http://krishipravahika.vitalbiotech.org/

कृषि प्रवाहिका: ई-समाचार पत्रिका

e-ISSN: 2583 – 0430

कृषि-प्रवाहिका: ई-समाचार पत्रिका, (2026) वर्ष 6, अंक 9, 01-05

Article ID:643

मृदा का डिजिटल जुड़वाँ: सेंसर, कृत्रिम बुद्धिमत्ता और आभासी मॉडल से स्मार्ट खेती की नई दिशा

डॉ. धर्मवीर[1]
अनुभव गालव[2]
आशुतोष सिंह अमन[3]

[1]सहायक प्राध्यापक (मृदा विज्ञान), कृषि एवं पशु चिकित्सा विज्ञान संकाय, मेवाड़ विश्वविद्यालय, गंगरार, चित्तौड़गढ़, राजस्थान–312901, भारत
[2]सहायक प्राध्यापक (कीट विज्ञान), कृषि एवं पशु चिकित्सा विज्ञान संकाय, मेवाड़ विश्वविद्यालय, गंगरार, चित्तौड़गढ़, राजस्थान–312901, भारत
[3]सहायक प्राध्यापक (कीट विज्ञान), कृषि एवं पशु चिकित्सा विज्ञान संकाय, मेवाड़ विश्वविद्यालय, गंगरार, चित्तौड़गढ़, राजस्थान–312901, भारत

*अनुरूपी लेखक

डॉ. धर्मवीर*

परिचय

आज मृदा परीक्षण हमें यह बताता है कि नमूना लेने के समय मिट्टी की स्थिति क्या थी। डिजिटल जुड़वाँ की अवधारणा इससे एक कदम आगे जाकर खेत की मिट्टी, मौसम, फसल, सिंचाई और प्रबंधन से आने वाले डेटा को एक जीवंत वर्चुअल मॉडल में जोड़ने का प्रयास करती है, ताकि किसान केवल वर्तमान स्थिति न देखे, बल्कि संभावित अगला कदम भी समझ सके।

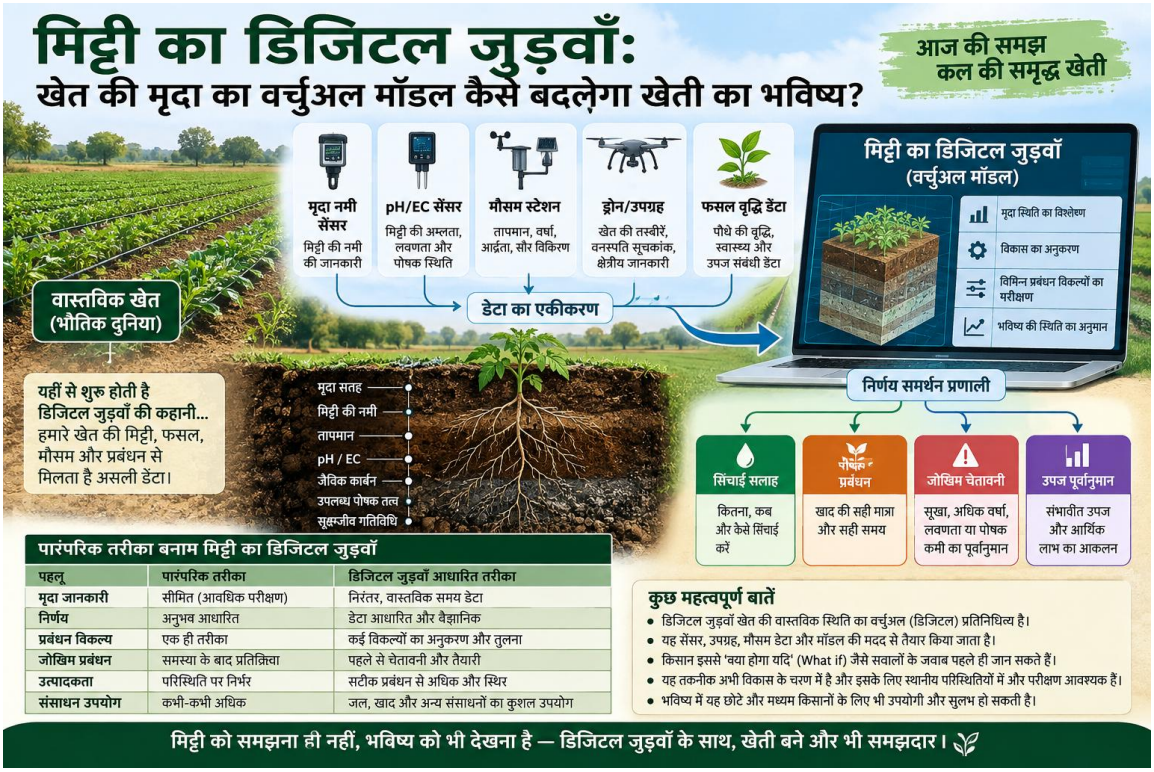
मिट्टी की "रिपोर्ट" से मिट्टी के "व्यवहार" तक

किसान जब मृदा परीक्षण कराता है, तो उसे pH, विद्युत चालकता, जैविक कार्बन तथा उपलब्ध नाइट्रोजन, फास्फोरस और पोटाश जैसी सूचनाएँ मिलती हैं। यह जानकारी अत्यंत महत्त्वपूर्ण है, परंतु खेत स्थिर नहीं रहता। वर्षा के बाद नमी बदलती है, सिंचाई से लवण नीचे या ऊपर जा सकते हैं, फसल की जड़ें पोषक तत्व लेती रहती हैं और तापमान सूक्ष्मजीवों की गतिविधि को प्रभावित करता है। इसलिए एक बार की जाँच खेत की बदलती कहानी का केवल एक चित्र है। "डिजिटल जुड़वाँ" इसी समस्या को हल करने की दिशा में उभरती अवधारणा है। सरल भाषा में, यह वास्तविक खेत या मृदा-फसल प्रणाली का कंप्यूटर पर बनाया गया ऐसा गतिशील प्रतिरूप है जिसे सेंसर, मौसम, उपग्रह/ड्रोन, मृदा परीक्षण और फसल अवलोकनों से समय-समय पर अपडेट किया जाता है। मॉडल इन जानकारियों को जोड़कर यह अनुमान लगाने की कोशिश कर सकता है कि यदि सिंचाई देर से हुई, उर्वरक मात्रा बदली, भारी वर्षा हुई या तापमान बढ़ा तो मिट्टी और फसल की प्रतिक्रिया कैसी हो सकती है।

वर्ष 2025-26 के वैज्ञानिक साहित्य में कृषि डिजिटल ट्विन को तेजी से बढ़ते अनुसंधान क्षेत्र के रूप में देखा गया है। नवीन समीक्षाएँ बताती हैं कि इस तकनीक में वास्तविक समय डेटा, प्रक्रिया-आधारित मॉडल, कृत्रिम बुद्धिमत्ता, रिमोट सेंसिंग और निर्णय-सहायता को एकीकृत करने की क्षमता है; साथ ही बड़े खेतों और विविध कृषि परिस्थितियों में इसकी व्यापक क्षेत्रीय पुष्टि अभी सीमित है। इसलिए इसे "तैयार जादुई समाधान" नहीं, बल्कि विकसित हो रही वैज्ञानिक प्रणाली के रूप में समझना अधिक उचित है।

कृषि प्रवाहिका
ई-समाचार पत्रिका
http://krishipravahika.vitalbiotech.org
e-ISSN: 2583 - 0430
कृषि-प्रवाहिका: ई-समाचार पत्रिका

डिजिटल जुड़वाँ काम कैसे करता है?



चित्र 1: खेत की वास्तविक स्थिति, सेंसर/मौसम/ड्रोन डेटा और वर्चुअल मृदा मॉडल को जोड़कर निर्णय-सहायता बनाने की संकल्पना।

डिजिटल जुड़वाँ की शुरुआत "डेटा" से होती है। मिट्टी की नमी सेंसर, pH/EC मापन, मौसम स्टेशन, वर्षा रिकॉर्ड, फसल की वृद्धि, सिंचाई की मात्रा, उर्वरक उपयोग, ड्रोन या उपग्रह से प्राप्त सूचकांक और समय-समय पर किए गए मृदा परीक्षण—ये सभी अलग-अलग सूचनाएँ हैं। डिजिटल ट्विन इन्हें एक ही प्रणाली में जोड़ने का प्रयास करता है।

इसके बाद मॉडल खेत की भौतिक और जैविक वास्तविकता की नकल करने की कोशिश करता है। कुछ मॉडल जल संतुलन, वाष्पोत्सर्जन, जड़ वृद्धि और पोषक चक्र जैसी प्रक्रियाओं पर आधारित होते हैं; कुछ मशीन लर्निंग से डेटा में छिपे पैटर्न सीखते हैं; और उन्नत प्रणालियाँ दोनों का मिश्रण अपनाती हैं। यही "हाइब्रिड" दृष्टिकोण मृदा-फसल प्रणाली के लिए विशेष रूप से उपयोगी माना जा रहा है, क्योंकि मिट्टी के अनेक व्यवहार वैज्ञानिक नियमों से समझे जा सकते हैं, जबकि स्थानीय भिन्नता डेटा से बेहतर पकड़ी जाती है।

सबसे महत्त्वपूर्ण चरण "क्या होगा यदि..." (What-if) विश्लेषण है। उदाहरण के लिए किसान पूछ सकता है: यदि अगले तीन दिन वर्षा की संभावना है तो आज सिंचाई करनी चाहिए या नहीं? यदि नाइट्रोजन की मात्रा 20 प्रतिशत कम की जाए तो संभावित उपज पर क्या असर पड़ सकता है? यदि खेत के एक हिस्से में EC बढ़ रहा है तो वहाँ अलग सिंचाई या निकास रणनीति की जरूरत है क्या? डिजिटल जुड़वाँ इन प्रश्नों के उत्तर निश्चित भविष्यवाणी के रूप में नहीं, बल्कि उपलब्ध डेटा और मॉडल के आधार पर संभावित परिदृश्य के रूप में देता है।

किसान को वास्तविक लाभ कहाँ मिल सकता है?

- **सिंचाई का बेहतर समय:** मृदा नमी, मौसम और फसल अवस्था को साथ पढ़कर अनावश्यक सिंचाई कम करने तथा जल तनाव से पहले चेतावनी देने में सहायता।
- **पोषक तत्व प्रबंधन:** मृदा परीक्षण, फसल मांग और मौसम को जोड़कर एक समान खेत में भी स्थान-विशिष्ट या समय-विशिष्ट पोषण निर्णय संभव करना।
- **लवणता और जलभराव का जोखिम:** EC, नमी और जल निकास से जुड़े डेटा के आधार पर समस्या वाले क्षेत्र की समय रहते पहचान।
- **उपज और जोखिम पूर्वानुमान:** फसल वृद्धि, मौसम और मृदा स्थिति के संयुक्त संकेतों से संभावित उपज या तनाव की शुरुआती जानकारी।
- **रिकॉर्ड आधारित खेती:** पिछले वर्षों का डेटा संरक्षित रहने से खेत की दीर्घकालिक मृदा-स्वास्थ्य प्रवृत्ति समझना।

पारंपरिक मृदा प्रबंधन और डिजिटल जुड़वाँ में अंतर

तालिका 1: किसान के दृष्टिकोण से पारंपरिक मृदा प्रबंधन और डिजिटल जुड़वाँ आधारित निर्णय-पद्धति की सरल तुलना।

पहलू	पारंपरिक तरीका	डिजिटल जुड़वाँ आधारित तरीका
मृदा जानकारी	समय-समय पर नमूना परीक्षण	परीक्षण + सेंसर + मौसम + फसल डेटा का निरंतर संयोजन
निर्णय	अनुभव, सामान्य सिफारिश और वर्तमान रिपोर्ट	डेटा, मॉडल और संभावित परिदृश्य का संयुक्त उपयोग
सिंचाई	निर्धारित अंतराल या अनुभव पर	नमी, मौसम और फसल की आवश्यकता के अनुसार
पोषक प्रबंधन	खेत के लिए औसत सिफारिश	समय/स्थान के अनुसार अलग निर्णय की संभावना
जोखिम प्रबंधन	समस्या दिखने के बाद प्रतिक्रिया	तनाव या जोखिम के शुरुआती संकेत पर चेतावनी
दीर्घकालिक सीख	रिकॉर्ड बिखरे या सीमित	एकीकृत इतिहास से खेत की प्रवृत्ति और तुलना

एक उदाहरण: सिंचाई और नाइट्रोजन का संयुक्त निर्णय

मान लीजिए किसी किसान के टमाटर या गेहूँ के खेत में मिट्टी की नमी सेंसर से लगातार मिल रही है। मौसम पूर्वानुमान अगले 48 घंटे में वर्षा की संभावना दिखा रहा है, जबकि पौध वृद्धि डेटा बताता है कि फसल तीव्र पोषक मांग की अवस्था में है। सामान्य पद्धति में किसान निर्धारित दिन पर सिंचाई और उर्वरक दे सकता है। डिजिटल जुड़वाँ मॉडल पहले संभावित परिदृश्य चलाएगा—आज सिंचाई + उर्वरक, केवल उर्वरक, वर्षा के बाद उर्वरक, या मात्रा विभाजित करना।

यदि मॉडल संकेत देता है कि भारी वर्षा के पहले अधिक नाइट्रोजन देने से लीचिंग की संभावना बढ़ सकती है, तो किसान मात्रा को विभाजित कर सकता है। इसी तरह यदि मिट्टी में पर्याप्त नमी है तो अनावश्यक सिंचाई टाली जा सकती है। इसका उद्देश्य निर्णय किसान से छीनना नहीं, बल्कि उसे अधिक सूचनापूर्ण विकल्प देना है। वास्तविक खेत में अंतिम निर्णय स्थानीय अनुभव, फसल अवस्था, लागत और विश्वसनीय मौसम जानकारी के साथ ही लिया जाना चाहिए।

मृदा स्वास्थ्य के लिए नया अवसर

डिजिटल जुड़वाँ की सबसे रोचक दिशा केवल उपज नहीं, बल्कि मृदा स्वास्थ्य है। आधुनिक मृदा विज्ञान मृदा को केवल पोषक तत्वों का भंडार नहीं मानता; जल प्रवाह, संरचना, कार्बन, सूक्ष्मजीव, जड़-मृदा संपर्क और पोषक चक्र मिलकर उसकी कार्यक्षमता निर्धारित करते हैं। हाल की वैज्ञानिक समीक्षा ने "soil-plant digital twin" को ऐसा एकीकृत ढाँचा बताया है जिसमें प्रक्रिया-आधारित मॉडल, पृथ्वी अवलोकन डेटा, डेटा-असिमिलेशन और physics-informed machine learning को जोड़ा जा सकता है।

भविष्य में किसी खेत का डिजिटल जुड़वाँ यह बता सकेगा कि पिछले पाँच वर्षों में जैविक कार्बन किस दिशा में गया, कहाँ बार-बार जल तनाव हुआ, किस क्षेत्र में पोषक तत्वों का उपयोग कम दक्ष रहा और कौन-सा प्रबंधन मृदा संरचना को बेहतर बनाए रखने में मदद कर रहा है। इस तरह "एक सीजन की उपज" से ध्यान हटकर "लंबे समय की मृदा कार्यक्षमता" की ओर जा सकता है।

भारत के छोटे और मध्यम किसानों के लिए यह कैसे उपयोगी बनेगा?

भारत में डिजिटल जुड़वाँ तभी उपयोगी होगा जब उसका रूप महँगे सेंसरों और जटिल कंप्यूटर स्क्रीन तक सीमित न रहे। छोटे किसान के लिए इसका सरल रूप मोबाइल आधारित निर्णय सेवा हो सकता है। किसान हर खेत में दर्जनों सेंसर लगाए बिना भी मृदा स्वास्थ्य कार्ड, मौसम डेटा, उपग्रह अवलोकन, सिंचाई रिकॉर्ड और समय-समय पर किए गए सेंसर मापन को साझा प्रणाली में जोड़ सकता है। ग्राम स्तर पर साझा मौसम स्टेशन, किसान उत्पादक संगठन, कृषि विज्ञान केंद्र और विश्वविद्यालय इस मॉडल को अधिक व्यावहारिक बना सकते हैं।

स्थानीय भाषा में चेतावनी—"आज सिंचाई रोकें", "इस भाग में लवणता की जाँच करें", "अगली नाइट्रोजन मात्रा वर्षा के बाद दें"—किसान के लिए जटिल मॉडल से अधिक उपयोगी होगी। इसलिए डिजिटल जुड़वाँ की सफलता तकनीकी शक्ति से उतनी ही जुड़ी है जितनी कि सरल संदेश, कम लागत, स्थानीय सत्यापन और किसान के विश्वास से।

किन सीमाओं को समझना जरूरी है?

- **डेटा की गुणवत्ता:** गलत सेंसर, गलत इकाई या अधूरा रिकॉर्ड मॉडल को गलत दिशा दे सकता है।
- **स्थानीय सत्यापन:** एक क्षेत्र में बना मॉडल दूसरे प्रकार की मिट्टी, जलवायु या फसल में सीधे लागू नहीं किया जा सकता।
- **इंटरऑपरेबिलिटी:** अलग कंपनियों/उपकरणों का डेटा एक-दूसरे से आसानी से न जुड़ना आज भी बड़ी तकनीकी चुनौती है।
- **लागत और रखरखाव:** सेंसर की खरीद, कैलिब्रेशन, इंटरनेट और डेटा प्रबंधन छोटे किसानों के लिए बाधा बन सकते हैं।
- **डेटा स्वामित्व:** किसान का खेत डेटा किसके पास रहेगा, किस उद्देश्य से उपयोग होगा और किसकी अनुमति से साझा होगा—यह स्पष्ट होना चाहिए।
- **अति-निर्भरता से बचाव:** मॉडल सलाह सहायक है; मिट्टी का वास्तविक निरीक्षण, प्रयोगशाला विश्लेषण और स्थानीय कृषि ज्ञान का स्थान पूरी तरह नहीं ले सकता।

भविष्य की दिशा: "एक खेत, एक जीवंत मृदा प्रोफाइल"

आने वाले वर्षों में डिजिटल मृदा प्रोफाइल केवल pH और NPK का रिकॉर्ड नहीं होगा। उसमें नमी की गतिशीलता, तापमान, जैविक कार्बन, लवणता, फसल इतिहास, सिंचाई जल की गुणवत्ता, उपज मानचित्र और संभवतः जैविक संकेतक भी जुड़ सकते हैं। हर नई फसल के साथ मॉडल सीखता जाएगा और खेत की "व्यक्तिगत" मृदा कहानी विकसित होगी।

यह तकनीक विशेष रूप से जलवायु परिवर्तन के संदर्भ में महत्त्वपूर्ण हो सकती है। अनियमित वर्षा, गर्मी की लहर, सूखा और अचानक

जलभराव जैसी स्थितियों में पूर्व निर्धारित सिफारिशें हमेशा पर्याप्त नहीं होतीं। गतिशील मॉडल किसान को बदलती परिस्थिति के अनुसार विकल्प चुनने में सहायता कर सकता है। 2026 की व्यापक समीक्षाएँ भी बताती हैं कि डिजिटल ट्विन आधारित कृषि में जलवायु अनुकूलन, बड़े पैमाने का क्षेत्रीय सत्यापन और अलग-अलग डिजिटल प्रणालियों के बीच डेटा-संगतता अभी प्रमुख अनुसंधान अंतर हैं। यही वे क्षेत्र हैं जहाँ भारतीय मृदा वैज्ञानिक, कृषि विश्वविद्यालय और स्टार्टअप उपयोगी योगदान दे सकते हैं।

किसान के लिए पाँच सरल संदेश

- डिजिटल जुड़वाँ मृदा परीक्षण का विकल्प नहीं, उसका गतिशील विस्तार है।
- सबसे अच्छा मॉडल वही है जो स्थानीय खेत के वास्तविक डेटा से लगातार सुधरता रहे।
- सेंसर की संख्या से अधिक महत्त्वपूर्ण है सही डेटा, सही कैलिब्रेशन और सही व्याख्या।
- जल, उर्वरक और मृदा स्वास्थ्य को अलग-अलग नहीं, एक ही प्रणाली के रूप में देखने से निर्णय बेहतर हो सकते हैं।
- भविष्य की स्मार्ट खेती में किसान का अनुभव और डिजिटल मॉडल प्रतिस्पर्धी नहीं, पूरक होंगे।

निष्कर्ष

"मिट्टी का डिजिटल जुड़वाँ" सुनने में भविष्य की तकनीक लगता है, पर इसकी नींव आज ही हमारे खेतों में मौजूद है—मृदा परीक्षण, मौसम रिकॉर्ड, मोबाइल, उपग्रह डेटा, सेंसर और किसान का अनुभव। नया केवल इतना है कि इन बिखरी जानकारियों को एक ऐसे वर्चुअल मॉडल में जोड़ा जाए जो खेत की स्थिति को समझे, संभावित बदलाव का अनुमान लगाए और सही समय पर उपयोगी निर्णय संकेत दे। यदि यह तकनीक स्थानीय परिस्थितियों में सत्यापित, कम लागत वाली और किसान की भाषा में विकसित की जाती है, तो यह संसाधन बचत, मृदा स्वास्थ्य संरक्षण और जोखिम प्रबंधन के लिए महत्त्वपूर्ण साधन बन सकती है। भविष्य की खेती केवल अधिक डेटा वाली खेती नहीं होगी; वह ऐसा डेटा उपयोग करने वाली खेती होगी जो मिट्टी के बदलते व्यवहार को समझ सके।

संदर्भ हेतु चयनित नवीन वैज्ञानिक स्रोत

Zeng, Y. et al. (2025). Monitoring and Modeling the Soil-Plant System Toward Understanding Soil Health. Reviews of Geophysics. DOI: 10.1029/2024RG000836.

Melesse, T. Y. (2025). Digital twin-based applications in crop monitoring. Heliyon, 11(2), e42137. DOI: 10.1016/j.heliyon.2025.e42137.

Zhang, R., Zhu, H., Chang, Q. & Mao, Q. (2025). A Comprehensive Review of Digital Twins Technology in Agriculture. Agriculture, 15(9), 903. DOI: 10.3390/agriculture15090903.

Subeesh, A. & Chauhan, N. (2026). Agricultural digital twin for smart farming: A review. Green Technologies and Sustainability, 4(2), 100299.

A systematic review of digital twin technologies in broadacre agriculture: Challenges, opportunities, and sustainability. Smart Agricultural Technology, 14 (2026), 102394.