



दीर्घोपयोगी कृषि में पोषक तत्वों के प्रबंधन और पौधों के विकास को बढ़ावा देने में कवकमूल की भूमिका : एक समीक्षा

भावना सक्सेना¹

सारांश

कवकमूल पौधों की जड़ प्रणाली एवं कवकीय सहजीवियों के मध्य स्थापित एक उन्नत सहजीवी तंत्र है, जो कृषि पारितंत्रों में पोषक तत्व गतिकी, राइजोस्फीयर प्रक्रियाओं तथा फसल उत्पादकता के नियमन में निर्णायक भूमिका निभाता है। प्रस्तुत समीक्षा आर्बस्कुलर कवकमूल पर केंद्रित नवीनतम अनुसंधानों के आलोक में इसके कृषिगत प्रभावों का समन्वित एवं समालोचनात्मक विश्लेषण प्रस्तुत करती है। उपलब्ध साक्ष्य इंगित करते हैं कि कवकमूल, विशेषतः फॉस्फोरस अधिग्रहण के संदर्भ में, उच्च दक्षता वाले अधिग्रहण तंत्र को सक्रिय कर पोषण उपयोग दक्षता को उल्लेखनीय रूप से उन्नत करता है। कवकीय हाइफी का विस्तारित जाल जड़ क्षेत्र का प्रभावी विस्तार कर मृदा-जल-वनस्पति अंतः क्रियाओं को सुदृढ़ बनाता है, जिससे पौधों की जल अधिग्रहण क्षमता एवं सूखा, लवणीयता तथा तापीय तनावों के प्रति सहनशीलता में गुणात्मक वृद्धि होती है। भविष्य में, ओमिक्स-आधारित दृष्टिकोण तथा प्रिसिजन कृषि तकनीकों के साथ कवकमूल का एकीकरण क्षेत्र-विशिष्ट, उच्च-प्रदर्शनशील स्ट्रेनों के विकास की दिशा में महत्वपूर्ण संभावनाएँ प्रस्तुत करता है। तथापि, इसके व्यापक अनुप्रयोग हेतु पारिस्थितिक अनुकूलनशीलता, स्ट्रेन-विशिष्टता एवं प्रबंधन-संबंधी जटिलताओं का वैज्ञानिक समाधान आवश्यक है। अतः कवकमूल कृषि स्थिरता, संसाधन दक्षता एवं पारिस्थितिक प्रत्यास्थता को सुदृढ़ करने वाला एक अत्यंत संभावनाशील जैविक उपकरण है।

मुख्य शब्द: जैव उर्वरक, कवकमूल, पादप सूक्ष्मजीव परस्पर क्रिया, मिट्टी की उर्वरता, दीर्घोपयोगी कृषि।

Role of Mycorrhiza in Nutrient Acquisition and Promoting Plant Growth in Sustainable Agriculture: A Review

Bhawna Saxena¹

10.18805/BKAP937

ABSTRACT

Mycorrhiza constitutes an advanced symbiotic association between the plant root systems and fungal partner, playing a pivotal role in regulating nutrient dynamics, rhizosphere processes and crop productivity within agroecosystems. This review presents a comprehensive and critical analysis of the agricultural implications of mycorrhiza, viewed in light of the latest research focused on arbuscular mycorrhiza. Available evidence indicates that mycorrhiza significantly enhances nutrient use efficiency particularly with regard to phosphorus uptake by activating highly efficient nutrient acquisition mechanisms. The extensive network of fungal hyphae effectively expands the root zone, strengthening soil-water-plant interactions and leading to a qualitative improvement in the plants' water uptake capacity, as well as their tolerance to drought, salinity and thermal stresses. In the future, the integration of mycorrhiza with omics-based approaches and precision agriculture techniques presents significant potential for the development of site-specific, high-performance strains. However, for its widespread application in agriculture, scientific solutions addressing its ecological adaptability, strain specificity and management-related complexities are required. Altogether, it suggests mycorrhiza as a highly promising biological tool for enhancing agricultural sustainability, resource efficiency and ecological resilience.

Key words: Biofertilizer, Mycorrhiza, Plant-microbe interaction, Soil fertility, Sustainable agriculture.

बढ़ती मानव जनसंख्या और जलवायु परिवर्तन विश्व खाद्य मांग को पूरा करने के लिए वैश्विक कृषि पर जबरदस्त दबाव डाल रहे हैं। फसल उत्पादन और भूमि उत्पादकता बढ़ाने के लिए, उर्वरकों, कीटनाशकों, खरपतवारनाशी आदि जैसे रसायनों का जबरदस्त उपयोग हो रहा है, जिसका मिट्टी की गुणवत्ता, पारिस्थितिक विविधता, अर्थव्यवस्था और पर्यावरण पर नकारात्मक प्रभाव पड़ रहा है (Sun *et al.*, 2016)। भविष्य में भी इन रसायनों का उपयोग काफी बढ़ने का अनुमान लगाया गया है। इसके अलावा, इन रसायनों का उपयोग भविष्य की

Department of Botany, Swami Shraddhanand College, Alipur-110 036, Delhi, India.

Corresponding Author: Bhawna Saxena, Department of Botany, Swami Shraddhanand College, Alipur-110 036, Delhi, India.
Email: bhawna@ss.du.ac.in

How to cite this article: Saxena, B. (2026). Role of Mycorrhizae in Nutrient Acquisition and Promoting Plant Growth in Sustainable Agriculture: A Review. *Bhartiya Krishi Anusandhan Patrika*. 41(3): 251-260. doi: 10.18805/BKAP937.

Submitted: 14-05-2026 **Accepted:** 10-09-2026 **Online:** 06-10-2026

खाद्य सुरक्षा के लिए एक चेतावनी हो सकता है। कृषि उत्पादकता में सुधार और मानव स्वास्थ्य की सुरक्षा के लिए हमें पर्यावरण अनुकूल कृषि पद्धतियों का पालन करने की आवश्यकता है, और इसे दीर्घोपयोगी कृषि के माध्यम से प्राप्त किया जा सकता है। दीर्घोपयोगी कृषि का मुख्य उद्देश्य पर्यावरण अनुकूल कृषि तकनीकों के साथ भोजन की मांग को पूरा करना है।

मिट्टी सूक्ष्मजीवों की विस्तृत श्रृंखला के लिए एक उत्कृष्ट आवास है, जिसमें कवकमूल कवक सभी मिट्टी के कवक में सबसे सर्वव्यापी है। कवकमूल कवक के साथ पौधों की जड़ों का सहजीवी संबंध पौधों की रूपात्मक, शारीरिक और जैव रासायनिक प्रतिक्रियाओं में सुधार करने के लिए जाना जाता है, यह टिकाऊ कृषि के लक्ष्यों को प्राप्त करने में मदद कर सकता है। कवकमूल शब्द का प्रयोग पहली बार वर्ष 1884 में ए.बी. फ्रैंक द्वारा किया गया था, जिसका अर्थ है किसी कवक तथा वाहिक पादपों की जड़ों के बीच परस्पर सहजीवी सम्बन्ध स्थापित होना। अरटिकेसी, चेनोपोडियासी, ब्रैसिकेसी और साइपेरेसी परिवार से संबंधित पौधों में शायद ही कभी माइकोरिजल उपनिवेशन होता है। कवकमूल कवक अकार्बनिक कार्बन और आश्रय के लिए अपने मेजबान पर निर्भर करते हैं, और बदले में वे पौधों के पानी और पोषक तत्वों को बढ़ाकर पौधे की वृद्धि को बढ़ाते हैं। इन्हें जल से भूमि तक पौधे की स्थापना में शामिल एक लंबा विकासवादी इतिहास रखने वाला प्राचीन संघ माना जाता है। फाइलोजेनेटिक विश्लेषण और प्राचीन रिकॉर्ड यह भी सुझाव देते हैं कि 450 मिलियन से अधिक वर्ष पहले कुछ प्रारंभिक डेवोनियन काल के पौधों ने इन फिलामेंटस कवक के साथ एक अंतरंग संबंध स्थापित किया था जिसे अब माइकोरिजल कवक के रूप में जाना जाता है (Upasani and Barl, 2025)।

कवकमूल ग्लोमालिन जैसे मृदा-संरचनात्मक प्रोटीन के स्राव द्वारा मृदा संघटन को स्थिर करता है तथा सूक्ष्मजीव समुदाय की संरचना एवं क्रियाशीलता को प्रभावित करता है। साथ ही, यह प्रेरित प्रणालीगत प्रतिरोध एवं जैव-नियंत्रण तंत्रों के माध्यम से रोगजनकों के विरुद्ध पौधों की प्रतिरक्षा प्रतिक्रियाओं का सशक्तीकरण करता है। टिकाऊ कृषि के संदर्भ में, कवकमूल-आधारित जैव उर्वरकों का एकीकरण रासायनिक इनपुट्स पर निर्भरता को न्यूनतम करते हुए पारिस्थितिक संतुलन को सुदृढ़ करने की एक प्रभावी रणनीति के रूप में उभर रहा है।

शोध अध्ययन ने पौधे के पोषक तत्वों को बढ़ाने, मिट्टी की संरचना में सुधार करने और पौधे की प्रकाश संश्लेषक क्षमता, वाष्पोत्सर्जन की दर, जड़ हाइड्रोलिक चालकता, जल उपयोग दक्षता, एंजाइमेटिक और गैर-संचय को प्रभावित करके जैविक और अजैविक तनाव के प्रति पौधों की सहनशीलता को बढ़ाने

में माइकोरिजल एसोसिएशन की भूमिका को भी दिखाया है। एंजाइमेटिक एंटीऑक्सिडेंट, संगत कार्बनिक विलेय, आसमाटिक समायोजन आदि। इसके अलावा, ये कवकमूल संघ पोषक तत्वों और अन्य संसाधनों के बेहतर आदान-प्रदान के लिए समुदाय में कई पौधों को जोड़ने वाला एक सामान्य भूमिगत जाल विकसित करने के लिए भी जाने जाते हैं। इस सहजीवी संघ में सभी जलवायु परिस्थितियों में उच्च पैदावार, टिकाऊ कृषि और पोषण गुणवत्ता पैदा करने की काफी संभावनाएं हैं। कृषि में बायोस्टिमुलेंट और बायोफर्टिलाइजर के रूप में कवकमूल के अनुप्रयोग ने कृषि रसायनों पर निर्भरता को कम करने, फसल की उपज और स्थिरता में सुधार करने की क्षमता दिखाई है (Delaeter *et al.*, 2024; Sun and Shahrajabian, 2023; Kuila and Ghosh, 2022)। जैविक खेती, कृषि वानिकी और जलवायु अनुकूल कृषि पद्धतियों में उनका समावेश कृषि में उनके महत्व पर जोर देता है। आणविक जीव विज्ञान, जीनोमिक्स और माइक्रोबायोटम अनुसंधान में हाल की प्रगति ने माइकोरिजल विविधता, सहजीवी तंत्र और पौधे प्रणाली में उनकी भूमिका के बारे में हमारी समझ को काफी हद तक बढ़ाया है। ज्ञान में ये प्रगति इंजीनियरिंग माइक्रोबियल कंसोर्टिया और सटीक कृषि दृष्टिकोण के लिए मार्ग प्रशस्त कर रही है, जो कवकमूल सहसंबंध के लाभों को अधिकतम करेगी।

इस समीक्षा का उद्देश्य टिकाऊ कृषि में माइकोराइजा की भूमिका की जांच करना है, जिसमें मुख्य रूप से तनाव प्रबंधन के साथ-साथ पौधों की वृद्धि को बढ़ावा देने में उनकी क्रियाविधि और अनुप्रयोग पर ध्यान केंद्रित किया गया है। यह कार्य कृषि में स्थिरता प्राप्त करने में अपनी पूरी क्षमता का उपयोग करने के लिए बहु-विषयक रणनीतियों को विकसित करने के लिए वर्तमान चुनौतियों और भविष्य की संभावनाओं पर भी प्रकाश डालता है।

कवकमूल सहजीविता की स्थापना एवं सिग्नलिंग

कवकमूल सहजीविता की स्थापना एक अत्यंत नियंत्रित, बहु-स्तरीय एवं द्विदिशीय सिग्नलिंग प्रक्रिया है, जिसमें पौधे एवं कवक के बीच रासायनिक संकेतों का आदान-प्रदान होता है। यह प्रक्रिया राइजोस्फीयर स्तर से प्रारंभ होकर जड़ कॉर्टेक्स में आर्बस्कुल निर्माण तक पहुँचती है और इसमें विशिष्ट जीन नेटवर्क, सिग्नलिंग मार्ग एवं कोशिकीय पुनर्संरचना सम्मिलित होती है (Genre *et al.*, 2013; Parniske, 2008)।

सहजीविता की प्रारंभिक अवस्था में पौधे अपनी जड़ों से स्ट्रिगोलैक्टोन्स का स्राव करते हैं, जो कवकीय बीजाणुओं के अंकुरण एवं हाइफी शाखाकरण को प्रेरित करते हैं। ये संकेत विशेष रूप से फॉस्फोरस-अभाव स्थितियों में अधिक स्रावित

होते हैं, जिससे सहजीविता की संभावना बढ़ती है (Akiyama *et al.*, 2005)। कवक, पौध संकेतों के प्रत्युत्तर में मिक कारक का स्राव करता है, जो पौध कोशिकाओं में सहजीविता-विशिष्ट सिग्नलिंग मार्गों को सक्रिय करते हैं। ये संकेत नोड फैक्टर्स के समान होते हैं, जो राइजोबियम-लेग्यूम सहजीविता में पाए जाते हैं (Genre *et al.*, 2013)। मिक कारक के अभिग्रहण के पश्चात पौध कोशिकाओं में एक संरक्षित सिग्नलिंग मार्ग सक्रिय होता है, जिसे सामान्य सहजीवन संकेत मार्ग कहा जाता है। इस मार्ग की प्रमुख विशेषता नाभिकीय क्षेत्र में आवर्तक कैल्शियम स्पाइकिंग है, जो संकेत पारगमन का एक केंद्रीय घटक है। कैल्शियम सिग्नलिंग के पश्चात CYCLOPS/IPD3 जैसे ट्रांसक्रिप्शन कारक सक्रिय होते हैं, जो सहजीविता-संबंधी जीनों (SYM) की अभिव्यक्ति को प्रेरित करते हैं।

कवकीय हाइफी मूल एपिडर्मिस पर विशेष चिपकने वाली संरचना हाइफोपोडियम बनाती है, जो जड़ सतह पर संपर्क स्थापित करने में सहायक होती है (Genre *et al.*, 2005)। कवकीय प्रवेश से पूर्व, पौध कोशिकाएँ एक आंतरिक संरचना विकसित करती हैं, जो हाइफी के प्रवेश मार्ग को निर्देशित करती है। यह कोशिकीय पुनर्संरचना माइक्रोट्यूब्यूल्स एवं एक्टिन फिलामेंट्स द्वारा नियंत्रित होती है।

जड़ कॉर्टेक्स में प्रवेश करने के पश्चात कवक अत्यधिक शाखायुक्त आर्बस्कुल संरचनाएँ बनाता है। ये संरचनाएँ पौध कोशिकाओं की प्लाज्मा झिल्ली से घिरी होती हैं, जिसे पेरिआर्बस्कुलर मेम्ब्रेन कहा जाता है (Parniske, 2008)। पेरिआर्बस्कुलर मेम्ब्रेन में विशिष्ट ट्रांसपोर्टर प्रोटीन्स (जैसे PT4 फॉस्फेट ट्रांसपोर्टर) उपस्थित होते हैं, जो कवक से पौधे की ओर पोषक तत्वों के प्रवाह को नियंत्रित करते हैं (Javot *et al.*, 2007)। कवकमूल सहजीविता में पौध हार्मोन जैसे ऑक्सिन, जिबरेलिन, एब्सिसिक अम्ल (ABA) एवं जैस्मोनिक अम्ल महत्वपूर्ण भूमिका निभाते हैं। स्ट्रिगोलैक्टोन्स सहजीविता की प्रारंभिक स्थापना में सहायक होते हैं, एब्सिसिक अम्ल आर्बस्कुल स्थिरता को प्रभावित करता है तथा जैस्मोनिक अम्ल प्रतिरक्षा एवं सहजीविता के संतुलन को नियंत्रित करता है।

विभिन्न प्रकार के कवकमूल सहजीवन और पौधे में उनकी स्थापना

कवकमूल सहजीवन में कवक के पौधे की जड़ में प्रवेश की सीमा, बाहरी आवरण के उत्पादन और अंतरकोशिकीय संरचनाओं के निर्माण के आधार पर वर्गीकृत किया गया है जो वे पौधे की जड़ के अंदर बनाते हैं (तालिका 1)। उपनिवेशन की सीमा के आधार पर, कवकमूल सहजीवन के दो प्रमुख प्रकार हैं:

तालिका 1: पौधे में विभिन्न प्रकार के माइकोरिजल संघ।

माइकोरिजल एसोसिएशन	विशेषता	कवक शामिल
एक्टोकवकमूल	कवक जड़ के बाहर एक मोटा आवरण बनाते हैं। हाइफे जड़ कॉर्टिकल कोशिकाओं में प्रवेश नहीं करता है।	एस्कोमाइसेट्स, बेसिडिओमाइसेट्स और गैस्ट्रोमाइसेट्स से संबंधित कवक ग्लोमेरोमाइकोटा
एंडोकवकमूल	हाइफे जड़ कॉर्टिकल कोशिकाओं के अंदर प्रवेश करते हैं और बढ़ते हैं।	
एक्टेंडोकवकमूल	कवक जड़ के बाहर एक पतला आवरण बनाते हैं। हाइफे जड़ कॉर्टिकल कोशिकाओं में प्रवेश कर सकता है।	एस्कोमाइसिटीस
मोनोट्रोपोइड कवकमूल	कवक के हाइफे एक्लोरोफिलस मोनोट्रोपोइड पौधे की जड़ों के बाहर एक मोटी आवरण बनाते हैं और इंटरसेल्युलर प्रवेश भी दिखाते हैं।	बेसिडिओमाइसीट्स
आर्बुटोइड कवकमूल	एरिकेसी परिवार के सदस्यों के साथ सहजीवी संबंध के लिए कवक। कवक के हाइफे जड़ के बाहर एक मोटी आवरण और हार्टिंग जाल बनाते हैं और अंतःकोशिकीय प्रवेश दिखाते हैं।	बेसिडिओमाइसीट्स बेसिडिओमाइकोटा
आर्किडेसियस कवकमूल	ऑर्किडेसी परिवार के सदस्यों के साथ सहजीवी संबंध के लिए कवक। हाइफे सेलुलर पैठ दिखाते हैं।	
एरिकॉइड कवकमूल	हीथलैंड में उगने वाले एरिकेसी परिवार के सदस्यों के साथ सहजीवी संबंध के लिए कवक। हाइफे इंटरसेल्युलर रूप से प्रवेश करते हैं और जड़ कोशिकाओं की बाहरी परत में कुंडलियाँ बनाते हैं।	एस्कोमाइसिटीस

एक्टोमाइकोरिजा और एंडोमाइकोरिजा, उनमें से, सबसे आम एसोसिएशन एंडोमाइकोरिजा है जिसे अर्बुस्कुलर माइकोरिजल फंगी (एएमएफ) भी कहा जाता है। एएमएफ में ग्लोमेरमाइकोटा कवक के हाइपहे रूट कॉर्टेक्स को उपनिवेशित करते हैं और एक्स्ट्रा-मेट्रिकल हाइपहे विकसित करते हैं। ये एक्स्ट्रा-मेट्रिकल हाइपहे जड़ से कई मीटर दूर तक फैले हुए मेजबान पौधे के लिए खनिज पोषक तत्वों और पानी के अधिग्रहण का काम करने के लिए जाने जाते हैं। कुछ हाइपहे कॉर्टिकल कोशिकाओं के भीतर द्विभाजित रूप से शाखाओं वाले पेड़ जैसी संरचना में विकसित हो सकते हैं, जिन्हें आर्बुस्कुलस कहा जाता है, जो पौधे और एएमएफ के बीच पोषक तत्वों के आदान-प्रदान का स्थान है। पौधा दोनों साझेदारों के बीच आपसी संबंध स्थापित करते हुए पानी और पोषक तत्व के बदले एएमएफ को कार्बन और आश्रय प्रदान करता है।

अर्बुस्कुलर माइकोरिजल कवक फलने वाले शरीर के रूप में सूक्ष्म बीजाणु पैदा करता है। यद्यपि कवक के बीजाणु मेजबान पौधे की अनुपस्थिति में अंकुरित हो सकते हैं, लेकिन अपने जीवन चक्र को पूरा करने के लिए कवक को मेजबान पौधे के साथ सहजीवी सहयोग की आवश्यकता होती है। सहजीवी संघ की स्थापना के दौरान दो सिग्नलिंग अणु, एमवाईसी (MYC) फैक्टर और स्ट्रिगोलैक्टोन क्रमशः अंकुरित बीजाणुओं और पौधों की जड़ों के हाइपहे द्वारा उत्पादित होते हैं (Kaur and Suseela, 2020)। स्ट्रिगोलैक्टोन पौधे की जड़ के चारों ओर हाइपहे के विकास को उत्तेजित करता है, जिसके बाद एप्रेसोरियम का निर्माण होता है और फंगल हाइपहे के साथ जड़ कॉर्टिकल क्षेत्र का उपनिवेशण होता है। एएमएफ रूपात्मक रूप से विशिष्ट संरचनाएं अंतर- और इंटर-सेलुलर हाइपहे,

आर्बुस्कुलस और हाइपल कॉइल बनाता है। मेजबान कोशिका में प्रवेश के बाद, कवक मायसेलियम मिट्टी में गहराई तक विकसित होता है, मेजबान पौधे के लिए पानी और पोषक तत्वों को अवशोषित करता है और समुदाय के अन्य पौधों के साथ सहजीवी संबंध भी स्थापित करता है।

टिकाऊ कृषि में कवकमूल की विविध भूमिका

कवकमूल और उनकी विविध भूमिकाएँ

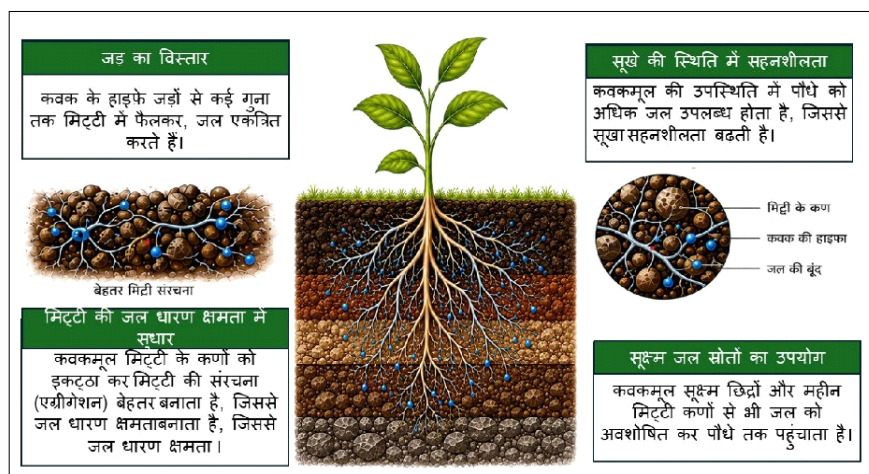
- कवकमूल सहजीवन और खनिज पोषण।
- मिट्टी की गुणवत्ता में सुधार।
- अजैविक तनाव का उन्मूलन।
- जैविक तनाव/रोग पैदा करने वाले रोगजनकों से सुरक्षा।
- पौधों का जल संबंध।
- बंजर भूमि का पुनरुद्धार।

i. कवकमूल सहजीवन और खनिज पोषण

कवकमूल पौधों में पोषक तत्वों के अधिग्रहण को अनुकूलित करने वाला एक उच्च-विशिष्ट सहजीवी तंत्र है, जिसमें आर्बुस्कुलर कवकमूल विशेष रूप से केंद्रीय भूमिका निभाता है। कवकीय हाइफी जड़ क्षेत्र से बाहर विस्तारित होकर एक्स्ट्रा-रैडिकल मायसेलियम का निर्माण करती हैं, जो मृदा के सूक्ष्म छिद्रों तक पहुँचकर जड़ के अवशोषण क्षेत्र को कई गुना बढ़ा देती हैं। यह पोषक तत्वों की कमी वाली मिट्टी और टिकाऊ पोषक तत्व प्रबंधन में महत्वपूर्ण भूमिका निभाता है (आकृति 1)।

फॉस्फोरस घुलनशीलता और अवशोषण

फॉस्फोरस अपनी कम घुलनशीलता और अघुलनशील फॉस्फेट के रूप में उच्च स्थिरीकरण के कारण, मिट्टी में सबसे सीमित



आकृति 1: कवकमूल के पौधों में भूमिका— कवकमूल सहजीवी संबंध के माध्यम से पौधों में पोषक तत्वों का अवशोषण बढ़ता है जो टिकाऊ कृषि के लिए अत्यधिक महत्व रखता है।

पोषक तत्व बन जाता है। यह संरचनात्मक विस्तार विशेष रूप से फॉस्फोरस अधिग्रहण के संदर्भ में अत्यंत महत्वपूर्ण है, जिससे समग्र रूप से रासायनिक फास्फोरस उर्वरक निर्भरता कम हो रही है। एएमएफ निम्नलिखित तरीकों से अनुपलब्ध फॉस्फेट की उपलब्धता को बढ़ाता है :

- हाइफल अन्वेषण जिसमें बारीक फफूंद हाइफे जड़ों के लिए दुर्गम मिट्टी के सूक्ष्मबीजाणुओं में प्रवेश करते हैं।
- कार्बनिक अम्लों और फॉस्फेट्स के स्राव के माध्यम से बाध्य फॉस्फेट का घुलनशीलीकरण, फॉस्फोरस को पौधों के लिए उपलब्ध रूपों में परिवर्तित करना।
- फंगल हाइपहे या आर्बुस्कुलस के माध्यम से कुशल परिवहन।
- कवकमूल-हाइफी फॉस्फेट ट्रांसपोर्टर (Harrison *et al.*, 2002) के माध्यम से अकार्बनिक फॉस्फेट (Pi) का सक्रिय अधिग्रहण कर उसे पॉलीफॉस्फेट के रूप में परिवर्तित करती हैं, जिसे आर्बुस्कुल के माध्यम से पौध कोशिकाओं में स्थानांतरित किया जाता है, जहाँ विशिष्ट पेरिआर्बुस्कुलर झिल्ली स्थित ट्रांसपोर्टर इस विनिमय को नियंत्रित करते हैं।

नाइट्रोजन अधिग्रहण

इसके अतिरिक्त, कवकमूल नाइट्रोजन (NH_4^+ एवं NO_3^-) के अधिग्रहण एवं रूपांतरण में भी योगदान देता है (Gachoma *et al.*, 2009), जहाँ कवक द्वारा अवशोषित नाइट्रोजन अमीनो अम्लों के रूप में पौधों को स्थानांतरित होती है। कुछ प्रकार के कवकमूल विशेष रूप से एक्टोमाइक्रिजा, एंजाइमी क्षरण के माध्यम से अमीनो एसिड और प्रोटीन तक पहुंच सकते हैं। बड़ी हुई जड़-कवक अंतःक्रिया से बेहतर आत्मसात होता है और नाइट्रोजन हानि कम होती है। इसके अलावा कवकमूल

राइजोबैक्टीरिया के साथ मिलकर जैविक नाइट्रोजन स्थिरीकरण को भी बढ़ाता है।

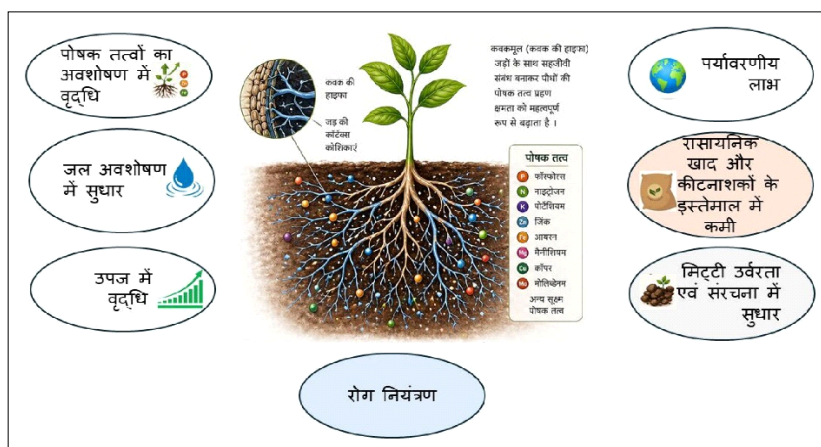
सूक्ष्म पोषक तत्व ग्रहण

Zn, Fe, Cu एवं Mn जैसे सूक्ष्म पोषक तत्वों के घुलनशीलन एवं परिवहन में भी कवकमूल की महत्वपूर्ण भूमिका है, विशेषतः उन मृदाओं में जहाँ ये तत्व अविलेय रूप में सीमित उपलब्धता में होते हैं। यह सहजीविता जड़-व्युत्पन्न एंजाइमों, ऑर्गेनिक एसिड्स एवं माइक्रोबायोम के साथ अंतःक्रियाओं के माध्यम से पोषक तत्वों की जैवउपलब्धता को और अधिक बढ़ाती है।

साथ ही, कवकमूल पौधों की पोषण उपयोग दक्षता को बढ़ाते हुए उर्वरक उपयोग की आवश्यकता को कम करता है तथा संसाधन-सीमित परिस्थितियों में फसल उत्पादकता को बनाए रखने में सहायक होता है। इस प्रकार, कवकमूल सहजीविता एक समन्वित जैव-भौतिक एवं आणविक तंत्र के रूप में कार्य करती है, जो पौध पोषण, मृदा स्वास्थ्य एवं टिकाऊ कृषि प्रणालियों के विकास में निर्णायक योगदान देती है।

ii. मिट्टी की गुणवत्ता में सुधार

मृदा अपरदन, संघनन, लवणीकरण या अम्लीकरण जैसी प्रक्रियाओं से मिट्टी की गुणवत्ता में गिरावट आती है। कृषि विस्तार ने समस्या को और भी गंभीर बना दिया है। कवकमूल के माध्यम से मिट्टी की बहाली एक प्राकृतिक विकल्प है। कवक को जड़ों से बाहर निकलने और हाइपहे का एक जटिल जाल उत्पन्न करने के लिए जाना जाता है। यह कवक जाल मिट्टी के कणों को समुच्चय में बांधता है। मृदा समुच्चय पौधों की वृद्धि के लिए बेहतर वातन, जल निस्पंदन और जल प्रतिधारण प्रदान करता है (आकृति 2)। इसके अलावा, 90% अर्बुस्कुलर कवकमूल



आकृति 2: पौधों के जल अवशोषण में कवक मूल की भूमिका— कवकमूल का विस्तृत जल मिट्टी से ज्यादा जल अवशोषित कर पौधों की जड़ों तक पहुंचाता है जो जल उपयोग दक्षता बढ़ाकर पौधों की वृद्धि और उत्पादकता में सुधार लाता है।

ग्लोमुलिन नामक एक चिपचिपा ग्लाइकोप्रोटीन का उत्पादन करने के लिए जाने जाते हैं, जो मिट्टी में दीर्घकालिक बंधन एजेंट के रूप में कार्य करता है। इसके अलावा, जब कार्बन संबंधी पदार्थ और खनिज मिट्टी के समुच्चय में मौजूद होते हैं, तो वे सूक्ष्म जीवों द्वारा धीरे-धीरे विघटित होते हैं और पौधों के पोषण के लिए उपलब्ध रहते हैं। इस प्रकार हाइपल जाल और ग्लोमुलिन, दोनों मिट्टी के समुच्चय को स्थिर करके मिट्टी की गुणवत्ता में सुधार करते हैं। स्थिर कार्बन पूल बनाकर मिट्टी में कार्बन जमा करने और जलवायु नियंत्रण में भी इनकी भूमिका होती है।

ये अपघटन दर को धीमा करते हैं, मिट्टी में जैविक कार्बन की मात्रा बढ़ाते हैं, जिससे मिट्टी की उपजाऊ शक्ति और बनावट में सुधार होता है। ये जड़ों से निकलने के स्वरूप को बदलकर और फायदेमंद सूक्ष्मजीवों के लिए सूक्ष्म-आवास का निर्माण कर मिट्टी की सूक्ष्मजीव जैव-विविधता को बढ़ाने के लिए भी जाने जाते हैं। साहित्य अध्ययन में यह भी बताया गया है कि PGPR के साथ सहक्रियात्मक अंतःक्रिया करने में इनकी भूमिका होती है, जिससे सूक्ष्मजीव दक्षता बढ़ती है। मिट्टी की बनावट और उपजाऊपन को बेहतर बनाने में इसकी विविध प्रकार की भूमिका इसे टिकाऊ खेती के लिए जरूरी बनाती है।

iii. अजैविक तनाव का उन्मूलन

सूखा, लवणता, बाढ़, गर्मी और ठंड जैसे अजैविक तनाव पौधों के शरीर क्रिया विज्ञान को विकृत कर सकते हैं जिससे उपज में गंभीर हानि हो सकती है। खारेपन, सूखे और अत्यधिक तापमान की स्थिति में अर्बुस्क्यूलर कवकमूल की उपस्थिति, सतत विकास के लक्ष्यों को प्राप्त करने के साथ-साथ पर्यावरणीय तनाव की स्थिति में पौधों की वृद्धि और उपज को बढ़ावा देने के लिए उनका उपयोग करने की संभावना का सुझाव देती है (Santoyo *et al.*, 2026; Abeer *et al.*, 2024; Fattahi *et al.*, 2020)।

कवकमूल मिट्टी में गहराई तक प्रवेश करने वाले एक्स्ट्रा-रेडिकल कवकजाल के लिए जड़ के रूपात्मक चरित्र को बदल देता है। इससे पानी और पोषक तत्वों के अवशोषण में सुधार के साथ जड़ की हाइड्रोलिक चालकता में सुधार होता है। इसके अलावा, पानी के तनाव की स्थिति में, यह जल प्रणाली (एक्वापोरिन) के गठन को भी बढ़ाता है, जिससे कोशिका के अंदर पानी और छोटे अणुओं के प्रवाह को विनियमित करने में भूमिका होती है। तनाव की स्थिति में मिट्टी के समुच्चय के निर्माण से मिट्टी की बनावट में सुधार होता है और मिट्टी में कार्बनिक पदार्थ की मात्रा बढ़ती है जिससे पौधे का बायोमास और उपज बढ़ती है।

यह भी बताया गया है कि एएम शर्करा, प्रोलाइन, ग्लाइसिन-बीटेन जैसे उपयुक्त विलेय के संचय को बढ़ाता है (Folli-Pereira *et al.*, 2020) और सेलुलर आसमाटिक क्षमता को बनाए रखता है। इसके अतिरिक्त, यह झिल्ली पारगम्यता बनाए रखता है, प्रकाश संश्लेषक क्षमता बढ़ाता है, सेलुलर चयापचय में सुधार करता है, अजैविक तनाव के खिलाफ समग्र सेलुलर सुरक्षा के लिए एंजाइम और एंटीऑक्सिडेंट जमा करता है।

iv. जैविक तनाव तथा रोग पैदा करने वाले रोगजनकों से सुरक्षा

कई अध्ययनों ने कीट, जीवाणु, विषाणु, कवक, नेमाटोड और अन्य मिट्टी के सूक्ष्मजीवों के कारण होने वाली विभिन्न रोगजनक बीमारियों में एएम कवक की जैव नियंत्रण भूमिका दर्शायी है। कवक साझेदार द्वारा खनिज पोषक तत्वों का अवशोषण, मेजबान पौधे को अधिक मजबूत और सहनशील या विभिन्न रोगों (Santoyo *et al.*, 2021) के प्रति प्रतिरोधी बनाता है। कवकमूल मेजबान संयंत्र में प्रणालीगत रक्षा तंत्र को प्रेरित करने के लिए भी जाना जाता है (Kumar *et al.*, 2025; Sukorini, 2025), जो सूक्ष्मजीवों के व्यापक स्पेक्ट्रम (रेंज) के खिलाफ लंबे समय तक चलने वाला प्रतिरोध प्रदान करता है। एक बार मेजबान संयंत्र में प्रतिरोध स्थापित हो जाने के बाद, वे सिग्नल अणु के माध्यम से आस-पास के पौधों में रक्षा के प्रेरण को व्यापक बनाते हैं और सामान्य कवकमूल जाल इसमें महत्वपूर्ण भूमिका निभाता है। वे न केवल रोगजनक की स्थापना को रोकते हैं तथा रोगजनक द्वारा हुई क्षति की भरपाई भी करते हैं और पौधे के विकास को बढ़ावा देते हैं। इससे पता चलता है कि कवकमूल टिकाऊ कृषि के लिए रासायनिक संरक्षकों का अद्वितीय विकल्प प्रदान करता है।

v. पौधों का जल संबंध

सूखा एवं जल-सीमित परिस्थितियों में, कवकमूल पौधों में जल अवशोषण को सुदृढ़ करने वाला एक अत्यंत महत्वपूर्ण सहजीवी संबंध है। आर्बस्कुलर कवकमूल की कवकीय हाइफी जड़ क्षेत्र से बाहर विस्तारित होकर कवकजाल का निर्माण करते हैं, यह मृदा के सूक्ष्म छिद्रों में प्रवेश कर जल के उन स्रोतों तक पहुँचती हैं जहाँ पौधों की जड़ें सीधे नहीं पहुँच पातीं। इस प्रकार यह कवकजाल जड़ के प्रभावी अवशोषण क्षेत्र को कई गुना बढ़ा देता है, जिससे पौधों की जल अधिग्रहण क्षमता में उल्लेखनीय वृद्धि होती है।

इसके अतिरिक्त, कवकमूल जड़ कोशिकाओं में एक्वापोरिन प्रोटीन्स की अभिव्यक्ति को विनियमित कर जल परिवहन की दक्षता को बढ़ाता है (Kikuchi *et al.*, 2016)।

यह सहजीविता पौधों में ऑस्मोटिक समायोजन को भी सुदृढ़ करती है, जिसके परिणामस्वरूप प्रोलाइन, शर्करा एवं अन्य ऑस्मोप्रोटेक्टेंट्स का संचय बढ़ता है, जो कोशिकीय जल संतुलन बनाए रखने में सहायक होते हैं। साथ ही, माइकोराइजा एंटीऑक्सीडेंट एंजाइम प्रणाली (जैसे सुपरऑक्साइड डिस्म्यूटेज, कैटालेज) को सक्रिय कर जल-अभाव जनित ऑक्सीडेटिव तनाव को कम करता है (Goicoechea *et al.*, 2020)।

कवकमूल सहजीविता पौध हार्मोनल संतुलन (विशेषतः एब्सिसिक अम्ल, ABA) को भी प्रभावित करती है, जो रंध्र-चालकता और वाष्पोत्सर्जन दर को नियंत्रित कर जल उपयोग दक्षता को बढ़ाता है। इस प्रकार, कवकमूल केवल जल अवशोषण को ही नहीं बढ़ाता, बल्कि जल के उपयोग एवं संरक्षण की समग्र क्षमता को भी सुदृढ़ करता है, जिससे पौधे सूखा एवं अन्य अजैविक तनावों के प्रति अधिक अनुकूल एवं उत्पादक बनते हैं।

vi. बंजर भूमि का पुनरुद्धार

कृषि रसायनों, खनन और विनिर्माण उद्योगों के अत्यधिक उपयोग से सूक्ष्मजीव विविधता, मिट्टी के कार्बनिक पदार्थ, पोषक चक्रण और मिट्टी में पानी की अवधारण में कमी आई है। इसके अलावा, इससे मिट्टी का क्षरण, लवणता, अम्लीकरण और मरुस्थलीकरण हुआ है, जिसके परिणामस्वरूप भूमि उत्पादकता में दीर्घकालिक हानि हुई है (Bunemann *et al.*, 2018; Raut *et al.*, 2020)। कवकमूल में प्रतिकूल परिस्थितियों में जीवित रहने की क्षमता होती है, इसलिए उनका उपयोग टिकाऊ कृषि के लिए बंजर भूमि की बहाली के लिए किया जा सकता है। पौधों की वृद्धि पर इसके सकारात्मक प्रभाव के माध्यम से कवकमूल विभिन्न अजैविक तनावों के प्रति पौधों की सहनशीलता में सुधार करता है। कवकमूल जड़ कुछ प्रकार के रसायन बाहर निकलती हैं जो मिट्टी में फैलता है और जैव-विविधता को बढ़ा देते हैं, इनसे पौधे समुदाय संरचना में सुधार होता है। हाइफे का जाल युवा पौधों की वृद्धि और विकास को सुविधाजनक बनाता है (Jeffries *et al.*, 2003)। मिट्टी के एकत्रीकरण के माध्यम से अर्बुस्कुलर कवकमूल द्वारा उत्पादित ग्लोमालिन मिट्टी की बनावट और कार्बनिक सामग्री में सुधार करता है (Li *et al.*, 2022)। यह दूषित स्थलों से भारी धातु के अवशोषण में भी भूमिका के लिए जाना जाता है (Shuab *et al.*, 2017; Zhang *et al.*, 2022)।

कवकमूल अध्ययन में प्रगति

कवकमूल पर हाल की जड़ उपनिवेशीकरण अध्ययन के प्राचीनकाल-संबंधी विवरण से हटकर प्रणाली जीवविज्ञान, कृत्रिम कंसोर्टिया, माइक्रोबायोम रचना और जैव-सूत्रीकरण की ओर

बढ़ गई हैं। ये तरीके गहरी समझ देते हैं और कुशल, लक्षित और टिकाऊ तरीके बनाने में मदद करते हैं, जिससे कवकमूल अगली पीढ़ी की खेती का आधार बन सके। कवकमूल अध्ययन में ये उन्नति दीर्घोपयोगी के लिहाज से जरूरी हैं।

ओमिक्स अध्ययन

ओमिक्स प्रौद्योगिकी ने सूक्ष्मजीव सहजीवन के आणविक आधार को समझने में बहुत बड़ी भूमिका निभाई है। जीनोमिक्स और ट्रांसक्रिप्टोमिक्स प्रौद्योगिकी के जरिए, जड़ उपनिवेशीकरण, कवक पहचान, अर्बुस्कुल निर्माण, फॉस्फेट विनिमय और तनाव सिग्नलिंग में शामिल जीन की पहचान की गई है (Manfred *et al.*, 2011; Velásquez *et al.*, 2025)। इन अप्रोच से पता चलता है कि पादप-कवक अंतःक्रिया सिर्फ एक सहजीवी संबंध नहीं है, बल्कि यह पादप-कवक सिग्नल, रिसेप्टर, ट्रांसक्रिप्शन फैक्टर और ट्रांसपोर्टर (Martin and van der Heijden, 2024) से जुड़ा एक बहुत ज्यादा रेगुलेटेड आणविक क्रिया है।

प्रोटिओमिक्स अध्ययन ने सहजीवी संबंध, झिल्ली परिवहन, पादप रक्षा विनियमन और कोशिकीय पुनर्रचना में शामिल प्रोटीन की पहचान की (Cauto *et al.*, 2013), जबकि मेटाबोमिक्स होस्ट जैव-रासायनिक मार्ग पुनर्रचना के बारे में जानकारी देता है, जिसमें शर्करा, अमीनो अम्ल, कार्बनिक अम्ल, फेनोलिक्स और तनाव से जुड़े दूसरे चयापचयों में बदलाव शामिल हैं। ये सभी तरीके बेहतर कवकमूल प्रतिक्रियाशील फसलों के विकास में अहम भूमिका निभा सकते हैं।

माइक्रोबायोम इंजीनियरिंग

माइक्रोबायोम इंजीनियरिंग मतलब फसल को बेहतर बनाने के लिए मिट्टी के माइक्रोप्लोरा में बदलाव करना है (Afridi *et al.*, 2022)। जैसा कि पहले भी बताया गया है, माइकोराइजा भी मिट्टी की बनावट और माहौल को बदलने में भूमिका निभाता है। यह जड़ों से निकलने वाले तरल को बदलता है, माइक्रोबियल कम्युनिटी के लिए हाइफल सतह देता है, और पोषक तत्वों से भरपूर रहने की जगह देता है। यह मिट्टी के माइक्रोब्स के साथ इंटरैक्ट कर सकता है और राइजोप्लोरा को नया आकार दे सकता है (Zeng *et al.*, 2025)। माइक्रोबायोम इंजीनियरिंग का भविष्य ऐसे स्थिर पौधा-माइकोराइजा-माइक्रोब कॉम्बिनेशन बनाने पर निर्भर करता है जो अलग-अलग मिट्टी और मौसम की स्थिति में स्थिर रहें।

सिंथेटिक माइकोराइजल कंसोर्टियम या SynCom

ये माइक्रोऑर्गेनिज्म के डिजाइन किए गए कॉम्बिनेशन हैं जिनके काम एक-दूसरे को पूरा करते हैं। इसमें माइकोराइजा के साथ साइडरोफोर बनाने वाले बैक्टीरिया, फॉस्फेट को

घोलने वाले बैक्टीरिया और बायोलॉजिकल कंट्रोल एजेंट शामिल हो सकते हैं, जिनका पौधे की पूरी विकास में भूमिका होती है (Dey *et al.*, 2024; Pellegrino *et al.*, 2022)। इस कंसोर्टियम में माइकोराइजा कीस्टोन कंपोनेंट की भूमिका निभाता है, जिसका इन माइक्रोब्स के लिए सही जगह देने में रोल होता है। हालांकि, इन माइक्रोबियल पार्टनर्स के बीच कम्पैटिबिलिटी ही इन कंसोर्टियम की सफलता का अहम फैक्टर है क्योंकि खराब तरीके से चुने गए कॉम्बिनेशन एक-दूसरे से मुकाबला कर सकते हैं या फील्ड कंडीशन में फेल हो सकते हैं।

बायोटेक्नोलॉजिकल इनोवेशन

माइकोराइजल प्रयोग को खेती में सुधार लाने के लिए बायोटेक्नोलॉजिकल इनोवेशन जरूरी हैं। माइकोराइजा एक जरूरी बायोट्राफ है, इसलिए इसे बिना किसी जीवित होस्ट के बड़े पैमाने पर कमर्शियली नहीं बनाया जा सकता। हाल की रिसर्च बायोरिएक्टर, रूट ऑर्गन कल्चर, सबस्ट्रेट बेस्ड खेती और कैरियर मटीरियल में इसके प्रोडक्शन पर फोकस करती है। बायोफॉर्मूलेषन में इसका बढ़ता उपयोग एक और अहम क्षेत्र है। वायबल स्पोर्स, लंबी शेल्फ लाइफ और पर्यावरण के अनुकूलता के लिए, कैरियर्स, एडजुवेंट्स, फिलर्स और स्टोरेज के तरीकों पर केंद्रित करती हैं।

इनके अलावा, क्रिस्पर और जीन एडिटिंग के तरीके, बेहतर डिलीवरी के लिए नैनोपार्टिकल्स को शामिल करना, और आर्टिफिशियल इंटेलिजेंस पर भी विचार किया जा रहा है, ताकि माइकोराइजल सिस्टम को बड़े पैमाने पर इस्तेमाल किया जा सके और बेहतर बनाया जा सके।

सीमाएँ और चुनौतियाँ

कवकमूल को दीर्घोपयोगी कृषि के लिए एक अच्छा साधन माना जाता है, लेकिन उनका व्यावहारिक उपयोग तकनीकी और वैज्ञानिक रूप से मुश्किल है। पोषक तत्व लेने, पानी सोखने, मिट्टी में इकट्ठा होने, जैविक और अजैविक तनाव प्रतिरोध में उनकी भूमिका के बारे में अच्छी तरह से बताया गया है; हालांकि, नियंत्रित प्रयोगशाला प्रयोग से बाहरी प्रयोग तक उनका बदलाव मेजबान पौधे का प्रकार, पारिस्थितिक बदलाव, कमजोर नियामक मानक और किसानों द्वारा कम अपनाने की वजह से सीमित है।

मेजबान पौधे विशिष्ट इस सहजीवी संबंध की एक और सीमा है। फंगस और होस्ट पौधे के आनुवंशिक रूप के बीच अनुकूलता इस सहजीवी संबंध को बनाने में एक जरूरी कारक है। एक ही प्रजाति की अलग-अलग किस्मों की फसलें अलग-अलग प्रतिक्रिया दिखाते हैं। यह जड़ आकृति, संकेतन,

सहजीवी संबंध के विकास में शामिल मार्ग और पोषक तत्व की जरूरतों में अंतर के कारण हो सकता है। इसके अलावा, कुछ फसलें कवक साथी के साथ इस तरह का सहजीवी संबंध विकसित नहीं करपाती हैं, जिससे इसका इस्तेमाल कम हो जाता है।

कवकमूल इनोक्युलेंट्स का बड़े पैमाने पर उत्पादन भी कभी-कभी इसके बाध्य जैवपोषी प्रकृति के कारण चुनौतीपूर्ण होता है (Ghorui *et al.*, 2023)। बीजाणुओं की बीजाणुओं बनाए रखना, वाहक पदार्थ में मानकीकरण की कमी, गुणवत्ता नियंत्रण, शेल्फ-अवधि स्थिरता इस काम को और मुश्किल बना देती है। इसके अलावा, किसानों में जानकारी की कमी खेती में इसके इस्तेमाल को रोकती है, कई किसानों को पारंपरिक उर्वरक की तुलना में इसके दीर्घकालिक फायदों के बारे में पता नहीं है। लगातार गुणवत्ता के लिए उनके इस्तेमाल के बारे में सीमित तकनीकी जानकारी और कमजोर नियामक ढांचे इस समस्या को और बढ़ाता है, जिससे ऐसी सूक्ष्मजीव प्रौद्योगिकी में किसानों का भरोसा कम होता है।

निष्कर्ष एवं भावी संभावनाएँ

कवकमूल सहजीविता पौध-मृदा-सूक्ष्मजीव अंतःक्रियाओं का एक महत्वपूर्ण जैविक आधार है, जो जल उपयोग दक्षता, पोषक तत्व अधिग्रहण तथा जैविक एवं अजैविक तनावों के प्रति पौध को समन्वित रूप से नियंत्रित करता है। कवकमूल को केवल जैव उर्वरक के रूप में न देखकर पादप पोषण, राइजोस्फीयर अभियांत्रिकी जैविक नियामक के रूप में समझना अधिक उपयुक्त है। भविष्य में जीनोमिक्स, ट्रांसक्रिप्टोमिक्स, प्रोटीओमिक्स तथा मेटाबोलोमिक्स प्रोफाइलिंग से पौध-कवकमूल अंतःक्रियाओं के प्रमुख जीन, सिग्नलिंग नेटवर्क, मेटाबोलाइट्स एवं कार्यात्मक सूक्ष्मजीवी समुदायों की पहचान संभव होगी। इन जानकारीयों का कृषि तथा फसल सुधार कार्यक्रमों के साथ एकीकरण फसल- एवं पर्यावरण-विशिष्ट कवकमूल इनोकुलेंट विकसित करने का आधार प्रदान कर सकता है।

आभार

लेखक इस लेख को पूरा करने के लिए लगातार सहायता, हौसला और एकेडमिक माहौल देने के लिए स्वामी श्रद्धानंद कॉलेज का शुक्रिया अदा करते हैं।

डिस्क्लेमर

इस आर्टिकल में बताए गए विचार और नतीजे सिर्फ लेखक के हैं और जरूरी नहीं कि वे उनसे जुड़े इंस्टीट्यूशन के विचारों को दिखाते हों। दी गई जानकारी कितनी सही और पूरी है, इसके लिए लेखक जिम्मेदार है, लेकिन इस कंटेंट के इस्तेमाल से होने

वाले किसी भी सीधे या अप्रत्यक्ष नुकसान के लिए कोई जिम्मेदारी नहीं लेता है।

हितों का टकराव

लेखक यह घोषणा करता है कि इस लेख के प्रकाशन के संबंध में कोई कॉन्फ्लिक्ट ऑफ इंटरेस्ट नहीं है। स्टडी के डिजाइन, डेटा कलेक्शन, एनालिसिस, पब्लिश करने के फैसले, या मैन्युस्क्रिप्ट तैयार करने में किसी भी फंडिंग या स्पॉन्सरशिप का फायदा नहीं उठाया गया या उस पर असर नहीं डाला गया।

जानकारी के साथ सहमति: NA.

REFERENCES

- Abeer, H., Allah Abd, E.F., Alqarawi, A.A. and Egamberdieva Difuza (2024). Induction of salt stress tolerance in cowpea [*Vigna unguiculata* (L.) Walp.] by arbuscular mycorrhizal fungi. *Legume Research*. **38(5)**: 579-588. <https://doi.org/10.18805/lr.v38i5.5933>.
- Afridi, M.S., Javed, M.A., Ali, S., De Medeiros, F.H.V., Ali, B., Salam, A., Sumaira, Marc, R.A., Alkhalifah, D.H.M., Selim, S. and Santoyo, G. (2022). New opportunities in plant microbiome engineering for increasing agricultural sustainability under stressful conditions. *Frontiers in Plant Science*. **13**: 899464. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.899464>.
- Akiyama, K., Matsuzaki, K.I. and Hayashi, H. (2005). Plant sesquiterpenes induce hyphal branching in arbuscular mycorrhizal fungi. *Nature*. **435(7043)**: 824-827.
- Bunemann, E.K., Bongiorno, G., Bai, Z., Creamer, R.E. (2018). Soil quality-A critical review. *Soil Biology and Biochemistry*. **120**: 105-125. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2018.01.030>.
- Couto, M.S.R., Lovato, P.E., Wipf, D., Dumos-Gaudot, E. (2013). Proteomic studies of arbuscular mycorrhizal associations. *Advances in Biological Chemistry*. **3**: 48-58. <https://doi.org/10.4236/abc.2013.31007>.
- Delaeter, M., Magnin-Robert, M., Randoux, B. and Lounès-Hadj Sahraoui, A. (2024). Arbuscular mycorrhizal fungi as biostimulant and biocontrol agents: A review. *Microorganisms*. **12(7)**: 1281. <https://doi.org/10.3390/microorganisms12071281>.
- Dey, S., Choudhury, D. and Dutta, S. (2024). A consortium of arbuscular mycorrhizal fungi, plant growth promoting fungi and mycorrhiza helper bacteria to establish a tripartite interaction as a boon for improvement of plant growth and augmentation of Aloin and Aloe emodin content in *Aloe barbadensis* Mill. *Research Square*. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-5308322/v1>.
- Fattahi, M., Nasrollahpoumoghdam, S. and Mohammadkhani, A. (2020). Comparison of effectiveness of arbuscular mycorrhiza fungi (AMF) on *Vitis vinifera* under low irrigation conditions. *Agricultural Science Digest*. **41**: 119-128. doi: 10.18805/ag.D-253.
- Folli-Pereira, M.d.S., Garlet, J. and Bertolazi, A.A. (2020). Arbuscular Mycorrhizal Fungi and Their Potential Applications for Sustainable Agriculture. In: Agriculturally Important Fungi for Sustainable Agriculture: Perspective for Diversity and Crop Productivity. [A.N. Yadav, S. Mishra, D. Kour, N. Yadav and A. Kumar (Eds.)], Springer. **1**: 109-119. https://doi.org/10.1007/978-3-030-48474-3_6.
- Gachomo, E., Allen, J.W., Pfeffer, P.E., Govindarajulu, M., Douds, D.D., Jin, H., et al., (2009). Germinating spores of *Glomus intraradices* can use internal and exogenous nitrogen sources for de novo biosynthesis of amino acids. *New Phytologist*. **184(2)**: 399-411. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2009.02925.x>.
- Genre, A., Chabaud, M., Balzergue, C., Puech Pagès, V., Novero, M., Rey, T., Fournier, J., Rochange, S., Bécard, G., Bonfante, P. and Barker, D.G. (2013). Short chain chitin oligomers from arbuscular mycorrhizal fungi trigger nuclear Ca²⁺ spiking in *Medicago truncatula* roots and their production is enhanced by strigolactone. *New Phytologist*. **198(1)**: 190-202.
- Genre, A., Chabaud, M., Timmers, T., Bonfante, P. and Barker, D.G. (2005). Arbuscular mycorrhizal fungi elicit a novel intracellular apparatus in *Medicago truncatula* root epidermal cells before infection. *The Plant Cell*. **17(12)**: 3489-3499.
- Ghorui, M., Chowdhury, S., Das, K., Sunar, K. and Prakash, B. (2023). Optimizing factors for large-scale production of arbuscular mycorrhizal fungi consortia using root organ cultures. *Journal of Biological Methods*. **10**: e99010006. <https://doi.org/10.14440/jbm.2023.410>.
- Goicoechea, N. (2020). Mycorrhizal fungi as bioprotectors of crops against Verticillium wilt- A hypothetical scenario under changing environmental conditions. *Plants*. **9**: 1468. <https://doi.org/10.3390/plants9111468>.
- Harrison, M.J., Dewbre, G.R. and Liu, J. (2002). A phosphate transporter from *Medicago truncatula* involved in the acquisition of phosphate released by arbuscular mycorrhizal fungi. *Plant Cell*. **14(10)**: 2413-2429. <https://doi.org/10.1105/tpc.004861>.
- Javot, H., Pumplin, N. and Harrison, M.J. (2007). Phosphate in the arbuscular mycorrhizal symbiosis: Transport properties and regulatory roles. *Plant, Cell & Environment*. **30(3)**: 310-322.
- Jeffries, P., Gianinazzi, S., Perotto, S., Turnau, K. and Barea, J. (2003). The contribution of arbuscular mycorrhizal fungi in sustainable maintenance of plant health and soil fertility. *Biology and Fertility of Soils*. **37**: 1-16. <https://doi.org/10.1007/s00374-002-0456-8>.
- Kaur, S. and Suseela, V. (2020). Unraveling arbuscular mycorrhiza-induced changes in plant primary and secondary metabolome. *Metabolites*. **10**: 335. <https://doi.org/10.3390/metabo10090335>.

- Kikuchi, Y., Hijikata, N., Ohtomo, R., Handa, Y., Kawaguchi, M. and Saito, K. (2016). Aquaporin-mediated long-distance polyphosphate translocation directed towards the host in arbuscular mycorrhizal symbiosis: Application of virus-induced gene silencing. *New Phytologist*. **211**(4): 1202-1208. <https://doi.org/10.1111/nph.14016>.
- Kuila, D. and Ghosh, S. (2022) Aspects, problems and utilization of Arbuscular Mycorrhizal (AM) application as bio-fertilizer in sustainable agriculture. *Current Research in Microbial Sciences*. **3**: 100107. <https://doi.org/10.1016/j.crmicr.2022.100107>.
- Kumar, A., Kumar, R., Singh, P., Kalaichelvan, S., Santos-Villalobos, S.L., Kumar, N., Fernando, L., Kumar, R., Solanki, M.K., Joshi, N.C. and Babalola, O.O. (2025). Emerging role of arbuscular mycorrhizal fungi in sustainable agriculture: From biology to field application. *Microbiology Open*. **14**(5): e70082. <https://doi.org/10.1002/mbo3.70082>.
- Li, Y., Xu, J., Hu, J., Zhang, T., Wu, X. and Yang, Y. (2022). Arbuscular mycorrhizal fungi and glomalin play a crucial role in soil aggregate stability in Pb-contaminated soil. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. **19**(9): 5029.
- Manfred, G.G. et al. (2011). Full-length transcriptome assembly from RNA-Seq data without a reference genome. *Nature Biotechnology*. **29**: 644-652. <https://doi.org/10.1038/nbt.1883>.
- Martin, F.M. and van der Heijden, M.G.A. (2024). The mycorrhizal symbiosis: Research frontiers in genomics, ecology and agricultural application. *New Phytologist*. **242**: 1486-1506. <https://doi.org/10.1111/nph.19541>.
- Parniske, M. (2008). Arbuscular mycorrhiza: the mother of plant root endosymbioses. *Nature Reviews Microbiology*. **6**(10): 763-775.
- Pellegrino, E., Nuti, M. and Ercoli, L. (2022). Multiple arbuscular mycorrhizal fungal consortia enhance yield and fatty acids of *Medicago sativa*: A two-year field study on agronomic traits and tracing of fungal persistence. *Frontiers in Plant Science*. **13**: 814401. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.814401>
- Raut, R.R., Harale, P. and Kurhe, A. (2020). Studies on soil quality parameters in relation to cropping patterns, micronutrients and pH from Goagalgaon area in Ahmednagar district of Maharashtra, India. *International Journal of Multidisciplinary Current Research*. **6**: 210-219.
- Santoyo, G., Gamalero, E. and Glick, B.R. (2021). Mycorrhizal-bacterial amelioration of plant abiotic and biotic stress. *Frontiers in Sustainable Food Systems*. **5**: 672881. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2021.672881>.
- Shuab, R., Lone, R., Ahmad, J. and Reshi, Z.A. (2017). Arbuscular Mycorrhizal Fungi: A Potential Tool for Restoration of Degraded Land. In: Mycorrhiza-Nutrient uptake, biocontrol, ecorestoration. [A. Varma, R. Prasad and N. Tuteja (Eds.)], (pp. 415-434). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-662-56502-3_21.
- Sukorini, H. (2025). Arbuscular vascular mycorrhizas (MVA) to control wilt disease in tomato (*Solanum lycopersicum* L.). *Agricultural Science Digest - A Research Journal*. doi: 10.18805/ag.DF-720.
- Sun, W. and Shahrajabian M. H. (2023). The application of arbuscular mycorrhizal fungi as microbial biostimulant, sustainable approaches in modern agriculture. *Plants*. **12**(17): 3101. <https://doi.org/10.3390/plants12173101>
- Sun, Y.F., Song, F.Q., Chang, W. and Fan, X.X. (2016). The effects of AMF on the growth and physiology of *E. angustifolia* seedlings under saline stress. *Scientia Silvae Sinicae* **52**: 18-27.
- Upasani, R.R. and Barla, S. (2025). Understanding the mycorrhizal network and ecological symphony: A review. *Agricultural Science Digest*. **45**(3): 371-379. doi: 10.18805/ag.D-6035.
- Velásquez, A., Comejo, P., Carvajal, M., D'Onofrio, C., Seeger, M. and Cuneo, I.F. (2025). A comprehensive review of the transcriptomic and metabolic responses of grapevines to arbuscular mycorrhizal fungi. *Planta*. **262**(3): 58. <https://doi.org/10.1007/s00425-025>.
- Zeng, W., Xiang, D., Li, X., Gao, Q., Chen, Y., Wang, K., Qian, Y., Wang, L., Li, J., Mi, Q., Huang, H., Xu, L., Zhao, M., Zhang, Y. and Xiang, H. (2025). Effects of combined inoculation of arbuscular mycorrhizal fungi and plant growth-promoting rhizosphere bacteria on seedling growth and rhizosphere microecology. *Frontiers in Microbiology*. **7**(15): 1475485.
- Zhang, X., Zhao, B., Zheng, Y., Li, M., Zhang, H., Wang, P., Chen, S., Jin, X. and Wu, X. (2025). Arbuscular mycorrhizal fungi mitigate lead toxicity in maize by restructuring rhizosphere microbiome and enhancing antioxidant defense mechanisms. *Agronomy*. **15**(6): 1310.