एग्री आर्टिकल्स
(कृषि लेखों के लिए ई-पत्रिका)
वर्ष: 06, अंक: 02 (मार्च-अप्रैल, 2026)
www.agriarticles.com पर ऑनलाइन उपलब्ध
© एग्री आर्टिकल्स, आई. एस. एस. एन.: 2582-9882

फसलों पर सुखे का प्रभाव एवं उनके प्रबंधन की रणनीतियाँ: एक परिदृश्य

*डॉ. सुनील कुमार मंडल एवं डॉ. सुरेन्द्र प्रसाद
सहायक प्राध्यापक, क्षेत्रीय अनुसंधान केन्द्र, झंझारपुर- 847403, स्नातकोत्तर कृषि महाविद्यालय, पूसा,
डॉ. राजेन्द्र प्रसाद केन्द्रीय कृषि विश्वविद्यालय, पूसा, समस्तीपुर, बिहार
*संवादी लेखक का ईमेल पता: skmandal6464@gmail.com

सुखे का तनाव एक अपरिहार्य कारक है जो विभिन्न वातावरणों में बिना किसी सीमा और स्पष्ट चेतावनी के मौजूद रहता है जिससे पौधे के जैवभार (बायोमास) उत्पादन, गुणवत्ता और उर्जा में बाधा उत्पन्न होती है। यह तापमान गतिशीलता, प्रकाश की तीव्रता और कम वर्षा के कारण होने वाला एक प्रमुख पर्यावरणीय तनाव है। इसके बावजूद इसका संचयी, अप्रत्यक्ष प्रभाव और बहुआयामी प्रावृति पौधों की आकारिकी, शारीरिक, जैव रासायनिक और आणविक विशेषताओं को गंभीर रूप से प्रभावित करती है, जिसका प्रकाश–संश्लेषण क्षमता पर प्रतिकूल प्रभाव पड़ता है। जल की कमी से निपटने के लिए, पौधे विभिन्न जटिल प्रतिरोध और अनुकूलन तंत्र को विकसित करते हैं, जिनमें शारीरिक और जैव रासायनिक प्रतिक्रियायें शामिल है, जो प्रजातियों के स्तर के साथ भिन्न होती है। पौधे में जल तनाव सहनशीलता और अनुकूलन को बेहतर बनाने वाले परिस्कृत अनुकूलन तंत्र और नियमितता के नेटवर्क पर संक्षेप में चर्चा की गई है। वृद्धि पैटर्न और संरचनात्मक गतिशीलता, रंध्र चालकता और वितरण में परिवर्तन के माध्यम् से वाष्पोत्सर्जन की हानि में कभी, पत्ती का मुरझाना, जड़ से प्ररोह अनुपात की गतिशीलता, जड़ की लम्बाई में वृद्धि, संगत विलय का संचय, वाष्पोत्सर्जन की दक्षता में वृद्धि, प्रसारण और हार्मोनल के विनियमन और विलंम्बित जीर्णता ऐसी रणनीतियां है, जिन्हे जल की कमी वाले पौधे अपनाते है। सुखे के तनाव से निपटने के उपायों में प्रजनन रणनीतियां, आणविक और जीनोमिक्स दृष्टिकोण शामिल है, जिनमें ओमिक्स प्रोद्यौगिकी परिवर्त्तन जैसे मेटाबोलोमिक्स, प्रोटिओमिक्स, जीनोमिक्स, ट्रांसक्रिप्टोमिक्स, ग्लाइकोमिक्स और पोनोमिक्स पर विशेष जोर दिया जाता है जो पौधों में तनाव सहनशीलता में सुधार करते हैं। सुखे के तनाव को प्रेरित करने के लिए, पौधे में तनाव की स्थिति में बीज प्राइमिंग, वृद्धि हार्मोन, ऑस्मोप्रोटेकेंट्टस, सिलिकॉन, सेलेनियम और पोटेशियम का प्रयोग करना उपयोगी है। इसके अतिरिक्त, सूक्ष्मजीवों, हाइड्रोजल, नेनोकणों के प्रयोगों और चयापचय इंजीनियरिंग तकनिकों के माध्यम् से सुखे के अनुकूलन के लिए एंटीआक्सीडेंट एंजाइम की गतिविधी को नियंत्रित करने, कोशिका होमियोस्टेसिस के रखरखाव के माध्यम् से पौधों की सहनशीलता को बढ़ाने और जल तनाव के प्रतिकूल प्रभावों को कम करने की कृषि में काफी संभावनाएँ है।

परिचय

पौधे प्राकृतिक और कृषि परिस्थितियों में वृद्धि और विकास के दौरान विभिन्न पर्यावरणीय तनावों के सम्पर्क में आते हैं। इनमें से सुखा पौधों की उत्पादकता प्रभावित करने वाले सबसे गंभीर पर्यावरणीय तनावों में से एक है। पौधे के शरीर के ताजे बायोमास (जैवभार) का लगभग 80–95 प्रतिशत पानी से बना होता है, जो पौधों की वृद्धि, विकास और चयापचय के कई पहलूओं सहित विभिन्न शारीरिक प्रक्रियाओं में महत्वपूर्ण भूमिका निभाते है। परिणामस्परूप, कुछ लोग सूखे को विभिन्न पोधों के लिये मुख्य पर्यावरणीय तनाव मानते हैं, विशेष रूप से सुखा प्रभावित क्षेत्रों में जो भविष्य में विश्व खाद्द सुरक्षा के लिए सबसे गंभीर खतरा और अतीत में महत्वपूर्ण अकालों का उत्प्रेरक है। कृषि में सुखे का प्रभाव जल संसाधनों की कमी और खतरनाक विश्व जनसंख्या की वृद्धि से भी खाद्द की मांग में वृद्धि के कारण बढ़ गये है। सुखे की अप्रत्याशित प्रकृति विभिन्न कारकों पर निर्भर करती है। जैसे वर्षा का आसमान और अविश्वसनीय वितरण, इसके अतिरिक्त, कुछ मामलों मे पौधे मिट्टी से पानी को अवशोषित करने में असमर्थ होते हैं, भले ही जड़ क्षेत्र में पर्याप्त नमी मौजूद हो और यह एक घटना जिसे शारीरिक सुखा या छद्दम सुखा के रूप में जाना जाता है।

सुखे के तनाव की स्थिति में पौधों के विभिन्न आणविक, जैव रासायनिक, शारीरिक, रूपात्मक और पारिस्थितिक लक्षण और प्रक्रियाएँ। पानी की कमी वाले वातावरण में पौधों की उपज और गुणवत्ता पर प्रतिकूल प्रभाव पड़ता है। विकास के चरण, आयु, पौधों की प्रजातियां और सुखे की गंभीरता और अवधि प्रमुख कारक है जो सुखे के प्रति प्रतिरोध तंत्र, बदले में, पौधों की प्रजातियों में भिन्न होता है। इसलिए, पौधों में अपने संसाधन के उपयोग को कम करने और सुखे जैसी प्रतिकूल पर्यावरणीय परिस्थितियों का सामना करने के लिए अपनी वृद्धि को समायोजित करने की क्षमता होती है। आणविक स्तर पर विभिन्न नेटवर्क, जैसे कि सिग्नल ट्रांसडक्सन में शामिल, सुखे के तनाव के खिलाफ इन प्रतिक्रियाओं को बढ़ाने के लिये जिम्मेदार है। कुछ बदलती परिस्थितियों में पौधों की सुखा सहनशीलता में सुधार की आवश्यकता होती है। जल–उपयोग दक्षता बढ़ाने के लिए जब जड़ों और पत्तियों का भौतिक अनुकूलन कुछ सुखा–प्रतिरोधी आणविक

संकेतों, जिनमें जीन कोंडिग रेगुलरिटी प्रोटीन भी शामिल है, जो विभिन्न नियामक तंत्रों के अनुसार ब्रॉसटॉक के माध्यम् से कई अन्य जीन और संकेतों को व्यक्त करती है, का सामना करने के लिये प्रर्याप्त नहीं होता है। भविष्य की खाद्द मांग को पूरा करने के लिए सुखा–सहनशील पौधों पर अधिक कार्य को बढ़ावा देना और किफायती व लाभकारी कृषि पद्दतियों का उपयोग अत्यन्त महत्वपूर्ण होगा।

पौधों में सुखे के तनाव के कारण

भविष्य में वैश्विक जलवायु परिवर्तन में तेजी आने की उम्मीद है, क्योंकि हवा का तापमान और वायुमंडलीय कार्बन डाइऑक्साइड का स्तर लगातार बढ़ रहा है जो अंततः वर्षा के पैटर्न और उसके वितरण को बदल देता है, हॉलांकि, वर्षा से पानी की कमी आमतौर पर सुखे के तनाव का मुख्य कारण होती है, लेकिन वाष्पीकरण के माध्यम् से मिट्टी में पानी की क्षति, जो उच्च तापमान की घटनाओं, उच्च प्रकाश की तीव्रता और शुष्क हवा से प्रेरित होती है, मौजूदा सुखे के तनाव की घटना को और बढ़ा सकती है। वैश्विक जलवायु परिवर्तन के परिणामस्वरूप आमतौर पर वैश्विक स्तर पर विशाल क्षेत्रों में सुखे के तनाव की स्थिति व्याप्त हो जाती है। सुखे के तनाव के साथ–साथ लवणता का तनाव भी पौधों में पानी की कमी का एक प्राथमिक कारण माना जाता है। सूखे के तनाव के लिये जिम्मेदार कुछ कारकों का संक्षेप में प्रकाश डाला गया है।

1. ग्लोबल वार्मिंग : जलवायु परिवर्तन से उत्पन्न कुछ परिणाम कृषि उत्पादकता के लिए फायदेमंद हो सकते है। उदाहरण के लिये, बढ़े हुये कार्बन डाइऑक्साइड के तहत प्रकाश संश्लेषण की उच्च दर की सूचना दी गई है। इसलिए उच्च संन्द्रता में वायुमंडल में इसकी उपस्थिति भविष्य में अनाज की पैदावार को बढ़ा सकती है। हालांकि, ज्यादातर मामलों में जलवायु परिवर्तन के प्राकृतिक और कृषि दोनों के पारिस्थितिकी प्रणालियों में हानिकारक परिणाम होते हैं। हवा के तापमान में वृद्धि से ग्लोशियर पिघल सकते हैं और कम या शून्य ढ़लान वाली कृषि भूमि में बाढ़ आ सकती है। इसके अतिरिक्त ग्लेसियर के नुकसान से जलाशयों में कमी आ रही है, जिससे फसलों के लिए पानी की उपलब्धता सीमित हो रही है, ये प्रवृति जो समय के साथ बढ़ रही है। वास्तव में, दुनिया भर के विभिन्न वर्षा आधारित कृषि क्षेत्रों में, ग्लोबल वार्मिंग के कारण वार्षिक संचित वर्षा में कमी आई है। ग्लोबल वार्मिंग के अंतर्गत बढ़ते तापमान के कारण पौधों में मौजूद आंतरिक जल काफी हद तक वायुमंडल में चला जाता है, जो दुनिया भर की विभिन्न कृषि प्रणालियों में पहले से मौजूद जल की कमी की समास्या को और बढ़ा देता हैं। यदि इस सदी के अंत तक हवा के तापमान मे वर्त्तमान स्तर से लगभग 2 डिग्री सेल्सियस अधिक की अपेक्षित वृद्धि होती है, तो दुनिया की बढ़ती आबादी गंभीर जल की कमी से प्रभावित होगी।

2. वर्षा की विसंगतियाँ : नहरों, नदियों और जल चैनल के माध्यम् से सिंचित क्षेत्रों की तुलना में उन क्षेत्रों में अधिक तनाव की उम्मीद है, जहॉ फसल उत्पादन पूरी तरह से वर्षा पर निर्भर है। इस प्रकार, वर्षा आधारित क्षेत्रों में सुखे की घटनायें पूरे वर्षा के वितरण के साथ दृढ़ता से सहसंबद्ध होती है और कुछ वर्षों में एक निश्चित अवधि में पानी के तनाव की उच्च संभावना देखी जाती है। औद्योगिकरण, वनों की कटाई और शहरीकरण प्रमुख मानवजनित गतिविधियों है जो वर्षा के पैटर्न (स्वरूप) को प्रभावित करती है और इस प्रकार जलवायु परिवर्तन में इसके प्रभाव के माध्यम् से पौधों को पानी की उपलब्धता प्रभावित होती है। पाकिस्तान में, शुरूआती वसन्त और सर्दियों में अनियमित और अधिक लगातार वारिश होती है, जबकि शुरूआती पतझड़ और गर्मियों के मौसम में कम और/या कोई बारिश नहीं होने के कारण अधिक बार शुष्क और गर्म मौसम होते हैं। विशेष रूप से गर्मियों में। हालांकि, वर्षों के भीतर और वर्षों के दौरान वर्षा का वितरण और तीव्रता पौधों के लिए जल संसाधनों के प्रबंधन और अधिकांश मामलों में सुखे के तनाव की घटना दोनों में एक प्रमुख भूमिका निभाती है।

3. मानसून के पैटर्न में बदलाव : ग्रीष्म ऋतु के दौरान, मानसून की प्रणाली को दुनिया के विभिन्न क्षेत्रों में वर्षा का स्त्रोत माना जाता है। इसका घटित होना तापमान के प्रेरक बल होने के साथ जुड़ा हुआ है। यह उम्मीद की जाती है कि यदि मौजूदा स्थितियाँ जारी रहती है, तो वर्षा आधारित क्षेत्रों में बीसवीं सदी की शुरूआत तक ग्रीष्मकालीन वर्षा की मात्रा में 70 प्रतिशत की कमी आयेगी। एक अनुमान के अनुसार वायुमंडल में कार्बन डाइऑक्साइड की सान्द्रता में अधिक वृद्धि के कारण उच्च वर्षा होने की उम्मीद है, जो फसल उत्पादन पर प्रतिकूल प्रभाव डालेगी और धनी आबादी वाले देशों के कृषि क्षेत्रों में बड़े पैमाने पर बाढ़ और बड़े पैमाने पर आर्थिक नुकसान का कारण बनेगी। ऐसी परिस्थितियों में मानसून की वर्षा में परिवर्तनशीलता राइजोस्फीयर के नमी की स्तर को प्रभावित करती है और करती रहेगी, जिससे वर्षा की तीव्रता, घटना और अवधि में गतिशीलता के माध्यम् से दुनिया के विशेष क्षेत्रों में फसलों की उत्पादकता प्रभावित होगी। वर्षा के स्वरूप की स्वाभाविक रूप से एच्छिक और अप्रत्यशित प्रकृति के साथ–साथ हाल के जलवायु परिवर्तनों के कारण, वर्षा ऋतु का छोटा या लंबा होना कुछ जलवायु क्षेत्रों में जल की कमी और या अधिकता, दोनों की समस्याओं के साथ वर्त्तमान और भविष्य के परिदृश्यों को और बिगाड़ सकता है। कृषि प्रधान होने के नाते, मानसून के व्यवाहर के अनुसार फसल उत्पादन की पद्दतियों को अपनाना और टिकाऊ फसल उत्पादन की ओर रूख करना आवश्यक है। उचित जल प्रबंधन और फसल नियोजन, अल्प से अत्यधिक और इसके विपरीत, मानसून के स्वरूप में मात्रात्मक बदलावों से निपटने की रणनीतियाँ है।

पौधों पर सुखे के तनाव का प्रभाव

पर्यावरणीय पारिस्थितियों में गतिशीलता के आधार पर पौधे विभिन्न तनावों का सामना कर सकते है जो उनके विकास और वृद्धि को गंभीर रूप से प्रभावित कर सकते हैं। पौधों को इन परिस्थितियों **में** जीवित रहने में सक्षम बनाने के लिए कुछ चयापचय परिवर्तन और जीन अभिव्यक्तियाँ होती है। अनाज की गुणवत्ता और पैदावार सुखे के तनाव से बहुत प्रभावित हो सकती है, जिसे कृषि में सबसे सीमित तनाव के रूप में जाना जाता है। इस प्रकार, पौधों में पानी की कमी से निपटने की क्षमता की जाँच करना बहुत महत्वपूर्ण है और निकट भविष्य में इस पर ध्यान देना जारी रखना चाहिए, खासकर शुष्क और अर्ध–शुष्क वातावरण में। वर्त्तमान में, प्रमुख स्टेपल (स्थायी) फसलों का गहन अध्ययन किया जा रहा है, ताकि अधिकत्तम अनाज की पैदावार और गुणवत्ता प्राप्त करने के लिए सुखा उत्तरदायी तंत्रों की पहचान की जा सके।

पौधों की वृद्धि और विकास के लिए जल की उपलब्धता का इष्टतम् स्तर आवश्यक हैं, मिट्टी की नमी में इष्टतम् स्तर से अधिक उतार–चढ़ाव अनाज की गुणवत्ता और उपज को प्रभावित कर सकता है। दुसरी ओर, राइजोस्फीयर में इष्टतम् जल की उपलब्धता से कम होने पर पौधों की वृद्धि और विकास वाधित होती है, जिससे पौधों के द्वारा पोषक तत्वों का अवशोषण अनाज वाली फसलों के उत्पादन में भारी कमी के लिये जिम्मेदार रहा है और वैश्विक तापमान की वृद्धि और जलवायु परिवर्तनशीलता के कारण इसके और भी गंभीर होने की आशंका है।

पानी की कमी का प्रकोप कम या बारिश के अभाव के कारण होता है, जिसके परिणामस्वरूप मिट्टी में नमी की मात्रा कम होती है और पौधों के हवाई हिस्सों जैसे पत्तियों और तनों में पानी की क्षमता कम होती है। जब ऐसा होता है, तो पत्तियों से वाष्पोत्सर्जन के माध्यम् से पानी की क्षति की दर शुष्क वातावरण में जड़ों के माध्यम् से पानी के अवशोषण की दर को पार कर जाती है। जड़े अपने विस्तार के माध्यम् से अधिक पानी को अवशोषित करने का प्रयास करती है और यह अंततः पौधों को पानी की कमी होने पर रंध्रीय पानी के नुकसान को कम करने के लिए अनुकूलित करता है। पौधों में विशिष्ट सुखे के तनाव के लक्षणों में पत्ती सिकुड़ना, पौधे अचेत होना, पत्तियों का पीला पड़ना, पत्ती झुलसना, स्थायी रूप से मुरझाना शामिल है। इसके अतिरिक्त, किसी दिये गये पानी की कमी के लिये पौधे की प्रतिक्रिया अन्य सूखा के तनाव की घटनाओं की पिछली घटना और तीव्रता पर दृढ़ता से निर्भर करती है।

पौधे के प्रदर्शन पर पानी की कमी के प्रतिकूल प्रभावों के बावजूद, पौधों में पानी की कमी को अलग–अलग स्थिति का जवाब देने की क्षमता होती है। पौधे की वृद्धि और पानी की उपलब्धता के बीच एक मजबूत संबंध है, क्योंकि कोशिका वृद्धि, कोशिका विभाजन की तुलना में पानी की कमी से अधिक प्रभावित होती है। इन परिस्थितियों में, पौधों की वृद्धि वाधित होती है, जिसके परिणामस्परूप कोशिका भित्ती की विस्तारशीलता और प्रचुरता में कमी आती है। जब सुखे की स्थिति गंभीर होती है, तो श्वसन दर भी कम हो सकता है, हालांकि हल्के तनाव के तहत श्वसन दर में वृद्धि देखी गई थी। पानी की कमी से निपटने के लिए, तनावग्रस्त पौधों के आसमाटिक समायोजन को जड़ों और पत्तियों की सुक्रोज सामग्री में वृद्धि के माध्यम् से बनाये रखा जाता है। सुखे की अवधि, तीव्रता और आवृति, मिट्टी की विशेषताएं, विकास की सिंिति और चरण के साथ–साथ पौधों की प्रजातियां सहित पर्यावरणीय कारक पौधों में सूखे से संबंधित लक्षणों की सीमा और अवधि को दृढ़ता से प्रभावित करते हैं। पत्तियों के जीर्णता और झुकने, झुलसने और लटके हुये पत्तों, पत्तियों के लूढ़कने और भंगुर होने, बंद फूलों और फूलों के झड़ने, मुरझाने, सुस्ती, समय से पहले गिरने, जीर्णता और पत्तियों का पीला पड़ने की दर में वृद्धि, पौधों में सुखे के तनाव के सबसे सर्वव्यापी लक्षणों में से है। हालांकि, कम सामान्य, टहनी में दरारें, शाखा का मरना, परिगलन, अवरूद्ध विकास, छाल में दरारें, और पेड़ों का पतला होना सुखे की स्थिति में पौधों के द्वारा प्रदर्शित अन्य लक्षणों का प्रतिनिधित्व करते हैं। कुछ मामलों में पौधें अत्यधिक सुखे के तनाव में मर सकते हैं। जब ऐसा होता है, तो अत्यधिक जल तनाव के लक्षण होते हैं– मुलायम मांसल पत्तियां, सड़े हुये धब्बे वाली पत्तियां, कवक प्रभावित और फफूंदयुक्त पौधों के हिस्से।

सुखे के तनाव के प्रति पौधों की प्रतिक्रियायें

विकास के माध्यम् से विभिन्न अनुकूली तंत्र विकसित किये गये है जो पौधों के सुखे तनाव के प्रतिकूल प्रभावों के प्रति अधिक सहिष्णु बनाते है। तनाव से बचाव, पलायन और सहनशीलता तीन मुख्य उत्तरजीविता रणनीतियों है जिनका उपयोग पौधे के सुखे के तनाव के सम्पर्क में आने पर करते हैं। इस प्रकार, सुखे के तनाव के प्रति पौधों की प्रतिक्रियायें आणविक स्तर से लेकर पौधे के सामान्य स्तर तक भिन्न होती है। सुखे के तनाव के विरूद्ध पौधों के पलायन, बचाव और सहनशीलता के तंत्रों पर निम्नलिखित अनुभागों में चर्चा गई है :

1. पलायन तंत्र : पौधों की उत्पादकता पर सुखे के तनाव के हानिकारक प्रभावों से बचने के लिए कुछ पौधे वर्ष के सबसे शुष्क भाग की शुरूआत से पहले तेजी से पौधे के विकास और जीवन–चक्र को छोटा करने, स्व–प्रजनन और मौसमी वृद्धि से जुड़े तंत्रों का उपयोग करते हैं। इन तंत्रों में, पौधों में शीघ्र पुष्पन शायद सबसे अच्छा संभव बचाव अनुकूली तंत्र है। हालांकि यह तंत्र कुछ मामलों में पौधों की वृद्धि अवधि की लम्बाई और अंतिम पौधों की उत्पादकता में उल्लेखनीय कमी ला सकता है।

2. परिहार और सहनशीलता तंत्र : परिहार रणनीति के तहत, रंध्रीय वाष्पोत्सर्जन हानियों में कमी और सुस्थापित जड़ की प्रणालियों के द्वारा जल के अवशोषण में वृद्धि के माध्यम् से पौधों की जल क्षमता को उच्च बनाये रखा जा सकता है। अन्य मामलों में रोमयुक्त पत्तियों और क्यूटिकल्स जैसी शुष्करूपी विशेषतायें पौधों के उत्तकों में उच्च जल धारण क्षमता बनाये रखने में मदद कर सकती है। हालांकि इन संरचनाओं का अत्यधिक विकास पौधों की उत्पादकता में कमी और पौधे के वानस्पतिक एवं प्रजनन भागों के औसत आकार में कमी के रूप में पौधों के लिए महत्वपूर्ण है।

दुसरी ओर, प्रकाश संश्लेषक मशीनरी के स्तर पर एक अनुकूली सहनशीलता तंत्र में पौधे के पत्तियों के क्षेत्रफल में कमी और नई पत्तियों के विस्तार में सीमायें शामिल है। इसी तरह पत्तियों के दोनों ओर टाइकोम का उत्पादन एक्सोमॉर्फिक विशेषतायें है जो पौधो को शुष्क वातावरण में पानी की कमी को सहन करने की अनुमति देती है। ये संरचनायें पानी में प्रकाश प्रतिबिंब की दर में वृद्धि करके और पानी के नुकसान के प्रतिरोध की एक और अतिरिक्त परंत जोड़कर पत्ती के तापमान को कम करती है। इसलिए पत्ती के वाष्पोत्सर्जन के माध्यम् से पानी की हानि की दर कम हो जाती है। हालांकि, यह व्यापक रूप से स्वीकार किया जाता है कि जड़ प्रणाली में परिवर्तन, जिसमें जड़ का आकार, घनत्व, लम्बाई, प्रसार, विस्तार और विकास दर शामिल हैं। पानी की कमी से निपटने के लिए सुखा–सहिष्णु पौधों के लिए मुख्य रणनीति का प्रतिनिधित्व करते हैं।

सुखे के तनाव के प्रतिकूल प्रभावों को कम करने के उपाय

वुवाई के समय, पौधों की संख्या, पौधों के जीनोटाइप और मिट्टी एवं पोषक तत्व प्रबंधन से संबंधित सर्वोत्तम प्रबंधन पद्दतियों का उपयोग सुखे के तनाव के अधीन क्षेत्र की फसलों में अनाज की उपज के नुकसान को कम करने में मदद कर सकता है। हालांकि, सुखा–सहिष्णु की घटनाओं के साथ ट्रांसजेनिक पौधों का उपयोग शायद सुखा तनाव के शमन दृष्टिकोण सबसे अधिक प्रचलित है और वर्त्तमान मे अधिक ध्यान आर्कषित कर रहा है। सामान्य पारम्परिक प्रजनन की

विधियों के माध्यम् से सुखा–सहिष्णु पौधों को विकसित करने के लिए प्रजनन, आणविक और जीनोमिक दृष्टिकोण जैसे कई प्रयास किए जा रहे हैं जिसमें अन्य उपायों के अंतर्गत जल निष्कर्षण दक्षता, जल उपयोग दक्षता, रंध्र चालकता और आसमाटिक समायोजन में सुधार करने पर ध्यान केन्द्रित किया गया है। जबकि रणनीतियों में सिचाई के आधुनिक और अधिक प्रभावी तरीकों का उपयोग, अच्छे रोपण का अभ्यास और मल्चिंग भी शामिल है।

1. चयन और प्रजनन रणनीतियाँ : वर्त्तमान एक प्रयुक्त पारंपरिक और परंपरागत प्रजनन की विधियों के उपज अनुभवजन्य चयन पर आधारित थी। एक ओर कम आनुवंशिता और दुसरी ओर उच्च जीनोटाइप एवं पर्यावरण सम्पर्क, मुख्य फसलों में मात्रात्मक उपज की विशेषता को परिभाषित करने वाले मुख्य कारक है। इस प्रकार, पारंपरिक प्रजनन उपज में सुधार के लिए व्यवहार मे है। पौधों की शारीरिक प्रक्रियाओं का ज्ञान मात्रात्मक विशेषता विशेष का चयन करने जीन अनुक्रमों का पता लगाने और मात्रात्मक विशेषता विशेष अंतःक्षेपण के लिए पूर्वापेक्षा है। सुखे की अनियमित, अविश्वसनीय और अप्रत्याशित प्रतिक्रिया के कारण, प्रतिरोधी किस्मों की जाँच खुली स्थितियों में संभव नहीं है, हालांकि, यह आश्रय और/या नियंत्रित स्थितियों में प्रबंधनीय है। इसके विपरीत, विविध वातावरणों में बेहतर सुखा तनाव अहिष्णुता के लिए ऐच्छिक रूप से चयनित संतानों की अभिव्यक्ति गैर–तनाव की स्थिति मे कम वाष्पोत्सर्जन दर और अपरिवर्तित जल उपयोग दक्षता वाली किस्मों का अंतिम फसल पर कोई प्रभाव नहीं पड़ता है। वैज्ञानिक जड़ संरचना, सापेक्ष जल सामग्री और आसमाजिटक क्षमता के आनुवंशिक विश्लेषण पर काम कर रहे हैं। उपज में योगदान देने वाले लक्षणों पर ध्यान देने की आवश्यकता है जो अत्यधिक आनुवांशिक है और सुखे की स्थिति में अनाज की उपज को प्रभावित करते हैं, लेकिन मापने की उनकी व्यवहार्यता के आधार पर इष्टतम् स्थितियों में नहीं। फिर भी, वे पानी–सीमित कृषि प्रणालियों में उपज के लिए वयापक अर्थों में आनुवंशिता प्रदर्शित करते हैं और अक्सर अनाज की उपज के साथ कोई बातचीत नहीं करते हैं। जब पौधे सुखे के तनाव के अधीन होते हैं, तो सबसे महत्वपूर्ण कारक जो ऐसी परिस्थितियों में सबसे पहले दिखाई देता है वह है, जल उपयोग दक्षता में बाधा, जो कि किस्मों के लिए भिन्न होता है। इसलिए, कुछ जीनोटाइप और कस्में, जो सुखे के प्रति संवेदनशील होती है, और पर्यावरणीय परिस्थितियों के साथ तालमेल विठाने मे असमर्थ होती हैं, कम जल उपोग दक्षता का कारण बनती है। इसलिए, प्रजनन पद्धति के माध्यम् से, उपयोग किये गए जल की प्रति इकाई बायोमास में टिकाऊ फसल उत्पादन के लिए जल उपयोग दक्षता को बढ़ाया जा सकता है।

लक्षणों की अनुवांशिक परिवर्तनशीलता के माध्यम् से फसल की प्रजातियों में सुखा का प्रतिरोध प्रत्यक्ष या अप्रत्यक्ष रूप से प्रेरित होता है और इस प्रकार प्रजनन में चयन के माध्यम् से इसमें सुधार की क्षमता होती है। मार्कर सहायता प्राप्त चयन (एमएएस) और जीनोमिक चयन (जीएस) सहायता प्राप्त प्रजनन के दो मुख्य दृष्टिकोण है। पूर्व दृष्टिकोण के लिए, एक प्रारंभिक चयन की रूचि के लक्षण से जुड़े आणविक मार्करों की पहचान करना है, जो प्रजनन के कार्यक्रमों में चयन के लिये पूर्वापेक्षा है। हालांकि, जीएस पूरे जीनोम पर मौजूद अनुवंशिक मार्करों के आधार पर चयन मॉडल की प्रगति और फेनोटाइपिंग प्रशिक्षण की आबादी के माध्यम् से प्रजनन की आबादी में जीनोम अनुमानित प्रजनन मूल्यों (जीईबीवी) के चयन पर निर्भर करता है। एमएसस कुछ दशकों में कई फसल प्रजनन कार्यक्रमों का एक महत्वपूर्ण हिस्सा है। एमएएस मे आणविक मार्कर शामिल होते हैं जो मात्रात्मक विशेषता विशेष क्यूटीएल या विशिष्ट जीन के करीब मैप करते हैं जो विशेष लक्ष्य की विशेषता से जुड़े होते हैं और वांछित एलील वाले व्यक्ति की पहचान करने के लिए इस्तेमाल किये जा सकते हैं। क्यूटीएल मैपिंग या जीनोम–वाइउ एसोसिएशन के दृष्टिकोण का उपयोग सटीक विश्वसनीय विशेषता का मूल्यांकन और घने आणविक मार्करों के माध्यम् से मार्कर विशेषता एसोसियेशन का चयन करने के लिए किया जाता है। इन विधियों के माध्यम् से विभिन्न फसलों में सुखा प्रतिरोध से जुड़े लक्षणों के लिए क्यूटीएल की पहचान की जाती है, जैसे गेहूँ, मक्का, ज्वार, धान, सोयाबीन, बाजरा और कई अन्य फसलें।

2. आणविक और जीनोमिक परिप्रेक्ष्य : जल तलाब के नाकारात्मक प्रभावों को कम करने के लिए प्रक्रियाओं के प्रेरण में शामिल जैव रासायनिक और आणविक कारकों में प्रतिलेखन, तनाव प्रतिक्रियाशील जीन (तालिक–1) और एब्सिसिक एसिड शामिल है। सुखे की कमी के प्रति बढ़ी हुई सहनशीलता के साथ–साथ, प्रजनन कार्यक्रम विभिन्न तनाव प्रतिक्रियाशील जीनों की ट्रांसजेनिक अभिव्यक्ति के माध्यम् से अन्य तनावों को नियंत्रण में रखने की भी रूचि रखते हैं। हालांकि, इन जीनों की बढ़ी हुई अभिव्यक्ति अक्सर पौधे की वृद्धि दर में मंदी से जुड़ी होती है, इससे इसका व्यवहारिक उपयोग कम हो सकता है। इस प्रकार, सूखा प्रतिरोध के आणविक और आनुवांशिक आधारों पर अभी भी इन परिस्थितियों से सफलतापूर्वक निपटने के लिए ध्यान देने की आवश्यकता है। इस अर्थ में जीनोमिक और संबंधित तकनीकी उपकरण उन जीनों को उजागार कर सकते है। तनाव–सहिष्णु जीनों का आण्विक स्तर क्रॉस–टॉक मात्रात्मक लोकी के लक्षणों में होता है जो उनकी परस्पर क्रिया और तनाव से संबंधित जीनों की क्लोनिंग को दर्शाता है। सामान्य तौर पर यह स्वीकार किया जाता है कि मार्कर मूल्यांकन, आणविक और पारंपरिक प्रजनन के माध्यम् से चयन का संयोजन एक एकीकृत दृष्टिकोण के रूप में पौधों की आनुवंशिक इंजीनियरिंग में अजैविक तनाव सहिष्णुता में सुधार के लिये सबसे अच्छा विकल्प है।

तालिका–1 : पौधों में सहनशीलता के लिए जिम्मेदार जीन

क्रं.सं	मेजवान पौधा	जिम्मेदार जीन	विशेषताएँ
1	गेहूँ	टी.ए.एन.ए.सी.–69	सुखे के प्रति सहनशीलता में वृद्धि।
2	मक्का	एन.एफ.–वाईबी–2	सुखे के दौरान यह उपज और प्रकाश–संश्लेषण दर को बढ़ाता है।
3	धान	एपी–37 और ओ.एस.एन.एसी.–10	सुखा सहनशीलता और अनाज की उपज में वृद्धि।
4	सोयाबीन	पी–5, सी–5	सुखा सहनशीलता में सुधार।
5	गन्ना	सोडईएफएफ–3	सुखे के प्रति सहनशीलता वृद्धि
6	तंबाकू	एचएसपी–70–1	सुखा तनाव के प्रति सहनशीलता तंत्र में वृद्धि।

स्त्रोत : अनेक वैज्ञानिकों के अन्वेषणों के आधार पर।

सुखा–प्रतिरोध प्रेरण

पौधों के सुखे की तनाव के प्रतिकूल प्रभावों को कम करने के लिये विभिन्न तरीकों और रणनीतियों को अपनाते हैं। कृषक भी सूखा सहनशीलता के लिए विभिन्न रणनीतियों का उपयोग कर रहे हैं, जिनमें से विभिन्न पौधों के वृद्धि की अवस्थाओं में सुखा प्रतिरोध को बढ़ाने के लिए बहिर्जात नियामकों, रसायनों, सिंथेटिक हार्मोन और यौगिकों का उपयोग अत्यन्त उपयोगी है।

1. बीज प्राइमिंग : पौधों के सुखे के प्रतिकूल प्रभाव को कम करने के लिये बीज प्राइमिंग को सबसे महतवपूर्ण अल्पकालिक दृष्टिकोण के रूप में संदर्भित किया गया है (तालिका–2)। इसे पूर्व–बुवाई तकनीक का उद्देश्य बीज की चयापचय मशीनरी में अंकुरण प्रक्रिया शुरू करना और प्रक्रिया के दौरान मूलांकर के उभरने के बिना बीज को मूलांकुर के उभार के लिये तैयार करना है। प्राइम बीजों की अंकुरण प्रक्रिया अधिक कुशल होती है, जिसके परिणामरूवरूप गैर–प्राइम्ड बीजों की तुलना में उच्च अंकुरण दर और एकरूपता होती है। गेहूँ, मक्का और चना जैसी फसलों में बीज प्राइमिंग का उपयोग सुखे के तनाव के प्रतिकूल प्रभाव को कम करने के लिये किया जाता है। हाल ही में एरोबिक परिस्थितियों में उगाये गये धान में सीधे बोये गये धान (डीएसआर) पानी की कमी की स्थिति में, डीएसआर के लिए विभिन्न ऑस्मोटिका का उपयोग किया गया, जिसके परिणामस्वरूप कैल्सियम हाइड्रोजन फास्फेट (CaHPo4) और पोटैशियम क्लोराइड (KCL) ऑक्सोप्राइमिंग ने फसल की उपज और उत्पादकता में वृद्धि की। पानी की कमी वाले क्षेत्रों में प्राइम्ड बीजों में बेहतर अंकुरण और स्थिरता देखे गये। इष्टतम् स्थिरता के साथ बेहतर उपज, सुखे को झेलने की क्षमता, शीघ्र और समन्वित अंकुरण के बाद उगे हुए बीज पाइमिंग से जुड़े हुये है। यह बताया गया है कि प्राइम्ड बीज ने पानी की कमी की स्थिति में गैर प्राइम्ड बीजों की तुलना में गेहूँ की फसल में जल उपयोग दक्षता को 44 प्रतिशत तक बढ़ाया। जल्दी उगे हुये बीज और पुष्पन के साथ अधिकत्तम उत्पादन के परिणामस्परूप पानी के सीमित वातावरण में प्राइम्ड बीज अनुकूल हुये।

तालिका–2 : बीज प्राइमिंग उपचार के माध्यम् से विभिन्न क्षेत्र के फसलों में सहिष्णुता तंत्र

क्रं. सं	प्राइमिंग विधि	फसल	सुरक्षात्मक प्रभाव
1	कैल्शियम क्लोराइड हाइड्रो और ऑस्मोप्राइमिंग	धान	फिनोल, फालोवनोइड संचय, एंटीऑक्सीडेंट प्रणाली और स्थायी स्थापना को बढ़ाता है।
	संगल न्यूल्लियोटाइड पॉलीमॉर्फिज–ऑक्मोप्राइमिंग		स्गत विलेय संचयन से प्रतिबंधित कार्य क्षमता (RWC), प्रकाश संश्लेषण क्षमता, झिल्ली स्थिरता और एंटीऑक्सीडेंट एंजाइम में वृद्धि होती है।
2	खेत पर प्राइमिंग	मक्का	अंकूरण के लिए इष्टतम् तापमान बनाये रखता है और कम समय में उगता है।
3	हाइड्रोप्राइमिंग और आणविक प्राइमिंग	कैनमोला पौधे	अंकुरण में वृद्धि, मूल प्ररोह अनुपात और अंकुरण में वृद्धि, ऑक्सीडेटिव तनाव के प्रति सहनशीलता उत्पन्न करना।
4	नाइट्रिक अम्ल प्राइमिंग	सोयाबीन	प्रति पौधे अनाज और फलियों की संख्या में वृद्धि
5	हाइड्रोप्राइमिंग	कपास	बीज की शक्ति और अंकूरण में वृद्धि और मूलक के उद्भव के लिए तापीय समय में कमी
	जैव और ऑस्मोप्राइमिंग		फिनोल, क्लोरोफिल सामग्री, अनाज, उपज और गुणवत्ता में वृद्धि
5	ऑस्मोप्राइमिंग	सूरजमुखी	कैटलेज संश्लेषण और इम्यूनोसा इटोलोकलाइजेशन में वृद्धि
6	आसोप्राइमिंग	गेहूँ	प्रतिबंधित कार्य क्षमता को बनाये रखता है, प्रोलाइन संचय, क्लोरोफिल सामग्री और पत्तियों के उभरने को बढ़ाता है।

2. पादप वृद्धि नियामक : प्राकृतिक और सिथेटिक प्लांट ग्रोथ रेगुलेटर (तालिका–3) के प्रयोग में सुखा सहनशीलता में सुधार हो सकता है। पानी की कमी के कारण पौधों में हाइपोकोटिल की लम्बाई और वजन में कमी को जिबरेलिक एसिड (जीए) के प्रयोग से कम किया जा सकता है, जो सुखा प्रभावित पौधों में आंशिक जल संतुलन और प्रोटीन संश्लेषण को बनाये रखने में मदद करता है। जीए के प्रयोग के बाद पानी की कमी वाले क्षेत्रों में गेहूँ, कपास और मक्का में रंध्र चालकता के साथ ही प्रकाश–संश्लेषण और श्वसन दर में वृद्धि हुई और इसके परिणामस्वरूप उन उपचारों की तुलना में अनाज की पैदावार अधिक हुई, जहाँ जीए का प्रयोग नहीं किया गया था। एब्सिसिक एसीड, युनिकोनाजोल, ब्रेसिनोलाइड और जैस्मोनिक एसिड का बाह्य प्रयोग भी सुखे के तहत फसल उत्पादकता में सुधार कर सकता है। एक अन्य सक्रिय साइटोकाइमिन और बेजाइलाडेनिन, एक हार्मोन है जो मक्का, गेहूँ, कपास, चना, जौ और धान सहित विभिन्न पौधों में सुखा प्रतिरोध तंत्र को नियंत्रित करता है। घुलनशील चीनी, घुलनशील प्रोटीन सामग्री और पत्तियों में सुपर ऑक्साइड डिसम्यूटेज, पेरोक्सीडेज और कैटालेज की गतिविधियों को सुखे के तनाव की स्थिति में यूनिकोनाजोल और ब्रेसिनोलोइड के द्वारा बढ़ाया गया था।

तालिका–3 : विभिन्न क्षेत्र के फसलों में फाइटोहार्मोन्स के माध्यम् से सुखे के प्रति सहनशीलता तंत्र में वृद्धि

क्रं. सं.	मेजवान पौधे	फाइटोहॉर्मोन	तंत्र	डपज की गतिशीलता
1	आलू	ऑक्सिन	आरओएस और जल की हानि में कमी।	10 प्रतिशत की वृद्धि
		जैस्मोनिक एसिड (JA)	जड़ और टहनियों की लम्बाई बढ़ी, पानी की हानि कम हुई, पौधों की सुरक्षा और ऑक्सीडेटिव तनाव में बदलाव आया।	
2	सोयाबीन	एब्सिसिक एसिड (एबीए)	तनाव जीन नियंत्रित हुए, प्रोलाइन और एंटीऑक्सीडेंट एजाइम की गतिविधि बढ़ी और रंध्र के आकार में कमी आई।	21 प्रतिशत उपज में वृद्धि

3	धान	जिबरेलिक एसिड (GA)	अधिकत्तम WVE, प्रकाश संश्लेषण, APX, CAT, प्रोलाइन सामग्री, विस्तारीत जड़े और बौने पौधे	10–30 प्रतिशत वृद्धि
4	कपास	आबा	एसओडी, सीएटी, क्लोरोफिल और प्रोलाइन में वृद्धि	46 प्रतिशत वृद्धि
5	धान	आबा	लंबी जड़े, रंध्रघनत्व, आकार और पत्ती क्षेत्र में कमी, जबकि एबीए, प्रोलाइन, घुलनशील शर्करा और एसओडी में वृद्धि	16 प्रतिशत वृद्धि
6	मक्का	आबा	एबीए संचय और सुखा सहिष्णुता में वृद्धि	बढ़ा हुआ
7	जौ	साइटोकाइनिक	ट्रांसजेनिक जौ के पौधों ने बेहतर निर्जलीकरण परिहार के माध्यम् से बेहतर सुखा सहिष्णुता दिखना	बढ़ा हुआ
8	टमाटर	जिक्रेरियक एसिड (GA)	पूरे पौधों में वाष्पोत्सर्जन कम होना, रंध्र छिद्र छोटे और पौधे छोटे होना	बढ़ा हुआ

स्त्रोत : वैज्ञानिक के अध्ययन के आधार पर संक्रमित

संक्षिप्त रूप :
WVE : जल उपयोग दक्षता
APX : एस्कॉर्विट पेरोक्सीडेज
CAT : कैटालेज
SOD : सुपर ऑक्सीडेज डिसम्यूटेज
ROS : रिएक्टिव ऑक्सीजन स्पीशीज

सैलिसिक एसिड एक वर्हिजात रूप से लागु पदार्थ भी सुखा सहिष्णुता में सुधार करता है और पानी की कमी के तहत पौधों की वृद्धि और अंतिम (परिपक्व अवधि) फसल को बढ़ाता है। पानी की कमी की स्थिति में सैलिसिक एसिड के प्रयोग के माध्यम् से गेहूँ की कैटाज गतिविधि में वृद्धि देखी गई। पर्ण और बीज उपचार के प्रयोगों में सलिसिलिक एसिड और इसके व्युत्पन्न का उपयोग सूखे के तनाव के अधीन गेहूँ की फसल में सुखा सहिष्णुता तंत्र में वृद्धि करता है। शोध से पता चलता है कि गेहूँ में सैलिसिलिक एसिड के प्रयोग ने अप्रत्यक्ष रूप से एब्सिसिक एसिड की सामग्री में वृद्धि के माध्यम् से प्रोलाइन के संचय को बढ़ा दिया। मक्का में, सुखे के तनाव की स्थिति में पॉलीमाइन सामग्री बढ़ जाती है। यह तनावग्रस्त पौधों में प्रतिक्रियाशील ऑक्सीजन प्रजातियों (आरओएस) के उत्पादन को भी नियंत्रित करता है और आरओएस अपमार्जन के असंतुलन से ऑक्सीडेटिव विस्फोट होते हैं, जिनका पौधों पर प्रतिकूल प्रभाव पड़ता है।

3. ऑस्मोप्रोटेक्टेंस : पौधों के तनाव की कई श्रेणियां, जो पौधों की वृद्धि और उत्पादकता को कम करती है, उन्हे ऑस्मोप्रोटेक्टेंस सिग्नलिंग के द्वारा नियंत्रित किया जाता है (तालिका–4)। ये पदार्थ उस समय जमा होते हैं, जब बढ़ती परिस्थितियां पौधों की वृद्धि और विकास के लिये उपयुक्त नहीं होती है और आंतरिक शारीरिक प्रक्रियाओं को बनाये रखने के लिये जिम्मेदार होते है जो पानी की कमी जैसी इष्टतम् स्थितियों के तहत पौधों के अस्तित्व को सुनिश्चित करते हैं। अन्य अतिरिक्त, पानी के तनाव के अधीन पौधों में महत्वपूर्ण ऑस्मोप्रोटेक्टेंट्स में प्रोलाइन, ट्रेहलोस, मैनिटोल और ग्लाइसिनवेटाइन शामिल है। ये यौगिक, आमतौर पर बीज उपचार के लिये उपयोग किये जाते है अथवा स्थापित फसलों के विभिन्न विकास के चरणों में वाह्य के रूप से लागू होते हैं। उप कोशिकीय संरचना की रक्षा करते हैं। अंत में स्पर्मिडाइन जैसे पॉलीमाइन्स का उपयोग जौ और गेहूँ जैसी फसलों में पानी के तनाव के प्रति पौधों की सहनशीलता बढ़ाने के लिए भी कुशल साबित हुआ है।

तालिका–4 : विभिन्न पोधों की प्रजातियों में सुखा सहिष्णुता तंत्र में ऑस्मोप्रोटेक्टेंस का महत्व

क्रं.सं.	ऑस्मोलाइटस	पौधे	पौधे का तंत्र
1	ग्लाइसिन	मक्का	प्रकाश संश्लेषण दक्षता रखरखाव, थैलाकॉइड
2	बीटाइन	धान, जौ	झिल्ली संरचना और आसमाटिक समायोजन
3	जीए और एबीए	तम्बाकू	तनाव सहनशीलता, आरओएस की सफाई और कार्बन–नाइट्रोजन संतुलन में सुधार
4	फ्रक्टेन	मीठे चुकन्दर	आरओएस स्कोबंजर, प्रोटीन और झिल्ली स्थिरीकरण एवं आसमाटिक समयोजन
5	मैनिटोल	मक्का	तनाव को दूर करें, ऑक्सीजन रेडिकल्स और आसमाटिक समायोजन को प्रेरित करना
6	डी–ओनोनिटॉल	अरेबिडोप्सिस	पौधों में पानी की हानि को रोकना

स्त्रोत : वैज्ञानिक के अध्ययन के अनुसार।
आरओएस (ROS) : प्रतिक्रियाशील ऑक्सीजन प्रजातियां

4. सिलिकॉन (पृथ्वी पर प्रचुर मात्रा में पाया जाने वाला तत्व) : पृथ्वी की सतह पर सबसे प्रचुर मात्रा में पाया जाने वाला तत्व, सिलिकॉन, पौधों की प्रतिरोधक क्षमता (तालिका–5) को तनाव के विभिन्न स्तरों और तनाव ग्रस्त एवं गैर–तनाव ग्रस्त दोनों पौधों को समग्र यांत्रिक शक्ति को बढ़ाने के लिए खनिज पोषक तत्व के रूप में इस्तेमाल किया जा सकता है। इसके अलावा, सिलिकॉन के वाह्य प्रयोग ने ज्वार और सुरजमुखी में सापेक्ष जल सामग्री को बढ़ाने की क्षमता का प्रदर्शन किया है। इसके अतिरिक्त बिना निषेचित नियंत्रण की तुलना में सिलिकॉन के साथ लागु गेहूँ के पौधों ने न केवल उच्च सापेक्ष जल सामग्री को बनाये रखा, बल्कि जल तनाव की स्थिति के सम्पर्क में आने पर तना के शुष्क पदार्थ में भी वृद्धि की। इस प्रकार, सिलिकॉन के प्रयोग से जड़ विकास के माध्यम् से तना से जड़ के अनुपात को कम कर दिया।

तालिका–5 : सिलिकॉन एंटीऑक्सीडेंट गतिविधि को सक्रिय करता है और पौधों की सुखा सहनशीलता तंत्र में सुधार करता है।

क्रं.सं.	फसल का पौधा	गतिविधि
1	टमाटर	सीएटी, एसओडी और जीआर गतिविधि में वृद्धि हुई।
2	टमाटर	सीएटी और एसओडी गतिविधि में वृद्धि, जबकि पीओडी गतिविधि में कमी।

3	गेहूँ	सीएटी, एसओडी और जीआर गतिविधि में वृद्धि।
4	सुरजमुखी	एपीएक्स और एमडीए गतिविधि में कमी।
5	गेहूँ	एस्कॉर्विट सामग्री में वृद्धि।

संक्षिप्त रूप : CAT : कैटेनालेज, **SOD :** सुपरऑक्सीडेज डिसम्यूटेज, **GR :** ग्लूटाथियोन रिडक्टेस, **POD :** पेरोक्सीडेज, **APX :** एस्कार्विट पेरोक्सीडेज, **MDA :** मैलेनडायल्डिहाइड।

5. एंटीऑक्सीडेंट प्रोटेक्टेंट के रूप में सेलेमियम : पानी के तनाव की कमी से प्रभावित पौधे आरओएस उत्पन्न करते है जो कार्बोहाइड्रेड, प्रोटीन, लिपिड और न्यूक्लिक एसिड जैसे जैव अणुओं को ऑक्सीडेटिव नुकसान पहुँचा सकते है और इसलिए पौधों के प्रकाश संश्लेषण, श्वसन और विकास को कम करते हैं। सेलेनियम के प्रयोग से पानी की कमी के तहत उगाये गये पौधों में संगत विलय हो सकते है और इस प्रकार पौधों में ऑक्सीडेटिव तनाव कम हो सकता है। पौधों के सेलुलर निर्जलीकरण इन ऑस्मोलाइट्स के संचय के माध्यम् से कम हो जाता है। पौधों में सेलेनियम प्रयोग के तहत आरओएस एंजाइमों का उत्पादन करने वाले ऑक्सीडेटिव तनाव संरक्षण के परिणामस्वरूप पौधों में जीर्णता उत्तेजीत होती है। पौधों में संलेनियम प्रयोग के माध्यम् से सुरक्षात्मक एंजाइमेटिक गतिविधियां भी सक्रिय होती है। पौधों में इसका उपयोग झिल्ली के क्षरण को कम कर सकता है और आर.ओ.एस. एंजाइम की गतिविधि को बढ़ा सकता है। इसके अतिरिक्त सिलेनियम का उपयोग पौधों की वृद्धि की बढ़ा सकता है। ऑक्सीडेटिव तनाव से होने वाले नुकसान को कम कर सकता है। प्रकाश तनाव के तहत ऑक्सीडेटिव तनाव को बढ़ा सकता है और सुखे के तनाव को सहन करने के लिये पौधों के जल संतुलन को नियंत्रित कर सकता है।

6. पोटेशियम (एक महत्वपूर्ण नियामक) : सुखे के तनाव की स्थिति में पोटेशियम का प्रयोग पानी की कमी के प्रतिकूल प्रभाव (तालिका–6) को कम करता है और पौधों की उतपादकता को बनाये रखता है। सुखे के तनाव की स्थिति में, पौधे अपने आंतरिक नियामक तंत्र के लिये अधिक पोटेशियम ग्रहण करते हैं। पौधों के द्वारा पोटेशियम की वृद्धि ऑक्सीडेटिव क्षति का कारण बनती है और इसलिए प्रकाश–संश्लेषण प्रक्रिया के दौरान आरओएस बना सकती है। इस प्रकार, तनाव के तहत उगायें गये पौधों के द्वारा पोटेशियम की उच्च मांग का कारण प्रकाश संश्लेषण प्रक्रिया के दौरान कार्बन डाइऑक्साइड निर्धारण को बनाये रखना है। पौधे के तनाव के तहत् पौधों में आर.ओ.एस. की वृद्धि कार्बन डाइऑक्साइड में कमी के कारण हो सकती है। जब पौधों को पानी की कमी की स्थिति में उगाया गया तो प्रकाश संश्लेषण प्रक्रिया खराब हो गई और आरओएस उत्पादन के माध्यम् से कार्बोहाइड्रेड चयापचय भी प्रभावित हुआ। यह भी देखा गया है कि पानी की कमी वाली पारिस्थितियों में उगाई जाने वाली फसलों की कम उपज को पोटेशियम के प्रयोग से बढ़ाया जा सकता है। मिट्टी सुधारक या पत्तियों पर पोटेशियम का प्रयोग पौधों की इष्टतम् शारीरिक प्रक्रियाओं के लिये लाभदायक है। परिणामस्वरूप, वर्षा और/या पानी की कमी वाले वातावरण में उगाई जाने वाली फसलों की इष्टतम् उपज प्राप्त करने के लिये पोटेशियम का प्रयोग अत्यनत महत्वपूर्ण है।

तालिका–6 : पोटेशियम का प्रयोग जल की कमी से प्रभावित पौधों पर पड़ने वाले प्रतिकूल प्रभावों को कम करता है।

क्रं. सं.	पादप प्रजाति	जल तनाव स्तर और समय	पोटेशियम का दर	लाभ
1	गेहूँ	पीईजी @15% अनाज भरने के समय	10 मि.ग्रा. K20	प्रोलाइन सामग्री, वलोरोफिल ए, बी और कैरोटीनॉयड में वृद्धि।
2	सुर्यमुखी	सिंचाई सेकना	100 कि.ग्रा./हे0	प्ररोह शुष्क पदार्थ और जैवभार में वृद्धि।
3	धान	10 दिनों के लिए डीएपी	120 कि.ग्रा./हे0	प्ररोह शुष्क पदार्थ में वृद्धि और ऑस्मोलाइट संश्लेषण में वृद्धि।
4	मक्का	एफसी जल धारण का 65 प्रतिशत	0.42 ग्रा./कि.ग्रा. मिट्टी	K^+, ग्लाइसिन, बीटाइन और ऑस्मोटिक नाइट्रोइड संचय में वृद्धि।
5	जौ	मिट्टी की नमी का 50 प्रतिशत	10 मि.ग्रा. K_2CO_3	पौधों में घुलनशील कार्बोहाइड्रेड की कमी और K की वृद्धि।

7. पादप सूक्ष्मजीव क्रॉसटॉक : सूक्ष्मजीव सुखे के तनाव के प्रतिकूल प्रभावों को कम करने में भी महत्वपूर्ण भूमिका निभाते है (तालिका–7) और इस तरह पौधों की उत्पादकता में सुधार करते हैं। विभिन्न पर्यावरणीय तनावों के तहत उगाये गये पौधों में ऑक्सीडेटिव क्षति को सूक्ष्मजीवों के माध्यम् से कम किया जा सकता है और फसल को सुखे की स्थिति का सामना करने में सखम बनाया जा सकता है। उनमें से, पौधों की वृद्धि को बढ़ावा देने वाले राइजोबैक्टीरिया (पीजीपीआर) शुष्क वातावरण में सुखे के तनाव के प्रभाव को कम करने के लिए जिम्मेदार है। पौधों में पीजीपीआर का टीका लगाने से उन फसलों की सुखा सहिष्णुता बढ़ सकती है, क्योंकि ये पीजीपीआर जड़ क्षेत्रों में कौलोनियां बनाते है और विभिन्न सूक्ष्म पोषक तत्वों को घुलनशील भी कर सकते हैं, ताकि उन्हे पौधे के अवशोषण के लिए उपलब्ध कराया जा सके। बैसिलस प्रजातियां ऐसे विलेय एकत्र करती है जो मक्के के पौधों को सूखे से निपटने और क्षय को रोकने में सक्षम बनाते है। धान के पौधे में, जैविक और अजैविक तनावों को फिलोस्फीयर वैक्टीरिया के टीकाकरण के माध्यम् से कम किया गया। बैसिलस एमाइलोलिकेफेसिएनत, एजोस्पिरिलम ब्रासिलेंस, राइजोबियम लेग्यूमिनोसारम, मेसोराइजोवियम सिसेरो बैक्टीरिया प्रजातियों के टीकाकरण से पौधों में होमियोस्टेसिस में सुधार हुआ और वृद्धि व बायोमास के साथ–साथ सुखा सहिष्णुता सूचकांक में वृद्धि हुई। इसी प्रकार ट्राइकोडर्मा प्रजाति को सुखा तनाव के लिए लाभकारी बताया गया, विशेष रूप से ट्राइकोडर्मा हैरिजियम को धान की सुखा सहिष्णुता के लिए एक लाभकारी प्रयोग माना गया है।

तालिका–7 : सुखे के तनाव को कम करने के लिए पौधों के अनुकूली तंत्र पर सुक्ष्मजीवों का प्रभाव

क्रं. सं.	प्रजाति/पौधों का नाम	रोगणुओं	गतिविधि
1	मक्का	एजोस्पिरिलम लिपोफेरम	घुलनशील शर्करा, मुक्त अमीनो अम्ल और प्रोलाइन के संचयन को बढ़ावा। जड़ की लम्बाई, नये अंकुर का भार, सुखे अंकूर का भार, जड़ का ताजा भार और सुखी जड़ की वृद्धि को प्रभावित करना।
2	मक्का	बैसिलस एसपीपी	प्रोलाइन, शर्करा, मुक्त अमीनो अम्ल का संचयन बढ़ाता है और इलेक्ट्रोलाइट रिसाव को कम करता है। यह एंटीआक्सीडेंट एंजाइम कैटालेज, ग्लूटाथियोन, पेरोक्सीडेज की गतिविधि को भी कम करता है।
3	सूरजमुखी	स्यूडोमोनासपुटिडा स्ट्रेन GAP-P45	एपॉक्सी पॉलीसेकेराइड उत्पादन
4	कैप्सिकम एनम	बैसिलस लाइकेफॉर्मिस स्ट्रेन K19	तनाव से संबंधित जीन और प्रोटीन
5	धान	ट्राइकोडर्मा हार्जियानम	जल की स्थिति से स्वतंत्र जड़ विकास को बढावा देना और सुखे की प्रतिक्रिया में देरी करना।
6	फेजोलस बल्गेरिस	राइजोवियम ट्रोपिकी और पैनीवैसिलस पॉलीमीक्सा	तनाव सहनशीलता में शामिल जीनों का अपरेगुलेशन।
7	मेडिकागो टंकैटुला	सिनोरहिजोवियम मेडिका	सुखे के तनाव के दौरान जड़ों में गाठें बनना और पीषक तत्वों का अधिग्रण।
8	गेहूँ	वैसिलस एमाइलोलिकफेसिएस 5113	जीवाणु मध्यस्तता वाले पौधे ने प्रतिलेख स्तर को क्षीण कर दिया और होमियोस्टेसिस में सुधार किया।

8. हाइड्रोजल (एक जल अवशोषित करने वाला बहुलक) : हाइड्रोजल एक बहुलक है और कृषि प्रणालियों के अंतर्गत मिट्टी में इसका प्रयोग लगातार सिंचाई की आवश्यकता को कम कर सकता है। पौधे शुष्क और अर्धशुष्क वातावरण में हाइड्रोजल कंडीशनिंग (वातावरण) के माध्यम् से जीवित रह सकते है और अपना जीवन–चक्र बनाये रख सकते हैं। जहॉ पानी की कमी एक गंभीर समस्या है। पानी की सीमा वर्षा की घटना से पूर्त्ति नहीं होती है और इसलिए मिट्टी के क्षरण को दूर करने के लिए उपलब्ध मिट्टी की नमी को नुकसान और क्षति से बचाने की मांग है। हाइड्रोजल मिट्टी संशोधन के कारण, मिट्टी के भौतिक, रासायनिक और जैविक लक्षण पौधे की वृद्धि और विकास पर सकारात्मक प्रभाव के साथ बढ़ जाते हैं। मिट्टी में इसके प्रयोग के माध्यम् से, यह सुखे के तनाव के तहत पौधे के जीवित रहने के समय को बढ़ाता है। इसलिए मिट्टी में इसका प्रयोग, विशेष रूप से शुष्क और अर्धशुष्क वातावरणों और सूखा प्रभावित क्षेत्रों में राइजोस्फीयर मे जल संरक्षण के लिए लाभदायक है। इसके अतिरिक्त पॉलिमर संशोधित मिट्टी की द्रव चालित चालकता समतल मिट्टी की तुलना में कम होती है। इसी प्रकार पॉलिमर संशोधित मिट्टी में वाष्पीकरण के माध्यम् से जल की हानि, बिना हाइड्रोजल संशोधन वाली मिट्टी की तुलना में कम थी।

9. नैनोकण (सुखे के तनाव से निपटना) : नैनोकणों (एनपी) की विशेषता इसके कण का आकार, टयूनेबल छिद्र का आकार, संभावित प्रतिक्रियाशीलता और उच्च सतह क्षेत्रफल है। पौधों में सेलुलर और्गेन को लक्षित किया जाता है और कुछ सामग्री नैनोकण लक्ष्य के माध्यम् से जारी की जाती है। एंटीऑक्सीडेंट एंजाइमों यानी एसओडी, कैट और पीओडी की गतिविधि को नैनोकणों के प्रयोग के द्वारा विनियमित और बढ़ाया गया (तालिका–8)। उदाहरण के लिए, पौधों में एसओडी की गतिविधि टी.आई.ओ. और एन.पी.एस. के प्रयोग के द्वारा बढ़ गई थी। कृषि में विभिन्न सूक्ष्म तत्वों और एनपी के उनके आक्साईड का उपयोग विभिन्न पौधों में सुखा तनाव प्रतिरोध को बढ़ाने के लिए किया गया था। जब एनपी जैसे सिलिका और जिंक नैनोकणों को लागू किया गया तो विभिन्न पौधों की प्रजातियों में विकास, वृद्धि और जैव रासायनिक लक्षण जैसे प्रोलाइन, क्लोरोफिल, कार्बोहाइड्रेट, कैरोटीनॉयड और साफेक्ष जल सामग्री में काफी सुधार हुआ। सिलिकन डाइऑक्साइड नैनोकण ने गेहूँ के पौधों में सुखा प्रतिरोध भी पाया गया। इसी तरह, पौधों में लवणता और सुखे तनाव को भी जिंकऑक्साइड नैनोकणों के प्रयोग के द्वारा कम किया गया। विकास के शुरूआती चरण के दौरान जिंकऑक्साइड नैनोकण के प्रयोग ने पौधो के लिए बीज भंडार को उत्तेजित किया और पौधों में सुखा प्रतिरोध को बढ़ाया। जिंक के साथ संयोजन में फेरस का भी सुखा तनाव के प्रति पौधे के प्रतिरोध पर लाभकारी प्रभाव बताया गया है।

तालिका–8 : नैनोकणों के प्रयोग के माध्यम् से पौधों में सुखा तनाव सहनशीलता में वृद्धि।

क्रं. सं.	नैनोकण	तंत्र
1	लोहा	कुसुम की उपज के घटकों और तेल के प्रतिशत पर सुखे के तनाव के प्रभाव को लौह नैनोकणों (Fe-NPs) के पर्णीय छिड़काव के माध्यम् से कम किया गया।
2	सिलिका	Si-NPs ने पौधों में सुखा तनाव सहनशीलता को बढ़ाई।
3	टाइटेनियम	टाइटेनियम के पर्णिय छिड़काव के माध्यम् से गेहूँ बीज के ग्लूटेन और स्टार्च की मात्रा में सुधार किया।
4	थायोल–गेटेड मेसोपोस सिलिकि	कैप्सुलेटेड एबीए रिलीज को नियंत्रित किया गया जो एटीजीएलके 2 जीन को बढ़ाता है जिससे एराबिडोप्सिस के पौधों में सुखा प्रतिरोध में सुधार हुआ।
5	जिंक ऑक्साईड	$ZnOPN_5$ के प्रयोग से सोयाबीन की अंकुरण दर और प्रतिशत में सुधार हुआ।

6	जास्ता और तांबा	Zn और CuNPs प्रयोगों की उपस्थिति में पानी की कमी के तहत एंटीऑक्सीडेंट एंजाइम और RWC में वृद्धि के साथ MDA के संचयन में कमी आई।

***Fe-NPs** = फेरसऑक्साईड नैनोकण, **Si-NPs** = सिलिकन ऑक्साइड नैनोकन, **ZnOPN$_5$** = जिंकऑक्साइड नैनोकण, **Cu NPs** = कॉपर ऑक्साईउ नैनोकन, **AtGols** = गैलेक्टिनॉल सिंथेज

10. मेटावोलिक इंजीनियरिंग और तनाव सहनशीलता की रणनीति : सुखे के तनाव से निपटने के लिए सबसे इष्टतम् संसाधनों में से एक सुखा सहिष्णु फसलों का विकास है। इस प्रकार फसल की उपज पर महत्वपूर्ण प्रभाव डाले बिना सुखा सहिष्णुता को बढ़ाना एक बड़ी चुनौती है। चयापचय इंजीनियरिंग के माध्यम् से पौधों में सुखा सहिष्णुता प्रेरण, जिससे तनाव संबंधी चयापचयों में वृद्धि होनी है, इसे एक महत्वपूर्ण रणनीति माना जाता है। शुष्क और अर्धशुष्क क्षेत्रों में रैफिनोज जैव संश्लेषण इंजीनियरिंग मार्ग के माध्यम् से सुखा सहिष्णुता के लिए सफल प्रजनन क्लासिक रणनीतियों में से एक है। पानी की कमी के तहत उगाये गये पौधों में रैफिनोज और गैलेक्टिनॉल का संचय गैलेक्टिनॉल सिंथेज (At Gol S_2) जीन के माध्यम् से उत्तेजित होता है जिसमें विशिष्ट जीन At Gol S_2 होता है जो विशेष रूप से सुखे के तनाव के तहत उत्तेजित होता है। पौधो में इस जीन की अभिव्यक्ति रैफिनोज और गैलेक्टिनॉल के स्तर को बढ़ाती है। रैफिनोज और गैलेक्टिनॉल दोनों ही आर.ओ.एस. स्कैवेंजर और संयुक्त विलेय के माध्यम् से पर्यावरणीय तनावों के तहत कोशिकाओं की रक्षा करने की क्षमता प्रदर्शित करते हैं। इस संबंध में धान और सोयाबीन के मेटाबोलोम विश्लेषण के तहत रैफिनोज और गैलेक्टिनॉल के स्तर में वृद्धि ने सुखे के तनाव के प्रति उनकी प्रतिक्रिया का संकेत दिया। गैलेविटनॉल सिंथेज में प्रयोग के माध्यम् से फसल का पादप परिवर्तन शुष्क वातावरण में पौधों के तनाव के प्रतिरोध को सक्रिय करता है। विभिन्न अध्ययनों में पता चलता है कि ट्रांसजेनिक पौधों में गैलेक्टिनॉल सिंथेज का प्रयोग न केवल सुखा सहिष्णुता को बढ़ाता है, बल्कि फसल की उपज में भी सुधार करता है। इस प्रकार गैलेक्टिनॉल सिंकेज चापचय इंजीनियरिंग को पानी के कमी की स्थिति में फसल की उपज को बढ़ाने के लिए एक उपयोगी दृष्टिकोण और एक महत्वपूर्ण पद्धति माना जाता है।

निष्कर्ष

हाल के जलवायु परिवर्तनों के तहत, जैविक और अजैविक दोनों प्रकार के तनाव वैश्विक खाद्द सुरक्षा और फसल उत्पादन की स्थिरता के लिए एक गंभीर खतरा है। अजैविक तनावों में, पौधों की वृद्धि और विकास पर इसके प्रतिकूल प्रभाव और फसलों की उपज और जैवभार (वायोमास) में उल्लेखनीय कमी के कारण सुखे का तनाव वैश्विक खाद्द असुरक्षा का कारण बन रहा है। इसलिए इस पर ध्यान दिया जा रहा है। सुखे का तनाव पौधों को जीवन–चक्र के दौरान अर्थात् अंकुरण से लेकर परिपक्वता अवधि तक, प्रभावित करता है। कुछ शारीरिक उपापचयी और जैव रासायनिक प्रतिक्रियाएँ सुखे के तनाव से प्रभावित होती है, जिससे पौधों की उत्पादकता वाधित होती है। पौधों पर सुखे के तनाव के प्रतिकूल प्रभाव से निपटने के लिए, पौधे कुछ ऐसे तंत्र अपनाते है जो सुखा सहनशीलता को बढ़ाते है। इस प्रकार विभिन्न पौधों में अप्रयुक्त अनुकूलन गुणों का पता लगाने और उन्हे उन जीनोटाइप में शामिल करने की आवश्यकता है जो सुखे के तनाव के प्रतिकूल प्रभावों को सहन कर सके, ताकि उनकी उत्पादकता प्रभावित न हो। प्रजनन तकनीकों के अंतर्गत जल की कमी में पौधों के प्रदर्शन और उत्पादन को बढ़ाने की अधिक क्षमता है। शुष्क और अर्धशुष्क वातावरण में सुखे से निपटने के लिए कुछ उपायों पर अधिक ध्यान दिया जा रहा है।

विकास पैटर्न और संरचनात्मक गतिशीलता, रंध्र चालकता परिवर्तन और वितरण के माध्यम् से वाष्पोत्सर्जन हानि में कमी, पत्तियों का लुढ़कना, जड़ से प्ररोह अनुपात गतिशीलता, जड़ की लम्बाई में वृद्धि संगत विलेय का संचय, वाष्पोत्सर्जन दक्षता में वृद्धि, असमायिक और हार्मोनल विनियमन एवं विलंवित जीर्णता के रणनीतियां हैं, जिन्हे जल की कमी वाले क्षेत्रों में उगाये जाने वाले पौधों के द्वारा अपनाया जा सकता है।

पौधों में सूखा तनाव सहिष्णुता में सुधार करने के लिए, कुछ प्रजनन रणनीतियां, आणविक और जीनोमिक्स परिपेक्ष्यों पर विशेष जोर देने के साथ ओमिक्स प्रौधेगिकी परिवर्तन यानी मेटाबोलोमिक्स, प्रोटिओमिक्स, जीनोमिक्स, ट्रांसक्रिप्टोमिक्स, ग्लायोमिक्स और फेनोमिक्स का दृष्टिकोण बहुत मूल्यवान है। अन्य पद्दतियां जिनमें बीज प्राइमिंग, विकास हार्मोन, ऑस्मोप्रोटेक्टेंस, सिलिकॉन, सेलेनियम और पोटेशियम का प्रयोग शामिल है जो पौधों में कम पानी की स्थिति में उपयोग करने योग्य है। इसके बावजूद सूक्ष्मजीवों, हाइड्रोजनल, नैनोकणों के प्रयोगों और चयापचय इंजीनियरिंग की तकनीकों का लाभकारी प्रभाव पौधों में सुखा तलाब के अनुकूलन के लिए एंटीऑक्सीडेंट एंजाइम गतिविधि को भी नियंत्रित करता है। सेल होमियोस्टेसिस (कोशिका समस्थिति) में रखरखाव के माध्यम् से पौधों की सहिष्णुता को बढ़ाता है और पौधों में पानी के तनाव के प्रतिकूल प्रभावों को कम करता है।