http://krishipravahika.vitalbiotech.org/

कृषि प्रवाहिका: ई-समाचार पत्रिका

e-ISSN: 2583 – 0430

*कृषि-प्रवाहिका: ई-समाचार पत्रिका,* (2026) वर्ष 6, अंक 4, 5-12

Article ID:574

# फसलों में पोषक तत्वों के सुदृढ़ीकरण (बायोफोर्टिफिकेशन) का जैव-रसायन

**पंकज कुमार पटेल[1*], शिवराज कुमार वर्मा[2], अनिल कुमार[3], वी. आर. उमरेतिया[4]**

[1]पीएच.डी. शोधार्थी, बी.आर.डी. पीजी कॉलेज, देवरिया, दीनदयाल उपाध्याय गोरखपुर विश्वविद्यालय (डीडीयूजीयू), गोरखपुर, उत्तर प्रदेश – 273009।

[2]सहायक प्राध्यापक, उद्यान विज्ञान विभाग, उदय प्रताप स्वायत्तशासी महाविद्यालय, वाराणसी, उत्तर प्रदेश-221002

[3]सहायक प्राध्यापक, सस्य विज्ञान विभाग, स्कूल ऑफ एग्रीकल्चर, एकलव्य विश्वविद्यालय, दमोह, मध्य प्रदेश।

[4]सहायक प्राध्यापक, कृषि जैव प्रौद्योगिकी विभाग, आनंद कृषि विश्वविद्यालय, आनंद – 388110।

*अनुरूपी लेखक

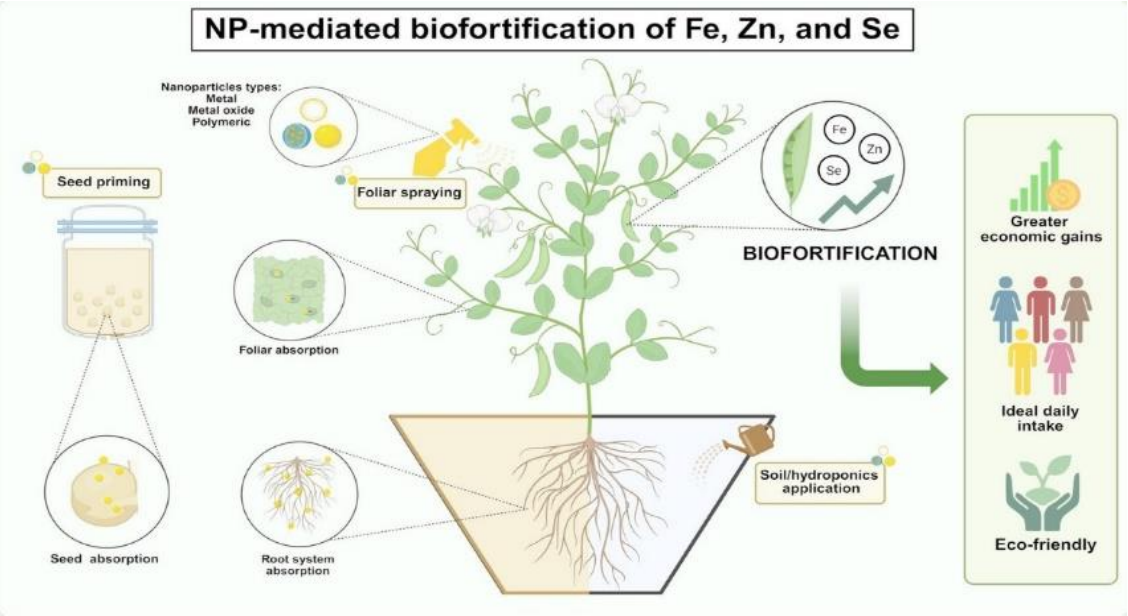
**पंकज कुमार पटेल***

बायोफोर्टिफिकेशन एक नवीन एवं सतत (सस्टेनेबल) तरीका है, जिसके माध्यम से फसलों के पोषण स्तर को बढ़ाया जाता है। इसमें आयरन (लोहा), जिंक (जस्ता) तथा विटामिन जैसे आवश्यक सूक्ष्म पोषक तत्वों की मात्रा और उनकी जैव उपलब्धता को बढ़ाया जाता है। यह प्रक्रिया जटिल जैव-रासायनिक तंत्रों द्वारा नियंत्रित होती है, जिनमें पोषक तत्वों का अवशोषण, परिवहन, आत्मसात और संचयन शामिल हैं। इसके प्रमुख घटकों में झिल्ली परिवहन प्रोटीन, चिलेटिंग एजेंट, एंजाइमेटिक मार्ग तथा जीन नियमन प्रक्रियाएँ शामिल होती हैं, जो खाद्य भागों में पोषक तत्वों के संचय को नियंत्रित करती हैं। बायोफोर्टिफिकेशन को प्राप्त करने के लिए आनुवंशिक (genetic) और कृषि संबंधी दोनों रणनीतियों का उपयोग किया जाता है। यह दृष्टिकोण छिपी हुई भूख (hidden hunger) को दूर करने, मानव स्वास्थ्य में सुधार करने तथा वैश्विक खाद्य और पोषण सुरक्षा सुनिश्चित करने में महत्वपूर्ण भूमिका निभाता है।

## 1. परिचय

कुपोषण, विशेष रूप से सूक्ष्म पोषक तत्वों की कमी या "छिपी हुई भूख (Hidden Hunger)," एक गंभीर वैश्विक स्वास्थ्य समस्या है, जो विशेषकर विकासशील देशों में अरबों लोगों को प्रभावित करती है। आयरन (लोहा), जिंक (जस्ता), विटामिन A तथा आयोडीन जैसे आवश्यक पोषक तत्व अक्सर अनाज-आधारित आहार में पर्याप्त मात्रा में नहीं मिलते। इस समस्या के समाधान के लिए बायोफोर्टिफिकेशन एक प्रभावी, किफायती और सतत रणनीति के रूप में उभरा है।

इसमें फसलों की वृद्धि के दौरान ही उनके पोषण स्तर को बढ़ाया जाता है, न कि कटाई के बाद पोषक तत्व मिलाकर . बायोफोर्टिफिकेशन का अर्थ है पौध प्रजनन, आनुवंशिक अभियांत्रिकी (genetic engineering) या कृषि प्रबंधन (agronomic practices) के माध्यम से फसलों के खाद्य भागों में आवश्यक पोषक तत्वों की मात्रा और उनकी जैव उपलब्धता को बढ़ाना। इसकी सफलता काफी हद तक उन जैव-रासायनिक प्रक्रियाओं की समझ पर निर्भर करती है, जो पौधों में पोषक तत्वों के अवशोषण, परिवहन, संचय और भंडारण को नियंत्रित करती हैं।




Source: https://link.springer.com/

**2. बायोफोर्टिफिकेशन की अवधारणा**

बायोफोर्टिफिकेशन का अर्थ है फसलों के पोषण मूल्य में सुधार करना, जिसमें विटामिन और खनिज तत्वों की मात्रा (density) को बढ़ाया जाता है। यह पारंपरिक फोर्टिफिकेशन से भिन्न है, जिसमें खाद्य प्रसंस्करण (processing) के दौरान पोषक तत्व जोड़े जाते हैं, जबकि बायोफोर्टिफिकेशन में फसल के अंदर ही प्राकृतिक रूप से पोषक तत्वों का स्तर बढ़ाया जाता है।

बायोफोर्टिफिकेशन के प्रमुख तरीके

- **आनुवंशिक बायोफोर्टिफिकेशन (Genetic Biofortification):** इसमें पारंपरिक प्रजनन (conventional breeding) और जैव प्रौद्योगिकी (biotechnology) का उपयोग करके पोषक तत्वों से भरपूर किस्में विकसित की जाती हैं।
- **एग्रोनॉमिक बायोफोर्टिफिकेशन (Agronomic Biofortification):** इसमें उर्वरकों (fertilizers) और मृदा संशोधकों (soil amendments) का प्रयोग करके फसलों में पोषक तत्वों की उपलब्धता और अवशोषण को बढ़ाया जाता है।
- **सूक्ष्मजीव आधारित बायोफोर्टिफिकेशन** इसमें लाभकारी सूक्ष्मजीवों (beneficial microbes) का उपयोग किया जाता है, जो पोषक तत्वों के अवशोषण और गतिशीलता को बढ़ाते हैं।

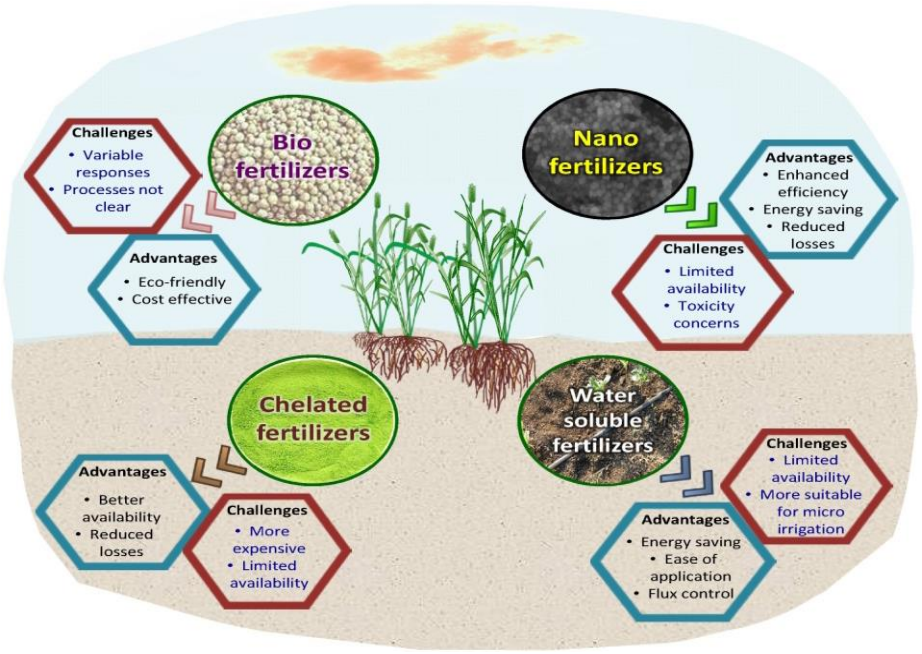
**3. पौधों में पोषक तत्वों के अवशोषण का जैव-रासायनिक आधार**

पौधों में पोषक तत्वों के अवशोषण का जैव-रासायनिक आधार एक जटिल प्रक्रिया है, जिसमें समन्वित शारीरिक और आणविक तंत्र शामिल होते हैं। ये तंत्र आवश्यक पोषक तत्वों के अवशोषण, परिवहन और उपयोग को नियंत्रित करते हैं। यह प्रक्रिया बायोफोर्टिफिकेशन के लिए अत्यंत महत्वपूर्ण है, क्योंकि इससे यह निर्धारित होता है कि पौधे मिट्टी से पोषक तत्वों को

कितनी दक्षता से ग्रहण और संचय करते हैं।

### 3.1 जड़ अवशोषण तंत्र

पौधे मुख्य रूप से अपनी जड़ों के माध्यम से पोषक तत्वों का अवशोषण करते हैं, जो दो प्रमुख तरीकों से होता है: निष्क्रिय (Passive) और सक्रिय (Active) परिवहन। निष्क्रिय परिवहन में प्रसरण (diffusion) और द्रव प्रवाह (mass flow) शामिल होते हैं, जिनमें पोषक तत्व सांद्रता प्रवणता के अनुसार बिना ऊर्जा के चलते हैं। इसके विपरीत, सक्रिय परिवहन में ATP के रूप में ऊर्जा की आवश्यकता होती है, जिससे आयन अपनी सांद्रता के विपरीत दिशा में स्थानांतरित होते हैं। जड़ कोशिकाओं की प्लाज्मा झिल्ली में विशेष आयन चैनल और वाहक प्रोटीन होते हैं, जो चयनात्मक अवशोषण में सहायक होते हैं। प्रोटॉन पंप ($H^+$-ATPase) विद्युत-रासायनिक प्रवणता बनाकर धनायनों और ऋणायनों के अवशोषण को प्रेरित करते हैं।




Source: https://www.frontiersin.org/

### 3.2 चिलेटर्स की भूमिका

चिलेटर्स ऐसे महत्वपूर्ण जैव-रासायनिक यौगिक हैं, जो राइजोस्पीयर में सूक्ष्म पोषक तत्वों की उपलब्धता बढ़ाते हैं। विशेषकर घास वर्ग के पौधे फाइटोसाइडरोफोर्स का उत्सर्जन करते हैं, जो आयरन ($Fe^{3+}$) से बंधकर घुलनशील यौगिक बनाते हैं, जिससे उसका अवशोषण आसान हो जाता है। इसके अतिरिक्त, साइट्रिक अम्ल और मैलिक अम्ल जैसे कार्बनिक अम्ल जड़ों द्वारा स्रावित होकर क्षारीय मृदा में आयरन और जिंक जैसे तत्वों को घुलनशील बनाते हैं। ये चिलेटिंग एजेंट पोषक तत्वों के अवक्षेपण को रोकते हैं और उनकी गतिशीलता बढ़ाते हैं, जिससे अवशोषण क्षमता में वृद्धि होती है।

### 3.3 झिल्ली परिवहन प्रोटीन

झिल्ली परिवहन प्रोटीन अत्यधिक विशिष्ट होते हैं और पौधों के अंदर पोषक तत्वों के अवशोषण एवं स्थानांतरण को नियंत्रित करते हैं। प्रमुख ट्रांसपोर्टर परिवारों में ZIP (Zinc-Iron Permease), जो जिंक और आयरन के अवशोषण में सहायक है; NRAMP (Natural

Resistance-Associated Macrophage Protein), जो द्विसंयोजी धातु आयनों के परिवहन में भाग लेता है; तथा HMA (Heavy Metal ATPases), जो भारी धातुओं के परिवहन और विषहरण (detoxification) में सहायक होते हैं। ये प्रोटीन पोषक तत्वों के संतुलन (homeostasis), वितरण और खाद्य भागों में संचय को सुनिश्चित करते हैं, जिससे फसलों के बायोफोर्टिफिकेशन में महत्वपूर्ण योगदान मिलता है।

## 4. पोषक तत्वों का स्थानांतरण एवं वितरण

जड़ों द्वारा अवशोषण के बाद, पोषक तत्व पौधों में विशेष संवहनी ऊतकों के माध्यम से विभिन्न भागों तक पहुँचाए जाते हैं, जिससे उचित वृद्धि, विकास तथा खाद्य भागों में उनका संचय सुनिश्चित होता है। यह प्रक्रिया विशेष रूप से बायोफोर्टिफिकेशन कार्यक्रमों में पोषक तत्वों की मात्रा बढ़ाने के लिए अत्यंत महत्वपूर्ण है।

### 4.1 जाइलम द्वारा परिवहन

जाइलम जड़ों से पौधे के ऊपरी भागों तक जल और घुले हुए खनिज पोषक तत्वों के ऊपर की ओर परिवहन के लिए जिम्मेदार होता है। यह प्रक्रिया मुख्यतः वाष्पोत्सर्जन खिंचाव द्वारा संचालित होती है, जो नकारात्मक दाब प्रवणता उत्पन्न करता है। नाइट्रोजन, पोटेशियम, कैल्शियम और मैग्नीशियम जैसे आवश्यक पोषक तत्व जाइलम के माध्यम से पत्तियों और बढ़ते ऊतकों तक पहुँचते हैं।

### 4.2 फ्लोएम द्वारा परिवहन

फ्लोएम पोषक तत्वों, विशेष रूप से प्रकाश-संश्लेषण उत्पादों और गतिशील खनिज तत्वों का पुनर्वितरण करता है। यह स्रोत ऊतकों (परिपक्व पत्तियाँ) से सिंक अंगों जैसे विकसित होते बीज, फल और जड़ों तक पोषक तत्वों को पहुँचाता है। यह द्विदिश प्रवाह सुनिश्चित करता है कि पोषक तत्वों का उचित स्थानों पर कुशलतापूर्वक वितरण हो।

### 4.3 स्रोत–सिंक संबंध

पोषक तत्वों का संचलन स्रोत और सिंक ऊतकों के बीच गतिशील संबंध पर निर्भर करता है। पत्तियाँ स्रोत (source) के रूप में कार्य करती हैं, जबकि बीज, जड़ें और फल सिंक (sink) के रूप में कार्य करते हैं। पोषक तत्वों का कुशल वितरण (partitioning) खाद्य भागों में उनके संचय को बढ़ाता है, जो बायोफोर्टिफिकेशन का एक प्रमुख उद्देश्य है।

## 5. पोषक तत्वों के संचयन के जैव-रासायनिक तंत्र

पौधों में पोषक तत्वों का संचयन जटिल जैव-रासायनिक मार्गों द्वारा नियंत्रित होता है, जो सूक्ष्म पोषक तत्वों और विटामिनों के संश्लेषण, भंडारण और वितरण को नियंत्रित करते हैं। ये तंत्र बायोफोर्टिफिकेशन के माध्यम से फसलों के पोषण स्तर को बढ़ाने में अत्यंत महत्वपूर्ण हैं।

### 5.1 आयरन चयापचय

आयरन एक आवश्यक सूक्ष्म पोषक तत्व है, जो क्लोरोफिल संश्लेषण और एंजाइम क्रियाओं में महत्वपूर्ण भूमिका निभाता है। पौधों में आयरन को सुरक्षित और जैव उपलब्ध रूप में फेरीटिन प्रोटीन के रूप में कोशिकीय भागों में संग्रहीत किया जाता है। इसका परिवहन मुख्यतः चिलेटेड रूपों ($Fe^{2+}$ और $Fe^{3+}$ कॉम्प्लेक्स) में होता है, जिससे विषाक्तता रोकी जा सके और घुलनशीलता बनी रहे। यह प्रक्रिया आयरन-प्रतिक्रियाशील जीनों द्वारा नियंत्रित होती है, जो अवशोषण, परिवहन और भंडारण को संतुलित रखते हैं।

### 5.2 जिंक चयापचय

जिंक कई एंजाइमों का संरचनात्मक एवं क्रियात्मक घटक है और चयापचय क्रियाओं में महत्वपूर्ण भूमिका निभाता है। यह एंजाइम सक्रियण और प्रोटीन संश्लेषण में सह-कारक (cofactor) के रूप में कार्य करता है। पौध कोशिकाओं में जिंक प्रोटीन और कार्बनिक लिगैंड्स के साथ बंधा रहता है, जिससे इसकी स्थिरता, परिवहन और उचित उपयोग सुनिश्चित होता है।

**5.3 विटामिन A (प्रोविटामिन A कैरोटेनॉयड्स(**

प्रोविटामिन A कैरोटेनॉयड्स का संश्लेषण आइसोप्रेनॉइड जैवसंश्लेषण मार्ग द्वारा होता है। इसमें प्रमुख एंजाइम जैसे फाइटोइन सिंथेस (PSY) और लाइकोपीन β-साइक्लेज β-कैरोटीन जैसे कैरोटेनॉयड्स के निर्माण को नियंत्रित करते हैं। ये यौगिक प्लास्टिड्स में संचित होते हैं और मानव पोषण के लिए महत्वपूर्ण होते हैं, क्योंकि ये विटामिन A के अग्रदूत (precursors) हैं।

**5.4 फोलेट एवं अन्य विटामिन**

फोलेट और अन्य विटामिन जटिल, बहु-चरणीय जैव-रासायनिक प्रक्रियाओं के माध्यम से बनते हैं, जिनमें अनेक एंजाइम शामिल होते हैं। इनका संश्लेषण और संचयन जीन अभिव्यक्ति (gene expression) और एंजाइम गतिविधि द्वारा नियंत्रित होता है, जिससे पौध ऊतकों में पर्याप्त पोषक तत्व उपलब्ध रहते हैं और पोषण गुणवत्ता में सुधार होता है।

**6. बायोफोर्टिफिकेशन का आनुवंशिक एवं आणविक आधार**

बायोफोर्टिफिकेशन फसलों में पोषक तत्वों की मात्रा बढ़ाने के लिए आनुवंशिक और आणविक तरीकों पर आधारित है। इन रणनीतियों का उद्देश्य पौधों की उस प्राकृतिक क्षमता को बढ़ाना है, जिससे वे आवश्यक पोषक तत्वों का अवशोषण, परिवहन और खाद्य भागों में संचय बेहतर ढंग से कर सकें।

**6.1 पारंपरिक प्रजनन**

पारंपरिक प्रजनन में पोषक तत्वों से समृद्ध किस्मों का चयन और उनका संकरण करके उन्नत किस्में विकसित की जाती हैं। यह विधि फसलों और उनके जंगली संबंधियों में उपलब्ध आनुवंशिक विविधता का उपयोग करती है। बार-बार चयन और संकरण के माध्यम से वैज्ञानिक आयरन, जिंक और विटामिन की अधिक मात्रा वाली किस्में विकसित करते हैं। यह एक सतत और व्यापक रूप से स्वीकार्य तरीका है, हालांकि इसमें अपेक्षित परिणाम प्राप्त करने में अधिक समय लग सकता है।

**6.2 आनुवंशिक अभियांत्रिकी**

आनुवंशिक अभियांत्रिकी के माध्यम से पोषक तत्वों के संश्लेषण और संचयन से संबंधित विशिष्ट जीनों को सीधे फसलों में प्रविष्ट कराया जाता है। यह पारंपरिक प्रजनन की तुलना में अधिक सटीक और तेज़ तरीका है। इसका एक प्रमुख उदाहरण गोल्डन राइस है, जिसे एंडोस्पर्म में β-कैरोटीन (प्रोविटामिन A) उत्पन्न करने के लिए विकसित किया गया है। इस प्रकार के नवाचार प्रमुख खाद्य फसलों के पोषण स्तर को काफी बढ़ाते हैं।

**6.3 जीन अभिव्यक्ति का नियमन**

पोषक तत्वों से संबंधित गुणों की अभिव्यक्ति आणविक स्तर पर विभिन्न नियामक तंत्रों द्वारा नियंत्रित होती है। ट्रांसक्रिप्शन फैक्टर्स विशेष जीनों को सक्रिय या निष्क्रिय करने में महत्वपूर्ण भूमिका निभाते हैं। प्रमोटर क्षेत्र यह निर्धारित करते हैं कि जीन कब और कहाँ व्यक्त होंगे, जबकि सिग्नल ट्रांसडक्शन मार्ग पौधों को आंतरिक और बाहरी संकेतों के प्रति प्रतिक्रिया देने में सहायता करते हैं। ये सभी तंत्र मिलकर पौधों में पोषक तत्वों के कुशल अवशोषण, परिवहन और संचयन को सुनिश्चित करते हैं।

**7. एग्रोनॉमिक बायोफोर्टिफिकेशन एवं मृदा जैव-रसायन**

एग्रोनॉमिक बायोफोर्टिफिकेशन का उद्देश्य मृदा और फसल प्रबंधन तकनीकों के माध्यम से फसलों के पोषण स्तर को बढ़ाना है। इसमें उर्वरकों के उपयोग, मृदा रसायन तथा लाभकारी सूक्ष्मजीवों का समन्वय किया जाता है, जिससे पोषक तत्वों की उपलब्धता और अवशोषण में वृद्धि होती है।

**7.1 उर्वरक अनुप्रयोग**

जिंक सल्फेट और आयरन चिलेट्स जैसे सूक्ष्म पोषक तत्वों वाले उर्वरकों का उपयोग

फसलों में पोषक तत्वों की मात्रा बढ़ाने में महत्वपूर्ण भूमिका निभाता है। इन्हें मृदा में देने के साथ-साथ पर्णीय छिड़काव (foliar spray) के रूप में भी प्रयोग किया जाता है। विशेष रूप से पर्णीय छिड़काव एक तेज़ और प्रभावी विधि है, क्योंकि पोषक तत्व सीधे पत्तियों द्वारा अवशोषित हो जाते हैं, जिससे उनकी उपयोगिता और खाद्य भागों में संचय बढ़ता है।

### 7.2 मृदा pH और पोषक तत्वों की उपलब्धता

मृदा का pH पोषक तत्वों की घुलनशीलता और उपलब्धता को प्रभावित करने वाला प्रमुख कारक है। अम्लीय (acidic) मृदाओं में आयरन, जिंक और मैंगनीज जैसे सूक्ष्म पोषक तत्व अधिक घुलनशील होते हैं और पौधों द्वारा आसानी से अवशोषित किए जाते हैं। इसके विपरीत, क्षारीय मृदाओं में ये तत्व अवक्षेपण और स्थिरीकरण (fixation) के कारण कम उपलब्ध हो जाते हैं, जिससे कमी उत्पन्न होती है। इसलिए, मृदा संशोधनों के माध्यम से pH का उचित प्रबंधन आवश्यक है।

### 7.3 सूक्ष्मजीवों की भूमिका

मृदा के सूक्ष्मजीव पोषक तत्वों की गतिशीलता और अवशोषण में महत्वपूर्ण योगदान देते हैं। माइकोराइज़ा फफूंद पौधों की जड़ों के साथ सहजीवी संबंध बनाकर फॉस्फोरस और सूक्ष्म पोषक तत्वों के अवशोषण को बढ़ाते हैं, क्योंकि वे जड़ों का सतह क्षेत्र बढ़ाते हैं। इसी प्रकार, पादप वृद्धि प्रोत्साहक राइजोबैक्टीरिया (PGPR) खनिजों को घुलनशील बनाकर, नाइट्रोजन स्थिरीकरण करके और वृद्धि प्रोत्साहक पदार्थ उत्पन्न करके पोषक तत्वों की उपलब्धता बढ़ाते हैं। ये जैविक अंतःक्रियाएँ सतत पोषक तत्व प्रबंधन और एग्रोनॉमिक बायोफोर्टिफिकेशन में महत्वपूर्ण भूमिका निभाती हैं।

## 8. पोषक तत्वों की जैव उपलब्धता को प्रभावित करने वाले कारक

पोषक तत्वों की जैव उपलब्धता से तात्पर्य उस मात्रा से है, जो पौध-आधारित खाद्य पदार्थों से मानव शरीर द्वारा अवशोषित और उपयोग की जा सकती है। यदि फसलें पोषक तत्वों से भरपूर भी हों, तो भी उनकी प्रभावशीलता उन जैव-रासायनिक कारकों पर निर्भर करती है, जो अवशोषण को प्रभावित करते हैं।

### 8.1 प्रतिपोषक तत्व

पौधों में पाए जाने वाले प्रतिपोषक यौगिक पोषक तत्वों की जैव उपलब्धता को कम कर सकते हैं। फाइटेट्स (फाइटिक अम्ल) सबसे महत्वपूर्ण अवरोधक हैं, क्योंकि वे आयरन, जिंक और कैल्शियम जैसे आवश्यक खनिजों से बंधकर अघुलनशील यौगिक बना लेते हैं, जिन्हें मानव शरीर अवशोषित नहीं कर पाता। इसी प्रकार, ऑक्सालेट्स कैल्शियम से बंध जाते हैं, जबकि टैनिन्स प्रोटीन पाचन और खनिज अवशोषण में बाधा डालते हैं। ये यौगिक कई अनाज और दलहनों में प्राकृतिक रूप से पाए जाते हैं, इसलिए इनके स्तर को प्रसंस्करण या प्रजनन तकनीकों द्वारा कम करना आवश्यक है।

### 8.2 अवशोषण को बढ़ाने वाले कारक

कुछ यौगिक पोषक तत्वों के अवशोषण को बढ़ाकर उनकी जैव उपलब्धता में सुधार करते हैं। विटामिन C (एस्कॉर्बिक अम्ल) आयरन के अवशोषण में महत्वपूर्ण भूमिका निभाता है, क्योंकि यह फेरिक ($Fe^{3+}$) को फेरस ($Fe^{2+}$) में परिवर्तित करता है, जो अधिक घुलनशील और आसानी से अवशोषित होता है। इसके अलावा, साइट्रिक अम्ल और मैलिक अम्ल जैसे कार्बनिक अम्ल खनिजों को घुलनशील रूप में बनाए रखते हैं, जिससे मानव पाचन तंत्र में उनका बेहतर अवशोषण संभव होता है। ये कारक प्रभावी बायोफोर्टिफाइड फसलों और संतुलित आहार के विकास में महत्वपूर्ण भूमिका निभाते हैं।

**9. बायोफोर्टिफिकेशन में हाल के उन्नत विकास**

हाल के तकनीकी विकासों ने बायोफोर्टिफिकेशन रणनीतियों की दक्षता, सटीकता और विस्तार को काफी बढ़ा दिया है। सबसे महत्वपूर्ण उपकरणों में से एक CRISPR-Cas9 है, जो एक जीन-संपादन) तकनीक है। यह पोषक तत्वों के अवशोषण और संचयन से संबंधित जीनों में सटीक परिवर्तन करने की अनुमति देता है। इसके माध्यम से फसलों के पोषण गुणों में लक्षित सुधार किया जा सकता है, बिना अन्य महत्वपूर्ण गुणों को प्रभावित किए।

एक अन्य महत्वपूर्ण नवाचार नैनो-उर्वरकों का उपयोग है, जो पोषक तत्वों को नियंत्रित और लक्षित रूप में प्रदान करते हैं। इससे पोषक तत्वों की उपयोग दक्षता बढ़ती है, हानि कम होती है और पौधों द्वारा अवशोषण बेहतर होता है।

इसके अलावा, ओमिक्स तकनीकें जैसे जीनोमिक्स, प्रोटीओमिक्स और मेटाबोलोमिक्स पौधों के चयापचय मार्गों और जीन कार्यों की गहरी जानकारी प्रदान करती हैं। इससे पोषक तत्वों की वृद्धि के लिए महत्वपूर्ण लक्ष्यों की पहचान करना आसान होता है।

स्मार्ट प्रजनन तकनीकें, जैसे मार्कर-सहायता प्राप्त चयन और जीनोमिक चयन, पोषक तत्वों से समृद्ध किस्मों के विकास को और तेज करती हैं। ये सभी तकनीकें पारंपरिक प्रजनन को आधुनिक आणविक उपकरणों के साथ जोड़कर बायोफोर्टिफिकेशन को अधिक सटीक, तेज और टिकाऊ बनाती हैं।

**10. चुनौतियाँ और सीमाएँ**

अपनी संभावनाओं के बावजूद, बायोफोर्टिफिकेशन कई चुनौतियों और सीमाओं का सामना करता है। प्रमुख समस्या यह है कि कुछ पोषक तत्वों के लिए फसलों के जीन पूल में आनुवंशिक विविधता सीमित होती है, जिससे प्रजनन की प्रगति बाधित होती है। इसके अलावा, मृदा प्रकार, जलवायु और कृषि प्रबंधन जैसी पर्यावरणीय परिस्थितियाँ पोषक तत्वों के संचय को प्रभावित करती हैं, जिससे परिणाम अस्थिर हो सकते हैं। एक अन्य महत्वपूर्ण मुद्दा आनुवंशिक रूप से परिवर्तित (GM) फसलों की स्वीकृति है, क्योंकि जन-सामान्य की चिंताएँ और सरकारी नियम इनके अपनाने में बाधा उत्पन्न करते हैं। इसके अतिरिक्त, बायोफोर्टिफाइड फसलों के अनुसंधान, विकास और प्रसार की लागत अधिक होती है, विशेषकर विकासशील देशों में। छोटे किसानों तक इन तकनीकों की पहुँच और बड़े स्तर पर विस्तार भी महत्वपूर्ण चुनौतियाँ हैं, जिन्हें सफल कार्यान्वयन के लिए दूर करना आवश्यक है।

**11. मानव स्वास्थ्य और पोषण पर प्रभाव**

बायोफोर्टिफाइड फसलें वैश्विक कुपोषण, विशेषकर सूक्ष्म पोषक तत्वों की कमी से होने वाली "छिपी हुई भूख" को दूर करने में महत्वपूर्ण भूमिका निभाती हैं। इन फसलों में आयरन, जिंक और विटामिन जैसे आवश्यक पोषक तत्व अधिक मात्रा में पाए जाते हैं, जिससे ये मानव स्वास्थ्य के लिए अत्यंत लाभकारी होती हैं। नियमित सेवन से एनीमिया, कमजोर प्रतिरक्षा प्रणाली और वृद्धि में रुकावट जैसी समस्याओं को कम किया जा सकता है।

ये फसलें बच्चों में मस्तिष्क विकास और रोग प्रतिरोधक क्षमता को बढ़ाने में सहायक होती हैं, क्योंकि वे आवश्यक पोषक तत्वों की पर्याप्त आपूर्ति सुनिश्चित करती हैं। इसके अलावा, गर्भावस्था और शिशु विकास के दौरान पोषक तत्वों की कमी से होने वाली जटिलताओं को कम करके यह मातृ और शिशु स्वास्थ्य में भी सुधार करती हैं।

उदाहरण के रूप में, आयरन-समृद्ध चावल और गेहूं एनीमिया को कम करने में सहायक हैं; जिंक-समृद्ध मक्का प्रतिरक्षा प्रणाली को मजबूत बनाता है; और विटामिन A-समृद्ध शकरकंद

रतौंधी को रोकने तथा दृष्टि सुधार में मदद करता है।

**12. भविष्य की संभावनाएँ**

बायोफोर्टिफिकेशन का भविष्य अत्यंत उज्ज्वल है, जो जैव प्रौद्योगिकी (biotechnology) और पारंपरिक प्रजनन (conventional breeding) में हो रही प्रगति से प्रेरित है। आधुनिक जैव-प्रौद्योगिकीय उपकरणों को पारंपरिक प्रजनन विधियों के साथ एकीकृत करने से ऐसी फसलें विकसित की जा सकती हैं, जिनमें अधिक पोषक तत्व हों और जो विभिन्न परिस्थितियों में बेहतर अनुकूलन क्षमता रखती हों।

इसके साथ ही, जलवायु परिवर्तन को ध्यान में रखते हुए ऐसी पोषक तत्वों से समृद्ध और जलवायु-सहिष्णु (climate-resilient) फसलों के विकास पर जोर दिया जा रहा है, जो सूखा, लवणता और अत्यधिक तापमान जैसी प्रतिकूल परिस्थितियों को सहन कर सकें और स्थिर पोषण उत्पादन सुनिश्चित करें।

इसके अलावा, किसानों, नीति-निर्माताओं और उपभोक्ताओं के बीच जागरूकता बढ़ाना भी अत्यंत आवश्यक है, ताकि बायोफोर्टिफाइड फसलों को व्यापक रूप से अपनाया जा सके। कृषि विस्तार सेवाओं को मजबूत करना, बीज वितरण प्रणाली में सुधार करना और पोषण शिक्षा को बढ़ावा देना भविष्य में बायोफोर्टिफिकेशन के प्रभाव को बढ़ाने में महत्वपूर्ण भूमिका निभाएगा।

**निष्कर्ष**

फसलों में पोषक तत्वों के संवर्धन का जैव-रसायन वैश्विक कुपोषण को दूर करने और खाद्य एवं पोषण सुरक्षा सुनिश्चित करने में केंद्रीय भूमिका निभाता है। पोषक तत्वों के अवशोषण, स्थानांतरण और संचय जैसी जैव-रासायनिक प्रक्रियाओं की स्पष्ट समझ प्रभावी बायोफोर्टिफिकेशन रणनीतियों के विकास में सहायक होती है।आणविक जीवविज्ञान, आनुवंशिकी और कृषि प्रबंधन में हुई प्रगति ने इस दृष्टिकोण की क्षमता को और मजबूत किया है। बायोफोर्टिफिकेशन प्रमुख खाद्य फसलों के पोषण स्तर को बढ़ाने के लिए एक किफायती और सतत समाधान प्रदान करता है। निरंतर अनुसंधान, नवाचार और किसानों द्वारा अपनाने के साथ, यह वैश्विक स्तर पर जनस्वास्थ्य में सुधार और सूक्ष्म पोषक तत्वों की कमी को कम करने में महत्वपूर्ण योगदान दे सकता है।