CHEMISTRY

फॉस्फेट उर्वरकों का मृदा से आवश्यक पोषक तत्वों के ह्रास पर प्रभाव: एक दशक (2016–2026) के साक्ष्यों की समीक्षा

रंजीता बागड़े, रूचि दुबे शर्मा, श्वेता शर्मा*

करियर कॉलेज (स्वशासी), भोपाल, मध्य प्रदेश, भारत

Published November 2026

Abstract

फॉस्फेट उर्वरक (DAP, SSP एवं NPK संकुल) भारतीय कृषि की उत्पादकता का आधार हैं, किंतु इनकेअधिक या असंतुलित प्रयोग से मृदा-पादप तंत्र में आवश्यक पोषक तत्वों, विशेषकर जिंक (Zn), की उपलब्धता घटने की चिंता बढ़ी है। यह समीक्षा-पत्र वर्ष 2016 से 2026 केबीच प्रकाशित चयनित अध्ययनों, मेटा-विश्लेषण, दीर्घकालिक उर्वरक प्रयोगों तथा अखिल भारतीय मृदा सर्वेक्षण केआँकड़ों का संश्लेषण करता है। साक्ष्य बताते हैं कि फॉस्फोरस का प्रभाव मुख्यतः पौधे केस्तर पर दिखता है। वैश्विक मेटा-विश्लेषण (51 प्रकाशन) में गेहूँ एवं मक्का केदानों में Zn सांद्रता क्रमशः 16.6% एवं 20.2% घटी, जबकि चावल में कोई कमी नहीं मिली और मृदा का उपलब्ध Zn अप्रभावित रहा। यह निष्कर्ष फसल एवं P-मात्रा पर निर्भर है। भारतीय क्षेत्र-प्रयोग में 80 किग्रा P/हे. पर धान केदाने में Zn लगभग 30% कम तथा फाइटिक अम्ल : Zn अनुपात लगभग 66% अधिक रहा। दीर्घकालिक प्रयोगों में P-रहित उपचारों में DTPA-Zn घटा, जबकि P सहित उपचारों में वह नियंत्रण केबराबर रहा; फिर भी NPK में Zn-संतुलन ऋणात्मक था, जो फसल-अपहरण की ओर संकेत करता है। समीक्षा में तंत्र, शोध-अंतराल, संतुलित प्रबंधन की रणनीतियाँ तथा नीतिगत सुझाव प्रस्तुत हैं, ताकि उपज-वृद्धि के साथ-साथ अनाज की पोषण-गुणवत्ता और मृदा-स्वास्थ्य भी सुरक्षित रहे।

Keywords: P–Zn विरोध; जिंक ह्रास; फॉस्फेट उर्वरक; माइकोराइज़ा; मृदा स्वास्थ्य; संतुलित उर्वरीकरण; सूक्ष्म पोषक तत्व

1 प्रस्तावना

फॉस्फोरस (P) पौधों केलिए एक अनिवार्य मुख्य पोषक तत्व है, जो ऊर्जा-स्थानांतरण (ATP), न्यूक्लिक अम्ल तथा कोशिका-झिल्ली केनिर्माण में भाग लेता है। हरित क्रांति केबाद भारत में उपज बढ़ाने केलिए फॉस्फेट उर्वरकों का उपयोग तेज़ी से बढ़ा। वर्ष 2023–24 में देश में डाई-अमोनियम फॉस्फेट (DAP) की अनुमानित खपत लगभग 10.81 मिलियन टन तथा सिंगल सुपर फॉस्फेट (SSP) की लगभग 4.54 मिलियन टन रही (Indus Food, n.d.)। खरीफ 2024 में देश का NPK उपयोग अनुपात 9.8:3.7:1 रहा, जबकि अनुशंसित आदर्श अनुपात 4:2:1 है (Drishti IAS, 2024)। यह असंतुलन संकेत देता है कि पोषक तत्वों का प्रबंधन फसल की वास्तविक आवश्यकता से मेल नहीं खा रहा।

इसी अवधि में सूक्ष्म पोषक तत्वों की कमी एक गंभीर समस्या बनकर उभरी है। ICAR की अखिल भारतीय समन्वित अनुसंधान परियोजना केअंतर्गत 28 राज्यों के615 जिलों से लिए गए 2,42,827 मृदा नमूनों केविश्लेषण में सल्फर (58.6%), जिंक (51.2%) एवं बोरॉन (44.7%) की कमी (अत्यंत अल्प, अल्प एवं प्रच्छन्न कमी सहित) सर्वाधिक पाई गई, जबकि लोहा, ताँबा एवं मैंगनीज़ की कमी क्रमशः 19.2%, 11.4% एवं 17.4% नमूनों में दर्ज हुई (Shukla et al., 2021)। जिंक की कमी का असर मनुष्य तक पहुँचता है: विश्व केप्रमुख गेहूँ-उत्पादक क्षेत्रों में गेहूँ केदाने में Zn की सांद्रता 20.4 से 30.5 मिग्रा/किग्रा केबीच है, जो पोषण-सुदृढ़ीकरण हेतु निर्धारित लक्ष्य (लगभग 40 मिग्रा/किग्रा) से कम है (Chen et al., 2017)।

ऐसे में यह प्रश्न स्वाभाविक है कि क्या फॉस्फेट उर्वरकों का सतत प्रयोग मृदा-पादप तंत्र से आवश्यक पोषक तत्वों के ह्रास को बढ़ाता है। इस समीक्षा में 'ह्रास' को तीन स्तरों पर समझा गया है: (i) मृदा में पादप-उपलब्ध मात्रा का घटना, (ii) पौधे द्वारा ग्रहण तथा दाने में सांद्रता का घटना, और (iii) फसल-अपहरण केकारण कुल पोषक-भंडार का ऋणात्मक संतुलन। समीक्षा केउद्देश्य हैं: फॉस्फोरस–सूक्ष्म पोषक तत्व परस्पर क्रिया केतंत्र स्पष्ट करना; वर्ष 2016–

2026 केसाक्ष्यों का तुलनात्मक संश्लेषण करना; भारतीय संदर्भ में दीर्घकालिक प्रयोगों केनिष्कर्ष देखना; तथा प्रबंधन-रणनीतियाँ एवं शोध-अंतराल चिह्नित करना।

2 समीक्षा की पद्धति

यह एक वर्णनात्मक (narrative) समीक्षा है। वर्ष 2016 से 2026 केबीच प्रकाशित सहकर्मी-समीक्षित शोध-पत्रों का चयन ऑनलाइन शोध-डेटाबेस एवं प्रकाशक-पोर्टलों की खोज से किया गया। खोज-शब्द थे: phosphorus fertilizer, zinc, micronutrient, long-term fertilizer experiment तथा India। चयन में उन अध्ययनों को वरीयता दी गई जो क्षेत्र-प्रयोग, दीर्घकालिक उर्वरक प्रयोग, मेटा-विश्लेषण या समीक्षा-आधारित हों और जिनमें मात्रात्मक परिणाम उपलब्ध हों। तंत्र की व्याख्या हेतु प्रासंगिक पूर्ववर्ती कार्य (जैसे Ova et al., 2015) भी सम्मिलित किए गए। इस लेख में कोई नया प्रायोगिक आँकड़ा प्रस्तुत नहीं है; तालिकाओं केमान संबंधित शोध-पत्रों में प्रकाशित माध्यों पर आधारित हैं तथा प्रतिशत परिवर्तन लेखक द्वारा उन्हीं माध्यों से परिकलित हैं। चूँकि यह प्रक्रिया व्यवस्थित (PRISMA) समीक्षा नहीं है, अतः कुछ प्रासंगिक अध्ययन छूट सकते हैं; यह इस समीक्षा की एक सीमा है।

3 फॉस्फेट एवं सूक्ष्म पोषक तत्वों की परस्पर क्रिया के तंत्र

3.1 मृदा में रासायनिक प्रक्रियाएँ

परंपरागत व्याख्या यह है कि उच्च फॉस्फेट सांद्रता पर जिंक अघुलनशील $Zn_3(PO_4)_2$ केरूप में अवक्षेपित हो जाता है तथा फॉस्फेट केअधिशोषण से मृदा-कणों पर ऋणावेश बढ़ने केकारण Zn का अधिशोषण भी बढ़ता है (Mondal et al., 2020)। पश्चिम बंगाल केनदिया में दो वर्ष (2014–15) केबोरो धान प्रयोग में 80 किग्रा P/हे. देने पर मृदा में डाले गए Zn की DTPA-निष्कर्षणीय मात्रा (Lindsay and Norvell, 1978) 10 किग्रा Zn/हे. पर 1.006 से घटकर 0.916 मिग्रा/किग्रा (लगभग 8.9%) तथा 5 किग्रा Zn/हे. पर 0.902 से 0.771 मिग्रा/किग्रा (लगभग 14.5%) रह गई; किंतु मृदा केमूल (native) Zn में कोई परिवर्तन नहीं हुआ (0.676 से 0.675 मिग्रा/किग्रा) (Mondal et al., 2020)। वैश्विक मेटा-विश्लेषण ने भी पाया कि P केप्रयोग से मृदा का उपलब्ध Zn प्रभावित नहीं होता (Zhang et al., 2021)। अतः मृदा-स्तर पर अवक्षेपण का प्रभाव मुख्यतःहाल ही में डाले गए घुलनशील Zn तक सीमित प्रतीत होता है, और इसे मृदा के जिंक-भंडार का ह्रास कहना उचित नहीं होगा।

3.2 जैविक तंत्र

अधिक फॉस्फोरस आर्बस्कुलर माइकोराइज़ा कवक (AMF) केजड़-उपनिवेशन को घटाता है, जो जिंक जैसे अचल पोषक तत्वों केअवशोषण में पौधे की सहायता करता है। मेटा-विश्लेषण में P केप्रयोग से जड़ में Zn सांद्रता औसतन 9.94% घटी और यह कमी AMF-उपनिवेशन में गिरावट से जुड़ी पाई गई (Zhang et al., 2021)। गेहूँ में उच्च P से Zn का घटाव मूल मृदा में दिखा, किंतु जीवाणुरहित (autoclaved) मृदा अथवा पोषक-विलयन में नहीं (Ova et al., 2015); यह जैविक मध्यस्थता की ओर संकेत करता है। फिर भी, मक्का, सोयाबीन एवं रेपसीड पर हुए अध्ययन के निष्कर्ष बताते हैं कि P-आपूर्ति द्वारा Zn-अवशोषण केनियमन में माइकोराइज़ा केअतिरिक्त कोई अन्य मार्ग भी सक्रिय है (Yu et al., 2020)।

3.3 पादप-शरीरक्रियात्मक तंत्र

अध्ययनों केअनुसार P मुख्यतःजड़ द्वारा Zn-अवशोषण को प्रभावित करता है, जबकि जड़ से प्ररोह तक स्थानांतरण तथा दाने की ओर पुनःसंचलन (remobilization) पर इसका प्रभाव सुसंगत नहीं पाया गया (Yu et al., 2020); मेटा-विश्लेषण में भी प्ररोह-जड़ तथा दाना-भूसा Zn सांद्रता अनुपात अप्रभावित रहे (Zhang et al., 2021)। नदिया केधान-प्रयोग में 80 किग्रा P/हे. पर दाने की उपज लगभग 10% बढ़ी, किंतु दाने में Zn सांद्रता 28.97 से 20.13 मिग्रा/किग्रा (लगभग 30.5%) तथा Zn-ग्रहण 72.92 से 55.94 ग्रा/हे. (लगभग 23.3%) घट गया (तालिका 2); अतः इसे केवल 'तनुकरण प्रभाव' (dilution effect) से नहीं समझाया जा सकता। इसी प्रयोग में दाने में फाइटिक अम्ल 24.93 से

28.65 ग्रा/किग्रा तथा फाइटिक अम्ल : Zn मोलर अनुपात 85.09 से 140.9 हो गया, अर्थात् Zn की जैव-उपलब्धता भी घटी (Mondal et al., 2020)। चीन में गेहूँ पर हुए अध्ययन में भी अत्यधिक P से दाने व आटे में प्रोटीन एवं Zn की जैव-उपलब्धता घटने की पुष्टि हुई (Zhang et al., 2017)।

3.4 मृदा-अभिक्रिया एवं जड़-स्राव की भूमिका

कैल्केरियस (चूनायुक्त) मृदाओं में Zn एवं P की कमी प्रायः साथ-साथ पाई जाती है। P–Zn परस्पर क्रिया केलिए मृदा pH में परिवर्तन, AMF का उपनिवेशन तथा जड़ों से कार्बोक्सिलेट-स्राव जैसे तंत्र सुझाए गए हैं, जो Zn एवं P दोनों की उपलब्धता को प्रभावित करते हैं (He et al., 2021)। इसका अर्थ है कि एक ही मात्रा का P अलग-अलग मृदाओं में भिन्न प्रभाव दे सकता है, और P–Zn विरोध का आकलन मृदा-प्रकार के संदर्भ में ही किया जाना चाहिए।

4 साक्ष्यों का संश्लेषण (2016–2026)

तालिका 1 में चयनित अध्ययनों का सार प्रस्तुत है। इनसे तीन निष्कर्ष उभरते हैं। पहला, P–Zn विरोध फसल-निर्भर है: गेहूँ एवं मक्का में यह स्पष्ट है (क्रमशः −16.6% एवं −20.2%), जबकि चावल में मेटा-विश्लेषण ने कोई प्रभाव नहीं पाया (Zhang et al., 2021)। किंतु चावल पर अध्ययन अपेक्षाकृत कम थे (51 में से 7), और भारतीय क्षेत्र-प्रयोग में धान में भी स्पष्ट कमी मिली (Mondal et al., 2020)। यह अंतर मृदा-गुणों, P की उच्च दर (80 किग्रा P/हे.), जल-प्रबंधन तथा Zn की प्रारंभिक स्थिति से जुड़ा हो सकता है, जिसका परीक्षण आवश्यक है।

Table 1. चयनित अध्ययनों का सार (2016–2023)।

वर्ष	अध्ययन	प्रणाली / क्षेत्र	प्रमुख निष्कर्ष
2016	Shahid et al.	LTFE, कटक; धान–धान; 41 वर्ष	Zn संतुलन N, NP, NK, NPK में ऋणात्मक; P सहित उपचारों में DTPA-Zn नियंत्रण के बराबर; NPK+FYM में सूक्ष्म पोषक तत्व सर्वाधिक
2017	Zhang et al.	गेहूँ; चीन	अत्यधिक P से दाने व आटे में प्रोटीन एवं Zn-जैवउपलब्धता घटी
2019	Niño-Savala et al.	समीक्षा	तलछटी चट्टान-आधारित P उर्वरकों में Cd; मृदा, फसल एवं स्वास्थ्य जोखिम
2020	Zhang et al.	मक्का	P से दाने में Cu की सांद्रता घटी, Fe की नहीं
2020	Yu et al.	मक्का, सोयाबीन, रेपसीड	उच्च P का Zn-पोषण पर प्रतिकूल प्रभाव; माइकोराइज़ा के अतिरिक्त अन्य मार्ग भी
2020	Mondal et al.	नदिया (प. बंगाल); धान; 2014–15	80 किग्रा P/हे. पर दाने में Zn ≈30% कम; दाना-उपज ≈10% अधिक
2020	Adhikari et al.	LTFE, बेंगलुरु; रागी–मक्का; >25 वर्ष	DTPA सूक्ष्म पोषक तत्वों पर N, NP, NPK का बहुत कम प्रभाव; भारी धातुओं का नगण्य संचय
2021	Zhang et al.	मेटा-विश्लेषण (51 प्रकाशन)	दाने में Zn: गेहूँ −16.6%, मक्का −20.2%, चावल 0%; जड़ में Zn −9.94%; मृदा Zn अप्रभावित
2021	Shukla et al.	भारत; 2,42,827 मृदा नमूने	कमी: S 58.6%, Zn 51.2%, B 44.7%
2021	Fan et al.	समीक्षा	N, P, S, Zn, Fe के बीच क्रॉस-टॉक; Pi की कमी से Fe एवं Al का संचय बढ़ता है
2023	Penn et al.	मक्का; नियंत्रित वातावरण	अधिक P-अवशोषण से दाना-उपज घटी; उच्च P पर दाने में Zn एवं Cu (प्रति पौधा) घटे

दूसरा, प्रभाव मुख्यतः पौधे के भीतर और जड़-क्षेत्र में दिखता है, मृदा के उपलब्ध-भंडार में नहीं (Zhang et al., 2021)। तीसरा, उपज-लाभ और पोषण-गुणवत्ता के बीच समझौता (trade-off) है, तथा अत्यधिक P-अवशोषण स्वयं उपज घटा सकता है (Penn et al., 2023)। तालिका 2 एवं चित्र 1 भारतीय क्षेत्र-प्रयोग के आँकड़े दर्शाते हैं।

Table 2. धान (नदिया, 2014–15) में P के स्तरों का प्रभाव (Zn के तीनों स्तरों का माध्य)।

P (किग्रा/हे.)	दाना-उपज (टन/हे.)	दाने में Zn (मिग्रा/किग्रा)	दाने में Zn-ग्रहण (ग्रा/हे.)	फाइटिक अम्ल : Zn	Zn कटाई-सूचकांक
0	2.55	28.97	72.92	85.09	0.257
40	2.61	27.38	70.61	96.80	0.255
60	2.76	24.07	65.65	114.8	0.252
80	2.81	20.13	55.94	140.9	0.246

तालिका 2 के मान Mondal et al. (2020) में प्रकाशित माध्यों से संकलित हैं।

साक्ष्य की गुणवत्ता पर भी ध्यान आवश्यक है। तालिका 1 में केवल दो अध्ययन (Shahid et al., 2016; Adhikari et al., 2020) दीर्घकालिक प्रयोगों पर आधारित हैं; शेष अल्पकालिक प्रयोग, सर्वेक्षण, मेटा-विश्लेषण या समीक्षाएँ हैं। मृदा-उपलब्धता का मापन अधिकांशतः DTPA-निष्कर्षण पर आधारित है, जो सभी मृदाओं में फसल-अनुक्रिया का समान रूप से पूर्वानुमान नहीं देता। नियंत्रित-वातावरण अध्ययन (Penn et al., 2023) तंत्र समझने में उपयोगी हैं, किंतु उनके परिणाम सीधे खेत की स्थितियों पर लागू नहीं किए जा सकते।

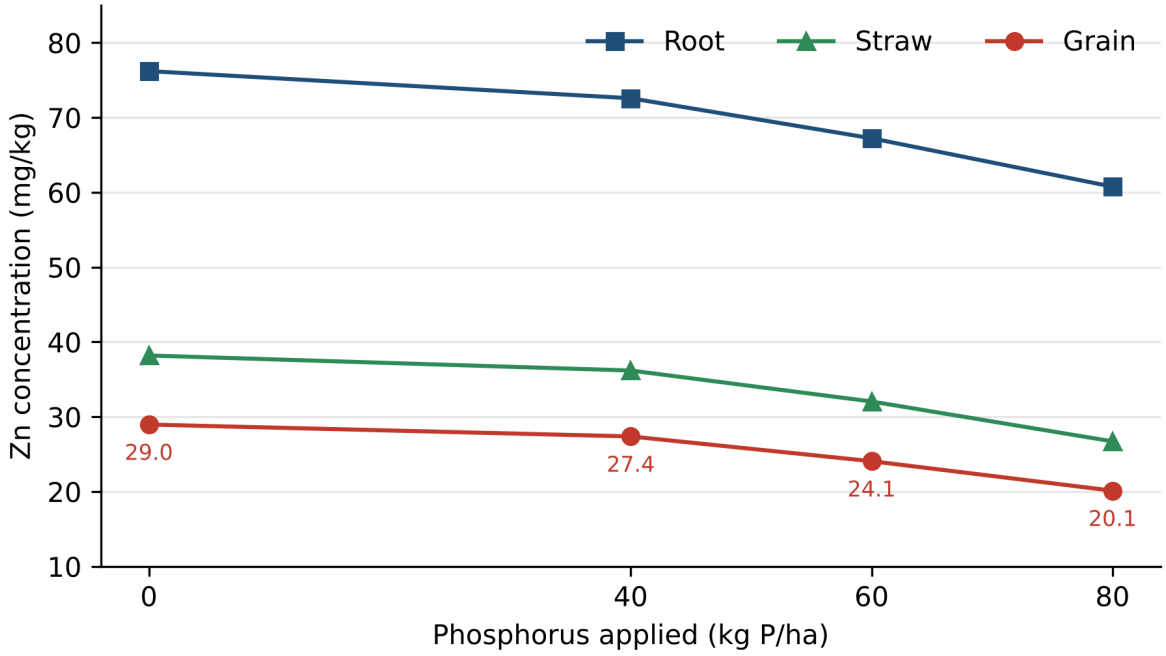


Figure 1. धान के दाने, भूसे एवं जड़ में Zn सांद्रता पर P के स्तरों का प्रभाव.

चित्र 1 के आँकड़े Mondal et al. (2020) से लिए गए हैं।

5 भारतीय संदर्भ: मृदा-सर्वेक्षण एवं दीर्घकालिक प्रयोग

Shukla et al. (2021) केअनुसार भारत की कृषि मृदाओं में उपलब्ध Zn का औसत 1.40 ± 1.60 मिग्रा/किग्रा रहा तथा 131 जिलों में 50% से अधिक नमूने Zn-न्यून थे। एक साथ दो पोषक तत्वों की कमी में S+Zn (9.30%), Zn+B (8.70%) तथा Zn+Fe (5.80%) प्रमुख रहीं। ये नमूने वर्ष 2012–2018 में लिए गए थे; अतः ये आँकड़े एक दशक पुरानी स्थिति दर्शाते हैं और उनका नवीनीकरण आवश्यक है (चित्र 2)।

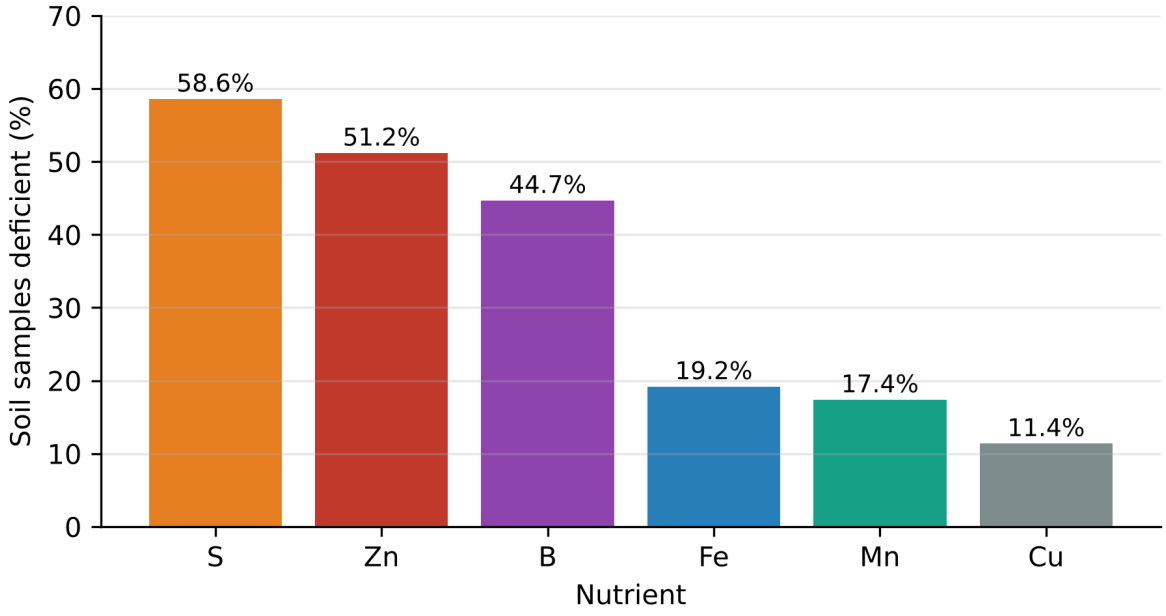


Figure 2. भारतीय मृदाओं में सल्फर एवं सूक्ष्म पोषक तत्वों की कमी (% नमूने).

चित्र 2 के आँकड़े Shukla et al. (2021) से लिए गए हैं।

दीर्घकालिक उर्वरक प्रयोग (LTFE) मृदा-ह्रास को पहचानने का सबसे विश्वसनीय साधन हैं। कटक (ओडिशा) में 1969 से जारी धान–धान प्रणाली में 41 वर्ष बाद पाया गया कि P-रहित रासायनिक उर्वरकों से DTPA-Zn नियंत्रण से घटा, जबकि P सम्मिलित उपचारों में वह नियंत्रण केबराबर बना रहा। तथापि N, NP, NK एवं NPK उपचारों में Zn का संतुलन ऋणात्मक था और मैंगनीज़ का संतुलन सभी उपचारों में ऋणात्मक रहा। P-उर्वरक तथा FYM से मृदा में कुल Fe, Mn, Zn एवं Cu बढ़े, जिसका कारण उनमें उपस्थित सूक्ष्म पोषक तत्व तथा वायुमंडलीय निक्षेपण बताया गया; NPK + FYM उपचार में DTPA-निष्कर्षणीय Fe, Mn, Zn एवं Cu सर्वाधिक रहे (Shahid et al., 2016)। बेंगलुरु में 25 वर्षों से अधिक केLTFE (रागी–मक्का) में N, NP तथा NPK केप्रयोग से DTPA-Zn, Fe, Mn एवं Cu केसंचयन पर बहुत कम प्रभाव पड़ा (Adhikari et al., 2020)।

इन परिणामों से एक परिकल्पना उभरती है: भारतीय खेतों में Zn का ह्रास मुख्यतःउच्च-उपज फसलों द्वारा अपहरण और Zn-रहित उर्वरकों केप्रयोग से होता है; फॉस्फेट का योगदान मृदा-भंडार को सीधे घटाकर नहीं, बल्कि पौधे में Zn-उपलब्धता घटाकर तथा Zn-आपूर्ति केअभाव में अपहरण-असंतुलन बढ़ाकर आता है। इस परिकल्पना को P–Zn द्रव्यमान-संतुलन पर आधारित बहु-स्थानीय अध्ययनों से परखना होगा।

6 अन्य पोषक तत्व एवं संदूषक

ताँबा एवं लोहा: मक्का में P केप्रयोग से दाने में Cu की सांद्रता घटी, पर Fe की नहीं (Zhang et al., 2020)। नियंत्रित वातावरण में उगाई गई मक्का में P-आपूर्ति केउच्चतम स्तर (22 मिग्रा/ली) पर दाने में Zn 3.5 से 2.9 मिग्रा/पौधा तथा Cu 0.65 से 0.23 मिग्रा/पौधा रह गए, जो 12 मिग्रा/ली P पर प्राप्त मानों से कम हैं; दाने का शुष्क भार भी 3732 से

2956 मिग्रा/पौधा हो गया (Penn et al., 2023)। पादप-स्तर पर फॉस्फेट (Pi) एवं Fe केबीच शरीरक्रियात्मक-जैवरासायनिक संबंध हैं; Pi की कमी Fe एवं Al के संचय को बढ़ाती है (Fan et al., 2021)।

सल्फर एवं कैल्शियम: भारत में S की कमी सर्वाधिक (58.6%) है (Shukla et al., 2021)। SSP में S एवं Ca भी होते हैं, जबकि DAP में नहीं। वर्ष 2023–24 में SSP की खपत 9.4% घटकर 4.54 मिलियन टन रही और DAP की खपत 3.8% बढ़ी (Indus Food, n.d.)। यदि यह झुकाव जारी रहा, तो S की आपूर्ति घटने की आशंका है; यह अनुमान है और इसके लिए प्रत्यक्ष प्रमाण की आवश्यकता है।

कैडमियम एवं भारी धातुएँ तलछटी चट्टान से बने फॉस्फेट उर्वरकों में कैडमियम अपेक्षाकृत अधिक मात्रा में पाया जाता है, और मृदा-उर्वरता, फसल तथा मानव-स्वास्थ्य पर उसकेजोखिम की चर्चा हुई है (Niño-Savala et al., 2019)। दूसरी ओर, सामान्य कृषि-पद्धति में फॉस्फेट उर्वरकों से अशुद्धि-तत्वों का संचय सीमित एवं स्थानीय माना गया है (Jiao et al., 2012), और बेंगलुरु के25-वर्षीय LTFE में Cd, Pb, Ni, Co एवं Cr का संचय नगण्य रहा (Adhikari et al., 2020)। अतः जोखिम उर्वरक के स्रोत, मात्रा और मृदा-अभिक्रिया पर निर्भर है।

पोषण-गुणवत्ता एवं जन-स्वास्थ्य: अनाज में Zn की सांद्रता और उसकी जैव-उपलब्धता का घटना केवल कृषि-समस्या नहीं, जन-स्वास्थ्य का भी प्रश्न है। Zn की कमी अनाज-आधारित आहार पर निर्भर विकासशील देशों में विशेष रूप से व्यापक बताई गई है और विश्व की लगभग एक-तिहाई जनसंख्या को प्रभावित करती है (Mondal et al., 2020)। जब उच्च P केकारण दाने में Zn घटे और फाइटिक अम्ल बढ़े (तालिका 2), तो आहार में Zn की प्रभावी आपूर्ति और घट सकती है। अतः P-प्रबंधन को उपज केसाथ-साथ दाने की पोषण-गुणवत्ता केलक्ष्य से भी जोड़ा जाना चाहिए।

7 प्रबंधन रणनीतियाँ

मृदा-परीक्षण आधारित संतुलित उर्वरीकरण: मृदा स्वास्थ्य कार्ड (2015 से) की अनुशंसा केअनुसार P की मात्रा निर्धारित करनी चाहिए और अनावश्यक अधिक दर से बचना चाहिए, क्योंकि उच्च P पर Zn-ग्रहण तथा Zn-जैवउपलब्धता घटती है और कुछ स्थितियों में उपज भी घटती है (Mondal et al., 2020; Penn et al., 2023)।

P केसाथ Zn की आपूर्ति: नदिया प्रयोग में 80 किग्रा P + 10 किग्रा Zn/हे. पर सर्वाधिक उपज मिली (नियंत्रण की तुलना में दाना-उपज +23.28%) तथा 10 किग्रा Zn/हे. से फाइटिक अम्ल : Zn अनुपात लगभग 19% घटा; लेखकों ने उच्च P पर Zn की अधिक मात्रा की आवश्यकता बताई (Mondal et al., 2020)। गेहूँ में P-जनित Zn-कमी को पर्णीय Zn छिड़काव से कम किया जा सका है (Zhang et al., 2012)।

जैविक स्रोतों का समन्वय: FYM या कम्पोस्ट केसाथ NPK (समन्वित पोषक तत्व प्रबंधन) से मृदा में DTPA-निष्कर्षणीय Fe, Mn, Zn एवं Cu सर्वाधिक रहे (Shahid et al., 2016)। साथ ही, P की अधिकता AMF-उपनिवेशन घटाती है (Zhang et al., 2021); अतः P की संतुलित मात्रा जड़-माइकोराइज़ा के संरक्षण में भी सहायक होगी।

8 शोध-अंतराल एवं भावी दिशाएँ

पहला, भारतीय परिस्थितियों में P × Zn पर बहु-स्थानीय एवं बहु-वर्षीय आँकड़ों का अभाव है; उपलब्ध अध्ययन अधिकांशतःएकल-स्थान या चीन-आधारित हैं। दूसरा, पोषक-संतुलन (निवेश–निर्गम) पर आधारित अध्ययन कम हैं, जो ह्रास केवास्तविक स्रोत की पहचान कर सकें। तीसरा, AMF केअतिरिक्त अन्य जैविक एवं जड़-स्रावी मार्गों की पहचान शेष है। चौथा, Cd–Zn का सह-प्रबंधन तथा DAP की तुलना में SSP एवं Zn-समृद्ध फॉस्फेट उर्वरकों का मूल्यांकन आवश्यक है। पाँचवाँ, इस समीक्षा में 2022–2026 की भारत-विशिष्ट प्रकाशित सामग्री अपेक्षाकृत कम मिली; अतः इस अवधि के अध्ययनों की व्यवस्थित खोज भावी समीक्षाओं का कार्य है।

9 निष्कर्ष

उपलब्ध साक्ष्य दर्शाते हैं कि फॉस्फेट उर्वरक मृदा केकुल सूक्ष्म पोषक-भंडार को सीधे नष्ट नहीं करते, परंतु अधिक मात्रा में प्रयोग करने पर वे पौधे द्वारा Zn (तथा कुछ स्थितियों में Cu) केअवशोषण और दानों की पोषण-गुणवत्ता को घटाते हैं। यह प्रभाव गेहूँ और मक्का में स्पष्ट है, चावल में अनिश्चित है, और जैविक (AMF) तथा शरीरक्रियात्मक तंत्रों से जुड़ा है। भारत की मृदाओं में Zn, S एवं B की व्यापक कमी को देखते हुए P का प्रयोग मृदा-परीक्षण पर आधारित, Zn और S सहित संतुलित पोषण तथा जैविक स्रोतों केसमन्वय केसाथ होना चाहिए। ह्रास केवास्तविक कारण को पृथक करने हेतु भारतीय दीर्घकालिक प्रयोगों में पोषक-संतुलन आधारित बहु-स्थानीय अध्ययन आवश्यक हैं।

नीतिगत दृष्टि से सुझाव हैं कि (i) उर्वरक-अनुशंसाओं में P केसाथ Zn एवं S को जोड़ा जाए, (ii) मृदा स्वास्थ्य कार्ड के आँकड़ों का नियमित अद्यतन कर जिला-स्तरीय अनुशंसाएँबनाई जाएँ और (iii) ऐसे दीर्घकालिक प्रयोगों को सुदृढ़ किया जाए जिनमें उपज के साथ दाने की पोषण-गुणवत्ता भी मापी जाए।

References

[1] Adhikari T, Gowda RC, Wanjari RH, Singh M (2020). Impact of continuous fertilization on heavy metals content in soil and food grains under 25 years of long-term fertilizer experiment. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*. https://doi.org/10.1080/00103624.2020.1854290

[2] Chen XP, Zhang YQ, Tong YP, Xue YF, Liu DY, Zhang W, et al. (2017). Harvesting more grain zinc of wheat for human health. *Scientific Reports*, 7, 7016. https://doi.org/10.1038/s41598-017-07484-2

[3] Drishti IAS (2024). Changing trends in fertilizer use (13 December 2024). https://www.drishtiias.com/daily-updates/daily-news-analysis/changing-trends-in-fertilizer-use

[4] Fan X, Zhou X, Chen H, Tang M, Xie X (2021). Cross-talks between macro- and micronutrient uptake and signaling in plants. *Frontiers in Plant Science*, 12, 663477. https://doi.org/10.3389/fpls.2021.663477

[5] He H, Wu M, Su R, Zhang Z, Chang C, Peng Q, Dong Z, Pang J, Lambers H (2021). Strong phosphorus (P)–zinc (Zn) interactions in a calcareous soil–alfalfa system suggest that rational P fertilization should be considered for Zn biofortification on Zn-deficient soils and phytoremediation of Zn-contaminated soils. *Plant and Soil*. https://doi.org/10.1007/s11104-020-04793-w

[6] Indus Food (n.d.). The evolving landscape of Indian fertilizer industry. https://indusfood.co.in/?p=3284

[7] Jiao W, Chen W, Chang AC, Page AL (2012). Environmental risks of trace elements associated with long-term phosphate fertilizers applications: a review. *Environmental Pollution*, 168, 44–53. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2012.03.052

[8] Lindsay WL, Norvell WA (1978). Development of a DTPA soil test for zinc, iron, manganese, and copper. *Soil Science Society of America Journal*, 42(3), 421–428.

[9] Mondal S, Hazra GC, Mani PK, Thingujam U (2020). Interaction effects of phosphorus and zinc on yield and nutritional quality of rice (Oryza sativa). *Indian Journal of Agronomy*, 65(4), 396–403.

[10] Niño-Savala AG, Zhuang Z, Ma X, Fangmeier A, Li H, Tang A, Liu X (2019). Cadmium pollution from phosphate fertilizers in arable soils and crops: an overview. *Frontiers of Agricultural Science and Engineering*, 6(4), 419–430. https://doi.org/10.15302/J-FASE-2019273

[11] Ova EA, Kutman UB, Ozturk L, Cakmak I (2015). High phosphorus supply reduced zinc concentration of wheat in native soil but not in autoclaved soil or nutrient solution. *Plant and Soil*, 393(1–2), 147–162. https://doi.org/10.1007/s11104-015-2483-8

[12] Penn CJ, Camberato JJ, Wiethorn MA (2023). How much phosphorus uptake is required for achieving maximum maize grain yield? Part 2: impact of phosphorus uptake on grain quality and partitioning of nutrients. *Agronomy*, 13(1), 258. https://doi.org/10.3390/agronomy13010258

[13] Shahid M, Shukla AK, Bhattacharyya P, Tripathi R, Mohanty S, Kumar A, Das B (2016). Micronutrients (Fe, Mn, Zn and Cu) balance under long-term application of fertilizer and manure in a tropical rice-rice system. *Journal of Soils and Sediments*, 16, 737–747. https://doi.org/10.1007/s11368-015-1272-6

[14] Shukla AK, Behera SK, Prakash C, Tripathi A, Patra AK, Dwivedi BS, Trivedi V, Rao CS, Chaudhari SK, Das S, Singh AK (2021). Deficiency of phyto-available sulphur, zinc, boron, iron, copper and manganese in soils of India. *Scientific Reports*, 11, 19760. https://doi.org/10.1038/s41598-021-99040-2

[15] Yu BG, Chen XX, Cao WQ, Liu YM, Zou CQ (2020). Responses in zinc uptake of different mycorrhizal and non-mycorrhizal crops to varied levels of phosphorus and zinc applications. *Frontiers in Plant Science*, 11, 606472. https://doi.org/10.3389/fpls.2020.606472

[16] Zhang W, Liu D, Liu Y, Chen X, Zou C (2017). Overuse of phosphorus fertilizer reduces the grain and flour protein and zinc bioavailability of winter wheat (Triticum aestivum L.). *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 65, 1473–1482.

[17] Zhang W, Zou C, Chen X, Liu Y, Liu D, Yang H, Deng Y, Chen X (2020). Phosphorus application decreased copper concentration but not iron in maize grain. *Agronomy*, 10(11), 1716.

[18] Zhang W, Zhang W, Wang X, Liu D, Zou C, Chen X (2021). Quantitative evaluation of the grain zinc in cereal crops caused by phosphorus fertilization: a meta-analysis. *Agronomy for Sustainable Development*, 41, 6. https://doi.org/10.1007/s13593-020-00661-0

[19] Zhang YQ, Deng Y, Chen RY, Cui ZL, Chen XP, Yost R, Zhang FS, Zou CQ (2012). The reduction in zinc concentration of wheat grain upon increased phosphorus-fertilization and its mitigation by foliar zinc application. *Plant and Soil*, 361, 143–152.