

Integracija mikoriznih gljiva u poljoprivrednu praksu: Prednosti i izazovi

Sažetak

Mikorize omogućuju biljkama učinkovitiji pristupim hranjivim tvarima i vodi iz tla čime se povećava otpornost biljaka na abiotске i biotske stresove. Osim izravnog utjecaja na rast i zdravlje biljaka, mikorize značajno doprinose poboljšanju strukture i plodnosti tla. Iako su mikorize autohtono prisutne u tlu intenzivni sustavi obrade mogu značajno smanjiti njihovu brojnost i funkcionalnost, zbog čega se preporučuje primjena inokulanata s visokim udjelom propagula. Analiza komercijalnih arbuskularnih inokulanata dostupnih na tržištu jasno ukazuju na ozbiljne nedostatke u kvaliteti, pouzdanosti i standardizaciji proizvoda. Nedostatak jasnih regulatornih okvira i jedinstvenih kriterija za utvrđivanje kvalitete omogućuje plasman na tržište proizvoda upitne učinkovitosti. Visokokvalitetni mikorizni inokulanti u poljoprivrednoj proizvodnji doprinose povećanju prinosa usjeva i dugoročnom očuvanju plodnosti tla, smanjenju ovisnosti o agrokemikalijama, što je temelj integriranih sustava upravljanja tlom.

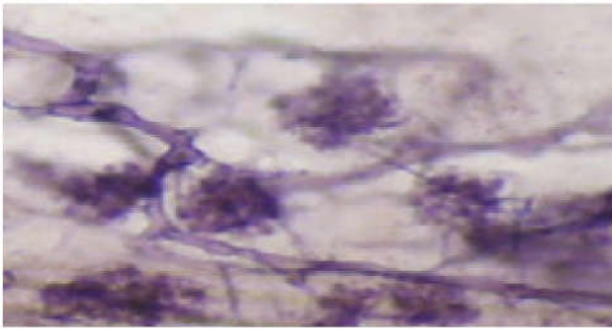
Ključne riječi: arbuskularne mikorize, inokulanti, propagule, kvaliteta

Uvod

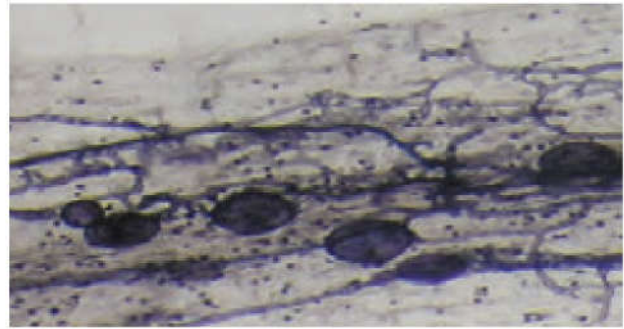
Mikoriza predstavlja oblik simbiozne mutualističke zajednice između gljiva i korijenskog sustava viših biljaka. Mikorizne hife koloniziraju korijen biljke te istodobno razvijaju ekstenzivnu mrežu u tlu. Hife prodiru u mikropore čestica tla nedostupne korijenovim dlačicama, čime značajno povećavaju površinu za apsorpciju vode i hranjivih tvari iz tla, a biljka opskrbljuje gljivu organskim ugljikom. Procjenjuje se kako mikorizu razvija oko 90 % kopnenih biljnih vrsta, što ju čini najraširenijom simbiozom u biljnom carstvu.

Fosilni nalazi i ribosomsko DNK sekvenciranje omogućuju jasnije razumijevanje evolucijskog razvoja mikoriza. Nalazi ukazuju kako su gljive, slične današnjim *arbuskularnim mikorizama*, stare oko 400 milijuna godina. Također se pretpostavlja kako je sposobnost koloniziranja kopna ranih vaskularnih biljaka bilo ovisna o udruživanju u mikoriznu simbioznu zajednicu (Brundrett, 2002). Danas je ova mikoriza raširenija od ostalih mikoriznih vrsta te je prisutna na 70 - 80 % biljnih vrsta. Nastaje između Glomeromycota i viših biljaka: žitarica, leguminoza, industrijskog bilja, voća i povrća ali i šumskih vrsta. Hife arbuskularnih mikoriza tj. endomikoriza prodiru u stanice korijena tvoreći *arbuskule* - razgranate hife koje omogućuju izmjenu nutrijenata (Slika 1) i *vezikule*, ovalne strukture koje služe za pohranu hranjivih tvari (Slika 2).

¹ prof. dr. sc. **Gabriella Kanižai Šarić**, Fakultet agrobiotehničkih znanosti Osijek, Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Vladimira Preloga 1, Osijek, R. Hrvatska
Autor za korespondenciju: gkanizai@fazos.hr

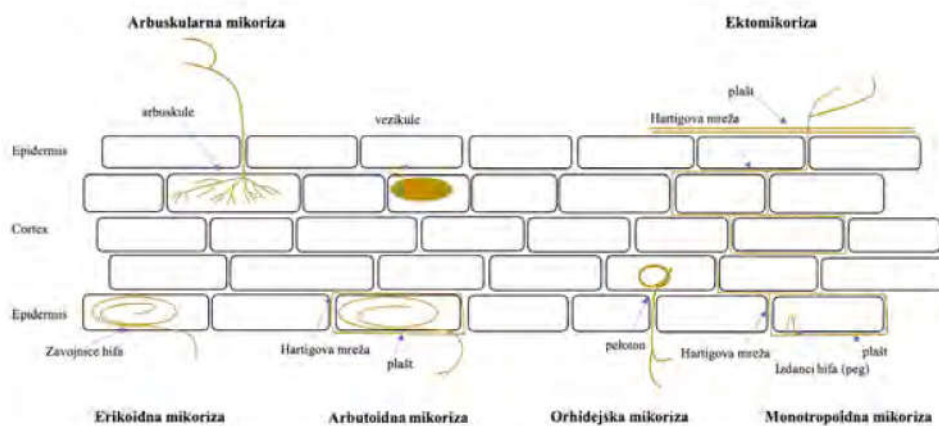


Slika 1: Arbuskule arbuskularnih mikoriza na korijenu krastavca. Izvor: Kanižai Šarić G. / **Figure 1.** Arbuscules of arbuscular mycorrhizae on cucumber roots. Source: Kanižai Šarić G.



Slika 2: Vezikule arbuskularnih mikoriza na korijenu salate. Izvor: Kanižai Šarić G. / **Figure 2:** Vesicles of arbuscular mycorrhizae on lettuce roots. Source: Kanižai Šarić G.

Razvojem angiosperma i diverzifikacijom drvenastih kultura u fosilnim nalazima iz razdoblja krede (145 - 66 milijuna godina) raspoznaju se *ektomikorize*, *orhidejske* i *erikoidne mikorize*. Ektomikorize stvaraju Basidimycota ili Ascomycota, manje Zygomycota (Brundrett, 2002). koje formiraju mrežu hifa oko korijena biljaka, a izmjena nutrijenata se vrši preko Hartigove mreže koja prodira između stanica korteksa korijena. Prisutne su kod određenih porodica drvenastih golosjemnjača (npr. bor, jela, ariš) i kritosjemnjača (npr. breza, bukva, hrast). Orhidejske mikorize su karakteristične za porodicu Orchidaceae i različitih vrsta gljiva te u prirodnim ekosistemima sudjeluju u klijanju sjemena, rastu i razvoju orhideja. Erikoidne mikorize su karakteristične za biljke iz porodice Ericaceae poput borovnice, vrieska ili brusnice. Ova simbioza je važna u ekološkim zahtjevnim staništima na kiselim i siromašnim tlima. *Arbutoidna mikoriza* se opisuje kao varijanta između ekto i erikoidne mikorize, a *monotropoidna* je poseban tip ektomikoriza koja se javlja kod nefotosintetskih biljaka (Slika 3).



Slika 3: Vrste i građa mikoriza / **Figure 3:** Types and structure of mycorrhizae

Koji su pozitivni učinci u poljoprivredi?

Mikorize imaju ključnu ulogu u funkcioniranju kopnenih ekosustava jer doprinose kruženju hraniva i sudjeluju u usvajanju fosfora, dušika, kalija, kalcija, magnezija, željeza, cinka, bakra, sumpora i mangana. Hife gljiva omogućuju i bolju apsorpciju i transport vode do biljke. Mikorizne hife djeluju kao proširenje korijenskog sustava, čime biljke dobivaju prednost

u uvjetima ograničene dostupnosti hraniva i vode. Na ovaj način mikorize izravno utječu na produktivnost biljnih zajednica i stabilnost ekosustava. Mikorizne gljive sudjeluju i u formiranju i stabilizaciji strukture tla. Hife gljiva vežu čestice tla, potiču agregaciju i povećavaju otpornost na eroziju. Mikorize aktiviraju obrambeni mehanizam biljke putem inducirane sistemske otpornosti pri čemu se aktiviraju signalni putevi za proizvodnju etilena i jasmonske kiseline, enzima, fenolnih spojeva i fitoalkesina koji su ključni u povećanju otpornosti od fitopatogenih gljiva. Osim biotskih stresova mikorize pomažu biljci u savladavanju i abiotskih stresova uzrokovanih visokim salinitetom, ekstremnim temperaturama i sušnim uvjetima. Primjenom mikoriza smanjuje se potreba za mineralnim gnojivima i pesticidima u poljoprivrednoj proizvodnji, čime se doprinosi plodnosti tla te poboljšanju njegove biogenosti. Ekosustav je u ravnoteži jer izostaju štetni učinci toksičnih agrokemikalija u životnim zajednicama tla, vode i zraka. Poljoprivredni proizvodi su zdraviji i kvalitetniji što direktno utječe na zdravlje ljudi i životinja. Mikorize kao biofertilizatori, bioregulatori i bioprotektanti imaju značajan doprinos u održivim sustavima gospodarenja tлом. S druge strane agrokemikalije predstavljaju značajno opterećenje za ekosustave i poljoprivrednu proizvodnju. Njihova prekomjerna i dugotrajna uporaba dovodi do degradacije i smanjenja plodnosti tla, uz značajan utjecaj na smanjenje populacije mikroorganizama tla, koji održavaju prirodnu ravnotežu tla, ali i drugih neciljanih organizama. Ispiranjem se prenose u podzemne i nadzemne vode što dodatno ugrožava vodene ekosustave. Bioakumulacijom i biomagnifikacijom štetne tvari se prenose kroz hranidbeni lanac što može dovesti do kratkoročnih i dugoročnih zdravstvenih problema ljudi i životinja. Sve navedeno dovodi do narušavanja hranidbene mreže i prirodne ravnoteže između organizama. Zbog očuvanja zdravlja ljudi i životinja, prirode i okoliša, biološke raznolikosti, poljoprivredno gospodarenje tлом se mora temeljiti na principima održive poljoprivrede, a uporaba mikoriza predstavlja dio ove strategije.

Metodologija proizvodnje mikoriznih inokulanata

Iako su mikorize sastavni dio populacije mikroorganizama tla njihova brojnost te prisutnost odgovarajućih sojeva nije dovoljna za optimalan učinak te se preporuča njihova primjena u poljoprivrednim uvjetima u obliku inokulanata, a u komercijalne svrhe za poljoprivrednu proizvodnju koriste se arbuskularne mikorize (Rouphael i sur., 2015). Arbuskularne mikorize su obligatni biotrofi (ne mogu se uzgojiti bez biljke) i ovakvi uvjeti moraju biti osigurani i u procesu proizvodnje. Za uspješnu kolonizaciju korijena preporuča se da inokulant sadrži više mikoriznih vrsta, visok broj infektivnih propagula (spora, hifa i fragmenata korijena) odsustvo patogena i štetnika, te da uključuje i korisne bakterije i aditive koji potiču kolonizaciju i aktivnost mikorize. Također, poželjno je da inokulant bude u krutom obliku čime se osigurava duži vijek skladištenja (Rouphale i sur., 2015).

Uzgoj mikoriza obuhvaća nekoliko metoda. Uzgoj biljaka sa mikoriznim simbiotskim gljivama na supstratu je najčešće korištena metoda u zaštićenim ili poluzaštićenim, a ponekad i u poljskim uvjetima. Kao supstrat se koristi tlo, pijesak, kompost, treset ili inertni materijali poput perlita i vermikulita. Preporuča se sterilizacija supstrata kako bi se izbjegla kontaminacija. Utvrđeno je kako je sastav supstrata može poticati ili reducirati kolonizaciju korijena kao i veličina čestica supstrata koji su bitni za aeraciju i vlažnost, a što utječe na sporulaciju mikoriza (Ijdo i sur., 2011). Najčešće se kao domaćini koriste biljke iz roda lukova (*Allium* spp.), kukuruz (*Zea mays* L.) ili trave (*Sorghum* spp., *Trifolium* spp.). Također je ustanovljeno kako je brojnost infektivnih propagula u korelaciji s vrstom biljke domaćina. Osim odabira vrste poželjno je da biljke domaćini imaju razvijen korijenov sustav, nisku osjetljivost na patogene i toleranciju na nisku razinu fosfora u supstratu. Nakon kolonizacije korijen i sup-

strat sadržavaju veliki broj propagula te se korijenje suši i usitnjava dok se spore prosijavaju i dekantiraju i koriste kao inokulum. Kvalitetu kontrole provodi sami proizvođači tijekom uzgoja kako bi se procijenio postotak kolonizacije korijena odnosno brojnost spora. Optimalan ciklus trajanja proizvodnog ciklusa se kreće od 16 - 20 tjedana, što je neophodno za razvoj dovoljnog broja spora i kolonizarnog korijena. Konačni cilj je proizvesti visoko učinkovit inokulant s visokim brojem propagula po gramu inokulanta.

Hidroponski ili aeroponski *ex vitro* obuhvaća uzgoj biljke u hranjivim otopinama ili u komorama gdje se korijenje orošava. Na kraju ciklusa korijenje, se suši i miješa s nosačim poput kaolina, vermikulita ili zeolita do standardizirane koncentracije propagula.

Slijedeća je *in vitro* metoda na Ri T-DNK korijenju transformiranom uz pomoć plazmida bakterije *Rhizobium rhizogenes* (nekada *Agrobacterium rhizogenes*). Ovakvo korijenje neprekidno raste u tekućim ili krutim hranjivim podlogama. Ovakav način uzgoja mikoriza osim u znanstvene koristi se i u komercijalne svrhe. Istraživanja definiraju parametre kako bi se utvrdio standard kvalitete i kvantitete proizvodnje mikoriza putem ROC (root organ culture) tehnologije. Ranija istraživanja su utvrdila kako se produkcija spora i propagula povećava unutar 16 tjedana inkubacije te da prinos varira s duljinom inkubacije od 2 766 spora u 4 - 8 tjedana do 300 000 propagula u 12 tjedana inkubacije (Adholeya i sur, 2005; Ghorui i sur, 2023). Ovakav način uzgoja ima i nedostatke koji su vezani uz odsustva fotosintetskog tkiva, a koji utječe na fiziologiju i razmjenu tvari između biljke i simbionta. Iz ovog razloga razvijena je i *in vitro* metoda mikorizacije na autotrofnim kulturnim sistemima (Voets i sur., 2005) i sustav mikorizne donorske biljke. Uzgoj mikoriza na ovaj način osigurava odsustvo kontaminanata međutim nedostaci uključuju veći uloženi rad, stručnost, dodatan prostor i opremu, kao i optimizaciju procesa što povećava troškove proizvodnje.

Prema rezultatima istraživanja meta studije Basiru i sur. iz 2021. godine utvrđeno je kako je 90 % mikoriznih proizvoda na tržištu u krutom stanju, a 10 % u tekućoj formi te da dominiraju tri vrste *Rhizophagus irregularis* (39 %, nekada *Glomus intraradices*), *Funneliformis mosseae* (21 %), *Claroideoglomus etunicatum* (16 %). Pravilnim odabirom mikorizne vrste se osigurava genetska stabilnost i funkcionalnost tijekom njihove uporabe s ciljem maksimiziranja potencijala arbuskularno mikoriznih inokulanata u poljoprivrednom ekosustavu (Ghorui i sur 2025). Mikorizni inokulantni moraju biti adaptirani na specifične agroekološke uvjete okoliša kako bi bili učinkoviti i kako bi se osigurao optimalan rast biljke. Komercijalni izolati imaju potencijal promijeniti sastav i raznolikost mikrobni zajednica te u specifičnim lokalnim uvjetima, a gdje su domaće arbuskularne mikorizne vrste prevladavajuće nad alohtonim, ne uspijevaju zaraziti biljke domačine zbog ograničene prilagodbe lokalnim uvjetima tla (Ghorui i sur, 2024). Dodatni korisni mikroorganizmi u mikoriznim inokulantima poput PGPM (plant growth promoting microorganisms) mogu dodatno pozitivno utjecati na rast, pristupačnost nutrijenata i prinos biljaka.

Preporučeni standardi kvalitete mikoriznih proizvoda

Studije utvrđuju nedosljednosti komercijalnih mikoriznih inokulanata koje uključuju netočne i nepotpune informacije na proizvodima, kontaminaciju patogenima i odsustvo ili malu brojnost mikoriznih propagula te je utvrđeno je kako samo 12 % komercijalnih proizvoda (globalno) sadržava vijabilne mikorizne gljive (Koziol i sur., 2025). Slični rezultati su utvrđeni u analizi inokulanata u istraživanju Salomon i sur. 2022 gdje je utvrđeno kako 84 % komercijalnih europskih inokulanata nije uspjelo izazvati mikoriznu kolonizaciju korijena što znači da nisu sadržavali održive propagule. Nadalje brojnost spora, u istoj studiji, u inokulantima s područja Europe se kretao od 0 - 267 po gramu inokulanta. DNK metabarkodiranje inokulanta otkrilo je zabrinjavajuću neusklađenost između deklariranog i detektiranog sastava

arbuskularnih gljivičnih vrsta te autori ističu potrebu za boljim smjernicama i industrijskim standardima kako bi se osigurala zaštita potrošača na tržištu mikoriznih inokulanta (Vahter i sur., 2023). Navedeno govori o slaboj kvaliteti mikoriznih proizvoda na tržištu Europe te postoji zabrinutost o kvaliteti i kvantiteti proizvoda prisutnih na tržištu (Basiru i sur., 2021).

Kako bi industrija arbuskularno mikoriznih inokulanta napredovala, moraju se provesti rigorozna istraživanja u vezi sa sastavom, kvalitetom, količinom i metodama primjene proizvoda (Berutti i sur. 2013). Zakoni unutar EU ne navode minimalnu brojnost spora niti propagula u mikoriznim inokulantima i kontrola kvalitete proizvoda (ne) izvršavaju sami proizvođači. U buduću je neophodna je standardizacija kvalitete proizvoda na najvišim razinama, ali i odgovornost samih proizvođača u ovoj visoko profitabilnoj industriji. Ovakva praksa ne samo da narušava povjerenje kupaca, već narušava ugled i znanstvene zajednice ali i cijelog tržište bioloških preparata.

EU regulativa koja se odnosi na mikorizne inokulante uređena je Uredbom EU 2019/1009 o gnojidbenim proizvodima, koja se primjenjuje od srpnja 2022 godine. Mikorizni inokulanti spadaju u mikrobne biostimulanse, a dozvoljeni mikroorganizmi u biostimulansima uključuju mikorizne gljive te bakterije *Azotobacter* spp., *Rhizobium* spp. i *Azospirillum* spp. Proizvodi moraju ispunjavati određene sigurnosne zahtjeve, ne smiju sadržavati patogene te moraju imati dokazan biostimulativni učinak kao i jasno označavanje na deklaraciji. Na deklaraciji se mora jasno navesti znanstveni naziv svakog mikroorganizma (rod, vrsta, soj) kao i njegova koncentracija odnosno broj mikroorganizama po gramu tj mililitru proizvoda. Također mora biti jasno označena preporučena doza, način uporabe, i obavezno upozorenje kako mikroorganizmi mogu uzrokovati senzibilizirajuće reakcije. Sve informacije moraju biti istinite, jasne i provjerljive u skladu s općim zahtjevima za označavanje. Mikorizni inokulanti su regulirani kao gnojidbeni proizvodi, a ne kao sredstva za zaštitu bilja, sve dok njihova funkcija nije suzbijanje bolesti ili štetnika (EU uredba 2019/1009). Ova uredba omogućuje proizvođačima uvođenje certifikata s CE (Conformité Européenne) oznakom što znači kako je proizvod prošao postupke ocjene sukladnosti i da ispunjava standard sigurnosti, zdravlja i zaštite okoliša utvrđene evropskim direktivama i uredbama i pri tome ima pristup cijelom tržištu EU.

Zaključak

Primjena mikoriznih gljiva u suvremenoj poljoprivrednoj proizvodnji predstavlja znanstveno utemeljenu strategiju za učinkovitiju mobilizaciju nutrijenata tla hraniva i povećanje produktivnosti biljaka. Korištenje visokokvalitetnih inokulanata s više mikoriznih vrsta i visokim udjelom vitalnih propagula u stabilnom, suhom obliku omogućuje dugotrajnu biološku aktivnost i pouzdanu kolonizaciju korijenskog sustava. Na ovaj način se značajno povećava dostupnost slabo pokretnih hraniva, osobito fosfora i mikroelemenata, te se poboljšava vodni status biljaka i njihova tolerancija na abiotske i biotske stresove. S aspekta održivosti mikorize imaju ključnu ulogu u smanjenju ovisnosti o mineralnim gnojivima i kemijskim sredstvima, čime se smanjuje negativan utjecaj agrokemikalija na okoliš. Zbog višestrukih pozitivnih učinaka na produktivnost agroekosustava i ekološku ravnotežu, mikorizne simbiozne zajednice smatraju se jednim od temeljnih elemenata održive poljoprivredne proizvodnje.

Literatura

Adholeya, A., Tiwari, P., Singh, R. (2005) Large-Scale inoculum production of arbuscular mycorrhizal fungi on root organs and inoculation strategies. U: Declerck, S., Fortin, J.A., Strullu, D-G., ur. *In vitro Culture of Mycorrhizas*. Springer, Berlin, Heidelberg.

Basiru, S., Mwanza, H.P., Hijri, M. (2021) Analysis of Arbuscular Mycorrhizal Fungal Inoculant Benchmarks. *Microorganisms*, 9, 81. DOI:<https://doi.org/10.3390/microorganisms9010081>

- Berruti, A., Borriello, R., Lumini, E., Scariot, V., Bianciotto, V., Balestrini, R. (2013)** Application of laser microdissection to identify the mycorrhizal fungi that establish arbuscules inside root cells. *Frontier in Plant Science*, 4, 135.
- Brundrett, M.C. (2002)** Coevolution of roots and mycorrhizas of land plants. *New Phytologist*, 154, 275–304.
- Uredba (EU) 2019/1009 europskog parlamenta i vijeća od 5. lipnja 2019.** o utvrđivanju pravila o stavljanju gnojivbenih proizvoda EU-a na raspolaganje na tržištu te o izmjenama uredaba (EZ) br. 1069/2009 i (EZ) br. 1107/2009 i stavljanju izvan snage Uredbe (EZ) br. 2003/2003
- Ghorui, M., Chowdhury, S., Das, K., Sunar, K., Prakash, B. (2023)** Optimizing factors for large-scale production of Arbuscular Mycorrhizal Fungi consortia using root organ cultures. *Journal of Biological Methods*, 10: e99010006. DOI: <https://doi.org/10.14440/jbm.2023.410>
- Ghorui, M., Chowdhury, S., Balu, P., Burla, S. (2024)** Arbuscular Mycorrhizal inoculants and its regulatory landscape. *Heliyon*, 10, 9, e303592024, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e30359>
- Ghorui, M., Chowdhury, S., Burla, S. (2025)** Recent advances in the commercial formulation of arbuscular mycorrhizal inoculants. *Frontiers in Industrial Microbiology*, 3, 1553472. DOI: 10.3389/finmi.2025.1553472
- Ijdo, M., Cranenbrouck, S., Declerck, S. (2011)** Methods for large-scale production of AM fungi: past, present, and future. *Mycorrhiza*, 21(1):1-16. DOI: 10.1007/s00572-010-0337-z.
- Kozioł, L., McKenna, T.P., Bever, J.D. (2025)** Meta-analysis reveals globally sourced commercial mycorrhizal inoculants fall short. *New Phytologist*, 246, 821827. DOI: <https://doi.org/10.1111/nph.20278>
- Rouphael, Y., Franken, P., Schneider, C., Schwarz, D., Giovanetti, M., Agnolucci, M., De Pascale, S., Bonini, P., Colla, G. (2015)** Arbuscular mycorrhizal fungi act as biostimulants in horticultural crops. *Scientia Horticulturae*, 196, 91-103.
- Salomon, M.J., Demarmels, R., Watts-Williams, S.J., McLaughlin, M.J., Kafle, A., Ketelsen, C., Soupir, A., Bücking, H., Cavagnaro, T.R., van der Heijden, M.G.A. (2022)** Global evaluation of commercial arbuscular mycorrhizal inoculants under greenhouse and field conditions, *Applied Soil Ecology*, 169. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2021.104225>.
- Vahter, T., Lillipuu, E.M., Oja, J., Opik, M., Vasar, M., Hiiesalu, I. (2023)** Do commercial arbuscular mycorrhizal inoculants contain the species that they claim?. *Mycorrhiza* 33, 211–220. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00572-023-01105-9>
- Voets, L., Dupré de Boulois, H., Renard, L., Strullu, D.-G., Declerck S. (2005)** Development of an autotrophic culture system for the *in vitro* mycorrhization of potato plantlets, *FEMS Microbiology Letters*, 248, 1, 111-118.

Prispjelo/Received: 12.2.2026.

Prihvaćeno/Accepted: 12.3.2026.

Professional paper

Integration of Mycorrhizal Fungi into Agricultural Practice: Advantages and Challenges

Abstract

Mycorrhizal fungi enable plants to access soil nutrients and water more efficiently, thereby enhancing plant tolerance to abiotic and biotic stresses. Beyond their effects on plant growth and health, mycorrhizae play a crucial role in improving soil structure and overall soil fertility. Although mycorrhizal fungi are naturally present in soils, intensive tillage practices can substantially reduce their abundance and functional effectiveness. For this reason, the application of high-quality mycorrhizal inoculants with a high propagule density is increasingly recommended. Analysis of commercially available arbuscular mycorrhizal inoculants reveals significant deficiencies in product quality, reliability, and standardization. The lack of clear regulatory frameworks and standardized criteria for determining quality allows products with questionable efficacy to be placed on the market. High-quality mycorrhizal inoculants in agricultural production contribute to increased crop yields, the long-term preservation of soil fertility, and reduced reliance on agrochemicals, which are the foundation of integrated soil management systems.

Key words: arbuscular mycorrhizae, inoculants, propagules, standardization, quality control