Reg. No.: COOP/2023/KOTA/201080/26/103

AGRICULTURE FORUM FOR TECHNICAL EDUCATION OF FARMING SOCIETY

Kota, Rajasthan

पौधों में डिटॉक्सिफ़िकेशन पाथवे और सेलुलर सुरक्षा

Authors

डॉ. ज़ुबी गौहर अंसारी

सहायक प्राध्यापक, पादप कार्यिकी विभाग, मेवाड़ विश्वविद्यालय, गंगरार, चित्तौड़गढ़, राजस्थान
पिन कोड – 312901

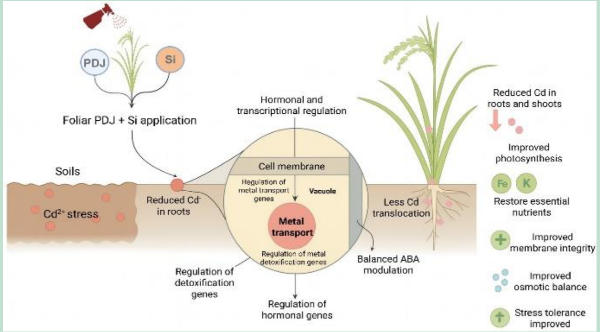
INTRODUCTION

पौधे निरंतर ऐसे विषैले यौगिकों के संपर्क में रहते हैं जो आंतरिक रूप से प्रकाश संश्लेषण, श्वसन और प्रकाश-श्वसन के दौरान तथा बाहरी रूप से सूखा, लवणता, अत्यधिक तापमान, भारी धातुओं, कीटनाशकों, प्रदूषकों और रोगजनकों द्वारा उत्पन्न होते हैं। ये तनाव प्रतिक्रियाशील ऑक्सीजन प्रजातियों (ROS), मिथाइलग्लायॉक्सल तथा अन्य हानिकारक अणुओं का संचय करते हैं, जो प्रोटीन, लिपिड, न्यूक्लिक अम्ल और झिल्लियों को क्षति पहुँचाते हैं। इनके विरुद्ध पौधों में प्रभावी डिटॉक्सिफिकेशन तंत्र, एंटीऑक्सीडेंट एंजाइम, गैर-एंजाइमिक एंटीऑक्सीडेंट, आणविक चैपरोन तथा मरम्मत प्रणालियाँ कार्य करती हैं, जो कोशिकीय अखंडता, उपापचयी संतुलन और तनाव सहनशीलता बनाए रखती हैं।

2. पौधों में विषैले यौगिकों के स्रोत)Sources of Toxic Compounds in Plants)

पौधे अनेक प्रकार के विषैले यौगिकों के संपर्क में आते हैं, जो आंतरिक उपापचयी क्रियाओं तथा बाह्य पर्यावरणीय स्रोतों दोनों से उत्पन्न होते हैं। अंतर्जात (Endogenous) विषैले पदार्थ प्राकृतिक रूप से प्रकाश संश्लेषण, श्वसन, प्रकाश-श्वसन तथा लिपिड पेरॉक्सीडेशन जैसी प्रक्रियाओं के दौरान बनते हैं। इनमें प्रतिक्रियाशील ऑक्सीजन प्रजातियाँ (Reactive Oxygen Species; ROS), मिथाइलग्लायॉक्सल तथा मुक्त मूलक (free radicals) शामिल हैं, जो अत्यधिक मात्रा में एकत्र होने पर कोशिकीय घटकों को क्षति पहुँचा सकते हैं।

बहिर्जात (Exogenous) विषैले पदार्थ मिट्टी, जल और वायु के माध्यम से पौधों में प्रवेश करते हैं। इनमें शाकनाशी (herbicides), कीटनाशक (pesticides), कैडमियम एवं सीसा जैसी भारी धातुएँ, औद्योगिक प्रदूषक तथा रोगजनकों द्वारा उत्पन्न विषाक्त पदार्थ शामिल हैं। सूखा, लवणता तथा अत्यधिक तापमान जैसी प्रतिकूल परिस्थितियों में इन विषैले पदार्थों का उत्पादन और संचय काफी बढ़ जाता है, जिससे कोशिकीय अखंडता, पौधों की वृद्धि और विकास पर प्रतिकूल प्रभाव पड़ता है।



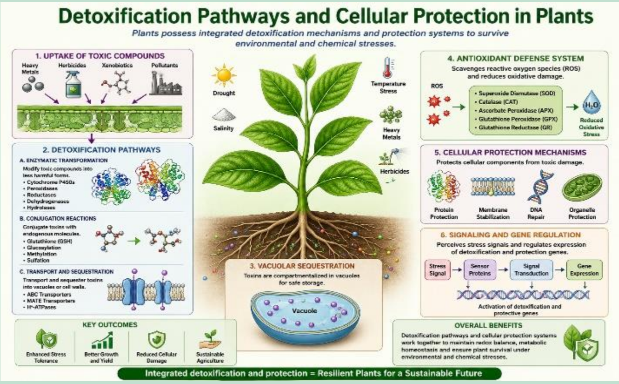
Source: https://www.frontiersin.org/

3. प्रतिक्रियाशील ऑक्सीजन प्रजातियाँ)ROS) और ऑक्सीडेटिव तनाव

प्रतिक्रियाशील ऑक्सीजन प्रजातियाँ (Reactive Oxygen Species; ROS) अत्यधिक अभिक्रियाशील अणु हैं, जो पौधों में वायवीय उपापचय (aerobic metabolism) के प्राकृतिक उप-उत्पाद के रूप में बनते हैं। प्रमुख ROS में सुपरऑक्साइड रेडिकल (O_2^-), हाइड्रोजन पेरॉक्साइड (H_2O_2), हाइड्रॉक्सिल रेडिकल (OH•) तथा सिंगलेट ऑक्सीजन ($^1O_2$) शामिल हैं। ये अणु मुख्यतः प्रकाश संश्लेषण के दौरान क्लोरोप्लास्ट में, श्वसन के दौरान माइटोकॉन्ड्रिया में, प्रकाश-श्वसन के दौरान पेरॉक्सीसोम में तथा तनाव प्रतिक्रियाओं के दौरान एपोप्लास्ट में उत्पन्न होते हैं।

सामान्य परिस्थितियों में ROS की मात्रा कम स्तर पर नियंत्रित रहती है और ये वृद्धि, विकास तथा रक्षा तंत्र के

नियमन में महत्त्वपूर्ण संकेतक अणुओं (signaling molecules) के रूप में कार्य करते हैं। किंतु सूखा, लवणता, अधिक प्रकाश तीव्रता, अत्यधिक तापमान तथा रोगजनक संक्रमण जैसे पर्यावरणीय तनाव ROS के अत्यधिक संचय का कारण बनते हैं। इस स्थिति को ऑक्सीडेटिव तनाव (oxidative stress) कहा जाता है, जो लिपिड पेरॉक्सीडेशन, प्रोटीन ऑक्सीकरण, DNA क्षति, झिल्ली विघटन, एंजाइम निष्क्रियता तथा कोशिकीय उपापचय में अवरोध उत्पन्न करता है, जिससे अंततः पौधों की वृद्धि और उत्पादकता घट जाती है।



4. डिटॉक्सिफिकेशन के सामान्य चरण

पौधों में डिटॉक्सिफिकेशन एक अत्यंत सुव्यवस्थित जैवरासायनिक प्रक्रिया है, जिसके द्वारा विषैले यौगिकों को कम हानिकारक रूपों में परिवर्तित किया जाता है और उन्हें सुरक्षित रूप से कोशिका के भीतर अलग करके संग्रहीत किया जाता है। इस प्रक्रिया को सामान्यतः तीन प्रमुख चरणों में विभाजित किया जाता है। चरण । (क्रियात्मककरण / Functionalization), चरण ॥ (संयुग्मीकरण / Conjugation), चरण ॥। (परिवहन एवं पृथक्करण / Transport and Sequestration)

5. चरण I: क्रियात्मककरण अभिक्रियाएँ)Phase I: Functionalization Reactions)

पौधों में डिटॉक्सिफिकेशन प्रक्रिया का प्रथम चरण क्रियात्मककरण (Functionalization) कहलाता है, जिसमें विषैले यौगिकों को रासायनिक रूप से परिवर्तित किया जाता है ताकि वे अधिक अभिक्रियाशील बनें और आगे की डिटॉक्सिफिकेशन प्रक्रिया के लिए उपयुक्त हो सकें। इस चरण में Cytochrome P450 Monooxygenases, पेरॉक्सिडेज़ (peroxidases), एस्टरेज़ (esterases) तथा रिडक्टेज़ (reductases) जैसे एंजाइम ऑक्सीकरण, अपचयन तथा जलअपघटन (hydrolysis) अभिक्रियाओं को उत्प्रेरित करते हैं।

इन अभिक्रियाओं के परिणामस्वरूप वसा-विलेय (lipophilic) विषैले अणुओं पर हाइड्रॉक्सिल (-OH), अमीनो (-NH_2) तथा कार्बोक्सिल (-COOH) जैसे क्रियात्मक समूह जोड़े या उजागर किए जाते हैं। इससे ये यौगिक अधिक ध्रुवीय (polar) तथा कुछ हद तक अधिक जल-विलेय बन जाते हैं।

सायटोक्रोम P450 मोनोऑक्सीजनेज़ विशेष रूप से शाकनाशियों (herbicides), कीटनाशकों (pesticides) तथा अन्य ज़ेनोबायोटिक्स (xenobiotics) के उपापचय में अत्यंत महत्वपूर्ण भूमिका निभाते हैं। विषैले पदार्थों को अभिक्रियाशील मध्यवर्ती (reactive intermediates) में परिवर्तित करके यह चरण उन्हें चरण ॥ में अंतर्जात अणुओं के साथ संयुग्मीकरण (conjugation) के लिए तैयार करता है। इस प्रकार, चरण । डिटॉक्सिफिकेशन प्रक्रिया की शुरुआत करता है और पौध कोशिकाओं पर विषैले प्रभावों को कम करने में सहायक होता है।

6. चरण II: संयुग्मीकरण अभिक्रियाएँ)Phase II: Conjugation Reactions)

डिटॉक्सिफिकेशन का द्वितीय चरण संयुग्मीकरण (Conjugation) कहलाता है। इस चरण में सक्रिय किए गए विषैले यौगिकों को पौधों के अंतर्जात (endogenous) अणुओं के साथ जोड़कर उनकी विषाक्तता कम की जाती है तथा उनकी जल-विलेयता बढ़ाई जाती है।

Toxin + GSH →Toxin-GSH

Glutathione S-transferases (GSTs) इलेक्ट्रोफिलिक विषैले यौगिकों के साथ ग्लूटाथायोन (GSH) को जोड़ने का कार्य करते हैं। UDP-glycosyltransferases शर्करा अणुओं को जोड़ते हैं, जबकि अमीनो अम्ल ट्रांसफरेज़ (amino acid transferases) अमीनो अम्लों के साथ स्थायी संयुग्म (stable conjugates) बनाते हैं।

इन जैवरासायनिक संशोधनों से अभिक्रियाशील विषैले यौगिक निष्क्रिय (neutralized) हो जाते हैं और उनका सुरक्षित परिवहन रिक्तिकाओं (vacuoles) या कोशिका भित्ति (cell wall) तक संभव हो पाता है। वहाँ उन्हें सुरक्षित रूप से संग्रहीत किया जाता है, जिससे वे कोशिकीय घटकों को क्षति नहीं पहुँचा पाते।

7. चरण III: परिवहन एवं पृथक्करण)Phase III: Transport and Sequestration)

चरण ॥। पौधों की डिटॉक्सिफिकेशन प्रक्रिया का अंतिम चरण है, जिसमें संयुग्मित (conjugated) विषैले यौगिकों को सक्रिय रूप से कोशिका के भीतर सुरक्षित भंडारण स्थलों तक पहुँचाया जाता है या कोशिका के बाहर निष्कासित किया जाता है। इस प्रक्रिया में ATP-Binding

Cassette Transporters (ABC transporters) तथा Multidrug and Toxic Compound Extrusion Transporters (MATE transporters) केंद्रीय भूमिका निभाते हैं। ये परिवाहक कोशिकीय ऊर्जा (ATP या प्रोटॉन ग्रेडिएंट) का उपयोग करके विषैले यौगिकों के संयुग्मों को झिल्लियों के पार स्थानांतरित करते हैं।

अधिकांश डिटॉक्सिफाइड यौगिकों को रिक्तिकाओं (vacuoles) में पहुँचाया जाता है, जहाँ उन्हें सुरक्षित रूप से पृथक (sequestered) कर दिया जाता है ताकि वे महत्वपूर्ण उपापचयी मार्गों के साथ अभिक्रिया न कर सकें। कुछ संयुग्म कोशिका भित्ति (cell wall) में जमा किए जाते हैं या एपोप्लास्ट (apoplast) में स्रावित कर दिए जाते हैं।

रिक्तिकीय पृथक्करण विशेष रूप से भारी धातुओं, शाकनाशी अपघटकों (herbicide metabolites) तथा ज़ेनोबायोटिक यौगिकों को अलग रखने के लिए अत्यंत महत्वपूर्ण है। यह प्रक्रिया संवेदनशील कोशिकांगों (organelles) की रक्षा करती है तथा प्रतिकूल पर्यावरणीय परिस्थितियों में कोशिकीय समस्थिति (cellular homeostasis) बनाए रखने में सहायता करती है।

8. एंजाइमिक एंटीऑक्सीडेंट रक्षा तंत्र

पौधों में प्रतिक्रियाशील ऑक्सीजन प्रजातियों (ROS) को निष्क्रिय करने तथा रेडॉक्स समस्थिति (redox homeostasis) बनाए रखने के लिए एक अत्यंत प्रभावी एंजाइमिक एंटीऑक्सीडेंट तंत्र पाया जाता है।

2O2−+2H+→H2O2+O2

Superoxide Dismutase (SOD) सुपरऑक्साइड रेडिकल (O_2^-) को हाइड्रोजन पेरॉक्साइड (H_2O_2) और ऑक्सीजन (O_2) में परिवर्तित करता है। इसके बाद Catalase (CAT) तथा Ascorbate Peroxidase (APX) हाइड्रोजन पेरॉक्साइड का अपघटन करके उसे जल (H_2O) और ऑक्सीजन में बदल देते हैं।

Glutathione Reductase (GR), Monodehydroascorbate Reductase (MDHAR) तथा Dehydroascorbate Reductase (DHAR) ग्लूटाथायोन और एस्कॉर्बेट जैसे अपचयित एंटीऑक्सीडेंटों का पुनर्जनन करते हैं। यह प्रणाली ऑक्सीडेटिव क्षति से निरंतर सुरक्षा प्रदान करती है तथा तनाव की परिस्थितियों में कोशिकीय रेडॉक्स संतुलन बनाए रखती है।

9. गैर एंजाइमिक एंटीऑक्सीडेंट-

गैर-एंजाइमिक एंटीऑक्सीडेंट छोटे सुरक्षात्मक अणु हैं जो प्रतिक्रियाशील ऑक्सीजन प्रजातियों (ROS) को सीधे निष्क्रिय करते हैं। इनमें एस्कॉर्बिक अम्ल (विटामिन C), ग्लूटाथायोन, टोकोफेरॉल (विटामिन E), कैरोटिनॉयड, फ्लेवोनॉयड, फेनोलिक यौगिक तथा प्रोलिन शामिल हैं। ये मुक्त मूलकों को हटाते हैं, लिपिड पेरॉक्सीडेशन रोकते हैं, प्रोटीन और न्यूक्लिक अम्लों की रक्षा करते हैं तथा झिल्लियों को स्थिर रखते हैं। ग्लूटाथायोन प्रमुख रेडॉक्स बफर के रूप में कार्य करता है और एंजाइमिक रक्षा तंत्र को सुदृढ़ बनाकर ऑक्सीडेटिव तनाव से सतत सुरक्षा प्रदान करता है।

10. एस्कॉर्बेट–ग्लूटाथायोन चक्र

एस्कॉर्बेट–ग्लूटाथायोन चक्र पौधों में एक अत्यंत महत्वपूर्ण एंटीऑक्सीडेंट मार्ग है, जो हाइड्रोजन पेरॉक्साइड (H_2O_2) का डिटॉक्सिफिकेशन करता है और कोशिकीय रेडॉक्स संतुलन बनाए रखता है।

H2O2+2AsA→2H2O+2MDHA

Ascorbate Peroxidase (APX) एस्कॉर्बेट (AsA) का उपयोग करके हाइड्रोजन पेरॉक्साइड को जल में परिवर्तित करता है। इसके बाद Monodehydroascorbate Reductase (MDHAR), Dehydroascorbate Reductase (DHAR) तथा Glutathione Reductase (GR), NADPH की सहायता से एस्कॉर्बेट और ग्लूटाथायोन का पुनर्जनन करते हैं। यह चक्र एंटीऑक्सीडेंट रक्षा को सल्फर उपापचय (sulfur metabolism) से जोड़ता है और ऑक्सीडेटिव तनाव के विरुद्ध निरंतर सुरक्षा प्रदान करता है।

11. ग्लायोक्सालेज़ तंत्र

ग्लायोक्सालेज़ तंत्र मिथाइलग्लायॉक्सल जैसे अत्यधिक विषैले उप-उत्पाद को निष्क्रिय करता है, जो ग्लाइकोलाइसिस के दौरान बनता है।

Methylglyoxal+GSH→D-Lactate

Glyoxalase I और Glyoxalase II ग्लूटाथायोन (GSH) की सहायता से मिथाइलग्लायॉक्सल को D-लैक्टेट में बदलते हैं। यह प्रक्रिया प्रोटीन, DNA और लिपिड की रक्षा करती है तथा लवणता, सूखा और भारी धातु तनाव के प्रति सहनशीलता बढ़ाती है।

12. भारी धातु डिटॉक्सिफिकेशन

पौधों ने कैडमियम (Cd), आर्सेनिक (As), सीसा (Pb) और पारा (Hg) जैसी विषैली धातुओं के डिटॉक्सिफिकेशन हेतु विशेष तंत्र विकसित किए हैं।

(γ-Glu-Cys)n-Gly+Metal2+→PC-Metal Complex

Phytochelatins, जो ग्लूटाथायोन से Phytochelatin Synthase द्वारा बनते हैं, धातु आयनों को बाँधकर स्थिर

कॉम्प्लेक्स बनाते हैं। Metallothioneins भी धातुओं का बंधन और पृथक्करण करते हैं। कोशिका भित्ति पर अवशोषण तथा रिक्तिकाओं में परिवहन द्वारा धातुओं को सुरक्षित रूप से संग्रहीत किया जाता है।

13. पौध कोशिकांगों की भूमिका

पौध कोशिकांग विषैले यौगिकों के निर्माण और डिटॉक्सिफिकेशन दोनों में महत्वपूर्ण भूमिका निभाते हैं। क्लोरोप्लास्ट, माइटोकॉन्ड्रिया और पेरॉक्सीसोम प्रकाश संश्लेषण, श्वसन तथा प्रकाश-श्वसन के दौरान ROS उत्पन्न करते हैं, साथ ही एंटीऑक्सीडेंट एंजाइमों द्वारा इन्हें निष्क्रिय भी करते हैं। रिक्तिकाएँ डिटॉक्सिफाइड उत्पादों, भारी धातु कॉम्प्लेक्स तथा ज़ेनोबायोटिक संयुग्मों का सुरक्षित भंडारण करती हैं। एंडोप्लाज्मिक रेटिकुलम में Cytochrome P450 Monooxygenases स्थित होते हैं, जो ज़ेनोबायोटिक उपापचय और कोशिकीय समस्थिति बनाए रखने में सहायक हैं।

14. हीट शॉक प्रोटीन्स एवं आणविक चैपरोन

Heat Shock Proteins (HSPs) तथा आणविक चैपरोन पौधों की कोशिकीय सुरक्षा प्रणाली के महत्वपूर्ण घटक हैं। प्रमुख परिवारों में HSP70, HSP90, HSP100 तथा छोटे हीट शॉक प्रोटीन्स (sHSPs) शामिल हैं। ये प्रोटीन प्रोटीनों के विकृतिकरण और एकत्रीकरण को रोकते हैं, सही फोल्डिंग में सहायता करते हैं, क्षतिग्रस्त प्रोटीनों का पुनर्संयोजन करते हैं तथा अपरिवर्तनीय रूप से क्षतिग्रस्त प्रोटीनों के अपघटन में सहायक होकर तनाव सहनशीलता बढ़ाते हैं।

15. झिल्ली संरक्षण एवं लिपिड मरम्मत

डिटॉक्सिफिकेशन तंत्र लिपिड पेरॉक्सीडेशन को सीमित करके कोशिकीय झिल्लियों की संरचनात्मक अखंडता को सुरक्षित रखते हैं। Tocopherols, Carotenoids तथा लिपिड-मरम्मत एंजाइम क्लोरोप्लास्ट और माइटोकॉन्ड्रिया की झिल्लियों को ऑक्सीडेटिव क्षति से बचाते हैं। ये यौगिक मुक्त मूलकों को निष्क्रिय करते हैं, असंतृप्त वसीय अम्लों की रक्षा करते हैं तथा क्षतिग्रस्त झिल्ली लिपिडों की मरम्मत में सहायता करते हैं, जिससे झिल्ली की पारगम्यता, ऊर्जा उत्पादन और कोशिकीय कार्यक्षमता सामान्य बनी रहती है।

16. DNA मरम्मत एवं प्रोटीन टर्नओवर

ROS द्वारा उत्पन्न DNA क्षतियों की मरम्मत बेस एक्सीशन रिपेयर (Base Excision Repair; BER), न्यूक्लियोटाइड एक्सीशन रिपेयर (Nucleotide Excision Repair; NER) तथा पुनर्संयोजन (recombination) मार्गों द्वारा की जाती है। ये तंत्र ऑक्सीकृत क्षारों, टूटे हुए न्यूक्लियोटाइडों तथा DNA स्ट्रैंड क्षतियों को पहचानकर उन्हें सही अनुक्रम से प्रतिस्थापित करते हैं। क्षतिग्रस्त या विकृत प्रोटीनों को Ubiquitin-Proteasome System तथा Autophagy के माध्यम से हटाया जाता है। यह प्रक्रिया कोशिकीय गुणवत्ता नियंत्रण बनाए रखती है, विषैले प्रोटीन संचय को रोकती है और तनाव की परिस्थितियों में सामान्य उपापचय एवं कोशिकीय कार्यों को सुरक्षित रखती है।

17. तनाव संकेत तंत्र

कैल्शियम संकेत, Mitogen-Activated Protein Kinases (MAPKs), प्रतिक्रियाशील नाइट्रोजन प्रजातियाँ

तथा एब्सिसिक अम्ल, सैलिसिलिक अम्ल, जैस्मोनिक अम्ल और एथिलीन जैसे फाइटोहॉर्मोन डिटॉक्सिफिकेशन प्रतिक्रियाओं और सुरक्षात्मक जीनों के अभिव्यक्ति का समन्वय करते हैं।

18. ट्रांसक्रिप्शनल नियमन

WRKY, NAC, bZIP, MYB तथा AP2/ERF जैसे ट्रांसक्रिप्शन कारक एंटीऑक्सीडेंट एंजाइम, ग्लूटाथायोन S-ट्रांसफरेज़, परिवहन प्रोटीन तथा अन्य डिटॉक्सिफिकेशन जीनों को सक्रिय करते हैं। DNA मिथाइलेशन, हिस्टोन संशोधन और छोटे RNA इन प्रतिक्रियाओं को सूक्ष्म रूप से नियंत्रित कर कोशिकीय समस्थिति बनाए रखते हैं।

19. अजैविक तनाव के अंतर्गत डिटॉक्सिफिकेशन

सूखा, लवणता, अत्यधिक या निम्न तापमान, जलभराव तथा पोषक तत्वों का असंतुलन पौधों में प्रतिक्रियाशील ऑक्सीजन प्रजातियों (ROS) और अन्य विषैले उपापचयों के उत्पादन को बढ़ा देते हैं। इन परिस्थितियों में एंटीऑक्सीडेंट एंजाइम, ग्लायोक्सालेज़ तंत्र, ग्लूटाथायोन-आधारित संयुग्मीकरण तथा रिक्तिकीय पृथक्करण जैसी डिटॉक्सिफिकेशन प्रक्रियाएँ अधिक सक्रिय हो जाती हैं। उन्नत डिटॉक्सिफिकेशन क्षमता कोशिकीय क्षति को कम करती है, प्रकाश संश्लेषण और उपापचयी संतुलन बनाए रखती है तथा तनाव सहनशीलता और उपज स्थिरता में महत्वपूर्ण योगदान देती है।

20. जैविक तनाव के दौरान डिटॉक्सिफिकेशन

रोगजनक संक्रमण के दौरान ऑक्सीडेटिव बर्स्ट और फाइटोएलेक्सिन का संचय होता है। पौधे एंटीऑक्सीडेंट

तथा डिटॉक्सिफाइंग एंजाइमों की सहायता से कोशिकीय क्षति को सीमित करते हुए रक्षा संकेत तंत्र को सक्रिय और संतुलित बनाए रखते हैं।

21. शाकनाशी उपापचय एवं चयनात्मकता

फसलों की शाकनाशियों के प्रति सहनशीलता मुख्यतः उनकी तीव्र डिटॉक्सिफिकेशन क्षमता पर निर्भर करती है। Cytochrome P450 Monooxygenases ऑक्सीकरण द्वारा शाकनाशी उपापचय प्रारंभ करते हैं, जबकि Glutathione S-transferases (GSTs) ग्लूटाथायोन के साथ संयुग्मीकरण कर विषाक्तता घटाते हैं। ग्लाइकोसिलट्रांसफरेज़ अतिरिक्त संशोधन करते हैं। हर्बीसाइड सेफनर डिटॉक्सिफिकेशन एंजाइमों और ट्रांसपोर्टरों की अभिव्यक्ति बढ़ाकर फसलों में चयनात्मकता, कम क्षति तथा प्रभावी खरपतवार नियंत्रण सुनिश्चित करते हैं।

22. फाइटोरिमेडिएशन)Phytoremediation)

पौधे प्रदूषकों का डिटॉक्सिफिकेशन और संचय करके दूषित मिट्टी व जल को शुद्ध करते हैं। हाइपरअक्यूमुलेटर प्रजातियाँ तथा आनुवंशिक रूप से संशोधित पौधे पर्यावरणीय सफाई और प्रदूषण नियंत्रण में महत्वपूर्ण भूमिका निभाते हैं।

23. जैव प्रौद्योगिकी अनुप्रयोग

जैव प्रौद्योगिकी दृष्टिकोणों ने पौधों की डिटॉक्सिफिकेशन क्षमता और तनाव सहनशीलता को बढ़ाया है। Superoxide Dismutase (SOD), Ascorbate

Peroxidase (APX), Glutathione S-transferases (GST) तथा Phytochelatin Synthase जैसे जीनों का ओवरएक्सप्रेशन एंटीऑक्सीडेंट रक्षा और भारी धातु डिटॉक्सिफिकेशन को मजबूत करता है। CRISPR जीनोम एडिटिंग द्वारा तनाव-संबंधी जीनों का सटीक संशोधन कर लवणता, सूखा, ऑक्सीडेटिव तनाव तथा विषैले धातुओं के प्रति सहनशील फसल किस्मों का विकास संभव हुआ है, जिससे उत्पादकता और अनुकूलन क्षमता बढ़ती है।

24. कृषि महत्व

पौधों के डिटॉक्सिफिकेशन पाथवे का अध्ययन कृषि के लिए अत्यंत महत्वपूर्ण है, क्योंकि ये तंत्र फसलों की पर्यावरणीय एवं रासायनिक तनाव सहनशीलता निर्धारित करते हैं। एंटीऑक्सीडेंट प्रणाली, भारी धातु डिटॉक्सिफिकेशन तथा ज़ेनोबायोटिक उपापचय की समझ से सूखा, लवणता, तापमान तनाव और प्रदूषण के प्रति सहनशील किस्मों का विकास संभव होता है। यह जानकारी शाकनाशी उपयोग, पोषक प्रबंधन और तनाव शमन रणनीतियों को अनुकूल बनाती है। उन्नत डिटॉक्सिफिकेशन क्षमता बेहतर वृद्धि, स्थिर उपज और उच्च गुणवत्ता सुनिश्चित करती है।

25. भविष्य की संभावनाएँ

पौधों में डिटॉक्सिफिकेशन पर भविष्य के अनुसंधान में ओमिक्स तकनीक, सिस्टम्स बायोलॉजी, नैनोटेक्नोलॉजी और सिंथेटिक बायोलॉजी का एकीकरण होगा। जीनोमिक्स, ट्रांसक्रिप्टोमिक्स, प्रोटीओमिक्स और मेटाबोलोमिक्स प्रमुख जीनों की पहचान करेंगे। CRISPR

और नैनो तकनीक से तनाव-सहनशील फसलों का सटीक विकास संभव होगा, जिससे कृषि अधिक टिकाऊ बनेगी।

26. निष्कर्ष

डिटॉक्सिफिकेशन पाथवे और कोशिकीय सुरक्षा तंत्र पौधों के जीवन, वृद्धि और उत्पादकता के लिए अत्यंत आवश्यक हैं। एंजाइमिक परिवर्तन, एंटीऑक्सीडेंट रक्षा, संयुग्मीकरण, परिवहन और रिक्तिकीय भंडारण मिलकर विषैले पदार्थों को निष्क्रिय करते हैं। ये तंत्र सूखा, लवणता, भारी धातु, शाकनाशी और रोगजनकों के विरुद्ध सहनशीलता बढ़ाकर सतत कृषि विकास में सहायक होते हैं।