük, a kölcsonhatások különféle fajtájúak lehetnek (kémiai, genetikai, fizikai) és
igen dinamikusak is. A beszélgetésekbe való belehallgatást lehetővé tévő megoldásoknak
része lehet valamilyen új vizualizációs technika vagy olyan új eszköz, ami képes össze-
kötni a kemotípust (a kémiai anyagok összessége, amik a társulások tagjai között áramla-
nak) a fenotípussal.



A RUGALMASSÁG ÉRTELMEZÉSE

Amennyiben azt tekintjük végső célnak, hogy olyan módszereket fejlesszünk ki, amik a beavatkozásaik révén növelik a terméshozamot és a betegségek, valamint kártevőkkel szembeni ellenállást, akkor meg kell találni ezeknek a komplex rendszereknek a beavatkozási pontjait. Gyakran megesik, hogy a laborban, leegyszerűsített körülmények között működőképes kezelések a földeken, összetettebb körülmények közt kudarcot vallanak. Ennek oka lehet a sikertelen versengés a már meghonosodott mikrobákkal, a szükséges partner organizmusok hiánya és a kedvezőtlen körülmények vagy időzítés. Ahhoz, hogy célzottan, a következményeket előre látva tudjunk beavatkozni a növény–mikroba–társulásokba, ahhoz szélesebb ismeretekre lenne szükségünk, arról, hogy a társulások hogyan változnak az időben (pl. az év egyes szakaszaiban) és melyek azok a sajátosságok, amik leginkább felelősek a reprodukálható beavatkozásokért.

A mikrobák közösségeinek rugalmas viselkedését is szükséges lenne értelmezni ahhoz, hogy fel tudjuk mérni a kockázatát és várható hozamát egy új mikroba beültetésének már meglévő rendszerekbe. A mikrobiális adalékok / kezelések általános társadalmi elfogadottságához az ilyen kockázatokat és lehetséges hatásokat nagyon alaposan fel kell becslőni és kétségeket kizáróan meg kell állapítani, hogy mik azok a mechanizmusok, amik mentén egy beavatkozás hasznossága megjelenik a növényeken. Például, kérdés, hogy a bevitt mikrobák nem változtatják-e meg a helyi mikrobatarsulások diverzitását? Felborítja-e a mikrobatarsulások természetes szerkezetét? Ezek a változások pozitívak vagy negatívak a növény egészségére vagy terméshozamára nézve? El tudnak-e terjedni az új mikrobák a célnövényen kívül máshol is, és ez adna-e okot aggodalomra? Ezeknek a fontos kérdéseknek a megválaszolásához szükség lenne a társulások dinamikájának alapjainak megértésére.

**A MIKROBIÁLIS
ADALÉKOK / KEZELÉSEK
ÁLTALÁNOS
TÁRSADALMI
ELFOGADOTTSÁGÁHOZ
AZ ÖSSZES
KOCKÁZATI TÉNYEZŐT
ÉS A LEHETSÉGES
HATÁSOKAT
NAGYON ALAPOSAN
FEL KELL BECSÜLNI.**



**AZ EVOLÚCIÓS SZEMPONTOK
SZERINT KIALAKÍTOTT
MIKROBAKÖZÖSSÉGEK LEHETŐVÉ
TEHETNÉK A HASZONNÖVÉNYEKNEK,
HOGY ROSSZ MINŐSÉGŰ TALAJBAN
IS FEJLŐDJENEK VAGY, HOGY A
KLÍMAVÁLTOZÁS MIATT EGYRE
KISZÁMÍTHATATLANABBÁ
VÁLÓ IDŐJÁRÁS
KIHÍVÁSAIT LE TUDJÁK GYŐZNI.**

A NÖVÉNYEK EVOLÚCIÓS PARNEREINEK FELKUTATÁSA

A ma termesztett haszonnövények ősei egészen biztosan más mikrobiális környezetben nőttek, mint amikbe napjainkban utódjaik kerülnek. A termőképesség növeléséhez nagyon hasznos lehet feltérképezni azokat a mikrobapartnereket, amikkel az egyes növények együtt fejlődtek, formálódtak. Az világosnak tűnik, hogy a növények képesek a környezetükből mikrobákat toborozni bizonyos funkciók ellátására. Lehetséges, hogy ha azokkal a mikrobákkal látnánk el a növényeket, amelyekkel azok kifejlődtek, akkor az, drasztikusan csökkenthetné azoknak a mesterséges anyagoknak a mennyiségét (pl. rovarirtó vegyszereket, műtrágyát, rovarirtókat...), amiket a gazdák jelenleg bevetnek annak érdekében, hogy segítsék a növények fejlődését számárunkra idegen helyeken. Az evolúciós szempontok szerint kialakított mikrobaközösségek lehetővé tehetnék a haszonnövényeknek, hogy rossz minőségű talajban is fejlődjenek vagy, hogy a klímaváltozás miatt egyre kiszámíthatatlanabbá váló időjárás kihívásait le tudják győzni.

A NÖVÉNY-MIKROBA-KAPCSOLATOKAT SZEM ELŐTT TARTÓ NEMESÍTÉS

A növénynemesítők évezredek óta a természetes genetikai változatosságot használták ki, hogy új fajtákat hozzanak létre és ezek a technikák az idők során egyre kifinomultabbá váltak. Annak ellenére, hogy a növényeket még nem kezdték el nemesíteni olyan irányban, hogy javuljon az összhangjuk az őket körülvevő mikrobákkal, ennek a szempontnak a szem előtt tartása is sikerekkel kecsegtethet. Ehhez hasonlóan, vagy talán még inkább, a „nemesítés” a mikrobák oldaláról is eredményes lehet: a cél, hogy még hatékonyabban tudják kiszolgálni a gazdanövényeket. Egy bizonyos környezetben hasznosnak talált mikrobát vagy mikrobákat még napjainkban is úgy értékesítik, mint általános terméshozam-fokozókat. Gyakran azonban ezek a készítmények más talajviszonyok között nem hoznak egyenletes eredményeket. Mindamellet, nincs értelme kihasználatlanul hagyni a mikrobák genetikai sokféleségében rejlő lehetőségeket. Az egyes feladatok hatékonyabb ellátására a mikrobák nemesítése gyorsabb folyamat, mint a növényeké, hiszen sokkal gyorsabban szaporodnak. Összefoglalva, a növénynemesítés egy új vonulata lehet kialakulóban és ezzel párhuzamosan a mikrobák nemesítése is egy megfontolandó út a növénytermesztés fejlesztésében.

ÉLETBEVÁGÓ FONTOSSÁGÚ ÚJ ESZKÖZÖK ÉS MEGKÖZELÍTSEK

TÖBB, GYORSABB ÉS OLCSÓBB 'OMIKÁK

A nagyteljesítményű nukleinsav-szekvenáló technológiák, mint a metatranszkriptomika segítségével a lehetőségeink forradalmian megnőttek, hogy megállapítsuk, milyen organizmusok vannak jelen a növények körül és milyen géneket fejeznek ki. Minél olcsóbbak, gyorsabban és elérhetőbbek lesznek ezek a technológiák, annál könnyebb lesz észrevenni a növényeket körülvevő mikrobiom jellegzetességeit.

Ezek a nukleinsav-alapú vizsgálatok azonban csak a kezdetet jelentik, innen még hosszú út vezet a társulások dinamikájának, anyagcsere folyamatainak és zavarásokra adott válaszainak megértéséig. A fehérjék és a kiválasztott kis molekulák valószínűleg sokkal hívebben tükröznék a társulások tevékenységét, mint a génszekvenciák, de a proteom és metabolom (*proteom: egy sejtben kifejezett fehérjék teljes készlete, metabolom: a teljes anyagcsere-hálózat – a szerk.*) felállító technológiák messze le vannak maradva a nukleinsav-alapúaktól.

KITERJEDTEBB ANNOTÁLÁS

Ahogy bővülnek a genomi és transzkriptomi adatbázisok, egyre fontosabb feladat a rengeteg ismeretlen funkciójú gén azonosítása. Nagy szükség lenne ehhez olyan, nagyteljesítményű eljárások kidolgozására, amik a szekvenciákban megtalálják a géneket, előre jelzik funkciójukat és annotálják őket.

Ahogy a növény–mikroba-társulások vizsgálata egyre inkább magában foglalja a gombákat és a vírusokat is; annotálatlan és ismeretlen funkciójú gének egész serege öntötte el az adatbázisokat. Ennek ellenére jó eséllyel ezen –eddig elhanyagolt– organizmusok kutatása feltárhat új anyagcsere és szintézis útvonalakat, valamint új stratégiákat az általános kihívások kezelésére, mint a patogén- és stressz rezisztencia. Önmagában is hasznos lenne többet tudni ezeknek a mikroorganizmusoknak a génfunkcióiról és kétségtelenül döntő fontosságú lenne a növény–mikroba-ökoszisztémák dinamikájának minden részletre kiterjedő megismerése.



A GYÖKEREKNEK
KORÁNTSEM
AZ
AZ EGYETLEN
FELADATA,
HOGY
EGYHELYBEN
TARTSA A
NÖVÉNYEKET.

TÖBB ÁTFOGÓ MODELL

Léteznek már modellek egyedi mikrobák, és néhány növény esetében is (pl. *Arabidopsis*, kukorica). Alap kutatásokra lenne szükség, hogy számba vegyük a különféle kölcsönhatásokat, megállapítsuk, hogy ezek hogy érintik a rendszer egészét, és hogy –ezek ismeretében már– fel tudjuk mérni, milyen hatással lehetnek a zavarások az egyes mikrobákra és a teljes rendszerre. Ezek a modellek bármilyen viszonyrendszer tanulmányozását elősegítenék; például az egyes mikrobák szerepét a tápanyagfelvételben egy adott környezetben, a mikroba-mikroba kölcsönhatásokban és növény-mikroba kölcsönhatásokban. Az összetett növény-mikroba-viszonyok rendszerszintű megértéséhez kapcsolt modellek gyűjteményére lenne szükség, amik átölelik a teljes vertikumot, az egyedi mikrobáktól a páronkénti kapcsolatokon át a hálózatelemzésig.

A végcél a különböző szinteket leíró modellek egyesítése, hogy ezzel egy valós képet kapjunk a rendszerszintű viselkedésről. A modellek akkor lesznek igazán használhatóak, ha a gyakorlati szempontokat szem előtt tartva, azokkal összhangban fejlesztik ki. A gyors megértést ugyanis az segíti, ha a gyakorlati tapasztalatokat és az elméleteket folyamatos finomításokkal igazítjuk egymáshoz, ami az ún. „top-down” és „bottom-up” megközelítések kombinálása.

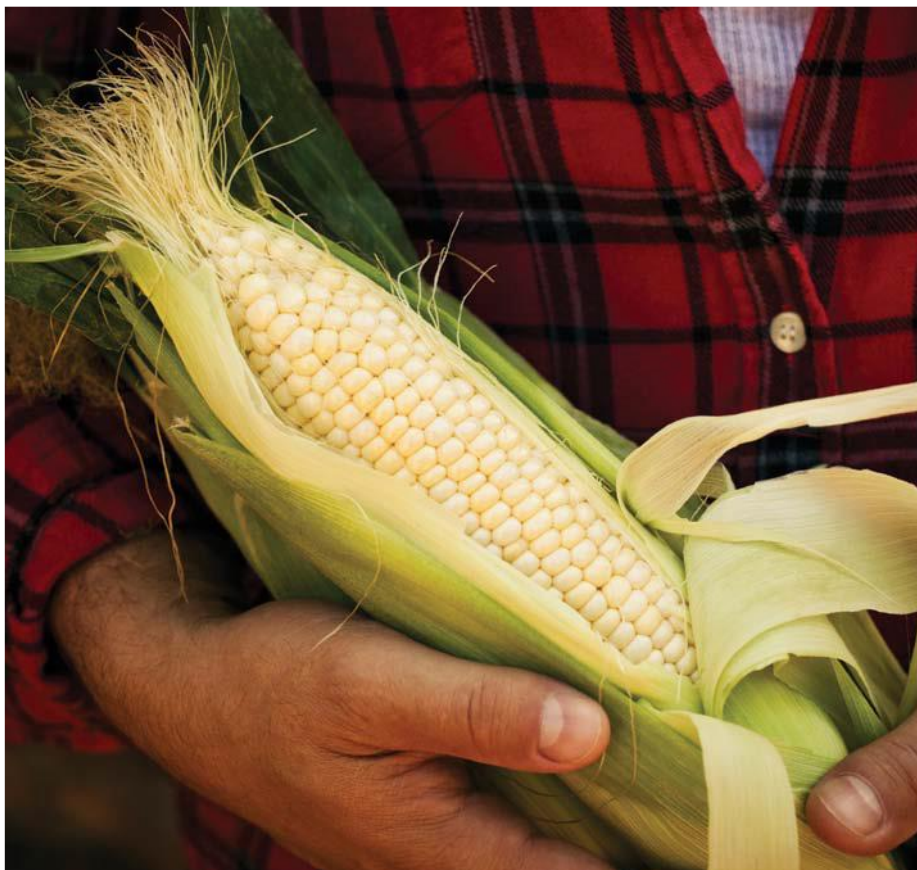
TECHNOLÓGIÁK A RHIZOSZFÉRA VIZSGÁLATÁRA

A gyökérzetnek korántsem az az egyetlen feladata, hogy egyhelyben tartsa a növényeket. Számtalan olyan folyamat és kölcsönhatás zajlik a gyökérzet, annak váladékai és a több ezer talajlakó mikroba között, amik alapvetőek a növény egészsége és termőképessége szempontjából. Bár ezeknek a kölcsönhatásoknak a jó része egyelőre ismeretlen, azok molekuláris szintű, valós idejű és helyű megfigyelési módszerei nélkülözhetetlenek, ahhoz, hogy megállapítsuk, milyen lenne az ideális mikroflóra összetétele egy növény szempontjából, és hogy ezt sikeresen be is tudjuk állítani a földiken.

A TERMÉSHOZAM ÉS A PRODUKTIVITÁS EGYEZMÉNYES MÉRÉSE

Produktivitás alatt a termelés hatékonyságát, vagyis a befektetett erőforrások és a termés arányát értjük, míg a terméshozam esetén a termés mennyiséget a művelt területre vetítjük –a szerk. A terméshozam és a produktivitás egyezményes mérésének kialakítása bonyolultabb probléma, mint aminek elsőre tűnik, márpedig a mikroba-alapú beavatkozások hatását csak megfelelő mennyiségi mérésekkel lehet alátámasztani.





AZ ÚJ FELFEDEZÉSEK ÁTADÁSA A GAZDÁK KEZÉBE

Az új tudományos ismeretek átültetése a gyakorlatba új termékek formájába, nem könnyű feladat, bármelyik területről is beszéljünk. Ez alól a növény–mikroba–kölcsonhatások sem kivételek. Tulajdonképpen a múltbeli tapasztalatok miatt hagyományosan kételkedve fogadnak minden ilyen tárgyú felfedezést, nem bízva abban, hogy azok a „való világban” is működnek.

Évtizedekkel ezelőtt, amikor az egész biokontroll-téma berobbant, sok kutatás vezetett sikeres termékhez, ugyanakkor számos mikrobaalapú készítmény vallott kudarcot a földeken, annak ellenére, hogy a laboratóriumok kontrollált körülményei között biztató eredményeket szolgáltatottak. A növény–mikroba–kölcsonhatások komplexitására és annak tagjainak nagyfokú egymásra utaltságára számos bizonyíték lát napvilágot. Ez alapján úgy tűnik, hogy a kezdeti kudarcok abból adódhattak, hogy nem tudták megállapítani azokat a körülményeket, amik közt az újonnan bevitt mikroba

**A TUDOMÁNY
LENDÜLETE
KOMBINÁLVA A
TAGADHATATLANUL
SÜRGETŐ
PROBLÉMÁVAL, AZT
SUGALLJA, HOGY
MEGÉRETETT AZ IDŐ
BEFEKTETÉSEK
ELKEZDÉSÉRE. EZEK
VÁRHATÓ
HOZAMA A
MEZŐGAZDASÁG
NAGYOBB
PRODUKTIVITÁSA A
NÖVÉNY–MIKROBA-
KÖLCSÖNHATÁSOK
SEGÍTSÉGÉVEL.**

meg tud telepedni és el tudja látni a kívánt feladatot. Mostanra már világossá vált, hogy adott mikroba hatástalan lehet, ha nincs jelen egy nélkülözhetetlen partnere vagy a versenytársai elfoglalták a célhelyét. Ezt a problémát nem lesz könnyű megoldani, de mégis ennek első lépése az ökoszisztémák összetettségének és dinamikus viselkedésének tudomásul vétele. Az utóbbi 20 évben rengeteg előrelépés történt a témában és számos új technológia terjedt el, így éppen ideje újra áttekinteni ezt a területet.

A mikrobiális ökológia reneszánszát éli; az új eszközök révén új környezetek, életterek válnak tanulmányozhatóvá. Az óceánoktól az emberi emésztőrendszerig, a kutatók egyre jobban megismerik az összetett mikrobatársulások időbeni alakulását. A talaj társulásait gyakran mind közül a legbonyolultabbként említik, és ennek vizsgálata lehet a legnehezebb, viszont a más környezetekben elért előrelépések valószínűleg segíthetik ezt a területet is.

A tudomány lendülete kombinálva a tagadhatatlanul sürgető problémával, azt sugallja, hogy megérett az idő a befektetések elkezdésére. Ezek várható eredménye a mezőgazdaság nagyobb produktivitása a növény–mikroba–kölcsonhatások segítségével. Ha tényleg ez a helyzet, akkor milyen formában kéne felépíteni ezeket a befektetéseket? A kollokvium résztvevői szerint egy, a gyógyszerek klinikai tesztjeihez hasonló, háromlépcsős megközelítés lenne az, ami még belátható időn belül meghozhatja a gyümölcsét.

1. TANÁCS: BEFEKTETÉS OLYAN ALAPKUTATÁSOKBA, AMIKET A KÍVÁNCISISÁG HAJT

A befektetőket toborzó alapkutatások mindegyikének, területtől függetlenül, van egy központi, megkerülhetetlen talánya, amire a kutatók választ keresnek. Gyakorlatilag minden innovatív termék az ilyen alapkutatásokban elért előrelépésekből növi ki magát. A tapasztalatok azonban azt mutatják, hogy lehetetlen megjósolni melyik projekt hozhat leghamarabban eredményeket. Az a minta vált rendkívül sikeressé az elmúlt hat évtizedben, amiben a társadalom tagjai és szervezetei önkéntesen adják össze a szükséges forrásokat egy kutatásalapú és kíváncsiság vezérelte projekthez, amit kollegiális lektorálás után választanak ki.



2. TANÁCS: TÖBB LÁBON ÁLLÁS A KUTATÁSOK FINANSZÍROZÁSA TERÉN IS

Miközben – már ha elfogadjuk azt az állítást, hogy – a fontos felfedezések többnyire kis területre fókuszáló kutatásokból jönnek, aközben a növény–mikroba–kölsönhatások hatalmas területet ölelnek fel, a támogatók száma és lehetőségeik pedig nem végtelenek. Egy jelentős eredmény kitűzése, amit a kutatás megcéloz, számos előnnyel jár; lelkesíti a tudósokat és a közvéleményt is, valamint ennek nyomán lehet befektetőket találni olyan technológiák kidolgozására, amikből eztán az egész tudományos közösség profitálhat. Minden kutatási projekt esetén ajánlatos mérhető végcélokat kitűzni, amik elérése alapján sikeresnek tekinthető a kutató / fejlesztő munka. A növény–mikroba–kölsönhatások területén is sok az olyan elérhető cél, amik elérésében a kíváncsiság vezérelte kutatás jelentős szerepet kapna. Ezek közül néhány lényegeset fel is vázolt a kollokvium:

- **20:20:20 – A terméshozamok 20%-os növelése 20%-kal kevesebb műtrágya és kártevőirtó felhasználásával 20 éven belül:** A feladatok közül ez a leginkább gyakorlati megközelítésű. A cél eléréséhez a kutatóknak meg kell állapítani, mik vezetnek a magasabb terméshozamhoz és ezzel párhuzamosan le kell csökkenteni a külső ráfordításokat. Az eszmecsere résztvevői egyetértettek abban, hogy a 20:20:20 egy nagyratörő cél, de nem elérhetetlen; teljesülése hatalmas előnyökkel járna a fogyasztók, a termelők és a környezet számára is.
- **Egy fontos haszonnövény teljes mikrobiótájának leírása:** Egy ilyen projekt számos szempont szerint megvizsgálná egy kiszemelt növényt körülvevő teljes mikrobaállományt és olyan kérdésekre keresné a választ, mint: miben különböznek a mikrobióták különböző földrajzi helyek között, különböző fejlettségi állapotokban, miben mások az azokat alkotó törzsek és miben különböznek, ha eltérő rendszerben folyik a gazdanövények művelése? Melyek voltak a növény őseinek mikrobapartnerei? Mi a mikrobátársulások szerepe abban, hogy a növény hogyan reagál a hőmérséklet, páratartalom és a szén-dioxid-koncentráció változására? Mik a társzmikrobáknak az általános biológiai jelentőségük, és létezik-e egy minimál- vagy alap mikrobióta? Lehet-e egy újonnan bevitt mikrobának valamilyen kiszámítható hatása a gazdanövény életére?
- **Különböző növény–mikroba–társulások válaszáinak leírása egy adott megpróbáltatás esetén:** Egy ilyen projekt magába foglalna mind művelt, mind vad növény–mikroba-rendszerek vizsgálatát és egy adott stresszhatás által kiváltott számos párhuzamos válaszelenségre összpontosítana.

ÉRDEMES LENNE A
SZEREPLŐKET
BEVONNI A
GYAKORLATIASÍTÁS
FOLYAMATÁNAK
VALAMIFÉLE MINTÁ-
JÁNAK VAGY
SZABVÁNYOS
MENETÉNEK KIDOL-
GOZÁSÁBAN IS.
AZ ILYEN
PROTOKOLLOK
FELÁLLÍTÁSA JÓ
LEHETŐSÉGET
BIZTOSÍTANA, HOGY
A TUDÓSOK, A REN-
DELETALKOTÓK,
TŐKÉSEK,
MAGÁNCÉGEK ÉS A
FOGYASZTÓI
CSOPORTOK
ELKEZDHESSENEK
EREDMÉNYESEN
KÖZÖSEN,
EGYÜTTMŰKÖDVE
DOLGOZNI.

3. TANÁCS ELŐÍRÁSSZERŰ TERV KIDOLGOZÁSA, ARRÓL HOGY A FELFEDEZÉS, HOGY KERÜL A LABORBÓL A FÖLDEKRE

- **A kutatók ösztönzése, hogy találják meg melyek azok lehetséges gyakorlati megoldások, amik az elért eredményekből kialakíthatók:** Olyan kíváncsiság hajtotta kutatásokba kell befektetni, amiknek a felfedezésiből biztosan születhetnek új gyakorlati alkalmazások. A kutatóknak meg kell adni minden segítséget, ahhoz hogy fel tudják mérni, hogy az eredményeiket milyen formákban lehet átültetni a gyakorlatba. Az a cél, hogy – kollegiális lektorálás mellett – minél több lehetséges utat felvázoljanak, amerre tovább lehet haladni.
- **Számos olyan kísérleti projekt támogatása, amik a készítmények hatásosságát vizsgálják:** A projektek ezen a ponton számszerűsítik a hatásosságot és felméri a termékek biztonságos voltát. Ezek elvégzéséhez egyezményes szabványokra és protokollokra van szükség. A készítmények vagy kezelések nem mindegyike kell, hogy új mikrobát tartalmazzon, hiszen egyes esetekben a külső körülmények megváltoztatása is elegendő lehet, hogy a már jelenlévő mikrobataráslások hatékonyabban megtelepedjenek és működjenek. Egy új mikroba bevezetésének kockázatát egyezményes szabványok szerint kell felmérni, hogy a hatóságok és társadalom számára is elfogadható legyen. Ebben a fázisban ajánlatos minden érdekeltet bevonni, beleértve a potenciális felhasználókat, a terjesztést végző tanácsadókat, a szabályzó hatóságokat, fogyasztói csoportokat, stb. Ahhoz, hogy egy megoldás (termék vagy módszer) sikeres és elfogadott legyen, tudatosan kell beavatkozni a növény-mikroba-kölcsönhatásokba és meg kell vitatni az új együttműködések kialakításának kockázatait és lehetséges előnyeit.
- **A legsikeresebb kísérleti projektek minden részletre kiterjedő szántóföldi tesztelése:** Ahogy fentebb felvázoltuk, egy mikroba mezőgazdasági alkalmazásának kísérletei mindig, a róla már megszerzett tudásanyagból táplálkoznak. A kereskedelmi bevezetés buktatói azonban kulcsszerepet játszanak abban, hogy egy felfedezést sikerül-e eredményesen termékbe alakítani. Ilyen tényezők lehetnek a léptéknövelés megvalósítása, az ellátás folyamatos fenntartása, üzleti kérdések, mint a szellemi tulajdonvédelem és a hatóságok jóváhagyásának beszerzése, valamint a társadalmi kérdések, mint a gazdák fogékonysága és fogyasztói elfogadottság.

A sikertörténetek azt mutatják, hogy az érdekelteket hasznos bevonni a fejlesztési folyamat teljes egészébe. Ugyanígy érdemes lenne őket bevonni a gyakorlati megvalósítás valamiféle mintájának vagy szabványos menetének kidolgozásában. Az ilyen protokollok felállítása jó lehetőséget biztosítana, hogy a tudósok, a rendeletalkotók, tőkések, magáncégek és a fogyasztói csoportok elkezdhessenek eredményesen közösen, együttműködve dolgozni.



VÉGSZÓ

Az egész világ számára biztonságos élelmiszer-ellátást nyújtani óriási és összetett kihívás. Számos területen lesz szükség előrelépéshez, ahhoz, hogy mezőgazdaság produktivitásának növelése lehetséges legyen a környezet további terhelése és még több fosszilis tüzelőanyag felhasználása nélkül. Néha azonban az égető szükség és a lehetőségek egyidejűleg jelentkeznek. A kollokvium előadásai - melyeket ez a jelentés foglal össze - azt mutatják, hogy most éppen ilyen a helyzet. Minden növény, bármilyen környezetben, a mikrobáktól függ, így minden haszonnövénynek előnyére válhat a mikroflórájának optimalizálása. Itt az idő, hogy igénybe vegyük a mikrobák képességeit és megoldjuk ezt a sürgető társadalmi problémát!