एग्री मैगज़ीन
(कृषि लेखों के लिए अंतरराष्ट्रीय ई-पत्रिका)
वर्ष: 03, अंक: 11 (नवम्बर, 2026)
www.agrimagazine.in पर ऑनलाइन उपलब्ध
© एग्री मैगज़ीन, आई. एस. एस. एन.: 3048-8656

वर्तमान परिप्रेक्ष्य में मृदा कार्बन की स्थिति, गतिकी एवं संवर्धन हेतु वैज्ञानिक प्रबंधन

राजीव पद्धूषण, रागिनी कुमारी एवं *बीर बहादुर सिंह
बिहार कृषि विश्वविद्यालय, सबौर, भागलपुर, बिहार, भारत
*संवादी लेखक का ईमेल पता: beerpusa@gmail.com

मृदा कार्बन मृदा स्वास्थ्य, कृषि उत्पादकता तथा पर्यावरणीय संतुलन का एक अत्यंत महत्वपूर्ण घटक है। यह मृदा की भौतिक, रासायनिक एवं जैविक विशेषताओं को प्रभावित करने के साथ–साथ जलवायु परिवर्तन के शमन में भी महत्वपूर्ण भूमिका निभाता है। वैश्विक स्तर पर मृदा पृथ्वी का सबसे बड़ा स्थलीय कार्बन भंडार है, जिसमें वायुमंडल एवं वनस्पति की अपेक्षा अधिक कार्बन संग्रहित रहता है। किंतु पिछले कुछ दशकों में गहन कृषि, अत्यधिक जुताई, असंतुलित पोषक तत्व प्रबंधन, फसल अवशेषों का दहन तथा जैविक पदार्थों की घटती उपलब्धता के कारण मृदा कार्बन में निरंतर कमी देखी गई है। भारत के अधिकांश कृषि क्षेत्रों, विशेषकर गंगा के मैदानी क्षेत्रों एवं बिहार में मृदा कार्बनिक कार्बन (सॉयल ऑर्गेनिक कार्बन, एस.ओ.सी) का स्तर वांछित स्तर से कम पाया जाता है। एस.ओ.सी में कमी के परिणामस्वरूप मृदा की उर्वरता, जल धारण क्षमता, पोषक तत्वों की उपलब्धता तथा सूक्ष्मजीवी गतिविधियाँ प्रभावित होती हैं, जिससे फसल उत्पादकता एवं कृषि की स्थिरता पर प्रतिकूल प्रभाव पड़ सकता है।

मृदा केवल पौधों के उगने का माध्यम नहीं है, बल्कि यह एक जटिल एवं जीवंत प्राकृतिक संसाधन है जो पृथ्वी के जैव–भूरासायनिक चक्रों का आधार है। मृदा में उपस्थित कार्बनिक पदार्थ का प्रमुख घटक मृदा कार्बन है, जो मृदा की उत्पादकता, उर्वरता, संरचना तथा पर्यावरणीय गुणवत्ता को बनाए रखने में महत्वपूर्ण भूमिका निभाता है। यह पोषक तत्वों के चक्रण, जल संरक्षण एवं कार्बन संचयन में महत्वपूर्ण योगदान देता है। विश्व की मिट्टियों में बड़ी मात्रा में कार्बन (लगभग 1500–2400 गीगाटन) संग्रहित है, जो वायुमंडल एवं वनस्पति में उपस्थित कार्बन की तुलना में एक महत्वपूर्ण कार्बन भंडार का प्रतिनिधित्व करता है। इसलिए मृदा कार्बन में होने वाले परिवर्तन वैश्विक कार्बन चक्र एवं जलवायु प्रणाली को प्रभावित कर सकते हैं। पिछले कुछ दशकों में जनसंख्या वृद्धि के साथ खाद्यान्न उत्पादन बढ़ाने के उद्देश्य से कृषि में रासायनिक उर्वरकों का असंतुलित उपयोग, गहन जुताई, एकल फसल प्रणाली, फसल अवशेषों का दहन तथा जैविक संसाधनों की उपेक्षा तथा असंतुलित पोषक तत्व प्रबंधन के कारण मृदा कार्बनिक कार्बन में निरंतर कमी देखी गई है। इसके परिणामस्वरूप मृदा की संरचना कमजोर हुई है, पोषक तत्वों के संरक्षण की क्षमता घटी है तथा जल धारण क्षमता एवं जैविक सक्रियता प्रभावित हो सकती है। वर्तमान समय में जलवायु परिवर्तन, प्राकृतिक संसाधनों के क्षरण तथा कृषि की स्थिरता जैसी वैश्विक चुनौतियों के संदर्भ में मृदा कार्बन का संरक्षण एवं संवर्धन अत्यंत आवश्यक हो गया है। यदि वैज्ञानिक कृषि प्रबंधन तकनीकों, जैसे संरक्षण कृषि, फसल अवशेष प्रबंधन, जैविक खादों का समुचित उपयोग, कृषि वानिकी तथा एकीकृत पोषक तत्व प्रबंधन को अपनाया जाए, तो मृदा कार्बन के संरक्षण एवं संवर्धन में महत्वपूर्ण योगदान दिया जा सकता है। इससे न केवल मृदा स्वास्थ्य एवं फसल उत्पादकता में सुधार होगा, बल्कि वायुमंडलीय कार्बन के मृदा में संचयन के माध्यम से जलवायु परिवर्तन के शमन में भी योगदान मिलेगा।

मृदा कार्बन का महत्व

मृदा कार्बन मृदा स्वास्थ्य का प्रमुख संकेतक है। यह मृदा की भौतिक, रासायनिक तथा जैविक विशेषताओं को प्रभावित करता है और कृषि उत्पादन प्रणाली की स्थिरता बनाए रखने में महत्वपूर्ण भूमिका निभाता है। मृदा कार्बन की पर्याप्त मात्रा मृदा को अधिक उपजाऊ, जलवायु–अनुकूल तथा दीर्घकालीन उत्पादक बनाती है।

भौतिक गुणों पर प्रभाव

मृदा कार्बन मृदा कणों को स्थिर समुच्चयों (सॉयल एग्रीगेट) में बाँधने का कार्य करता है, जिससे मृदा की संरचना में सुधार होता है। इसके परिणामस्वरूप मृदा की जल धारण क्षमता बढ़ती है, वायु संचार में सुधार होता है, जड़ों का विकास बेहतर होता है, कटाव की संभावना कम होती है एवं मृदा की सतह पर कठोर परत बनने की समस्या घटती है।

रासायनिक गुणों पर प्रभाव

मृदा कार्बन पोषक तत्वों के भंडारण एवं उनकी उपलब्धता को नियंत्रित करता है। यह धनायन विनिमय क्षमता (केटायन एक्सचेंज कैपेसिटी,सी.ई.सी.) में वृद्धि करता है, नाइट्रोजन, फॉस्फोरस, सल्फर तथा अन्य पोषक तत्वों की उपलब्धता में सुधार करता है, पोषक तत्वों के लीचिंग द्वारा होने वाले नुकसान को कम करता है तथा मृदा की बफर क्षमता में वृद्धि करता है। इससे मृदा के पीएच में होने वाले अचानक परिवर्तनों को कम करने में सहायता मिलती है।

जैविक गुणों पर प्रभाव

मृदा कार्बन सूक्ष्मजीवों के लिए ऊर्जा एवं भोजन का प्रमुख स्रोत है। पर्याप्त कार्बन की उपस्थिति में लाभकारी जीवाणुओं एवं कवकों की संख्या में वृद्धि होती है, जैविक पदार्थों के अपघटन की प्रक्रिया तेज होती है, पोषक तत्वों का खनिजीकरण बढ़ता है तथा मृदा में एंजाइमों की गतिविधियाँ अधिक सक्रिय रहती हैं।

कृषि उत्पादकता पर प्रभाव

उच्च मृदा कार्बन स्तर वाली मिट्टियों में बीजों का अंकुरण बेहतर होता है, फसलों की जड़ें अधिक गहराई तक विकसित होती हैं, सूखा एवं बाढ़ जैसी प्रतिकूल परिस्थितियों को सहन करने की क्षमता बढ़ती है, उर्वरकों की उपयोग दक्षता में वृद्धि होती है तथा दीर्घकालीन फसल उत्पादकता बनी रहती है।

मृदा कार्बन के प्रकार

मृदा कार्बन को उसकी स्थिरता एवं विघटन की गति के आधार पर मुख्यतः दो भागों में विभाजित किया जाता हैकृ

(i) सक्रिय कार्बन: सक्रिय कार्बन मृदा कार्बन का सबसे गतिशील भाग है, जिसका जीवनकाल लगभग 1–5 वर्ष होता है। यह सूक्ष्मजीवों द्वारा शीघ्र विघटित हो जाता है, पौधों के लिए पोषक तत्वों का त्वरित स्रोत प्रदान करता है तथा मृदा की जैविक सक्रियता का एक प्रमुख सूचक माना जाता है।

(ii) स्थिर कार्बन: इसके विपरीत, स्थिर कार्बन लंबे समय तक मृदा में सुरक्षित रहता है और इसका जीवनकाल लगभग 100–1000 वर्ष या उससे अधिक हो सकता है। यह मुख्यतः स्थिर जैविक पदार्थ एवं ह्यूमस के रूप में पाया जाता है, मृदा की संरचना एवं कार्बन संचयन में महत्वपूर्ण भूमिका निभाता है तथा जलवायु परिवर्तन के शमन में उपयोगी होता है।

मृदा कार्बनिक पदार्थ के प्रमुख घटक

मॉडलों (जैसे RothC—Rothamsted Carbon Model) के अनुसार मृदा कार्बनिक कार्बन को विभिन्न कार्बन पूलों में वर्गीकृत किया जाता है। प्रमुख घटक निम्नलिखित हैं।

सारणी 1: मृदा कार्बन के विभिन्न घटकों का तुलनात्मक अध्ययन (1984 बनाम 2021)

घटक	1984 (टन/हे.)	2021 (टन/हे.)	परिवर्तन %	विशेषता
DPM (Decomposable Plant Material)	2.5	1.8	–28	शीघ्र विघटित होने वाला पौध अवशेष
RPM (Resistant Plant Material)	10.0	8.5	–15	अपेक्षाकृत धीमी गति से विघटित होने वाला पौध पदार्थ
BIO (Microbial Biomass)	1.2	0.9	–25	सूक्ष्मजीवों का जैवभार
HUM (Humified Organic Matter)	25.0	22.0	–12	अपेक्षाकृत स्थिर ह्यूमस कार्बन
IOM (Inert Organic Matter)	–	–	–	अत्यंत स्थायी एवं लगभग निष्क्रिय कार्बन

वर्तमान परिप्रेक्ष्य में मृदा कार्बन की स्थिति

(i) वैश्विक स्तर

- कृषि भूमि में पिछले 50–100 वर्षों में लगभग 30–50% तक मृदा कार्बन की हानि हुई है।
- प्रत्येक वर्ष लगभग 0.5–1.0 गीगाटन कार्बन मृदा से वायुमंडल में उत्सर्जित होने का अनुमान है।

(ii) भारत में स्थिति

- भारतीय कृषि मृदाओं में औसत मृदा कार्बनिक कार्बन लगभग 0.5% पाया जाता है।
- लगभग 60% कृषि भूमि में मृदा कार्बन की कमी पाई जाती है।
- सिंचित क्षेत्रों में एस.ओ.सी अपेक्षाकृत अधिक, जबकि शुष्क एवं अर्ध–शुष्क क्षेत्रों में कम पाया जाता है।
- पहाड़ी एवं वन क्षेत्रों में सामान्यतः मृदा कार्बन की मात्रा अधिक पाई जाती है।

(iii) बिहार में स्थिति

- गंगा के मैदानी क्षेत्रों में एस.ओ.सी लगभग 0.3–0.6% पाया जाता है।
- बाढ़ प्रभावित क्षेत्रों में जैविक पदार्थ की मात्रा अपेक्षाकृत अधिक, जबकि उच्च भूमि क्षेत्रों में कम पाई जाती है।
- निरंतर फसल उत्पादन, विशेषकर धानदृगेहूँ आधारित फसल प्रणाली, के कारण मृदा कार्बन का क्षय हो सकता है।

सारणी 2. भारत में मृदा कार्बन की स्थिति

क्षेत्र/राज्य	एस.ओ.सी (%) 1980s	एस.ओ.सी (%) 2020s	परिवर्तन (%)
भारत (औसत)	0.75	0.50	–33
बिहार (मैदानी)	0.60	0.40	–33
सिंचित क्षेत्र	0.80	0.60	–25
असिंचित क्षेत्र	0.50	0.30	–40

मृदा कार्बन की गतिकी

मृदा कार्बन एक स्थिर घटक नहीं है, बल्कि यह निरंतर प्रवेश, अपघटन, स्थिरीकरण और ह्रास की प्रक्रियाओं से गुजरता रहता है। इन सभी प्रक्रियाओं को सामूहिक रूप से मृदा कार्बन की गतिकी (सॉइल कार्बन डायनेमिक्स) कहा जाता है।

(i) कार्बन का प्रवेशरू मृदा में कार्बन का प्रवेश मुख्यतः फसल अवशेषों, पौधों की जड़ों, जड़ स्राव, गोबर की खाद, कम्पोस्ट, वर्मी कम्पोस्ट, हरी खाद तथा कृषि वानिकी से प्राप्त पत्तियों एवं अन्य जैव–अवशेषों के माध्यम से होता है।

(ii) कार्बनिक पदार्थ का अपघटनरू मृदा में कार्बनिक पदार्थों का अपघटन मुख्यतः जीवाणु, कवक तथा अन्य सूक्ष्मजीवों द्वारा होता है, जिसके दौरान कार्बन डाइऑक्साइड का उत्सर्जन, पोषक तत्वों का विमोचन, सूक्ष्मजीवी जैवभार का निर्माण तथा कार्बनिक पदार्थ के कुछ भाग का अधिक स्थिर कार्बनिक रूपों में परिवर्तन होता है।

(iii) कार्बन का स्थिरीकरणरू मृदा में कार्बन का स्थिरीकरण मुख्यतः स्थिर कार्बनिक पदार्थों के निर्माण, चिकनी मिट्टी एवं खनिज कणों से जुड़ने तथा सॉइल एग्रीगेट्स के भीतर संरक्षित होने के कारण होता है, जिससे कार्बन लंबे समय तक मृदा में सुरक्षित रह सकता है और कार्बन पृथक्करण (कार्बन सीक्वेस्ट्रेशन) में योगदान देता है।

(iv) कार्बन का ह्रासरू मृदा कार्बन की हानि मुख्यतः अत्यधिक जुताई, मृदा अपरदन, फसल अवशेषों के दहन, जैविक पदार्थों की कमी, उच्च तापमान, सूक्ष्मजीवी श्वसन द्वारा कार्बन डाइऑक्साइड के उत्सर्जन तथा कार्बनिक पदार्थों के त्वरित अपघटन के कारण होती है।

मृदा कार्बन संतुलन

मृदा कार्बनिक कार्बन = कार्बन का प्रवेश – कार्बन की हानि

यदि कार्बन का प्रवेश, कार्बन की हानि से अधिक होगा, तो मृदा कार्बनिक कार्बन की मात्रा बढ़ेगी। इसके विपरीत, यदि कार्बन की हानि, कार्बन के प्रवेश से अधिक होगी, तो मृदा कार्बनिक कार्बन की मात्रा में लगातार कमी आती जाएगी।

मृदा कार्बन को प्रभावित करने वाले प्रमुख कारक

मृदा कार्बनिक कार्बन की मात्रा एक स्थिर मान नहीं होती, बल्कि यह प्राकृतिक एवं मानवजनित कारकों से निरंतर प्रभावित होती रहती है। इन कारकों की समझ मृदा कार्बन संरक्षण एवं संवर्धन के लिए आवश्यक है।

1. जलवायुरू जलवायु मृदा कार्बन का सबसे महत्वपूर्ण नियंत्रक है, क्योंकि उच्च तापमान पर सूक्ष्मजीवों की गतिविधि बढ़ने से कार्बनिक पदार्थों का विघटन तेज होता है, जबकि अधिक वर्षा वाले क्षेत्रों में वनस्पति वृद्धि के कारण कार्बन का संचयन बढ़ सकता है, हालांकि अत्यधिक वर्षा से लीचिंग एवं मृदा कटाव भी बढ़ सकते हैं, जबकि शुष्क क्षेत्रों में जैविक पदार्थों का निर्माण सीमित होने के कारण एस.ओ.सी अपेक्षाकृत कम रहता है।
2. मृदा का प्रकाररू मृदा की बनावट एवं खनिज संरचना कार्बन के संरक्षण को प्रभावित करती है, क्योंकि चिकनी मिट्टियाँ कार्बनिक पदार्थों को अधिक समय तक सुरक्षित रखती हैं, जबकि रेतीली मिट्टियों में कार्बन का विघटन अपेक्षाकृत शीघ्र होता है तथा कैल्शियम एवं लौह युक्त मिट्टियों में कार्बन अपेक्षाकृत अधिक स्थिर रहता है।
3. भूमि उपयोग एवं फसल प्रणालीरू भूमि उपयोग में परिवर्तन का एस.ओ.सी पर प्रत्यक्ष प्रभाव पड़ता है, क्योंकि कृषि भूमि में निरंतर खेती से कार्बन की कमी हो सकती है, जबकि वन एवं घासभूमियों में कार्बन संचयन अधिक होता है तथा धान–दलहन–गेहूँ एवं बहुफसली प्रणालियों में धान–गेहूँ प्रणाली की तुलना में एस.ओ.सी अधिक पाया जा सकता है।
4. जुताईरू अत्यधिक जुताई से मृदा में ऑक्सीजन की उपलब्धता बढ़ती है, जिससे सूक्ष्मजीवों द्वारा कार्बनिक पदार्थों का विघटन तेज होता है, परिणामस्वरूप कार्बन डाइऑक्साइड का उत्सर्जन बढ़ता है और एस.ओ.सी में कमी आती है।
5. जैविक पदार्थों की उपलब्धतारू गोबर की खाद, कम्पोस्ट, वर्मी कम्पोस्ट, हरी खाद एवं फसल अवशेष मृदा कार्बन के प्रमुख स्रोत हैं, इसलिए इनका नियमित एवं उचित उपयोग एस.ओ.सी को बढ़ाने में महत्वपूर्ण भूमिका निभाता है।

मृदा कार्बन संवर्धन हेतु वैज्ञानिक प्रबंधन उपाय

1. फसल अवशेष प्रबंधन – फसल अवशेषों को जलाने के बजाय खेत में मिलाने से मृदा में कार्बनिक पदार्थों की मात्रा बढ़ती है, मृदा संरचना में सुधार होता है, सूक्ष्मजीवी गतिविधियाँ बढ़ती हैं तथा दीर्घकाल में मृदा कार्बनिक कार्बन (OC) में वृद्धि होती है।
2. जैविक खादों का उपयोग – जैविक खादों (गोबर की सड़ी खाद, कम्पोस्ट, वर्मी कम्पोस्ट, बायोगैस स्लरी एवं नगर कम्पोस्ट) के नियमित प्रयोग से मृदा में कार्बनिक पदार्थों की मात्रा बढ़ती है, सूक्ष्मजीवी जैवभार एवं पोषक तत्वों की उपलब्धता में सुधार होता है तथा मृदा की जल धारण क्षमता बढ़ती है।
3. हरी खाद – हरी खाद (ढैंचा, सनै, मूंग, उड़द आदि) के प्रयोग से मृदा में कार्बनिक पदार्थों की मात्रा बढ़ती है, नाइट्रोजन की उपलब्धता में वृद्धि होती है तथा मृदा संरचना और उर्वरता में सुधार होता है।
4. संरक्षण कृषि – न्यूनतम या शून्य जुताई, मृदा को फसल अवशेषों से ढककर रखने तथा विविध फसल चक्र अपनाने से मृदा कार्बन का संरक्षण बढ़ता है, मृदा अपरदन कम होता है, जल संरक्षण में सुधार होता है तथा दीर्घकाल में एस.ओ. सी में वृद्धि होती है।
5. एकीकृत पोषक तत्व प्रबंधन – रासायनिक उर्वरकों एवं जैविक स्रोतों के संतुलित उपयोग से मृदा में कार्बन संचयन बढ़ता है, पोषक तत्वों की उपयोग दक्षता में सुधार होता है तथा दीर्घकालीन मृदा उत्पादकता बनी रहती है।उदाहरणतः 75% अनुशंसित रासायनिक उर्वरक. गोबर की सड़ी खाद, एनपीके. वर्मी कम्पोस्ट, एनपीके. हरी खाद, एनपीके. जैव उर्वरक
6. जैव उर्वरकों का उपयोग – जैव उर्वरकों (राइजोबियम, एजोटोबैक्टर, एजोस्पिरिलम, फॉस्फेट घुलनशील जीवाणु ,माइकोराइजा आदि) के प्रयोग से सूक्ष्मजीवी सक्रियता बढ़ती है, पौधों की वृद्धि एवं पोषक तत्वों के अवशोषण में सुधार होता है तथा मृदा की जैविक गतिविधियाँ संतुलित रहती हैं।
7. कृषि वानिकी – कृषि वानिकी से पत्तियों एवं जड़ अवशेषों के माध्यम से मृदा में कार्बनिक पदार्थ बढ़ता है, कार्बन मृदा की गहरी परतों तक पहुँचता है, मृदा अपरदन कम होता है तथा दीर्घकालीन कार्बन भंडारण को बढ़ावा मिलता है।
8. दलहनी फसलों का समावेश – फसल चक्र में दलहनी फसलों को शामिल करने से जैविक नाइट्रोजन स्थिरीकरण बढ़ता है, मृदा में जैविक पदार्थों का योगदान बढ़ता है, मृदा उर्वरता में सुधार होता है तथा मृदा कार्बन संवर्धन को बढ़ावा मिलता है। उदाहरणकृ धानदृमूंगदृगेहूँ, मक्कादृचना, बाजरादृअरहर

बिहार के लिए विशेष अनुशंसाएँ

बिहार की जलवायु, मृदा एवं प्रमुख फसल प्रणालियों को ध्यान में रखते हुए निम्नलिखित उपाय मृदा कार्बन संवर्धन के लिए अधिक प्रभावी हो सकते हैं—

1. धानदृगेहूँ प्रणाली में मूंग या उड़द का समावेश।
2. प्रति हेक्टेयर 5–10 टन गोबर की सड़ी खाद का नियमित उपयोग करना ।
3. धान के पुआल को जलाने के बजाय खेत में मिलाना या उचित रूप से प्रबंधित करना ।
4. ढैंचा द्वारा हरी खाद का उपयोग करना ।
5. शून्य या न्यूनतम जुताई को बढ़ावा देना।
6. मृदा परीक्षण आधारित संतुलित उर्वरक प्रबंधन अपनाना।
7. प्रत्येक 2–3 वर्ष में मृदा कार्बनिक कार्बन का परीक्षण कराना।