एग्री मैगज़ीन
(कृषि लेखों के लिए अंतरराष्ट्रीय ई-पत्रिका)
वर्ष: 03, अंक: 06 (जून, 2026)
www.agrimagazine.in पर ऑनलाइन उपलब्ध
© एग्री मैगज़ीन, आई. एस. एस. एन.: 3048-8656

पौधों की पोषणात्मक गुणवत्ता में सुधार हेतु जीनोम संपादन आधारित दृष्टिकोण

चन्दर मोहन[1], राकेश कुमार[2], आशुतोष शर्मा[2], राजेश कुमार सिंह[2], आशुतोष सिंह[2] एवं *विक्रम सिंह गौड़[3]

[1]क्षेत्रीय मक्का अनुसंधान एवं बीज उत्पादन केंद्र, बेगूसराय, बिहार, भारत

[2]रानी लक्ष्मी बाई केंद्रीय कृषि विश्वविद्यालय, झाँसी, उ.प्र., भारत

[3]कृषि महाविद्यालय, बालाघाट, जवाहरलाल नेहरू कृषि विश्वविद्यालय, जबलपुर, म.प्र., भारत

*संवादी लेखक का ईमेल पता: vikramsinghgaur@gmail.com

जीनोम संपादन तकनीकें पौधों की पोषण गुणवत्ता को सटीक रूप से सुधारने में सक्षम हैं। इनके माध्यम से विटामिन, आवश्यक अमीनो अम्ल तथा लाभकारी खनिजों की मात्रा बढ़ाई जा सकती है। ट्रांसक्रिप्शन एक्टिवेटर–लाइक इफेक्टर न्यूक्लिएसेज़ (टैलेन), जिंक फिंगर न्यूक्लिएसेज़ (जेड.एफ.एन), क्लस्टर्ड रेगुलरली इंटरस्पेस्ड शॉर्ट पैलिंड्रोमिक रिपीट्स–कैस9 (क्रिस्पर/कास9) तथा प्राइम एडिटर्स प्रमुख जीनोम संपादन उपकरण हैं। ये उपकरण पौधों के जीनोम में लक्षित परिवर्तन करके अधिक स्वास्थ्यवर्धक तेलों, प्रोटीनों, खनिजों तथा अन्य लाभकारी जैव–अणुओं के निर्माण हेतु आवश्यक घटकों में सुधार करते हैं। विशेष रूप से, क्रिस्पर/कास9 तकनीक हाल के वर्षों में पौधों के जीनोम के सटीक एवं प्रभावी संपादन के लिए एक व्यवहार्य, किफायती तथा बहुउपयोगी उपकरण के रूप में सिद्ध हुई है। इस तकनीक ने फसल सुधार के क्षेत्र में अत्यधिक संभावनाएँ प्रदर्शित की हैं। इन जीनोम संपादन तकनीकों का उपयोग करके कई ऐसी फसलें विकसित की गई हैं जिनका पोषण मूल्य पहले की तुलना में अधिक है। फल एवं सब्जियों के पोषणात्मक, कार्यात्मक तथा भौतिक–रासायनिक गुणों के प्रति जन–जागरूकता में भी वृद्धि हुई है। इन गुणों में आवश्यक विटामिन, खनिज, फाइटोकेमिकल्स तथा एंटीऑक्सीडेंट्स की मात्रा जैसे महत्वपूर्ण लक्षण शामिल हैं। हाल ही में जीनोम संपादन तकनीकों का उपयोग करके विकसित समृद्ध टमाटर तथा उच्च ओलिक अम्ल युक्त सोयाबीन बाजार में उपलब्ध कराए गए हैं।

मुख्य–शब्द: जीनोम संपादन, टैलेन, जेड.एफ.एन, क्रिस्पर/कास9, पोषण गुणवत्ता, फसल सुधार।

परिचय

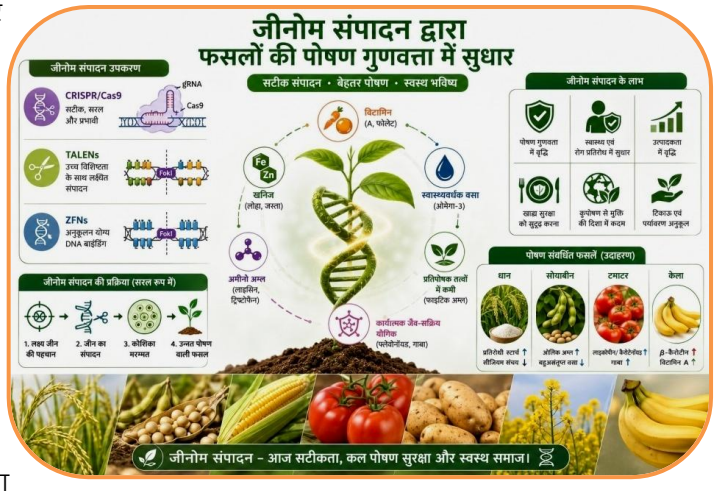
सूक्ष्म पोषक तत्वों की कमी से होने वाला कुपोषण विश्वभर में दो अरब से अधिक लोगों को प्रभावित करता है। बच्चे और महिलाएँ कुपोषण के प्रति सबसे अधिक संवेदनशील होते हैं, जिसके परिणामस्वरूप अवरुद्ध शारीरिक विकास, विभिन्न स्वास्थ्य समस्याएँ तथा जन्म–संबंधी अनेक जटिलताएँ उत्पन्न होती हैं। खाद्य पदार्थों में पोषक तत्वों से भरपूर फसलों को शामिल करके कुपोषण जैसी जटिल समस्या से काफी हद तक निपटा जा सकता है। बायोफोर्टिफिकेशन एक दीर्घकालिक समाधान है, जिसका उद्देश्य कृषि सुधार, कृषि प्रबंधन तथा पारंपरिक पादप प्रजनन विधियों के माध्यम से मुख्य खाद्य फसलों में आवश्यक पोषक तत्वों की मात्रा बढ़ाना है। पिछले कई दशकों में पारंपरिक प्रजनन विधियाँ उपयोगी अल्पजनी एवं बहुजनी लक्षणों के सुधार में महत्वपूर्ण रही हैं। हालांकि, इन विधियों में अधिक समय, अधिक लागत, श्रम–साध्यता, असटीक चयन तथा जटिल संकरण प्रक्रियाएँ शामिल होती हैं। इसके अतिरिक्त, पर्याप्त आनुवंशिक विविधता की कमी तथा उपयुक्त दाता प्रजनन रेखाओं की अनुपलब्धता के कारण वांछित लक्षणों की पहचान एवं चयन करना कठिन हो जाता है।

जीनोम संपादन जैसी आधुनिक और नवोन्मेषी तकनीकों के विकास ने इस क्षेत्र में नई संभावनाएँ उत्पन्न की हैं। जीनोम संपादन तकनीकें गुणसूत्रों पर डी.एन.ए. अनुक्रमों में लक्षित स्थानों पर परिवर्तन करके जीनोम में सटीक संशोधन करने में सक्षम हैं। पिछले कुछ वर्षों में इन तकनीकों का उपयोग विभिन्न फसलों में रोगजनकों तथा अजैविक तनावों के प्रति सहनशीलता विकसित करने के लिए किया गया है। जीनोम संपादन उपकरण फसलों में लक्षित आनुवंशिक संशोधन के लिए उन्नत तकनीकों के रूप में उभरे हैं, जो खनिज पोषक तत्वों, आवश्यक अमीनो अम्लों तथा विटामिनों की मात्रा बढ़ाकर पोषण गुणवत्ता में महत्वपूर्ण सुधार प्रदान करते हैं। इनका विशेष उपयोग गेहूँ, धान, मक्का, तिलहनी फसलों तथा उद्यानिकी फसलों जैसी प्रमुख खाद्य फसलों में किया जा रहा है। क्रिस्पर/कास9 आधारित तकनीकों में हुए विकास, विशेषकर प्राइम एडिटिंग और बेस एडिटिंग जैसी नवीन प्रणालियों तथा नए क्रिस्पर–संबद्ध प्रोटीनों के विकास ने पोषण प्रोफ़ाइल एवं लाभकारी खनिज तत्वों से संबंधित लक्षणों के सुधार की संभावनाओं को और अधिक प्रभावी बना दिया है। हाल के वर्षों में टमाटर, सोयाबीन, धान, गेहूँ तथा मक्का जैसी अनेक फसलों में पोषण गुणवत्ता सुधार के लिए जीनोम संपादन तकनीकों का सफलतापूर्वक उपयोग किया गया है। ये तकनीकें रुचिकर लक्षणों से संबंधित विशिष्ट जीनों को लक्षित करके पौधों के जीनोम में निर्धारित स्थानों पर सटीक उत्परिवर्तन उत्पन्न करती हैं। विभिन्न फसलों एवं उद्यानिकी फसलों में पोषण सुरक्षा को बढ़ाने के लिए क्रिस्पर/कास9 तकनीक, टैलेन और जेड.एफ.एन की तुलना में अधिक प्रभावी सिद्ध हुई है। इसके परिणामस्वरूप पोषण–संपन्न तथा स्वास्थ्यवर्धक फसल किस्मों के विकास का मार्ग प्रशस्त हुआ है।

1. जीनोम संपादन उपकरण

फसल सुधार के लिए जीनोम संपादन तकनीकों का सफलतापूर्वक उपयोग अनेक फसलों में रोगजनकों के विरुद्ध प्रतिरोध तथा अजैविक एवं जलवायुजनित तनावों के प्रति सहनशीलता विकसित करने हेतु किया गया है। ट्रांसक्रिप्शन एक्टिवेटर–लाइक इफेक्टर न्यूक्लिएसेज (टैलेन) जिंक फिंगर न्यूक्लिएसेज़ (जेड.एफ.एन), क्लस्टर्ड रेगुलरली इंटरस्पेस्ड शॉर्ट पैलिंड्रोमिक रिपीट (क्रिस्पर/कास9), बेस एडिटर्स तथा प्राइम एडिटर्स प्रमुख जीनोम संपादन उपकरण हैं। इन तकनीकों का सफल उपयोग धान, गेहूँ, मक्का, जौ तथा अन्य अनेक फसलों में किया जा चुका है।

1.1. जिंक फिंगर न्यूक्लिएसेज़: जिंक फिंगर न्यूक्लिएस जीनोम संपादन का एक शक्तिशाली उपकरण है, जिसे प्रतिबंध एंडोन्यूक्लिएस के सिद्धांत पर विकसित किया गया है। जेड.एफ.एन तकनीक में डी.एन.ए. की द्वि–सूत्रीय टूटन को लक्षित स्थानों पर उत्पन्न किया जाता है। इसके पश्चात कोशिका की त्रुटि–प्रवण नॉन–होमोलॉगस एंड जॉइनिंग मरम्मत प्रणाली सक्रिय होकर लक्षित स्थान पर छोटे विलोपन अथवा समावेशन उत्पन्न करती है। अधिकांश जेड.एफ.एन काइमेरिक प्रोटीन होते हैं, जिनमें दो प्रमुख डोमेन पाए जाते हैं। जिंक फिंगर न्यूक्लिएस (जेड.एफ.एन) लक्षित जीन संपादन की एक प्रभावी तकनीक है, जो दो प्रमुख घटकोंकृजिंक फिंगर आधारित डी.एन.ए.–बाइंडिंग डोमेन तथा डी.एन.ए.–क्लीवेज डोमेन से निर्मित होती है। जिंक फिंगर डोमेन विशिष्ट डी.एन.ए. अनुक्रमों को पहचानकर उनसे जुड़ता है, जबकि **फोक। टाइप–।।** प्रतिबंध एंडोन्यूक्लिएस आधारित क्लीवेज डोमेन डी.एन.ए. को काटने का कार्य करता है। **फोक।** का एन–टर्मिनस डी.एन.ए. बाइंडिंग तथा सी–टर्मिनस डी.एन.ए. कटाव के लिए उत्तरदायी होता है। सामान्यतः डी.एन.ए.–बाइंडिंग डोमेन 3–6 जिंक फिंगर इकाइयों से मिलकर बना होता है, जहाँ प्रत्येक इकाई लगभग 3 बेस युग्मों की पहचान करती है। दो जिंक फिंगर के बाइंडिंग स्थल प्रायः 18–24 बेस युग्म लंबे होते हैं और उनके बीच 5–8 बेस युग्म की दूरी आवश्यक होती है। यह उपयुक्त दूरी **फोक।** मोनोमरों के द्विकरण को सक्षम बनाती है, जिससे लक्षित डी.एन.ए. में द्वि–सूत्रीय टूटन उत्पन्न होती है। उच्च विशिष्टता के कारण जेड.एफ.एन पौधों में सटीक एवं लक्षित जीन संपादन के लिए अत्यंत महत्वपूर्ण उपकरण हैं।



1.2. ट्रांसक्रिप्शन एक्टिवेटर–लाइक इफेक्टर न्यूक्लिएसेज़ (टैलेन)**:** ट्रांसक्रिप्शन एक्टिवेटर–लाइक इफेक्टर न्यूक्लिएसेज़ (टैलेन)जीनोम संपादन की एक उन्नत एवं प्रभावी तकनीक है, जिसका विकास जिंक फिंगर न्यूक्लिएसेज़ (जेड.एफ.एन) के पश्चात हुआ और जिसका व्यापक उपयोग फसलों में वांछित लक्षणों के सुधार हेतु किया जाता है। इसकी कार्यप्रणाली जेड.एफ.एन के समान है, जिसमें ट्रांसक्रिप्शन एक्टिवेटर–लाइक इफेक्टर (टैल) को **फोक।** एंडोन्यूक्लिएस के गैर–विशिष्ट डी.एन.ए.–क्लीवेज डोमेन के साथ संयोजित किया जाता है। टेल प्रोटीनों की खोज पौध रोगजनक जीवाणु जैन्थोमोनस में हुई थी, जो धान, कपास तथा अन्य फसलों को संक्रमित करते हैं। टैलेन की संरचना में 33–35 अमीनो अम्लों की पुनरावृत्तियों से बना केंद्रीय डी.एन.ए.–बाइंडिंग डोमेन, सी–टर्मिनल पर संरक्षित ट्रांसक्रिप्शन सक्रियण डोमेन (TAD), एन–टर्मिनल पर स्राव एवं स्थानांतरण संकेत तथा न्यूक्लियर लोकलाइजेशन सिग्नल (एनएल) शामिल होते हैं। नाभिक में पहुँचने के बाद टैलेन लक्षित डी.एन.ए अनुक्रम के दोनों ओर विपरीत दिशा में 12–30 बेस युग्म की दूरी पर बंधता है। इसके पश्चात **फोक।** डोमेन का द्विकरण होकर डी.एन.ए. में द्वि–सूत्रीय कटाव उत्पन्न होता है, जिससे लक्षित जीन की अभिव्यक्ति का सटीक नियमन एवं प्रभावी जीन संपादन संभव हो पाता है।

1.3. क्लस्टर्ड रेगुलरली इंटरस्पेस्ड शॉर्ट पैलिंड्रोमिक रिपीट्स (क्रिस्पर/कास9): क्रिस्पर/कास9 जीनोम संपादन की तीसरी तथा वर्तमान में सर्वाधिक लोकप्रिय और प्रभावी तकनीक है, जिसका उपयोग जीवों के जीनोम में सटीक, लक्षित एवं नियंत्रित परिवर्तन करने के लिए किया जाता है। इसकी सरल संरचना, उच्च दक्षता और व्यापक उपयोगिता के कारण यह आधुनिक जैव प्रौद्योगिकी एवं फसल सुधार कार्यक्रमों में अत्यंत महत्वपूर्ण स्थान रखती है। यह तकनीक बैक्टीरिया एवं आर्किया की प्राकृतिक अनुकूली प्रतिरक्षा प्रणाली पर आधारित है, जो उन्हें वायरस एवं अन्य विदेशी आनुवंशिक तत्वों के आक्रमण से सुरक्षा प्रदान करती है। क्रिस्पर/कास9 प्रणालियों को संरचनात्मक विशेषताओं के आधार पर दो वर्गों, छह प्रकारों तथा अनेक उपप्रकारों में वर्गीकृत किया गया है। इसकी कार्यप्रणाली तीन प्रमुख चरणों–अनुकूलन, अभिव्यक्ति और हस्तक्षेप पर आधारित होती है, जिनके माध्यम से बाहरी डी.एन.ए. की पहचान, क्रिस्पर आर.एन.ए का निर्माण तथा लक्षित डी.एन.ए. का सटीक विखंडन किया जाता है। क्रिस्पर/कास9 की प्रमुख विशेषताओं में उच्च सटीकता, कम लागत, त्वरित परिणाम, सरल डिज़ाइन तथा एक साथ अनेक जीनों के संपादन की क्षमता शामिल है। धान सहित विभिन्न फसलों में इसका सफल उपयोग रोग प्रतिरोध, सूखा–सहनशीलता, अधिक दाना संख्या, साइटोप्लाज्मिक नर बाँझपन तथा अधिक टिलरिंग जैसे महत्वपूर्ण कृषि लक्षणों के सुधार हेतु किया गया है। इन गुणों के कारण क्रिस्पर/कास9 आधुनिक पौध जीनोम संपादन की सबसे उन्नत, विश्वसनीय एवं बहुउद्देशीय तकनीक बन चुकी है।

2. जीनोम संपादन उपकरणों के माध्यम से फसलों में पोषण सुधार की रणनीतियाँ

विटामिन, खनिज, आवश्यक अमीनो अम्ल तथा स्वास्थ्यवर्धक वसा मानव स्वास्थ्य के लिए अत्यंत महत्वपूर्ण हैं। ये जैव–अणु एवं खनिज मुख्यतः खाद्यान्नों, फलों, सब्जियों, दलहनी फसलों तथा तिलहनी फसलों से प्राप्त होते हैं। इन पोषक तत्वों की कमी से मनुष्यों में अनेक विकार एवं रोग उत्पन्न हो सकते हैं, विशेष रूप से बच्चों और महिलाओं में इसका प्रभाव अधिक गंभीर होता है। फसल किस्मों की पोषण गुणवत्ता में सुधार करने के लिए विटामिनों (जैसे– प्रो

विटामिन ए एवं फोलेट), खनिजों (जैसे– लौह एवं जस्ता), आवश्यक अमीनो अम्लों (जैसे– ट्रिप्टोफैन एवं लाइसीन) तथा स्वास्थ्यवर्धक वसाओं (जैसे– ओमेगा–3 फैटी अम्ल) की मात्रा बढ़ाने और प्रतिपोषक तत्वों जैसे फाइटिक अम्ल की मात्रा कम करने पर विशेष ध्यान दिया जा रहा है। यह रणनीति पोषण संबंधी कमियों को दूर करने तथा वैश्विक स्तर पर कुपोषण की समस्या से निपटने में सहायक सिद्ध हो सकती है। जीनोम संपादन जैसी उन्नत तकनीकों द्वारा डी.एन.ए. में सटीक परिवर्तन करके पोषक तत्वों से समृद्ध फसल किस्मों का विकास संभव हुआ है। टैलेन, जेड.एफ.एन तथा क्रिस्पर/कास9 जैसे शक्तिशाली जीनोम संपादन उपकरणों का उपयोग करके जीनोम के विभिन्न गुणसूत्रीय क्षेत्रों में डी. एन.ए. का संपादन, विलोपन अथवा संशोधन किया जाता है। इन तकनीकों के माध्यम से कई फसलों में पोषण गुणवत्ता को सफलतापूर्वक बढ़ाया गया है। जीनोम संपादन तकनीकों के उपयोग से विकसित कुछ पोषण–सुधारित फसलों के उदाहरण आगे दी गई सारणी में प्रस्तुत किए गए हैं। इन उदाहरणों से स्पष्ट होता है कि जीनोम संपादन फसलों में आवश्यक पोषक तत्वों की मात्रा बढ़ाने और मानव पोषण सुरक्षा सुनिश्चित करने का एक प्रभावी एवं आशाजनक साधन है।

सारणी–1: फसलों में पोषण संवर्धन हेतु आनुवंशिक (जीनोम) संपादन

पोषण संबंधी लक्षण	लक्षित जीन	फसलें प्रमुख	जीनोम संपादन का उद्देश्य
विटामिन (प्रो–विटामिन ए)	पीयसवाई1, सीआरटीबी	धान, मक्का, आलू, कसावा, केला धान, मक्का, आलू, कसावा, केला	विटामिन ए की कमी को कम करने हेतु प्रो–विटामिन ए (β–कैरोटीन) की मात्रा बढ़ाना
खनिज (लौह एवं जस्ता)	ओएसएनएएस, ओएसवाईएसएल2	धान, सोयाबीन	लौह एवं जस्ता के अवशोषण, परिवहन व संचयन को बढ़ाना तथा जैव–उपलब्धता में सुधार करना
अमीनो अम्ल एवं प्रोटीन गुणवत्ता	लाइसीन एवं ट्रिप्टोफैन जैव–संश्लेषित जीन (ओपेक2)	मक्का, सोयाबीन	आवश्यक अमीनो अम्लों की मात्रा बढ़ाना तथा प्रोटीन की समग्र गुणवत्ता में सुधार करना
स्वास्थ्यवर्धक वसा (ओमेगा–3 फैटी अम्ल)	एफएडी2, एफएडी3	सोयाबीन एवं तिलहनी फसलें	खाद्य तेलों में ओमेगा–3 फैटी अम्लों की मात्रा बढ़ाना व विरोधी वसाओं को कम करना
प्रतिपोषक तत्वों में कमी	जीएमएलपीके1	सोयाबीन	फाइटिक अम्ल की मात्रा कम करके खनिजों के अवशोषण में सुधार करना
कार्यात्मक जैव–सक्रिय यौगिक	फ्लेवोनॉयड, कैरोटेनॉयड एवं गाबा जैव–संश्लेषित जीन	केल, सोयाबीन, टमाटर	स्वास्थ्यवर्धक यौगिकों जैसे फ्लेवोनॉयड, कैरोटेनॉयड एवं गाबा की मात्रा बढ़ाना

संक्षिप्त विवरण: उपरोक्त सारणी से स्पष्ट है कि जीनोम संपादन तकनीकों, विशेषकर क्रिस्पर/कास9, टैलेन एवं जेड.एफ. एन, के माध्यम से फसलों की पोषण गुणवत्ता में महत्वपूर्ण सुधार किया जा सकता है। इन तकनीकों द्वारा विटामिन, खनिज, आवश्यक अमीनो अम्ल तथा स्वास्थ्यवर्धक वसाओं की मात्रा बढ़ाने के साथ–साथ प्रतिपोषक तत्वों को कम किया जा सकता है, जिससे कुपोषण की समस्या के समाधान एवं वैश्विक पोषण सुरक्षा को सुदृढ़ बनाने में सहायता मिल सकती है।

3. फसलों में पोषण गुणवत्ता सुधार हेतु जीनोम संपादन के सफल उदाहरण

जीनोम संपादन तकनीकों ने कृषि जैवप्रौद्योगिकी के क्षेत्र में क्रांतिकारी परिवर्तन लाते हुए फसलों की पोषण गुणवत्ता, खाद्य सुरक्षा तथा मानव स्वास्थ्य संबंधी गुणों के सुधार के लिए नए अवसर प्रदान किए हैं। विशेष रूप से क्रिस्पर/कास9, टैलेन तथा प्राइम एडिटिंग जैसी उन्नत तकनीकों ने लक्षित जीनों में सटीक संशोधन संभव बनाकर पोषण–संपन्न एवं स्वास्थ्यवर्धक फसलों के विकास को गति प्रदान की है। विभिन्न फसलों में किए गए सफल प्रयोग इस तकनीक की व्यापक उपयोगिता और प्रभावशीलता को दर्शाते हैं।

3.1. धान: धान में क्रिस्पर/कास9 तकनीक का उपयोग SBEI, SBEIIb तथा OsHAK–1 जीनों के संपादन हेतु किया गया है। इन संशोधनों के परिणामस्वरूप प्रतिरोधी स्टार्च की मात्रा में वृद्धि हुई, जो मानव स्वास्थ्य के लिए लाभकारी मानी जाती है, जबकि सीज़ियम के संचय में कमी लाकर खाद्य सुरक्षा में सुधार प्राप्त किया गया।

3.2. सोयाबीन: सोयाबीन में टैलेन तकनीक द्वारा वसीय अम्ल जैवसंश्लेषण से संबंधित एफएडी2 एवं एफएडी3 जीनों का सटीक संपादन किया गया, जिससे ओलिक अम्ल की मात्रा बढ़ी तथा बहुअसंतृप्त वसीय अम्लों का स्तर कम हुआ। परिणामस्वरूप अधिक स्थिर, पोषक एवं स्वास्थ्यवर्धक खाद्य तेलों का विकास संभव हुआ।

3.3. ज्वार: ज्वार में क्रिस्पर/कास9 तकनीक द्वारा k1C जीन परिवार की अभिव्यक्ति को कम करके प्रोटीन की गुणवत्ता और पाचनशीलता में सुधार किया गया है, जिससे इसके पोषण मूल्य में उल्लेखनीय वृद्धि हुई।

3.4. आलू: आलू में प्राइम एडिटिंग आधारित जीन संशोधन के माध्यम से PP02 तथा 16DOX जीनों की अभिव्यक्ति को कम किया गया, जिससे भूरापन तथा स्टेरॉयडल ग्लाइकोएल्कलॉइड जैसे अवांछनीय यौगिकों की मात्रा घटाई जा सकी। इसके अतिरिक्त, टैलेन तकनीक द्वारा Vinv जीन का संशोधन कर एक्रिलामाइड के निर्माण को कम किया गया, जो प्रसंस्कृत खाद्य पदार्थों की सुरक्षा के दृष्टिकोण से महत्वपूर्ण उपलब्धि है।

3.5. टमाटर: टमाटर पोषण सुधार हेतु जीनोम संपादन का एक प्रमुख मॉडल फसल रहा है। क्रिस्पर/कास9 तथा टैलेन के उपयोग से बैंगनी वर्णक, लाइकोपीन, कैरोटेनॉयड, β–कैरोटीन तथा गामा–अमीनोब्यूट्रिक अम्ल (गाबा) के संचय से संबंधित जीनों में सुधार किया गया है। इन परिवर्तनों से टमाटर की पोषण क्षमता, एंटीऑक्सीडेंट गुण तथा स्वास्थ्यवर्धक महत्व में वृद्धि हुई है।

3.6. सरसों: ब्रैसिका प्रजातियों, विशेषकर ब्रेसिका रापा एवं रेपसीड, में BrOG1A तथा BrOG1B जीनों की अभिव्यक्ति को क्रिस्पर/कास9 द्वारा नियंत्रित कर फ्रुक्टोज एवं ग्लूकोज़ की मात्रा घटाई गई तथा सुक्रोज की मात्रा बढ़ाई गई, जिससे गुणवत्ता, स्वाद एवं उपभोक्ता स्वीकार्यता में सुधार प्राप्त हुआ।

3.7. केला: केला में β–कैरोटीन संवर्धन के उद्देश्य से स्ब्म जीन को क्रिस्पर/कास9 द्वारा लक्षित किया गया है। इस जीन के संपादन से फल में β–कैरोटीन का स्तर बढ़ा, जो विटामिन–ए की कमी से उत्पन्न कुपोषण को कम करने की दिशा में महत्वपूर्ण कदम है।

इस प्रकार, विभिन्न फसलों में जीनोम संपादन तकनीकों के सफल अनुप्रयोग यह सिद्ध करते हैं कि ये तकनीकें पोषण गुणवत्ता बढ़ाने, स्वास्थ्यवर्धक जैव–अणुओं के स्तर को सुधारने, खाद्य सुरक्षा सुनिश्चित करने तथा वैश्विक कुपोषण की चुनौतियों का समाधान करने में अत्यंत महत्वपूर्ण भूमिका निभा रही हैं। भविष्य में क्रिस्पर/कास9, टैलेन, प्राइम एडिटिंग तथा अन्य नवीन जीनोम संपादन उपकरणों के माध्यम से अधिक पोषण–संपन्न, सुरक्षित एवं टिकाऊ फसल किस्मों का विकास संभव होगा, जो सतत कृषि और वैश्विक खाद्य एवं पोषण सुरक्षा को सुदृढ़ करने में महत्वपूर्ण योगदान देंगे।

निष्कर्ष एवं भावी संभावनाएँ

जीनोम संपादन फसलों की पोषण गुणवत्ता में रणनीतिक एवं सटीक सुधार करने तथा लाभकारी जैव–अणुओं के संचय को बढ़ाने के लिए एक प्रभावी तकनीक के रूप में उभरा है। टैलेन, जेड.एफ.एन तथा क्रिस्पर/कास9 जैसे जीनोम संपादन उपकरणों का उपयोग धान, गेहूँ, मक्का, सरसों, सोयाबीन, ज्वार, केला, आलू एवं टमाटर जैसी महत्वपूर्ण फसलों में किया गया है। इन तकनीकों के माध्यम से विभिन्न उपापचयी एवं जैवसंश्लेषण प्रक्रियाओं से संबंधित डी.एन.ए. अनुक्रमों में लक्षित परिवर्तन करके विटामिन, खनिज तथा आवश्यक अमीनो अम्लों की मात्रा में वृद्धि की गई है। इसके अतिरिक्त, लक्षित जीनों की अभिव्यक्ति को कम करके प्रतिपोषक तत्वों की मात्रा को भी सफलतापूर्वक घटाया गया है। इस प्रकार, जीनोम संपादन आधारित फसल सुधार वैश्विक स्तर पर कुपोषण की समस्या के समाधान में प्रत्यक्ष योगदान प्रदान करता है। पोषण–संपन्न एवं स्वास्थ्यवर्धक फसल किस्मों का विकास खाद्य एवं पोषण सुरक्षा सुनिश्चित करने की दिशा में एक महत्वपूर्ण कदम है। भविष्य की दृष्टि से जीनोम संपादन तकनीकों की संभावनाएँ अत्यंत आशाजनक हैं। विशेष रूप से, मल्टीप्लेक्स जीनोम एडिटिंग जैसी उन्नत तकनीकें, जिनके माध्यम से एक ही समय में अनेक पोषण संबंधी लक्षणों को लक्षित किया जा सकता है, भविष्य के फसल सुधार कार्यक्रमों में महत्वपूर्ण भूमिका निभा सकती हैं। साथ ही, बेस एडिटिंग, प्राइम एडिटिंग तथा नए क्रिस्पर/कास9 संबद्ध प्रोटीनों के विकास से जीनोम संपादन की सटीकता, दक्षता एवं उपयोगिता में और वृद्धि होने की संभावना है। अतः यह कहा जा सकता है कि जीनोम संपादन न केवल फसलों की पोषण गुणवत्ता को बेहतर बनाने का एक प्रभावशाली साधन है, बल्कि यह वैश्विक कुपोषण को कम करने, खाद्य सुरक्षा को सुदृढ़ करने तथा मानव स्वास्थ्य में सुधार लाने के लिए भविष्य की कृषि जैव–प्रौद्योगिकी का एक महत्वपूर्ण आधार भी बनेगा।