

## A növényi növekedést elősegítő baktériumok (PGPB) szerepe és legújabb tudományos eredményei a mezőgazdaságban

KOVÁCS DEZSŐ<sup>1\*</sup>, HOROTÁN KATALIN<sup>2</sup>, ORLÓCI LÁSZLÓ<sup>3</sup>, KISVARGA SZILVIA<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Magyar Agrár- és Élettudományi Egyetem, Tájépítészeti, Településtervezési és Díszkertészeti Intézet, Dísznövénytermesztési és Dendrológiai Tanszék

<sup>2</sup> Eszterházy Károly Katolikus Egyetem, Biológiai Intézet, Állattani Tanszék

<sup>3</sup> Magyar Agrár- és Élettudományi Egyetem, Tájépítészeti, Településtervezési és Díszkertészeti Intézet, Dísznövénytermesztési és Zöldfelületgazdálkodási Kutatócsoport

E-mail: kovacsdezso.zsztgy@gmail.com

### Összefoglalás

A jelenlegi mezőgazdasági és kertészeti termesztés egyre jelentősebb kihívásai közé tartozik a klímaváltozás hatásainak mérséklése, valamint az ezzel együtt fellépő fokozott peszticid és herbicid használat. Ezen tényezők miatt a növénytermesztés minősége és mennyisége egyre nehezebben tartható az elvárt magas színvonalon, ennek okán számos vizsgálat célkitűzéseiben szerepel ezek kijuttatásának mérséklése és a korszerű mezőgazdasági termesztés negatív hatásainak mérséklése, melyben a növényi növekedést elősegítő baktériumok (PGPB) és más élő szervezetek segítséget jelenthetnek. A tudományos eredmények is ezt támasztják alá, melyek az utóbbi években igen előrehaladtak ezen a területen és PGPB-k által nyújtott széleskörű alkalmazás lehetőségeiről számolnak be.

Jelenlegi munkánkban a téma tudományos eredményeit és a szakemberek témával kapcsolatos véleményét gyűjtöttük össze, kiemelten kezelve az elmúlt 3–4 év vizsgálati időszakát, melynek kiemelt témaköréit képezik a talaj-növény kapcsolatok vizsgálata, valamint a PGPB alkalmazásának lehetőségei és célcsoportjai.

Az összegyűjtött adatok alapján elmondható, hogy a növényi fejlődést elősegítő baktériumok alkalmazása egyre inkább meghatározóvá válik a mezőgazdasági alkalmazásban a világ számos pontján, ezzel együtt pedig támogatja a fenntarthatóbb, környezettudatosabb mezőgazdasági termelést kiváltva a műtrágyák és vegyszerek alkalmazását. Mivel még számos hatásmechanizmus, biokémiai és működési folyamat jelenleg is vizsgálatok tárgyát képezi, ezért a következő években várható a PGPB, a mikrobiális és egyéb növényi növekedés serkentő anyagok tekintetében egy újabb felívelő, tudományos irányvonal.

**Kulcsszavak:** PGPB, mikroba, talajmikroba, fitoremediáció, stresszválasz

---

## A növényi növekedést elősegítő baktériumok (PGPB) fogalma és jelentősége

A modern mezőgazdasági gyakorlatok az elmúlt évszázadban jelentősen megnövelték a terméshozamot, melyhez erősen hozzájárult a műtrágyák és a szintetikus eredetű növényvédőszeres kijuttatása. Ezen vegyszerek intenzív használata a jelenlegi mezőgazdasági gyakorlatban napjainkra számos igazolt környezeti problémáért tehető felelőssé, többek között ide sorolható a talajvíz szennyeződés, a talajminőség romlása és a biológiai sokféleség csökkenése is. Ezek mellett a klímaváltozással és az urbanizációval összefüggő negatív hatással bíró változások, mint amilyen például a szárazság, a hőszigetek kialakulása, a nagy mértékben szennyeződő talaj és levegő szintén veszélyt jelentenek a jelenlegi mezőgazdasági termelésre, mely azt eredményezheti, hogy már egy rövid stresszhatás – akár egy nap – is nagy kihívást jelenthet, mely együtt járhat a talajromlással és ezzel együtt a talaj mikrobiális populációinak degradációjával (Toor 2020). Ezek a változások is rávilágítanak, hogy egyre nagyobb szükség van arra, hogy a növénytermesztés választ adjon a változó kihívásokra, ez a válasz pedig hozzájárul ahhoz, hogy kielégítse a világ növekvő népességének élelmiszerszükségletét, amely egyes előrejelzések szerint 2050-re eléri a 9 milliárd főt. A jelenlegi mezőgazdasági gyakorlatok mindezek tükrében egy fenntarthatóbb és környezetbarát megközelítés felé mozdulnak el, amely mind hazai, mind nemzetközi viszonylatban egy határozott irányvonal (Toor 2020).

A növényi növekedést elősegítő baktériumok (Plant Growth Promoting Bacteria, rövidítve PGPB) olyan hasznos baktériumok, amelyek szerepe egyre inkább felértékelődik a kertészeti termelésben. Ezek a baktériumok a rhizoszférában, a talaj növények gyökereit körülvevő zónájában telepednek meg és szimbiózisban élnek a növényekkel. A PGPB különböző mechanizmusokon keresztül pozitívan befolyásolhatják a növények növekedését, így előnyökhöz juttathatják a növényeket többek között a nitrogénmegkötés, a fitohormonok termelése és a kórokozókkal szembeni szisztémás rezisztencia indukálása révén (Islam et al. 2021; Aamir et al. 2019). Nem csupán a növekedést, hanem a terméshozamot és a stressztűrést is növelhetik, melyekhez a tápanyagok elérhetőségének elősegítésével, a talajszerkezet javításával, valamint a növényi védekezési mechanizmusok fokozásával járulnak hozzá. A biztosított előnyök lehetővé teszik a szintetikus műtrágya- és növényvédőszer használat mérséklését a szükséges szer mennyiség csökkentésével. Elmondható, hogy a PGPB-ben rejlő lehetőségek alkalmazása a kertészetben fenntartható megoldásokat kínál a mezőgazdasági termelékenység növelésére, miközben minimalizálja a növényeket érő káros környezeti hatásokat.

### A PGPB főbb funkciói és hatásmechanizmusa

A növénytermesztés elengedhetetlen alappillére a talaj, mely egy részben megújuló energiaforrásként jellemezhető, szerkezeti tulajdonságain túl pedig élőlényekben gazdag környezet. A talaj a legváltozatosabb és legnagyobb számú mikrobiális közösségekkel rendelkezik más biomokhoz viszonyítva, ezek a közösségek pedig kolonizálják a talajt és nem csak egymással, hanem növény- és állatfajokkal egyaránt kapcsolatot teremtenek (Younas et al. 2022; Jansson és Hofmockel 2020). A növények optimális fejlődésének és az ezzel kapcsolatos mutatószámok (pl. termés mennyiség) fenntartásához elengedhetetlen a megfelelő kapcsolat biztosítása a növények és a talaj mikroorganizmusai között, ennek oka abban keresendő, hogy a tápanyagciklus kulcsfontosságú szabályozói (Younas et al. 2022). Ezt támasztják alá az újabb kutatások, melyek a hasznos növény-

mikrobák integrációját javasolják a természetes mikrobiomhoz kapcsolódva (Kumar és Singh 2020; Younas et al. 2022).

A PGPB baktériumok fő hatásaiaként említhetők, hogy képesek elősegíteni a növények növekedését, és promotálják a növényi betegségekkel szembeni ellenállóképeséget és a talajban jelentkező abiotikus stressz kezelését is bakteriális fitohormonok és kapcsolódó metabolitok termelésével, valamint általuk kiváltott előnyös gyökérmorfológiai változások révén (Goswami és Suresh 2020; Kouas et al. 2020). Támogatják a növény növekedését miközben csökkentik a patogén gombák, vírusok, fonálférgek és baktériumok által okozott betegségek megjelenésének kockázatát (Bhateria és Kumar 2022). A növény-mikróba kapcsolatra további példa lehet az abiotikus és biotikus stressz elleni védelem, valamint az indukált növekedés és fejlődés támogatása (Mahadevakumar és Sridhar 2020), de ide sorolható a hormonszint szabályozása, a nitrogénfelvétel támogatása, antioxidáns védelmi rendszer, különböző másodlagos metabolitok és szideforok termelése is (Khanna et al. 2020).

A PGPB mellett külön említést kell tennünk a növényi növekedést elősegítő rhizobaktériumokról (PGPR), melyek a PGPB baktériumok egy alcsoportjaként írhatók le. A PGPR hatásmechanizmusa hasonló, mint a PGPB baktériumok esetében leírtak, azonban működésük szorosan a rhizoszférához kapcsolódik. A PGPR bevezetése a mezőgazdasági termelési rendszerbe a növényi növekedés szabályozásában és az abiotikus stresszkezelésben való hatékonysága miatt jövedelmező alternatíva lehet (Goswami és Suresh 2020; Das et al. 2022) és alkalmazása az egyik legígéretesebb módszer a növények növekedésének és terméshozamának fenntartható, környezetbarát módon történő javítására (Etesami 2020).

A talajmikrobiomokat a soron következő „zöld forradalom” sarokköveként tartják számon, melynek egyik kritikus jelentőségű pontja a növényi növekedést elősegítő baktériumok alkalmazása és felhasználása a mezőgazdasági célú mikrobiom tervezésében (Chen et al. 2022; Khalil és Shinwari 2022; Ma 2019), melyek közül kiemelkedő jelentőségű PGPB csoportok például a *Paenibacillus*, *Azospirillum*, *Rhizobium*, *Bacillus*, *Azotobacter*, *Klebsiella*, *Pseudomonas* és *Serratia* (Rahman et al. 2021). A továbbiakban a PGPB baktériumok fontosabb hatásait tárgyaljuk (1. ábra).

1. ábra. PGPB kiemelt hatáscsoportjai

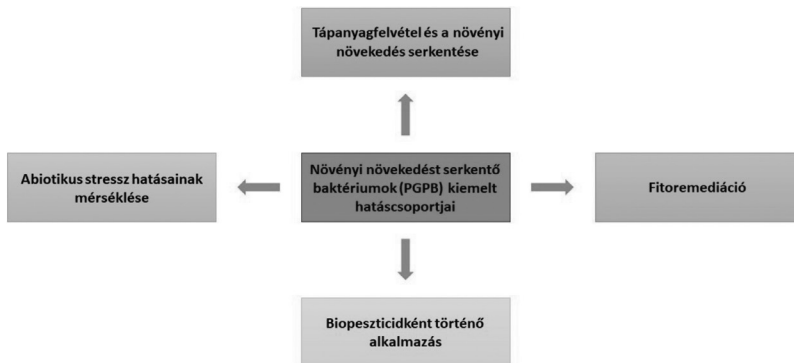


Figure 1. PGPB key impact groups

---

Az éghajlatváltozás és szélsőségei, valamint a világ népesség növekedéséből eredő változások (pl. tájhasználat változás) tartós nyomás alá helyezik a mezőgazdasági termelést, melyet enyhíthet a növények és a mikrobák közötti kapcsolat minél pontosabb meghatározása, feltárása és értelmezése, ami hozzájárulhat a negatív hatások mérséklésében, így például támogatva a növényeket az abiotikus stresszel szemben (Bhateria és Kumar 2022; Mushtaq Rawat 2021). Az éghajlatváltozás eredményeként az uralkodó környezeti feltételek módosulása, mintegy láncreakció fogható fel, mely változásokat idéz elő a növényi szervezetben, így hatással van élettani folyamataira, a környezeti változásokra adott reakcióira, a gyökérválradékok kiválasztására, ezen felül hatást gyakorol a C/N arányra, a talaj mikrobiális közösségeinek abundanciájára, összetételére és diverzitására is (Wahid et al. 2020). A mikrobák tehát nélkülözhetetlen szerepet játszanak a klímaváltozás és az abiotikus stressz mérséklésében (Cabral et al. 2021; Aamir et al. 2019; Padder et al. 2021), több szinten működő mechanizmusrendszeren keresztül, ezáltal megkönnyítve a szomszédos növénypopulációk közötti együttélést is (Aamir et al. 2019).

A PGPB baktériumok bizonyos törzseinek speciális talaj- és éghajlati viszonyok közötti alkalmazása hozzájárulhat ahhoz, hogy jobban megértsük, mely törzsek alkalmasak fajspecifikus növénytermesztésre az abiotikus tényezők függvényében (Katsenios et al. 2022), ezen vizsgálatok eredményeként már számos új baktériumtörzs alkalmassá lett nyilvánítva a PGPB-ként való hasznosításra (Walker et al. 2020). A PGPB-ként jelölt törzs jellegzetes potenciáljának kiaknázásában, hogy képes legyen enyhíteni az abiotikus stressz negatív hatását a növényekben, a törzsspecifitás döntő szerepet játszik (Sharma et al. 2021).

A növények környezeti stresszel szembeni ellenállóképességének kérdése folyamatosan központi elemét képezte a kutatásoknak (Imam et al. 2016), amelyhez a mikrobák - beleértve a rizoszférikus és endofita mikroorganizmusokat is - nagyban hozzájárulnak. A növények és a mikrobák kölcsönhatása megjelenik növényélettani mechanizmusok szabályozásában is, hiszen egy ideális kölcsönhatás esetén a növények az abiotikus stresszhatásokkal szemben fokozott védelmet élvezhetnek (Bhateria és Kumar 2022). Kimutatták, hogy a növények stressztűrő képességét fokozza bizonyos mikroorganizmusokkal való társulás, ez pedig környezeti stressztűrő növényfajták nemesítésében is nagy előrelépést jelenthet (Agrahari et al. 2020; Sharma et al. 2021). Több tanulmány kiemelte, hogy a mikrobák és a haszonnövények együttélése kiemelkedő szerepet játszik a nem optimális termőhelyhez való alkalmazkodásban, fennmaradásban és túlélésében, valamint a talaj egészségi állapotának megőrzésében, akár kombinált abiotikus stressz esetén (mint például aszály, sótartalom, UV-sugárzás, nehézfém-szennyeződés) is, miközben a növények biokémiai, fiziológiai és molekuláris folyamatai változásának szabályozásába is bekapcsolódnak (Sharma et al. 2021; Bhateria és Kumar 2022).

Számos rhizobaktériumról kimutatták például, hogy ACC-deamináz enzimet termel, amely fiziológiai és biokémiai változások sorát indítja el a növényben, ezáltal segítve az abiotikus stressz hatásainak kivédését (Sharma et al. 2021). Ebben a rendszerbe számos szignálmolekula kapcsolódik be, melyek másodlagos metabolitokként a gyökér- és hajtásválradékokban lelhetők fel, feladatuk pedig nem más, mint a növény immunitásának támogatása, mely megfelelő mikrobiom esetén hatványozottan teljesül (Singh et al. 2019).

A természetes mikrobiális egyensúly sok esetben veszélyeztetettnek tekinthető, mely nem csak a mezőgazdaságra, hanem a települések zöldfelületgazdálkodási rendszereire vonatkozóan is

kérdéseket vet fel, hiszen ezeken a területeken szintén felértékelődik a talaj és ezáltal a növényzet mikrobiális úton történő támogatása. A PGPB baktériumokat alkalmasnak találták arra, hogy támogassák a települési talaj- és légszennyezés mérséklését és elősegítsék a növények szennyező anyagokkal szembeni alkalmazkodóképességének javítását is. Ez történhet közvetetten az ultrafinom részecskék, szénvegyületek és a légköri szénhidrogének lebontásával, vagy közvetlenül a növényi életfolyamatokra való hatással (Perreault és Laforest-Lapointe 2022).

### **Tápanyagfelvétel és a növényi növekedés serkentése**

A PGPB baktériumokat már 1980 óta célzottan tanulmányozzák, mint a műtrágyákat kiváltó mezőgazdasági technológiát, a fenntartható termés hozam növelésére (Rilling et al. 2019). Ennek alapját az képezi, hogy kimutatható módon növelhetik a termésmennyiséget, a tápanyagtartalmat, valamint visszaszoríthatják a károsítók támadását (Ramakrishna et al. 2019; Pellegrini et al. 2020; Kumar és Singh 2020). Ezeken túlmenően elősegítik a növényi szervezetben a vitaminok, fitohormonok és növekedésszabályozók termelését is (Rahman et al. 2021), valamint ezek koncentrációjára is hatással vannak (Nascimento et al. 2019).

Nagy kihívást jelent a növények növekedésének és fejlődésének fenntartható úton való fokozása – erre pedig jó útvonal lehet a talaj PGPB baktériumokkal való beoltása is (Kumar és Verna 2018). A PGPB alkalmazásának hatékonysága attól függ, hogy képesek-e megtelepedni egy adott, akár leromlott környezetben, valamint fel tudják-e venni a versenyt a természetes úton ott élő növényi mikroorganizmusokkal mezőgazdasági körülmények között és kellő mennyiségben képesek-e felszaporodni és kifejteni hatásukat (Rilling et al. 2019). A vizsgálatok eredményeként az elmúlt évek során számos PGPB törzset izoláltak és tanulmányoztak, mely alkalmas lehet erre a célra, mindazonáltal csak néhány került kereskedelmi forgalomba. Ennek oka a baktériumok kis számban történő vagy teljesen sikertelen túlélése az agroökoszisztémákban való alkalmazást követően (Pellegrini et al. 2020). A tanulmányokban megjelenő eredmények is ezt a kettőséget mutatják, tehát számos esetben az alkalmazott PGPB törzsek nagy számban eliminálódnak a talajban, míg más esetekben oltóanyagként történő alkalmazásuk jelentősen javítja a növények növekedését (Chen et al. 2022). Ennek monitorozására és a PGPB baktériumok nyomon követésére riportergéneken, immunológiai reakciókon és nukleinsavakon alapuló módszereket alkalmaznak a magvakban, talajokban vagy növényekben (Rilling et al. 2019).

Számos különböző kísérleti megközelítést alkalmaztak a talajbaktériumok és növények közötti kölcsönhatások feltárására, ezen módszerek némelyike a növény változásaira összpontosít, míg mások a PGPB baktériumok fiziológiájának és biokémiai folyamatainak megismerésére irányulnak (Gamalero et al. 2022). Ezek a vizsgálatok mutattak rá arra, hogy a PGPB különböző biostimulátor csoportokkal együtt alkalmazva is hatékony lehet, így a már említett PGPR baktériumok és a huminsav kombinációja versenylónyként jelenhet meg a jövőbeni kereskedelmi PGPB-ipar számára (Vasseur-Coronado et al. 2021).

A legújabb eredmények számos PGPB baktériumként alkalmazott törzs hatékonyságára hívják fel a figyelmet, melyek a mezőgazdaság számára alkalmazhatók lehetnek. Erre példa lehet a *Lysinibacillus* GIC41 törzse, mely jelentősen növelte spenótnövényeken a hajtáshossz száraztömegét, továbbá növelte a vitalitást, összevetve az ezzel korreláló mennyiségben alkalmazott műtrágyával (Ahsan

---

et al. 2021). Az *Enterobacter* 15S baktériumtörzssel való beoltásra adott növényi növekedési válaszok specifikus foszforellátás mellett a kukorica (mint egyszikű modellnövény) és az uborka (mint kétszikű modellnövény) növények között eltérő eredményeket mutattak ki. A 15S baktériumtörzs arra készítette az uborkanövényeket, hogy megbirkózzanak a foszforhiánnyal az oldhatatlan foszfor szolubilizálásával. Ez a folyamat a gyökérstruktúra változását, az ásványi tápanyagfelvétel, a fenolok és flavonoidok gyökérszövetből való kiürülését eredményezte, továbbá a foszforéhezés által indukálható foszforszint növekedéséhez vezetett Pi transzporter gének segítségével (Zuluaga et al. 2021). A kukorica esetében a *Bacillus mojavensis* 16%-al, a *B. subtilis* 13,8%-al, a *B. pumilus* 11,8%-al és a *B. pseudomycooides* 9,8%-al növelte meg a termést a kontroll csoporthoz képest. Ezen kívül a *B. mojavensis*, *B. subtilis* és *B. pumilus* törzsekkel kezelt növények betakarított szemei mutatták a legmagasabb fehérje- és rosttartalmat. Ezen túlmenően a legtöbb esetben a fotoszintetikus sebesség, a transzspirációs sebesség és a sztóma konduktancia magas értéke magas hozamot eredményezett (Katsenios et al. 2022).

A *Bacillus* törzsek egy része a rizstermesztésben is alkalmazható, ezen kívül a *Pseudomonas*, *Enterobacter*, *Streptomyces* baktériumtörzsek is segíthetik a rizsnövények egészségi állapotának javítását és fenntartását, amely szintén a megfelelő tápanyagfelvételt és a növényi növekedés elősegítését eredményezi (Ngalimat et al. 2021).

Egy másik, kukoricával végzett kísérlet sorozatban a rizoszférához kapcsolódó natív baktériumokat vizsgálták, mely során megállapították, hogy a *Bacillus* sp. (13B41), *Advenella incenata* (22A67), *Pantoea dispersa* (22B45) és *Rhizobium pusense* (31B11) törzsek képesek voltak indolokat szintetizálni és szideroforokat termelni. E törzsek kukoricánövényekre történő egyedi beoltása jelentős növekedést mutatott a nem oltott növényekhez képes több eltérő paraméter esetén, így a magasságban (35-40%), a hajtás száraz tömegében (244-289%), a gyökér száraz tömegében (99-137%), és SPAD értékben (40-47%). A mért eredmények alapján arra a következtetésre jutottak, hogy a vizsgált baktériumok a későbbiekben alkalmasak lehetnek szántóföldi kísérleteknél is (Aviles et al. 2022), de a növényházi zöldségtermesztésben is sikerrel alkalmazhatók (Fusco et al. 2022).

### **Fitoremediáció**

A talaj nehézfémekkel és szerves szennyeződésekkel való szennyezettsége globális környezeti problémává vált (Ma 2019; Xiang et al. 2022; Hansda et al. 2022), melyhez nagy mértékben hozzájárul az antropogén eredetű vegyi anyag kibocsátás (Bhandari és Bhatt 2020; Islam et al. 2021). A fitoremediáció egyike azon bioremediációs módszereknek, melyek lehetővé teszik a különböző szennyező anyagok – elsősorban nehézfémek - talajból történő kivonását (Kong et al. 2019). A nehézfémek talajból, üledékekből vagy vízből történő eltávolítására, olyan növényeket alkalmaznak, melyek ezeket nagy mennyiségben képesek megkötni, így elsősorban mérgező vegyszereket vesznek fel a talajból és a közvetlen környezetükből (Bhandari és Bhatt 2020; Ma 2019). Ez olyan folyamatokon keresztül valósul meg, mint a szideroforok, szerves savak és biofelületaktív anyagok előállítás, a biometilezés, a redox folyamatok, a foszfor szolubilizáció, a nitrogén- és vasmegkötés (Islam et al. 2021).

A kizárólag növények felhasználásával végzett fitoremediációs folyamat időigényes, és nagy koncentrációjú szennyezőanyag esetén a fémfelvétel gátlódhat (Hansda et al. 2022; Ma 2019), azonban a fenntarthatósági célok mellett alkalmazásuk elengedhetetlen, jelentőségük pedig a riasztó

számadatok tükrében még inkább felértékelődik: Kínában például évente 47 ezer hektár terület válik ember által szennyezetté.

A fitoremediációs folyamatok támogatásában a növény-mikroba kölcsönhatások a már bemutatott biztosított előnyöknek köszönhetően fontos szerepet játszanak, így elősegítik a növények fémekkel szennyezett környezetéhez való alkalmazkodását, a növekedés stimulálását, mely hatások a fitoremediáció felgyorsítását is elősegítik (Ma 2019). Azonban ki kell térnünk arra, hogy a mikrobák által támogatott fitoremediáció hatékonyságát bizonyos tényezők hátráltatják, ilyen lehet például a másodlagos toxinok magas koncentrációja és ezek bomlásának hiánya, valamint az esetleges tápanyaghiány vagy a felvétel gátlása (Xiang et al. 2022).

A fitoremediációs hatások előtt még hosszú kutatási út áll, azonban a témában már több eredmény született és áll rendelkezésünkre az utóbbi időszakból. Phares et al. (2022) mérései alapján a kukoricatermesztésben a *Pseudomonas* bizonyos törzseit bevonva csökkenthető a kijuttatott NPK műtrágya mennyisége, Ummara et al. (2022) eredményei szerint pedig a PGPB baktériumok alkalmazása kukoricánál a dízelolaj túrést is fokozza. A *Citrobacter freundii* LMG 3246 törzs, a *Citrobacter braakii* DSM 17596 és G5 törzs PGPB-ként kompatibilis, és biotrágyaként számos területen alkalmazható, mivel a növények vitalitását fokozzák így fitoremediációs hatásukat támogatják (Denaya et al. 2021).

A nehézfém-bányászati zagyok körüli, rézzel szennyezett mezőgazdasági területeken termelt repce állományokban kimutatták, hogy a fémrezisztens PGPB baktériumtörzsek növelték a repce biomasszáját és a teljes rézfelvétel mennyiségét. A *Microbacterium oxydans* JYC17, a *Pseudomonas thivervalensis* Y1-3-9 és az *Escherichia coli* J62 tesztbaktériumtörzsek jó növekedést serkentő képességgel rendelkeztek, kolonizálták és megváltoztatták a repce rhizoszférájának és endoszférájának bakteriális összetételét. Ezzel párhuzamosan növelték a repce aszkorbinsav és glutation tartalmát és csökkentették a nehézfémek okozta oxidatív stresszt. A fenti eredmények azt mutatják, hogy a JYC17, Y1-3-9 baktériumtörzsek a repcével megfelelően alkalmazhatók a fitoremediációban is (Ren et al. 2019). A PGPB baktériumok alkalmazása arzénszennyeződés mérséklésére is alkalmas lehet (Abedi és Mojiri 2019).

A nehézfém-tartalom mellett a talaj só-tartalmának növekedése, valamint az ehhez köthető elszikesedési folyamat gyorsulása és területi hányadának kiterjedése várható az elkövetkező években, mely gátat vehet a fenntartható mezőgazdasági termelés számára, hiszen az emelkedett só-tartalom drasztikusan befolyásolja a mikrobiális aktivitást (Bhateria és Kumar 2022).

A PGPB baktériumoknak különféle mechanizmusait írták le a növények túlélésének javítására nagyobb só-tartalmú körülmények között (Mishra et al. 2021), ennek okán például megnövekedett cukortermelést, pigment- és aszkorbinsav mennyiséget is eredményezhetnek a szikes területen nevelt növényeknél (Rahman et al. 2021).

A só-tartalom emelkedése mellett számottevő probléma az elsivatagosodás. Zheng et al. (2023) megállapította, hogy sziklás, elsivatagosodott területeken a cserjék és gyógynövények fajösszetételét a talaj mikrobiológiai összetétele szignifikánsan befolyásolja. A baktériumok közül a *Verrucomicrobium* sp. relatív abundanciája alacsony volt, de szignifikánsan korrelált a száraz talaj tulajdonságaival. A MetaCyc útvonal elemzése során megállapításra került, hogy a metabolikus baktériumok a legnagyobb relatív abundanciával rendelkeznek a sziklás, elsivatagosodó területeken.

---

A sótürrő PGPB baktériumtörzsek molekuláris mechanizmusaival kapcsolatos ismereteink a sóstressz enyhítésére további széleskörű kutatást igényelnek, azonban elmondható, hogy a halofil PGPB baktériumok fenntartható megoldást jelenthetnek a szikes talajok termelékenységének javítására, és segíthetnek elérni az élelmezésbiztonsággal és az agrár-ökoszisztémák elsivatagosodásának megfékezésével kapcsolatos célkitűzéseket (Mishra et al. 2021).

### **Biopeszticid hatás**

A közelmúltban a kutatások a gazda-kórokozó kölcsönhatások komplex molekuláris mechanizmusainak megértésére irányultak, ezzel együtt a mikroba alapú műtrágyák (bioprotektánsok), fito-fertőtlenítők kifejlesztésére, a rhizoszféra mikrobiális működésének elősegítésére a hatékonyabb tápanyagfelvétel és a betegségek elleni küzdelem érdekében (Mahadevakumar és Sridhar 2020). A talaj mikroorganizmusainak alkalmazása gazdaságilag hatékony megoldást biztosíthat a növényvédelemben, miközben a hagyományos módszereket biológiai módszerekkel helyettesítik (Khanna et al. 2020). Elmondhatjuk, hogy a PGPB baktériumok alkalmazása összhangban áll az ökológiai fenntarthatóság és az integrált növényvédelem elveivel, beleértve a szintetikus peszticidek alkalmazásának csökkentését is.

A PGPB biopeszticidként való alkalmazása is igen árnyalt képet mutat a jelenlegi kutatások eredményei alapján, mivel bizonyos esetekben az alkalmazott baktériumfajok közvetlen hatást gyakorolnak a növényi kórokozókra és parazitákra, mely jelentkezik kompetícióban és bioaktív vegyületek felszabadulásában egyaránt (Ruiu 2020; Kloock et al. 2020). Ebben az irányban a *Bacillus*, a *Paenibacillus*, a *Brevibacillus*, a *Pseudomonas*, a *Serratia*, a *Burkholderia* és a *Streptomyces* fajok több tanulmány tárgyát képezték és képezik jelenleg is, melyek célja, hogy a biológiai védekezésben való felhasználásuk további szintjeit tárják fel, melyek a jövőre nézve alkalmazhatóak lehetnek (Ruiu 2020). A rhizoszféra jótékony mikroorganizmusai a növények számára kórokozónak minősülő mikroorganizmusok hatását mérséklik, több esetben kolonizálják azokat és működésüket gátolják, mindeközben növelik a növény stressztűrő képességét - stimulálják az ISR-t (Induced Systemic Resistance, magyarul: indukált szisztémás rezisztencia). A PGPB, mint bio oltóanyag azonban bizonyos körülmények között nem képes kompetitív módon kolonizálni a rhizoszférát, ebből adódóan a PGPB biofilm készítmények, mint a bioinokuláns fejlesztés egyik stratégiai elemei, nem képesek az *in vivo* hatások leküzdésére. A sikeres alkalmazás érdekében meg kell értenünk a PGPB baktériumok biofilmen belüli kommunikációs útvonalait, mely eltérő módon jelentkezik a növényekkel és más mikroorganizmusokkal szemben. Ez a molekuláris jeleken keresztül végbemenő kommunikáció minél pontosabb feltárása fontos lépés a megfelelő biopeszticidek kifejlesztéséhez vezető úton (Ajijah et al. 2023).

### **A PGPB hatáskörének növelési lehetőségei és korlátai**

A növényekhez kapcsolódó hasznos mikrobákat széles körben használják olyan mikrobiális konzorciumok kifejlesztésére, amelyek közvetlenül a növényekre és a talajra is hatnak (Agrahari et al. 2020). A növény-mikroba kölcsönhatások közvetítésében részt vevő molekulák és gének azonosítása utat nyithat a növénytermesztés folyamatának javítására és a metabolitok által közvetített növény-mikroba kölcsönhatások manipulálására is (Yu et al. 2022) (2. ábra).



2. ábra. A PGPB-ék által biztosított előnyök és gátló tényezők

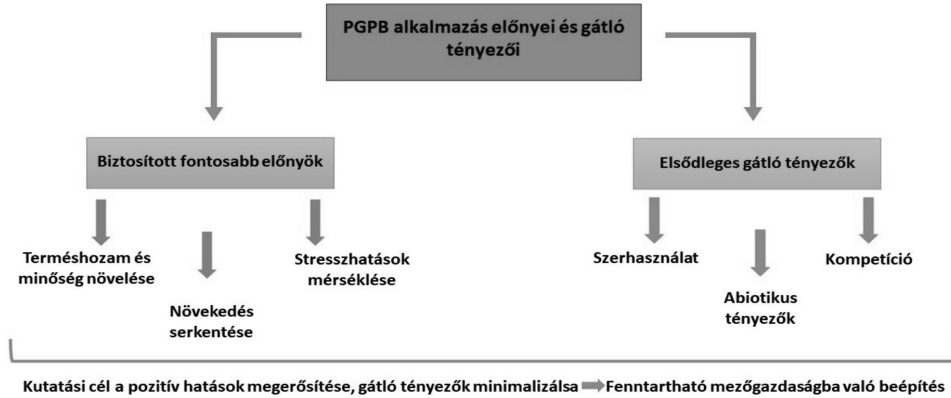


Figure 2. Benefits and limitations of PGPBs

A növények PGPB baktériumokra való reagálásáról szóló tanulmányok célja olyan biztonságos és hatékony bakteriális oltóanyagok kifejlesztése, amelyek segítségével a legkülönbözőbb környezeti feltételek mellett mégis nagy léptékben elősegíthető a növények optimális fejlődése (Gamalero et al. 2022). Ezek eredményeként egyre több kutatás ad tájékoztatást arról, hogy mely anyagok alkalmasak PGPB alkalmazásának támogatására és ezzel együtt hatásfokuk növelésére. Chen et al. (2022) kutatásaikban megállapították, a PGPB növényi növekedésre kifejtett hatását vizsgálták, melynek egyik lehetséges útjaként a gyökerekben DNS-metilációra való hatást írták le. Ez az eredmény is arra enged következtetni, hogy a mikrobiom-növény kölcsönhatások mechanizmusának mélyebb szintű megértése új stratégiák életre hívását teszi lehetővé, mely magában foglalja a növényi mikrobiom mérnöki alkalmazását is.

A kutatások azonban nem kizárólag genetikai, hanem növényélettani folyamatokat is érintenek, melynek egyik iránya a kumarinok, növényi eredetű másodlagos metabolitok, vizsgálata. Ezeket a gyökérszövet termeli és választja ki, vasmobilizáló hatással rendelkeznek. A vasfelvételben betöltött szerepük mellett tanulmányozták, hogy képesek-e leküzdeni a fertőzéseket az élőszervezetekben, s ezáltal hatékony támogatói lehetnek-e a PGPB baktériumoknak biopeszticidként és tápanyagfelvételt elősegítőként az együttes alkalmazás esetén. Stringlis et al. (2019) kimutatta, hogy a kumarin kiváló antimikrobiális és vírusölő hatással rendelkezik, ami arra enged következtetni, hogy a jövőben is alkalmazható lehet.

Egy másik élettani folyamat, mely egyre több kutató érdeklődését váltotta ki a melatonin szintézise, ennek egyik oka az, hogy 21. század egyik nagy felfedezése volt, hogy ez a folyamat a növényekben is lejátszik, mely mellé egy szabályozó szerep is társul, ami hatással lehet a magok csírázására, a növények fejlődésére, az öregedési folyamatok késleltetésére, ezeken túl pedig bekapcsolódik az abiotikus stresszhatások kivédésébe is. A felsorolt tulajdonságai alapján biostimulátorként is alkalmazásra kerül,

---

azonban az elmúlt években a kutatások a PGPB baktériumokkal való kölcsönhatásait is elkezdtek vizsgálni. 2021-ben kimutatták, hogy a melatonin támogatja a növényi PGPB kapcsolatokat a biotikus és abiotikus stresszorokkal szemben, ezáltal is növelve a növény stressztűrő képességét (Posmyk és Janas 2009). Azonban a PGPB-vel történő együttes alkalmazás és a biztosított előnyök mellett az élelmiszcélú növények termesztésénél figyelembe kell venni a melatonin lebomlási idejét, mert nagy mennyiségben toxikus hatással is bírhat (Arnao és Hernández-Ruiz 2021).

A növényi szervezet által termelt fitohormonok, mint például az etilén (ET), a szalicilsav (SA) és az indol-3-ecetsav (IAA), szabályozzák a növények növekedését és fejlődését, valamint a növény-mikroba kölcsönhatásokat is. Az ezeket lebontó baktériumok megismerése és alkalmazása szintén kulcsfontosságú a növények növekedését és védelmét célzó újszerű megoldások kidolgozásában. A fitohormon koncentrációkat módosító képesség fontos szerepet játszik a baktériumok kolonizációjában és a növények növekedését elősegítő képességekben (Nascimento et al. 2019). A vizsgálatok azt mutatják, hogy a DBD (dielectric-barrier-discharge) plazma, amely egy igen hatékony módszere a fenotípusos tulajdonságok javításának napjainkban, felgyorsíthatja a CB-R05 baktériumok fejlődését és aktivitását, a megnövekedett bakteriális vitalitás pedig javítja a kolonizációt a növény gyökereiben és megemeli a fitohormonok szintjét, ami a növények növekedésének, termés hozamának és toleranciájának fokozásához vezet (Ji et al. 2019).

A PGPB hatáskörének növelésére nem csupán a növények élettani folyamatai vagy azok termékei képesek, hanem más vegyületek is felhasználhatók erre a célra, így az előnyös hatásokat kémiai elemekkel is lehet növelni, támogatni. A szelén napjainkban egy igen nagy arányban kutatott elem a mezőgazdaságban (Mora et al. 2015), mivel exogén alkalmazása szelénben szegény területeken a terméshozam emelkedést, a termésminőség és a stressztűrés javítását segíti elő (Guo et al. 2023). Több *Brassica oleracea* fajtánál a talajból izolált *Nocardioopsis* baktériumtörzset szelénrel alkalmazva a kezelt növények nagymértékben ellenálltak az abiotikus stresszhatásoknak (AbdElgawad et al. 2023). Míg *Brassica juncea*, *Lactuca sativa* és *Beta vulgaris* esetében a növények növekedésére az *Exiguobacterium* sp. S17-es törzsével szinergiában fejtett ki pozitív hatást (Marfetán et al. 2023).

Egy másik vegyület, a pirogénsav (PA), ami mezőgazdasági termelésben gyakran alkalmazott növény-növekedés- és termésfokozóként ismert, szintén alkalmazható a PGPB-vel együttesen. Ebben az esetben az alacsonyabb pirogénsav (PA)-koncentráció mellett pozitívan jelentkezik hatásuk, jobb talajminőségben, melyet fokozott növény-növekedés és hozam jelez. A pirogénsav (PA) magasabb koncentrációja (5%) elősegítheti baktériumnemzetségek - például a *Bacillus* törzs - felszaporodását, melyek a védekezésben, így például a kórokozó baktériumok számának csökkentésében és a kártevők elleni védekezésben is felelős (Sivaram et al. 2022). Ilyen hatással rendelkezik például a fokhagyma (Hayat et al. 2022) és az allelopátiás növények is (Kocira et al. 2022).

Számos kutatás folyik a natív baktériumtörzsek PGPB-ként való alkalmazásával kapcsolatosan is. *Sinorhizobium* baktériumtörzseket babnövények rhizoszférájába oltva kimutathatóan hatékonyan bizonyult a növényfejlődés elősegítésében (Manzano-Gómez et al. 2023). Kukorica növények esetében a *Bacillus* sp. (13B41), *Advenella incenata* (22A67), *Pantoea dispersa* (22B45) és *Rhizobium pusense* (31B11) törzsek segítették elő az optimális fejlődést.

### A PGPB hatásmechanizmusainak monitorozási módszerei

A PGPB baktériumok monitorozása kiemelt szerepet játszik a mezőgazdasági gazdálkodásban azáltal, hogy felméri a PGPB oltóanyagok hatékonyságát a növények növekedésének és egészségének elősegítésében. A monitorozás különféle technikákat foglal magában, beleértve a molekuláris biológiai módszereket, például a kvantitatív PCR-t és a nagy áteresztőképességű szekvenálást, továbbá a funkcionális vizsgálatokat az olyan specifikus tulajdonságok értékelésére, mint a nitrogénkötés, a foszfát-szolubilizáció és a fitohormonok termelése. A rizoszférában a PGPB mennyiségének, sokféleségének és aktivitásának nyomon követésével a kutatók és a gazdálkodók optimalizálhatják a biotrágya alkalmazás módjait, javíthatják a termés hozamot és minimalizálhatják a negatív környezeti hatásokat, hozzájárulva a fenntartható mezőgazdasági gyakorlatokhoz.

A PGPB nyomon követésére és monitorozására szolgáló módszereket általában három fő kategóriába sorolják: I) riportergén-alapú módszerek, II) immunológiai módszerek és III) nukleinsav-alapú módszerek. Az eljárástól függetlenül azonban a megfelelő módszer kiválasztásánál figyelembe kell venni annak relatív környezeti biztonságát, reprodukálhatóságát, érzékenységet, költségeit és időfelhasználását is (Rilling et al. 2019).

A nyomkövetési módszereket alkalmazó vizsgálatok alacsony száma főként a beoltott PGPB aktivitásának lokalizálására, megszámlálására és értékelésére szolgáló hatékony, olcsó és gyors módszer korlátozott elérhetőségére vezethető vissza. Emiatt az ilyen mikroorganizmusok növényekre gyakorolt hatását általában a növényi biomassza és növényélettani paraméterek mérésével értékelték anélkül, hogy az eredmények egyértelműen megerősítenék a baktériumok kolonizáló képességét, s ezt már az 1990-es években elkezdték felülvizsgálni (Rilling et al. 2021). Ivnitski et al. (1999) a beoltott baktériumok legalább sejtszinten történő monitorozását javasolták az életképes és nem életképes sejtek megkülönböztetésével, minimális mennyiségű reagens használatával, automatizált módszerrel. Ezenkívül Rattray és Simington (1995) roncsolásmentes módszerek kidolgozásának szükségességét javasolta a PGPB *in planta* vizsgálatához.

Ma már lehetőség nyílik a nem génszerkesztett technikákkal történő monitorozásra is. A különféle baktériumtörzsek monitorozására alkalmazott jelölések és technikák közé tartozik a lacZ gén, a gusA gén, a luxAB gének, a fluoreszcens *in situ* hibridizáció és a kvantitatív PCR. Míg ezek a technikák meglehetősen jól működnek laboratóriumi körülmények között, hatékonyságuk terepi körülmények között kevésbé biztosított. A laboratóriumi megközelítések alkalmazásakor esetlegesen fennálló korlátok és korlátok megkerülése érdekében a megfelelő monitorozáshoz szükséges azonosítani a PGPB baktériumtörzsek CRISPR-lókuszeit, amelyek rövid, palindrom ismétlődések, s amelyeket rövid spacer szekvenciák tarkítanak. Ezek a szekvenciák azonosíthatók, mivel sok PGPB baktériumtörzs teljes DNS-állománya ismert. Miután ezzel a PGPB törzsből a szekvenciák azonosítása megtörtént, lehetőség nyílik az egyedi, törzsön belüli egységek specifikációjára is. Ezzel az eljárással tehát nem szükséges jelölni vagy szerkeszteni a PGPB törzs géneit, azok természetes módon alkalmazhatók és könnyen monitorozhatók, nyomon követhetők (Gamalero et al. 2022).

---

## Összefoglalás

A talaj-mikrobiom kapcsolatának vizsgálata és feltárása korunk igen fontos és gyorsan fejlődő tudományterülete, melyet számos kutatási eredmény is alátámaszt, miközben újabban ezt a területet célzó kutatások látnak napvilágot. Ennek képezi részét a PGPB baktériumok vizsgálata, mivel széles körben való alkalmazásuk megoldást jelenthet a fenntartható mezőgazdasági termelés kihívásaira és akár az erre való részbeni és később teljes átállásra is. A PGPB alkalmazásával csökkenhet a műtrágyák és a peszticidek, herbicidek kijutatott össz mennyisége, s ezzel pedig hozzájárulhatunk a környezeti terhelés csökkenéséhez is. A kutatások másik irányát tekintve elmondható, hogy egyre több baktériumtörzs esetében kerül bizonyításra, hogy alkalmasak PBPG-ként való használatra. Az ezt célzó kutatások száma évről évre nő, mely előrevetíti a témában rejlő lehetőséget.

A gyomirtószerek és műtrágyák túlzott használata, a klímaváltozás miatti fokozódó stresszhatások és környezeti változások miatt is fontossá válik a PGPB magasabb arányú alkalmazása és hatásainak feltárása, akár növénycsoport specifikusan is. Ezen alkalmazás egyik iránya lehet a fitoremediáció is, mely folyamatát a PGPB támogathatja, mivel számos talaj-növény kapcsolat alkalmas arra, hogy kiszűrje, lebontsa a talajba került szennyező vegyületeket. A téma kutatása tehát fontos és folyamatos – s a PGPB alkalmazásával és kutatásával utat teremthetünk egy fenntarthatóbb jövő kiépítésében.

## Köszönetnyilvánítás

A kutatás a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Hivatal „A körforgásos gazdaság megvalósíthatósága a honvédelmi tevékenységek során” című, TKP2021-NVA-22 azonosítószámú Tématerületi Kiválósági Program támogatásával valósult meg, a Körforgásos Gazdaság Elemző Központ (KGEK) vezetésével.

## Felhasznált irodalom

1. Aamir, M., Rai, K.K., Dubey, M.K., Zehra, A., Tripathi, Y.N., Divyanshu, K. and Upadhyay, R.S. 2019. Impact of climate change on soil carbon exchange, ecosystem dynamics, and plant-microbe interactions. In *Climate change and agricultural ecosystems*. Woodhead Publishing, 379-413.
2. AbdElgawad, H., Magdy Korany, S., Reyad, A.M., Zahid, I., Akhter, N., Alsharif, E. and Crecchio, C. 2023. Synergistic impacts of plant-growth-promoting bacteria and selenium nanoparticles on improving the nutritional value and biological activities of three cultivars of Brassica sprouts. *ACS omega*, 8(29): 26414-26424.
3. Abedi, T. and Mojiri, A. 2019. Constructed wetland modified by biochar/zeolite addition for enhanced wastewater treatment. *Environmental Technology & Innovation*, 16: 100472.
4. Agrahari, R.K., Singh, P., Koyama, H. and Panda, S.K. 2020. Plant-microbe interactions for sustainable agriculture in the postgenomic era. *Current Genomics*, 21(3): 168-178.
5. Ahsan, N., Marian, M., Suga, H. and Shimizu, M. 2021. *Lysinibacillus xylanilyticus* strain GIC41 as a potential plant biostimulant. *Microbes and environments*, 36(4): ME21047.
6. Ajijah, N., Fiodor, A., Pandey, A.K., Rana, A. and Pranaw, K. 2023. Plant Growth-Promoting

- Bacteria (PGPB) with Biofilm-Forming Ability: A Multifaceted Agent for Sustainable Agriculture. *Diversity*, 15(1): 112.
7. Arnao, M.B. and Hernández-Ruiz, J. 2021. Melatonin as a plant biostimulant in crops and during post-harvest: a new approach is needed. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 101(13): 5297-5304.
  8. Aviles, C.F.A., Acosta, C.B.C., de los Santos Villalobos, S., Santoyo, G. and Cota, F.I.P. 2022. Caracterización de bacterias promotoras de crecimiento vegetal (BPCV) nativas y su efecto en el desarrollo del maíz (*Zea mays* L.). *Biotecnia*, 24(1): 15-22.
  9. Bhandari, G. and Bhatt, P. 2021. Concepts and application of plant–microbe interaction in remediation of heavy metals. *Microbes and Signaling Biomolecules Against Plant Stress: Strategies of Plant-Microbe Relationships for Better Survival*, 55-77.
  10. Bhatneria, R. and Kumar, S. 2022. Role of Plant–Microbe Interactions in Combating Salinity Stress. In *Plant Stress Mitigators: Action and Application* Singapore: Springer Nature Singapore. 259-280.
  11. Cabral, L., Giovanella, P., Pellizzer, E.P., Teramoto, E.H., Kiang, C.H. and Sette, L.D. 2022. Microbial communities in petroleum-contaminated sites: Structure and metabolisms. *Chemosphere*, 286: 131752.
  12. Chen, C., Wang, M., Zhu, J. et al. 2022. Long-term effect of epigenetic modification in plant–microbe interactions: modification of DNA methylation induced by plant growth-promoting bacteria mediates promotion process. *Microbiome*, 10: 36. <https://doi.org/10.1186/s40168-022-01236-9>
  13. Das, P.P., Singh, K.R., Nagpure, G., Mansoori, A., Singh, R.P., Ghazi, I.A. and Singh, J. 2022. Plant-soil-microbes: A tripartite interaction for nutrient acquisition and better plant growth for sustainable agricultural practices. *Environmental Research*, 214: 113821.
  14. Denaya, S., Yulianti, R., Pambudi, A. and Effendi, Y. 2021. Novel microbial consortium formulation as plant growth promoting bacteria (PGPB) agent. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. IOP Publishing. 637(1): 012030.
  15. Etesami, H. 2020. Plant–microbe interactions in plants and stress tolerance. In *Plant life under changing environment*. Academic Press, 355-396.
  16. Fusco, G.M., Nicastro, R., Roupheal, Y. and Carillo, P. 2022. The Effects of the Microbial Biostimulants Approved by EU Regulation 2019/1009 on Yield and Quality of Vegetable Crops. *Foods*, 11(17): 2656.
  17. Gamalero, E., Bona, E. and Glick, B.R. 2022. Current techniques to study beneficial plant-microbe interactions. *Microorganisms*, 10(7): 1380.
  18. Goswami, M. and Suresh, D.E.K.A. 2020. Plant growth-promoting rhizobacteria—alleviators of abiotic stresses in soil: a review. *Pedosphere*, 30(1): 40-61.
  19. Guo, Q., Ye, J., Zeng, J., Chen, L., Korpelainen, H. and Li, C. 2023. Selenium species transforming along soil–plant continuum and their beneficial roles for horticultural crops. *Horticulture Research*, 10(2): uhac270.
  20. Hansda, A., Kisku, P.C. and Kumar, V. 2022. Plant-microbe association to improve phytoremediation of heavy metal. In *Advances in Microbe-Assisted Phytoremediation of Polluted Sites* Elsevier. 113-146.
  21. Hayat, S., Ahmad, A., Ahmad, H., Hayat, K., Khan, M.A. and Runan, T. 2022. Garlic, from medicinal herb to possible plant bioprotectant: A review. *Scientia Horticulturae*, 304: 111296.
  22. Imam, J., Singh, P.K. and Shukla, P. 2016. Plant microbe interactions in post genomic era: perspectives and applications. *Frontiers in microbiology*, 7: 1488.
  23. Stringlis, I.A., de Jonge, R. and Pieterse, C.M.J. 2019. The Age of Coumarins in Plant-Microbe Interactions, *Plant and Cell Physiology*, 60(7): 1405–1419 .
  24. Islam, M.S., Kormoker, T., Idris, A.M., Proshad, R., Kabir, M.H. and Ustaoglu, F. 2021. Plant–microbe–metal interactions for heavy metal bioremediation: a review. *Crop and Pasture Science*, 73: 181-201.
  25. Ivnitski, D., Abdel-Hamid, I., Atanasov, P. and Wilkins, E. 1999. Biosensors for detection of pathogenic bacteria. *Biosensors and Bioelectronics*, 14(7): 599-624.

- 
26. Jansson, J.K. and Hofmockel, K.S. 2020. Soil microbiomes and climate change. *Nature Reviews Microbiology*, 18(1); 35-46.
  27. Ji, S.H., Kim, J.S., Lee, C.H., Seo, H.S., Chun, S.C., Oh, J. and Park, G. 2019. Enhancement of vitality and activity of a plant growth-promoting bacteria (PGPB) by atmospheric pressure non-thermal plasma. *Scientific reports*, 9(1): 1-16.
  28. Katsenios, N., Andreou, V., Sparangis, P., Djordjevic, N., Giannoglou, M., Chanioti, S., Kasimatis, C.N., Kakabouki, I., Leonidakis, D., Danalatos, N., Katsaros, G. and Efthimiadou, A. 2022. Assessment of plant growth promoting bacteria strains on growth, yield and quality of sweet, P. corn. *Sci Rep* 12: 11598. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-16044-2>
  29. Khalil, A.T. and Shinwari, Z.K. 2022. Utilization of Plant Growth-Promoting Bacteria (PGPB) Against Phytopathogens. In *Antifungal Metabolites of Rhizobacteria for Sustainable Agriculture*. Cham: Springer International Publishing. 53-63.
  30. Khanna, K., Kapoor, D., Sharma, P., Bakshi, P., Sharma, P., Saini, P. and Bhardwaj, R. 2020. Plant-Microbe Interactions under Adverse Environment. *Plant Ecophysiology and Adaptation under Climate Change: Mechanisms and Perspectives I: General Consequences and Plant Responses*, 717-751.
  31. Kloock, A., Bonsall, M.B. and King, K.C. 2020. Evolution and maintenance of microbe-mediated protection under occasional pathogen infection. *Ecology and Evolution*, 10(16): 8634-8642.
  32. Kocira, S., Pérez-Pizá, M.C., Bohata, A., Bartos, P. and Szparaga, A. 2022. Cold Plasma as a Potential Activator of Plant Biostimulants. *Sustainability*, 14(1): 495.
  33. Kong, Z., Wu, Z., Glick, B.R., He, S., Huang, C. and Wu, L. 2019. Co-occurrence patterns of microbial communities affected by inoculants of plant growth-promoting bacteria during phytoremediation of heavy metal-contaminated soils. *Ecotoxicology and environmental safety*, 183: 109504.
  34. Kouas, S., Khan, N. and Hirsch, A.M. 2021. The Hologenome Hypothesis and Its Application to Plant-Microbe Interactions on an Evolutionary Scale. *Microbes: The Foundation Stone of the Biosphere*, 425-440.
  35. Kumar, A. and Verma, J.P. 2018. Does plant—microbe interaction confer stress tolerance in plants: a review? *Microbiological research*, 207: 41-52.
  36. Kumar, A. and Singh, J. 2020. Biofilms Forming Microbes: Diversity and Potential Application in Plant–Microbe Interaction and Plant Growth. In: Yadav, A., Singh, J., Rastegari, A., Yadav, N. (eds) *Plant Microbiomes for Sustainable Agriculture. Sustainable Development and Biodiversity*, vol 25. Springer, Cham. doi.10.1007/978-3-030-38453-1\_6
  37. Ma, Y. 2019. Biotechnological potential of plant-microbe interactions in environmental decontamination. *Frontiers in Plant Science*, 10: 1519.
  38. Mahadevakumar, S. and Sridhar, K.R. 2020. Plant-microbe interaction: current developments and future challenges. *Advances in Plant Microbiome and Sustainable Agriculture: Diversity and Biotechnological Applications*, 1-38.
  39. Manzano-Gómez, L.A., Rincón-Rosales, R., Flores-Felix, J.D., Gen-Jimenez, A., Ruiz-Valdiviezo, V. M., Ventura-Canseco, L.M.C. and Rincón-Molina, C.I. 2023. Cost-Effective Cultivation of Native PGPB *Sinorhizobium* Strains in a Homemade Bioreactor for Enhanced Plant Growth. *Bioengineering*, 10(8): 960.
  40. Marfetán, J.A., Gallo, A.L., Farias, M.E., Vélez, M.L., Pescuma, M. and Ordoñez, O.F. 2023. *Exiguobacterium* sp. as a bioinoculant for plant-growth promotion and Selenium biofortification strategies in horticultural plants. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 39(5): 134.
  41. Mishra, P., Mishra, J. and Arora, N.K. 2021. Plant growth promoting bacteria for combating salinity stress in plants—Recent developments and prospects: A review. *Microbiological Research*, 252: 126861.
  42. Mora, M.L., Durán, P., Acuña, J., Cartes, P., Demanet, R. and Gianfreda, L. 2015. Improving selenium status in plant nutrition and quality. *Journal of soil science and plant nutrition*, 15(2): 486-503.
  43. Mushtaq, A. and Rawat, S. 2021. Plant–Microbe Interactions: An Insight into the Underlying Mechanisms to Mitigate Diverse Environmental Stresses. *Microbes and Signaling Biomolecules Against Plant Stress: Strategies of Plant-Microbe Relationships for Better Survival*, 127-150.

44. Nascimento, F.X, Glick, B.R. and Rossi, M.J. 2019. Isolation and characterization of novel soil- and plant-associated bacteria with multiple phytohormone-degrading activities using a targeted methodology. *Access Microbiol.* 1(7): e000053. doi: 10.1099/acmi.0.000053.
45. Ngalimat, M.S., Mohd Hata, E., Zulperi, D., Ismail, S.I., Ismail, M.R., Mohd Zainudin, N.A.I. and Yusof, M.T. 2021. Plant growth-promoting bacteria as an emerging tool to manage bacterial rice pathogens. *Microorganisms*, 9(4): 682.
46. Padder, S.A., Mansoor, S., Bhat, S.A., Baba, T.R., Rather, R.A., Wani, S.M. and Darwish, H. 2021. Bacterial endophyte community dynamics in apple (*Malus domestica* Borkh.) germplasm and their evaluation for scab management strategies. *Journal of Fungi*, 7(11): 923.
47. Pellegrini, M., Pagnani, G., Bernardi, M., Mattedi, A., Spera, D.M. and Gallo, M.D. 2020. Cell-free supernatants of plant growth-promoting bacteria: A review of their use as biostimulant and microbial biocontrol agents in sustainable agriculture. *Sustainability*, 12(23): 9917.
48. Perreault, R. and Laforest-Lapointe, I. 2022. Plant-microbe interactions in the phyllosphere: facing challenges of the anthropocene. *ISME J.* 16: 339–345. <https://doi.org/10.1038/s41396-021-01109-3>
49. Phares, C.A., Amoakwah, E., Danquah, A., Afrifa, A., Beyaw, L.R. and Frimpong, K.A. 2022. Biochar and NPK fertilizer co-applied with plant growth promoting bacteria (PGPB) enhanced maize grain yield and nutrient use efficiency of inorganic fertilizer. *Journal of Agriculture and Food Research*, 10: 100434.
50. Posmyk, M.M. and Janas, K.M. 2009. Melatonin in plants. *Acta physiologiae plantarum*, 31: 1-11.
51. Rahman, N.S.N.A, Hamid, N.W.A. and Nadarajah, K. 2021. Effects of abiotic stress on soil microbiome. *International Journal of Molecular Sciences*, 22(16): 9036.
52. Ramakrishna, W., Yadav, R. and Li, K. 2019. Plant growth promoting bacteria in agriculture: Two sides of a coin. *Applied Soil Ecology*, 138: 10-18.
53. Rattray, A.J. and Symington, L.S. 1995. Multiple pathways for homologous recombination in *Saccharomyces cerevisiae*. *Genetics*, 139(1): 45-56.
54. Ren, X.M., Guo, S.J., Tian, W., Chen, Y., Han, H., Chen, E. and Chen, Z.J. 2019. Effects of plant growth-promoting bacteria (PGPB) inoculation on the growth, antioxidant activity, Cu uptake, and bacterial community structure of rape (*Brassica napus* L.) grown in Cu-contaminated agricultural soil. *Frontiers in microbiology*, 10: 1455.
55. Rilling, J.I., Acuña, J.J., Nannipieri, P., Cassan, F., Maruyama, F. and Jorquera, M.A. 2019. Current opinion and perspectives on the methods for tracking and monitoring plant growth-promoting bacteria. *Soil Biology and Biochemistry*, 130: 205-219.
56. Rilling, J.I., Maruyama, F., Sadowsky, M.J., Acuña, J.J. and Jorquera, M.A. 2021. CRISPR loci-PCR mint eszköz az *Azospirillum* sp. B510 törzs. *Microorganisms*, 9(7): 1351.s
57. Ruiu, L. 2020. Plant-growth-promoting bacteria (PGPB) against insects and other agricultural pests. *Agronomy*, 10(6): 861.
58. Sharma, S., Chandra, D., Sharma, A.K. 2021. Rhizosphere Plant–Microbe Interactions Under Abiotic Stress. In: Gupta, V.V.S.R., Sharma, A.K. (eds) *Rhizosphere Biology: Interactions Between Microbes and Plants*. Rhizosphere Biology. Springer, Singapore. [https://doi.org/10.1007/978-981-15-6125-2\\_10](https://doi.org/10.1007/978-981-15-6125-2_10)
59. Singh, P.P., Kujur, A., Yadav, A., Kumar, A., Singh, S.K. and Prakash, B. 2019. Mechanisms of plant-microbe interactions and its significance for sustainable agriculture. In *PGPR amelioration in sustainable agriculture*. Woodhead Publishing. 17-39.
60. Sivaram, A.K., Panneerselvan, L., Mukunthan, K. and Megharaj, M. 2022. Effect of pyrolygneous acid on the microbial community composition and Plant Growth-Promoting Bacteria (PGPB) in soils. *Soil Systems*, 6(1): 10.
61. Toor, M.D. and Adnan, M. 2020. Role of soil microbes in agriculture; a review. *Open access Journal of Biogenerics and Research*. 4(2): 1-5. DOI: 10.46718/JBGSR.2020.04.000091
62. Ummara, U., Noreen, S., Afzal, M., Zafar, Z.U., Akhter, M.S., Iqbal, S. and Ahmad, P. 2022. Induced systemic tolerance mediated by plant-microbe interaction in maize (*Zea mays* L.) plants under hydrocarbon contamination. *Chemosphere*, 290: 133327.

- 
63. Vasseur-Coronado, M., du Boulois, H.D., Pertot, I. and Puopolo, G. 2021. Selection of plant growth promoting rhizobacteria sharing suitable features to be commercially developed as biostimulant products. *Microbiological Research*, 245: 126672.
  64. Wahid, F., Sharif, M., Ali, A., Fahad, S., Adnan, M., Noor, M. and Azeem, M. 2020. Plant-microbes interactions and functions in changing climate. *Environment, climate, plant and vegetation growth*, 397-419.
  65. Walker, R., Otto-Pille, C., Gupta, S., Schillaci, M. and Roessner, U. 2020. Current perspectives and applications in plant probiotics. *Microbiology Australia*, 41(2): 95-99.
  66. Xiang, L., Harindintwali, J.D., Wang, F., Redmile-Gordon, M., Chang, S.X., Fu, Y. and Xing, B. 2022. Integrating biochar, bacteria, and plants for sustainable remediation of soils contaminated with organic pollutants. *Environmental Science & Technology*, 56(23): 16546-16566.
  67. Younas, T., Umer, M., Husnain Gondal, A., Aziz, H., Khan, M.S., Jabbar, A. and Ore Areche, F. 2022. A comprehensive review on impact of microorganisms on soil and plant. *Journal of Bioresource Management*, 9(2): 12.
  68. Yu, J., Tu, X. and Huang, A.C. 2022. Functions and biosynthesis of plant signaling metabolites mediating plant-microbe interactions. *Natural Product Reports*, 39(7): 1393-1422.
  69. Zheng, W., Wu, Q., Rao, C., Chen, X., Wang, E., Liang, X. and Yan, W. 2023. Characteristics and interactions of soil bacteria, phytocommunity and soil properties in rocky desertification ecosystems of Southwest China. *Catena*, 220: 106731.
  70. Zuluaga, M.Y.A., de Oliveira, A.L.M., Valentinuzzi, F., Tiziani, R., Pii, Y., Mimmo, T. and Cesco, S. 2021. Can inoculation with the bacterial biostimulant *Enterobacter* sp. strain 15S be an approach for the smarter P fertilization of maize and cucumber plants? *Frontiers in Plant Science*, 12: 719873.

**Recent scientific advances in the role of plant-soil interactions  
in agricultural production - with particular reference  
to the role of PGPB application and phytoremediation**

KOVÁCS, D.<sup>1</sup>, HOROTÁN, K.<sup>2</sup>, ORLÓCI, L.<sup>3</sup>, KISVARGA, SZ.<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Department of Floriculture and Dendrology, Institute of Landscape Architecture,  
Urban Planning and Garden Art, Hungarian University of Agriculture and Life Sciences

<sup>2</sup> Zoological Department, Institute of Biology, Eszterházy Károly Catholic University

<sup>3</sup> Ornamental Plant and Green System Management Research Group, Institute of Landscape  
Architecture, Urban Planning and Garden Art, Hungarian University of Agriculture  
and Life Sciences

E-mail: kovacsdezso.zsztgy@gmail.com

Current agricultural and horticultural production is faced with growing challenges due to climate change as well as the increased use of pesticides and herbicides, which make it even more difficult to maintain the quality and/or quantity of crops at a high level. Plant Growth Promoting Bacteria (PGPB) and other living organisms can help to overcome the current challenges of modern



agriculture. The potential of PGPB is expanding in scientific and commercial circles, with scientific results showing great progress in recent years. Our current work has collected scientific results from the last few years and the opinions of experts on the subject. An important focus of our review is on opinions and results on soil-plant interactions, the importance of PGPB and recent developments in this area, highlighting the scientific results of the last 3-4 years. In summary, all of these findings suggest that plant growth promoting bacteria are becoming increasingly important in agriculture in large parts of the world, contributing to more sustainable, environmentally conscious agricultural production and replacing the use of fertilizers and chemicals. With many mechanisms of action, biochemical and functional processes still under investigation, we can expect a new emerging scientific trend in PGPB, microbial and other plant growth stimulants in the coming years.

**Keywords:** PGPB, plant growth-promoting bacteria, plant, stress, microbes, rhizosphere, soil rehabilitation, soil microbial communities

**Szerzők:**

**Kovács Dezső** (kapcsolattartó szerző) – PhD hallgató, Magyar Agrár- és Élettudományi Egyetem, Tájépítészeti, Tájépítészeti, Településtervezési és Díszkertészeti Intézet, Dísznövénytermesztési és Dendrológiai Tanszék, 1118 Budapest, Villányi út 35-43.; Kovács Díszfaiskola, Zalaszentgyörgy Kossuth u. 71.

**Horotán Katalin** – laboráns, Eszterházy Károly Katolikus Egyetem, Biológiai Intézet, Állattani Tanszék, 3300 Eger, Leányka út 6.

**Orlóci László** – dr. univ., tudományos főmunkatárs, kutatócsoport vezető, Magyar Agrár- és Élettudományi Egyetem, Tájépítészeti, Településtervezési és Díszkertészeti Intézet, Dísznövénytermesztési és Zöldfelületgazdálkodási Kutatócsoport, 1223 Budapest, Park utca 2.

**Kisvarga Szilvia** – PhD, tudományos főmunkatárs, Magyar Agrár- és Élettudományi Egyetem, Tájépítészeti, Településtervezési és Díszkertészeti Intézet, Dísznövénytermesztési és Zöldfelületgazdálkodási Kutatócsoport, 1223 Budapest, Park utca 2.