कृषि अभियांत्रिकी दर्पण

विशेषांक: 48 (2026)

भाकृअनुप
ICAR

भा.कृ.अनु.प. - केन्द्रीय कृषि अभियांत्रिकी संस्थान
नबीबाग, बैरसिया रोड, भोपाल-462038
ICAR–Central Institute of Agricultural Engineering
Nabi Bagh, Berasia Road, Bhopal– 462038

कृषि अभियांत्रिकी दर्पण (KRISHI ABHIYANTRIKI DARPAN)

विशेषांक: 48 (Special Issue: 48)

एग्रीकल्चर 4.0 के युग में कृषि यंत्रीकरण: सतत् फसल उत्पादन हेतु नवोन्मेषी एवं भविष्योन्मुखी प्रौद्योगिकी के माध्यम से भारतीय कृषि प्रणाली का सशक्तिकरण

Agricultural Mechanization in the Era of Agriculture 4.0: Empowering the Indian Agricultural System through Innovative and Futuristic Technologies for Sustainable Crop Production

जुलाई 2026 (July 2026)

संपादकगण	Editors
डॉ. एस.पी. सिंह	Dr. S.P. Singh
डॉ. अभिजीत खड़तकर	Dr. Abhijit Khadatkar
डॉ. करण सिंह	Dr. Karan Singh
डॉ. विजय कुमार	Dr. Vijay Kumar
डॉ. स्वप्नजा जाधव	Dr. Swapnaja Jadhav
श्री राकेश कुमार कुशवाहा	Shri Rakesh Kumar Kushwaha

प्रकाशक (Publisher)

निदेशक, भा.कृ.अनु.प. – केन्द्रीय कृषि अभियांत्रिकी संस्थान

नबी बाग, बैरसिया रोड, भोपाल – 462 038 (मध्य प्रदेश)

Director, ICAR–Central Institute of Agricultural Engineering

Nabi Bagh, Berasia Road, Bhopal – 462 038 (Madhya Pradesh)

उल्लेख

सिंह, एस. पी., खड़तकर, ए., सिंह, के., कुमार, वि., जाधव, एस., कुशवाहा, र. कु., 2026. एग्रीकल्चर 4.0 के युग में कृषि यंत्रीकरण: सतत् फसल उत्पादन हेतु नवोन्मेषी एवं भविष्योन्मुखी प्रौद्योगिकी के माध्यम से भारतीय कृषि प्रणाली का सशक्तिकरण. कृषि अभियांत्रिकी दर्पण (विशेषांक: 48), भा.कृ.अनु.प. – केन्द्रीय कृषि अभियांत्रिकी संस्थान, भोपाल, भारत, 1-124 पृष्ठ

Citation

Singh, S. P., Khadatkar, A., Singh, K., Kumar, V., Jadhav, S., Kushwaha, R. K., 2026. Agricultural Mechanization in the Era of Agriculture 4.0: Empowering the Indian Agricultural System through Innovative and Futuristic Technologies for Sustainable Crop Production. Krishi Abhiyantriki Darpan (Special Issue: 48). ICAR–Central Institute of Agricultural Engineering, Bhopal, India, 1-124 Page

निदेशक की कलम से...

मुझे अत्यंत प्रसन्नता है कि कृषि अभियांत्रिकी दर्पण का यह विशेषांक "एग्रीकल्चर 4.0 के युग में कृषि यंत्रीकरण: सतत् फसल उत्पादन हेतु नवोन्मेषी एवं भविष्योन्मुखी प्रौद्योगिकी के माध्यम से भारतीय कृषि प्रणाली का सशक्तिकरण" जैसे अत्यंत महत्वपूर्ण विषय पर प्रकाशित किया जा रहा है। इस विशेषांक में उन शोधपत्रों को शामिल किया गया है, जिन्हें भाकृअनुप-केन्द्रीय कृषि अभियांत्रिकी संस्थान के द्वारा दिनांक 18 सितंबर, 2025 को उपरोक्त विषयांतर्गत आयोजित की गई ऑनलाइन वैज्ञानिक संगोष्ठी के दौरान प्रस्तुत किया गया। इस संगोष्ठी ने देशभर के अनुभवी वैज्ञानिकों, शिक्षकों, शोधार्थियों एवं कृषि विशेषज्ञों को हिंदी तकनीकी उपलब्धियों को साझा करने का एक प्रभावी मंच प्रदान किया।

उपरोक्त संगोष्ठी का विषय भाकृअनुप-केन्द्रीय कृषि अभियांत्रिकी संस्थान, भोपाल के मूल उद्देश्यों से भी गहनता से जुड़ा हुआ है। अपनी स्थापना के 50 वर्ष पूरा कर चुका यह संस्थान सदैव कृषि यंत्रीकरण के माध्यम से फसल उत्पादकता में सुधार लाने, नवीकरणीय स्रोतों से ऊर्जा दोहन करने, सिंचाई जल का दक्ष प्रबंधन सुनिश्चित करने, कटाई-उपरांत हानियों को न्यूनतम करने तथा कृषि-व्यवसायों को प्रोत्साहित कर ग्रामीण क्षेत्र में आय एवं रोजगार सृजन के माध्यम से भारतीय कृषि के आधुनिकीकरण हेतु सक्रियतापूर्वक प्रयासरत रहा है। इसी क्रम में संस्थान कृषि यंत्रीकरण, कटाई-उपरांत खाद्य प्रसंस्करण एवं मूल्य संवर्धन, सिंचाई एवं जल निकास अभियांत्रिकी तथा कृषि में ऊर्जा प्रबंधन के क्षेत्र में आधारभूत, अनुकूलित एवं व्यावहारिक अनुसंधान के साथ-साथ प्रसार एवं प्रशिक्षण कार्यक्रमों के माध्यम से मानव संसाधन विकास तथा कृषि अभियांत्रिकी प्रौद्योगिकियों के व्यावसायीकरण एवं उपयोग को भी निरंतर बढ़ावा दे रहा है। इस विशेषांक का विषय संस्थान के इन्हीं दीर्घकालिक उद्देश्यों को एग्रीकल्चर 4.0 के नवीन आयामों से जोड़कर एक सशक्त एवं सामयिक दिशा प्रदान करता है।

इस विशेषांक के समसामयिक प्रकाशन एवं उपयोगिता को ध्यान में रखते हुए यह कहना अतिशयोक्ति नहीं होगी कि भारतीय कृषि आज विज्ञान, अभियांत्रिकी और डिजिटल प्रौद्योगिकियों के अनूठे समन्वय से कृषि विकास की नई संभावनाओ का मार्ग प्रशस्त कर रही है। जलवायु परिवर्तन, प्राकृतिक संसाधनों का सतत् उपयोग, कृषि श्रमिकों की उपलब्धता में कमी तथा बढ़ती खाद्य एवं पोषण सुरक्षा की आवश्यकताओं ने कृषि क्षेत्र में नवाचार एवं उन्नत यंत्रीकरण को अत्यंत आवश्यक बना दिया है। ऐसे परिदृश्य में एग्रीकल्चर 4.0 की अवधारणा—जिसमें कृत्रिम बुद्धिमत्ता, इंटरनेट ऑफ थिंग्स (आईओटी), रोबोटिक्, ड्रोन, सेंसर प्रौद्योगिकी, मशीन लर्निंग, बिग डेटा तथा स्वचालन का समावेश है—भारतीय कृषि को अधिक सटीक, दक्ष, टिकाऊ एवं लाभकारी बनाने की दिशा में एक महत्वपूर्ण परिवर्तनकारी शक्ति के रूप में उभर रही है।

इस विशेषांक में प्रकाशित शोधपत्र एग्रीकल्चर 4.0 के विभिन्न आयामों को समाहित करते हैं। इनमें कृत्रिम बुद्धिमत्ता आधारित कृषि निर्णय प्रणाली, ड्रोन प्रौद्योगिकी, कंप्यूटर विज़न, स्मार्ट सेंसर, मृदा

एवं फसल स्वास्थ्य निगरानी, सटीक कृषि, स्वचालित कृषि यंत्र, खाद्य गुणवत्ता मूल्यांकन, पर्यावरण-अनुकूल प्रौद्योगिकियाँ, जैव-अवक्रमणीय(बायो डीग्रेडेबल) पैकेजिंग, कार्बन प्रबंधन तथा ग्रामीण आजीविका सशक्तिकरण जैसे समसामयिक एवं महत्त्वपूर्ण विषयों पर उत्कृष्ट शोध कार्य प्रस्तुत किए गए हैं। ये शोध भारतीय कृषि को अधिक स्मार्ट, संसाधन-कुशल तथा पर्यावरणीय दृष्टि से टिकाऊ बनाने की दिशा में महत्वपूर्ण योगदान देंगे। मातृभाषा में वैज्ञानिक साहित्य का विकास वैज्ञानिक ज्ञान के व्यापक प्रसार का एक प्रभावी माध्यम है। हिंदी में उच्च गुणवत्ता वाले शोध प्रकाशनों के माध्यम से नवीन तकनीकों को अधिकाधिक वैज्ञानिकों, विद्यार्थियों, कृषि प्रसार कार्यकर्ताओं तथा किसानों तक सरल एवं प्रभावी रूप में पहुँचाया जा सकता है। इस दृष्टि से यह विशेषांक वैज्ञानिक उत्कृष्टता तथा राजभाषा हिंदी के संवर्धन—दोनों उद्देश्यों की सार्थक पूर्ति करता है।

मैं इस विशेषांक के सभी लेखकों, समीक्षकों, संपादकीय मंडल तथा आयोजन समिति को उनके समर्पित प्रयासों के लिए हार्दिक बधाई एवं शुभकामनाएँ देता हूँ। मुझे विश्वास है कि यह विशेषांक कृषि अभियांत्रिकी एवं स्मार्ट कृषि के क्षेत्र में कार्यरत वैज्ञानिकों, शोधकर्ताओं, शिक्षकों, विद्यार्थियों, उद्योग जगत एवं नीति-निर्माताओं के लिए एक उपयोगी संदर्भ ग्रंथ सिद्ध होगा तथा भारत में नवाचार-आधारित, टिकाऊ एवं प्रौद्योगिकी-संचालित कृषि प्रणाली के विकास को नई दिशा प्रदान करेगा।

मैं इस विशेषांक के सफल प्रकाशन पर सभी संबंधित व्यक्तियों को हार्दिक बधाई सम्प्रेषित करता हूँ तथा इसके व्यापक प्रभाव एवं सफलता की मंगलकामना करता हूँ।

(डॉ. सी. आर. मेहता)
निदेशक
भाकृअनुप–केन्द्रीय कृषि अभियांत्रिकी संस्थान, भोपाल

अग्रलेख

"एग्रीकल्चर 4.0 के युग में कृषि यंत्रीकरण: सतत् फसल उत्पादन हेतु नवोन्मेषी एवं भविष्योन्मुखी प्रौद्योगिकी के माध्यम से भारतीय कृषि प्रणाली का सशक्तिकरण"

भारतीय कृषि आज एक ऐसे संक्रमणकाल से गुजर रही है, जहाँ पारंपरिक ज्ञान एवं आधुनिक विज्ञान का समन्वय कृषि के भविष्य को नई दिशा प्रदान कर रहा है। जनसंख्या वृद्धि, प्राकृतिक संसाधनों पर बढ़ता दबाव, जलवायु परिवर्तन, श्रमिकों की कमी तथा गुणवत्तायुक्त एवं सुरक्षित कृषि उत्पादों की बढ़ती मांग ने कृषि क्षेत्र में तकनीकी नवाचारों को अनिवार्य बना दिया है। ऐसे समय में एग्रीकल्चर 4.0 की अवधारणा—जिसमें कृत्रिम बुद्धिमत्ता (Artificial Intelligence), इंटरनेट ऑफ थिंग्स (IoT), रोबोटिक्स, ड्रोन, बिग डेटा, मशीन लर्निंग, सेंसर प्रौद्योगिकी, कंप्यूटर विज़न तथा स्वचालित कृषि यंत्रों का समावेश है—भारतीय कृषि को अधिक उत्पादक, सटीक, संसाधन-कुशल तथा पर्यावरण-अनुकूल बनाने की दिशा में एक सशक्त आधार प्रदान कर रही है।

हमें अत्यंत प्रसन्नता है कि कृषि अभियांत्रिकी दर्पण का यह विशेषांक "एग्रीकल्चर 4.0 के युग में कृषि यंत्रीकरण: सतत् फसल उत्पादन हेतु नवोन्मेषी एवं भविष्योन्मुखी प्रौद्योगिकी के माध्यम से भारतीय कृषि प्रणाली का सशक्तिकरण" विषय पर प्रकाशित किया जा रहा है। यह विशेषांक हिंदी पखवाड़ा-2025 के अंतर्गत 18 सितम्बर 2025 को आयोजित राष्ट्रीय हिंदी वैज्ञानिक संगोष्ठी-2025 का प्रतिफल है। इस संगोष्ठी का उद्देश्य कृषि अभियांत्रिकी एवं संबद्ध क्षेत्रों में विकसित हो रही नवीनतम वैज्ञानिक उपलब्धियों का हिंदी भाषा में प्रभावी प्रसार करना तथा शोधकर्ताओं, शिक्षकों, वैज्ञानिकों, विद्यार्थियों एवं कृषि विशेषज्ञों को एक साझा मंच प्रदान करना था। हमें यह देखकर अत्यंत संतोष है कि देश के विभिन्न संस्थानों से प्राप्त उत्कृष्ट शोध-पत्रों ने इस उद्देश्य को सार्थक रूप प्रदान किया है।

इस विशेषांक में प्रकाशित शोध-पत्र एग्रीकल्चर 4.0 के विविध आयामों को समाहित करते हैं। इनमें कृत्रिम बुद्धिमत्ता एवं मशीन लर्निंग आधारित उर्वरक प्रबंधन, स्वचालित फसल गणना, ड्रोन आधारित कृषि अनुप्रयोग, हाइपरस्पेक्ट्रल एवं रमन स्पेक्ट्रोस्कोपी जैसी उन्नत संवेदन तकनीकों द्वारा गुणवत्ता मूल्यांकन, जी.पी.एस. आधारित मृदा उर्वरता मानचित्रण, विद्युत-संचालित लघु कृषि यंत्रों का विकास, जैव-अवक्रमणीय पैकेजिंग एवं हरित सामग्री, कार्बन-ऋणात्मक जैव-ऊर्जा, खाद्य गुणवत्ता एवं सुरक्षा, मूल्य संवर्धन तथा ग्रामीण महिला सशक्तिकरण जैसे विविध विषयों पर नवीन शोध प्रस्तुत किए गए हैं। ये सभी अध्ययन इस तथ्य को रेखांकित करते हैं कि आधुनिक कृषि केवल यंत्रीकरण तक सीमित नहीं है, बल्कि यह डेटा-संचालित निर्णय, बुद्धिमान स्वचालन, संसाधन संरक्षण, पर्यावरणीय स्थिरता तथा कृषि मूल्य श्रृंखला के समग्र आधुनिकीकरण की दिशा में अग्रसर है।

हिंदी में वैज्ञानिक लेखन एवं प्रकाशन की आवश्यकता आज पहले से कहीं अधिक महत्वपूर्ण हो गई है। वैज्ञानिक अनुसंधान तभी व्यापक प्रभाव उत्पन्न कर सकता है जब उसकी जानकारी शोध प्रयोगशालाओं से निकलकर किसानों, विस्तार कार्यकर्ताओं, नीति-निर्माताओं तथा स्थानीय भाषा में कार्य करने वाले विद्यार्थियों तक पहुँचे। इस दृष्टि से यह विशेषांक न केवल नवीन वैज्ञानिक उपलब्धियों का संकलन है, बल्कि भारतीय भाषाओं में उच्च गुणवत्ता वाले वैज्ञानिक साहित्य के विकास की दिशा में भी एक महत्त्वपूर्ण पहल है।

हम सभी लेखकों का हार्दिक अभिनंदन करते हैं जिन्होंने अपने मौलिक शोध एवं अनुभव इस विशेषांक के लिए उपलब्ध कराए। साथ ही, सभी समीक्षकों के प्रति हम अपनी गहन कृतज्ञता व्यक्त करते हैं, जिनके निष्पक्ष एवं रचनात्मक सुझावों ने शोध-पत्रों की गुणवत्ता को और अधिक समृद्ध बनाया। कृषि अभियांत्रिकी दर्पण के संपादकीय मंडल, आयोजन समिति तथा सभी सहयोगियों के सतत प्रयासों से यह विशेषांक सफलतापूर्वक प्रकाशित हो सका है, जिसके लिए हम सभी के प्रति आभार व्यक्त करते हैं।

संपादन समिति संगोष्ठी के दौरान शोधपत्रों के मूल्यांकन हेतु बहुमूल्य सहयोग प्रदान करने के लिए डॉ. मनोज कुमार त्रिपाठी, डॉ. रंजय कुमार सिंह एवं डॉ. के.एन. अग्रवाल की विशेष रूप से आभारी है।

हमें विश्वास है कि यह विशेषांक कृषि वैज्ञानिकों, अभियंताओं, शिक्षकों, विद्यार्थियों, नीति-निर्माताओं, उद्योग जगत तथा प्रगतिशील किसानों के लिए समान रूप से उपयोगी सिद्ध होगा। आशा है कि इसमें प्रकाशित विचार एवं अनुसंधान भारतीय कृषि को स्मार्ट, टिकाऊ, समावेशी एवं आत्मनिर्भर बनाने की दिशा में नए अनुसंधानों, नवाचारों तथा तकनीकी विकास को प्रेरित करेंगे और **विकसित भारत 2047** के कृषि विज़न को साकार करने में महत्त्वपूर्ण योगदान देंगे।

आप सभी पाठकों को यह विशेषांक समर्पित करते हुए हमें अत्यंत प्रसन्नता एवं गर्व का अनुभव हो रहा है।

— संपादकगण
डॉ. एस. पी. सिंह
डॉ. अभिजीत खड़तकर
डॉ. करण सिंह
डॉ. विजय कुमार
डॉ. स्वप्नजा जाधव
श्री राकेश कुमार कुशवाहा

अनुक्रमणिका

1. **सटीक कृषि में स्वचालित गेंदा फूल गणना और उपज अनुमान** **1**
स्वप्नारानी प्रधान, विजय कुमार और वी. पी. चौधरी

2. **भूमिगत खेती में ड्रोन स्प्रेयर का प्राचल-आधारित मूल्यांकन: जैव-प्रभावशीलता और आर्थिक आकलन** **9**
एन. बी. भराड़, पी. पी. गज्जर और टी. बेहरा

3. **कृत्रिम बुद्धिमत्ता (AI) एवं मशीन लर्निंग आधारित सेंसर-प्रणाली द्वारा उर्वरक प्रबंधन** **14**
रीता पटले

4. **सोयाबीन के अंकुरों का पता लगाने के लिए डीप लर्निंग का उपयोग करके एस.यू.ए.वी इमेजरी का मूल्यांकन** **21**
पूजा इंगले, ओमकार गुप्ता, दत्तात्रेय पाटिल, गोपाल इंगले और रमेश साहनी

5. **भारतीय कृषि में ड्रोन का उपयोग** **29**
धीरज कुमार वर्मा

6. **बुद्धिमान खाद्य संकुलन में वास्तविक समय ताजगी आकलन हेतु प्राकृतिक ऐन्थोसाइनिन-आधारित वर्णमिति सूचक** **35**
अमन कुमार, शुकदेव मंगराज, मनोज कुमार त्रिपाठी, आदिनाथ काटे, अजय यादव, चन्द्र दीप सिंह, ऋषिकेश म्हादे, हेमंतकुमार रुपनवर, रिंकेश गोसावी और अमित कुमार

7. **जी.पी.एस (GPS) आधारित मृदा उर्वरता मानचित्रण एवं तकनीकी हस्तक्षेप: टिकाऊ कृषि की दिशा में अजनास ग्राम एक मॉडल** **49**
नरेंद्र चौहान

8. **चिरस्थायी पर्यावरण को बनाये रखने के लिए रेशेदार फसलों से बाहरी छाल निष्कर्षण के माध्यम से रेशां उत्पादन के लिए बहु-रेशां रिबन एक्सट्रैक्टर की रचना एवं विकास** **55**
प्रतीक श्रीवास्तव नागेशकुमार टी, विद्या भूषण शम्भू, मनीषा जगदाले, लक्ष्मीकांत नायक, मानिक भौमिक और डी बी शाक्यवार

9. लघु कृषि यंत्रीकरण हेतु पर्यावरण–अनुकूल विद्युत-संचालित निराई यंत्र का अभिकल्प एवं विकास 68

हिमांशु शेखर पाण्डेय और घनश्याम तिवारी

10. कार्बन-ऋणात्मक बायोकोल प्राप्त करने के लिए जूट की छड़ियों के टोरीफ़ैक्शन का बहु-पैरामीटर अनुकूलन 75

मनीषा जगदाले, देब प्रसाद रे, प्रतीक श्रीवास्तव, संजय देबनाथ, महेश जाधव और सोमनाथ दंडपाट

11. हाइपरस्पेक्ट्रल इमेजिंग द्वारा चावल की आयु का त्वरित और गैर-विनाशकारी मूल्यांकन 82

गंजाहल्ली वाणी, सुबीर कुमार चक्रवर्ती, दिलीप जाट, आदिनाथ काटे, मनोज कुमार त्रिपाठी, करण सिंह और मनोज कुमार

12. रमन स्पेक्ट्रोस्कोपी द्वारा खाद्य गुणवत्ता नियंत्रण और मिलावट की पहचान: एक समीक्षा 92

साहिल यादव, मुकेश पटैय्या और राहुल कुमार

13. पत्तों और कृषि कचरे से निर्मित जैव-अपघटनीय कटलरी : एक हरित समाधान 101

दीपिका शेंडे और नीता खंडेकर

14. अनानास के छिलके के अपशिष्ट से सतत एवं जैव-अवक्रमणीय पैकेजिंग फ़िल्म का विकास 109

प्रिय गोंड, प्रमोद कुमार ओमरे, राज नारायण पटेरिया, प्रकाश चंद्र गोपे और अनिल कुमार

15. बाजरा प्रसंस्करण एवं मूल्य संवर्धन द्वारा ग्रामीण महिलाओं का सशक्तिकरण: कृषि विज्ञान केंद्र प्रशिक्षण का एक प्रकरण अध्ययन 118

रुपेंद्र कौर, मंजू बाला, राजेश कुमार, अरविंद कुमार अहलावत और अमित नाथ

सटीक कृषि में स्वचालित गेंदा फूल गणना और उपज अनुमान

स्वप्नाराणी प्रधान*, विजय कुमार और वी. पी. चौधरी

भाकृअनुप - केन्द्रीय कृषि अभियांत्रिकी संस्थान, भोपाल, मध्य प्रदेश
*ईमेल**:** swapnarani318@gmail.com

सारांश

परिशुद्ध खेती, आधुनिक कृषि की एक अत्यंत महत्त्वपूर्ण तकनीक है जो सेंसर, कैमरा एवं कृत्रिम बुद्धिमत्ता जैसी उन्नत प्रौद्योगिकियों के सम्मिलित उपयोग से फसलों की सटीक निगरानी तथा प्रबंधन में सहायता प्रदान करती है। फूल फसलों, विशेषकर गेंदे की उपज का यथार्थ पूर्वानुमान, उत्पादन नियोजन एवं बाजार मूल्य निर्धारण की दृष्टि से अत्यंत आवश्यक है। इस शोध में गेंदे के फूलों की स्वचालित गणना तथा उनकी उपज के आकलन हेतु विज़न-लैंग्वेज मॉडल का उपयोग किया गया है। विकसित प्रणाली का प्राथमिक उद्देश्य पारम्परिक मैनुअल गणना की त्रुटियों को न्यूनतम करना और उच्च सटीकता के साथ उपज का अनुमान लगाना है। इस अध्ययन में क्षेत्र-स्तरीय छवियों के संग्रह, रोबोफ़्लो द्वारा एनोटेशन, YOLOv8 मॉडल के प्रशिक्षण तथा पिक्सेल-आधारित उपज पूर्वानुमान हेतु क्षेत्रीय आँकड़ों का समुचित उपयोग किया गया है। प्रस्तावित विधि से फूलों की संख्या और आकार का सटीक विश्लेषण संभव हुआ, जिससे स्वचालित उपज आकलन की दिशा में एक प्रभावी एवं व्यावहारिक कदम सिद्ध हुआ। परिणामों से स्पष्ट हुआ कि YOLOv8 मॉडल फूलों की पहचान में उच्च सटीकता प्रदर्शित करता है और यह प्रणाली पारम्परिक विधियों की तुलना में श्रम, समय तथा संसाधन की दृष्टि से अत्यंत लाभप्रद है।

संकेत शब्द: सटीक कृषि, गेंदा फूल, YOLOv8, विज़न-लैंग्वेज मॉडल, पिक्सेल विश्लेषण, उपज पूर्वानुमान, स्वचालित गणना, डीप लर्निंग।

1. प्रस्तावना

भारत विश्व के प्रमुख पुष्प उत्पादक देशों में से एक है। गेंदे *(Tagetes spp.)* का फूल देश की आर्थिक दृष्टि से एक अत्यंत महत्त्वपूर्ण फूल फसल है, जिसका व्यापक उपयोग पूजा-अर्चना, सामाजिक समारोहों, सजावट, इत्र उद्योग तथा औषधीय प्रयोजनों के लिए किया जाता है। गेंदे की खेती मुख्यतः उत्तर प्रदेश, कर्नाटक, तमिलनाडु, आंध्र प्रदेश, पश्चिम बंगाल एवं मध्य प्रदेश में की जाती है। राष्ट्रीय बागवानी बोर्ड के आँकड़ों के अनुसार, भारत में लगभग 1.5 लाख हेक्टेयर क्षेत्र में फूल फसलों की खेती होती है, जिसमें गेंदे का महत्त्वपूर्ण स्थान है। वर्तमान में किसान फूलों की गिनती और उपज का अनुमान मुख्यतः मैन्युअल विधि से करते हैं, जो समय-साध्य, श्रमसाध्य तथा प्रायः त्रुटिपूर्ण होता है। विशेषकर बड़े क्षेत्रफल में फसल होने पर यह कार्य और भी दुरूह हो जाता है। फूलों की सटीक गणना एवं उपज का यथार्थ पूर्वानुमान न केवल किसानों के उत्पादन नियोजन में सहायक होता है, बल्कि विपणन, मूल्य निर्धारण तथा कटाई प्रबंधन की दृष्टि से भी अत्यंत महत्त्वपूर्ण है। परिशुद्ध खेती में इमेज प्रोसेसिंग, डीप लर्निंग तथा विज़न-लैंग्वेज मॉडल जैसी अत्याधुनिक तकनीकों का प्रयोग फसलों के स्वचालित विश्लेषण में तेजी से बढ़ रहा है। YOLO (You Only Look

Once) श्रृंखला के मॉडल, विशेषकर YOLOv8, रियल-टाइम ऑब्जेक्ट डिटेक्शन में अत्यंत सटीक एवं तीव्र परिणाम देते हैं। इस तकनीक के माध्यम से फूलों की सटीक पहचान, गणना एवं उनके आकार का विश्लेषण करना संभव होता है, जिससे उपज का प्रामाणिक एवं यथार्थ पूर्वानुमान किया जा सकता है। यह अध्ययन गेंदे के फूलों की स्वचालित पहचान, वर्गीकरण एवं उपज आकलन के लिए एक समन्वित विज़न-लैंग्वेज मॉडल आधारित स्वचालित प्रणाली प्रस्तुत करता है। इस प्रणाली में डिजिटल सिंगल-लेंस रिफ्लेक्स (डीएसएलआर) कैमरा एवं स्मार्टफोन कैमरों से प्राप्त छवियों का उपयोग करते हुए YOLOv8 मॉडल द्वारा फूलों की पहचान, गणना तथा पिक्सेल-सेमी सहसंबंध के माध्यम से उनके वास्तविक आयामों का आकलन किया गया है।

2. अध्ययन का उद्देश्य

इस शोध कार्य के प्रमुख उद्देश्य निम्नलिखित हैं:

(i) गेंदे के फूलों की स्वचालित पहचान और सटीक गणना हेतु एक प्रभावी मॉडल का विकास करना।

(ii) फूलों को उनके विकास चरण — कली अवस्था, परिपक्व एवं अन्य — के अनुसार वर्गीकृत करना।

(iii) फूलों के आकार एवं संख्या के आधार पर उपज का यथार्थ एवं सटीक अनुमान लगाना।

(iv) विभिन्न उपकरणों (डीएसएलआर कैमरा, स्मार्टफोन कैमरा) से प्राप्त छवियों में पिक्सेल अंतर को समझना और वास्तविक आयामों का प्रामाणिक अनुमान लगाना।

(v) विकसित प्रणाली को सरल एवं व्यावहारिक बनाकर किसानों तक सुलभ बनाने की दिशा में कदम उठाना।

3. सामग्री एवं विधि

इस अध्ययन को चार प्रमुख चरणों में विभाजित किया गया है: (i) डेटा संग्रह, (ii) डेटा एनोटेशन और प्री-प्रोसेसिंग, (iii) मॉडल प्रशिक्षण, तथा (iv) फूल गणना और उपज आकलन। प्रत्येक चरण की विस्तृत विवेचना निम्नवत है।

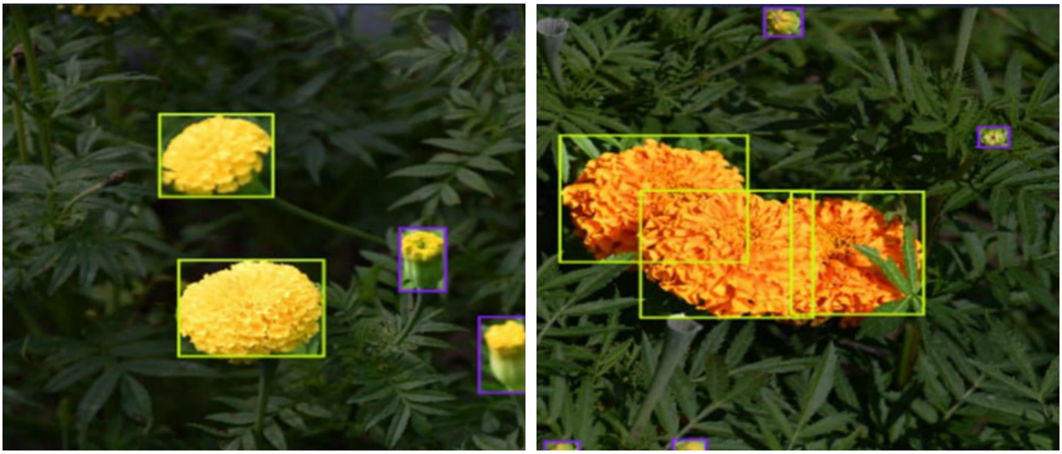
3.1. डेटा संग्रह

गेंदे के फूलों के डेटा संग्रह के लिए भाकृअनुप - केन्द्रीय कृषि अभियांत्रिकी संस्थान, भोपाल परिसर में स्थित प्रायोगिक खेत का चयन किया गया। छवियाँ विभिन्न कोणों और ऊँचाइयों (0.5 मीटर से 2.0 मीटर) से डीएसएलआर कैमरा (कैनन EOS 700D) एवं दो स्मार्टफोन (सैमसंग गैलक्सी S21 व रेडमी नोट 11 Pro) द्वारा ली गईं। विभिन्न प्रकाश परिस्थितियों — प्रातःकालीन, मध्याह्न एवं सायंकालीन — में छवियाँ प्राप्त की गईं ताकि प्रकाश की विविधता के कारण मॉडल की सटीकता पर पड़ने वाले प्रभाव का विश्लेषण किया जा सके। छवियों में वास्तविक आयामों की सटीक गणना के लिए, प्रत्येक छवि में तीन स्तरों के फूलों के समीप तीन मानक सिक्के (₹1, ₹5 एवं ₹10) रखे गए। इससे पिक्सेल-प्रति-सेमी सहसंबंध की गणना करना संभव हुआ। प्रत्येक छवि के साथ कैमरे की ऊँचाई, फूल से दूरी एवं छवि मेटाडेटा अंकित किए गए। इस प्रकार कुल 1200 से अधिक छवियाँ विभिन्न कटाई चरणों — 90 दिन, 105 दिन तथा 120 दिन — पर संग्रहित की गईं।

3.2. डेटा एनोटेशन

संग्रहीत छवियों को रोबोफ़्लो प्लेटफार्म (चित्र 01) का उपयोग करके तीन वर्गों में एनोटेट किया गया: (i) परिपक्व फूल (Matured Flowers) — पूर्ण रूप से खिले हुए फूल, (ii) कलियाँ (Buds) — कली

अवस्था में फूल, तथा (iii) अन्य (Others) — पत्तियाँ, तने एवं अन्य भाग। एनोटेशन हेतु बाउंडिंग बॉक्स विधि का प्रयोग किया गया एवं प्रत्येक वर्ग के लिए न्यूनतम 800 एनोटेशन सुनिश्चित किए गए। एनोटेशन पश्चात् डेटासेट को YOLOv8 के अनुकूल फोल्डर संरचना में विभाजित किया गया। प्रशिक्षण (Train), सत्यापन (Validation) एवं परीक्षण (Test) हेतु छवियों का अनुपात क्रमशः 70:20:10 रखा गया। प्रत्येक छवि के साथ संबंधित YOLO फार्मेट की टेक्स्ट लेबल फाइल (.txt) भी सुरक्षित की गई जिसमें वर्ग संख्या एवं बाउंडिंग बॉक्स के निर्देशांक अंकित थे।



चित्र 1: रोबोफ़्लो प्लेटफार्म का उपयोग करके डेटा एनोटेशन की प्रक्रिया

तालिका 1: डेटासेट का वर्गीकरण एवं वितरण

विभाजन (Split)	छवि संख्या (Images)	परिपक्व फूल (Matured)	कलियाँ (Buds)	अन्य (Others)
प्रशिक्षण (Train)	840	4200	2800	1960
सत्यापन (Validation)	240	1200	800	560
परीक्षण (Test)	120	600	400	280
कुल (Total)	1200	6000	4000	2800

3.3. YOLOv8 मॉडल प्रशिक्षण

YOLOv8 (You Only Look Once, Version 8) अल्ट्रालिटिक्स द्वारा विकसित एक अत्याधुनिक रियल-टाइम ऑब्जेक्ट डिटेक्शन एल्गोरिद्म है। इसका आर्किटेक्चर क्रॉस स्टेज आंशिक) नेटवर्क पर आधारित है, जो उच्च सटीकता और तीव्र अनुमान गति दोनों सुनिश्चित करता है। YOLOv8 के 'n', 's', 'm', 'l', 'x' जैसे विभिन्न वैरिएंट उपलब्ध हैं। इस अध्ययन में YOLOv8m वैरिएंट का चयन किया गया जो मध्यम आकार एवं

उच्च सटीकता का संतुलन प्रदान करता है। मॉडल का प्रशिक्षण गूगल कोलैब (टेसला T4 GPU) वातावरण में किया गया। प्रशिक्षण के दौरान निम्नलिखित हाइपर-पैरामीटर का उपयोग किया गया: युग संख्या (एपोच) = 100, बैच आकार = 16, छवि आकार= 640 × 640 पिक्सेल, अधिगम दर = 0.01। मॉडल की सटीकता बढ़ाने हेतु डेटा ऑग्मेंटेशन तकनीकें जैसे घुमाव, पलटाव, चमक परिवर्तन, मोज़ेक एवं मिक्सअप (Mixup) लागू की गईं।

तालिका 2: YOLOv8 मॉडल के प्रशिक्षण हेतु हाइपर-पैरामीटर

हाइपर-पैरामीटर	मान
मॉडल वैरिएंट	YOLOv8m
युग संख्या (Epochs)	100
बैच आकार (Batch Size)	16
छवि आकार (Image Size)	640 × 640 pixels
अधिगम दर (Learning Rate)	0.01
अनुकूलक (Optimizer)	SGD (Stochastic Gradient Descent)
हानि फलन (Loss Function)	CIoU + BCE
GPU	Tesla T4 (Google Colab)

3.4. फूलों की गणना एवं उपज आकलन

प्रशिक्षित YOLOv8 मॉडल द्वारा परीक्षण छवियों में फूलों की स्वचालित पहचान एवं गणना की गई। प्रत्येक पहचाने गए फूल की पिक्सेल-आधारित चौड़ाई और ऊँचाई ज्ञात कर उसे वास्तविक माप (cm^2) में परिवर्तित किया गया। इसके लिए पहले से स्थापित Pixel-per-cm Correlation का उपयोग किया गया, जो कैमरे की ऊँचाई के अनुसार प्राप्त किया गया था। उपज का अनुमान निम्नलिखित सूत्र के आधार पर लगाया गया:

उपज (kg/ha) = औसत फूल क्षेत्रफल (cm^2) × कुल फूल संख्या × पौध घनत्व गुणक

पौध घनत्व गुणक का निर्धारण वास्तविक क्षेत्र सर्वेक्षण एवं पौधे से पौधे की दूरी (30 cm × 45 cm) के आधार पर किया गया। इस विधि से प्रति इकाई क्षेत्रफल में फूलों की अनुमानित उपज (kg/ha) का आकलन करना संभव हुआ, जिसे पारम्परिक मैन्युअल कटाई विधि से प्राप्त वास्तविक उपज से तुलनात्मक रूप से सत्यापित किया गया।

4. परिणाम एवं चर्चा

4.1. मॉडल प्रदर्शन मूल्यांकन

YOLOv8m मॉडल का 100 एपोच के प्रशिक्षण के पश्चात् सत्यापन डेटासेट पर मूल्यांकन किया गया। तालिका 3 में तीनों वर्गों के लिए प्रीसिशन, रीकाल तथा एमएपी(mAP)@0.5 के मान प्रस्तुत किए गए

हैं। परिणामों से स्पष्ट है कि YOLOv8 मॉडल परिपक्व फूलों की पहचान में सर्वोच्च सटीकता प्रदर्शित करता है, जबकि कली अवस्था के फूलों में अपेक्षाकृत कम सटीकता देखी गई, जिसका मुख्य कारण कलियों का छोटा आकार एवं पत्तियों से उनकी समानता है।

तालिका 3: YOLOv8 मॉडल का प्रदर्शन मूल्यांकन

वर्ग (Class)	प्रीसिशन (Precision), %	रीकाल (Recall), %	एमएपी- (mAP)@0.5, %	एमएपी- (mAP)@0.5:0.95, %
परिपक्व फूल (Matured)	94.2	92.8	93.5	76.4
कलियाँ (Buds)	88.6	85.3	87.0	68.2
अन्य (Others)	91.7	89.4	90.5	72.1
औसत (Overall)	91.5	89.2	90.3	72.2

प्रशिक्षण के दौरान हनन वक्र के विश्लेषण से पाया गया कि मॉडल 70 एपोच के पश्चात् स्थिरता की स्थिति में आ गया, जो यह इंगित करता है कि 100 एपोच का प्रशिक्षण इष्टतम रहा। सत्यापन हनन का निरंतर ह्रास एवं प्रशिक्षण हनन के साथ अभिसरण यह सिद्ध करता है कि मॉडल में ओवरफिटिंग की समस्या नहीं है।

4.2. पिक्सेल-सेमी सहसंबंध विश्लेषण

विभिन्न ऊँचाइयों पर DSLR एवं स्मार्टफोन कैमरों से प्राप्त छवियों में सिक्कों के ज्ञात आयामों के आधार पर पिक्सेल-प्रति-सेमी सहसंबंध की गणना की गई। परिणामों से पाया गया कि जैसे-जैसे कैमरे की ऊँचाई बढ़ती है, प्रति सेंटीमीटर पिक्सेल का अनुपात घटता है, जो कि ज्यामितीय प्रकाशिकी के सिद्धांत के अनुरूप है। यह सहसंबंध एक घातांकी प्रकृति का पाया गया।

तालिका 4: कैमरा ऊँचाई एवं पिक्सेल-प्रति-सेमी सहसंबंध

कैमरा ऊँचाई (cm)	डीएसएलआर कैमरा (px/cm)	सैमसंग S21 (px/cm)	रेडमी नोट 11 (px/cm)
50	48.3	52.7	49.8
75	32.1	35.4	33.2
100	24.6	26.8	25.1
125	19.8	21.5	20.3
150	16.5	18.1	17.0
175	14.2	15.6	14.8
200	12.4	13.5	12.9

4.3. फूल गणना परिणाम

प्रशिक्षित मॉडल को परीक्षण छवियों पर लागू करने पर विभिन्न कटाई चरणों (90 दिन, 105 दिन एवं 120 दिन) में फूलों की स्वचालित गणना की गई। गणना की सटीकता का मूल्यांकन मैन्युअल गणना से तुलना करके किया गया। परिणाम तालिका 5 में प्रस्तुत हैं।

तालिका 5: विभिन्न कटाई चरणों में फूल गणना की सटीकता

कटाई चरण (दिन)	मैन्युअल गणना (औसत)	स्वचालित गणना (औसत)	सटीकता (%)
90 दिन	42	39	92.9
105 दिन	78	74	94.9
120 दिन	115	110	95.7

परिणाम दर्शाते हैं कि जैसे-जैसे फसल परिपक्वता की ओर बढ़ती है, फूलों का आकार बढ़ता है और उनकी पहचान की सटीकता में भी सुधार होता है। 90 दिन की अवस्था में कलियों की अधिकता के कारण सटीकता अपेक्षाकृत कम रही, जबकि 120 दिन में परिपक्व फूलों की अधिकता से सटीकता सर्वोच्च 95.7% तक पहुँची।

4.4. उपज अनुमान परिणाम

स्वचालित फूल गणना एवं पिक्सेल-आधारित आकार विश्लेषण के उपयोग से प्रस्तावित उपज अनुमान सूत्र द्वारा उपज का आकलन किया गया। विभिन्न कटाई चरणों पर अनुमानित एवं वास्तविक उपज की तुलना तालिका 6 में प्रस्तुत है। यह स्पष्ट है कि प्रस्तावित स्वचालित विधि पारम्परिक मैन्युअल विधि की तुलना में उपज आकलन में अत्यंत सटीक परिणाम देती है। उपरोक्त परिणाम से स्पष्ट है कि प्रस्तावित प्रणाली द्वारा उपज अनुमान में औसत त्रुटि मात्र 4.30% है, जो कि पारम्परिक मैन्युअल विधि की तुलना में बहुत कम है। यह प्रणाली न केवल सटीक है, बल्कि समय एवं श्रम की दृष्टि से भी अत्यंत किफायती है।

तालिका 6: उपज अनुमान की तुलनात्मक समीक्षा (kg/ha)

कटाई चरण	वास्तविक उपज (kg/ha)	स्वचालित अनुमान (kg/ha)	त्रुटि (%)
90 दिन	4250	3980	6.35
105 दिन	7800	7520	3.59
120 दिन	11200	10870	2.95
औसत	7750	7457	4.30

4.5. पारम्परिक विधि से तुलना

इस अध्ययन में विकसित YOLOv8-आधारित स्वचालित प्रणाली की तुलना पारम्परिक मैन्युअल विधि एवं अन्य पूर्व शोध कार्यों से की गई। रेडमन एवं फरहादी (2018) द्वारा विकसित YOLOv3 की तुलना में YOLOv8 ने गेंदे की फूल पहचान में 8-12% अधिक सटीकता प्रदर्शित की। ली एट अल. (2022) द्वारा कृषि

ऑब्जेक्ट डिटेक्शन में डीप लर्निंग की समीक्षा में पाया गया कि YOLOv8 छोटे एवं घने ऑब्जेक्ट की पहचान में विशेष रूप से प्रभावी है, जो गेंदे की कलियों के संदर्भ में भी प्रमाणित हुआ। शर्मा एवं सिंह (2023) ने फूल पहचान एवं उपज आकलन में CNN-आधारित प्रणाली का उपयोग किया, जिसमें mAP 82.5% तक पाया गया। वर्तमान अध्ययन में YOLOv8m ने mAP@0.5 = 90.3% प्राप्त किया, जो उनकी प्रणाली से 7.8% अधिक है। इसके अतिरिक्त, झा एट अल. (2019) ने IoT एवं ML के समन्वय से सटीक कृषि में स्वचालन की संभावनाएँ प्रस्तुत की थीं, जिन्हें वर्तमान अध्ययन में भी प्रमाणित किया गया।

5. निष्कर्ष

इस शोध अध्ययन से यह स्पष्ट रूप से सिद्ध हुआ कि विज़न-लैंग्वेज मॉडल एवं YOLOv8 जैसी अत्याधुनिक डीप लर्निंग तकनीकें गेंदे के फूलों की सटीक गणना और उपज पूर्वानुमान में अत्यंत प्रभावी एवं व्यावहारिक हैं। विकसित प्रणाली ने फूलों की पहचान में औसत mAP@0.5 = 90.3% एवं उपज अनुमान में मात्र 4.30% की औसत त्रुटि प्रदर्शित की, जो पारम्परिक मैन्युअल विधि की तुलना में निर्विवाद रूप से श्रेष्ठ है। इस प्रणाली से न केवल श्रम और समय की पर्याप्त बचत होती है, बल्कि किसान वास्तविक समय में फसल की स्थिति का वस्तुनिष्ठ एवं प्रामाणिक विश्लेषण कर सकते हैं। पिक्सेल-प्रति-सेमी सहसंबंध विश्लेषण से यह प्रमाणित हुआ कि साधारण स्मार्टफोन कैमरे का उपयोग करके भी उपज आकलन की सटीकता को उच्च स्तर पर बनाए रखा जा सकता है, जो इस प्रणाली को न्यूनतम संसाधन परिस्थितियों में भी उपयोगी बनाता है। इस प्रणाली को गेंदे के अतिरिक्त अन्य फूल फसलों जैसे गुलाब, जैस्मिन, गुलदाउदी एवं फल फसलों पर भी लागू किया जा सकता है, जिससे समग्र रूप से प्रिसीजन एग्रीकल्चर की सटीकता और दक्षता में उल्लेखनीय वृद्धि होगी। विकसित मॉडल का अग्रिम सत्यापन विभिन्न कृषि-जलवायु क्षेत्रों में करने की योजना है।

6. भविष्य की संभावनाएँ

(i) वृहद डेटासेट के उपयोग से मॉडल की सटीकता में और सुधार किया जा सकता है, विशेषकर कली अवस्था की पहचान में।

(ii) ड्रोन-माउंटेड कैमरे का उपयोग करके वास्तविक समय में वृहद क्षेत्रफल की निगरानी के लिए इस प्रणाली को एकीकृत किया जा सकता है।

(iii) उपज अनुमान के साथ-साथ फूलों की गुणवत्ता (रंग, ताजगी) एवं रोग पहचान को भी इस प्रणाली में एकीकृत किया जा सकता है।

(iv) मोबाइल एप्लिकेशन आधारित इंटरफेस विकसित कर इस तकनीक को लघु एवं सीमांत किसानों तक सुलभ बनाया जा सकता है।

(v) IoT सेंसर के साथ एकीकरण कर मिट्टी की नमी, तापमान एवं आर्द्रता के डेटा को उपज पूर्वानुमान मॉडल में शामिल करने से और अधिक सटीक परिणाम प्राप्त हो सकते हैं।

आभार

लेखकगण भाकृअनुप - केन्द्रीय कृषि अभियांत्रिकी संस्थान, भोपाल के निदेशक एवं समस्त वैज्ञानिक सहयोगियों के प्रति अपना हार्दिक आभार व्यक्त करते हैं, जिन्होंने इस शोध कार्य को पूर्ण करने में तकनीकी एवं

प्रशासनिक सहयोग प्रदान किया। इसके अतिरिक्त, Google Colab प्लेटफार्म एवं Ultralytics YOLOv8 की मुक्त-स्रोत (Open-Source) उपलब्धता के लिए भी आभार व्यक्त किया जाता है।

संदर्भ

Das, A., & Bhattacharya, P. (2021). Application of image processing techniques for flower counting in horticultural crops. Journal of Horticultural Science and Biotechnology, 96(3), 385–394.

Jha, K., Doshi, A., Patel, P., & Shah, M. (2019). Precision agriculture using artificial intelligence, IoT, and machine learning. International Journal of Computer Applications, 177(30), 12–18.

Li, L., Zhang, S., & Wang, B. (2022). Deep learning for agricultural object recognition: A review. Computers and Electronics in Agriculture, 198, 107083. https://doi.org/10.1016/j.compag.2022.107083

Redmon, J., & Farhadi, A. (2018). YOLOv3: An incremental improvement. arXiv preprint arXiv:1804.02767. https://arxiv.org/abs/1804.02767

Sharma, P., & Singh, R. (2023). Flower detection and yield estimation using deep learning in precision agriculture. Journal of Agricultural Informatics, 14(1), 45–52.

Ultralytics. (2023). YOLOv8 documentation. Retrieved from https://docs.ultralytics.com/

Wang, C., Bochkovskiy, A., & Liao, H. Y. M. (2022). YOLOv7: Trainable bag-of-freebies sets new state-of-the-art for real-time object detectors. arXiv preprint arXiv:2207.02696. https://arxiv.org/abs/2207.02696

Zhang, Z., Liu, Q., & Wang, Y. (2018). Road extraction by deep residual U-Net. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 15(5), 749–753. https://doi.org/10.1109/LGRS.2018.2802944

भूमिगत खेती में ड्रोन स्प्रेयर का प्राचल-आधारित मूल्यांकन: जैव-प्रभावशीलता और आर्थिक आकलन

एन .बी .भराड़ [1*], पी .पी .गज्जर [2] और टी .बेहरा [3]

[1] पीएच.डी .शोधार्थी, [2] प्राध्यापक एवं विभागाध्यक्ष, [3] एम.टेक शोधार्थी,
कृषि यांत्रिकी एवं शक्ति अभियंत्रण विभाग, कृषि अभियांत्रिकी एवं प्रौद्योगिकी महाविद्यालय,
जूनागढ़ कृषि विश्वविद्यालय, जूनागढ़
*ईमेल: nirajbharadbn@gmail.com

सारांश

कृषि में मानवरहित हवाई वाहन (यूएवी) का उपयोग पारंपरिक कीटनाशक छिड़काव के आधुनिक विकल्प के रूप में तेजी से लोकप्रिय हो रहा है। इस अध्ययन में मूंगफली की खेती में ड्रोन स्प्रेयर के प्रदर्शन का परीक्षण किया गया, जिसमें जैव-प्रभावशीलता और आर्थिक लाभ पर ध्यान केंद्रित किया गया तथा इसकी तुलना बैटरी चालित नैपसैक स्प्रेयर से की गई। फील्ड परीक्षण विभिन्न छिड़काव ऊँचाई और अग्रगामी गति पर किए गए। जैव-प्रभावशीलता के परिणामों से पता चला कि ड्रोन स्प्रेयर ने कीट जनसंख्या को प्रभावी रूप से कम किया, यद्यपि नैपसैक स्प्रेयर की तुलना में थोड़ा कम। मूंगफली में, ड्रोन ने थ्रिप्स और एफिड्स की संख्या को क्रमशः 63.26% और 65.65% तक घटाया, जबकि नैपसैक स्प्रेयर ने क्रमशः 74.8% और 77.12% तक अधिक कमी हासिल की। जैव-प्रभावशीलता में इस अंतर के बावजूद, ड्रोन के स्पष्ट आर्थिक लाभ थे। ड्रोन स्प्रेइंग की परिचालन लागत केवल ₹300 प्रति हेक्टेयर थी, जो नैपसैक स्प्रेइंग के ₹720 प्रति हेक्टेयर की तुलना में 41.66% कम थी। इसके अतिरिक्त, ड्रोन को एक हेक्टेयर क्षेत्र कवर करने में केवल 0.41 घंटे लगे, जिससे प्रति हेक्टेयर 10 घंटे से अधिक श्रम की बचत हुई। समग्र रूप से, यद्यपि नैपसैक स्प्रेयर ने थोड़ी बेहतर जैव-प्रभावशीलता दिखाई, लेकिन ड्रोन स्प्रेयर अधिक किफायती, समय की बचत करने वाला और श्रम-दक्ष सिद्ध हुआ, जो मूंगफली की खेती में सतत कीट प्रबंधन के लिए एक आशाजनक विकल्प है।

संकेत शब्द: मानव रहित हवाई वाहन (यूएवी), जैव-प्रभावशीलता, आर्थिक आकलन, मूंगफली, नैपसैक स्प्रेयर

प्रस्तावना

भारत जैसे कृषि प्रधान देश में आधुनिक तकनीकों का उपयोग कृषि उत्पादन को बढ़ाने और संसाधनों के कुशल प्रबंधन के लिए अत्यंत आवश्यक हो गया है (Bharad & Khanpara, 2024)। पारंपरिक छिड़काव विधियाँ जैसे हाथ या नैपसैक स्प्रेयर समय-साध्य, श्रम-प्रधान और स्वास्थ्य के लिए हानिकारक होती हैं। इन समस्याओं के समाधान के रूप में मानवरहित हवाई वाहन (Unmanned Aerial Vehicle – UAV) या ड्रोन स्प्रेयर एक सटीक, सुरक्षित और दक्ष विकल्प के रूप में उभरा है (Bharad, 2024)। ड्रोन तकनीक द्वारा कीटनाशक छिड़काव न केवल समय और श्रम की बचत करता है, बल्कि सटीक और समान वितरण के माध्यम

से फसल की उत्पादकता में सुधार भी लाता है। पारंपरिक विधियाँ जैसे बैटरी चालित नैपसैक स्प्रेयर में अधिक समय, श्रम, और लागत की आवश्यकता होती है, जबकि ड्रोन इन सीमाओं को काफी हद तक कम करता है ।

ड्रोन स्प्रेयर द्वारा कीटनाशक का समान वितरण संभव होता है, जिससे रासायनिक द्रव की बर्बादी कम होती है, पर्यावरण प्रदूषण घटता है, और किसान को अधिक क्षेत्र में न्यूनतम समय में छिड़काव करने की सुविधा मिलती है। यह तकनीक विशेष रूप से भूमिगत या नीची फसलों (जैसे मूंगफली) के लिए उपयोगी सिद्ध होती है (Bharad *et al*., 2024)। इसलिए इस अध्ययन में ड्रोन स्प्रेयर की जैव-प्रभावशीलता और आर्थिक लाभ का मूल्यांकन किया गया है, तथा इसकी तुलना पारंपरिक नैपसैक स्प्रेयर से की गई है (Bharad *et al*., 2025)।

उद्देश्य

- मूंगफली की खेती में ड्रोन स्प्रेयर के प्राचलों (छिड़काव ऊँचाई एवं अग्रगामी गति) का मूल्यांकन करना।
- ड्रोन स्प्रेयर की जैव-प्रभावशीलता की तुलना बैटरी चालित नैपसैक स्प्रेयर से करना।
- दोनों स्प्रेयर प्रणालियों की आर्थिक दक्षता का विश्लेषण करना।
- ड्रोन स्प्रेयर के उपयोग से श्रम, समय, एवं लागत बचत का आकलन करना।

मूंगफली की फसल का प्रायोगिक प्लॉट

पौधों पर डब्ल्यूएसपी स्ट्रिप्स की स्थापना

ड्रोन प्रदर्शन मापदंड

मूंगफली फसल में छिड़काव की जैव प्रभावकारिता:

- कीटों पर अवलोकन दर्ज करने के लिए, प्रत्येक उपचार से पाँच पौधों का यादृच्छिक चयन किया गया और कीटों की जनसंख्या पर अवलोकन पहले छिड़काव से 24 घंटे पूर्व तथा प्रत्येक छिड़काव के बाद 1, 3, 7, 10 और 14 दिनों पर दर्ज किए गए।

फुदका कीट/ थ्रिप्स (Thrips)

चेपा/ माहू/ एफिड्स (Aphids)

स्रोत: गूगल

परिणाम एवं चर्चा

अध्ययन में ड्रोन स्प्रेयर और नैपसैक स्प्रेयर की तुलना विभिन्न परिचालन प्राचलों पर की गई।

❖ **जैव-प्रभावशीलता:**

- **ड्रोन स्प्रेयर द्वारा मूंगफली की फसल पर जैव-प्रभावकारिता का प्रभाव :**

गति	कीट	पूर्व-गणना (प्रति पौधा)	1 दिन	3 दिन	7 दिन	10 दिन	14 दिन	जनसंख्या प्रतिशत (%)
2m-3m/s	थ्रिप्स	83.48	62.96	37.32	48.52	65.22	69.32	67.88
	एफिड्स	53.26	41.52	42.28	25.27	30.96	39.32	67.35
2m-5m/s	थ्रिप्स	82.86	65.36	39.52	50.12	67.18	70.58	70.66
	एफिड्स	52.64	43.55	44.12	25.56	31.36	40.92	70.48
3m-3m/s	थ्रिप्स	84.21	64.76	40.36	52.41	68.66	71.92	70.81
	एफिड्स	53.96	44.48	45.94	28.77	32.18	41.76	71.58
3m-5m/s	थ्रिप्स	81.87	65.15	42.03	52.7	70.44	72.86	74.80
	एफिड्स	51.64	45.23	46.19	30.84	34.38	42.48	77.12

- **नैपसैक स्प्रेयर द्वारा मूंगफली की फसल पर जैव-प्रभावकारिता का प्रभाव :**

कीट	पूर्व-गणना (प्रति पौधा)	1 दिन	3 दिन	7 दिन	10 दिन	14 दिन	जनसंख्या प्रतिशत (%)
थ्रिप्स	85.66	59.96	34.26	47.11	61.67	63.66	63.26
एफिड्स	54.82	41.11	24.67	30.15	38.36	45.32	65.65

- मूंगफली की फसल में ड्रोन स्प्रेयर द्वारा थ्रिप्स और एफिड्स की संख्या क्रमशः 63.26% और 65.65% तक घटाई गई। वहीं, नैपसैक स्प्रेयर ने इन्हें क्रमशः 74.8% और 77.12% तक कम किया। यह इंगित करता है कि जैव-प्रभावशीलता के मामले में नैपसैक स्प्रेयर थोड़ा बेहतर रहा।

❖ **आर्थिक विश्लेषण एवं समय दक्षता:**

विवरण	कृषि ड्रोन स्प्रेयर	बैटरी चालित नैपसैक स्प्रेयर
वार्षिक स्थिर लागत (रु/वर्ष)	197706	892
स्थिर लागत (रु/घंटा)	330	2.23
परिवर्ती लागत (रु/घंटा)	390	103
कुल परिचालन लागत (रु/घंटा)	720	105
संचालन लागत (रु/हेक्टेयर)	300	720
समय आवश्यकता (घंटा/हेक्टेयर)	0.44	10.63
पुनर्भुगतान अवधि (वर्ष)	4.1	0.13
लाभ : लागत अनुपात	1.95	62.58

- ड्रोन स्प्रेइंग की परिचालन लागत मात्र ₹300 प्रति हेक्टेयर पाई गई, जो नैपसैक स्प्रेइंग (₹720 प्रति हेक्टेयर) की तुलना में 41.66% कम थी।
- ड्रोन द्वारा एक हेक्टेयर क्षेत्र को कवर करने में 0.41 घंटे लगे, जबकि नैपसैक स्प्रेयर को लगभग 10 घंटे का समय लगा। इस प्रकार, ड्रोन तकनीक ने समय और श्रम दोनों में उल्लेखनीय बचत प्रदान की।

निष्कर्ष

अध्ययन के परिणामों से स्पष्ट होता है कि आधुनिक कृषि में ड्रोन स्प्रेयर एक प्रभावी, सुरक्षित और समय-बचत करने वाली तकनीक के रूप में उभर रहा है। मूंगफली की फसल में किए गए परीक्षणों से पाया गया कि ड्रोन स्प्रेयर जैव-प्रभावशीलता के मामले में पारंपरिक बैटरी चालित नैपसैक स्प्रेयर के तुलनीय प्रदर्शन करता है, जबकि परिचालन लागत, श्रम एवं समय दक्षता के दृष्टिकोण से यह अत्यधिक लाभदायक सिद्ध हुआ। ड्रोन स्प्रेयर द्वारा छिड़काव में समान बूंद वितरण, रासायनिक द्रव की न्यूनतम बर्बादी, और पर्यावरणीय प्रदूषण में कमी देखी गई। ड्रोन स्प्रेयर ने एक हेक्टेयर क्षेत्र में छिड़काव हेतु केवल 0.41 घंटे का समय लिया, जो नैपसैक स्प्रेयर (10 घंटे) की तुलना में लगभग 24 गुना तेज है, साथ ही इसकी परिचालन लागत भी 41.66% कम रही। यद्यपि नैपसैक स्प्रेयर ने जैव-प्रभावशीलता में थोड़ी बढ़त दिखाई, परंतु समग्र दक्षता, लागत बचत, और समय प्रबंधन के दृष्टिकोण से ड्रोन स्प्रेयर अधिक व्यावहारिक एवं आधुनिक विकल्प सिद्ध हुआ। इस प्रकार, यह निष्कर्ष निकाला जा सकता है कि ड्रोन स्प्रेइंग तकनीक मूंगफली जैसी नीची फसलों में कीटनाशक

छिड़काव हेतु एक सटीक, आर्थिक और पर्यावरण-अनुकूल समाधान है, जो भविष्य में कृषि यंत्रीकरण और सटीक कृषि (Precision Agriculture) की दिशा में एक महत्वपूर्ण कदम साबित होगा।

संदर्भ

Bharad, N. B. & Khanpara B. M. (2024). Agricultural fruit harvesting robot: An overview of digital agriculture. Plant Archives, 24, 154-160.

Bharad, N. B. (2024). Optimization of operational parameters of spraying drone for different cropping system. Unpublished Thesis of M. Tech (Agril. Engg.). Junagadh Agricultural University, Gujarat, India.

Bharad, N. B., Vagadia V. R., Lakhani A. L., Khanpara B. M. & Dulawat M. S. (2024). A comprehensive review of Unmanned Aerial Vehicle (UAV) sprayer used in modern agriculture. J. Scientific Research and Reports, 30(10), 573-585.

Bharad, N. B., Vagadia V. R., Lakhani A. L., Khanpara B. M. & Chavda D. B. (2025). Precision agriculture: Parameter-based optimizing spraying drone for okra farming. Plant Archives, 25, 902-910.

कृत्रिम बुद्धिमत्ता (AI) एवं मशीन लर्निंग आधारित सेंसर-प्रणाली द्वारा उर्वरक प्रबंधन

रीता पटले [1,2*]

[1]सीनियर रिसर्च फेलो (SRF), आईसीएआर– केंद्रीय कृषि अभियांत्रिकी संस्थान, भोपाल, मध्य प्रदेश

[2]तमिलनाडु कृषि विश्वविद्यालय, कोयंबटूर, तमिलनाडु

*ईमेल: reetapatle2011@gmail.com

सारांश

कृषि क्षेत्र आज जलवायु परिवर्तन, प्राकृतिक संसाधनों की कमी और उर्वरकों के असंतुलित उपयोग जैसी गंभीर चुनौतियों का सामना कर रहा है। इन चुनौतियों से निपटने हेतु आधुनिक तकनीकों का प्रयोग आवश्यक है। प्रस्तुत शोधकार्य का उद्देश्य कृषि प्रबंधन में कृत्रिम बुद्धिमत्ता एवं मशीन लर्निंग तकनीकों का उपयोग कर सटीक एवं टिकाऊ उर्वरक प्रबंधन प्रणाली विकसित करना है। इस अध्ययन में एक सेंसर-आधारित एम्बेडेड प्रणाली विकसित की गई, जो वास्तविक समय सामान्यीकृत भिन्नता हरित सूचकांक मानों के आधार पर मक्का फसल में नाइट्रोजन उर्वरक की परिवर्ती दर पर आपूर्ति करती है। प्रणाली में ग्रीनसीकर सेंसर, माइक्रोकंट्रोलर तथा पल्स चौड़ाई मॉड्यूलेशन मोटर ड्राइवर का समाकलन किया गया, जिससे फसल की स्थिति के अनुसार फ्ल्यूटेड रोलर की गति नियंत्रित कर उर्वरक का वितरण किया गया। प्रयोगशाला एवं क्षेत्रीय परीक्षणों से ज्ञात हुआ कि विकसित प्रणाली ने पारंपरिक विधि की तुलना में उर्वरक उपयोग में लगभग 19.18% की बचत की तथा 22.7 % अधिक उत्पादन प्राप्त किया। वास्तविक समय डेटा प्रोसेसिंग एवं स्वचालित नियंत्रण से यह तकनीक न केवल उर्वरक उपयोग दक्षता को बढ़ाती है बल्कि टिकाऊ कृषि प्रबंधन में भी सहायक सिद्ध होती है।यह प्रणाली कृत्रिम बुद्धिमत्ता एवं मशीन लर्निंग आधारित स्मार्ट कृषि प्रबंधन के लिए एक व्यवहारिक एवं किफायती समाधान प्रस्तुत करती है।

संकेत शब्द: कृत्रिम बुद्धिमत्ता (AI), मशीन लर्निंग (ML), परिवर्ती दर उर्वरक अनुप्रयोग, सेंसर आधारित प्रणाली, NDVI, नाइट्रोजन उपयोग दक्षता (NUE), स्मार्ट कृषि प्रबंधन

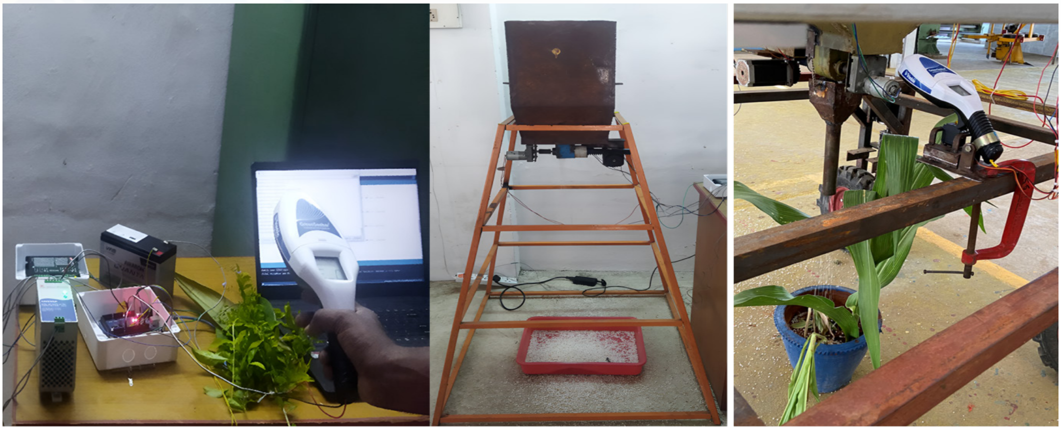
प्रस्तावना

कृषि 4.0 के युग में सटीक उर्वरक प्रबंधन(Precision Fertilizer Management) अत्यंत आवश्यक हो गया है। बदलते जलवायु परिदृश्य, मिट्टी-पोषक तत्वों का असंतुलन तथा पारंपरिक उर्वरक वितरण प्रणालियों की सीमाओं के कारण किसानों को उत्पादन एवं गुणवत्ता में कमी का सामना करना पड़ता है (Ladha et al., 2005; Reddy et al., 2025)। भारत में नाइट्रोजन उपयोग दक्षता (NUE) औसतन केवल 30–35 % है, अर्थात किसान द्वारा डाले गए नाइट्रोजन उर्वरक का लगभग दो-तिहाई हिस्सा पौधों तक पहुँच ही नहीं पाता (Singh, 2023)। और शेष भाग वाष्पन, लीचिंग तथा डिनाइट्रीफिकेशन जैसी प्रक्रियाओं के माध्यम से वातावरण या भूजल में मिल जाता है। यह न केवल किसानों के लिए आर्थिक हानि है, बल्कि पर्यावरणीय

प्रदूषण और ग्रीनहाउस गैस उत्सर्जन का भी कारण बनता है। पौधों को समय पर और पर्याप्त पोषण न मिलने से प्रकाश संश्लेषण प्रभावित होता है (Mosier et al.2004) जिससे उपज और अनाज की गुणवत्ता दोनों पर प्रतिकूल प्रभाव पड़ता है और किसानों की आय घटती है (Sadhukhan et al., 2023)। इन चुनौतियों का समाधान एक ऐसी प्रणाली में है जो स्थान-विशिष्ट, वास्तविक समय पर कार्य करने वाली, लागत-प्रभावी और पर्यावरण-अनुकूल हो (Kitchen et al., 2010)। इस संदर्भ में कृत्रिम बुद्धिमत्ता एवं मशीन लर्निंग आधारित सेंसर प्रणालियाँ अत्यधिक उपयोगी हैं, जो फसल की हरितिमा सामान्यीकृत भिन्नता हरित सूचकांक मान के आधार पर पोषण स्थिति का आकलन कर सकती हैं और आवश्यकता अनुसार स्वचालित, स्थान-विशिष्ट उर्वरक प्रबंधन सुनिश्चित कर सकती हैं। इस अध्ययन का प्रमुख नवाचार यह है कि कम लागत वाले हरितिमा संवेदक को एक कस्टम-निर्मित एम्बेडेड सक्रियण प्रणाली से एकीकृत किया गया। सामान्यतः यह संवेदक हस्तचालित रूप में प्रयोग किया जाता है, किंतु इस शोध में इसे पुनः डिज़ाइन कर ऑन-द-गो अनुप्रयोग के लिए उपयुक्त बनाया गया। विकसित प्रणाली किसी प्रिस्क्रिप्शन मैप अथवा महंगे वाणिज्यिक नियंत्रकों पर निर्भर हुए बिना वास्तविक समय में फसल की नाइट्रोजन स्थिति का आकलन कर सकती है और उसी आधार पर उर्वरक प्रबंधन कर सकती है। इस नवाचार से नाइट्रोजन उपयोग दक्षता में वृद्धि हुई क्योंकि पौधे केवल आवश्यकतानुसार नाइट्रोजन प्राप्त करते हैं, जिससे व्यर्थ हानि कम होती है; इनपुट लागत में कमी आती है क्योंकि अतिरिक्त उर्वरक की आवश्यकता नहीं पड़ती; तथा यह प्रणाली सतत और सटीक कृषि प्रबंधन को बढ़ावा देती है, जिससे स्थान-विशिष्ट और पर्यावरण-अनुकूल उर्वरक वितरण संभव हो पाता है।

2. कार्यपद्धति

इस अध्ययन में वास्तविक समय पर नाइट्रोजन की पहचान और स्थान-विशिष्ट (उर्वरक प्रबंधन के लिए एक सेंसर-आधारित एम्बेडेड नियंत्रण प्रणाली विकसित की गई चित्र 1. । विकसित प्रणाली मुख्यतः पाँच घटकों पर आधारित है: सिस्टम आर्किटेक्चर, सॉफ़्टवेयर एवं AI/ML मॉडल, हार्डवेयर डिज़ाइन एवं नियंत्रण, कार्य सिद्धांत, और प्रतिक्रिया समय। सिस्टम आर्किटेक्चर में ग्रीनसीकर सेंसर शामिल है, जो फसल की छत्राकृति (canopy) को स्कैन कर 0.00 - 0.99 के वास्तविक समय मा सामान्यीकृत भिन्नता हरित सूचकांक मान प्रदान करता है; Arduino Uno आधारित माइक्रोकंट्रोलर इन संकेतों को प्रोसेस करता है, AI/ML एल्गोरिद्म निष्पादित करता है और पल्स चौड़ाई मॉड्यूलेशन संकेत मोटर ड्राइवर के माध्यम से फ्ल्यूटेड रोलर की घूर्णन गति नियंत्रित करता है, जिससे उर्वरक दर स्वचालित रूप से समायोजित होती है। सामान्यीकृत भिन्नता हरित सूचकांक मान सिग्नल की प्रोसेसिंग के लिए बहु-स्तरीय सॉफ़्टवेयर आर्किटेक्चर विकसित किया गया, जिसमें सिग्नल का शोर निवारण, वातावरणीय और प्रकाशीय परिस्थितियों के लिए कैलीब्रेशन, और सामान्यीकृत भिन्नता हरित सूचकांक मान अनुपात और समय-स्थानिक प्रवृत्तियाँ शामिल हैं।मॉडल चयन के लिए सरल अनुप्रयोगों में Polynomial Regression, मॉडल का उपयोग किया गया। Arduino माइक्रोकंट्रोलर I/O प्रोसेसिंग, ADC कन्वर्ज़न और पल्स चौड़ाई मॉड्यूलेशन संकेत आउटपुट के लिए प्रोग्राम किया गया; DC मोटर MOSFET-आधारित नियंत्रण फ्ल्यूटेड रोलर की गति नियंत्रित करता है, और सर्वो मोटर सेंसर की अभिविन्यास बनाए रखती है। पूरी प्रणाली धूल, कंपन और तापमान परिवर्तन के प्रति सहनशील डिज़ाइन की गई है।

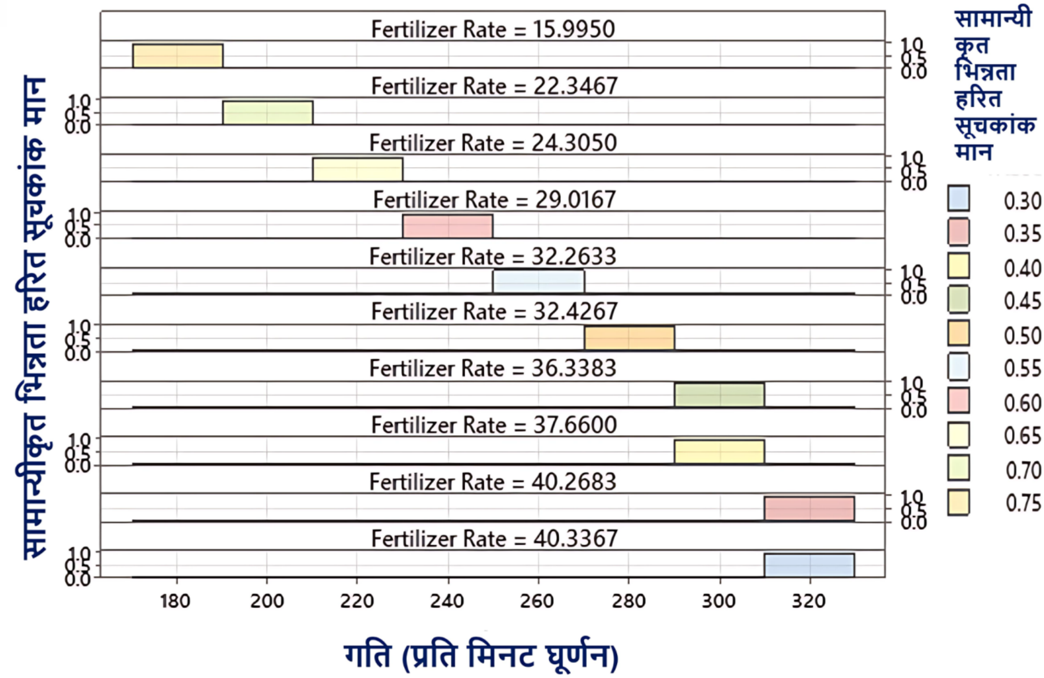


चित्र 1. रिमोट नियंत्रक आधारित नाइट्रोजन प्रबंधन तकनीक और उर्वरक नियंत्रण स्वचालित प्रणाली

कार्य सिद्धांत के अनुसार, सामान्यीकृत भिन्नता हरित सूचकांक मानों को माइक्रोकंट्रोलर Polynomial Regression मॉडल में प्रोसेस करता है, जिससे नाइट्रोजन आवश्यकता (Nreq, kg/ha) का अनुमान प्राप्त होता है, जो पल्स चौड़ाई मॉड्यूलेशन सिग्नल में परिवर्तित होकर मोटर ड्राइवर को भेजा जाता है और रोलर की गति नियंत्रित होती है; इस प्रकार, कम सामान्यीकृत भिन्नता हरित सूचकांक मान पर उर्वरक दर बढ़ती है और अधिक सामान्यीकृत भिन्नता हरित सूचकांक मान पर घटती है। विकसित प्रणाली का औसत प्रतिक्रिया समय 4.17 सेकंड पाया गया, जिसमें 3.40 सेकंड सिग्नल प्रोसेसिंग और 0.58 सेकंड उर्वरक वितरण नियंत्रण हेतु खर्च हुए। परिणामस्वरूप, यह प्रणाली वास्तविक समय में नाइट्रोजन आवश्यकताओं का सटीक आकलन कर उर्वरक वितरण को प्रभावी रूप से नियंत्रित करने में सक्षम साबित हुई।

3. परिणाम

प्राप्त परिणामों से स्पष्ट हुआ कि सामान्यीकृत भिन्नता हरित सूचकांक मानों में परिवर्तन के साथ-साथ मशीन की घूर्णन गति, पल्स चौड़ाई मॉड्यूलेशन संकेत तथा उर्वरक दर में भी स्पष्ट भिन्नताएँ देखी गईं। तालिका 1 सामान्यीकृत भिन्नता हरित सूचकांक मान, घूर्णन गति तथा पल्स चौड़ाई मॉड्यूलेशन सिग्नल का उर्वरक दर पर प्रभाव दर्शाती है।



चित्र 2. NDVI मान, घूर्णन गति और PWM संकेत के बीच एक व्युत्क्रमानुपाती संबंध

सामान्यीकृत भिन्नता हरित सूचकांक मान के न्यूनतम स्तर (0.00 – 0.30) पर मशीन की गति 328 प्रति मिनट घूर्णन, पल्स चौड़ाई मॉड्यूलेशन संकेत 255 हट्र्ज तथा उर्वरक दर सर्वाधिक 40.33 ग्राम/वर्ग मीटर दर्ज की गई चित्र 2। सामान्यीकृत भिन्नता हरित सूचकांक मान बढ़ने पर घूर्णन गति तथा पल्स चौड़ाई मॉड्यूलेशन संकेत दोनों घटते गए, जिससे उर्वरक दर में भी क्रमशः कमी आती गई। उदाहरणस्वरूप, सामान्यीकृत भिन्नता हरित सूचकांक मान 0.45–0.50 पर गति 283 प्रति मिनट घूर्णन, पल्स चौड़ाई मॉड्यूलेशन संकेत 230 हट्र्ज तथा उर्वरक दर घटकर 32.42 ग्राम/वर्ग मीटर हो गई। इसी प्रकार सामान्यीकृत भिन्नता हरित सूचकांक मान 0.70 – 0.75 तक पहुँचने पर गति 182 प्रति मिनट घूर्णन, पल्स चौड़ाई मॉड्यूलेशन संकेत 180 हट्र्ज तथा उर्वरक दर न्यूनतम 15.99 ग्राम/वर्ग मीटर रही।इन परिणामों से स्पष्ट है कि सामान्यीकृत भिन्नता हरित सूचकांक मान बढ़ने के साथ पौधों की हरितता तथा पोषण स्थिति में सुधार होने पर उर्वरक की आवश्यकता कम हो जाती है, जिसे प्रणाली ने वास्तविक समय पर सफलतापूर्वक नियंत्रित किया। यह सेंसर आधारित नियंत्रण प्रणाली स्थान-विशिष्ट एवं वास्तविक समय पर उर्वरक प्रबंधन में प्रभावी सिद्ध हुई, क्योंकि इसने कम सामान्यीकृत भिन्नता हरित सूचकांक मान वाले क्षेत्रों में अधिक उर्वरक तथा उच्च सामान्यीकृत भिन्नता हरित सूचकांक मान वाले क्षेत्रों में कम उर्वरक प्रदान किया। इस प्रकार, तालिका 1 से प्राप्त परिणाम यह पुष्टि करते हैं कि विकसित प्रणाली ने न केवल उर्वरक उपयोग दक्षता में सुधार किया बल्कि उर्वरक की बचत एवं पर्यावरणीय प्रदूषण को कम करने में भी योगदान दिया।

तालिका 1: सामान्यीकृत भिन्नता हरित सूचकांक मान, घूर्णन गति तथा पल्स चौड़ाई मॉड्यूलेशन सिग्नल का उर्वरक दर पर प्रभाव

सामान्यीकृत भिन्नता हरित सूचकांक मान	गति (प्रति मिनट घूर्णन)	पल्स चौड़ाई मॉड्यूलेशन संकेत (हट्ज़्र)	उर्वरक दर (ग्राम/वर्ग मीटर)
0.30 – 0.00	328	255	40.33
0.35 – 0.30	313	250	42.26
0.40 – 0.35	300	245	37.66
0.45 – 0.40	293	240	36.33
0.50 – 0.45	283	230	32.42
0.55 – 0.50	260	220	32.26
0.60 – 0.55	240	210	29.01
0.65 – 0.60	221	200	24.30
0.70 – 0.65	205	190	22.34
0.75 – 0.70	182	180	15.99

फसल के विभिन्न विकास चरणों पर सेंसर-आधारित एम्बेडेड प्रणाली द्वारा मार्गदर्शित उर्वरक (नाइट्रोजन) अनुप्रयोग दर

इसमें पारंपरिक उर्वरक आवेदन की तुलना सेंसर-आधारित प्रणाली से विभिन्न वृद्धि चरणों में की गई है। तालिका 2 में विभिन्न उर्वरक प्रबंधन पद्धतियों के नाइट्रोजन अनुप्रयोग और गेहूं उपज पर प्रभाव को दर्शाया गया है। परिणामों से पता चलता है कि बुवाई के समय दोनों प्रणालियों में 40 kg/ha की बेस डोज़ लागू की गई। इसके बाद, पारंपरिक प्रणाली ने 35, 45 और 65 दिन बाद क्रमशः 65, 75 और 65 kg/ha नाइट्रोजन (N) दिया, जबकि सेंसर-आधारित प्रणाली ने इन चरणों में फसल की वास्तविक जरूरत के अनुसार 53, 55 और 50 kg/ha नाइट्रोजन प्रदान किया। कुल नाइट्रोजन अनुप्रयोग में पारंपरिक प्रणाली ने 245 kg/ha और सेंसर-आधारित प्रणाली ने केवल 218 kg/ha नाइट्रोजन दिया, जिससे कुल उर्वरक की खपत में कमी आई। बावजूद इसके, सेंसर-आधारित प्रणाली ने 7892 kg/ha उपज प्राप्त की, जो पारंपरिक प्रणाली की 6430 कि.ग्रा./हेक्टेयर उपज से अधिक थी। तालिका 2 यह स्पष्ट रूप से दर्शाता है कि सेंसर-आधारित साइट-स्पेसिफिक नाइट्रोजन प्रबंधन प्रणाली फसल की वास्तविक जरूरत के अनुसार उर्वरक का कुशल उपयोग सुनिश्चित करती है, कुल नाइट्रोजन इनपुट को कम करते हुए गेहूं की उपज और नाइट्रोजन उपयोग दक्षता में सुधार करती है।

तालिका 2: फसल के विभिन्न विकास चरणों पर सेंसर-आधारित एम्बेडेड प्रणाली द्वारा मार्गदर्शित उर्वरक (नाइट्रोजन) अनुप्रयोग दर

उपचार	बेसल डोज़ (kg/ha)	35 दिन बुवाई के बाद (kg/ha)	45 दिन बुवाई के बाद (kg/ha)	65 दिन बुवाई के बाद (kg/ha)	कुल नाइट्रोजन उर्वरक (kg/ha)	अनाज की उपज (kg/ha)
पारंपरिक उर्वरक अनुप्रयोग	40	65	75	65	245	6430
सेंसर-आधारित प्रणाली	40	53	55	50	198	7892

निष्कर्ष

इस अध्ययन में एक सेंसर-आधारित एम्बेडेड प्रणाली विकसित की गई, जो वास्तविक समय सामान्यीकृत भिन्नता हरित सूचकांक मानों के आधार पर मक्का फसल में नाइट्रोजन उर्वरक की परिवर्ती दर पर आपूर्ति करती है। प्रणाली में ग्रीनसीकर सेंसर, माइक्रोकंट्रोलर तथा पल्स चौड़ाई मॉड्यूलेशन संकेत, मोटर ड्राइवर का एकीकृत उपयोग किया गया, जिसके माध्यम से फसल की स्थिति के अनुसार फ्ल्यूटेड रोलर की गति नियंत्रित कर उर्वरक का सटीक वितरण सुनिश्चित किया गया। प्रयोगशाला एवं क्षेत्रीय परीक्षणों से यह स्पष्ट हुआ कि विकसित प्रणाली ने पारंपरिक विधि की तुलना में उर्वरक उपयोग में लगभग 19.18% की बचत की तथा 22.7 % अधिक उत्पादन प्राप्त किया। वास्तविक समय डेटा प्रोसेसिंग एवं स्वचालित नियंत्रण क्षमता के कारण यह तकनीक न केवल नाइट्रोजन उपयोग दक्षता में वृद्धि करती है बल्कि टिकाऊ कृषि प्रबंधन की दिशा में भी सहायक सिद्ध होती है। प्रस्तुत प्रणाली कृत्रिम बुद्धिमत्ता एवं मशीन लर्निंग-आधारित स्मार्ट कृषि प्रबंधन हेतु एक व्यवहारिक एवं किफायती समाधान प्रदान करती है।

संदर्भ

Kitchen, N. R., Sudduth, K. A., Drummond, S. T., Scharf, P. C., Palm, H. L., Roberts, D. F., & Vories, E. D. (2010). Ground-based canopy reflectance sensing for variable-rate nitrogen corn fertilization. Agronomy J, 102(1), 71-84.

Ladha, J. K., Pathak, H., Krupnik, T. J., Six, J., & van Kessel, C. (2005). Efficiency of fertilizer nitrogen in cereal production: retrospects and prospects. Advances in Agronomy, 87, 85-156.

Mosier, A. R., Syers, J. K., & Freney, J. R. (2004). Nitrogen fertilizer: an essential component of increased food, feed, and fiber production. Agriculture and the nitrogen cycle: assessing the impacts of fertilizer use on food production and the environment, 65, 3-15.

Reddy, M. B., Sravani, P., Kumar, S., Rajawat, M. V. S., Jaiswal, D. K., Dhar, S. & Kumar, S. (2025). Nitrogen use efficiency reimagined: advancements in agronomic, ecophysiological, and molecular strategies. Journal of Plant Nutrition, 48(9), 1577-1603.

Sadhukhan, R., Kumar, D., Sen, S., Sepat, S., Ghosh, A., Shivay, Y. S., & Hossain, A. (2023). Precision nutrient management in zero-till direct-seeded rice influences the productivity, profitability, nutrient, and water use efficiency as well as the environmental footprint in the indo gangetic plain of India. Agriculture, 13(4), 784.

Singh,B., (2023). Nitrogen use efficiency in crop production in India: trends, issues, and challenges. Agricultural Research, 12(1), 32–44.

सोयाबीन के अंकुरों का पता लगाने के लिए डीप लर्निंग का उपयोग करके एस.यू.ए.वी इमेजरी का मूल्यांकन

पूजा इंगले[1]*, ओमकार गुप्ता[2], दत्तात्रेय पाटिल[2], गोपाल इंगले[2], रमेश साहनी[1]

[1] केंद्रीय आईसीएआर-केंद्रीय कृषि अभियांत्रिकी संस्थान, भोपाल

[2] कृषि अभियांत्रिकी एवं प्रौद्योगिकी महाविद्यालय, वीएनएमकेवी, परभणी

*ईमेल: poojaingleciae@gmail.com

सारांश

पिछले कुछ वर्षों में विभिन्न आकारों के मानव रहित हवाई वाहन (यूएवी) सटीक कृषि में फसल निगरानी और प्रबंधन के लिए अत्यंत उपयोगी सिद्ध हुए हैं। प्रस्तुत अध्ययन में सोयाबीन के पौधों का पता लगाने हेतु कम लागत वाले एस.यू.ए.वी द्वारा प्राप्त आरजीबी इमेजरी की प्रभावशीलता का मूल्यांकन किया गया है, ताकि किसानों को संसाधनों का बेहतर उपयोग करने, रोपण घनत्व सुधारने और प्रारंभिक चरणों में गैर-अंकुरण की पहचान करने में सहायता मिल सके। शुरुआत में, डीजेआई मिनी 2 (डीजेआई, शेन्ज़ेन, चीन) एस.यू.ए.वी का उपयोग करते हुए सोयाबीन क्षेत्र में 1.5 से 12 मीटर ऊँचाई पर छवियाँ एकत्र कर इमेजिंग ऊँचाई का अनुकूलन किया गया। अंतिम डेटासेट के लिए 2.5 मीटर ऊँचाई पर साफ मौसम में 4000×2250 पिक्सेल रिज़ॉल्यूशन वाली कुल 252 आरजीबी छवियाँ एकत्रित की गईं। इन प्राकृतिक छवियों में सोयाबीन अंकुरों को रोबोफ्लो (रोबोफ्लो इंक., यूएसए) सॉफ़्टवेयर की सहायता से बाउंडिंग बॉक्स द्वारा एनोटेट किया गया। एनोटेशन के पश्चात डेटा को पूर्व-संसाधित कर 7:2:1 के अनुपात में प्रशिक्षण, परीक्षण और सत्यापन अस्त हो में विभाजित किया गया। मॉडल की विविधता बढ़ाने के लिए प्रशिक्षण डेटा को तीन गुना डेटा ऑग्मेंटेशन किया गया। अत्याधुनिक योलो वी 8 मॉडल को इस संवर्धित डेटासेट पर प्रशिक्षित किया गया, जिसके प्रदर्शन मेट्रिक्स—प्रिसिशन, रिकॉल, एम.ए.पी 50 और एम.ए.पी 50-90-क्रमशः 0.69, 0.67, 0.72 और 0.38 प्राप्त हुए। हालाँकि, अतिरिक्त प्रशिक्षण डेटा शामिल कर मॉडल के प्रदर्शन में और सुधार संभव है। समग्र रूप से अध्ययन से यह निष्कर्ष निकला कि कम लागत वाले एस.यू.ए.वी से प्राप्त आरजीबी छवियों पर प्रशिक्षित योलो वी 8एस मॉडल प्रारंभिक वृद्धि चरणों में सोयाबीन के अंकुरों का विश्वसनीय रूप से पता लगाने में सक्षम है।

संकेत शब्द: गहन शिक्षण, आरजीबी इमेजरी, सटीक कृषि, मानवरहित हवाई वाहन, योलो8एस

1. परिचय

सोयाबीन विश्व की प्रमुख तिलहनी एवं दलहनी फसलों में से एक है, जिसका कृषि, पोषण तथा औद्योगिक क्षेत्रों में विशेष महत्व है। भारत में इसे द्वि-उद्देशीय फसल के रूप में व्यापक रूप से उगाया जाता है, क्योंकि इसका उपयोग तिलहन एवं दलहन दोनों रूपों में किया जाता है। उच्च पोषणीय गुणवत्ता एवं बहुआयामी उपयोगिता के कारण सोयाबीन को "इक्कीसवीं सदी की चमत्कारी फसल" तथा "गोल्डन बीन" कहा जाता है। इसमें लगभग 38-42 प्रतिशत उच्च गुणवत्ता वाला पादप-आधारित प्रोटीन तथा 18-22 प्रतिशत

खाद्य तेल पाया जाता है, जो आवश्यक अमीनो अम्लों से समृद्ध होता है (Daas et al., 2025) । भारत में इसका उपयोग सोया दूध, टोफू, सोया आटा एवं न्यूट्री नगेट्स जैसे खाद्य उत्पादों के अतिरिक्त पशुधन एवं पोल्ट्री आहार तथा बायोडीज़ल, लेसिथिन, पेंट, प्लास्टिक एवं कॉस्मेटिक्स जैसे औद्योगिक उत्पादों के निर्माण में भी किया जाता है। सोयाबीन प्रसंस्करण उद्योग की विशेषता इसकी तेल, डिफैटेड सोयाबीन मील तथा विभिन्न मूल्य संवर्धित उत्पादों में रूपांतरण क्षमता में निहित है (Tiwari et al., 2022)। वैश्विक स्तर पर सोयाबीन खाद्य तेल एवं प्रोटीन का एक प्रमुख स्रोत है, जो विश्व की कुल खाद्य तेल आवश्यकता का लगभग 25 प्रतिशत भाग अकेले पूरा करती है। साथ ही, सोया मील को पशुधन एवं पोल्ट्री उद्योग के लिए उच्च प्रोटीनयुक्त चारे का महत्वपूर्ण स्रोत माना जाता है तथा यह वायुमंडलीय नाइट्रोजन स्थिरीकरण के माध्यम से मृदा उर्वरता बढ़ाने में भी सहायक है। भारत सरकार के वर्ष 2024-25 के प्रथम अग्रिम अनुमानों के अनुसार देश में सोयाबीन उत्पादन 133.60 लाख टन तक पहुँचने की संभावना है, जो वर्ष 2023-24 के 130.62 लाख टन उत्पादन से अधिक है। महाराष्ट्र एवं मध्य प्रदेश देश के प्रमुख उत्पादक राज्य हैं, जबकि राजस्थान, गुजरात, कर्नाटक एवं तेलंगाना भी उल्लेखनीय योगदान देते हैं। वर्ष 2025 तक वैश्विक कृषि प्रणाली में सोयाबीन का महत्व निरंतर बढ़ा है, जिसका प्रमुख कारण बढ़ती जनसंख्या, खाद्य प्रसंस्करण उद्योग का विस्तार, जलवायु परिवर्तन की चुनौतियाँ तथा वैश्विक व्यापार संरचनाओं में परिवर्तन हैं (FAO, 2023)।

वर्तमान समय में खेत स्तर पर अंकुरण अवस्था में बीजों एवं नवांकुरों की गणना प्रायः पारंपरिक मानव-आधारित पद्धतियों द्वारा की जाती है। यह प्रक्रिया अत्यधिक समय-साध्य एवं श्रम-प्रधान होने के साथ-साथ मानवीय त्रुटियों, अनुभव-आधारित भिन्नताओं तथा अवलोकन असंगतियों से प्रभावित रहती है। बड़े कृषि क्षेत्रों में वास्तविक पौध संख्या, पौध घनत्व एवं पौध-अंतर दूरी का वस्तुनिष्ठ मूल्यांकन करना चुनौतीपूर्ण हो जाता है। के अनुसार मानव-आधारित पौध गणना पद्धतियों में 10-18 प्रतिशत तक त्रुटियाँ सामान्य रूप से पाई जाती हैं (Zhang et al., 2020)। उच्च उत्पादकता सुनिश्चित करने के लिए प्रारम्भिक अंकुरण अवस्था अत्यंत महत्वपूर्ण मानी जाती है, क्योंकि समान रूप से विकसित एवं स्वस्थ अंकुर ही संतुलित वृद्धि, पोषक तत्वों के कुशल उपयोग तथा उच्च उपज का आधार बनते है। प्रारम्भिक अवस्था में अंकुरण असमानता होने पर पौधों के मध्य प्रतिस्पर्धा, पोषक तत्वों का असंतुलित उपयोग तथा असमान वृद्धि जैसी समस्याएँ उत्पन्न होती हैं, जिससे कुल उपज में 15-30 प्रतिशत तक कमी आ सकती है। अतः प्रारम्भिक वृद्धि चरण में पौध संख्या एवं अंकुरण स्थिति का सटीक आकलन अत्यंत आवश्यक हो जाता है (Baio et al., 2024)।

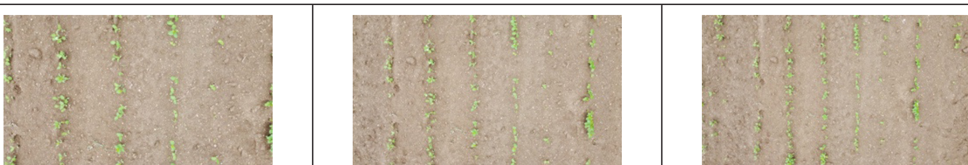
हाल के वर्षों में डिजिटल इमेजिंग, कंप्यूटर विज़न, मशीन लर्निंग तथा डीप लर्निंग आधारित तकनीकों का कृषि क्षेत्र में तीव्र विस्तार हुआ है। कृत्रिम बुद्धिमत्ता आधारित स्वचालित पौध गणना प्रणालियाँ उच्च सटीकता के साथ पौध पहचान एवं निगरानी में सक्षम सिद्ध हुई हैं, जिससे पुनः रोपण निर्णय, बीज गुणवत्ता मूल्यांकन तथा फसल प्रबंधन में उल्लेखनीय सुधार संभव हुआ है (Fu et al., 2024). विशेष रूप से सूक्ष्म मानव रहित हवाई वाहन (sUAVs) द्वारा प्राप्त उच्च-विभेदन फील्ड इमेजरी बड़े कृषि क्षेत्रों में तीव्र, किफायती एवं पुनरावृत्त डेटा संग्रहण के लिए अत्यंत प्रभावी सिद्ध हुई है। यह तकनीक खेत स्तर पर सूक्ष्म अंकुरण भिन्नताओं की पहचान कर सटीक कृषि आधारित निर्णय प्रणाली को और अधिक सुदृढ़ बनाती है (Li et al., 2025). उपरोक्त तथ्यों के परिप्रेक्ष्य में प्रस्तुत अध्ययन का मुख्य उद्देश्य सूक्ष्म मानव रहित हवाई वाहन (sUAV)

से प्राप्त फील्ड इमेजरी का उपयोग करते हुए गहन अधिगम आधारित सोयाबीन अंकुर पहचान प्रणाली की व्यवहार्यता एवं सटीकता का मूल्यांकन करना है। यह अध्ययन प्रारम्भिक वृद्धि अवस्था में सोयाबीन अंकुरों की स्वचालित पहचान हेतु एक प्रभावी, विश्वसनीय एवं कम लागत वाली तकनीकी प्रणाली विकसित करने की दिशा में महत्वपूर्ण योगदान प्रदान करता है।

2. सामग्री और विधि

2.1 डेटा संग्रहण

प्रारम्भिक चरण में सूक्ष्म मानव रहित हवाई वाहन (sUAV) की उपयुक्त इमेजिंग ऊँचाई निर्धारित करने के उद्देश्य से सोयाबीन खेत में भूमि सतह से 1.5 से 10 मीटर तक की विभिन्न ऊँचाइयों पर परीक्षणात्मक छवियाँ संकलित की गईं। विभिन्न ऊँचाइयों पर प्राप्त छवियों के तुलनात्मक विश्लेषण के आधार पर 2.5 मीटर की ऊँचाई को अंतिम डेटा संग्रहण हेतु सर्वाधिक उपयुक्त पाया गया। इसके पश्चात स्वच्छ एवं धूपयुक्त मौसम की परिस्थितियों में sUAV को भूमि सतह से 2.5 मीटर की ऊँचाई पर संचालित करते हुए सीधे नीचे की दिशा से कुल 252 उच्च-रिज़ॉल्यूशन आरजीबी छवियाँ प्राप्त की गईं। डेटा गुणवत्ता सुनिश्चित करने के लिए संकलित सभी छवियों का दृश्य निरीक्षण किया गया तथा उन्हें स्पष्ट एवं अस्पष्ट श्रेणियों में वर्गीकृत किया गया, जिनमें से केवल स्पष्ट एवं उच्च गुणवत्ता वाली छवियों को अंतिम डेटासेट में सम्मिलित किया गया। प्रत्येक छवि का स्थानिक विभेदन 4000 × 2250 पिक्सेल रखा गया, जिससे सोयाबीन अंकुरों की सूक्ष्म संरचनात्मक विशेषताओं को स्पष्ट रूप से अभिलक्षित किया जा सके। संकलित यह उच्च-रिज़ॉल्यूशन डेटासेट आगे डीप लर्निंग आधारित सोयाबीन अंकुर पहचान मॉडल के प्रशिक्षण एवं प्रदर्शन मूल्यांकन हेतु उपयोग में लिया गया।



(क) उड़ान की ऊंचाई 1.5 मीटर | (ख) उड़ान की ऊंचाई 2 मी | (ग) उड़ान की ऊंचाई 2.5 मी

चित्र 1. जमीनी स्तर से ऊपर विभिन्न पदों पर उड़ान की ऊंचाई का मूल्यांकन

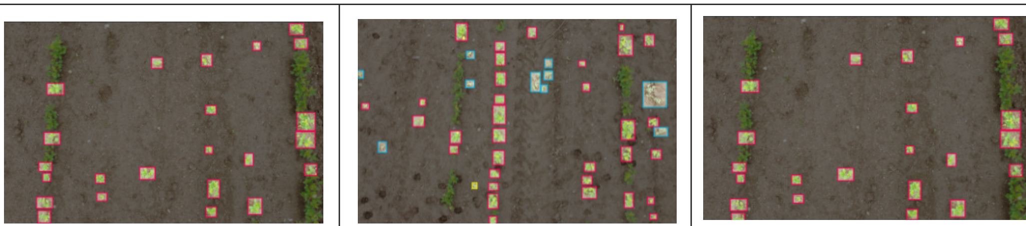
2.2 डाटा एनोटेशन

डेटा एनोटेशन प्रक्रिया के अंतर्गत संकलित छवियों में उपस्थित सोयाबीन अंकुरों की पहचान कर उन्हें सीमांकन बक्सों के माध्यम से चिह्नित किया गया, ताकि गहन अधिगम आधारित योलोवी8 मॉडल को वस्तुओं की वास्तविक स्थिति एवं वर्ग संबंधी जानकारी उपलब्ध कराई जा सके। यह प्रक्रिया रोबोफ्लो सॉफ़्टवेयर की सहायता से संपन्न की गई। एनोटेशन के दौरान प्रत्येक छवि में सोयाबीन अंकुरों के सटीक स्थान का सावधानीपूर्वक निर्धारण करते हुए उनके चारों ओर सीमांकन बक्से बनाए गए तथा उपयुक्त वर्ग नाम प्रदान किया गया। चित्र में प्रदर्शित अनुसार प्रत्येक अंकुर को पृथक रूप से सीमांकित किया गया, जिससे खेत की पंक्तियों में उपस्थित पौधों की स्थिति, वितरण एवं घनत्व का स्पष्ट अभिलेखन संभव हो सका। इस प्रकार तैयार

किया गया एनोटेटेड डेटासेट मॉडल प्रशिक्षण हेतु आधारभूत संदर्भ डेटा के रूप में उपयोग किया गया, जिससे मॉडल की वस्तु पहचान क्षमता एवं पूर्वानुमान सटीकता में सुधार सुनिश्चित किया जा सके।

2.3 छवि वृद्धि और पूर्व-संस्करण

एनोटेटेड डेटासेट में 4000 × 2250 पिक्सेल विभेदन वाली सोयाबीन अंकुरों की छवियाँ सम्मिलित थीं, जिन्हें आगे 640 × 640 पिक्सेल आकार के उप-चित्रों में विभाजित किया गया। इसके पश्चात उन सभी छवियों पर छवि-वृद्धि तकनीकों का प्रयोग किया गया, जिनमें कम-से-कम एक सोयाबीन अंकुर उपस्थित था। यह प्रक्रिया ऑगमेंटर Python library की सहायता से संपन्न की गई, जिसके परिणामस्वरूप लगभग 5000 संशोधित छवियाँ प्राप्त हुईं। छवि-वृद्धि के अंतर्गत क्षैतिज उलटाव, -10° से +10° तक घूर्णन, -5% से +5% तक संतृप्ति परिवर्तन तथा क्षैतिज एवं ऊर्ध्वाधर दिशाओं में °15± तक कर्तन रूपांतरण लागू किए गए, जिससे डेटासेट की विविधता एवं मॉडल की सामान्यीकरण क्षमता में वृद्धि हो सके (Zou et al., 2024)। इसके अतिरिक्त, पूर्व-संसाधन चरण में छवियों का आकार परिवर्तन एवं सामान्यीकरण जैसे कार्य भी संपन्न किए गए। तत्पश्चात संवर्धित एवं पूर्व-संसाधित डेटासेट को 70:20:10 के अनुपात में क्रमशः प्रशिक्षण, प्रमाणीकरण एवं परीक्षण समूहों में विभाजित किया गया तथा इन्हें योलोवी8 प्रारूप में निर्यात किया गया। यह परिशोधित डेटासेट आगे गहन अधिगम आधारित योलोवी8 मॉडल के प्रशिक्षण ढाँचे में सम्मिलित किया गया, जहाँ मॉडल को विभिन्न खेतीय परिस्थितियों में सोयाबीन अंकुरों की पहचान हेतु प्रशिक्षित किया गया।



(क) (ख) (ग)

चित्र 2 (क, ख एवं ग). खेतीय परिस्थितियों में सोयाबीन अंकुरों का एनोटेशन।

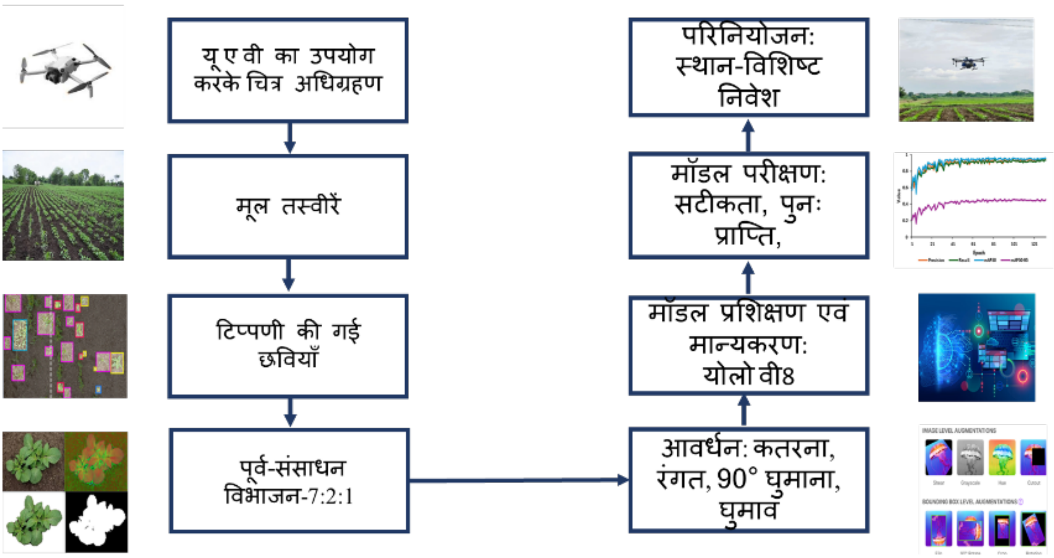
2.4 गूगल कोलाब में योलोवी8 गहन अधिगम मॉडल का प्रशिक्षण

सोयाबीन अंकुरों की पहचान हेतु योलोवी8 गहन अधिगम मॉडल का प्रशिक्षण गूगल कोलाब मंच पर संपन्न किया गया। प्रशिक्षण प्रक्रिया में ग्राफिक्स प्रक्रमण इकाई (जीपीयू) का उपयोग किया गया, जिससे मॉडल प्रशिक्षण की गति एवं संगणनात्मक दक्षता में उल्लेखनीय वृद्धि हुई। प्रशिक्षण के लिए एक पृथक नोटबुक तैयार की गई, जिसमें आवश्यक पुस्तकालयों एवं सहायक घटकों को स्थापित किया गया। इसके पश्चात योलोवी8 संरचना को गिटहब स्रोत से प्राप्त कर कार्य निर्देशिका विन्यस्त की गई। प्रशिक्षण हेतु उपयोग किए गए कुल डेटासेट में 252 छवियाँ सम्मिलित थीं, जिनके साथ संबंधित एनोटेशन फ़ाइलें भी उपलब्ध थीं, ताकि मॉडल को सोयाबीन अंकुरों की सटीक पहचान के लिए प्रशिक्षित किया जा सके। डेटासेट को गूगल कोलाब वातावरण में अपलोड किया गया तथा जीपीयू आधारित संसाधनों की उपलब्धता के कारण प्रशिक्षण प्रक्रिया अधिक तीव्र एवं प्रभावी रूप से संपन्न हुई। डेटा तैयारी चरण में एनोटेशन रूपांतरण, विन्यास फ़ाइलों

का समायोजन तथा प्रशिक्षण संरचना का मानकीकरण किया गया। मॉडल प्रशिक्षण की प्रगति एवं प्रदर्शन मापदण्डों की निगरानी के लिए टेन्सरबोर्ड का उपयोग किया गया, जिसके माध्यम से प्रशिक्षण हानि, सटीकता एवं अन्य प्रदर्शन संकेतकों का विश्लेषण किया गया (Singh et al., 2022)। समग्र रूप से, गूगल कोलाब की संगणनात्मक सुविधाओं एवं योलोवी8 मॉडल की उच्च कार्यक्षमता के संयोजन से सोयाबीन अंकुर पहचान हेतु एक प्रभावी एवं विश्वसनीय गहन अधिगम मॉडल विकसित किया गया ।

2.5 प्रदर्शन मूल्यांकन मापदण्ड

वस्तु-पहचान आधारित वर्गीकरण मॉडल के प्रदर्शन का मूल्यांकन करने हेतु विभिन्न महत्वपूर्ण मापदण्डों का उपयोग किया गया। इनमें प्रिसीजन एक प्रमुख संकेतक है, जो मॉडल द्वारा अनुमानित कुल सकारात्मक परिणामों में से सही सकारात्मक पूर्वानुमानों के अनुपात को दर्शाता है। इसके विपरीत, रिकॉल वास्तविक सकारात्मक उदाहरणों में से सही प्रकार से पहचाने गए परिणामों के अनुपात को प्रदर्शित करता है, जिससे मॉडल की पहचान क्षमता का आकलन किया जाता है। इसके अतिरिक्त, मॉडल के समग्र प्रदर्शन के मूल्यांकन हेतु मीन एवरेज प्रिसीजन (एमएपी) का उपयोग किया गया, जो मॉडल द्वारा निर्मित सीमांकन बक्सों एवं वास्तविक सीमांकन बक्सों के मध्य समानता के आधार पर सटीकता का मान निर्धारित करता है। इस प्रकार, एमएपी वस्तु-पहचान मॉडल की विश्वसनीयता एवं कार्यक्षमता का व्यापक मूल्यांकन प्रदान करता है।



चित्र 3. सोयाबीन अंकुर का पता लगाने मॉडल प्रशिक्षण वर्कफ़्लो

चित्र 3 में प्रदर्शित कार्यप्रवाह के अनुसार अध्ययन प्रक्रिया में सर्वप्रथम मानव रहित हवाई वाहन की सहायता से खेत की छवियाँ संकलित की गईं, जिनसे मूल छवियों का डेटासेट तैयार किया गया। इसके पश्चात सोयाबीन अंकुरों का एनोटेशन कर छवियों को पूर्व-संसाधन एवं विभाजन (7:2:1) प्रक्रिया से गुजारा गया। आगे छवि-वृद्धि तकनीकों, जैसे घूर्णन, कर्तन एवं रंग परिवर्तन का प्रयोग कर डेटासेट को अधिक विविध बनाया

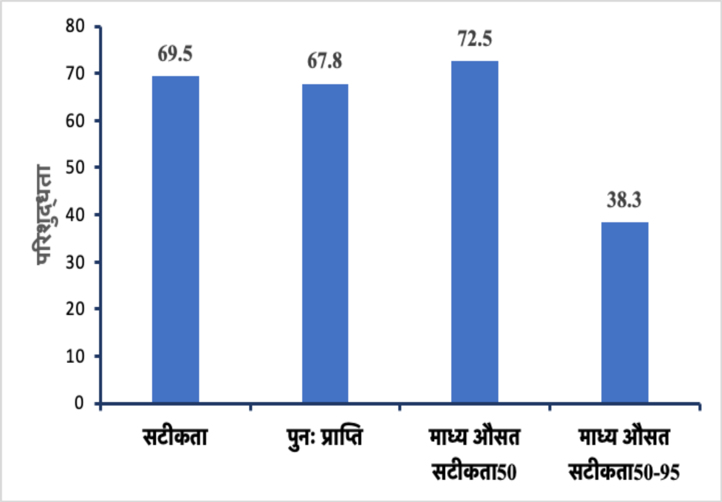
गया। तत्पश्चात योलोवी8 मॉडल का प्रशिक्षण एवं मूल्यांकन किया गया, जिसमें मॉडल की पहचान सटीकता, पुनर्प्राप्ति क्षमता तथा एमएपी मानों का विश्लेषण किया गया। अंततः प्रशिक्षित मॉडल का उपयोग वास्तविक खेत परिस्थितियों में सोयाबीन अंकुर पहचान हेतु किया गया, जिससे अध्ययन की कार्यप्रणाली का एक समग्र एवं व्यवस्थित ढाँचा स्थापित हुआ।

3. परिणाम एवं चर्चा

प्रशिक्षित योलोवी8 मॉडल के प्रदर्शन विश्लेषण से यह स्पष्ट हुआ कि मॉडल ने सोयाबीन अंकुरों की पहचान में संतोषजनक दक्षता प्रदर्शित की। वर्ग वितरण विश्लेषण से ज्ञात हुआ कि डेटासेट में केवल एक लक्ष्य वर्ग, अर्थात् सोयाबीन अंकुर, पर्याप्त संख्या में उपस्थित था, जिससे मॉडल प्रशिक्षण के दौरान वर्गीय प्रतिनिधित्व संतुलित बना रहा। सीमांकन बक्सों की चौड़ाई एवं ऊँचाई के वितरण से यह भी स्पष्ट हुआ कि अधिकांश अंकुर छवियों में छोटे आकार के पिक्सेल क्षेत्र घेरते हैं, जो प्रारम्भिक वृद्धि अवस्था की विशेषता है। भ्रम मैट्रिक्स के अनुसार मॉडल ने 896 सोयाबीन अंकुरों की सही पहचान की, जबकि कुछ अंकुर पृष्ठभूमि के रूप में वर्गीकृत हुए। इसके अतिरिक्त, मिट्टी, खरपतवार तथा फसल अवशेष जैसे पृष्ठभूमि तत्वों को कभी-कभी अंकुर के रूप में पहचाना गया, जिससे कुछ मिथ्या-सकारात्मक परिणाम प्राप्त हुए। सामान्यीकृत भ्रम मैट्रिक्स से ज्ञात हुआ कि लगभग 75 प्रतिशत अंकुरों की सही पहचान हुई, जो मॉडल की उच्च संवेदनशीलता को प्रदर्शित करता है।

मात्रात्मक प्रदर्शन मूल्यांकन में योलोवी8 मॉडल ने 0.695 प्रिसीजन तथा 0.678 रिकॉल प्राप्त किया, जो भविष्यवाणी सटीकता एवं पहचान पूर्णता के मध्य संतुलित प्रदर्शन को दर्शाता है। मॉडल का mAP@0.50 मान 0.725 प्राप्त हुआ, जिससे यह सिद्ध हुआ कि मॉडल मध्यम प्रतिच्छेदन सीमा पर अंकुरों की स्थिति निर्धारण में प्रभावी है। हालांकि, कठोर प्रतिच्छेदन मानदण्डों पर mAP@0.50–0.95 का मान 0.383 प्राप्त हुआ, जो सूक्ष्म एवं सघन रूप से वितरित अंकुरों की पहचान में विद्यमान चुनौतियों को इंगित करता है। प्रिसीजन-रिकॉल तथा प्रिसीजन-विश्वसनीयता वक्रों से ज्ञात हुआ कि विभिन्न विश्वसनीयता सीमाओं पर मॉडल का प्रदर्शन स्थिर बना रहा। इसके अतिरिक्त, एफ1-विश्वसनीयता वक्र ने वह उपयुक्त परिचालन क्षेत्र प्रदर्शित किया, जहाँ प्रिसीजन एवं रिकॉल के मध्य सर्वोत्तम संतुलन प्राप्त हुआ।

प्रशिक्षण एवं प्रमाणीकरण वक्रों के विश्लेषण से यह स्पष्ट हुआ कि 100 प्रशिक्षण चक्रों के दौरान बॉक्स हानि, वर्गीकरण हानि तथा वितरण फोकल हानि में निरंतर कमी दर्ज की गई, जो मॉडल की प्रभावी अधिगम क्षमता एवं क्रमिक अनुकूलन व्यवहार को प्रदर्शित करती है। प्रमाणीकरण हानि वक्रों का प्रशिक्षण वक्रों के समीप बने रहना इस तथ्य को इंगित करता है कि मॉडल में अत्यधिक अधिगम की समस्या न्यूनतम रही तथा मॉडल ने वास्तविक खेत परिस्थितियों में भी संतोषजनक सामान्यीकरण क्षमता प्रदर्शित की। लगभग 60-70 प्रशिक्षण चक्रों के उपरांत प्रदर्शन मापदण्डों में स्थिरता प्राप्त हुई, जिससे यह निष्कर्ष निकाला गया कि मॉडल अभिसरण अवस्था तक पहुँच चुका था।



चित्र 2. परीक्षण डेटासेट पर योलो वी 8 मॉडल के परिणाम

दृश्य सत्यापन परिणामों से यह भी ज्ञात हुआ कि प्रशिक्षित योलोवी8 मॉडल ने विभिन्न प्रकाश परिस्थितियों, मिट्टी की पृष्ठभूमि, खरपतवार उपस्थिति तथा कतार अभिविन्यास जैसी जटिल खेत परिस्थितियों में भी सोयाबीन अंकुरों की सफल पहचान एवं स्थान निर्धारण किया। सीमांकन बक्सों का वास्तविक अंकुरों की स्थिति के साथ निकट सामंजस्य मॉडल की उच्च स्थानीयकरण क्षमता को प्रदर्शित करता है। समग्र रूप से, अध्ययन के परिणाम यह सिद्ध करते हैं कि कम लागत वाले सूक्ष्म मानव रहित हवाई वाहन तथा गहन अधिगम आधारित योलोवी8 मॉडल का एकीकृत उपयोग प्रारम्भिक अवस्था में सोयाबीन अंकुर पहचान, पौध गणना एवं सटीक कृषि अनुप्रयोगों हेतु एक प्रभावी, विश्वसनीय एवं व्यावहारिक तकनीकी समाधान प्रदान करता है।

तालिका 1. एकत्रित छवियां और परिणाम उदाहरण

वर्ग	चित्रों की संख्या	आवृत्तियों
सोयाबीन का अंकुर	252	4503

4. निष्कर्ष और भविष्य की सिफ़ारिशें

प्रस्तुत अध्ययन का मुख्य उद्देश्य सूक्ष्म मानव रहित हवाई वाहन (sUAV) द्वारा प्राप्त उच्च-विभेदन छवियों का उपयोग करते हुए गहन अधिगम आधारित मॉडल के माध्यम से सोयाबीन अंकुरों की पहचान क्षमता का मूल्यांकन करना था। अध्ययन के परिणामों से स्पष्ट हुआ कि योलोवी8 गहन अधिगम मॉडल ने प्रारम्भिक वृद्धि अवस्था में सोयाबीन अंकुरों की पहचान एवं स्थान निर्धारण में संतोषजनक एवं आशाजनक प्रदर्शन प्रदर्शित किया। प्रिसीजन, रिकॉल, mAP@0.50 तथा mAP@0.50-0.95 जैसे मानक प्रदर्शन मापदण्डों के आधार पर मॉडल ने वास्तविक खेत परिस्थितियों में प्रभावी पहचान क्षमता प्रदर्शित की, जिससे इसकी व्यावहारिक उपयोगिता सिद्ध होती है।

योलोवी8 मॉडल तथा व्यापक प्रदर्शन मूल्यांकन पद्धतियों के संयोजन ने अंकुर पहचान एवं निगरानी प्रक्रिया के लिए एक प्रभावी, विश्वसनीय एवं सुदृढ़ तकनीकी समाधान प्रस्तुत किया। अध्ययन से यह भी ज्ञात हुआ कि मॉडल विभिन्न पृष्ठभूमि परिस्थितियों, जैसे खरपतवार, मिट्टी एवं फसल अवशेषों की उपस्थिति में भी सोयाबीन अंकुरों की सफल पहचान करने में सक्षम था। इसके परिणामस्वरूप श्रम-आवश्यकता एवं समय की बचत के साथ-साथ पौध गणना की सटीकता में उल्लेखनीय वृद्धि संभव हुई।

इसके अतिरिक्त, अध्ययन में योलोवी8 मॉडल ने सोयाबीन डेटासेट पर mAP@0.50 के स्तर पर संतोषजनक प्रदर्शन प्रदर्शित किया, जो अंकुर पहचान प्रणाली की दक्षता एवं विश्वसनीयता को और अधिक सुदृढ़ बनाता है। समग्र रूप से, यह अध्ययन दर्शाता है कि कम लागत वाले sUAV एवं गहन अधिगम आधारित योलोवी8 मॉडल का एकीकृत उपयोग सटीक कृषि अनुप्रयोगों, विशेष रूप से प्रारम्भिक पौध स्थापना, पौध गणना एवं फसल निगरानी के लिए एक प्रभावी एवं व्यावहारिक समाधान प्रदान कर सकता है।

संदर्भ

Baio, F. H. R., Gava, R., Teodoro, L. P. R., Alvarez, R. D. C. F., Alves, M. E. M., Santana, D. C., ... & Teodoro, P. E. (2024). A New Proposal for Soybean Plant Stand: Variation Based on the Law of the Minimum. Plants, 13(22), 3193.

Dass, A., Singh, A., Nithinkumar, K., Rajanna, G. A., Verma, R. K., Rathore, S. S., & Meena, V. S. (2025). Synergies and trade-offs of integrating bio-formulations with mineral fertilizers in soybean under the climate crisis: implications for productivity, profitability, and nutrient-use efficiency. Journal of Agriculture and Food Research, 24, 102474.

FAO. (2023). Global oilseed market review. Food and Agriculture Organization of the United Nations.

Li, R., Chen, G., Lu, Y., Qin, K., Zhou, T., & Wang, W. (2025). Longitudinal perching trajectory planning for a fixed-wing unmanned aerial vehicle at high angle of attack based on the estimation of region of attraction. Drones, 9(2), 87.

Tiwari, S. P. (2022). Emerging trends in soybean industry. arXiv preprint arXiv:2202.08590.

Zhang, Z., Kayacan, E., Thompson, B., & Chowdhary, G. (2020). High precision control and deep learning-based corn stand counting algorithms for agricultural robot. Autonomous Robots, 44(7), 1289-1302.

Zou, K., Shan, Y., Zhao, X., & Che, X. (2024). A deep learning image augmentation method for field agriculture. IEEE Access, 12, 37432-37442.

भारतीय कृषि में ड्रोन का उपयोग

धीरज कुमार वर्मा*

स्नातकोत्तर छात्र कृषि पादप रोग विज्ञान विभाग, राजा महेंद्र प्रताप सिंह विश्वविद्यालय, अलीगढ़

*ईमेल: dheerajverma9536@gmail.com

सारांश

भारत की अर्थव्यवस्था की रीढ़ आज भी खेती ही है, जहाँ गाँवों में बहुसंख्यक परिवारों की आजीविका सीधे खेतों से जुड़ी हुई है। कृषि उपज न केवल घरेलू ज़रूरतें पूरी करती है बल्कि देश के निर्यात में भी उसका बड़ा योगदान है। फिर भी इस अहम क्षेत्र की चुनौती यह है कि यह आधुनिक तकनीक से अब भी दूर है। मौसम की मार कीटों का प्रकोप एवं पारंपरिक सिंचाई पर निर्भरता खासकर बारिश का इंतज़ार अक्सर फसलों को जोखिम में डाल देते हैं। किसान कठिन परिश्रम करता है, लेकिन साधनों के अभाव में उपज की गुणवत्ता तथा मात्रा पर अनिश्चितता बनी रहती है।लेकिन अब एक नई उम्मीद जगी है। सोचिए, अगर फसल खराब होने से पहले ही उसका पता लगाकर कदम उठाए जा सकें? क्या पुराने खेती के तजुर्बे एवं ड्रोन जैसी आधुनिक तकनीक का संगम संभव है? क्या ड्रोन खेतों की निगरानी कर, किसानों को समय रहते सचेत कर सकते हैं, जिससे नुकसान को टाला जा सके? इस लेख में हम इन्हीं सवालों की गहराई में उतरेंगे एवं जानेंगे कि भविष्य में भारतीय कृषि किस नई दिशा में अग्रसर हो सकती है।

परिचय

भारतीय खेती के क्षितिज पर ड्रोन तकनीक ने एक नई सुबह ला दी है। अब पारंपरिक खेती स्मार्ट एवं सटीक खेती में तब्दील हो रही है, जहाँ ड्रोन (किसान ड्रोन) मददगार बनकर उभरे हैं। ये उड़न खेतिहर

कीटनाशकों और उर्वरकों का बेहद समान छिड़काव करते हैं, फसलों की सेहत पर पैनी नज़र रखते हैं, एवं पानी की 90% तक बचत कर देते हैं। सरकार द्वारा प्रोत्साहित इस तकनीक से लागत में भारी कमी आई है कीटनाशकों की खपत 40% तक घट गई है, वहीं पैदावार बढ़ी है। अब खेती समय-कुशल, सुरक्षित और अधिक मुनाफे वाली बन गई है।सरकारी प्रयासों की बात करें तो 2022 के बजट में 100 किसान ड्रोनों को बढ़ावा देने की घोषणा ने इस दिशा को गति दी। 'ड्रोन किसान यात्रा' जैसी पहलों और रासायनिक मुक्त खेती के लिए ड्रोन के अनिवार्य उपयोग ने तकनीकी समावेश को बल दिया है। भारत के छोटे किसानों के लिए, जिनके पास कम समय में बड़े खेतों की निगरानी करना एक चुनौती थी, ड्रोन अब एक अनिवार्य साथी बन गया है।दरअसल, कृषि ड्रोन छोटे मानव रहित विमान (UAVs) होते हैं, जो हाईटेक कैमरों, सेंसरों एवं स्प्रेयर से लैस होते हैं। इनके ज़रिए फसल निगरानी, मृदा विश्लेषण, नैनो यूरिया जैसे पोषक तत्वों का छिड़काव और फसल मानचित्रण आसान हो गया है। ये महज़ 5 मिनट में एक एकड़ में कीटनाशक छिड़क सकते हैं, जिससे मेहनत कम होती है। किसान अब जहरीले रसायनों के सीधे संपर्क से बच जाते हैं, और कम पानी व कीटनाशकों में ही काम हो जाता है जो पर्यावरण तथा जेब, दोनों के लिए फायदेमंद है।यह परिवर्तनकारी तकनीक न सिर्फ आज की खेती को सशक्त बना रही है, बल्कि कल के युवाओं को कृषि की ओर आकर्षित करने तथा टिकाऊ, उन्नत खेती का मार्ग प्रशस्त करने में भी अहम भूमिका निभाएगी।

प्रयोजन:

1. **चरम परिशुद्धता से छिड़काव:** ड्रोन का उपयोग कर उर्वरकों, कीटनाशकों तथा फफूंदनाशकों का अत्यंत समान तथा नियंत्रित छिड़काव सुनिश्चित किया जाना, जिससे रसायनों का अपव्यय न्यूनतम हो तथा प्रति एकड़ प्रभावशीलता अधिकतम हो।

2. **समय तथा श्रम में क्रांतिकारी कमी:** पारंपरिक तरीकों की तुलना में अत्यधिक तीव्र गति से कार्य समाप्त करना (जैसे—मात्र 15-20 मिनट में एक एकड़ में छिड़काव), जिससे किसानों का कीमती समय तथा शारीरिक श्रम दोनों बचें।

3. **किसानों के स्वास्थ्य की रक्षा:** हानिकारक रासायनिक स्प्रे के सीधे संपर्क में आने से बचाकर, किसानों को जानलेवा बीमारियों तथा त्वचा संबंधी समस्याओं से सुरक्षित रखना।

4. **प्राकृतिक संसाधनों का सहेजकर उपयोग:** पानी, रासायनिक उर्वरक और कीटनाशकों की खपत में 40 से 90 प्रतिशत तक की कमी लाकर, कृषि लागत घटाना तथा पर्यावरण संरक्षण को बढ़ावा देना।

5. **फसल स्वास्थ्य की वास्तविक समय निगरानी:** उच्च रिज़ॉल्यूशन और इंफ्रारेड कैमरों के सहारे फसलों में कीटों, रोगों, नमी की कमी या पोषण असंतुलन का शीघ्र पता लगाने में सहायता करना, ताकि समय पर निवारण संभव हो।

6. **भूमि और मृदा का बारीकी से विश्लेषण:** खेतों का सूक्ष्म सर्वेक्षण, मृदा नमी मानचित्रण, और फसल पैटर्न की पहचान करके बेहतर फसल योजना और सिंचाई प्रबंधन हेतु डेटा संचालित निर्णय लेना।

7. **पशुधन पर नजर रखना:** दूरस्थ क्षेत्रों में चर रहे पशुओं पर सतत निगरानी रखना, उनकी ट्रैकिंग करना और आवश्यकतानुसार सतर्कता बरतना।

8. तेजी से वनीकरण तथा बीजारोपण: बीजों के लघु गोले (seed pods) को हवा से निर्धारित स्थानों पर गिराकर सघन और तीव्र गति से वृक्षारोपण करना, जिससे पर्यावरणीय संतुलन बहाल करने में मदद मिले।

कार्यप्रणाली :

भारतीय कृषि में ड्रोन प्रौद्योगिकी एक क्रांतिकारी उपकरण के रूप में उभरी है, जो सटीकता तथा दक्षता के साथ खेती के तरीकों को बदल रही है। इसकी शुरुआत विस्तृत योजना तथा भू-चित्रांकन से होती है जहाँ ड्रोन में लगे GPS तथा उच्च क्षमता वाले RGB एवं मल्टीस्पेक्ट्रल कैमरे खेतों का त्रिआयामी नक्शा तैयार करते हैं, जिससे मिट्टी की नमी और फसलों की सेहत का स्पष्ट पता चलता है। स्मार्ट छिड़काव इसका अगला महत्वपूर्ण चरण है: AI संचालित ड्रोन संवेदकों की सहायता से केवल रोगग्रस्त या जरूरतमंद पौधों पर ही कीटनाशक, नैनो यूरिया और सूक्ष्म पोषक तत्वों का बारीकी से प्रयोग करते हैं, जिससे रसायनों की बचत और पर्यावरणीय सुरक्षा संभव हो पाती है।

इसके अलावा, वास्तविक समय में फसल निगरानी के जरिए ड्रोन कीटों के हमलों, खरपतवारों और वृद्धि पैटर्न पर पैनी नज़र रखते हैं जिससे टिड्डी नियंत्रण जैसी चुनौतियाँ आसान हो जाती हैं। अंत में, स्वास्थ्य मूल्यांकन और डेटा विश्लेषण के तहत ये उड़ान भरने वाले सहायक मिट्टी के कटाव, जलभराव और बायोमास आकलन में अहम भूमिका निभाते हैं, जिससे किसान समय पर सही निर्णय ले सकते हैं।

कृषि कार्यों के आधार पर ड्रोन के प्रकार :

(1.) **छिड़काव करने वाले ड्रोन (स्प्रेयर ड्रोन):** ये उन्नत ड्रोन बड़े स्प्रे टैंक से लैस होते हैं, जिनका उपयोग कीटनाशकों, फफूंदनाशकों और तरल उर्वरकों के सटीक छिड़काव के लिए किया जाता है। इनकी क्षमता इतनी शक्तिशाली है कि कुछ मॉडल 50 किलोग्राम से अधिक भार उठाकर खेतों में दवाओं का समान वितरण सुनिश्चित करते हैं।

(2.) **बीज व उर्वरक फैलाने वाले ड्रोन (सीडर/स्प्रेडर ड्रोन):** ये ड्रोन ठोस उर्वरकों, बीजों या दानेदार सामग्री को सीधे मिट्टी में बोने या बिखेरने के लिए विशेष भंडारण कंटेनरों से सुसज्जित होते हैं, जिससे बुवाई की प्रक्रिया तेज और अधिक प्रभावी बन जाती है।

(3.) **निगरानी व इमेजिंग ड्रोन (मॉनिटरिंग ड्रोन):** हाई रिज़ॉल्यूशन वाले आरजीबी, मल्टीस्पेक्ट्रल और थर्मल कैमरों से लैस ये ड्रोन फसलों के स्वास्थ्य, कीटों के प्रकोप, सिंचाई में कमियों और मिट्टी की स्थिति पर रियल टाइम डेटा देते हैं, जो सटीक कृषि (प्रिसिज़न फार्मिंग) की रीढ़ होते हैं।

(4.) **इलेक्ट्रोस्टैटिक ड्रोन:** ये अत्याधुनिक तकनीक का उपयोग करके रासायनिक पदार्थों को इलेक्ट्रोस्टैटिक चार्ज के साथ फसलों पर लगा हैं, जिससे दवा की बर्बादी न्यूनतम हो जाती है और हर पत्ते तक बेहतर कवरेज सुनिश्चित होती हैं।

भारत में ड्रोन तकनीक की प्रगति तथा सरकारी सहायता की स्थिति : भारत में ड्रोन क्रांति (2026 तक):

बदलता तकनीकी परिदृश्य :

देश में ड्रोन प्रौद्योगिकी ने अब महज़ एक उड़न खिलौने से बढ़कर कृषि, रक्षा, सुरक्षा, भू-संपदा सर्वेक्षण और लॉजिस्टिक्स के क्षेत्र में गहरी पैठ बना ली है। पंजाब जैसे कृषि प्रधान राज्यों में नैनो उर्वरकों और कीटनाशकों के छिड़काव के लिए ड्रोन का इस्तेमाल किसानों की ताकत बन गया है इससे न केवल फसल

उत्पादन बढ़ा है, बल्कि रासायनिक इनपुट में भी उल्लेखनीय कमी आई है। वहीं, स्वामित्व योजना के तहत अब तक 3.28 लाख से अधिक गाँवों का हवाई सर्वेक्षण किया जा चुका है, जिससे ग्रामीण संपत्ति अधिकारों का डिजिटल मानचित्रण संभव हुआ है। रक्षा क्षेत्र में तो ड्रोन तकनीक ने नई ऊँचाइयाँ छू ली हैं; स्वदेशी रक्षा ड्रोनों के विकास से अनुमान है कि वर्ष 2030 तक इस क्षेत्र से 3.56 अरब डॉलर का राजस्व अर्जित होगा।

सरकारी संकल्प तथा सशक्तिकरण की पहल :

नीति निर्माण के स्तर पर, 2021 के उदारीकृत ड्रोन नियमों ने ड्रोन संचालन को पारदर्शी, सरल और सुलभ बनाया है। **'नमो ड्रोन दीदी'** योजना के तहत 15,000 महिला स्वयं सहायता समूहों को ड्रोन उपलब्ध कराए जा रहे हैं यह कदम महिला उद्यमिता को उड़ान देने के साथ ही कृषि उत्पादकता में भी नया आयाम जोड़ रहा है। कृषि कार्यों के लिए सरकार 80% तक ड्रोन सब्सिडी भी दे रही है, जबकि ड्रोन तथा उसके घटकों हेतु उत्पादन लिंक्ड प्रोत्साहन (PLI) योजना स्वदेशी विनिर्माण को गति दे रही है। सक्षम जनशक्ति तैयार करने के लिए 244 से अधिक मान्यता प्राप्त ड्रोन प्रशिक्षण संगठन (DTO) युवाओं को हुनरमंद बना रहे हैं।

परिणाम :

आधुनिक ड्रोन तकनीक ने कृषि कार्यों को पूरी तरह से बदल कर रख दिया है। पारंपरिक तरीकों की तुलना में, ड्रोन से छिड़काव करने पर कीटनाशकों और पोषक तत्वों की अत्यधिक मितव्ययिता देखी गई है जहाँ आमतौर पर 200 लीटर घोल की ज़रूरत होती थी, वहीं ड्रोन मात्र 20 लीटर में कुशलतापूर्वक काम पूरा कर लेता है। समय के मोर्चे पर यह तकनीक और भी क्रांतिकारी साबित होती है, क्योंकि एक दिन में 30-40 एकड़ में सटीक छिड़काव कर यह श्रम तथा समय, दोनों की भारी बचत करती है। जल एवं रासायनिक संसाधनों की खपत में भी ड्रोन ने अद्भुत कमी लाई है लगभग 90% पानी और 40% तक उर्वरक/कीटनाशक बचाने में सक्षम है। इसके अलावा, हाई रिज़ॉल्यूशन कैमरों से लैस ड्रोन फसलों की सेहत, कीट आक्रमण और मिट्टी की स्थिति पर सटीक निगरानी देता है, जिससे फसल क्षति का यथार्थ आकलन संभव हो पाता है। सबसे महत्वपूर्ण बात यह है कि हवाई मार्ग से छिड़काव होने के कारण किसान सीधे जहरीले रसायनों के संपर्क से बच जाते हैं, जिससे उनके स्वास्थ्य की सुरक्षा सुनिश्चित होती है।

निष्कर्ष :

भारतीय कृषि में ड्रोन तकनीक एक ऐसा "कृषि यांत्रिकी क्रांति का नया अध्याय" है, जो परंपरागत खेती को स्मार्ट तथा सटीक खेती (प्रिसिजन फार्मिंग) की राह पर मोड़ रहा है। फसलों पर कीटनाशकों का बेहतर तथा बराबर छिड़काव हो, खेतों की निगरानी पल पल हो, या फिर मिट्टी की सेहत का आकलन ड्रोन हर मोर्चे पर समय, मेहनत तथा रसायनों की खपत (90% तक कम पानी) को अविश्वसनीय रूप से बचा रहे हैं। यह आधुनिक तकनीक सिर्फ उपज बढ़ाकर किसानों की कमाई दोगुनी नहीं करती, बल्कि गाँव के युवाओं के लिए नए रोज़गार के दरवाजे भी खोलती है। हाँ, शुरुआती लागत ऊँची होना और तकनीकी समझ की कमी जैसी चुनौतियाँ अब भी बाकी हैं, लेकिन सरकार की ओर से दी जा रही सब्सिडी और चल रहे प्रशिक्षण कार्यक्रम इन ड्रोनों को किसानों का सच्चा हवाई सहायक बनाने का सपना साकार कर रहे हैं। निस्संदेह, ड्रोन संचालित खेती का भविष्य बेहद उज्ज्वल है।

संदर्भ :

डॉ. आर. के. सिंह, कृषि विज्ञान में ड्रोन तकनीक, कृषि ड्रोन के सिद्धांत, स्प्रे, सेंसर, GPS एप्लीकेशन

डॉ. एस. एस. तोमर, फसल निगरानी में मानव रहित हवाई वाहन, फसल रोग, कीट निगरानी, मल्टीस्पेक्ट्रल इमेजिंग पर शोध आधारित

डॉ. नरेंद्र सिंह, कृषि में यांत्रिकी एवं ड्रोन प्रौद्योगिकी, दिशानिर्देश विधि, उर्वरक बचत, सरकारी योजनाएं

भारतीय कृषि में ड्रोन विनियमन और सब्सिडी - कृषि मंत्रालय, सरकारी दस्तावेज- नियम, पीएलआई योजना, नमो ड्रोन दीदी, 80% सब्सिडी

सटीक खेती और ड्रोन अनुप्रयोग - ICAR प्रकाशन, सटीक खेती, मृदा मानचित्रण, रासायनिक बचत डेटा

बुद्धिमान खाद्य संकुलन में वास्तविक समय ताजगी आकलन हेतु प्राकृतिक ऐन्थोसाइनिन-आधारित वर्णमिति सूचक

अमन कुमार[1,2]*, शुकदेव मंगराज[3], मनोज कुमार त्रिपाठी[3], आदिनाथ काटे[3], अजय यादव[4], चन्द्र दीप सिंह[5], ऋषिकेश म्हादे[6], हेमंतकुमार रुपनवर[6], रिंकेश गोसावी[6], अमित कुमार[6]

[1]कृषि प्रसंस्करण और खाद्य अभियांत्रिकी विभाग, आईसीएआर – केंद्रीय कृषि अभियांत्रिकी संस्थान, भोपाल, मध्य प्रदेश

[2]स्नातकोत्तर विद्यालय, भारतीय कृषि अनुसंधान संस्थान, नई दिल्ली

[3]कृषि उत्पाद प्रसंस्करण प्रभाग, आईसीएआर– केंद्रीय कृषि अभियांत्रिकी संस्थान, भोपाल, मध्य प्रदेश

[4]आईसीएआर – राष्ट्रीय डेयरी अनुसंधान संस्थान, करनाल, हरियाणा

[5]सिंचाई और जलनिकासी प्रभाग, आईसीएआर– केंद्रीय कृषि अभियांत्रिकी संस्थान, भोपाल, मध्य प्रदेश

[6] डॉ. बाळासाहेब सावंत कोकण कृषी विद्यापीठ, दापोली, महाराष्ट्र

ईमेल: sauravaman12@gmail.com

सारांश

यह शोध कार्य एक पीएच-संवेदनशील वर्णमिति ताजगी सूचक के विकास और मूल्यांकन को प्रस्तुत करता है, जो शीघ्र नष्ट होने वाले खाद्य पदार्थों की वास्तविक समय निगरानी हेतु तैयार किया गया है। यह सूचक काले गाजर से प्राप्त ऐन्थोसाइनिन, जो एक प्राकृतिक एवं खाद्य-ग्रेड वर्णक है, को सेल्यूलोज आधारित आधार पर आरोपित करके निर्मित किया गया, जिससे ताजगी पहचान हेतु एक सतत और गैर-विनाशकारी दृष्टिकोण प्राप्त हुआ। बढ़ती पर्यावरण-अनुकूल बुद्धिमान पैकेजिंग की मांग के साथ, इस प्रकार के नवाचार खाद्य गुणवत्ता निगरानी प्रणाली को उन्नत करने में महत्वपूर्ण हैं। ऐन्थोसाइनिन, जो अपने पीएच-निर्भर रंग परिवर्तन के लिए प्रसिद्ध हैं, को गैर-रासायनिक तरीकों से सेल्यूलोज मैट्रिक्स पर भौतिक रूप से आरोपित किया गया। उनकी स्थिरता और संरचनात्मक एकीकरण का विश्लेषण क्षेत्र उत्सर्जन स्कैनिंग इलेक्ट्रॉन सूक्ष्मदर्शी, फूरिए-परिवर्तन अवरक्त स्पेक्ट्रोस्कोपी और एक्स-रे विवर्तन द्वारा किया गया, जबकि तन्य परीक्षण से यांत्रिक अखंडता की पुष्टि हुई। सूचक का प्रदर्शन, परिवेशीय (25 ± 1 °C) और शीतित (5 ± 1 °C) परिस्थितियों में जैवविघटनीय ट्रे में संग्रहित सफेद बटन मशरूम की ताजगी की निगरानी कर सत्यापित किया गया, जिसे भौतिक-रासायनिक आकलन और वाष्पशील कार्बनिक यौगिक उत्सर्जन के साथ समानांतर किया गया। विकसित सूचक ने हल्के गुलाबी (अम्लीय) से गहरे नीले (क्षारीय) रंग में विशिष्ट परिवर्तन प्रदर्शित किया, जो खराब होने की प्रगति को प्रभावी रूप से दर्शाता है। संरचनात्मक लक्षणन ने छिद्रपूर्ण संरचना, हाइड्रोजन बंध अंतःक्रियाओं और हल्की क्रिस्टलिनिटी कमी के साथ सफल ऐन्थोसाइनिन आरोपण की पुष्टि की, जबकि तन्य शक्ति अप्रभावित रही।

सूचक ने मशरूम की ताजगी को तीन अलग-अलग चरणों में विश्वसनीय रूप से वर्गीकृत किया: ताजा (दिन 1–4), अभी भी ताजा (दिन 6–8), और खराब (दिन 10)। सूचक रंग परिवर्तनों और गुणवत्ता मापदंडों, विशेषकर भार हानि, के बीच मजबूत सहसंबंध (r = 0.93) देखा गया, जबकि प्रमुख घटक विश्लेषण ने चरण-वार भेदभाव की पुष्टि की। यह प्राकृतिक ऐन्थोसाइनिन-आधारित वर्णमिति सूचक एक सतत, बुद्धिमान पैकेजिंग समाधान के रूप में महत्वपूर्ण क्षमता प्रदर्शित करता है, जो वास्तविक समय, गैर-आक्रामक निगरानी प्रदान करता है, और खाद्य अपशिष्ट में कमी में योगदान करता है।

संकेत शब्द: ताजगी सूचक, वास्तविक समय निगरानी, काला गाजर ऐन्थोसाइनिन, वाष्पशील कार्बनिक यौगिक, बुद्धिमान पैकेजिंग

1. प्रस्तावना

स्वास्थ्यकर तथा अधिक भंडारण अवधि वाले खाद्य पदार्थों की बढ़ती माँग ने ऐसी पैकेजिंग प्रणालियों के विकास को आवश्यक बनाया है, जो भोजन की गुणवत्ता और सुरक्षा दोनों को संरक्षित रखें। पैकेजिंग भोजन को सूक्ष्मजीव संक्रमण, ऑक्सीकरण तथा नमी हानि से बचाकर उसकी गुणवत्ता बनाए रखती है। इसी उद्देश्य से बुद्धिमान पैकेजिंग प्रणाली विकसित हुई, जिसमें रंग परिवर्तन द्वारा भोजन की ताजगी बताने वाले संकेतक सम्मिलित होते हैं (Chaari et al., 2024)। ये संकेतक पी.एच. संवेदनशील प्राकृतिक रंगों पर आधारित होते हैं, जो खाद्य खराबी के दौरान उत्पन्न वाष्पशील यौगिकों तथा पी.एच. परिवर्तन के कारण रंग बदलते हैं (Elhadef et al., 2024) । पारम्परिक सेंसर आधारित तकनीकें महंगी और जटिल होती हैं, जबकि रंग आधारित संकेतक बिना किसी उपकरण के दृश्यमान परिवर्तन के माध्यम से ताजगी का संकेत देते हैं (Yong & Liu, 2020; Priyadarshi et al., 2021)। प्राकृतिक रंगों का उपयोग इसलिए भी बढ़ रहा है क्योंकि वे विषरहित, जैव-अनुकूल और पर्यावरण हितैषी होते हैं, जबकि कृत्रिम रंग स्वास्थ्य जोखिम उत्पन्न कर सकते हैं (Almasi et al., 2022)। प्राकृतिक रंगों में एन्थोसाइनिन विशेष महत्त्व रखते हैं क्योंकि उनका रंग पी.एच. के अनुसार लाल से नीला या हरे तक परिवर्तित होता है, जिससे खाद्य खराबी स्पष्ट रूप से पहचानी जा सकती है (Khan & Farooqui, 2011; Kuswandi et al., 2012; Liu et al., 2022)। काले गाजर से प्राप्त एन्थोसाइनिन संरचनात्मक रूप से अधिक स्थिर होते हैं, इसलिए इन्हें ताजगी संकेतक के रूप में प्रभावी माना जाता है (Kırca et al., 2007; Parlak et al., 2023)। रंग संकेतक को स्थिर करने हेतु सेल्यूलोज़ आधारित फ़िल्टर पेपर उपयोगी है क्योंकि वह छिद्रयुक्त एवं जैव-अनुकूल होता है, जिससे रंग तथा वाष्पशील यौगिकों का संपर्क सुगम होता है (Ezati et al., 2021)। सफेद बटन मशरूम विश्व उत्पादन में लगभग एक–तिहाई योगदान देते हैं, परंतु अत्यधिक नाशवान होते हैं और स्थानीय तापमान पर केवल 1-3 दिन तथा शीत भंडारण में 8 दिन तक सुरक्षित रह पाते हैं (Zhang et al., 2018; Sami et al., 2021)। वर्तमान ताजगी परीक्षण विधियाँ महंगी, समय लेने वाली तथा जटिल उपकरणों की आवश्यकता वाली हैं (Lin et al., 2023; Arjun et al., 2022)। अतः इस अध्ययन का उद्देश्य काले गाजर एन्थोसाइनिन पर आधारित रंग संकेतक का विकास करना है, जो बिना किसी उपकरण के मशरूम की ताजगी को वास्तविक समय पर दर्शा सके। यह तकनीक सतत, पर्यावरण हितैषी तथा बुद्धिमान पैकेजिंग प्रणालियों के विकास की दिशा में महत्वपूर्ण योगदान दे सकती है।

2. सामग्री तथा विधियाँ

2.1 सामग्री

काले गाजर (डाकस कैरोटा एल.) ताज़ा अवस्था में भोपाल स्थित केसर फ़ार्म से प्राप्त किए गए। ताज़ा बटन मशरूम मध्यम प्रदेश के भोपाल क्षेत्र में स्थित श्री देव हरि मशरूम इकाई से क्रय किए गए। जैव-आधारित जैव अपघटनीय पैकेजिंग हेतु गन्ने के बगास से बने कंटेनर तथा पी.एल.ए–स्टार्च आधारित लपेटन फ़िल्म मुंबई स्थित एंट्रेक्स नेचर केयर प्राइवेट लिमिटेड से प्राप्त की गई। संकेतक निर्माण के लिए प्रयुक्त फ़िल्टर पेपर (व्हाटमन ग्रेड 42) तथा सभी रसायन हाई–मीडिया प्रयोगशाला, मुंबई से खरीदे गए।

2.2 एन्थोसाइनिन का निष्कर्षण

काले गाजर से उच्च शुद्धता एवं स्थिरता वाला एन्थोसाइनिन निष्कर्षण (Oladzadabbasabadi et al., 2022) द्वारा वर्णित विधि में संशोधन कर प्राप्त किया गया। सर्वप्रथम गाजरों को धोकर उनके छिलके हटाए गए तथा छोटे टुकड़ों में काटा गया। लगभग 100 ग्राम गाजर टुकड़ों को 200 मिलीलीटर अम्लीकृत एथेनॉल (95% एथेनॉल + 0.1% हाइड्रोक्लोरिक अम्ल) के साथ तीन मिनट मिश्रित किया गया। मिश्रण को चार डिग्री सेल्सियस तापमान पर अंधेरे में चौबीस घंटे तक भिगोने हेतु रखा गया ताकि निष्कर्षण दक्षता बढ़ सके। तत्पश्चात मिश्रण को दस हजार आर.पी.एम. पर पंद्रह मिनट अपकेंद्रित कर सुपरनेटन्ट प्राप्त किया गया। इस द्रव को फ़िल्टर पेपर द्वारा छाना गया तथा रोटरी वाष्पन द्वारा चालीस डिग्री सेल्सियस पर एथेनॉल हटाया गया। प्राप्त गाढ़े निष्कर्षण को ठंडे सुखन (फ़्रीज़ ड्राई) द्वारा चूर्ण में परिवर्तित कर प्रकाश एवं नमी से सुरक्षित वायु–रोधक पात्र में ऋणात्मक बीस डिग्री सेल्सियस तापमान पर संरक्षित किया गया।

2.3 ताजगी संकेतक की तैयारी

काले गाजर एन्थोसाइनिन को फ़िल्टर पेपर पर अधिरोपित कर संकेतक तैयार किया गया। यह तकनीक Ezati et al. (2021) से अनुकूलित की गई। सबसे पहले 1.5 प्रतिशत (वज़न/आयतन आधार) समाधान आसुत जल में तैयार किया गया और शुद्धता हेतु छनन एवं ध्वनि-विक्षेप (सोनिकेशन) किया गया। चयनित ग्रेड का फ़िल्टर पेपर 1.5 × 3.0 सेंटीमीटर आकार में काटकर संकेतक धारक रूप में उपयोग किया गया। पेपर स्ट्रिप को निष्कर्षण समाधान में पूर्णतः डुबोकर तीन हजार आर.पी.एम. पर पंद्रह मिनट अपकेंद्रित किया गया, जिससे समाधान समान रूप से पेपर पर जमा हो सके। तत्पश्चात इन्हें पच्चीस डिग्री सेल्सियस पर चौबीस घंटे सुखाकर, नमी एवं प्रकाशरोधी सीलबंद डिब्बे में सिलिका–जेल के साथ संग्रहित किया गया।

2.4 रंग संकेतक का विश्लेषण

पी.एच. संवेदनशीलता परीक्षण: निर्मित संकेतक की पी.एच. आधारित रंग प्रतिक्रिया का परीक्षण रंगमापी यंत्र द्वारा किया गया। स्ट्रिपों को पी.एच. 2 से 10 के बफ़र घोलों में रखा गया और परिवर्तनशील रंग प्रतिक्रिया मापी गई। हंटर रंग मानक (एल*, ए*, बी*) का मूल्यांकन किया गया तथा कुल रंग परिवर्तन (Δई) ज्ञात किया गया।

क्षेत्र उत्सर्जन स्कैनिंग इलेक्ट्रॉन माइक्रोस्कोपी: निष्कलंक तथा एन्थोसाइनिन अधिरोपित फ़िल्टर पेपर की सतही संरचना का अध्ययन क्षेत्र उत्सर्जन स्कैनिंग इलेक्ट्रॉन माइक्रोस्कोपी द्वारा किया गया, जिसमें 20 किलोवोल्ट त्वरण वोल्टेज तथा 1-5 मिमी कार्य दूरी प्रयोग हुई।

फ़ूरियर रुपांतरण अवरक्त स्पेक्ट्रोस्कोपी: फ़िल्टर पेपर में एन्थोसाइनिन अंतःक्रिया तथा क्रियात्मक समूहों की पहचान हेतु अवरक्त स्पेक्ट्रोस्कोपी 4000±500 सेंटीमीटर$^{-1}$ तरंग संख्या सीमा तथा 8 सेंटीमीटर$^{-1}$ संकल्प में की गई।

क्ष–किरण विवर्तन: संकेतक स्ट्रिपों की क्रिस्टलीय प्रकृति जाँच के लिए 2-60 डिग्री द्वि–थीटा सीमा में विवर्तन डेटा संग्रहित किया गया तथा क्रिस्टलीयता सूचकांक का निर्धारण कर संरचनात्मक परिवर्तन का आकलन किया गया।

तन्य बल परीक्षण: फ़िल्टर पेपर की यांत्रिक शक्ति का आकलन Kumar et al. (2023) द्वारा वर्णित पद्धति के आधार पर किया गया। बी.सी.ए. अधिरोपण के प्रभाव का निर्धारण तुलनात्मक रुप से किया गया।

अमोनिया संवेदनशीलता: सूचक स्ट्रिप की अमोनिया वाष्प पर प्रतिक्रिया Zhang et al. (2019) में वर्णित तकनीक में संशोधन कर ज्ञात की गई। रंग परिवर्तन को छायाचित्र विश्लेषण से आर, जी, बी मानों में मापा गया तथा संवेदनशीलता का हिसाब समीकरण 2 द्वारा लगाया गया।

मशरूम हेतु संकेतक की उपयोगिता मूल्यांकन: ताजगी संकेतक का प्रदर्शन सफेद बटन मशरूम में खराबी की निगरानी हेतु जाँचा गया। समान आकार एवं अविकृत कैप वाले मशरूमों को जैव–आधारित ट्रे में पैक कर पी.एल.ए.–स्टार्च फ़िल्म से लपेटा गया, जिस पर संकेतक संलग्न किया गया। नमूनों को दो तापमानों (251°±C तथा 51°±C) पर संग्रहित किया गया।

भौतिक–रासायनिक परिवर्तन मूल्यांकन

a) **भार हानि:** प्रत्येक संग्रहण अवधि में मशरूम की प्रारम्भिक एवं अंतिम वज़न मापकर प्रतिशत भार हानि समीकरण 3 द्वारा ज्ञात की गई।

b) **दृढ़ता:** नमूनों की दृढ़ता का मापन बनावट विश्लेषक द्वारा मानकीकृत बल, गति एवं पैठ गहराई पर किया गया (Moradian et al., 2018)।

c) **पी.एच.:** निर्मित रस का पी.एच. मान अंशांकित डिजिटल पी.एच. मीटर द्वारा निर्धारित किया गया (Thakur et al., 2020)।

d) **घुलनशील ठोस सामग्री:** कुल घुलनशील ठोस पदार्थों का निर्धारण डिजिटल अपवर्तनमापी द्वारा किया गया (López-Gómez et al., 2021)।

e) **सूक्ष्मजीवी भार:** एरोबिक प्लेट गणना विधि से सूक्ष्मजीवी भार का निर्धारण किया गया तथा परिणाम लॉग इकाइयों में प्रस्तुत किए गए (Sami et al., 2021)।

f) **परिपक्वता सूचकांक:** सात–बिंदु पैमाने पर कैप खुलने की अवस्था सहित परिपक्वता निर्धारण किया गया (Ban et al., 2014)।

वाष्पशील कार्बनिक यौगिकों की प्रोफ़ाइल: नमूनों से उत्सर्जित वाष्पशील कार्बनिक यौगिकों का विश्लेषण हेडस्पेस घन–चरण सूक्ष्म निष्कर्षण तथा गैस–क्रोमैटोग्राफी–द्रव्यमान स्पेक्ट्रोमिति द्वारा विभिन्न संग्रहण दिनों में किया गया Pei et al. (2016) ।

सांख्यिकीय विश्लेषण: परिणामों का विश्लेषण एक–मार्गीय परिवर्तनीयता विश्लेषण द्वारा तथा औसत तुलना के लिए पश्च–परीक्षण प्रयोग कर किया गया। प्रवृत्ति तथा सह–सम्बंधन स्पष्ट करने हेतु मुख्य अवयव विश्लेषण किया गया तथा परिणामों का ग्राफिक प्रस्तुतीकरण सॉफ़्टवेयर के माध्यम से संपादित किया गया।

3. परिणाम एवं चर्चा

3.1 बुद्धिमान रंग संकेतक का विश्लेषण

3.1.1 पी.एच. आधारित रंग परिवर्तन

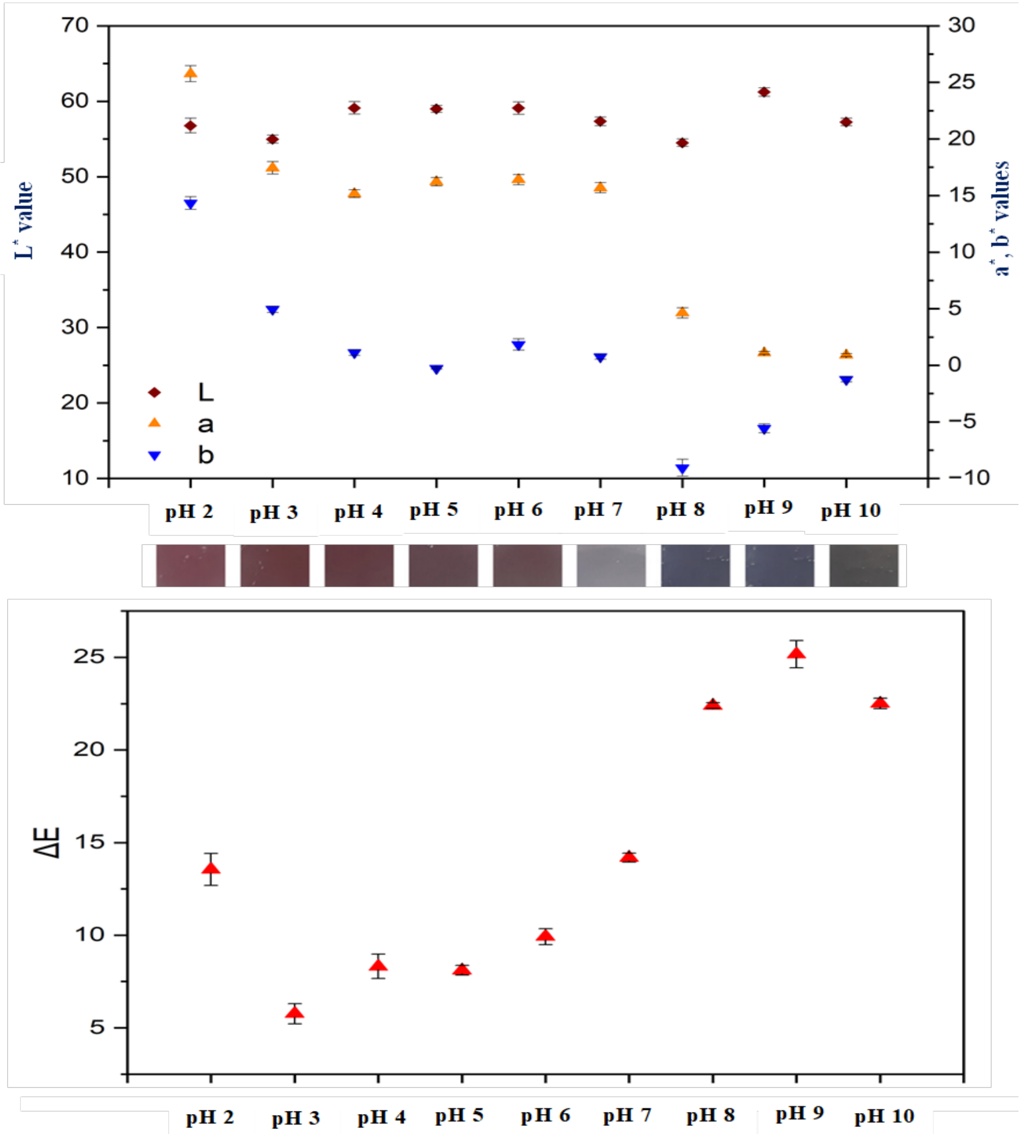
काले गाजर एन्थोसायनिन आधारित ताजगी संकेतक ने पी.एच. 2 से 10 तक क्रमिक रंग परिवर्तन दर्शाया (चित्र 1)। पी.एच. 2 पर लाल, पी.एच. 3-4 पर गुलाबी, पी.एच. 5-6 पर फीका गुलाबी तथा पी.एच. 7 पर हल्का नीला दिखा। यह नीला रंग पी.एच. 8-9 पर गहरा होकर अंततः पी.एच. 10 पर काले रंग में परिवर्तित हुआ। यह व्यवहार पूर्व रिपोर्टों में वर्णित एन्थोसायनिन आधारित फिल्मों के रंग परिवर्तन के अनुरूप है (Liu et al., 2017; Koosha & Hamedi., 2019)। काला गाजर सायनिडिन आधारित एसाइलित एन्थोसायनिन का समृद्ध स्रोत है, जो पी.एच. परिवर्तनों के प्रति स्थिरता प्रदान करते हैं (Algarra et al., 2014)। रंगिमितीय विश्लेषण में हल्कापन (L*) 54.51 (पी.एच. 8) से 61.22 (पी.एच. 9) तक पाया गया। लाल–हरित मान (a*) पी.एच. बढ़ने पर घटा, जो अम्लीय वातावरण में लाल रंग की प्रधानता दर्शाता है। पीले–नीले मान (b*) उच्च पी.एच. पर ऋणात्मक रहे, जो क्षारीय स्थिति में नीले–काले रंग की उपस्थिति को दर्शाते हैं। रंग अंतर (ΔE) पाँच से अधिक रहा, जो आँखों से स्पष्ट दिखाई देने वाले परिवर्तन का संकेत है। इन परिणामों के आधार पर काले गाजर एन्थोसायनिन को सेल्यूलोज़ फिल्टर पेपर पर आरोपित कर ताजगी संकेतक विकसित किया गया, जो नाशवान खाद्य पदार्थों विशेषकर सफेद बटन मशरूम की वास्तविक समय में दृश्य ताजगी जाँच के लिए उपयुक्त सिद्ध हुआ।

3.2 अमोनिया वाष्प के प्रति संवेदनशीलता

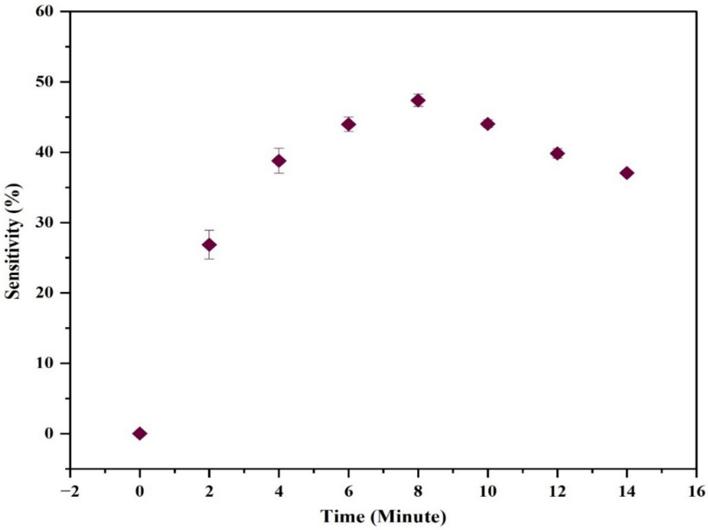
विकसित रंगमिति ताज़गी संकेतक की संवेदनशीलता का परीक्षण 0.8 M अमोनिया वाष्प के संपर्क में किया गया, जो प्रोटीन-समृद्ध खाद्य पदार्थों के विघटन से उत्पन्न वाष्पशील नाइट्रोजन यौगिकों का प्रतिनिधित्व करता है। अमोनिया के संपर्क में आते ही संकेतक ने प्रारम्भिक 2–4 मिनट के भीतर SRGB मानों में तीव्र वृद्धि दिखाई (चित्र 2), जो क्षारीय वातावरण के प्रति इसकी तीव्र प्रतिक्रिया का संकेत है। संकेतक का प्रारम्भिक हल्का मैरून रंग 2 मिनट में प्रुशियन नीले तथा 4 मिनट में आर्कटिक काले रंग में परिवर्तित हुआ, जो एन्थोसाइनिन संरचना में महत्वपूर्ण परिवर्तन दर्शाता है।

प्रत्यक्ष रूप से अमोनिया से उत्पन्न हाइड्रॉक्सिल आयनों के साथ प्रतिक्रिया के कारण एन्थोसाइनिन का संरचनात्मक रूपांतरण हुआ, जिसमें इसका फ्लैविलियम कैशन स्वरूप क्षारीय वातावरण में क्विनोनॉइडल बेस स्वरूप में परिवर्तित हो गया। सर्वोच्च SRGB मान 47.35% आठवें मिनट पर दर्ज किया गया, जिसके बाद मान धीरे-धीरे घटकर 14वें मिनट पर स्थिर हो गए, जो संरचनात्मक रूपांतरण की पूर्णता और रंग स्थिरता

को दर्शाता है। इस अध्ययन में प्रारम्भिक मिनटों में तीव्र रंग परिवर्तन संकेतक को वास्तविक समय ताज़गी निगरानी के लिए उपयुक्त बनाता है। तीव्र संवेदनशीलता और स्पष्ट दृश्य परिवर्तन इसे बुद्धिमान पैकेजिंग प्रणालियों में व्यावसायिक उपयोग के लिए एक संभावित उम्मीदवार बनाते हैं।



चित्र 1. बी.सी.ए. विलयन तथा विकसित संकेतक के रंग मान (L*, a*, b*) एवं कुल रंग अंतर (ΔE) का पी.एच. 2 से 10 की सीमा में विश्लेषण।



चित्र 2. 14 मिनट तक 0.8 M अमोनिया के प्रति विकसित ताज़गी संकेतक की संवेदनशीलता (SRGB)।

3.3 बटन मशरूम के भंडारण के दौरान ताजगी संकेतक का मूल्यांकन

इस अध्ययन में विकसित रंगमितीय ताजगी संकेतक की प्रभावशीलता का आकलन Agaricus bisporus के खराब होने की निगरानी हेतु किया गया। मशरूम को जैव-अवक्रमणीय पैकेजिंग में रखकर संकेतक को पैकिंग फिल्म के अंदर स्थापित किया गया। भंडारण तापमान 25±1°C (परिवेश) और 5±1°C (शीतित) रखा गया। संकेतक के रंग परिवर्तन को मशरूम के भौतिक-रासायनिक गुणों एवं वी.ओ.सी. प्रोफाइलिंग के साथ जोड़ा गया। परिणामों से पुष्टि हुई कि संकेतक वास्तविक-समय एवं गैर-ध्वंसात्मक गुणवत्ता मूल्यांकन हेतु प्रभावी है।

3.3.1 बटन मशरूम के भौतिक-रासायनिक गुण

3.3.1.1 वजन में भौतिक हानि

श्वसन एवं वाष्पन से जलहानि के कारण वजन हानि गुणवत्ता को गंभीर रूप से प्रभावित करती है। परिवेश तापमान पर वजन हानि शीतित स्थितियों की तुलना में लगभग दोगुनी पाई गई। 25±1°C पर 3वें दिन तक वजन हानि 5% से अधिक हो गई, जबकि 5±1°C पर समान हानि 8वें दिन दर्ज हुई। यह दर्शाता है कि उच्च तापमान पर संग्रहीत मशरूम 3वें दिन तक अप्राकृतिक-बिक्री योग्य हो गए, जबकि कम तापमान पर 8वें दिन तक बाजार योग्य बने रहे।

3.3.1.2 दृढ़ता (Firmness)

दृढ़ता उपभोक्ता स्वीकार्यता का प्रमुख सूचक है। ताजे मशरूम की प्रारंभिक दृढ़ता 44.49±1.69 N थी, जो समय के साथ दोनों तापमान स्थितियों में कम हुई। 25°C पर 3वें दिन 7.78 N तथा 5°C पर 12वें दिन 7.15 N दर्ज हुई। जलहानि, संरचनात्मक संकुचन तथा कोशिका अवनयन के कारण दृढ़ता में कमी आती है, जो गुणवत्ता ह्रास दर्शाती है ।

3.3.1.3 pH

ताजे मशरूम का प्रारंभिक pH 6.52 था। भंडारण के दौरान pH में क्रमिक वृद्धि दर्ज हुई, जो सूक्ष्मजीवीय गतिविधि एवं चयापचयी उपापचयों के कारण संरचनात्मक विलयन के परिणामस्वरुप है। यह पित्तिकीय प्रतिक्रिया गुणवत्ता ह्रास एवं खराब होने का संकेत देती है।

3.3.1.4 कुल घुलनशील ठोस पदार्थ (TSS)

टी.एस.एस. मान 6.11 से बढ़कर 7.15 तक पहुँचा। यह जलहानि एवं द्रव्य सांद्रण वृद्धि का संकेतक है। टी.एस.एस. वृद्धि श्वसन दर, पकने की प्रवृत्ति एवं सूखे पदार्थ के संकेंद्रण से संबंध रखती है, जो गुणवत्ता में गिरावट का द्योतक है।

3.3.1.5 सूक्ष्मजीवी लोड

Pseudomonas spp. मशरूम खराब होने का प्रमुख कारक है। प्रारंभिक सूक्ष्मजीव संख्या लगभग 4.33 log10 CFU/g थी, जो समय के साथ बढ़कर 25°C पर 3वें दिन तथा 5°C पर 12वें दिन 7.92–9.47 log10 CFU/g तक पहुँची। इस वृद्धि ने भूरेपन, गंध-विकृति एवं ऊतक अवनयन को प्रेरित किया, जिससे शेल्फ-लाईफ में तीव्र गिरावट आई।

3.3.1.6 परिपक्वता सूचकांक

भंडारण के दौरान बटन मशरूम की कैप का खुलना परिपक्वता का प्रमुख संकेतक है, जो आंतरिक नमी ह्रास से जुड़ा होता है। परिपक्वता के साथ ऊपरी ऊतकों का सूखना जलहानि बढ़ाता है, जिससे कैप एवं वील की मूल संरचना प्रभावित होती है। प्रारंभिक दिन (Day 0) पर सभी नमूनों का परिपक्वता सूचकांक 0 था, क्योंकि सभी मशरूम बंद कैप अवस्था में थे। भंडारण अवधि के साथ परिपक्वता सूचकांक दोनों तापमान स्थितियों में क्रमिक रूप से बढ़ा। 25±1°C पर 3वें दिन यह 4.12 और 5±1°C पर 12वें दिन 4.13 दर्ज किया गया।

महत्वपूर्ण गुणवत्ता सीमा स्तर

भौतिक-रासायनिक गुणों में वजन हानि एवं सूक्ष्मजीवी भार ने स्वीकार्य सीमाएँ पार कीं—

- 25±1°C पर 3वें दिन तक वजन हानि >5% तथा सूक्ष्मजीवी संख्या >8 log10 CFU/g हो गई।
- 5±1°C पर वही स्तर 8वें दिन प्राप्त हुआ।

इन सीमाओं के आधार पर निष्कर्ष निकला कि 25°C पर संग्रहीत मशरूम 3वें दिन के बाद व्यावसायिक रूप से अनुपयुक्त हो जाते हैं, जबकि 5°C पर संग्रहीत नमूने 8वें दिन तक बाजार गुणवत्ता बनाए रखते हैं। परिणाम दर्शाते हैं कि पी.एल.डब्ल्यू., दृढ़ता, pH, टी.एस.एस., सूक्ष्मजीवी भार एवं परिपक्वता सूचकांक सभी भंडारण तापमान से अत्यधिक प्रभावित होते हैं। उच्च तापमान गुणवत्ता अवनयन को तेज करता है, जिससे शेल्फ-लाईफ घटती है और विपणन क्षमता सीमित होती है। अतः कम भंडारण तापमान बनाए रखना ताजे बटन मशरूम की गुणवत्ता एवं बाजार-योग्यता को संरक्षित करने हेतु आवश्यक है।

3.3.2 वाष्पशील कार्बनिक यौगिकों (VOCs) की प्रोफाइलिंग

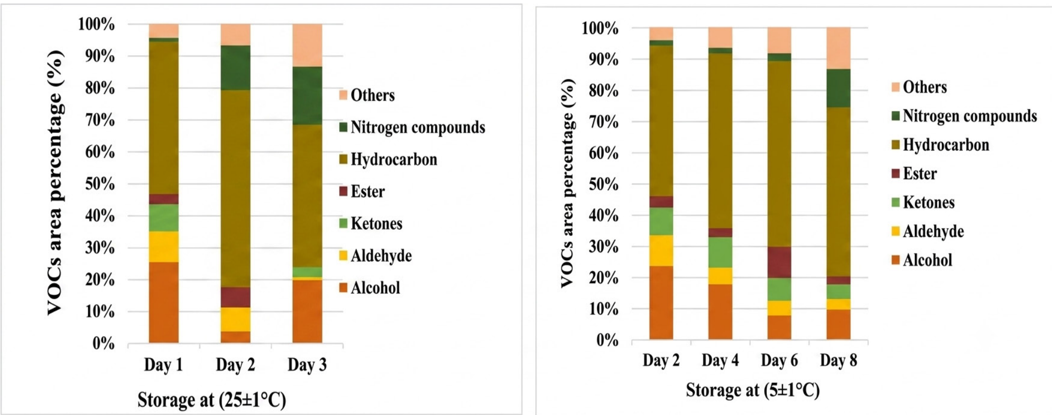
दो भंडारण तापमानों (25±1°C तथा 5±1°C) के तहत Agaricus bisporus द्वारा उत्सर्जित VOCs

का वर्गीकरण किया गया। VOCs को सात रासायनिक वर्गों में बाँटा गया और समय के साथ उनकी सांद्रता में उल्लेखनीय परिवर्तन दर्ज किए गए (चित्र 3)। भंडारण के प्रथम दिन हाइड्रोकार्बन सर्वाधिक (48.17%) थे, उसके बाद अल्कोहल (25.25%), ऐल्डिहाइड (9.4%), कीटोन (8.53%), एस्टर (3.02%) तथा नाइट्रोजन यौगिक (1.47%) थे। हाइड्रोकार्बन समूह में D-लिमोनीन प्रमुख घटक था (13.8%), जबकि अल्कोहल समूह में 3-ऑक्टानॉल (8.85%) एवं 1-ऑक्टेन-3-ऑल (6.67%) की प्रमुखता रही, जो ताज़े मशरूम की विशिष्ट सुगंध के मुख्य तत्व माने जाते हैं।

तापमान का VOC प्रोफ़ाइल पर स्पष्ट प्रभाव देखा गया।

- 25±1°C पर नाइट्रोजन यौगिकों में तीव्र वृद्धि हुई—1.47% (दिन 1) से 14.30% (दिन 2) और 18.33% (दिन 3)।
- 5±1°C पर वृद्धि धीमी थी—1.67% (दिन 2) से 2.45% (दिन 6) और 12.36% (दिन 8) तक।

भंडारण के अंतिम चरणों में इंडोल प्रमुख नाइट्रोजन यौगिक के रूप में उभरा, जिसका बढ़ना उच्च सूक्ष्मजीवी गतिविधि का सूचक माना गया।



चित्र 3: भंडारण तापमानों (25±1°C तथा 5±1°C) के तहत Agaricus bisporus द्वारा उत्सर्जित VOCs

नाइट्रोजन आधारित यौगिकों (विशेषकर इंडोल व अमाइन्स) की बढ़ोतरी मुख्यतः ऑटोलिसिस तथा सूक्ष्मजीवी डी-ऐमिनेशन से जुड़ी थी। ये यौगिक pH बढ़ाते हैं और गुणवत्ता अवनयन को तेज करते हैं। GC-MS विश्लेषण से पुष्टि हुई कि पैकेजिंग के भीतर नाइट्रोजन यौगिक बढ़ने के साथ माइक्रो-पर्यावरण का pH भी बढ़ा।

जब pH ने काले गाजर ऐंथोसाइनिन का संक्रमण बिंदु (≈6.5) पार किया, तो संकेतक में हल्के मैरून से नीले रंग में परिवर्तन दिखाई दिया। यह ऐंथोसाइनिन के डी-प्रोटोनन से उत्पन्न दृश्य प्रतिक्रिया थी, जो सड़न से जुड़े pH परिवर्तन का प्रभावी संकेतक बनी।

अतः इस pH-संवेदनशील रंग संकेतक का प्रयोग ताजगी निगरानी के लिए अविनाशी, वास्तविक समय पर आधारित तकनीक सिद्ध हुआ, जो मशरूम भंडारण में गुणवत्ता संरक्षण व खाद्य सुरक्षा दोनों के लिए उपयोगी है।

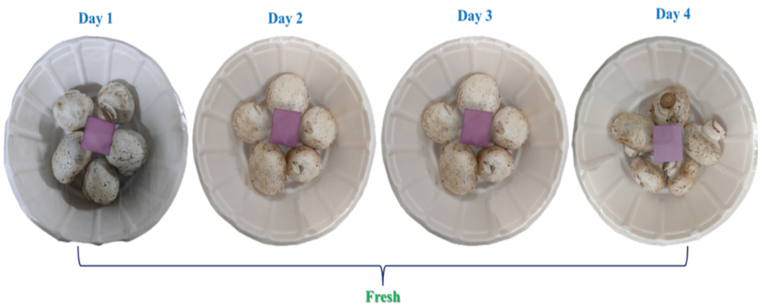
3.3.3 भंडारण के दौरान ताजगी संकेतक के रंग में परिवर्तन

ताजगी संकेतक के दृश्य रंग परिवर्तन तथा कुल रंग अन्तर (ΔE) से प्राप्त परिणाम चित्र 4 (a–c) में दर्शाए गए हैं। भंडारण के दौरान सड़न बढ़ने के साथ संकेतक का रंग क्रमिक रूप से हल्के गुलाबी से स्प्रूस नीले में परिवर्तित हुआ।

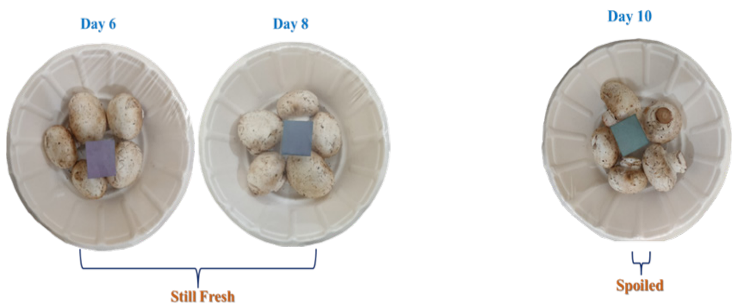
- 25±1°C पर, रंग परिवर्तन दूसरे दिन ही स्पष्ट दिखाई दिया।
- 5±1°C पर, हल्का गुलाबी रंग सातवें दिन तक बना रहा, जबकि नीले रंग की शुरुआत आठवें दिन देखी गई।

ऊँचे तापमान पर रंग परिवर्तन की तीव्रता अधिक रहने का कारण VOCs संरचना में तेजी से होने वाला जैव-रासायनिक परिवर्तन है। यह रंग परिवर्तन 25±1°C के लिए दिन 2 पर तथा 5±1°C के लिए दिन 8 पर उपभोक्ताओं हेतु शुरुआती चेतावनी संकेत के रूप में उपयोगी सिद्ध हुआ।

ΔE द्वारा मात्रात्मक रंग परिवर्तन का आकलन किया गया। ΔE मान 16 से अधिक होने पर नमूनों में सड़न का संकेत मिला — यह 25±1°C पर दूसरे दिन और 5±1°C पर आठवें दिन दर्ज किया गया। यह सीमा मान अनप्रशिक्षित उपभोक्ता द्वारा भी स्पष्ट दृष्टिगत परिवर्तन के रूप में पहचाना जा सकता है।



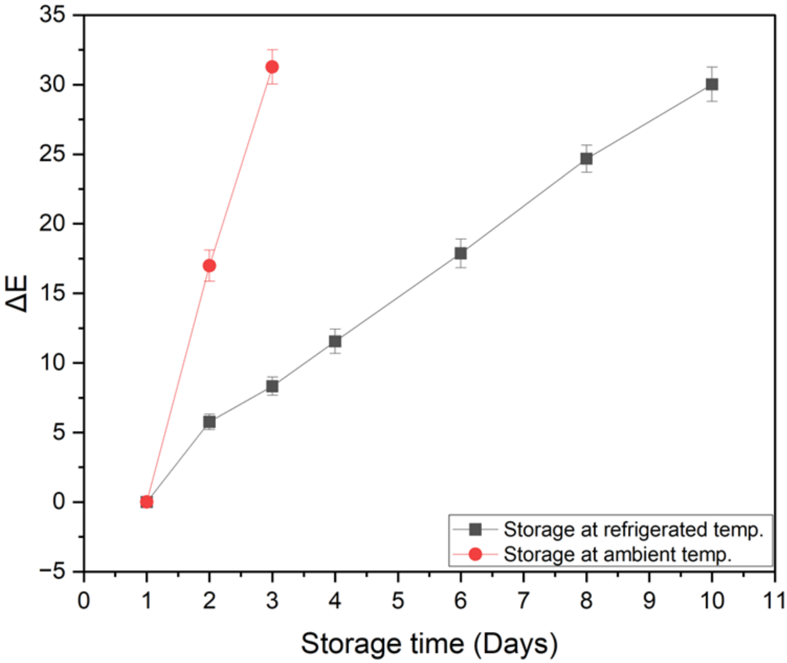
चित्र 4a: 5±1°C पर संकेतक के रंग परिवर्तन के आधार पर ताजगी मूल्यांकन



चित्र 4b: 25±1°C पर संकेतक के रंग परिवर्तन के आधार पर ताजगी मूल्यांकन

5±1°C पर संग्रहीत नमूनों में संकेतक रंग परिवर्तन और भौतिक-रासायनिक गुणों के बीच सहसंबंध परीक्षण किया गया। सभी गुणों में (कठोरता को छोड़कर) अत्यधिक महत्वपूर्ण सहसंबंध ($p < 0.01$) पाया

गया। सहसंबंध गुणांक 0.82–0.93 के बीच थे, जिसमें भार क्षय (0.93) सर्वाधिक सहसंबंधित पाया गया। यह सिद्ध करता है कि संकेतक रंग परिवर्तन मशरूम के वास्तविक गुण परिवर्तन से गहरे रूप से सम्बद्ध है, तथा ताजगी की वास्तविक समय निगरानी हेतु प्रभावी उपकरण है।



चित्र 4c: भंडारण अवधि में संकेतक के रंग (ΔE) में परिवर्तन

3.4 प्रमुख अवयव विश्लेषण (PCA): 5±1°C पर भंडारण के दौरान भौतिक-रासायनिक गुणों का वर्गीकरण

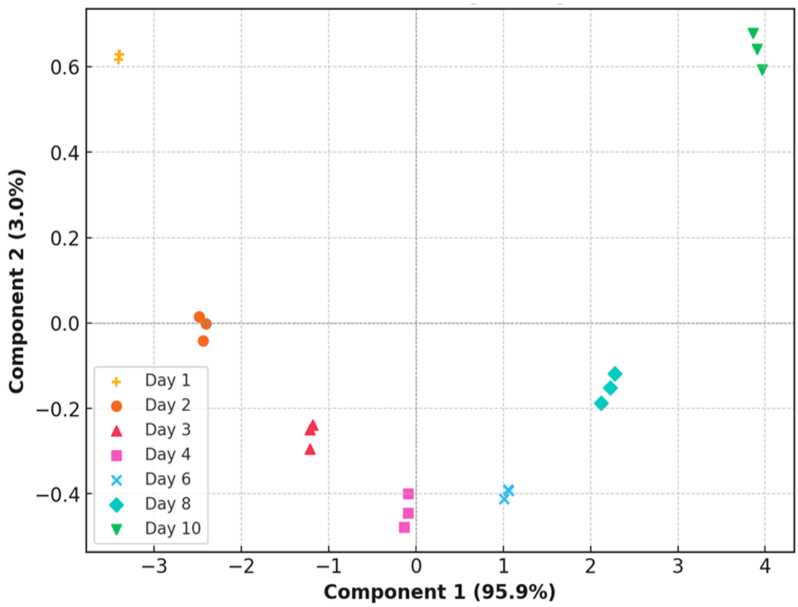
चित्र 5 में बहुसंख्यक गुणवत्ता संकेतकों की PCA आधारित वर्गीकृति प्रदर्शित है। चयनित संकेतक (कठोरता, pH, TSS, TPC, MI तथा PLW) के आधार पर नमूनों को सात विशिष्ट समूहों में बिना किसी ओवरलैप के वर्गीकृत किया गया।

- PC1 ने 95.9% तथा PC2 ने 3.0% परिवर्तन का प्रतिनिधित्व किया।
- दिन 1–4 के समूह PC1<0 क्षेत्र में निकटतर रहे, जो उच्च गुणवत्ता एवं न्यूनतम परिवर्तन को दर्शाता है।
- दिन 6–8 में समूह केन्द्र की ओर स्थानांतरित हुए, जो प्रारम्भिक अवनयन परन्तु अभी भी स्वीकार्य गुणवत्ता को सूचित करता है।
- दिन 10 का समूह PC1>0 एवं PC2>0 की दिशा में सर्वाधिक दूर पाया गया, जिससे स्पष्ट गुणवत्ता क्षरण और सड़न सिद्ध हुई।

PCA ने भंडारण अवधि के साथ गुणवत्ता परिवर्तन की तीन अवस्थाएँ दर्शाईं—

1. ताजा चरण (दिन 1–4)
2. अभी ताजा परंतु अवनत होता चरण (दिन 6–8)
3. सड़ा हुआ चरण (दिन 10)

PCA वर्गीकरण संकेतक रंग परिवर्तन से भी मेल खाता है, जिससे इसकी ताजगी पहचान क्षमता वैज्ञानिक रूप से पुष्ट होती है।



चित्र 5: बहुसंख्यक गुणवत्ता संकेतकों की PCA आधारित वर्गीकृति

निष्कर्ष

काले गाजर ऐंथोसाइनिन को सेलुलोज फिल्टर पेपर पर स्थिर कर विकसित किया गया संकेतक मशरूम की ताजगी का वास्तविक समय मूल्यांकन करने में सक्षम रहा। FTIR, SEM तथा XRD विश्लेषणों ने ऐंथोसाइनिन के प्रभावी स्थिरीकरण और संवेदनशील रंग प्रतिक्रिया की पुष्टि की। GC-MS परीक्षण से सिद्ध हुआ कि पैकेजिंग में नाइट्रोजन यौगिकों (विशेषकर अमाइन्स) के संचय से आंतरिक pH बढ़ा और संकेतक में स्पष्ट रंग परिवर्तन हुआ, जिससे तीन गुणवत्ता अवस्थाओं — ताज़ा, अभी ताजा तथा सड़ा हुआ — को नग्न आंखों से पहचाना जा सका। यह संकेतक कम लागत, पर्यावरण-अनुकूलता, खाद्य-अपशिष्ट आधारित सामग्री उपयोग तथा आसान उपभोक्ता अनुप्रयोग के कारण अन्य नाशवंत उत्पादों (मछली, पोल्ट्री, मांस एवं डेयरी) में भी ताजगी आकलन के लिए उपयोगी सिद्ध होने की क्षमता रखता है।

संदर्भ

Almasi, H., Forghani, S., & Moradi, M. (2022). Recent advances on intelligent food freshness indicators; an update on natural colorants and methods of preparation. Food Packaging and Shelf Life, 32, 100839.

Arjun, A. D., Chakraborty, S. K., Mahanti, N. K., & Kotwaliwale, N. (2022). Non-destructive assessment of quality parameters of white button mushrooms (Agaricus bisporus) using image processing techniques. Journal of Food Science and Technology, 59(5), 2047-2059.

Ban, Z., Li, L., Guan, J., Feng, J., Wu, M., Xu, X., & Li, J. (2014). Modified atmosphere packaging (MAP) and coating for improving preservation of whole and sliced Agaricus bisporus. Journal of Food Science and Technology, 51, 3894-3901.

Chaari, M., Elhadef, K., Akermi, S., Tounsi, L., Hlima, H. B., Ennouri, M., & Smaoui, S. (2024). Development of a novel colorimetric pH-indicator film based on CMC/flaxseed gum/ betacyanin from beetroot peels: A powerful tool to monitor the beef meat freshness. Sustainable Chemistry and Pharmacy, 39, 101543.

Elhadef, K., Chaari, M., Akermi, S., Hlima, H. B., Ennouri, M., Abdelkafi, S., & Smaoui, S. (2024). pH-sensitive films based on carboxymethyl cellulose/date pits anthocyanins: A convenient colorimetric indicator for beef meat freshness tracking. Food Bioscience, 57, 103508.

Ezati, P., Bang, Y. J., & Rhim, J. W. (2021). Preparation of a shikonin-based pH-sensitive color indicator for monitoring the freshness of fish and pork. Food chemistry, 337, 127995.

Ezati, P., Bang, Y. J., & Rhim, J. W. (2021). Preparation of a shikonin-based pH-sensitive color indicator for monitoring the freshness of fish and pork. Food chemistry, 337, 127995.

Khan, P. M. A., & Farooqui, M. (2011). Analytical applications of plant extract as natural pH Indicator: a review. Journal of advanced scientific research, 2(04), 20-27.

Kırca, A., Özkan, M., & Cemeroğlu, B. (2007). Effects of temperature, solid content and pH on the stability of black carrot anthocyanins. Food chemistry, 101(1), 212-218.

Kumar, V. A., Pravitha, M., Yadav, A., Pandiselvam, R., & Srivastav, P. P. (2023). Influence of ultrasonic application on soybean aqueous extract based composite edible film: Characterization and their food application. Food Hydrocolloids, 135, 108210.

Kuswandi, B., Restyana, A., Abdullah, A., Heng, L. Y., & Ahmad, M. (2012). A novel colorimetric food package label for fish spoilage based on polyaniline film. Food control, 25(1), 184-189.

Lin, H., Jiang, H., Adade, S. Y. S. S., Kang, W., Xue, Z., Zareef, M., & Chen, Q. (2023). Overview of advanced technologies for volatile organic compounds measurement in food quality and safety. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 63(26), 8226-8248.

Liu, D., Zhang, C., Pu, Y., Chen, S., Liu, L., Cui, Z., & Zhong, Y. (2022). Recent advances in pH-responsive freshness indicators using natural food colorants to monitor food freshness. Foods, 11(13), 1884.

López-Gómez, A., Ros-Chumillas, M., Navarro-Martínez, A., Barón, M., Navarro-Segura, L., Taboada-Rodríguez, A., ... & Martínez-Hernández, G. B. (2021). Packaging of fresh sliced mushrooms with essential oils vapours: A new technology for maintaining quality and extending shelf life. Foods, 10(6), 1196.

Moradian, S., Almasi, H., & Moini, S. (2018). Development of bacterial cellulose based active membranes containing herbal extracts for shelf life extension of button mushrooms (Agaricus bisporus). Journal of Food Processing and Preservation, 42(3), e13537.

Oladzadabbasabadi, N., Nafchi, A. M., Ghasemlou, M., Ariffin, F., Singh, Z., & Al-Hassan, A. A. (2022). Natural anthocyanins: Sources, extraction, characterization, and suitability for smart packaging. Food Packaging and Shelf Life, 33, 100872.

Parlak, M. E., Sahin, O. I., Dundar, A. N., Saricaoglu, F. T., Smaoui, S., Goksen, G., & Nirmal, N. P. (2023). Natural colorant incorporated biopolymers-based pH-sensing films for indicating the food product quality and safety. Food Chemistry, 138160.

Pei, F., Yang, W., Ma, N., Fang, Y., Zhao, L., An, X., & Hu, Q. (2016). Effect of the two drying approaches on the volatile profiles of button mushroom (Agaricus bisporus) by headspace GC–MS and electronic nose. LWT-Food Science and Technology, 72, 343-350.

Priyadarshi, R., Ezati, P., & Rhim, J. W. (2021). Recent advances in intelligent food packaging applications using natural food colorants. ACS Food Science & Technology, 1(2), 124-138.

Sami, R., Elhakem, A., Almushhin, A., Alharbi, M., Almatrafi, M., Benajiba, N., & Helal, M. (2021). Enhancement in physicochemical parameters and microbial populations of mushrooms as influenced by nano-coating treatments. Scientific Reports, 11(1), 7915.

Sami, R., Elhakem, A., Almushhin, A., Alharbi, M., Almatrafi, M., Benajiba, N., ... & Helal, M. (2021). Enhancement in physicochemical parameters and microbial populations of mushrooms as influenced by nano-coating treatments. Scientific Reports, 11(1), 7915.

Thakur, R. R., Shahi, N. C., Mangaraj, S., Lohani, U. C., & Chand, K. (2020). Effect of apple peel based edible coating material on physicochemical properties of button mushrooms (Agaricus bisporus) under ambient condition. International Journal of Chemical Studies, 8(1), 2362-2370.

Yong, H., & Liu, J. (2020). Recent advances in the preparation, physical and functional properties, and applications of anthocyanins-based active and intelligent packaging films. Food Packaging and Shelf Life, 26, 100550.

Zhang, J., Zou, X., Zhai, X., Huang, X., Jiang, C., & Holmes, M. (2019). Preparation of an intelligent pH film based on biodegradable polymers and roselle anthocyanins for monitoring pork freshness. Food chemistry, 272, 306-312.

Zhang, K., Pu, Y. Y., & Sun, D. W. (2018). Recent advances in quality preservation of postharvest mushrooms (Agaricus bisporus): A review. Trends in Food Science & Technology, 78, 72-82.

जी पी एस आधारित मृदा उर्वरता मानचित्रण एवं तकनीकी हस्तक्षेप: टिकाऊ कृषि की दिशा में अजनास ग्राम एक मॉडल

डॉ. नरेन्द्र चौहान*

कृषि विज्ञान संस्थान, सेज विश्वविद्यालय, इंदौर 452020

*ईमेल: narendra.chouhan@sageuniversity.in

सारांश

इस अध्ययन का उद्देश्य मध्यप्रदेश के देवास जिले के अजनास ग्राम की मृदा उर्वरता का वैज्ञानिक मूल्यांकन कर जीपीएस आधारित मृदा उर्वरता मानचित्रण तैयार करना तथा टिकाऊ कृषि हेतु तकनीकी हस्तक्षेप सुझाना है। 130 मैक्रोन्यूट्रिएंट और 80 माइक्रोन्यूट्रिएंट मृदा नमूनों का जी.पी. एस डेटा जी.आई.एस सॉफ़्टवेयर द्वारा विश्लेषित किया गया। परिणामों से ज्ञात हुआ कि नाइट्रोजन की सर्वाधिक कमी, फॉस्फोरस व पोटाश का असंतुलन, तथा जिंक (62%) की प्रमुख कमी विद्यमान है। लगभग 40% नमूनों में जैविक कार्बन का स्तर निम्न पाया गया । फसली विश्लेषण से स्पष्ट हुआ कि किसानों द्वारा प्रयुक्त रासायनिक उर्वरक अनुशंसित अनुपात से कम हैं, जिससे उपज व मृदा स्वास्थ्य पर प्रतिकूल प्रभाव पड़ता है। जीपीएस आधारित उर्वरता मानचित्रण द्वारा साइट-विशिष्ट पोषण प्रबंधन की दिशा में सटीक सिफारिशें विकसित की गईं। अध्ययन निष्कर्षित करता है कि मृदा परीक्षण आधारित पोषण प्रबंधन, जैविक कार्बन सुधार एवं जी पी एस-जी आई एस तकनीक के एकीकृत प्रयोग से सतत कृषि एवं पोषण संतुलन में उल्लेखनीय सुधार संभव है।

संकेत शब्द: मृदा उर्वरता, जी पी एस, जी आई एस, पोषण प्रबंधन, टिकाऊ कृषि, अजनास ग्राम

1. प्रस्तावना

भारत एक कृषि प्रधान देश है, या यूँ कहें कि भारत की आत्मा गांवों में बसती है और गांवों में बसता है किसान, जो इस देश के लगभग 140 करोड़ से अधिक लोगों के लिए अन्न का उत्पादन करता है। वैज्ञानिकों और किसानों के संयुक्त प्रयासों के परिणामस्वरूप भारत आज खाद्यान्न उत्पादन में आत्मनिर्भर बन चुका है। हाल के वर्षों में कोविड-19 महामारी जैसे कठिन समय में भी, जब अन्य क्षेत्र अपने अस्तित्व के लिए संघर्ष कर रहे थे, तब भी कृषि क्षेत्र ने देश की अर्थव्यवस्था को स्थिर बनाए रखा। परंतु बढ़ती जनसंख्या, घटती भूमि की उत्पादकता, तथा मृदा संसाधनों के अत्यधिक दोहन के कारण भविष्य में खाद्य सुरक्षा बनाए रखना एक गंभीर चुनौती के रूप में उभर रही है। मृदा की उर्वरता कृषि उत्पादन की रीढ़ होती है। किसी भी फसल की वृद्धि, उत्पादन, तथा गुणवत्ता इस बात पर निर्भर करती है कि मृदा में आवश्यक पोषक तत्त्व मैक्रोन्यूट्रिएंट्स (N, P, K, S) के साथ-साथ सूक्ष्म पोषक तत्व जैसे (Zn, Fe, Mn, Cu, B, Mo आदि) उचित मात्रा और अनुपात में मौजूद हों। यदि मृदा में इन पोषक तत्वों की कमी या असंतुलन हो, तो न केवल फसल की पैदावार प्रभावित होती है, बल्कि मृदा की दीर्घकालीन उपजाऊ शक्ति भी गिर सकती है।

वर्तमान समय में उर्वरक असंतुलन एक गंभीर समस्या है। उदाहरण स्वरूप अक्सर यूरिया(नाइट्रोजन स्रोत) का अधिक उपयोग किया जाता है, जबकि फॉस्फोरस, पोटाश और सूक्ष्म तत्वों की मात्रा अपेक्षाकृत कम

रहती है। इस प्रकार की असंतुलन पद्धति धीरे-धीरे मिट्टी की पोषण क्षमता को कम कर देती है। इसलिए मृदा परीक्षण आधारित उर्वरक अनुशंसाएँ और संतुलित पोषण प्रबंधन अपनाना आज अति आवश्यक है। मध्य प्रदेश के देवास जिले की खातेगांव तहसील के अंतर्गत आने वाला अजनास ग्राम इस दिशा में एक प्रेरक उदाहरण प्रस्तुत करता है। लगभग 200 वर्ष पुराने इस ग्राम की मिट्टी मुख्यतः काली चिकनी मिट्टी है। इस अध्ययन का उद्देश्य अजनास ग्राम की मिट्टी का वैज्ञानिक विश्लेषण कर उसकी उर्वरता स्थिति का निर्धारण करना, जीपीएस आधारित मृदा उर्वरता मानचित्र तैयार करना, तथा उर्वरक उपयोग में हो रहे असंतुलन को पहचानते हुए टिकाऊ कृषि की दिशा में तकनीकी हस्तक्षेप सुझाना है।

2. सामग्री एवं विधि

यह अध्ययन 2023 में मध्यप्रदेश के देवास जिले की खातेगांव तहसील में आने वाले अजनास ग्राम में किया गया। अजनास ग्राम का कुल क्षेत्रफल लगभग 10,460 हेक्टेयर है' जिसमें से लगभग 1,060 हेक्टेयर भूमि पर कृषि कार्य होता है (Village Info India, 2025)। वर्तमान में ग्राम की कुल जनसंख्या लगभग 6,000 है और यहां के 500 किसान कृषि को अपना मुख्य व्यवसाय मानते हैं। अजनास ग्राम के किसान कृषि विकास की मुख्य धारा से जुड़े हैं और हर नए तकनीकी बदलाव को अपनाने के लिए उत्सुक हैं। अध्ययन में 35 किसानों को चुना गया और उनकी मुख्य आवश्यकता सटीक तकनीकी जानकारी की है, ताकि मिट्टी और पोषण प्रबंधन के सर्वोत्तम उपायों को अपनाया जा सके। अजनास ग्राम में सोयाबीन, गेहूँ और चना जैसी प्रमुख फसलें उगाई जाती हैं।

अध्ययन के लिए मिट्टी के 130 मैक्रोन्यूट्रिएंट और 80 माइक्रोन्यूट्रिएंट नमूने एकत्र किए गए थे (Soil health card, 2025)। और प्रत्येक नमूने का स्थान जीपीएस डिवाइस द्वारा दर्ज किया गया। इस डेटा का उपयोग जी पी एस आधारित मृदा उर्वरता मानचित्रण के लिए किया गया। सभी नमूनों का स्थानिक विश्लेषण और उर्वरता मानचित्रण, जीआईएस सॉफ़्टवेयर (आर्क जी आई एस) और जीपीएस डेटा के आधार पर किया गया। अध्ययन में यह पाया गया कि अधिकांश किसानों द्वारा सोयाबीन, गेहूँ और चना फसलों में संतुलित उर्वरक का उपयोग नहीं किया जा रहा है, जिससे मिट्टी की पोषण स्थिति पर असंतुलन का प्रभाव दिखाई देता है। नमूना डेटा का सांख्यिकीय विश्लेषण किया गया और प्रत्येक पोषक तत्व की उपलब्धता को वर्गीकृत कर औसत, मानक विचलन और प्रतिशत वितरण का आकलन किया गया। इस अध्ययन के परिणामस्वरूप मृदा परीक्षण आधारित संतुलित उर्वरक अनुशंसाएँ तैयार की गईं। जी पी एस आधारित मानचित्र के माध्यम से किसानों को फील्ड-विशिष्ट पोषण प्रबंधन के सुझाव प्रदान किए गए और उन्हें मिट्टी स्वास्थ्य सुधार एवं सतत कृषि के लिए प्रशिक्षण एवं तकनीकी मार्गदर्शन दिया गया।

परिणाम और चर्चा

अजनास ग्राम की मिट्टी के परीक्षण के आधार पर यह पाया गया कि ग्राम की मिट्टी में पोषक तत्वों की कमी और अधिकता दोनों दृष्टिगोचर होती हैं, हालांकि कोई गंभीर मृदा समस्या नहीं पाई गई (चित्र 1(a), 1(b))। मिट्टी का संपूर्ण पोषण संतुलन असंतुलित उर्वरक प्रबंधन और पोषण की असमान उपलब्धता के कारण प्रभावित हो रहा है। अध्ययन के परिणामों से यह स्पष्ट हुआ कि अजनास की लगभग 40% मिट्टी में जैविक कार्बन की कमी है और 60% मिट्टी में मध्यम स्तर दर्ज किया गया (चित्र 1(c))। जैविक कार्बन मिट्टी की

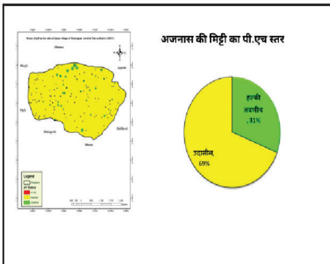
संरचना, जलधारण क्षमता और पोषक तत्वों के आदान-प्रदान में महत्वपूर्ण भूमिका निभाता है। जैविक कार्बन की कमी, विशेष रूप से नाइट्रोजन जैसे पोषक तत्वों की उपलब्धता को प्रभावित कर सकती है, जो इस क्षेत्र में उर्वरक प्रबंधन की आवश्यकता को और बढ़ाती है।

नाइट्रोजन(N) पौधों के लिए आवश्यक प्रमुख पोषक तत्व है। परीक्षण के अनुसार, लगभग शत-प्रतिशत मृदा में नाइट्रोजन की कमी पाई गई, जो सोयाबीन, गेहूँ और चना जैसी प्रमुख फसलों की उपज पर नकारात्मक प्रभाव डाल सकती है (चित्र 1(d)। फॉस्फोरस(P) का स्तर लगभग 41% मृदा में मध्यम और 59% मृदा में उच्च पाया गया (चित्र 1(e)। पोटाश(K) लगभग 72% मृदा में मध्यम और 28% में अधिक था (चित्र 1(f))। सल्फर(S) की कमी केवल 22% मृदा में पाई गई, जबकि 78% मृदा में मध्यम स्तर था (चित्र1(g)। सूक्ष्म पोषक तत्वों की स्थिति भी असंतुलित पाई गई। विशेष रुप से जिंक (Zn) की कमी लगभग 62% मृदा में पाई गई (चित्र1(h), जबकि लोहा(Fe) की कमी केवल 20% मृदा में और 80% मृदा में मध्यम स्तर पाया गया (चित्र 1(i)। बोरॉन(B) का स्तर लगभग 26% मृदा में मध्यम और 74% में अधिक था (चित्र1(j)। तांबा(Cu) और मैगनीज(Mn) की उपलब्धता अधिक पाई गई (चित्र 1(k) एवं 1(l)। इस प्रकार, यह स्पष्ट होता है कि कृषि उत्पादन की स्थिरता के लिए मिट्टी परीक्षण आधारित पोषण प्रबंधन आवश्यक है।

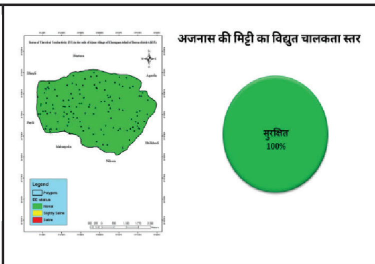
फसलों में रासायनिक उर्वरक के उपयोग का विश्लेषण किया गया। सोयाबीन की फसल में केवल 20% किसान ही रासायनिक उर्वरक का उपयोग करते हैं, जिसमें मुख्य रुप से डी.ए.पी .का प्रयोग होता है। अनुशंसित पोषक तत्व अनुपात N:P:K = 20:60:20 किग्रा/हे के स्थान पर किसानों द्वारा केवल 11:28:0 किग्रा/हे का ही प्रयोग किया जा रहा है, जिससे सोयाबीन की फसल में पोषक तत्व असंतुलित हो रहे हैं (चित्र 2(a)।

गेहूँ की फसल में डीएपी, इफको-II और यूरिया का प्रयोग होता है। जिन किसानों ने डीएपी और यूरिया का प्रयोग किया, उन्होंने गेहूँ के लिए अनुशंसित N:P:K=100:80:40 किग्रा/हे के स्थान पर 88:60:0 किग्रा/हे का ही प्रयोग किया (चित्र 2(b)। वहीं, डी ए पी की जगह इफको और यूरिया प्रयोग करने वाले किसानों ने 72:40:20 किग्रा/हे का ही प्रयोग किया (चित्र 2(c)। चने की फसल में भी मुख्य रुप से डी.ए.पी का उपयोग किया गया और अनुशंसित 20:60:20 किग्रा/हे के स्थान पर केवल 13:34:0 किग्रा/हे का ही प्रयोग हुआ (चित्र2(d)। सर्वेक्षण से स्पष्ट हुआ कि सोयाबीन, गेहूँ और चने की फसलों में पोषक तत्वों का उपयोग पूर्णतः असंतुलित है। यह असंतुलन फसल उपज, मिट्टी की दीर्घकालीन उर्वरता और पोषण संतुलन पर प्रतिकूल प्रभाव डाल सकता है। अध्ययन से यह भी पता चला कि किसानों द्वारा पोषक तत्वों का उपयोग मिट्टी परीक्षण और फसल की आवश्यकता के अनुरुप नहीं है।

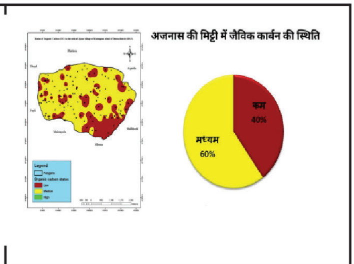
जी पी एस आधारित मृदा उर्वरता मानचित्रण और स्थानिक पोषण प्रबंधन माध्यम से किसानों को फसल-विशिष्ट और खेत-विशिष्ट उर्वरक अनुशंसाएँ प्रदान की जा सकती हैं। इससे न केवल पोषण संतुलन सुधरता है, बल्कि सतत कृषि और उत्पादन स्थिरता को भी बढ़ावा मिलता है। यह अध्ययन दर्शाता है कि वैज्ञानिक मृदा प्रबंधन और तकनीकी हस्तक्षेप अजनास ग्राम के किसानों के लिए टिकाऊ कृषि अपनाने में एक महत्वपूर्ण उपकरण हो सकते हैं।



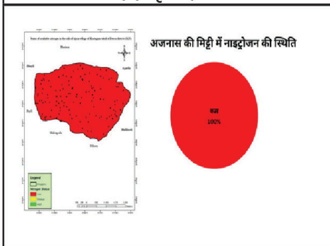
(a) मृदा pH



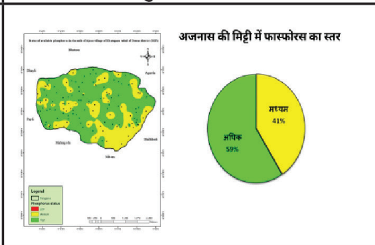
(b) विद्युत चालकता (EC)



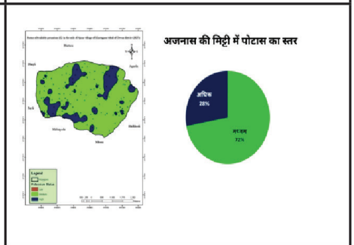
(c) जैविक कार्बन



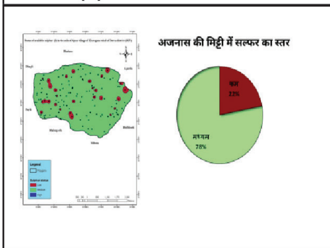
(d) उपलब्ध नाइट्रोजन



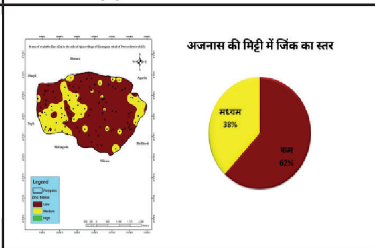
(e) उपलब्ध फॉस्फोरस



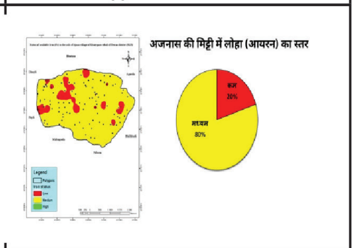
(f) उपलब्ध पोटाश



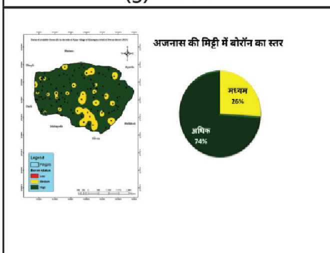
(g) सल्फर



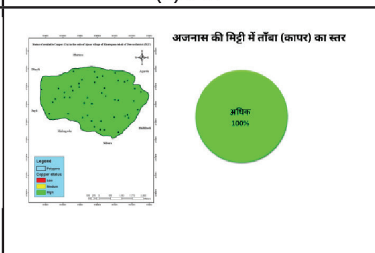
(h) जिंक



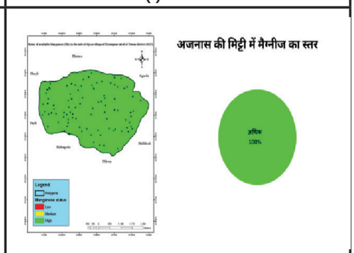
(i) लोहा



(j) बोरॉन

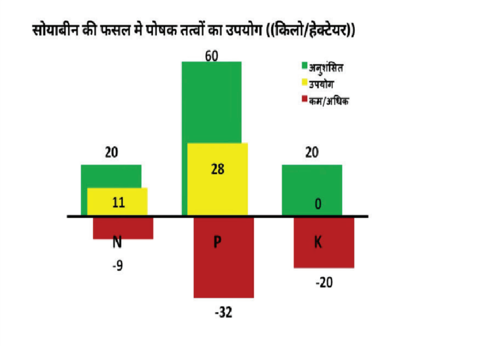


(k) तांबा

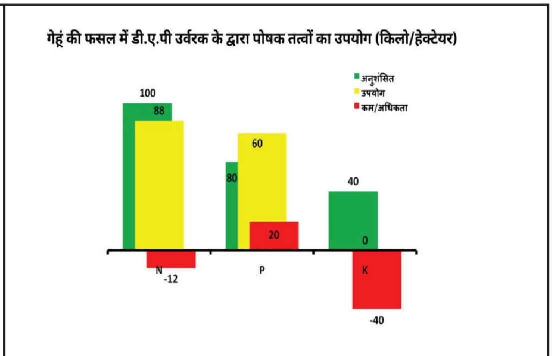


(l) मैंगनीज

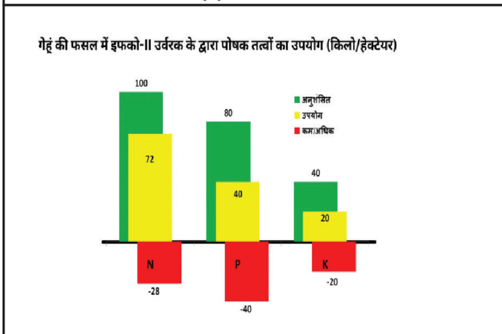
चित्र 1. अजनास ग्राम के जीपीएस आधारित मृदा उर्वरता एवं मृदा गुणधर्म मानचित्र) :a) मृदा pH, (b) विद्युत चालकता)EC), (c) जैविक कार्बन, (d) उपलब्ध नाइट्रोजन, (e) उपलब्ध फॉस्फोरस, (f) उपलब्ध पोटाश, (g) सल्फर, (h) जिंक, (i) लोहा, (j) बोरॉन, (k) तांबा तथा)l) मैंगनीज।



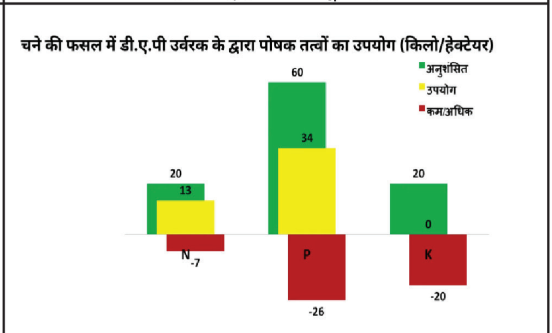
(a) सोयाबीन



(b) गेहूँ (डीएपी+यूरिया)



(c) गेहूँ (इफको+यूरिया)



(d) चना

चित्र 2. प्रमुख फसलों में अनुशंसित एवं वास्तविक पोषक तत्व उपयोग की तुलना) :a) सोयाबीन, (b) गेहूँ)डीएपी+यूरिया(, (c) गेहूँ)इफको+यूरिया(, (d) चना।

सिफारिशें

1. मिट्टी परीक्षण आधारित उर्वरक प्रबंधन: किसानों को हर सीजन में मिट्टी परीक्षण कराना चाहिए और पोषक तत्वों की उपलब्धता के अनुसार संतुलित उर्वरक का प्रयोग करना चाहिए।
2. जीपीएस और जीआईएस, आधारित उर्वरता मानचित्रण: खेत-विशिष्ट पोषण प्रबंधन के लिए जी पी एस आधारित मृदा उर्वरता मानचित्र का उपयोग किया जाना चाहिए, जिससे प्रत्येक खेत की पोषण जरूरत के अनुसार अनुशंसाएँ दी जा सकें।
3. संतुलित रासायनिक उर्वरक का उपयोग: सोयाबीन, गेहूँ और चने जैसी प्रमुख फसलों में पोषक तत्वों का संतुलित अनुपात अपनाना आवश्यक है, जैसे कि नाइट्रोजन, फॉस्फोरस और पोटाश के उचित अनुपात।
4. जैविक कार्बन सुधार: मिट्टी की जैविक कार्बन सामग्री बढ़ाने के लिए हरी खाद, गोबर खाद और कम्पोस्ट का नियमित उपयोग किया जाना चाहिए।

5. सूक्ष्म पोषक तत्व प्रबंधन: जिंक, लोहा, बोरॉन, तांबा और मैंगनीज जैसी सूक्ष्म पोषक तत्वों की कमी को पूरा करने के लिए सटीक मात्रा में सूक्ष्म उर्वरक का प्रयोग किया जाना चाहिए।
6. किसानों के लिए प्रशिक्षण: किसानों को मिट्टी स्वास्थ्य, पोषण संतुलन और उर्वरक प्रबंधन के लिए नियमित प्रशिक्षण और जागरूकता कार्यक्रम उपलब्ध कराए जाने चाहिए।
7. सतत कृषि की दिशा में तकनीकी हस्तक्षेप: जीपीएस आधारित मृदा उर्वरता मानचित्रण और पोषण प्रबंधन की तकनीक को अपनाकर किसानों की उत्पादन क्षमता और मिट्टी की दीर्घकालीन उपजाऊ शक्ति बढ़ाई जा सकती है।

निष्कर्ष

अजनास ग्राम की मृदा उर्वरता अध्ययन से स्पष्ट हुआ कि ग्राम की मिट्टी में पोषक तत्वों का असंतुलन और जैविक कार्बन की कमी देखी गई। नाइट्रोजन की कमी लगभग सभी नमूनों में पाई गई, जबकि फॉस्फोरस और पोटाश का स्तर असमान था। सूक्ष्म पोषक तत्वों में विशेष रूप से जिंक की कमी प्रमुख समस्या रही। इसके परिणामस्वरूप, सोयाबीन, गेहूँ और चने की फसलों में किसानों द्वारा उपयोग किए जाने वाले रासायनिक उर्वरक पूर्णतः असंतुलित पाए गए।

अध्ययन यह दर्शाता है कि मिट्टी परीक्षण और जीपीएस आधारित उर्वरता मानचित्रण किसानों के लिए फसल-विशिष्ट और खेत-विशिष्ट पोषण प्रबंधन की दिशा में एक प्रभावी उपकरण है। उचित तकनीकी हस्तक्षेप और संतुलित उर्वरक प्रबंधन के माध्यम से मिट्टी की उपजाऊ शक्ति में सुधार और सतत कृषि को बढ़ावा दिया जा सकता है।

संदर्भ

Soil Health card, Government of India, Ministry of Agriculture and Farmers Welfare, Department of Agriculture and Farmers Welfare. 2025. Soil Health Card Portal. Available at: https://soilhealth.dac.gov.in/home

Village Info India. 2025. Ajnas Village, Khategaon Tehsil, Dewas District, Madhya Pradesh. Available at: https://villageinfo.in/madhya-pradesh/dewas/khategaon/ajnas.html

चिरस्थायी पर्यावरण को बनाये रखने के लिए रेशेदार फसलों से बाहरी छाल निष्कर्षण के माध्यम से रेशां उत्पादन के लिए बहु-रेशां रिबन एक्सट्रैक्टर की रचना एवं विकास

प्रतीक श्रीवास्तव*, नागेशकुमार टी, विद्या भूषण शम्भू, मनीषा जगदाले, लक्ष्मीकांत नायक, मानिक भौमिक एवं डी बी शाक्यवार

भा. कृ. अनु. प. - राष्ट्रीय प्राकृतिक रेशा अभियांत्रिकी एवं प्रौद्योगिकी संस्थान,12-रीजेंट पार्क, कोलकाता

*ईमेल: prateek07shrivastava@gmail.com

सारांश

व्यापार और उद्योग की दृष्टि से, कपास के बाद जूट भारत में सबसे महत्वपूर्ण प्राकृतिक रेशे वाली फसल है। लेकिन बढ़ती निवेश लागत, श्रमिकों की अनुपलब्धता और अनुचित डिज़ाइन वाली मशीनरी इसके उत्पादन में हर साल गिरावट के प्रमुख कारण हैं। इन मुद्दों को हल करने के लिए, इस शोध कार्य का उद्देश्य कुल प्रसंस्करण लागत को कम करने और फाइबर की गुणवत्ता बढ़ाने के लिए एक बिजली से चलने वाला डेकोर्टिकेटर (एक्सट्रैक्टर) यन्त्र को विकसित करना है जो की जूट के साथ साथ अन्य बास्ट आधारित रेशेदार फसल में से कटाई के उपरांत हरी छाल (रिबन) को निकल सके। वर्तमान आविष्कार के अनुसार विकसित निष्कर्षक में एक तह-प्रकार की ट्रे, जिसमें फीडिंग च्यूट, रिबन निष्कर्षण तंत्र, रिबन संवहन इकाई, रिबन संग्रहण इकाई, उप-उत्पाद वितरण च्यूट, विद्युत संचरण प्रणाली, परिवर्तनीय आवृत्ति ड्राइव (VFD), चार वायवीय पहिये और एकल-बिंदु हिच तंत्र शामिल हैं। रिबन निष्कर्षण तंत्र में मुख्य रूप से एक जोड़ी फ्ल्यूड क्रशिंग रोलर्स और पृथक्करण रोलर्स शामिल हैं। विकसित फाइबर एक्सट्रैक्टर का डिजाइन एवं रेशां निष्कर्षण प्रक्रिया का संख्यात्मक मॉडलिंग असतत तत्व विधि (डिस्क्रीट एलिमेंट मेथड) का उपयोग करके किया गया है । एवं सिमुलेशन के परिणाम दिखाते हैं कि 100, 200, 300, 400 और 500 आरपीएम पर डिकॉर्टिकेटर को संचालित करने के लिए आवश्यक कुल शक्ति क्रमशः 2.4, 4.1, 5.4, 6.0 और 6.3 किलोवाट है। विकसित मशीन का कुल माप 2775 मिमी लंबा, 980 मिमी चौड़ा और 1215 मिमी ऊँचा है। यह मशीन जूट, केनाफ, मीस्ट, भांग, बिछुआ, सन और रेमी जैसी फसलों से हरे रिबन के साथ-साथ सूखे रेशे निकालने के लिए उपयुक्त है। यह मशीन तीन-चरण 7.5 एचपी इलेक्ट्रिक मोटर द्वारा संचालित होती है और इसकी संचालन गति 250-550 आरपीएम तक होती है। मशीन की निष्कर्षण क्षमता और दक्षता क्रमशः 1050 से 1200 किग्रा/घंटा और 89 से 93% तक है। विकसित मशीन का भारत के पश्चिम बंगाल एवं उत्तराखंड राज्य के अलग अलग भाग में जुटे, हेम्प एवं निट्ल से रिबन/रेशा निकलने के लिए औद्योगिक-सह-क्षेत्र परीक्षण भी किये गए है। इसके साथ साथ बौद्धिक संपदा अधिकार (पेटेंट: 202043107 6073 एवं डिजाइन पंजीकरण: 461912-001) भी किये गए है। विकसित तकनीक का व्यावसायीकरण भी नम्रता हेम्पको लिमिटेड, बेंगलुरु, कर्नाटक-560402 एवं

जॉय मां तारा एंटरप्राइज, सोडेपुर, कोलकाता-700110 को "एग्री इनोवेट" के माध्यम से रु. 1,25,000 + 18% जीएसटी और 7.5% वार्षिक रॉयल्टी के लाइसेंस शुल्क के साथ किया गया है। इस तकनीक को भा. कृ. अनु. प. प्रौद्योगिकी प्रमाणन पुरस्कार भी प्राप्त हुआ है।

संकेत शब्द: हरी छाल (रिबन), डिकॉर्टिकेटर, असतत तत्व विधि, निष्कर्षण क्षमता , दक्षता

प्रस्तावना

बास्ट फाइबर (छाल वाले रेशें) का नवीकरणीय, जैवनिम्नीकरणीय और टिकाऊ संसाधन होने की वजह से दुनिया भर में विविध मूल्यवर्धित उत्पादों जैसे हेसियन, बोरी, थैले, कालीन, चटाई, रस्सी, छत के झूठे बोर्ड और कई भू-वस्त्र उत्पादों को बनाने के लिए बड़े पैमाने पर उपयोग किया जाता है। जूट, मेस्टा, केनाफ, सनहेम्प, रेमी, सिसल, हेम्प (भांग) और नेटल (बिछुआ) भारत में पाए जाने वाले महत्वपूर्ण बास्ट फाइबर उत्पादक वाणिज्यिक/औद्योगिक फसलें हैं। इसके अलावा, पौधे आधारित रेशे हमारे देश में रहने वाले लाखों लोगों को आजीविका प्रदान कर रहे हैं। लगभग 40 लाख किसान परिवार सीधे तौर पर केवल जूट की खेती प्रणाली से जुड़े हुए हैं। लेकिन वर्तमान परिदृश्य में, कपड़ा उद्योग लगातार बढ़ती, अजेय आबादी की मांग को पूरा करने के लिए अधिक से अधिक रेशां या कपड़े आधारित उत्पादों का उत्पादन करने के लिए मजबूर हैं। पिछले कुछ वर्षों में, भारत के फैशन उद्योग में 'टिकाऊ' और 'जैविक' अपरिहार्य शब्द बन गए हैं, जिसमें ब्रांड 100% जैविक होने और प्राकृतिक रेशों का उपयोग करने के लिए प्रतिबद्ध हैं। यह बाजार में प्राकृतिक रेशे उगाने वाले किसानों के लिए एक नया आयाम खोलता है। इन फसलों के वाणिज्यिक महत्व के बावजूद, इनकी खेती से जुड़ी समस्याओं, विशेष रुप से ग्रीन रिबन/बास्ट निष्कर्षण और रीटिंग कार्यों के कारण, किसानों की रुचि इन फसलों को उगाने में कम हो रही है।

बास्ट फाइबर के प्रसंस्करण में 'फाइबर निष्कर्षण' और 'पृथक्करण' सबसे पहला कदम है। फाइबर वाली फसलों की कटाई के बाद फाइबर को पौधों में मौजूद ऊतक से अलग किया जाता है । फाइबर बंडलों की बाहरी परत को स्टेम कोर और फाइबर बंडलों के बीच के बंधन को तोड़कर पौधे से अलग किये जाने की प्रक्रिया को रेटिंग (अपगलन) कहा जाता है (Ahmed and Akhter 2001)। भारत में पारंपरिक रूप से विभिन्न प्राकृतिक रेशों की अपगलन प्रक्रिया जल स्त्रोतों जैसे की नदी, तालाब, झील, इत्यादि में की जाती है। यह प्रक्रिया बहुत अधिक समय लेने वाली (18-21 दिन) (Ray et al. 2022), पानी की खपत करने वाली (पौधो: पानी का अनुपात = 1:20) (Majumder 2013), थकने वाली (कुल ऊर्जा इनपुट का 19-21%) (Shambhu 2016), और पर्यावरण प्रदूषण करने वाली (अपशिष्ट जल और मीथेन गैस उत्सर्जन) (Sadrmanesh and Chen 2018) है। इसके अलावा, यह अच्छी फसलों के उपयोग के बावजूद घटिया गुणवत्ता वाले फाइबर का उत्पादन भी करता है जिससे बाजार में बिक्री मूल्य कम हो जाता है जिससे किसानों को कम शुद्ध लाभ होता है। इसके अलावा, पिछले कुछ दशकों में, विभिन्न कारकों के कारण जल निकायों में तेज़ी से कमी आ रही है। इसलिए, किसान अन्य निष्कर्षण प्रक्रियाओं को अपनाने के लिए तैयार हैं, ताकि कम संसाधनों के उपयोग के साथ कम समय में रीटिंग पूरी की जा सके।

इस संदर्भ में, जूट की रिबन रिटिंग से आशाजनक परिणाम सामने आ रहे हैं, क्योंकि इससे रिटिंग का समय 5-6 दिन कम हो जाता है, पानी की आवश्यकता 1:20 से घटकर 1:10 सब्सट्रेट लिकर अनुपात रह जाती है और पारंपरिक रिटिंग की तुलना में पर्यावरण प्रदूषण लगभग एक-चौथाई रह जाता है, साथ ही फाइबर की मजबूती, सुंदरता, रंग, चमक और कुल मिलाकर पूरी तरह छाल-मुक्त जूट फाइबर के संदर्भ में बेहतर गुणवत्ता वाले जूट फाइबर के उत्पादन का आश्वासन भी मिलता है (Banik et al. 2003)। रिबन रेटिंग प्रक्रिया के लिए पौधों से हरे रिबन को मैन्युअल या मशीन की सहायता से निकालना आवश्यक होता है। आम तौर पर, मैकेनिकल फाइबर एक्सट्रैक्टर उच्च स्तर के संपीड़न, कतरनी और प्रभाव बल की स्थितियों के तहत काम करते हैं। साथ ही, इन मशीनों में संभावित रूप से खतरनाक चलने वाले हिस्से होते हैं, जो ऑपरेटर को गंभीर या घातक चोट पहुंचा सकते हैं। अपर्याप्त या इंजीनियरिंग और तकनीकी ज्ञान की कमी से फील्ड ऑपरेशन के दौरान मशीन के घटकों में खराबी और विफलता हो सकती है। इसलिए, ऐसी मशीनों के घटक तत्व विश्वसनीय और टिकाऊ होने चाहिए जो ऑपरेशन के दौरान अत्यधिक बाहरी बलों को झेल सकें।

इस दिशा में, अतीत में कुछ प्रयास किए गए थे, Karim et al. 2021, ने झेंग्झौ शूलिय मशीनरी कंपनी लिमिटेड, चीन से करुपन्नया रंगपुर लिमिटेड (केपी मॉडल) की मौजूदा मशीन के सिद्धांत का उपयोग करके जूट के पौधों के लिए एक निष्कर्षण मशीन विकसित की। विकसित प्रोटोटाइप में केपी मॉडल की तुलना में 48% अधिक निष्कर्षण क्षमता है। Lu et al. 2013, ने एक अनुप्रस्थ-फीडिंग रैमी डेकोर्टिकेटर को डिजाइन और विकसित किया, जिसमें तने के ऊपर और नीचे के खंडों को संसाधित करने के लिए ग्रिप चेन के भीतर और बाहर दोनों जगह स्थित डबल पीलिंग सिलेंडर होते हैं, और ग्रिप चेन से तने के सिरों को अनुप्रस्थ-फीडिंग करते हैं। 131 किग्रा/घंटा की उत्पादकता दर से 4.15% फाइबर का उत्पादन हुआ। Lu et al. 2014, ने ताजा भांग के तने के निष्कर्षण के लिए डिकॉर्टिकेटर को डिजाइन और मूल्यांकन किया। प्रोटोटाइप में रगड़ने और कंघी करने की प्रणाली शामिल थी; रगड़ने वाला रोलर तने से फाइबर को अलग करता है और कंघी करने से फाइबर से जुड़ी छड़ी निकल जाती है। विकसित मशीन पर परीक्षणों से 108.67-174.22 किलोग्राम/घंटा की उत्पादकता का पता चला। Shambhu et al. 2023, ने आईसीएआर- एनआईएनएफईटी में जूट के पौधों से फाइबर निकालने के लिए एक पावर रिबनर को डिजाइन और विकसित किया। इस मशीन की क्षमता 35 से 45 किलोग्राम फाइबर प्रति घंटा है। मौजूदा मशीनें या तो उत्पादन क्षमता में कमज़ोर हैं या सभी प्रकार की बास्ट फाइबर फसलों को संभालने में सक्षम नहीं हैं। इसलिए, आईसीएआर-राष्ट्रीय प्राकृतिक रेशा अभियांत्रिकी एवं प्रौद्योगिकी संस्थान, कोलकाता में एक यांत्रिक बहु-बास्ट फाइबर फसल रिबन एक्सट्रैक्टर (डेकोर्टिकेटर) विकसित किया गया है।

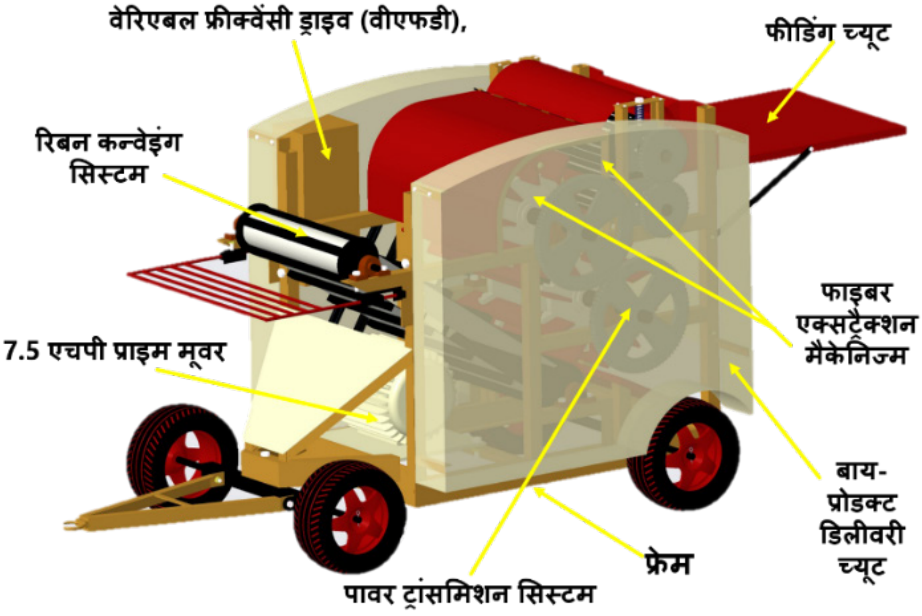
सामग्री एवं विधि

बास्ट फाइबर एक्सट्रैक्टर का 3-आयामी-कंप्यूटर एडिड डिज़ाइन (3D-CAD) प्रारूप की रचना

पिछले शोध कार्य की व्यापक समीक्षा के आधार पर, बास्ट फाइबर एक्सट्रैक्टर का 3-आयामी-कंप्यूटर एडिड डिज़ाइन प्रारूप की क्रियो पैरामीट्रिक सॉफ्टवेयर की सहायता से रचना की गई है (चित्र 1)। रचनात्मक बास्ट फाइबर एक्सट्रैक्टर में मुख्य रूप से फोल्डिंग-प्रकार का फीडिंग ट्रे, एक जोड़ी कुचल बेलन

(क्रशिंग सिलिंडर), एक जोड़ी पृथक बेलन (सेपरटिंग सिलिंडर), विद्युत पारेषण प्रणाली (पावर ट्रांसमिशन सिस्टम), रिबन वितरण प्रणाली (रिबन डिलीवरी सिस्टम), 5-hp इलेक्ट्रिक मोटर, फ्रेम एवं परिवहन पहिया (ट्रांपोर्टिंग व्हील) शामिल है।

डिज़ाइन किए गए सीएडी मॉडल का समग्र आयाम 1300 मिमी × 1415 मिमी × 1000 मिमी (लंबाई × चौड़ाई × ऊंचाई) है। क्रशिंग सिलेंडर का कुल व्यास 150 मिमी और लंबाई 750 मिमी है। क्रशिंग सिलेंडर में 10 मिमी लंबाई के 180 स्पाइक्स होते हैं। ये स्पाइक्स सिलेंडर की परिधि पर 50 मिमी की दूरी पर समान रूप से लगाए गए थे। जबकि, पृथक्करण सिलेंडर का कुल व्यास 175 मिमी और लंबाई 750 मिमी है। पृथक्करण सिलेंडर की परिधि पर 50 मिमी ऊँचाई और 5 मिमी मोटाई वाले 14 सर्पिल ब्लेड लगे होते हैं। क्रशिंग रोलर के CAD मॉडल को डिज़ाइन करने के लिए सॉफ्टवेयर में ASE 1085 सामग्री का चयन किया गया था, जबकि पृथक्करण सिलेंडर को डिज़ाइन करने के लिए ASE 1040 सामग्री का चयन किया गया था। डिज़ाइन किए गए एक्सट्रैक्टर में, परिकल्पना के अनुसार, ग्रीन बास्ट फाइबर-आधारित पौधों को बंडल (8-10 पौधे) के रूप में फोल्डिंग-प्रकार के फीडिंग ट्रे के माध्यम से मैन्युअल रूप से डाला जाता है। इसके पश्च्यात, पौधे क्रशिंग सिलिंडर के संपर्क में आते है। ये सिलिंडर्स, पौधो में कतरनी (शेयरिंग) बल लगते है जिससे पौधो की आतंरिक छड़ी छोटे छोटे टुकड़ो में टूट जाती है एवं बाहरी छाल (रिबन) विभक्त हो जाती है। तत्पश्चाय्त पौधे सेपरटिंग सिलिंडर के संपर्क में आते है जहा रिबन अंतरि छड़ी से पूर्ण रूप से विभक्त हो जाते है। इसके बाद रिबन वितरण प्रणाली (रिबन डिलीवरी सिस्टम) के माध्यम से, प्रसंस्कृत रिबन को मशीन से बहार निकल लिया जाता है एवं टूटी हुई आतंरिक छड़ी मशीन के निचले भाग से बहार निकल जाती है।



चित्र 1: बास्ट फाइबर एक्सट्रैक्टर का 3-आयामी-कंप्यूटर एडिड डिज़ाइन प्रारूप

डिस्क्रीट एलिमेंट मेथड (DEM)

डिस्क्रीट एलिमेंट मेथड (DEM) सिमुलेशन के लिए मापदंडों का निर्धारण और चयन

अल्टेयर ईडीईएम (एक्सपर्ट्स इन डिस्क्रीट एलिमेंट मॉडलिंग) सॉफ्टवेयर में किसी पदार्थ के वास्तविक प्रवाह को दर्शाने के लिए, विभिन्न अन्योन्यक्रिया मापदंडों को प्रयोगात्मक रूप से मापना आवश्यक है। डीईएम मापदंडों को दो श्रेणियों में वर्गीकृत किया गया है, अर्थात् पदार्थ और अन्योन्यक्रिया गुण। पदार्थ के गुणों में स्थैतिक घनत्व, अपरुपण मापांक, यंग मापांक शामिल हैं, जबकि अन्योन्यक्रिया गुणों में स्थैतिक घर्षण गुणांक, लोटनिक घर्षण गुणांक और प्रत्यास्थापन गुणांक शामिल हैं। ये अन्योन्यक्रिया गुणांक यह निर्धारित करते हैं कि कणिकीय पदार्थ के कण एक-दूसरे के साथ या संपर्क में आने वाले अन्य पदार्थों के साथ कैसे अन्योन्यक्रिया करते हैं।

(a) पुनर्स्थापन गुणांक (Coefficient of restitution)

पुनर्स्थापन गुणांक को टक्कर से पहले और बाद में वेगों के अंतर के अनुपात के रूप में परिभाषित किया जा सकता है। एक पूर्णतः प्रत्यास्थ टक्कर का प्रत्यास्थता गुणांक 1 होता है, जबकि एक पूर्णतः अप्रत्यास्थ टक्कर का प्रत्यास्थता गुणांक 0 होता है, इस प्रकार किसी भी कण/टकराव के लिए प्रत्यास्थता गुणांक शून्य और 1 के बीच होता है। इसका मान पदार्थ के प्रकार, कण की ज्यामिति और टक्कर के समय कणों के सापेक्ष वेगों पर निर्भर करता है।

$$e = \sqrt{\frac{h_r}{h_i}} \quad \text{...(1)}$$

जहां: hr = पलटाव की ऊंचाई और hi = प्रभाव की ऊंचाई

(b) स्थैतिक घर्षण गुणांक (Coefficient of static friction)

स्थैतिक घर्षण गुणांक (μs) को किसी सतह पर किसी तत्व के अभिलंब बल (FN) से स्थैतिक घर्षण बल (fs) के अनुपात के रूप में परिभाषित किया जाता है। यह DEM में एक महत्वपूर्ण पैरामीटर है और इसे सटीक रूप से निर्दिष्ट करने की आवश्यकता है क्योंकि यह कण प्रवाह व्यवहार को बहुत प्रभावित करता है।

$$\mu_s = \frac{f_s}{F_N} \quad \text{...(2)}$$

(c) रोलिंग घर्षण गुणांक (Coefficient of rolling friction)

रोलिंग घर्षण गुणांक का उपयोग किसी सपाट सतह पर प्रारंभिक रूप से विरामावस्था में स्थित किसी वस्तु को गति प्रदान करने के लिए आवश्यक बल आघूर्ण की मात्रा निर्धारित करने के लिए किया जाता है। यह किसी सतह पर किसी अवयव के अभिलंब बल (F_N) और रोलिंग घर्षण बल (f_r) का अनुपात होता है। अनुभवजन्य रूप से इसे इस प्रकार परिभाषित किया जाता है।

$$\mu_r = \frac{f_r}{F_N} \quad \text{...(3)}$$

(d) पॉइसन अनुपात (Poisson's Ratio), यंग मापांक (Young Modulus) और अपरूपण - मापांक (Shear modulus)

जूट के पौधे के पॉइसन अनुपात (Poisson's Ratio), यंग मापांक (Young Modulus) और अपरूपण मापांक (Shear modulus) को मापने के लिए, बनावट विश्लेषक उपकरण (texture analyzer apparatus) में अर्ध-स्थैतिक संपीड़न लोडिंग स्थितियों के तहत प्रयोगों की एक श्रृंखला आयोजित की गई थी जैसा कि चित्र 2 में दिखाया गया है। परीक्षण 25.0 मिमी व्यास वाले बेलनाकार नमूनों पर किए गए, जिन्हें जूट के पौधो के मध्य भाग से एक गोलाकार कटर का उपयोग करके काटा गया और फिर 25.0 मिमी की ऊँचाई तक काटा गया (Shaw and Young 1988)। यह देखते हुए कि जूट के पौधे के आयतन में यांत्रिक गुणों का वितरण एक समान नहीं था, नमूने लेने का एक विशिष्ट क्षेत्र चुना गया और उसे सभी कोर के लिए रखा गया। कोर के नमूने कंद की दीर्घ अक्ष के लंबवत और मध्य क्षेत्र से लिए गए थे (Alvarez and Canet 1988)। परीक्षण करने के लिए, प्रेस को 1 मिमी/सेकंड के वेग पर एक-अक्षीय अप्रतिबंधित संपीड़न के लिए समायोजित किया गया था। प्रत्येक बेलनाकार नमूने का संपीड़न विरूपण क्षेत्र के भीतर चुने गए भार मानों पर रोक दिया गया था, जहाँ भार-विरूपण वक्र का ढलान लगभग रैखिक था। नमूनों का व्यास भार डालने से पहले मापा गया और बाद में प्रतिबल और विकृति की गणना के लिए रिकॉर्ड किया गया।

प्रेस में 250 मिमी व्यास का एक स्टील प्लेट संपर्क लगाया गया था, और प्रत्येक बेलनाकार नमूने का संपीड़न 150 न्यूटन भार स्तर पर रोक दिया गया था, जहाँ प्रत्येक भार-विरूपण वक्र का ढलान लगभग रैखिक था। पार्श्व विरूपण को एक अनुरुप संकेतक से जुड़े गेज के माध्यम से मापा गया था; जब संकेतक स्थिर हो गया, तो मापों का विभेदन 0.1 मिमी था। बनावट विश्लेषक से जुड़े विस्थापन ट्रांसड्यूसर LDTV द्वारा अनुदैर्ध्य विरूपण स्वचालित रूप से प्राप्त किया गया था।

प्वाइसन अनुपात (μ) की गणना समीकरण द्वारा की गई:

$$\boldsymbol{\mu} = \frac{\Delta\xi_2}{\Delta\xi_1} \qquad \text{...(4)}$$

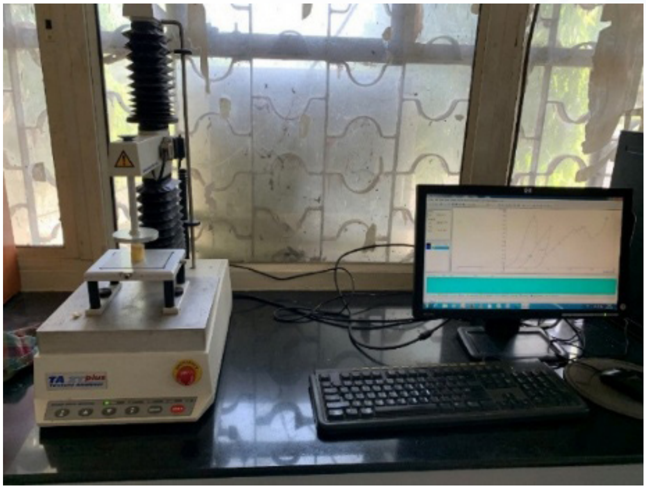
जहाँ Δξ1 लोडिंग दिशा विकृति (या अक्षीय विकृति) का निरपेक्ष मान है, और Δξ2 अनुप्रस्थ विकृति (या रेडियल विकृति) है:

यंग मापांक (E) समीकरण द्वारा परिभाषित किया गया है

$$\frac{\sigma}{\xi_1} = \frac{F/\pi(D_0/2)^2}{\Delta L/L_0} \qquad \text{..(5)}$$

जहाँ D0 और L0 क्रमशः नमूनों का प्रारंभिक व्यास और लंबाई हैं, σ प्रतिबल है और F सामान्य भार है।

ईडीईएम सॉफ्टवेयर में, डीईएम सिमुलेशन के लिए क्रमशः यंग मापांक या कतरनी मापांक, जो उनके वास्तविक मानों से कम होते हैं, पर विचार किया जाता है। अध्ययन में प्रयुक्त सामग्रियों, जैसे जूट के पौधे और स्टील, के विभिन्न पदार्थ और परस्पर क्रिया गुण, मापों और साहित्य से प्राप्त आंकड़ों के संयोजन से प्राप्त किए गए थे, जैसा कि तालिका 1 में दिखाया गया है।



चित्र 2: बनावट विश्लेषक में जूट के पौधे के यांत्रिक गुणों का निर्धारण

तालिका 1: जूट के पौधे और स्टील, के विभिन्न पदार्थ और परस्पर क्रिया गुण

(a) **Material Property**		
Property	**Material**	
घनत्व (Bulk density), kg/m3	स्टील	
	हरा जूट का पौधा	
सूखा जूट का पौधा		
पोइसन रेश्यो (Poisson's ratio)	स्टील	
	हरा जूट का पौधा	
	सूखा जूट का पौधा	
यंग मापांक (Young modulus), Pa	स्टील	
	हरा जूट का पौधा	
	सूखा जूट का पौधा	
(b) **Interaction Property**		

कण का आकार, mm	4-6 (random)
पुनर्स्थापन गुणांक हरा जूट: हरा जूट	0.5
पुनर्स्थापन गुणांक हरा जूट: स्टील	0.5
पुनर्स्थापन गुणांक सूखा जूट का पौधा: स्टील	0.4
घर्षण गुणांक हरा जूट: हरा जूट	0.53
घर्षण गुणांक हरा जूट: स्टील	0.5
घर्षण गुणांक सूखा जूट का पौधा: स्टील	0.56
रोलिंग घर्षण गुणांक हरा जूट: हरा जूट	0.16
रोलिंग घर्षण गुणांक हरा जूट: स्टील	0.05
रोलिंग घर्षण गुणांक सूखा जूट का पौधा: स्टील	0.15
पुनर्स्थापन गुणांक स्टील: स्टील	0.5
पुनर्स्थापन गुणांक जूट का पौधा : स्टील	0.6
घर्षण गुणांक स्टील : स्टील	0.4
घर्षण गुणांक स्टील : जूट का पौधा	0.45
रोलिंग घर्ष गुणांक स्टील : स्टील	0.05
रोलिंग घर्षण गुणांक स्टील : जूट का पौधा	0.05

बास्ट फाइबर पौधे का प्रारूपण नमूना

बास्ट फाइबर वाले पौधे जैसे की जूट का नमूना बनाने के लिए, शुरुआत में Creo Element सॉफ्टवेयर में जूट के पौधे का एक CAD मॉडल विकसित किया गया है। जूट के पौधे के CAD मॉडल को STL फॉर्मेट में सेव करके EDEM सॉफ्टवेयर में अपलोड किया गया है। EDEM में जूट के पौधे को बनाने के लिए, एकल एवं बहु-गोलाकार प्रकार के कण का चयन किया गया है और उसे जूट के पौधे की CAD फ़ाइल में चित्र 3. में दर्शाए अनुसार मर्ज किया गया है। EDEM में जूट के पौधे के विभिन्न लम्बाई वाले पौधे बनाने के लिए, कण गुणों में माध्य 1 और मानक विचलन 0.05 वाला सामान्य आकार वितरण पैरामीटर प्रदान किया गया है।

चित्र 3: बास्ट फाइबर पौधे का प्रारुपण नमूना

अवास्तविक कारखाना (फैक्टरी) का विकास

जूट के पौधे बनाने के बाद, ईडीईएम सॉफ्टवेयर में एक कारखाने का विकास किया गया जिसमे से जूट के पौधे सतत अनुकरण (सिमुलेशन) करने के लिए बास्ट फाइबर एक्सट्रैक्टर के नमूने में डाले जाते है। विकसित अवास्तविक कारखाने से जूट के पौधे 10 किलो ग्राम प्रति मिनट की स्पीड से प्रवेश करवाए गए है।

डीईएम संपर्क मॉडल का चयन (सिलेक्शन ऑफ़ डीईएम कांटेक्ट मॉडल्स)

कणों के बीच संपर्क और अवमंदन बलों की गणना के लिए EDEM सॉफ्टवेयर में विभिन्न संपर्क मॉडलों का उपयोग किया जाता है। जिनमे से क्रमश: लीनियर स्प्रिंग कांटेक्ट मॉडल (LSCM), हेर्त्ज़ मिंडलिन कांटेक्ट मॉडल (HMCM), हिस्टेरेटिक स्प्रिंग कांटेक्ट मॉडल (HSCM) है। पूर्व में किये गए शोध के आधार में वर्तमान शोध कार्य के लिए हेर्त्ज़ मिंडलिन कांटेक्ट मॉडल (HMCM) को उपयोग किया गया है। यह मॉडल कण गति नियम पर अंतर-आर्द्र-कण आसंजन बल के प्रभाव पर विचार करता है। यह एक संसंजक बल संपर्क मॉडल है, जो स्थैतिक विद्युत, नमी आदि के कारण स्पष्ट आसंजन और संकुलन वाली सामग्रियों, जैसे फसलों और गीली मिट्टी, के अनुकरण के लिए उपयुक्त है (Ucgul et al. 2014)।

3D-DEM सिमुलेशन

जूट के पौधे का प्रारूप बनाने के बाद, बास्ट फाइबर एक्सट्रैक्टर के CAD मॉडल के साथ EDEM सॉफ्टवेयर में सिम्युलेट किया गया है। सिमुलेशन के दौरान परस्पर क्रिया व्यवहार की जाँच के लिए, सॉफ्टवेयर में कुछ सिमुलेशन गुण प्रदान किए गए हैं। बास्ट फाइबर एक्सट्रैक्टर में जूट के पौधे की वजह से

लगने वाले उच्च ड्रैग फ़ोर्स और अवांछित रुकावट की समस्या से बचने के लिए, एडिनबर्ग (यूनाइटेड किंगडम) स्थित डीईएम सॉल्यूशंस लिमिटेड द्वारा विकसित एटेयर ईडीईएम 2021 (स्टूडेंट) सॉफ़्टवेयर में 3डी-डीईएम सिमुलेशन किया गया है। इस उद्देश्य के लिए, ड्रैग फ़ोर्स को कम करने और बेहतर फील्ड ऑपरेशन के लिए ब्लेड की गति को अनुकूलित करने हेतु सॉफ़्टवेयर में कई प्रयोग किए गए थे।

यांत्रिक बहु-बास्ट रेशेदार फसल-आधारित रिबन एक्सट्रैक्टर (डेकोर्टिकेटर) का निर्माण

यांत्रिक रिबन एक्सट्रैक्टर (डिकोर्टिकेटर) के CAD मॉडल का अनुकरण करने के बाद, मशीन का प्रोटोटाइप तैयार किया गया (चित्र 4)। वर्तमान आविष्कार के अनुसार, एक्सट्रैक्टर असेंबली में एक कठोर फ्रेम, एक फोल्डिंग ट्रे, फीडिंग च्यूट, रिबन निष्कर्षण तंत्र, रिबन संवहन इकाई, रिबन संग्रहण इकाई, उप-उत्पाद वितरण च्यूट, विद्युत संचरण प्रणाली, परिवर्तनीय आवृत्ति ड्राइव (VFD), चार वायवीय पहिये और एकल-बिंदु हिच तंत्र शामिल हैं।

रिबन निष्कर्षण तंत्र में मुख्य रूप से एक जोड़ी फ्ल्यूड क्रशिंग रोलर्स और पृथक्करण रोलर्स शामिल थे। महत्वपूर्ण बात यह भी है कि क्रशिंग रोलर्स और पृथक्करण रोलर्स की संयुक्त क्रिया, रिबन को बास्ट फाइबर प्लांट्स से अलग करती है, जिससे प्लांट्स पर कतरनी और प्रभाव बल लगता है जिससे यांत्रिक रूप से संसाधित रिबन जल्दी से सड़ जाता है। यह एक्सट्रैक्टर 7.5 एच.पी. तीन-फेज विद्युत मोटर के माध्यम से चलता है और एक परिवर्तनीय आवृत्ति ड्राइव (तीन-फेज) को मोटर के साथ जोड़ा गया है, ताकि उच्च गुणवत्ता वाले फाइबर के उत्पादन के लिए विभिन्न प्रजातियों और आकार के पौधों से रिबन निकालने के लिए फ्लूटेड क्रशिंग रोलर्स और पृथक्कारी रोलर्स के प्रति मिनट क्रांति (आरपीएम) को एक साथ नियंत्रित किया जा सके।

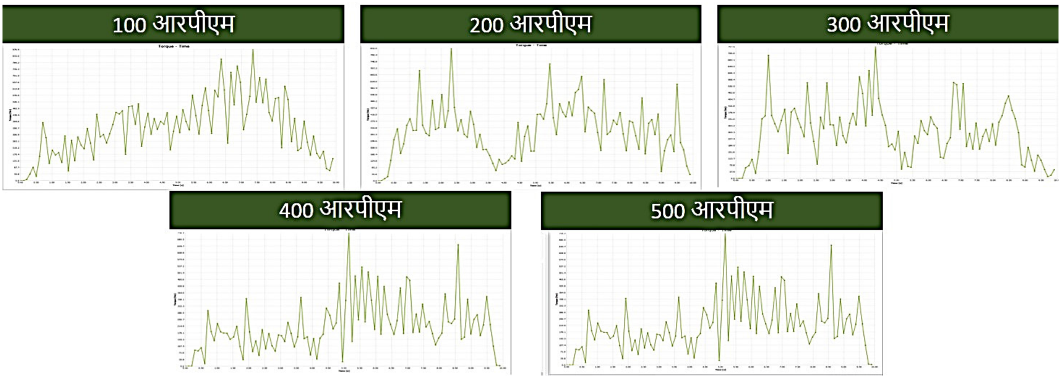
चित्र 4: विकसित यांत्रिक बहु-बास्ट रेशेदार फसल-आधारित रिबन एक्सट्रैक्टर (डेकोर्टिकेटर)

परिणाम और चर्चा

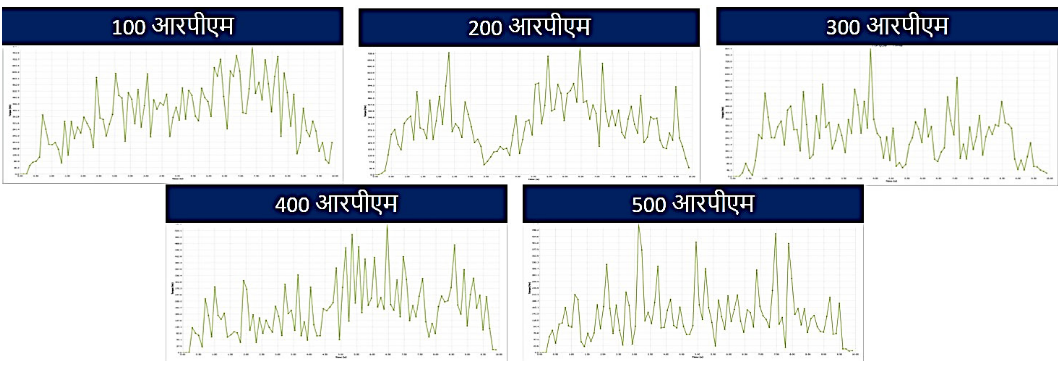
3D-DEM सिमुलेशन के परिणाम

सिमुलेशन के दौरान बास्ट फाइबर एक्सट्रैक्टर के ऊपरी एवं निचले पृथकी बेलन (सेपरटिंग सिलिंडर) में अलग अलग आरपीएम में लगने वाले टार्क की जांच की गई जिसके परिणाम को चित्र क्रमश: 5 एवं 6 में

दर्शाया गया है। सिमुलेशन के दौरान विकसित अवास्तविक कारखाने से जूट के पौधे 10 किलो ग्राम प्रति मिनट की स्पीड से प्रवेश करवाए गए है। परिणाम से पता चलता है की जैसे जैसे पृथकी बेलन (सेपरटिंग सिलिंडर) की गति में वृद्धि होती है वैसे वैसे लगने वाली टार्क की मात्रा में कमी अति है। परिणाम यह भी दर्शाते है कि ऊपरी पृथकी बेलन (सेपरटिंग सिलिंडर) में निचले पृथकी बेलन (सेपरटिंग सिलिंडर) कि तुलना में अधिक टार्क लगता है क्युकि निचले पृथकी बेलन (सेपरटिंग सिलिंडर) जूट के पौधो का पूरा भार लेते है एवं अधिक समय तक पौधो के संपर्क में रहते है। ऊपरी पृथकी बेलन (सेपरटिंग सिलिंडर) में अधिकतम टार्क 240 Nm 100 आरपीएम में लगता है जबकि न्यूनतम टार्क 159 Nm 500 आरपीएम में लगता है। इसी प्रकार, निचले पृथकी बेलन (सेपरटिंग सिलिंडर) में अधिकतम टार्क 210 Nm 100 आरपीएम में लगता है जबकि न्यूनतम टार्क 185 Nm 500 आरपीएम में लगता है।



चित्र 5: ऊपरी पृथकी बेलन (सेपरटिंग सिलिंडर) में टोर्क (Torque)

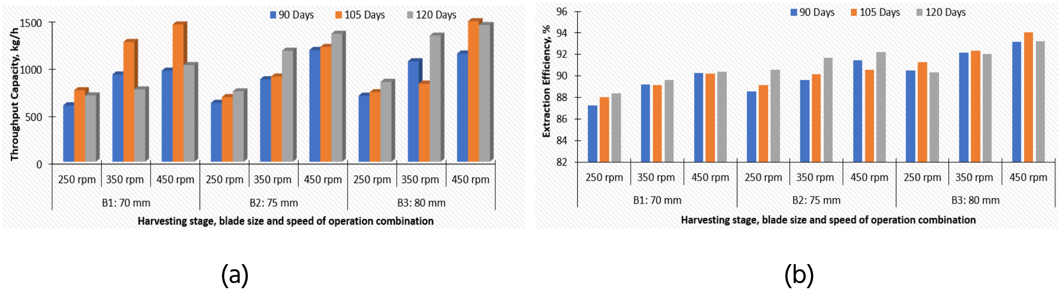


चित्र 6: निचले पृथकी बेलन (सेपरटिंग सिलिंडर) में टोर्क

मशीन का प्रदर्शन

विकसित मशीन का संस्थान और किसानों के खेतों, दोनों जगह जूट और बिच्छू बूटी के पौधों से रिबन/बाहरी छाल निकालने के लिए गहन परीक्षण किया गया। मशीन की प्रवाह क्षमता 850-1100 किग्रा/

घंटा की सीमा में प्राप्त की गई, जबकि निष्कर्षण दक्षता 85-92% की सीमा में प्राप्त की गई। मशीन की औसत ऊर्जा आवश्यकता 0.28 kWh (बिना भार के) और 1.34 kWh (भार पर) पाई गई।



चित्र 7. विभिन्न गति, ब्लेड आकार और कटाई चरण संयोजनों पर (a) थ्रूपुट क्षमता और (b) निष्कर्षण दक्षता

निष्कर्ष

विभिन्न प्राकृतिक रेशेदार फसलों जैसे जूट, मेस्टा, भांग, सन हेम्प, बिछुआ और रेमी से बाहरी छाल/रिबन के यांत्रिक निष्कर्षण के माध्यम से रिबन रिटिंग को निष्पादित करने के लिए, एक इलेक्ट्रिक-संचालित मल्टी-बास्ट फाइबर एक्सट्रैक्टर को ICAR-NINFET, कोलकाता में डिजाइन और विकसित किया गया था। विकसित मशीन में फेम, फीडिंग च्यूट, फाइबर निष्कर्षण तंत्र, रिबन संवहन प्रणाली, बाय-प्रोडक्ट डिलीवरी च्यूट, पावर ट्रांसमिशन सिस्टम, वेरिएबल फ्रीक्वेंसी ड्राइव (VFD), और 7.5 hp प्राइम मूवर शामिल थे। विकसित फाइबर एक्सट्रैक्टर का डिजाइन एवं रेशां निष्कर्षण प्रक्रिया का संख्यात्मक मॉडलिंग असतत तत्व विधि (डिस्क्रीट एलिमेंट मेथड) का उपयोग करके किया गया है । एवं सिमुलेशन के परिणाम दिखाते हैं कि 100, 200, 300, 400 और 500 आरपीएम पर डिकॉर्टिकेटर को संचालित करने के लिए आवश्यक कुल शक्ति क्रमशः 2.4, 4.1, 5.4, 6.0 और 6.3 किलोवाट है। मशीन की थ्रूपुट क्षमता 1050-1200 किलोग्राम/घंटा की सीमा में हासिल की गई थी जबकि निष्कर्षण दक्षता 88-93 की सीमा में हासिल की गई थी। मशीन की औसत ऊर्जा आवश्यकता 1.34 kWh (लोड पर) है ।

विकसित मशीन का भारत के पश्चिम बंगाल एवं उत्तराखंड राज्य के अलग अलग भाग में जुटे, हेम्प एवं निट्ल से रिबन/रेशा निकलने के लिए औद्योगिक-सह-क्षेत्र परीक्षण भी किये गए है। इसके साथ साथ बौद्धिक संपदा अधिकार (पेटेंट: 2020431076073 एवं डिजाइन पंजीकरण: 461912-001) भी किये गए है। विकसित तकनीक का व्यावसायीकरण भी नम्रता हेम्पको लिमिटेड, बेंगलुरु, कर्नाटक-560402 एवं जॉय मां तारा एंटरप्राइज, सोडेपुर, कोलकाता-700110 को "एग्री इनोवेट" के माध्यम से रु. 1,25,000 + 18% जीएसटी और 7.5% वार्षिक रॉयल्टी के लाइसेंस शुल्क के साथ किया गया है। इस तकनीक को भा. कृ. अनु. प. प्रौद्योगिकी प्रमाणन पुरस्कार भी प्राप्त हुआ है।

संदर्भ

Ahmed, Z. and Akhter, F., 2001. Jute retting: an overview. Online J Biol Sci, 1(7), pp.685-688.

Alvarez, M. D., and Canet, W. (1998). Rheological characterization of fresh and cooked potato tissues (cv. Monalisa). European Food Research and Technology, 207(1), 55–65.

Banik, S., Basak, M.K., Paul, D., Nayak, P., Sardar, D., Sil, S.C., Sanpui, B.C. and Ghosh, A., 2003. Ribbon retting of jute—a prospective and eco-friendly method for improvement of fibre quality. Industrial Crops and Products, 17(3), pp.183-190.

Karim, M.R., Hoque, M.A., Chawdhury, A., Ahmed, S., EL Sabagh, A. and Hossain, A., 2021. Design, development, and performance evaluation of a power-operated jute fiber extraction machine. AgriEngineering, 3(2), pp.403-422.

Lü, J., Long, C., Ma, L., Liu, J. and He, H., 2014. Design and experiment on decorticator of hemp fresh stem. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 30(14), pp.298-307.

Lü, J., Long, C., Zhao, J., Ma, L., Lü, H., Liu, J. and He, H., 2013. Design and experiment of transverse-feeding ramie decorticator. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engg, 29(16), pp.16-21.

Majumder, A., Bairagya, M.D., Basu, B., Gupta, P.C. and Sarkar, S., 2013. Retting of jute grown in arsenic contaminated area and consequent arsenic pollution in surface water bodies. Science of the total environment, 442, pp.247-254.

Ray, D.P., Ghosh, R.K., Saha, B., Sarkar, A., Singha, A., Mridha, N., Das, I., Sardar, G., Mondal, J., Manjunatha, B.S. and Shakyawar, D.B., 2022. Accelerated retting technology for the extraction of golden fibre from the Indian Tossa jute (Corchorus sp.). J of Cleaner Production, 380, p.135063.

Sadrmanesh, V. and Chen, Y., 2019. Bast fibres: structure, processing, properties, and applications. International Materials Reviews, 64(7), pp.381-406.

Shambhu, V.B., 2016. Energy use pattern and economic analysis of jute Fibre production in India a case study for West Bengal. Agricultural Mechanization in Asia, Africa and Latin America, 47(4), pp.74-81.

Shambhu, V.B., Shrivastava, P., T, N., Jagadale, M., Nayak, L.K. and Shakyawar, D.B., 2023. Development of gender-friendly power ribboner for extraction of green ribbon/bast from jute plants. Journal of Natural Fibers, 20(2), p.2250076.

Shaw, M. C., and Young, E. (1988). Rubber elasticity and fracture. Journal of Engineering Materials and Technology, 110(3), 258–265.

Ucgul, M., Fielke, J.M., and Saunders, C. (2014). 3D DEM tillage simulation: Validation of a hysteretic spring (plastic) contact model for a sweep tool operating in a cohesionless soil. Soil Tillage Res., 144, 220 227.

लघु कृषि यंत्रीकरण हेतु पर्यावरण–अनुकूल विद्युत-संचालित निराई यंत्र का अभिकल्प एवं विकास

हिमांशु शेखर पाण्डेय*[1] एवं घनश्याम तिवारी[2]

[1]कृषि अभियांत्रिकी विभाग, भाकृअनुप – भारतीय गन्ना अनुसंधान संस्थान, लखनऊ, उत्तर प्रदेश

[2]प्रौद्योगिकी एवं अभियांत्रिकी महाविद्यालय, महाराणा प्रताप कृषि एवं प्रौद्योगिकी विश्वविद्यालय, उदयपुर, राजस्थान

*ईमेल: pandeyhs13@gmail.com

सारांश

लघु एवं सीमान्त किसान भारतीय कृषि व्यवस्था की रीढ़ हैं, जिनकी उत्पादकता एवं लाभप्रदता बढ़ाने के लिए उपयुक्त यंत्रीकरण आवश्यक है। परंपरागत निराई-गुड़ाई की विधियाँ श्रमसाध्य, समय-गहन एवं महंगी होने के साथ-साथ पर्यावरण पर प्रतिकूल प्रभाव डालती हैं। प्रस्तुत अध्ययन में लघु कृषि यंत्रीकरण की आवश्यकताओं को ध्यान में रखते हुए एक पर्यावरण–अनुकूल विद्युत-संचालित अंतर्वर्ती निराई यंत्र का अभिकल्प एवं विकास किया गया। इस यंत्र का डिज़ाइन हल्का, सरल, ऊर्जा–दक्ष तथा रखरखाव में आसान है । इसमें बैटरी चालित मोटर को शक्ति स्रोत के रूप में उपयोग किया गया, जो प्रदूषण रहित एवं कम ध्वनि स्तर पर कार्य करता है। परिणामों से ज्ञात हुआ कि संचालन की गति एवं निराई ड्रम का व्यास शक्ति खपत एवं निराई दक्षता पर 1 और 5 प्रतिशत स्तर पर महत्वपूर्ण प्रभाव डालते हैं। परीक्षणों से पाया गया कि औसत निराई दक्षता 91.36 प्रतिशत, क्षेत्र क्षमता 0.048 हे./घं., क्षेत्र दक्षता संतोषजनक तथा पौध क्षति केवल 2.36 प्रतिशत पाई गई जब संचालन गति 2.5 से 3 कि.मी./घं. रखी गई। औसत शक्ति खपत 176 वाट दर्ज की गई। विकसित यंत्र की क्षेत्र क्षमता पारंपरिक व्हील हो की तुलना में 3-4 गुना अधिक तथा संचालन लागत में 51 प्रतिशत तक की बचत दर्ज की गई, जिससे आवश्यक मानव श्रम एवं कुल लागत में उल्लेखनीय कमी हुई।। विद्युत-संचालित-ड्राइव प्रणाली के कारण कंपन में कमी आई, जिससे संचालक की सुविधा एवं कार्यकुशलता में वृद्धि हुई। प्रयोगात्मक मूल्यांकन से ज्ञात हुआ कि यह यंत्र कतारों के बीच खरपतवार नियंत्रण में प्रभावी है तथा संचालन के दौरान किसी भी प्रकार का कार्बन उत्सर्जन नहीं करता। पारंपरिक उपकरणों की तुलना में यह श्रम की बचत, संचालन की सरलता तथा ऊर्जा दक्षता प्रदान करता है। अतः यह यंत्र लघु एवं सीमान्त किसानों के लिए उपयुक्त, सस्ती और पर्यावरण–अनुकूल तकनीकी समाधान सिद्ध हो सकता है।

संकेत शब्द: लघु कृषि यंत्रीकरण, निराई यंत्र, विद्युत-संचालित उपकरण, पर्यावरण–अनुकूल तकनीक, प्रदर्शन मूल्यांकन, आर्थिक विश्लेषण

परिचय

भारत में लगभग आधी जनसंख्या अपनी आजीविका कृषि से प्राप्त करती है, जो उनका प्रमुख आय स्रोत है। देश में कृषि उत्पादन प्रणालियाँ मुख्य रूप से खरपतवारों की व्यापक और गंभीर उपस्थिति के कारण

प्रभावित होती हैं। भारत की विविध जलवायु परिस्थितियाँ खरपतवारों के विकास के लिए अनुकूल वातावरण प्रदान करती हैं, जिसके परिणामस्वरूप फसल उत्पादन में भारी हानि होती है (Rao et al., 2020)। इसलिए कृषि उत्पादन प्रणाली में उपज बढ़ाने और संसाधनों की दक्षता को अधिकतम करने के लिए खरपतवार नियंत्रण अत्यंत आवश्यक है। खरपतवार नियंत्रण के कई तरीके उपलब्ध हैं, जिनमें हस्तचालित, यांत्रिक, रासायनिक और जैविक विधियाँ शामिल हैं। इनमें हस्तचालित विधि सबसे प्रभावी मानी जाती है, लेकिन यह अत्यधिक श्रमसाध्य, समय लेने वाली और महंगी होती है। कुल श्रम आवश्यकता का लगभग एक-चौथाई भाग केवल खरपतवार नियंत्रण में ही खर्च होता है। फसल के चरम मौसम में मजदूरों की कमी और निराई में देरी के कारण उपज में 40–60 प्रतिशत तक की कमी हो सकती है (Yadav and Pund, 2007)। रासायनिक विधियाँ त्वरित और सरल रूप से लागू की जा सकती हैं, लेकिन ये फसल, मानव स्वास्थ्य और पर्यावरण के लिए गंभीर जोखिम उत्पन्न करती हैं। जैविक विधियाँ अपेक्षाकृत कम प्रभावी होती हैं और बाहरी जीवों को आकर्षित करने के कारण कार्य कठिन बनाती हैं। दूसरी ओर, यांत्रिक विधियाँ अपनी उच्च कार्य क्षमता और त्वरित क्रियाशीलता के कारण खरपतवार नियंत्रण का प्रभावी और टिकाऊ माध्यम साबित होती हैं। कृषि की शुरुआत से ही यांत्रिक तरीकों द्वारा खरपतवार नियंत्रण एक स्थायी और प्रभावी विकल्प रहा है। छोटे खेतों में खरपतवार नियंत्रण और भी चुनौतीपूर्ण होता है, क्योंकि वहाँ श्रमिकों की कमी, उपयुक्त उपकरणों की अनुपलब्धता और खरपतवार का अपर्याप्त ज्ञान पाया जाता है (Goel et al., 2008)। छोटे किसानों की ये चुनौतियाँ नवाचारपूर्ण और उपयुक्त तकनीकों के विकास के लिए प्रेरित करती हैं। पर्यावरण अनुकूल तकनीक और वैकल्पिक ऊर्जा स्रोत छोटे खेतों के यंत्रीकरण में प्रमुख गैप के रूप में पहचाने गए हैं। छोटे और सीमांत किसानों की जोत का आकार बहुत छोटा होने के कारण वे बड़े मशीनों का संचालन नहीं कर पाते। इसके अलावा, उपलब्ध कृषि उपकरणों की डिज़ाइन क्षेत्र-विशेष होती है, ताकि विभिन्न मृदा प्रकार, फसल प्रणालियाँ और स्थानीय संसाधनों की आवश्यकताओं को पूरा किया जा सके (Pandey, et al., 2023)। स्वचालित शक्ति संचालित निराई यंत्र का उपयोग करने पर संचालक उच्च स्तर के यांत्रिक कंपन का सामना करता है, जिससे थकान, जैव-गतिशील विकार और रक्तवाहिका संबंधी रोग उत्पन्न हो सकते हैं। इस प्रकार, कंपन के कारण संचालक की कार्य क्षमता प्रभावित होती है और खेत कार्यों के दौरान थकावट बढ़ जाती है। वर्तमान में छोटे खेतों में पंक्ति-बीच निराई अधिकतर हस्तचालित विधि से की जाती है, जो समय-साध्य और महंगी होती है। इस स्थिति में विद्युत शक्ति स्रोत का उपयोग एक उपयुक्त विकल्प हो सकता है, क्योंकि इसमें हानिकारक या असंगत पदार्थों का प्रयोग नहीं होता। विद्युत-संचालित कृषि यंत्र हल्के कृषि कार्यों के लिए अत्यंत उपयुक्त हैं। ये बैटरियों में संचित रासायनिक ऊर्जा का लगभग 75 प्रतिशत यांत्रिक ऊर्जा में परिवर्तित कर सकते हैं, जबकि आंतरिक दहन इंजन वाले यंत्रों में यह क्षमता केवल 15 प्रतिशत के आसपास होती है। अतः यह तकनीक हल्के ड्राफ्ट वाले कार्यों, जैसे निराई और अंतर्वर्ती जुताई, के लिए अत्यंत उपयुक्त है (Singh, et al., 2019)। यदि मुख्य यांत्रिक भार को कुशल शक्ति स्रोत से प्रतिस्थापित किया जाए, तो ऊर्जा खपत में कमी और मशीन तथा संचालक दोनों के प्रदर्शन में सुधार संभव है। छोटे खेतों का यंत्रीकरण कृषि उत्पादकता बढ़ाने में महत्वपूर्ण योगदान देता है, क्योंकि यह समय पर कार्य निष्पादन और श्रम-कठिनाई को कम करता है। विद्युत-संचालित निराई यंत्र का विकास न केवल निराई कार्य में श्रम-कठिनाई को घटाता है, बल्कि किसानों की जीवाश्म ईंधन पर निर्भरता को भी समाप्त करता है। हाल के अध्ययनों के अनुसार, वॉक-

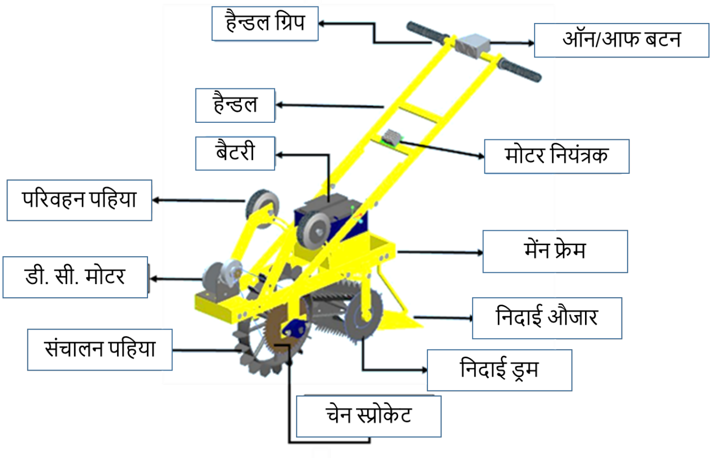
बिहाइंड ई-ड्राइव यूनिट्स संचालक की थकान को 80–85 प्रतिशत तक कम कर सकती हैं (Utpal et al., 2022)। यह तकनीक छोटे और सीमांत किसानों के लिए प्रभावी, सुरक्षित और पर्यावरण अनुकूल समाधान प्रदान करती है, जिससे कृषि कार्य में दक्षता और उत्पादन दोनों में वृद्धि संभव है।

2. सामग्री एवं विधियाँ

एक विद्युत-संचालित निराई यंत्र का डिज़ाइन और विकास , फार्म मशीनरी एवं पावर इंजीनियरिंग विभाग, प्रौद्योगिकी एवं अभियांत्रिकी महाविद्यालय, महाराणा प्रताप कृषि एवं प्रौद्योगिकी विश्वविद्यालय, उदयपुर में किया गया। इस निराई यंत्र का मुख्य उद्देश्य कम श्रम-कठिनाई और अधिक दक्षता के साथ निराई कार्य करना था। इसके अतिरिक्त, यंत्र को इस प्रकार डिजाइन किया गया कि संचालन के दौरान फसलों को न्यूनतम क्षति पहुँचे, शक्ति स्रोत का अधिकतम उपयोग हो सके ताकि रन-टाइम बढ़ाया जा सके, और संचालक के लिए कंपन न्यूनतम रहे।

2.1 निराई यंत्र का अभिकल्प एवं विकास

विद्युत-संचालित निराई यंत्र का एक प्रोटोटाइप सैद्धांतिक अभिकल्प गणनाओं और मशीन की कार्यात्मक आवश्यकताओं के आधार पर विकसित किया गया। निराई यंत्र के विकास हेतु मुख्य मानदंड फसल संबंधी एवं मृदा संबंधी पैरामीटर थे, जैसे कि मृदा का प्रकार , मृदा प्रतिरोध, फसल की ज्यामिति और खरपतवार घनत्व, ये सभी कारक निराई के प्रदर्शन को सीधे प्रभावित करते हैं। विकसित यंत्र को वॉक-बिहाइंड मोड में चलाने के लिए डिज़ाइन किया गया, जिससे संचालक को निराई के दौरान संचालन में आसानी हो। विकसित निराई यंत्र के प्रमुख घटक जैसे कि बैटरी , डी.सी. मोटर (गति नियंत्रक सहित), ड्राइव व्हील , निराई तंत्र (जिसमें ड्रम और औजार शामिल हैं), मुख्य फ्रेम , परिवहन पहिया तथा हैंडल है। इन सभी घटकों का संयोजन चित्र 1 में प्रदर्शित किया गया है। यह डिज़ाइन न केवल संचालन में सरल है, बल्कि छोटे और सीमांत किसानों के लिए किफायती, हल्का और पर्यावरण अनुकूल समाधान प्रदान करता है।



चित्र 1: विकसित की गयी निराई **विद्युत-संचालित निराई** यन्त्र का योजनात्मक आरेख

2.2 विकसित निराई यंत्र का क्षेत्रीय परीक्षण एवं मूल्यांकन

विकसित निराई यंत्र का क्षेत्रीय प्रयोगात्मक परीक्षण एवं मूल्यांकन रेतीली दोमट मिट्टी में रबी मौसम के दौरान मेथी एवं धनिया फसलों (30 से.मी. पंक्ति दूरी) में लगभग 30 दिन की फसल अवस्था पर संचालित किया गया जब खेतों में पर्याप्त मात्रा में खरपतवार उग चुके थे। प्रयोग से पहले मृदा के भौतिक गुण जैसे कि नमी की मात्रा, संपुट घनत्व और कोन सूचकांक का मापन खेत के विभिन्न स्थानों पर किया गया। इन मापों के लिए डिजिटल सॉयल मॉइस्चर मीटर, डिजिटल कोन पेनिट्रोमीटर और कोर कटर का उपयोग किया गया। इसी प्रकार, प्रयोग से पूर्व विभिन्न स्थानों पर फसल संबंधी पैरामीटर जैसे पंक्ति दूरी, पौधों की ऊँचाई, छत्र चौड़ाई और खरपतवार की ऊँचाई को भी मापा गया। फसल को क्षति से बचाने के लिए विकसित निराई यंत्र को फसलों की पंक्तियों के बीच चलाया गया तथा यंत्र को पंक्तियों के मध्य से गुजारा गया ताकि एक सुरक्षित क्षेत्र बना रहे और फसल को नुकसान न पहुँचे। निराई यंत्र के क्षेत्रीय प्रदर्शन अध्ययन की प्रयोगात्मक योजना तालिका 2 में प्रस्तुत की गई है। विकसित निराई यंत्र के क्षेत्र प्रदर्शन की तुलना व्हील हो से की गई। प्रदर्शन के मूल्यांकन के लिए निराई दक्षता, पौध क्षति, क्षेत्र क्षमता, शक्ति खपत और कंपन जैसे विभिन्न पैरामीटर दर्ज किए गए तथा उपयुक्त सूत्रों का उपयोग कर उनकी गणना की गई। विकसित विद्युत-संचालित निराई यंत्र के तकनीकी विनिर्देश तालिका 1 में वर्णित हैं।

तालिका 1 — विकसित विकसित विद्युत-संचालित निराई यंत्र के तकनीकी विनिर्देश

क्रम संख्या	तकनीकी विनिर्देश	विवरण
1.	कुल आयाम, मि.मी. (लंबाई × चौड़ाई × ऊँचाई)	765 × 250 × 950
2.	भार, कि.ग्रा.	45
3.	ड्राइव पहिए का आकार (व्यास × चौड़ाई), मि.मी.	300 × 50
4.	हैंडल का आयाम (लंबाई × चौड़ाई), मि.मी.	1180 × 200
5.	हैंडल की T-आकार की पकड़ का आकार (लंबाई × व्यास), मि.मी.	20 × 600
6.	ड्रम पर ब्लेडों की संख्या	10
7.	स्वीप कोण, डिग्री	720
8.	निराई उपकरण का आकार (लंबाई × चौड़ाई × मोटाई), मि.मी.	120 × 180 × 4
9.	निराई उपकरणों की संख्या	1
10.	कटाई चौड़ाई, मि.मी.	180
11.	अधिकतम निराई गहराई, मि.मी.	45
12.	डीसी मोटर (स्पीड कंट्रोलर सहित)	24 V, 350 W
13.	मोटर से ड्राइव पहिए तक गति अनुपात	5.33

क्रम संख्या	तकनीकी विनिर्देश	विवरण
14.	बैटरी	2 (12 V, 24 Ah)
15.	ऊर्जा मीटर	LCD, 0–20 A, 6.5–100 V
16.	थ्रॉटल पोजीशन सेंसर	0–4 A, 0–24 V
17.	मोड़ त्रिज्या, मि.मी.	450–700
18.	परिवहन पहिए	2

3. परिणाम और चर्चा

क्षेत्रीय प्रयोगात्मक परीक्षण के दौरान मृदा के औसत गुणों, जैसे नमी की मात्रा, संपुट घनत्व तथा कोन सूचकांक का मापन करने पर इनके मान क्रमशः14.83 प्रतिशत, 1.59 ग्रा./सी.सी. तथा406.3 किलो पास्कल (kPa) पाए गए। फसल संबंधी औसत मान जैसे पौधे की ऊँचाई, छत्र चौड़ाई, पौध घनत्व तथा खरपतवार संख्या क्रमशः 15.85 से.मी., 14.8 से.मी., 62.2 और 95.5 दर्ज किए गए। विकसित प्रोटोटाइप को फसल को क्षति से बचाने के लिए एक सुरक्षित क्षेत्र (सेफ्टी जोन) को ध्यान में रखकर संचालित किया गया। क्षेत्रीय परीक्षणों के परिणामों से स्पष्ट हुआ कि निराई दक्षता का औसत मान संचालन की गति बढ़ने के साथ बढ़ता है। ड्रम व्यास के औसत मानों पर निराई दक्षता अधिक देखी गई, जिसका मुख्य कारण कम रोलिंग प्रतिरोध और अधिक खरपतवार काटने या उखाड़ने की क्रिया हो सकता है। पूरे प्रयोग में सर्वाधिक निराई दक्षता 91.68 प्रतिशत दर्ज की गई, जो कि 175 मि.मी. ड्रम व्यास और 3 कि.मी./घं. गति पर प्राप्त हुई। यह दक्षता 150 मिमी ड्रम व्यास और 2 कि.मी./घं गति पर प्राप्त न्यूनतम दक्षता की तुलना में लगभग 34.10 प्रतिशत अधिक थी। पौध क्षति के संदर्भ में यह पाया गया कि न्यूनतम पौध क्षति 2 कि.मी./घं गति पर हुई, जबकि 3 कि.मी./घं. गति पर औसत पौध क्षति 3.18 प्रतिशत रही। समस्त परीक्षणों का औसत पौध क्षति मान 2.54 प्रतिशत पाया गया। यह इंगित करता है कि विकसित यंत्र फसल को न्यूनतम हानि पहुँचाते हुए प्रभावी निराई करने में सक्षम है। क्षेत्र क्षमता के दृष्टिकोण से सर्वाधिक क्षेत्र क्षमता 3 कि.मी./घं. गति और 175 मि.मी. ड्रम व्यास पर दर्ज की गई। चूंकि यह यंत्र वॉक-बिहाइंड मोड में संचालित होता है, अतः संचालक की औसत गति 3 कि.मी./घं. से अधिक नहीं होनी चाहिए ताकि संचालन आरामदायक और सुरक्षित रहे। विकसित यंत्र की प्रभावी क्षेत्र क्षमता मौजूदा हस्तचालित उपकरणों की तुलना में तीन से चार गुना अधिक पाई गई, जिससे आवश्यक श्रमशक्ति तथा संचालन लागत में उल्लेखनीय कमी संभव है। शक्ति खपत का औसत मान गति और ड्रम व्यास में वृद्धि के साथ बढ़ता गया। शक्ति खपत में वृद्धि का कारण अधिक ड्राफ्ट बल, मृदा का संपुट घनत्व तथा मृदा की नमी हो सकता है। पूरे परीक्षण में औसत शक्ति खपत 180.97 W दर्ज की गई। यंत्र का अधिकतम रन टाइम 3 घंटे था, जो 175 मिमी ड्रम व्यास और 3 कि.मी./घं गति पर प्राप्त हुआ। निराई क्रिया के दौरान तीनों अक्षों (x, y और z) में औसत कंपन 2.54 मी./से. दर्ज किया गया, जो मौजूदा शक्ति-संचालित निराई यंत्रों की तुलना में कम था। इससे संचालक की थकान में कमी तथा कार्य कुशलता में वृद्धि देखी गई। समग्र रूप से, विकसित ई-संचालित निराई यंत्र ने उच्च निराई दक्षता, न्यूनतम पौध क्षति, अधिक क्षेत्र क्षमता, उपयुक्त शक्ति खपत और कम कंपन के साथ उत्कृष्ट प्रदर्शन किया। यह छोटे एवं सीमांत किसानों के लिए समय एवं

श्रम बचाने वाला, सुरक्षित तथा प्रभावी यंत्र सिद्ध होता है। विकसित यन्त्र द्वारा निराई क्रिया का क्षेत्र दृश्य चित्र 2 में दर्शाया गया है ।

चित्र 2: विकसित यन्त्र द्वारा निराई क्रिया का क्षेत्र दृश्य

4. निष्कर्ष

वर्तमान अध्ययन से यह स्पष्ट हुआ कि विकसित विद्युत-संचालित निराई यंत्र की संचालन गति का निराई दक्षता, पौध क्षति, प्रभावी क्षेत्र क्षमता और शक्ति खपत पर महत्वपूर्ण प्रभाव होता है, जो 1 प्रतिशत और 5 प्रतिशत स्तर पर सांख्यिकीय रूप से महत्वपूर्ण है, जबकि इनके आपसी प्रभाव का महत्व नहीं पाया गया। ड्रम व्यास का निराई दक्षता और शक्ति खपत पर 1 और 5 प्रतिशत स्तर पर महत्वपूर्ण प्रभाव देखा गया। विकसित निराई तंत्र, जिसमें ड्रम और औजार का संयोजन है, ने 175 मिमी ड्रम व्यास और 3 किमी/घं. की गति पर सर्वोत्तम प्रदर्शन किया। परीक्षणों से पाया गया कि औसत निराई दक्षता 91.36 प्रतिशत, क्षेत्र क्षमता 0.048 हे./घं., क्षेत्र दक्षता संतोषजनक तथा पौध क्षति केवल 2.36 प्रतिशत पाई गई जब संचालन गति 2.5 से 3 किमी/घं. रखी गई। औसत शक्ति खपत 176 वाट दर्ज की गई। विकसित यंत्र की क्षेत्र क्षमता व्हील हो की तुलना में 3–4 गुना अधिक पाई गई। इस यंत्र के उपयोग से निराई कार्य में आवश्यक श्रमशक्ति में महत्वपूर्ण कमी आई, जिससे संचालन की लागत में भी कमी संभव हुई। कुल मिलाकर, विकसित विद्युत-संचालित निराई यंत्र छोटे और सीमांत किसानों के लिए उपयुक्त, सुरक्षित और प्रभावी समाधान साबित होता है।

संदर्भ

Goel, A. K., Behra, D., Behra, K., Mohanty, S. K., & Nanda, S. K. (2008). Development and ergonomic evaluation of manually operated weeder. Agricultural Engineering International: The CIGR Ejournal, 10, 1–11.

Pandey, H. S., Tiwari, G. S., & Sharma, A. K. (2023). Design and development of an e-powered inter row weeder for small farm mechanization: e-powered inter row weeder for small farm mechanization. Journal of Scientific & Industrial Research (JSIR), 82(06), 671–682.

Rao, A. N., Singh, R. G., Gulshan, M., & Wani, S. P. (2020). Weed research issues, challenges, and opportunities in India. Crop Protection, 134, 44–51.

Singh, M. K., Singh, S. P., Singh, M. K., & Utpal, E. (2019). Battery assisted four-wheel weeder for reducing the drudgery of farmers. Indian Journal of Agricultural Sciences, 89, 1434–1438. https://doi.org/10.56093/ijas.v89i9.93483

Utpal, E., Singh, S. P., & Singh, M. K. (2022). Comparative field performance evaluation of different type of Pusa Electric Power Units. Indian Journal of Agricultural Sciences, 92(6), 747–751.

Yadav R & Pund S, (2007) Development and ergonomic evaluation of manual weeder, Agric Eng Int: The CIGR E J, 9, 1–9.

कार्बन-ऋणात्मक बायोकोल प्राप्त करने के लिए जूट डंठलों के टॉरिफ़ैक्शन का बहु-पैरामीटर अनुकूलन

मनीषा जगदाले*, देब प्रसाद रे, प्रतीक श्रीवास्तव, महेश जाधव, संजय देबनाथ, सोमनाथ दंडपाट

भा.कृ.अनु.प.-राष्ट्रीय प्राकृतिक रेशां अभियांत्रिकी एवं प्रौद्योगिकी संस्थान, कोलकाता-

*ईमेल: manisha.jagadale.123@gmail.com

सारांश

यह लेख जूट डंठल के टॉरिफ़ैक्शन (torrefaction) क्षेत्र में उष्मीय अपघटन मानचित्रण (thermal degradation mapping) पर केंद्रित है। इस महत्वपूर्ण अध्ययन में, जूट डंठल को चार विभिन्न तापमानों (200 °C, 250 °C, 300 °C और 350 °C) तथा तीन विभिन्न निवास अवधियों (20 मिनट, 40 मिनट और 60 मिनट) पर एक स्थिर कण-परत अभिक्रियक (fixed bed reactor) में टॉरिफ़ाई किया गया। टॉरिफ़ैक्शन के प्रभाव का मूल्यांकन द्रव्यमान उपज, ऊर्जा उपज, ऊष्मीय मूल्य, संवर्धन गुणांक, टॉरिफ़ैक्शन की तीव्रता, निकटतम (proximate) और तत्वीय (ultimate) विश्लेषण पर किया गया। फूरियर ट्रांसफ़ॉर्म अवरक्त स्पेक्ट्रोस्कोपी (FTIR) और स्कैनिंग इलेक्ट्रॉन माइक्रोस्कोपी (SEM) के माध्यम से टॉरिफ़ैक्शन प्रक्रिया से उत्पन्न रासायनिक संरचना और आकृतिक (morphological) परिवर्तनों की गहन जांच की गई। टॉरिफ़ाइड जूट डंठलों की द्रव्यमान और ऊर्जा उपज क्रमशः 68.45 से 85.31% और 85.87 से 99.99% के बीच पाई गई। परिणामों से पता चला कि कार्बन सामग्री में 46.56 % से 53.12 % तक वृद्धि हुई, जबकि उच्च ऊष्मा मूल्य (HHV) 18.87 MJ/kg से बढ़कर 20.62 MJ/kg हुआ। O/C और H/C अनुपात क्रमशः 28.57 % और 41.50 % तक घट गए, जो यह इंगित करता है कि हाइड्रोजन का निष्कासन ऑक्सीजन से अधिक तेजी से हुआ। ऊर्जा-द्रव्यमान सह-लाभ सूचकांक (EMCI) 350 °C तापमान और 20 मिनट निवास समय पर अधिकतम 17.63 % तक पहुंचा। FTIR स्पेक्ट्रम में 1032.52, 1189.12 और 1295.18 cm^{-1} पर प्राप्त नोड्स ने सेल्यूलोज, हेमिसेल्यूलोज और लिग्निन संरचनाओं में टॉरिफ़ैक्शन के कारण खिंचाव (stretching) को दर्शाया। उच्च तापमान पर SEM विश्लेषण में जूट डंठल की संरचना में अंतराल (intergaps) देखे गए, जो वाष्पशील गैसों के उत्सर्जन के कारण उत्पन्न हुए। समग्र रूप से, टॉरिफ़ैक्शन को एक प्रारंभिक उपचार (pre-treatment) प्रक्रिया के रूप में उपयोग करने से जूट डंठल के गुणों में सुधार प्रदर्शित हुआ।

संकेत शब्द: जूट डंठल, ऊर्जा-द्रव्यमान सह-लाभ सूचकांक, टॉरिफ़ैक्शन की डिग्री, बायोएनर्जी, संवर्धन गुणांक

परिचय

दुनिया की जनसंख्या तेजी से बढ़ रही है और अनुमान है कि वर्ष 2050 तक यह 9.1 अरब तक पहुँच जाएगी । बढ़ती जनसंख्या के कारण 2020 से 2050 के बीच ऊर्जा खपत में 31% वृद्धि की संभावना है। अतः, नवीकरणीय ऊर्जा के विकास हेतु वैश्विक स्तर पर गहन प्रयास किए जा रहे हैं। बायोमास विश्व का सर्वाधिक

उपलब्ध, कार्बन-तटस्थ और पर्यावरण-अनुकूल संसाधन है। भारत एक कृषि प्रधान देश है, जो प्रतिवर्ष लगभग 500 मिलियन टन बायोमास उत्पन्न करता है (Bhuvaneshwari et al., 2019), जिसके मुख्य स्रोत अनाज, दलहन, तिलहन, तंतु एवं उद्यानिकी फसलें हैं। टॉरिफ़ैक्शन, गैसीकरण एवं पाइरोलिसिस की तुलना में एक हल्की ऊष्मा उपचार प्रक्रिया है, जो 200 से 300 °C तापमान सीमा में ऑक्सीजन की अनुपस्थिति या नियंत्रित मात्रा में 10–240 मिनट के निवास समय तथा 50 °C/मिनट से कम ताप दर पर संचालित होती है। हेमिसेल्युलोज बायोमास का सर्वाधिक सक्रिय घटक है, जो इसकी अमोर्फ संरचना और छोटी शर्करा श्रृंखलाओं के कारण ऊष्मीय अपघटन के प्रति अधिक संवेदनशील होता है। उच्च टॉरिफ़ैक्शन तापमान पर लिग्निन का अपघटन प्रारंभ होता है, जबकि हेमिसेल्युलोज मुख्यतः द्रव्यमान हानि में योगदान देता है।

जूट (कोरकोरस प्रजाति) कपास के बाद विश्व की सबसे अधिक प्रयुक्त प्राकृतिक रेशेदार फसल है। विश्व जूट उत्पादन में भारत 56.85% योगदान देता है, इसके बाद बांग्लादेश (40.67%) और चीन (1.03%) का स्थान है (Majumdar et al., 2020)। जूट रेशा निष्कर्षण के बाद उत्पन्न जूट डंठल एक महत्वपूर्ण सह-उत्पाद है, जिसका भार रेशे के लगभग 2.5 गुना होता है । भारत में प्रत्येक वर्ष लगभग 3 से 4 मिलियन टन जूट डंठल अपशिष्ट उत्पन्न होता है । यह लिग्नोसेलुलोजिक सामग्री से समृद्ध होने के कारण न तो पशु आहार के लिए उपयुक्त है और न ही खाद निर्माण के लिए। अतः इसे अक्सर जलाया या फेंक दिया जाता है, जो पर्यावरण प्रदूषण का कारण बनता है। इसका उपयोग बायो-ऑयल, शोषक पदार्थ, बायोएथेनॉल और सक्रिय कार्बन के रूप में किये जाने के कुछ सीमित ही अध्ययन उपलब्ध है। परंतु इसकी कम ऊर्जा घनत्व और जलग्राही प्रकृति इसके ईंधन रूप में प्रयोग को सीमित करती है। इस समस्या का समाधान टॉरिफ़ैक्शन तकनीक से किया जा सकता है, जो बायोमास की ऊर्जा घनत्व, ऊष्मीय मान, ईंधन अनुपात और द्रव्यमान उपज जैसी विशेषताओं को सुधारने में सक्षम है । टॉरिफ़ैक्शन प्रक्रिया के परिणाम बायोमास की संरचना तथा तापमान, निवास समय, कण आकार और ताप दर जैसे मापदंडों पर निर्भर करते हैं।

अध्ययन में 200 °C, 250 °C, 300 °C और 350 °C के तापमानों तथा 20, 40 और 60 मिनट के निवास समयों के संयोजन के प्रभाव का विश्लेषण किया गया है। मुख्य परीक्षणों में निकटतम विश्लेषण (प्रॉक्सिमेट एनालिसिस), तत्वीय विश्लेषण (अल्टीमेट एनालिसिस), ऊष्मीय मान (कैलोरिफिक वैल्यू), रूपात्मक संरचना (मॉर्फोलॉजिकल स्ट्रक्चर) और फुरियर ट्रांसफॉर्म अवरक्त स्पेक्ट्रोस्कोपी (एफटीआईआर) शामिल हैं। साथ ही ईंधन विशेषताओं जैसे द्रव्यमान उपज, ऊर्जा उपज, उच्च ऊष्मा मान (एचएचवी), संवर्धन गुणांक, टॉरिफ़ैक्शन डिग्री और ऊर्जा-द्रव्यमान सह-लाभ सूचकांक का भी विश्लेषण किया गया है। यह व्यापक अध्ययन जूट उद्योग से उत्पन्न अपशिष्ट के सतत प्रबंधन, ऊर्जा पुनरुत्पादन और भविष्य की नवीकरणीय ऊर्जा रणनीतियों में नई संभावनाएँ खोल सकता है। टॉरिफ़ैक्शन तकनीक के माध्यम से जूट डंठल को उच्च ऊर्जा मूल्य वाले बायोईंधन में परिवर्तित करना पर्यावरणीय संतुलन और ग्रामीण अर्थव्यवस्था के उन्नयन की दिशा में एक महत्वपूर्ण कदम साबित हो सकता है।

प्रायोगिक कार्यविधियाँ

जूट की डंठल के नमूनों को 50-60 मिमी से छोटे टुकड़ों में काटा गया और 105 °C पर 24 घंटे तक गरम हवा वाले ओवन में सुखाया गया। टॉरिफ़ैक्शन हेतु प्रयुक्त लघु-स्तरीय सेटअप जिसमें स्थिर-बेड

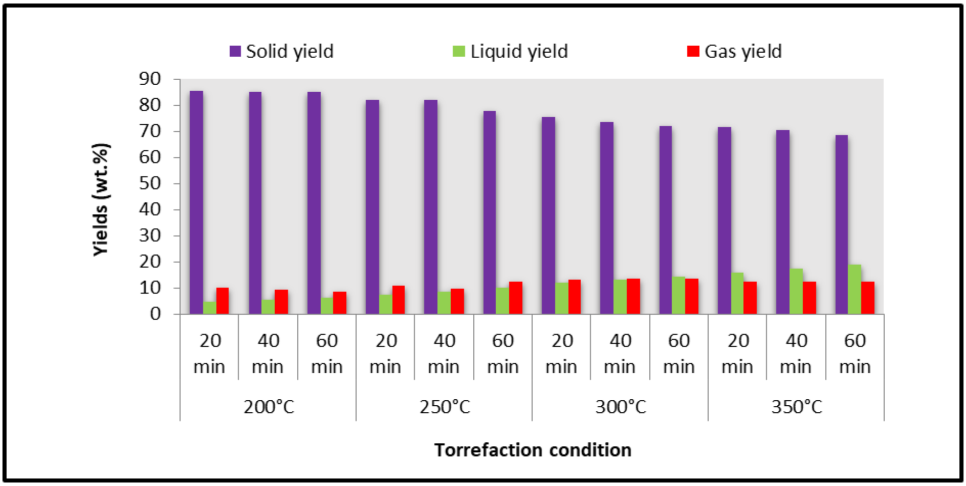
रिएक्टर, हीटर, पीआईडी नियंत्रक, कंडेनसर, थर्मोकपल और द्रव संग्रह इकाई शामिल थे। रिएक्टर (व्यास 180 मिमी, ऊँचाई 600 मिमी) 500 ग्राम से 5 किलोग्राम तक बायोमास को बैच मोड में टॉरिफ़ाई करने में सक्षम था। प्रयोग के दौरान तापमान को K-प्रकार थर्मोकपल और PID नियंत्रक से नियंत्रित किया गया। जूट डंठल को 200-350 °C तापमान और 20-60 मिनट निवास समय पर टॉरिफ़ाई किया गया। सेलुलोज और हेमिसेल्युलोज की मात्रा TAPPI-17 और लिग्निन की TAPPI-22 पद्धति से निर्धारित की गई। निकटतम विश्लेषण (ASTM E871-82, E872-82, D1102-84) के अनुसार किया गया। C, H, N, S का प्रतिशत LECO TruSpec (CHNS) एलीमेंटल विश्लेषक से और ऑक्सीजन का प्रतिशत अंतर से गणना किया गया। कच्ची और टॉरिफ़ाइड डंठल का उच्च ऊष्मीय मान (HHV) बॉम्ब कैलोरीमीटर से निर्धारित किया गया। चित्रों और सारणियों में केवल स्थिर भार पर प्राप्त परिणाम दर्शाए गए हैं।

परिणाम और चर्चा

जूट डंठल की भौतिक-रासायनिक विशेषताओं की तुलना पूर्व में अध्ययन किए गए नमूनों से की गई। कच्चे जूट डंठल में क्रमशः 39.78% सेल्युलोज, 29.90% हेमिसेल्युलोज और 25.38% लिग्निन पाया गया।

ठोस, द्रव और गैसीय उत्पाद उपज

चित्र 1 में विभिन्न टॉरिफ़ैक्शन तापमानों (200 °C, 250 °C, 300 °C और 350 °C) तथा 20, 40 और 60 मिनट के निवास समयों पर कच्चे जूट डंठल से प्राप्त औसत ठोस, द्रव और गैस उपज दर्शाई गई है। इनकी सीमाएँ क्रमशः 77.38 ± 6.28 %, 11.15 ± 4.84 % और 11.47 ± 1.75 % रहीं।

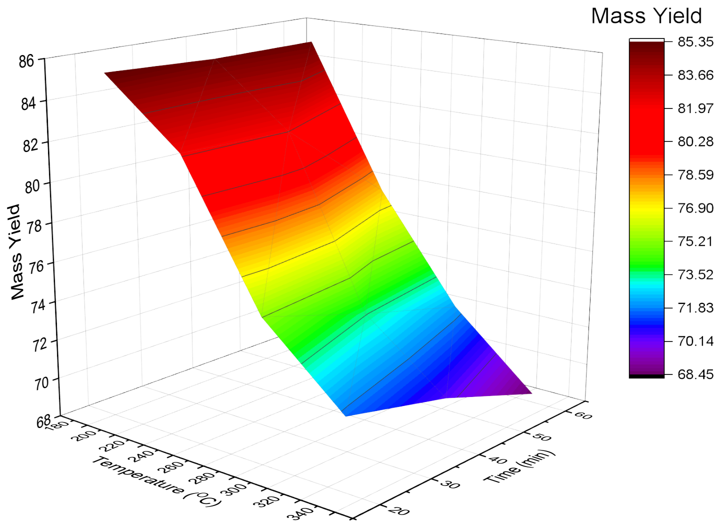


चित्र 1. विभिन्न टॉरिफ़ैक्शन स्थितियों में कच्चे जूट डंठल से प्राप्त ठोस, द्रव और गैसीय उत्पादों की उपज।

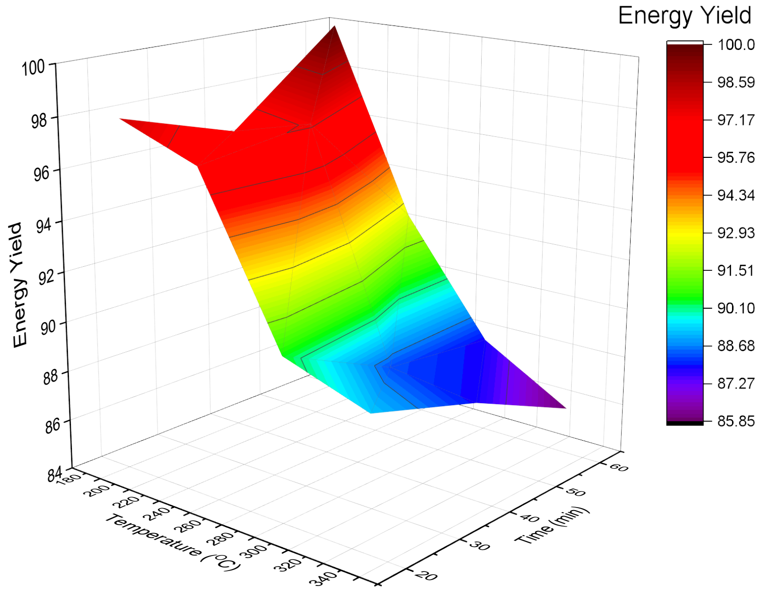
टॉरिफाइड जूट डंठल की द्रव्यमान उपज और ऊर्जा उपज

द्रव्यमान उपज और ऊर्जा उपज, टॉरिफ़ैक्शन के दौरान होने वाले उष्मीय अपघटन की तीव्रता का आकलन करने के महत्वपूर्ण संकेतक हैं। विभिन्न तापमानों (200 °C, 250 °C, 300 °C और 350 °C) तथा

निवास समयों (20, 40 और 60 मिनट) पर टॉरिफ़ाइड जूट डंठल की द्रव्यमान और ऊर्जा उपज के 3D सतह चित्र क्रमशः चित्र 2 और 3 में दर्शाए गए हैं।



चित्र 2. तापमान और निवास समय का टॉरिफाइड जूट डंठल की द्रव्यमान उपज पर प्रभाव



चित्र 3. तापमान और निवास समय का टॉरिफाइड जूट डंठल की ऊर्जा उपज पर प्रभाव

समग्र रूप से देखा गया कि तापमान 200 °C से 350 °C तक बढ़ने पर द्रव्यमान उपज 85.31% से घटकर 68.45% रही, जबकि ऊर्जा उपज 85.87% से 99.99% के बीच पाई गई। तापमान में वृद्धि के साथ टॉरिफ़ाइड पदार्थ की ऊर्जा और द्रव्यमान उपज में गिरावट दर्ज की गई। सभी तापमान और निवास समय संयोजनों में ऊर्जा उपज का मान द्रव्यमान उपज से अधिक रहा, जो यह दर्शाता है कि टॉरिफ़ैक्शन प्रक्रिया के परिणामस्वरूप उच्च ऊष्मा मान (HHV) में हुई वृद्धि द्रव्यमान ह्रास की तुलना में अधिक प्रभावशाली थी। विभिन्न तापमानों और निवास समयों पर प्राप्त ऊर्जा-द्रव्यमान सह-लाभ सूचकांक (EMCI) के मान टेबल S1 (पूरक सामग्री) में दिए गए हैं। अधिकतम EMCI मान 17.63% 350°C तापमान और 20 मिनट निवास समय पर प्राप्त हुआ, जो औद्योगिक अपशिष्ट-आधारित ईंधन के लिए रिपोर्ट किए गए EMCI मान (11.7%) से अधिक है (Nobre et al., 2019)। इस प्रकार, टॉरिफ़ैक्शन प्रक्रिया जूट डंठल के लिए उच्चतर EMCI प्राप्त करने में प्रभावी सिद्ध होती है।

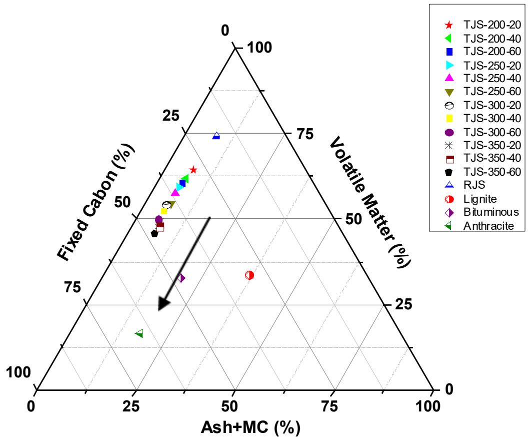
टॉरिफाइड जूट डंठल का निकटतम (प्रॉक्सिमेट) विश्लेषण

टॉरिफ़ैक्शन (torrefaction) के मापदंडों, अर्थात् तापमान और समय, का प्रभाव निकटतम विश्लेषण (proximate analysis) और ईंधन अनुपातों पर अध्ययन किया गया और इसे कच्चे जूट डंठल (raw jute stick) से तुलना की गई। कच्चे जूट डंठल में राख, वाष्पशील पदार्थ, स्थायी कार्बन और नमी की मात्रा क्रमशः 2.80%, 74.12%, 27.15% और 5.28% पाई गई। वाष्पशील पदार्थों में अधिकतम 45.72% तक की कमी 350°C तापमान और 60 मिनट निवास समय की टॉरिफेक्शन स्थिति पर देखी गई (चित्र 4)। इसके अतिरिक्त, स्थायी कार्बन में वृद्धि यह दर्शाती है कि टॉरिफाइड ठोस उत्पादों का ऊष्मीय मान (heating value) कच्चे नमूनों की तुलना में अधिक होता है। परंपरागत रूप से, बायोमास में वाष्पशील पदार्थ की अधिकता और स्थायी कार्बन की कम मात्रा के कारण इसका ईंधन अनुपात (fuel ratio) कम होता है। इस अध्ययन में ईंधन अनुपात 0.24 (कच्चा जूट डंठल) से 1.04 (टॉरिफाइड जूट डंठल–350°C–60 मिनट) तक पाया गया, जबकि औद्योगिक कोयले के लिए यह 0.5–1.0 की सीमा में होता है (Sarkar et al., 2021)। यह दर्शाता है कि टॉरिफाइड जूट डंठल ऊर्जा स्रोत के रूप में क्षमता रखते हैं। राख की मात्रा न्यूनतम 1.78% (250°C और 60 मिनट निवास समय) पर पाई गई, जो कच्चे जूट डंठल (2.80%) की तुलना में कम है। राख की मात्रा टॉरिफेक्शन की तीव्रता बढ़ने के साथ बढ़ने लगती है।

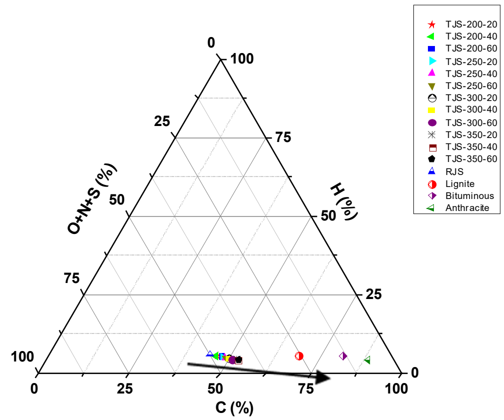
टॉरिफाइड जूट डंठल का तत्वीय (अल्टीमेट) विश्लेषण

टॉरिफेक्शन तापमान और निवास समय के प्रभाव को C, H, O, N और S तत्वों के आधार पर दर्शाया गया है। कच्चे बायोमास में C, H, O, N और S की मात्रा क्रमशः 44.23%, 5.90%, 49.32%, 0.42% और 0.55% पाई गई। जबकि टॉरिफाइड बायोमास के लिए इन मूल्यों की सीमा क्रमशः 46.56-53.12%, 5.38-4.15%, 47.51-42.43%, 0.51-0.54% और 0.55-0.30% थी। उच्च टॉरिफेक्शन तापमान पर ऑक्सीजन की मात्रा में महत्वपूर्ण कमी इस कारण से थी कि ऑक्सीजन का उपयोग हाइड्रोकार्बन वाष्प, CO_2, CO और अन्य यौगिकों के निर्माण में हुआ (Majumdar et al., 2020)। टॉरिफाइड जूट डंठल नमूनों में तापमान बढ़ने पर नाइट्रोजन और सल्फर की मात्रा में हल्की गिरावट का रुझान देखा गया। कम नाइट्रोजन सामग्री दहन के दौरान कम NO_x उत्सर्जन का कारण बन सकती है, जबकि कम सल्फर सामग्री रिएक्टर में जंग (corrosion)

की समस्या को कम करने में सहायक होती है। सल्फर की मात्रा में परिवर्तन 0.30% से 0.55% के बीच पाया गया, जो कि 1% से कम था (चित्र 5)।



चित्र 4. कच्चे जूट डंठल, टॉरिफाइड जूट डंठल और कोयला नमूनों के द्वितीयक डेटा का निकटतम (प्रॉक्सिमेट) विश्लेषण



चित्र 5. कच्चे जूट डंठल, टॉरिफाइड जूट डंठल और कोयला नमूनों के द्वितीयक डेटा का तत्वीय (अल्टीमेट) विश्लेषण।

टॉरिफाइड जूट डंठल का फूरियर ट्रांसफॉर्म इन्फ्रारेड स्पेक्ट्रोस्कोपी (FTIR) विश्लेषण

फूरियर ट्रांसफॉर्म इन्फ्रारेड स्पेक्ट्रोस्कोपी (FTIR) का उपयोग चयनित बायोमैटेरियल में उपस्थित रासायनिक यौगिकों या अभिक्रियाशील घटकों को निर्धारित करने के लिए किया गया। चित्र 6 (अ) और (ब) में यौगिक के लिए कंपन आवृत्तियों (vibrational frequencies) के अनुरूप अवशोषण शिखर (absorption peaks) दर्शाए गए हैं। चित्र 6. विभिन्न टॉरिफिकेशन तापमानों और निवास समय पर कच्चे तथा टॉरिफाइड जूट डंठल का FTIR विश्लेषण

स्पेक्ट्रम में शिखर का आकार यौगिक में उपस्थित पदार्थ की मात्रा को प्रदर्शित करता है। वे फंक्शनल ग्रुप सबसे महत्वपूर्ण होते हैं जहाँ अधिकतम परिवर्तन देखा जा सकता है, जैसे C=C, C=O, C–H और H–C–H समूह। 669.24 cm^{-1} पर स्थित बैंड से सेल्यूलोज की उपस्थिति का पता चलता है। चित्र 3 से यह देखा गया कि उच्च तापमानों, अर्थात् 300 °C और 350 °C पर, निम्न तापमानों की तुलना में सेल्यूलोज बैंड में उल्लेखनीय कमी आई। 1032.52 cm^{-1}, 1189.12 cm^{-1} और 1295.18 cm^{-1} पर स्थित बैंड क्रमशः कार्बोहाइड्रेट, एस्टर या ईथर समूहों की उपस्थिति को दर्शाते हैं। 1505 cm^{-1} पर प्राप्त शिखर लिग्निन की उपस्थिति दर्शाता है और यह ऐसे स्पेक्ट्रल क्षेत्र में स्थित है जहाँ पॉलीसैकराइड शिखर अनुपस्थित होते हैं। अधिकांश तापमान सीमा के लिए इस शिखर में कोई उल्लेखनीय परिवर्तन नहीं देखा गया, लेकिन 350°C पर इसमें बैंड की तीव्रता में उल्लेखनीय कमी पाई गई। 1727 cm^{-1} पर स्थित बैंड हेमी-सेल्यूलोज में कार्बोक्सिलिक अम्ल समूहों के स्ट्रेचिंग वाइब्रेशन से संबंधित है, और जब तापमान 300°C तक पहुँचता है, तो 1727 cm^{-1} का बैंड पूरी तरह गायब हो जाता है। यह इंगित करता है कि सभी हेमीसेल्यूलोज हटा दिए गए हैं। 2908 cm^{-1} पर स्थित शिखर एल्डिहाइड समूहों की उपस्थिति दर्शाता है। FTIR विश्लेषण से पता चला कि निम्न टॉरिफिकेशन तापमानों

(200°C और 250°C) पर कोई बड़ा परिवर्तन नहीं देखा गया, जबकि उच्च टॉरिफिकेशन तापमानों (300°C और 350°C) पर सबसे उल्लेखनीय प्रभाव देखे गए।

4. निष्कर्ष

यह शोध कार्य जूट डंठल की टॉरिफिकेशन प्रक्रिया में तापीय अपघटन (Thermal Degradation) मानचित्रण पर आधारित है, जिसमें तापमान (200°C, 250°C, 300°C और 350°C) और निवास समय (20, 40 और 60 मिनट) के प्रभाव का अध्ययन किया गया है तथा इसके परिणामस्वरूप उत्पन्न उत्पादों के रासायनिक और भौतिक गुणों पर इसके प्रभाव का विश्लेषण किया गया है। ईंधन संबंधी गुण, जैसे कि ऊष्मा मूल्य (Heating Value), द्रव्यमान उपज (Mass Yield), ऊर्जा उपज (Energy Yield), निकटतम विश्लेषण, तत्वीय विश्लेषण और रासायनिक संरचना (Chemical Composition) निर्धारित किए गए। टॉरिफिकेशन की तीव्रता बढ़ने के साथ जूट डंठल के कार्बन प्रतिशत और उच्च ऊष्मा मूल्य (Higher Heating Value) दोनों में वृद्धि देखी गई। कार्बन प्रतिशत 46.56% से बढ़कर 53.12% तक पहुंचा, जबकि उच्च ऊष्मा मूल्य 16.44 से बढ़कर 20.62 MJ/kg तक बढ़ गया। टॉरिफिकेशन की तीव्र परिस्थितियों (तापमान और निवास समय) में हाइड्रोजन-से-कार्बन अनुपात (H/C) में 41.50% और ऑक्सीजन-से-कार्बन अनुपात (O/C) में 28.57% तक की कमी देखी गई, जो इंगित करती है कि हाइड्रोजन का निष्कासन ऑक्सीजन की तुलना में अधिक तेजी से होता है। टॉरिफिकेशन के दौरान ऑक्सीजन युक्त समूहों जैसे कि एलिफैटिक –OH और –COOH में कमी आई, जिसके परिणामस्वरुप जूट डंठल का कार्बन प्रतिशत बढ़ गया।

संदर्भ

Bhuvaneshwari, S., Hettiarachchi, H., & Meegoda, J. N. (2019). Crop residue burning in India: Policy challenges and potential solutions. International Journal of Environmental Research and Public Health, 16(5), 832. https://doi.org/10.3390/ijerph16050832

Majumdar, S., Saha, P., Dutta, K., & Dutta, S. K. (2020). Improvement of fiber crop jute using genomics and genetic engineering. In M. Al-Khayri, S. Jain, & D. Johnson (Eds.), Advances in plant breeding strategies: Industrial and food crops (pp. 613–640). Elsevier. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818581-0.00022-X

Nobre, C., Vilarinho, C., Alves, O., Mendes, B., & Gonçalves, M. (2019). Upgrading refuse-derived fuel (RDF) through torrefaction and carbonization: Evaluation of RDF char fuel properties. Energy, 181, 66–76. https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.05.105

Sarkar, T. R., Azargohar, R., Dalai, A. K., & Meda, V. (2021). Improvement of fuel and physicochemical properties of canola residue through microwave torrefaction. Energy Reports, 7, 6338–6353. https://doi.org/10.1016/j.egyr.2021.09.068

हाइपरस्पेक्ट्रल इमेजिंग द्वारा चावल की आयु का त्वरित और गैर-विनाशकारी मूल्यांकन

गंजाहल्ली वाणी*, सुबीर कुमार चक्रवर्ती, दिलीप जाट, आदिनाथ काटे, मनोज कुमार त्रिपाठी, करण सिंह तथा मनोज कुमार

भा.कृ.अ.प.-केन्द्रीय कृषि अभियांत्रिकी संस्थान, भोपाल-462038

*ईमेल: vani14027@gmail.com

सारांश

चावल के भंडारण के दौरान होने वाली भौतिक-रासायनिक (physicochemical) परिवर्तनों का उसकी गुणवत्ता एवं वाणिज्यिक मूल्य पर महत्वपूर्ण प्रभाव पड़ता है। इस अध्ययन में 900–1700 nm सीमा की हाइपरस्पेक्ट्रल इमेजिंग तकनीक का उपयोग कर मुख्य आयु-सूचक मानकों-कुल स्टार्च, ऐमाइलोज़, मुक्त वसीय अम्ल (FFA) तथा पेरॉक्साइड मान (PV) का तीव्र एवं अविनाशी (non-destructive) निर्धारण किया गया। ताज़ा एवं पुराना चावल वर्गीकृत करने हेतु PLS-DA तथा K-NN मॉडलों का निर्माण किया गया, जिसमें PLS-DA ने 99% की उच्चतर पूर्वानुमानिक सटीकता प्रदर्शित की, जबकि K-NN की सटीकता 94% रही। मात्रात्मक भविष्यवाणी के लिए पूर्ण-स्पेक्ट्रम आधारित PLSR तथा MLR प्रतिगमन मॉडलों का उपयोग किया गया, जिसमें MLR ने बेहतर प्रदर्शन (R^2_p = 0.805-0.821; RMSEP = 0.403-2.959) दर्शाया। विकसित मॉडलों की सहायता से चावल के दानों के भीतर रासायनिक संघटकों (FFA, PV, कुल स्टार्च एवं ऐमाइलोज़) का स्थानिक दृश्यांकन भी संभव हुआ, जो भंडारण अवधि के दौरान चावल में अंतः-नमूना विविधताओं को समझने हेतु एक तीव्र एवं सक्षम दृष्टिकोण प्रदान करता है।

संकेत शब्द: चावल, हाइपरस्पेक्ट्रल इमेजिंग प्रणाली, बहुविविध विश्लेषण, वर्गीकरण मॉडल

1. प्रस्तावना

चावल (Oryza sativa L.) विश्व की लगभग आधी जनसंख्या का मुख्य आहार है, विशेष रूप से एशिया, अफ्रीका और दक्षिण अमेरिका में, जहाँ यह कार्बोहाइड्रेट तथा आवश्यक पोषक तत्वों का प्रमुख स्रोत है (Choi et al., 2015)। भारत विश्व के प्रमुख चावल उत्पादक देशों में से एक है, जहाँ लगभग 46.24 मिलियन हेक्टेयर क्षेत्र में चावल की खेती की जाती है और वार्षिक उत्पादन लगभग 137 मिलियन टन है। विभिन्न किस्मों में बासमती चावल अपनी विशिष्ट सुगंध, बनावट तथा उत्कृष्ट पाक-गुणों के कारण अत्यधिक आर्थिक महत्त्व रखता है और एक प्रमुख निर्यात वस्तु है (Chavan, 2023)। कटाई के बाद भंडारण अवधि के दौरान चावल की गुणवत्ता में सुधार होता है, जिसे सामान्यतः "एजिंग" कहा जाता है। इस प्रक्रिया में कई भौतिक-रासायनिक एवं शारीरिक परिवर्तन होते हैं। उचित एजिंग से पकाने का व्यवहार, बनावट तथा उपभोक्ता स्वीकार्यता में सुधार होता है, जबकि अत्यधिक भंडारण से गुणवत्ता में गिरावट आ सकती है और बाज़ार मूल्य कम हो सकता है। भंडारण के शुरुआती तीन महीनों में महत्वपूर्ण परिवर्तन देखे गए हैं, जबकि दीर्घकालिक एजिंग (12–24 महीने) से हेड राइस रिकवरी, जल अवशोषण क्षमता तथा भिगोने और पकाने के दौरान दानों

के फैलाव में वृद्धि होती है (Thakare et al., 2023; Sai Krishna et al., 2018)। ये सुधार मुख्यतः स्टार्च की संरचना में परिवर्तनों-जैसे लंबी श्रृंखला वाले अमाइलोपेक्टिन का विघटन, क्रिस्टलीय क्षेत्रों में कमी, तथा स्टार्च ग्रैन्यूल्स की कमजोरी-के कारण होते हैं, जिनसे अमाइलोज़ मात्रा बढ़ती है और पकाने के गुण बेहतर होते हैं (Wang et al., 2022)। इन वांछित गुणों के कारण आयु-युक्त (aged) चावल उष्णकटिबंधीय एशिया में अधिक पसंद किया जाता है (Kaur & Chand, 2011) और बाज़ार में 25-30% अधिक मूल्य प्राप्त करता है (Thakare et al., 2023)।

चावल की आयु का सटीक निर्धारण गुणवत्ता सुनिश्चित करने, मिसलेबलिंग रोकने तथा उचित बाज़ार मूल्यांकन के लिए अत्यावश्यक है। पारंपरिक विश्लेषण विधियाँ—जैसे रासायनिक परीक्षण, विस्कोसिटी मापन तथा संवेदी मूल्यांकन—उपयोगी होने पर भी विनाशकारी, श्रम-साध्य हैं और बड़े पैमाने या ऑन-साइट विश्लेषण के लिए उपयुक्त नहीं हैं। हाइपरस्पेक्ट्रल इमेजिंग (HSI) को केम्योमेट्रिक मॉडलिंग के साथ एकीकृत करने से चावल की गुणवत्ता एवं आयु का तीव्र, अविनाशी एवं विश्वसनीय मूल्यांकन संभव है। HSI व्यापक तरंगदैर्घ्य सीमा में विस्तृत स्पेक्ट्रल जानकारी प्रदान करता है, जिससे भंडारण के दौरान होने वाले सूक्ष्म जैवरासायनिक एवं संरचनात्मक परिवर्तनों का पता लगाया जा सकता है (Jindagul et al., 2023)। इसकी पिक्सेल-स्तरीय स्पेक्ट्रल मैपिंग क्षमता चावल की संरचना में होने वाले परिवर्तनों की गहन समझ प्रदान करती है, साथ ही रसायनों, समय तथा नमूना तैयारी की आवश्यकता को कम करती है।

यद्यपि इस क्षेत्र में संभावनाएँ व्यापक हैं, परंतु बहुत कम अध्ययनों ने HSI को मशीन लर्निंग एल्गोरिद्म के साथ संयोजित कर भौतिक-रासायनिक गुणों की मात्रात्मक भविष्यवाणी तथा भंडारण अवधि के आधार पर चावल का वर्गीकरण किया है। अतः यह अध्ययन चावल की एजिंग से संबंधित भौतिक-रासायनिक परिवर्तनों की जाँच करता है और हाइपरस्पेक्ट्रल इमेजिंग तथा केम्योमेट्रिक तकनीकों का उपयोग कर चावल की आयु निर्धारण हेतु एक अविनाशी पद्धति विकसित करने का उद्देश्य रखता है।

2. सामग्री एवं विधि

2.1. नमूना संग्रहण एवं तैयारी

पुसा बासमती 1509 किस्म के धान के दाने, वर्ष 2021, 2022 एवं 2023 की फसलों से, नेशनल सीड कॉर्पोरेशन, भोपाल (भारत) से प्राप्त किए गए। नमूनों को प्रयोगशाला इनक्यूबेटर में 30 ± 1 °C तापमान तथा 65 ± 2% सापेक्ष आर्द्रता की नियंत्रित परिस्थितियों में भंडारित किया गया। बाहरी अशुद्धियों को हटाने हेतु नमूनों को साफ करने के बाद, प्रत्येक वर्ष के 250 g धान को राइस हलर (TMU35B Satake, Japan) की सहायता से डिहल किया गया। प्राप्त ब्राउन राइस को आगे के विश्लेषण तक ज़िपलॉक पाउच में संरक्षित रखा गया। हाइपरस्पेक्ट्रल इमेजिंग हेतु प्रत्येक वर्ष (2021, 2022 तथा 2023) के लिए 100 दानों वाले तीन स्वतंत्र नमूनों का उपयोग किया गया।

2.2. चावल की भौतिक-रासायनिक संरचना का निर्धारण

ताज़ा एवं पुराना चावल दोनों का नमी प्रतिशत 105 °C पर नमूने को स्थिर भार प्राप्त होने तक सुखाकर निर्धारित किया गया (AOAC, 2005) । क्रूड प्रोटीन (नाइट्रोजन × 5.95) की मात्रा माइक्रो-कजेल्डहल विधि

द्वारा मापी गई (AOAC, 2005) । वसा की मात्रा पेट्रोलियम ईथर का उपयोग करते हुए Soxhlet उपकरण द्वारा निर्धारित की गई (9) । कुल स्टार्च की मात्रा 10. हॉज, जे. ई. और हॉफराइटर द्वारा वर्णित विधि से आंकी गई (Hodge & Hofreiter, 1962) । अमाइलोज़ की मात्रा आयोडीन कलरिमेट्रिक पद्धति अपनाते हुए 620 nm पर UV-Vis स्पेक्ट्रोफोटोमीटर द्वारा मापी गई (Khumtong and Noomhorm (2015)) । मुक्त वसीय अम्ल (FFA) तथा पेरॉक्साइड मान (PV) का Wu et al. (2016) द्वारा वर्णित विधियों के अनुसार किया गया (Wu et al., 2016) । सभी विश्लेषणों को प्राप्त मानों की सटीकता तथा पुनरुत्पादकता सुनिश्चित करने हेतु त्रिकृति में किया गया (n = 3)।

2.3. हाइपरस्पेक्ट्रल इमेज अधिग्रहण

ताज़ा, एक-वर्ष पुराने तथा दो-वर्ष पुराने ब्राउन राइस के हाइपरस्पेक्ट्रल चित्र 900–1700 nm नियर-इन्फ्रारेड–शॉर्टवेव इन्फ्रारेड (NIR–SWIR) HSI प्रणाली (Pika NIR-320, Resonon Inc., USA) का उपयोग करके प्राप्त किए गए। यह प्रणाली 4.9 nm की स्पेक्ट्रल रेज़ोल्यूशन, 168 स्पेक्ट्रल बैंड तथा 320 स्पैटियल चैनल प्रदान करती है, तथा 540 fps की अधिकतम फ्रेम दर उच्च-रिज़ोल्यूशन एवं तीव्र इमेज अधिग्रहण सुनिश्चित करती है। समान एवं स्थिर प्रकाशन हेतु फ़ाइबर-कपल्ड, स्थिरित ब्रॉडबैंड लाइन लाइट स्रोत का उपयोग किया गया, जिससे तापीय प्रभाव न्यूनतम रहे। चित्र 320 × 224 पिक्सेल की स्पैटियल रेज़ोल्यूशन पर रिकॉर्ड किए गए, जहाँ प्रत्येक हाइपरस्पेक्ट्रल लाइन में 320 स्पैटियल पिक्सेल सम्मिलित थे, तथा कैप्चर की गई लाइनों की संख्या (224) स्कैनिंग दिशा में नमूने की लंबाई पर निर्भर थी। इमेजिंग के दौरान चावल के दानों को मोटराइज़्ड प्लेटफ़ॉर्म पर रखा गया तथा हैलोजन लैंप द्वारा प्रकाशित किया गया। परावर्तित प्रकाश को नमूने के ऊपर स्थित हाइपरस्पेक्ट्रल कैमरा द्वारा कैद किया गया, जिससे स्थानिक (spatial) तथा वास्तविक समय (real-time) स्पेक्ट्रल डेटा दोनों प्राप्त हुए (Fig.1)। सभी इमेजिंग पैरामीटर Spectronon Pro सॉफ़्टवेयर (संस्करण 3.4.5, Resonon Inc., USA) द्वारा नियंत्रित एवं विन्यस्त किए गए।

2.4. हाइपरस्पेक्ट्रल छवियों का पूर्व-प्रसंस्करण

हाइपरस्पेक्ट्रल छवियों के स्थानिक (spatial) पूर्व-प्रसंस्करण से शोर में कमी, ज्यामितीय विकृतियों का सुधार, सटीकता में वृद्धि तथा बहुवैरीय विश्लेषण के लिए अनुपयुक्त क्षेत्रों को हटाने में सहायता मिली (Chakraborty et al., 2021)। छवि आयामों को कम करने तथा मृत पिक्सल्स को हटाने के लिए स्पैटियल बिनिंग तकनीक का उपयोग किया गया, जबकि पृष्ठभूमि हस्तक्षेप को हटाने हेतु K-means क्लस्टरिंग मास्क लागू किए गए। कण (grain) आकृति-विज्ञान पर प्रकाश प्रकीर्णन, शोर और पृष्ठभूमि परिवर्तनशीलता के प्रभाव को और न्यूनतम करने के लिए स्पेक्ट्रल पूर्व-प्रसंस्करण तकनीकों का उपयोग किया गया, जिनमें Savitzky–Golay (SG) स्मूदिंग, SG प्रथम अवकलज (SG-D1), Standard Normal Variate (SNV) तथा SG द्वितीय अवकलज (SG-D2) शामिल थे। स्मूदिंग और अवकलज विधियों को 7-बिंदु विंडो और द्वितीय-डिग्री बहुपद के साथ लागू किया गया। सभी स्थानिक एवं स्पेक्ट्रल पूर्व-प्रसंस्करण चरण HYPER-Tools संस्करण 3.029 का उपयोग करते हुए MATLAB R2019a (MathWorks, Natick, USA) में संपादित किए गए।

2.5. वर्गीकरण मॉडल का विश्लेषण

चावल नमूनों की आयु का वर्गीकरण करने के लिए सुपर्वाइज़्ड वर्गीकरण एल्गोरिद्म Partial Least Squares Discriminant Analysis (PLS-DA) एवं K-Nearest Neighbors (k-NN) का उपयोग किया गया। मॉडल के प्रदर्शन का मूल्यांकन विनीशियन ब्लाइंड्स पद्धति के साथ पाँच-समूह क्रॉस-वैलिडेशन द्वारा किया गया। PLS-DA में सही वर्गीकृत नमूनों को एक (1) तथा गलत वर्गीकृत नमूनों को शून्य (0) मान प्रदान किया गया (Chakraborty et al., 2021)। k-NN एल्गोरिद्म किसी वस्तु को उसके निकटतम पड़ोसियों की बहुलता (majority class) के आधार पर वर्गीकृत करता है, जहाँ k पड़ोसियों की संख्या को दर्शाता है। यह विधि बहु-वर्ग (multiclass) समस्याओं के लिए उपयुक्त, गैर-रेखीय (nonlinear) एवं गैर-पैरामीट्रिक (nonparametric) है। मॉडल की प्रभावशीलता चुने गए k-मान पर निर्भर करती है (Kong et al., 2013), जबकि वर्गीकरण सटीकता डेटासेट की विशेषताओं से प्रभावित होती है (Zheng et al., 2014)। PLS-DA में प्रयुक्त लेटेंट वेरिएबल्स (LVs) की संख्या तथा k-NN में प्रयुक्त k-मान को वर्गीकरण त्रुटि को न्यूनतम करने हेतु अनुकूलित (optimized) किया गया

2.6. बहुवैरीय विश्लेषण

बहुवैरीय विश्लेषण चावल के वृद्धिकरण के दौरान होने वाले भौतिक-रासायनिक परिवर्तनों की भविष्यवाणी हेतु विकसित किया गया, जिसमें 943–1653 nm तरंगदैर्ध्य सीमा से प्राप्त स्पेक्ट्रल डेटा का उपयोग किया गया। मॉडल विकास के लिए Multiple Linear Regression (MLR) और Partial Least Squares Regression (PLSR) तकनीकों का उपयोग किया गया। PLSR, जो प्रिंसिपल कंपोनेंट विश्लेषण और प्रतिगमन विश्लेषण का संयोजन है, स्पेक्ट्रल बैंड ओवरलैप तथा सह-रैखिकता (collinearity) की समस्या को हल करने हेतु प्रयुक्त किया गया। यह विधि ऐसे लेटेंट वेरिएबल्स (LVs) की पहचान करती है जो अधिकतम विचरण को स्पष्ट करते हुए प्रतिक्रिया चर (responses) का मॉडलिंग करते हैं (Zifarelli et al., 2020)। MLR का उपयोग स्पेक्ट्रल डेटा और नमूना गुणों के मध्य रैखिक संबंध स्थापित करने के लिए किया गया, जिसमें गुणांक (coefficients) का अनुमान न्यूनतम वर्ग पद्धति (least-squares approach) द्वारा किया गया (Zhu et al., 2017)। मॉडल प्रदर्शन का मूल्यांकन कैलिब्रेशन के लिए निर्धारण गुणांक (R^2c), क्रॉस-वैलिडेशन (R^2Cv) और प्रेडिक्शन (R^2p) तथा उनके संबंधित रूट मीन स्क्वायर एरर—RMSEc, RMSECv और RMSEP—का उपयोग करके किया गया। R^2c तथा R^2p वास्तविक और पूर्वानुमानित मानों के बीच संबंध को मापते हैं, जबकि RMSEC और RMSEP क्रमशः कैलिब्रेशन एवं प्रेडिक्शन की सटीकता का मूल्यांकन करते हैं। मॉडल विकास हेतु 70% डेटा कैलिब्रेशन और 30% डेटा वैलिडेशन के लिए विभाजित किया गया। अंतिम मॉडल का चयन अधिकतम R^2 तथा न्यूनतम RMSE के आधार पर किया गया।

3. परिणाम एवं चर्चा

3.1. भूरे चावल की भौतिक-रासायनिक संरचना पर वृद्धिकरण का प्रभाव

ताज़ा तथा दो वर्ष तक संग्रहीत पुसा बासमती चावल की भौतिक-रासायनिक संरचना के प्रमुख मानकों—जैसे ऐमिलोज़ सामग्री, कुल स्टार्च, FFA तथा PV-में महत्वपूर्ण अंतर ($p < 0.05$) दर्ज किए गए

(तालिका 1)। भंडारण अवधि के दौरान स्टार्च अपघटन स्पष्ट रूप से दिखाई दिया। वर्ष 2023 के ताज़ा चावल में कुल स्टार्च सामग्री 71.86% थी, जो दो वर्ष पुराने चावल में घटकर 69.82% हो गई, जबकि ऐमिलोज़ सामग्री ताज़ा चावल (23.41%) की तुलना में वृद्ध चावल में अधिक (25.72%) पाई गई।

इन परिवर्तनों का मुख्य कारण आंतर्जात एंजाइमों की हाइड्रोलिटिक गतिविधि है, जिसके परिणामस्वरूप स्टार्च तथा नॉन-स्टार्च पॉलीसैकराइड्स के छोटे अणु-घटकों में विघटन होता है। साथ ही, ऐमिलोपेक्टिन स्तर में कमी ने ऐमिलोज़ सामग्री में देखी गई वृद्धि में योगदान दिया, जो वांग, एच., और अन्य (Wang et al., 2022) के निष्कर्षों के अनुरूप है। इसके विपरीत, पूर्व अध्ययनों के अनुरूप नमी, प्रोटीन तथा वसा सामग्री में भंडारण अवधि के दौरान कोई महत्वपूर्ण परिवर्तन नहीं देखा गया (Naveed et al., 2022; Miao et al., 2021)। लिपिड अपघटन के संकेतक जैसे FFA तथा PV में उल्लेखनीय वृद्धि ($p < 0.05$) दर्ज की गई। FFA का मान 8.45 से बढ़कर 17.95 mg/100 g तक पहुँच गया, जबकि पेरॉक्साइड मान 1.62 से बढ़कर 18.24 हो गया, जो ऑक्सीकरणीय क्षरण का संकेत देता है। यह वृद्धि मुख्यतः लिपिड हाइड्रोलिसिस और ऑक्सीकरण के कारण होती है, जहाँ भूसा परत (bran layer) में उपस्थित लाइपेस एंजाइम ट्राइग्लिसराइड्स को मुक्त वसीय अम्लों में तोड़ते हैं, जिससे बासीपन (rancidity) तथा गुणवत्ता ह्रास में तेजी आती है (Chidanand et al., 2016; Song et al., 2023)। इन निष्कर्षों से यह पुष्टि होती है कि कुल स्टार्च, ऐमिलोज़ सामग्री, PV तथा FFA चावल के वृद्धिकरण के प्रमुख संकेतक हैं। वर्तमान अध्ययन का मुख्य उद्देश्य इन आयु-संकेतक मानकों के आधार पर चावल की उम्र का सटीक आकलन करने हेतु गैर-विनाशी (non-destructive) भविष्यवाणी मॉडल विकसित करना है।

तालिका 1: विभिन्न वर्षों के चावल के नमूनों की भौतिक-रासायनिक संरचना

गुणधर्म (Property)	वर्ष		
	2021	2022	2023
नमी की मात्रा (%)	12.20^{a}	12.10^{a}	12.00^{a}
वसा की मात्रा (%)	2.40^{a}	2.11^{b}	2.09^{b}
ऐमिलोज़ सामग्री (%)	23.41^{c}	24.85^{b}	25.72^{a}
कुल स्टार्च (%)	71.86^{a}	70.12^{b}	69.82^{c}
पेरॉक्साइड मान (PV, meq/kg)	1.62^{c}	12.29^{b}	18.24^{a}
मुक्त वसीय अम्ल (FFA, mg KOH/100 g)	8.45^{c}	14.35^{b}	17.95^{a}
प्रोटीन (%)	8.94^{a}	8.68^{b}	8.72^{b}

समान सुपरस्क्रिप्ट अक्षर यह दर्शाते हैं कि स्तंभों के बीच अंतर सांख्यिकीय रूप से महत्वपूर्ण नहीं है ($p > 0.05$)।

3.2. वर्गीकरण मॉडल

ताजा और संग्रहित चावल के वर्गीकरण के लिए विभिन्न स्पेक्ट्रल प्री-प्रोसेसिंग विधियों का उपयोग करते हुए PLS-DA और K-NN मॉडल विकसित किए गए। PLS-DA और K-NN मॉडल के लिए latent

variables (LVs) और k-value न्यूनतम त्रुटि दर के आधार पर चुने गए। मॉडल के प्रदर्शन का मूल्यांकन संवेदनशीलता, विशिष्टता , सटीकता, और शुद्धता जैसे संकेतकों द्वारा किया गया (तालिका 2)। कई स्पेक्ट्रल प्री-प्रोसेसिंग विधियों, जैसे smoothing, SG-D1, और SG-D2, का मूल्यांकन किया गया। सभी विधियों ने कच्चे डेटा की तुलना में स्थिरता और भविष्यवाणी की सटीकता में सुधार किया। इनमें से, SG-D1 प्रीट्रीटमेंट विधि ने दोनों मॉडलों में सबसे अधिक सटीकता प्रदान की।

PLS-DA और K-NN मॉडलों की संवेदनशीलता, विशिष्टता, शुद्धता और सटीकता ने विभिन्न आयु वर्ग के चावल के नमूनों के वर्गीकरण में उत्कृष्ट प्रदर्शन प्रदर्शित किया (तालिका 2)। K-NN मॉडल ने प्रशिक्षण सेट पर 94% और परीक्षण सेट पर 95% सटीकता प्राप्त की, जबकि PLS-DA मॉडल ने दोनों प्रशिक्षण और परीक्षण डेटा सेट पर 99% सटीकता प्राप्त की। ये परिणाम ताजा और संग्रहित चावल के बीच महत्वपूर्ण स्पेक्ट्रल भिन्नताओं को दर्शाते हैं।यह निष्कर्ष पुष्टि करता है कि PLS-DA मॉडल वर्गीकरण के लिए श्रेष्ठ भविष्यवाणी प्रदान करता है। यह Jindagul et al. (2023) के निष्कर्षों के अनुरूप है, जिसमें बताया गया है कि PLS-DA ने पॉलिश किए गए चावल की उम्र को प्रभावी ढंग से निर्धारित किया और खराब नमूनों का वर्गीकरण किया, जिसके पूर्वानुमान की सटीकता क्रमशः 98 और 100% थी। इसी प्रकार, सॉन्ग और अन्य (Song et al., 2023) ने SVM विधि का उपयोग करके चावल की उम्र में मिलावट के लिए उच्च वर्गीकरण सटीकता प्रदर्शित की, दक्षिणी जापोनिका और लेट जापोनिका चावल में क्रमशः 98% और 96% सटीकता प्राप्त की। ये अध्ययन चावल की उम्र और गुणवत्ता के सटीक वर्गीकरण के लिए केमॉमेट्रिक तकनीकों की मजबूती की पुष्टि करते हैं।

तालिका 2: ताजा और संग्रहित चावल के लिए SG-D1 स्पेक्ट्रल डेटा का उपयोग करते हुए PLS-DA और K-NN मॉडल के वर्गीकरण परिणाम (ताजा, 2023 में काटा गया; एक वर्ष, 2022 में काटा गया; दो वर्ष, 2021 में काटा गया।)

वर्गीकरण विधि	नमूना	प्रशिक्षण सेट				परीक्षण सेट			
		विशिष्टता	संवेदन शीलता	सटीकता	संपूर्ण शुद्धता	विशिष्टता	संवेदन शीलता	सटीकता	संपूर्ण शुद्धता
PLSDA Lv-9	ताजा चावल	0.99	0.98	0.99	0.99	0.99	0.98	0.97	0.99
	एक वर्ष पुराना चावल	1.00	1.00	1.00		1.00	1.00	1.00	
	दो वर्ष पुराना चावल	0.99	0.98	0.99		0.99	0.98	0.99	

KNN K-6	ताजा चावल	0.96	0.95	0.96	0.94	0.96	0.95	0.96	0.95
	एक वर्ष पुराना चावल	0.95	0.96	0.97		0.95	0.94	0.97	
	दो वर्ष पुराना चावल	0.96	0.94	0.95		0.96	0.94	0.95	

3.3. भविष्यवाणी मॉडल का विकास

इस अध्ययन में चावल के मुख्य भौतिक–रासायनिक गुणों जैसे कि कुल स्टार्च, एमीलेस सामग्री, मुक्त वसा अम्ल (FFA), और पेरॉक्साइड मान (PV) की भविष्यवाणी के लिए PLSR और MLR मॉडल का उपयोग किया गया, जिसमें HSI डेटा का उपयोग 943–1653 nm सीमा में किया गया (तालिका 3)। मॉडल की सटीकता और मजबूती बढ़ाने के लिए विभिन्न स्पेक्ट्रल प्री-प्रोसेसिंग विधियों का परीक्षण किया गया। Savitzky–Golay प्रथम व्युत्क्रम (SG-D1) PLSR के लिए सर्वोत्तम प्रदर्शन दिखाया, जबकि MLR ने कच्चे स्पेक्ट्रा के साथ सर्वोत्तम प्रदर्शन किया। दोनों मॉडलों ने मजबूत भविष्यवाणी प्रदर्शन प्रदर्शित किया, जिसमें सभी पैरामीटरों के लिए R^2 मान 0.80 से अधिक थे, जो उनकी विश्वसनीयता की पुष्टि करते हैं। SG-D1 के साथ PLSR ने उच्च R^2p मान प्राप्त किए: कुल स्टार्च के लिए 0.8024, एमीलेस के लिए 0.8195, FFA के लिए 0.8051, और PV के लिए 0.8053, जबकि संबंधित RMSEP मान क्रमशः 0.4027, 0.4160, 1.7600 और 3.0870 थे। तुलनात्मक रूप से, कच्चे स्पेक्ट्रल डेटा के साथ MLR ने और भी बेहतर भविष्यवाणी प्रदर्शन दिखाया, जिसमें कुल स्टार्च के लिए R^2p 0.8053, एमीलेस के लिए 0.8206, FFA के लिए 0.8206 और PV के लिए 0.8210 प्राप्त हुए, और PLSR की तुलना में RMSEp मान कम थे। दोनों मॉडलों के लिए कैलिब्रेशन और परीक्षण परिणाम अच्छी तरह मेल खाते थे, जो उनकी मजबूती को पुष्ट करते हैं। ये निष्कर्ष Kiran et al., 2023 के अध्ययन के अनुरूप हैं, जिन्होंने भी चावल के भौतिक–रासायनिक गुणों की भविष्यवाणी में MLR की उच्च सटीकता की रिपोर्ट की थी। कुल मिलाकर, यह अध्ययन MLR मॉडल को चावल की उम्र बढ़ने के संकेतकों का गैर-विनाशकारी मूल्यांकन करने के लिए उच्च भविष्यवाणी सटीकता वाला एक प्रभावी दृष्टिकोण के रूप में उजागर करता है।

तालिका 3. PLSR (SG-D1 प्री-प्रोसेस्ड स्पेक्ट्रा) और MLR (मूल स्पेक्ट्रा) का उपयोग करके चावल के भौतिक–रासायनिक गुणों की भविष्यवाणी।

PLSR मॉडल	सुसज्जन		पार-परीक्षण		पूर्वानुमान	
	R^2_c	$RMSE_c$	R^2_{cv}	$RMSE_{cv}$	R^2_p	$RMSE_p$
कुल स्टार्च	0.8134	0.3930	0.8103	0.3950	0.8024	0.4027
एमाइलेस सामग्री	0.8235	0.4056	0.8205	0.4100	0.8195	0.4160

पेरोक्साइड मूल्य (PV)	0.8193	2.9620	0.8165	2.9848	0.8053	3.0870
फ्री फैटी एसिड (FFA)	0.8166	1.7000	0.8138	1.7130	0.8051	1.7600
MLR मॉडल						
कुल स्टार्च	0.8250	0.3801	0.8190	0.3965	0.8053	0.4027
एमाइलेस सामग्री	0.8267	0.4020	0.8258	0.4087	0.8206	0.4107
पेरोक्साइड मूल्य (PV)	0.8292	2.8800	0.8234	2.9287	0.8210	2.9593
फ्री फैटी एसिड (FFA)	0.8263	1.6542	0.8204	1.6887	0.8206	1.6887

4.निष्कर्ष

यह अच्छी तरह स्थापित तथ्य है कि चावल के भंडारण के दौरान भौतिक और रासायनिक परिवर्तन होते हैं। इस अध्ययन में इन परिवर्तनों का विश्लेषण हाइपरस्पेक्ट्रल इमेजिंग (HSI) के माध्यम से उपयुक्त केमॉमेट्रिक तकनीकों के साथ किया गया, जिससे चावल की उम्र का त्वरित और गैर-विनाशकारी (non-destructive) पूर्वानुमान संभव हो सका। दो वर्षों तक संग्रहीत चावल की तुलना में ताजे चावल में कुल स्टार्च, एमिलोज़ (amylose), मुक्त वसा अम्ल (FFA) और पेरोक्साइड मान (PV) में महत्वपूर्ण ($p < 0.05$) परिवर्तन देखे गए, जिन्हें चावल की परिपक्वता/वृद्धि (aging) के प्रमुख संकेतक के रूप में पहचाना गया। वर्गीकरण (classification) मॉडल में, PLS-DA ने 99% पूर्वानुमान सटीकता प्राप्त की, जो K-NN (94%) से अधिक थी। पूर्ण-स्पेक्ट्रम मॉडल (full-spectrum models) जैसे PLSR और MLR ने चावल की परिपक्वता के प्रमुख संकेतकों की प्रभावी भविष्यवाणी की ($R^2 > 0.8$), जिसमें MLR ने PLSR की तुलना में बेहतर प्रदर्शन किया, और क्रमशः R^2p मान 0.8053 (स्टार्च), 0.8206 (एमिलोज़), 0.8206 (FFA), और 0.8201 (PV) तथा RMSEP मान 0.4027, 0.4107, 1.6887 और 2.9593 प्राप्त किए। कुल मिलाकर, यह अध्ययन दर्शाता है कि HSI के साथ उपयुक्त केमॉमेट्रिक तकनीकों का संयोजन चावल की उम्र का मूल्यांकन करने के लिए त्वरित, विश्वसनीय और गैर-विनाशकारी उपकरण प्रदान करता है, विशेष रूप से प्रमुख संकेतकों जैसे स्टार्च, एमिलोज़, FFA और PV के संदर्भ में। यह दृष्टिकोण पारंपरिक विश्लेषणात्मक विधियों का व्यवहारिक विकल्प प्रस्तुत करता है, जिससे भौतिक-रासायनिक परिवर्तनों की प्रभावी निगरानी और चावल की उम्र का त्वरित अनुमान संभव होता है, जो इसके उचित मात्रात्मक उपयोग और भंडारण प्रबंधन रणनीतियों के अनुकूलन में सहायक हो सकता है।

संदर्भ

AOAC. (2005). Official methods of analysis of the Association of Analytical Chemists International. Gaithersburg, MD: AOAC.

Chakraborty, S. K., Mahanti, N. K., Mansuri, S. M., Tripathi, M. K., Kotwaliwale, N., & Jayas, D. S. (2021). Non-destructive classification and prediction of aflatoxin-B1 concentration in maize kernels using Vis–NIR (400–1000 nm) hyperspectral imaging. Journal of Food Science and Technology, 58(2), 437–450. https://doi.org/10.1007/s13197-020-04552-w

Chavan, S. D. (2023). Trade Directions of Indian Basmati Rice Export- Markov Chain Approach. Economic Affairs, 68(1). https://doi.org/10.46852/0424-2513.1.2023.23.

Chidanand, D., Srinivasan, K., Shanmugasundaram, S., & Alice, R. S. J. (2016). Chemical changes of paddy during metal silo storage. Asian j pharm clin res, 9(1), 121-125

Choi, S., Jun, H., Bang, J., Chung, S., Kim, Y., Kim, B., Kim, H., Beuchat, L. R., & Ryu, J. (2015). Behaviour of Aspergillus flavus and Fusarium graminearum on rice as affected by degree of milling, temperature, and relative humidity during storage. Food Microbiology, 46, 307–313. https://doi.org/10.1016/j.fm.2014.08.019

Hodge, J.E. and Hofreiter, B.T. (1962). In: Methods in Carbohydrate Chemistry, (Eds. Whistler, R.L. and Be Miller, J.N.), Academic Press, New York.

Jindagul, N., Bantadjan, Y., & Chamchong, M. (2023). Use of hyperspectral chemical imaging to determine the age of milled rice post harvest. Journal of Near Infrared Spectroscopy, 31(3), 150–157. https://doi.org/10.1177/09670335231170332

Kaur, N. J., & Chand, N. T. (2011). Effect of natural ageing of basmati paddy on physico-chemicaland textural properties of cooked rice. Journal of Agricultural Engineering (India), 48(2), 1–7. https://doi.org/10.52151/jae2011482.1434.

Khoomtong, A., & Noomhorm, A. (2015). Development of a simple portable Amylose content meter for rapid determination of amylose content in milled rice. Food and Bioprocess Technology, 8(9), 1938–1946. https://doi.org/10.1007/s11947-015-1550-8

Kiran, P. R., Kar, A., Sahoo, R. N., & T, N. A., V. (2023). Robust NIRS Models for Non-Destructive Prediction of Physicochemical Properties and ageing of Basmati Rice. International Journal of Environment and Climate Change, 13(10), 4394–4405. https://doi.org/10.9734/ijecc/2023/v13i103116.

Kong, W., Zhang, C., Liu, F., Nie, P., & He, Y. (2013). Rice seed cultivar identification using Near-Infrared Hyperspectral Imaging and multivariate data analysis. Sensors, 13(7), 8916–8927. https://doi.org/10.3390/s130708916.

Miao, X., Miao, Y., Tao, S., Liu, D., Chen, Z., Wang, J., Huang, W., & Yu, Y. (2021). Classification of rice based on storage time by using near infrared spectroscopy and chemometric methods. Microchemical Journal, 171, 106841. https://doi.org/10.1016/j.microc.2021.106841.

Naveed, A., Zubair, M., Baig, A., Farid, M., Ahmed, W., Rehman, R., Ayub, M. A., Hassoun, A., & Cropotova, J. (2022). Effect of storage on the nutritional and antioxidant properties of brown Basmati rice. Food Science & Nutrition, 11(5), 2086-2098. https://doi.org/10.1002/fsn3.2962

Sai Krishna, A., Dutta, S., Subramanian, V., Moses, J., & Ananthanarayanakrishnan, C. (2018). Ageing of rice: A review. Journal of Cereal Science, 81, 161–170. https://doi.org/10.1016/j.jcs.2018.04.009

Song, Y., Cao, S., Chu, X., Zhou, Y., Xu, Y., Sun, T., Zhou, G., & Liu, X. (2023). Non-destructive detection of moisture and fatty acid content in rice using hyperspectral imaging and

chemometrics. Journal of Food Composition and Analysis, 121, 105397. https://doi.org/10.1016/j.jfca.2023.105397.

Thakare, S. S., Awana, M., Warwate, S. I., Mandal, S., Rudra, S. G., Bollinedi, H., Ray, M., Solanke, A. U., Nair, L. S., Kumar, S., Krishnan, V., & Singh, A. (2023). Dynamics of physico-chemical properties towards understanding the optimum ageing of basmati and non-basmati rice (Oryza sativa L.) for consumer preferences. Journal of Cereal Science, 112, 103714. https://doi.org/10.1016/j.jcs.2023.103714.

Wang, H., Wang, Y., Wang, R., Liu, X., Zhang, Y., Zhang, H., & Chi, C. (2022). Impact of long-term storage on multi-scale structures and physicochemical properties of starch isolated from rice grains. Food Hydrocolloids, 124, 107255. https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2021.107255.

Wu, J., McClements, D. J., Chen, J., Liu, W., Luo, S., & Liu, C. (2016). Improvement in storage stability of lightly milled rice using superheated steam processing. Journal of Cereal Science, 71, 130–137. https://doi.org/10.1016/j.jcs.2016.08.006

Zheng, W., Fu, X., & Ying, Y. (2014). Spectroscopy-based food classification with extreme learning machine. Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems, 139, 42–47. https://doi.org/10.1016/j.chemolab.2014.09.015

Zhu, H., Chu, B., Fan, Y., Tao, X., Yin, W., & He, Y. (2017). Hyperspectral imaging for predicting the internal quality of kiwifruits based on variable selection algorithms and chemometric models. Scientific Reports, 7(1). https://doi.org/10.1038/s41598-017-08509-6

Zifarelli, A., Giglio, M., Menduni, G., Sampaolo, A., Patimisco, P., Passaro, V. M. N., Wu, H., Dong, L., & Spagnolo, V. (2020). Partial Least-Squares regression as a tool to retrieve gas concentrations in mixtures detected using Quartz-Enhanced photoacoustic spectroscopy. Analytical Chemistry, 92(16), 11035–11043. https://doi.org/10.1021/acs.analchem.0c00075.

रमन स्पेक्ट्रोस्कोपी द्वारा खाद्य गुणवत्ता नियंत्रण और मिलावट की पहचान: एक समीक्षा

साहिल यादव*, मुकेश पटैय्या, राहुल कुमार

भाकृअनुप - केंद्रीय कृषि अभियांत्रिकी संस्थान, भोपाल, मध्य प्रदेश

*ईमेल: sy3436528@gmail.com

सारांश

खाद्य धोखाधड़ी और मिलावट आज वैश्विक स्तर पर एक गंभीर चुनौती बन चुकी है, जिसके परिणामस्वरुप न केवल भारी आर्थिक नुकसान होता है, बल्कि जनस्वास्थ्य पर भी गंभीर खतरे उत्पन्न होते हैं। इन समस्याओं से निपटने के लिए रमन स्पेक्ट्रोस्कोपी एक शक्तिशाली, गैर-विनाशकारी और त्वरित विश्लेषणात्मक तकनीक के रूप में उभर रही है। इसका मूल सिद्धांत मोनोक्रोमैटिक प्रकाश के अप्रत्यास्थ प्रकीर्णन पर आधारित है, जो किसी भी नमूने के रासायनिक बंधों की एक अद्वितीय आणविक फिंगरप्रिंट प्रदान करता है। हाल के वर्षों में रमन स्पेक्ट्रोस्कोपी की विभिन्न उन्नत तकनीकों का विकास हुआ है, जिनमें सतह-वर्धित रमन प्रकीर्णन (एस ई आर एस) तकनीक अति-संवेदनशील पहचान के लिए विशेष रूप से प्रभावी है, जबकि पोर्टेबल सिस्टम स्थल पर ही त्वरित विश्लेषण की सुविधा प्रदान करते हैं। इस तकनीक की प्रभावशीलता कई अध्ययन मामलों में सिद्ध हो चुकी है, जैसे – दूध में मेलामाइन की पहचान, हल्दी में मेटानिल येलो का पता लगाना, एक्स्ट्रा वर्जिन ऑलिव ऑयल की प्रामाणिकता की पुष्टि करना, तथा फलों पर कीटनाशक अवशेषों की जाँच करना। इन अनुप्रयोगों से रमन स्पेक्ट्रोस्कोपी के प्रमुख लाभ सामने आते हैं, जिनमें उच्च विशिष्टता, न्यूनतम नमूना तैयारी, जलीय प्रणालियों के साथ उपयुक्तता, और त्वरित परिणाम शामिल हैं। भविष्य की संभावनाओं में कृत्रिम बुद्धिमत्ता, इंटरनेट ऑफ थिंग्स (आई ओ टी)तथा अत्यंत पोर्टेबल उपकरणों के एकीकरण की दिशा में प्रयास हो रहे हैं, जो स्वचालित और वास्तविक समय में खाद्य सुरक्षा निगरानी के एक नए युग की ओर संकेत करते हैं। इस प्रकार, रमन स्पेक्ट्रोस्कोपी खाद्य आपूर्ति श्रृंखला की सुरक्षा और गुणवत्ता सुनिश्चित करने के लिए एक बहुउपयोगी एवं अपरिहार्य तकनीक के रूप में स्थापित हो रही है।

संकेत शब्द: स्पेक्ट्रोस्कोपी, खाद्य गुणवत्ता, मिलावट, कृत्रिम बुद्धिमत्ता, इंटरनेट ऑफ थिंग्स

प्रस्तावना

भोजन में मिलावट एक गंभीर वैश्विक जन-स्वास्थ्य समस्या है। भोजन का जानबूझकर या अनजाने में दूषित होना (जैसे अनधिकृत रसायन, सस्ते घटक, या कीटनाशक अवशेष मिलाना) गंभीर बीमारी का कारण बन सकता है और उपभोक्ता विश्वास को कम कर सकता है। रमन स्पेक्ट्रोस्कोपी खाद्य सुरक्षा में एक शक्तिशाली विश्लेषणात्मक उपकरण के रूप में उभरा है क्योंकि यह आणविक कंपन की जांच करके प्रत्येक पदार्थ के लिए एक अद्वितीय "फिंगरप्रिंट" स्पेक्ट्रम उत्पन्न करता है। यह कंपनशील फिंगरप्रिंट नमूने में विशिष्ट यौगिकों (मिलावट या संदूषक) की सीधी पहचान की अनुमति देता है। महत्वपूर्ण रूप से, रमन विश्लेषण गैर-

विनाशकारी है, इसके लिए न्यूनतम नमूना तैयारी की आवश्यकता होती है, और इसे पोर्टेबल उपकरणों के साथ तेजी से किया जा सकता है। Petersen et al. (2021) ने इस बात पर जोर दिया कि रमन भोजन संदूषकों की "गैर-विनाशकारी, संचालन में आसान, संवेदनशील और तीव्र" स्क्रीनिंग प्रदान करता है। इसके अलावा, क्योंकि रमन प्रकीर्णन संकीर्ण, अच्छी तरह से हल की गई वर्णक्रमीय रेखाएं उत्पन्न करता है, यह मल्टीप्लेक्स पहचान और मात्रात्मक विश्लेषण का समर्थन करता है—प्रत्येक रमन शिखर की तीव्रता सीधे उस रासायनिक प्रजाति की सांद्रता के आनुपातिक होती है। ये विशेषताएं रमन स्पेक्ट्रोस्कोपी को दूध, मसाले, तेल और उपज जैसे जटिल मैट्रिक्स में विभिन्न प्रकार के खाद्य मिलावटों (रासायनिक या जैविक) का पता लगाने के लिए उपयुक्त बनाती हैं।

रमन स्पेक्ट्रोस्कोपी: सिद्धांत और कार्यप्रणाली

रमन स्पेक्ट्रोस्कोपी आणविक बंधों द्वारा एकवर्णी प्रकाश (आमतौर पर एक लेजर से) के अलोचदार (रमन) प्रकीर्णन पर आधारित है। जब फोटॉन एक नमूने के साथ परस्पर क्रिया करते हैं, तो अधिकांश प्रत्यास्थ रूप से (रेले स्कैटरिंग) प्रकीर्णन करते हैं, लेकिन एक छोटा अंश अणुओं में कंपनशील संक्रमणों के अनुरूप ऊर्जा बदलाव से गुजरता है । ये ऊर्जा बदलाव एक रमन स्पेक्ट्रम उत्पन्न करते हैं: प्रत्येक शिखर नमूने में एक विशिष्ट आणविक बंध या कार्यात्मक समूह के अनुरूप होता है । व्यवहार में, एक लेज़र (अक्सर 532, 633, या 785 नैनोमीटर) नमूने को प्रकाशित करता है और एक स्पेक्ट्रोमीटर बदले हुए तरंग दैर्घ्य को रिकॉर्ड करता है। वाणिज्यिक रमन प्रणालियाँ बेंचटॉप उपकरणों से लेकर (माइक्रो-रमन या इमेजिंग के लिए माइक्रोस्कोप के साथ) क्षेत्र परीक्षण के लिए हैंडहेल्ड या पोर्टेबल स्पेक्ट्रोमीटर तक होती हैं।

रमन स्पेक्ट्रोस्कोपी की कई रूपरेखाएँ मौजूद हैं। पारंपरिक रमन लेबल-मुक्त है और आंतरिक कंपनों की जांच करता है। सतह-संवर्धित रमन स्पेक्ट्रोस्कोपी रमन संकेत को तक बढ़ाने के लिए धात्विक नैनोस्ट्रक्चर्ड सबस्ट्रेट्स (आमतौर पर सोने या चांदी के नैनोकण) का उपयोग करता है । Petersen et al. (2021) में चित्रा 1B दिखाता है कि SERS (लाल ट्रेस) बिना संवर्धित रमन (काली ट्रेस) के सापेक्ष एक लक्ष्य के रमन शिखर की तीव्रता को बहुत बढ़ा सकता है । अल्ट्रा-संवेदनशील संदूषकों का पता लगाने (पी पी बी या उससे कम तक) को सक्षम बनाता है, हालांकि इसके लिए प्रतिलिपि प्रस्तुत करने योग्य सबस्ट्रेट्स की तैयारी की आवश्यकता होती है। रमन माइक्रोस्कोपी एक माइक्रोस्कोप ऑब्जेक्टिव के साथ एक रमन स्पेक्ट्रोमीटर को जोड़ती है ताकि माइक्रोन रिज़ॉल्यूशन पर रासायनिक संरचना को स्थानिक रूप से मैप किया जा सके। उदाहरण के लिए, रमन इमेजिंग एक जटिल ठोस मैट्रिक्स में मिलावट कणों को स्थानीयकृत कर सकता है। कुल मिलाकर, आधुनिक रमन विधियाँ (माइक्रो-रमन, इमेजिंग) एक बहुमुखी टूलकिट प्रदान करती हैं: वे लेबल-मुक्त, अक्सर गैर-आक्रामक होती हैं, और खाद्य मिलावटों के गुणात्मक (पहचान) और मात्रात्मक (अंशांकन) दोनों विश्लेषणों में सक्षम होती हैं ।

खाद्य वस्तुओं में सामान्य मिलावट

खाद्य मिलावट वस्तु के अनुसार अलग-अलग होती है। दूध में, सामान्य मिलावटों में तनुकरण एजेंट या फिलर (पानी, स्टार्च), गैर-पोषक योजक (यूरिया, सुक्रोज, नमक), और खतरनाक रसायन (फॉर्मेलिन,

हाइड्रोजन पेरोक्साइड, डिटर्जेंट, अमोनियम सल्फेट, मेलामाइन) शामिल हैं । उदाहरण के लिए, यूरिया और अमोनियम सल्फेट को स्पष्ट प्रोटीन सामग्री को बढ़ावा देने के लिए जोड़ा जाता है, और मेलामाइन (एक नाइट्रोजन युक्त यौगिक) को प्रोटीन परीक्षणों में धोखा देने के लिए दूध पाउडर में कुख्यात रूप से जोड़ा गया था। फॉर्मेलिन(फॉर्मेल्डिहाइड), बोरिक/सैलिसिलिक एसिड, डिटर्जेंट और हाइड्रोजन पेरोक्साइड जैसे महत्वपूर्ण "स्वास्थ्य" मिलावट भी कभी-कभी दूध में पाए जाते हैं ।

मसाला मिलावट में फिलर या रंगकारक होते हैं। मिर्च पाउडर और हल्दी में, अवैध डाई या पिगमेंट आम हैं: लेड क्रोमेट, एक जहरीला पीला पिगमेंट, हल्दी में पाया गया है, और फेरिक ऑक्साइड रेड (औद्योगिक लौह ऑक्साइड पिगमेंट) रंग को बढ़ाने के लिए मिर्च में । सिंथेटिक डाई जैसे सुडान I-III या टार्ट्राज़ीन और अल्लुरा रेड का उपयोग भी अवैध रूप से मसालों में रंग बदलने के लिए किया जाता है। पौधे-आधारित फिलर (जैसे ईंट की धूल, पिसे हुए स्टार्च, पपीते के बीज) या प्रीमियम मसालों के साथ सस्ते मसालों (जैसे लाल रंग की मिर्च, मिर्च के बीज के छिलके) को मिलाना अन्य उदाहरण हैं। केसर (दुनिया का सबसे महंगा मसाला) में, केसर के पाउडर, हल्दी, या कृत्रिम रंगकारकों के साथ मिलावट ज्ञात है ।

घी (स्पष्ट मक्खन वसा) और अन्य उच्च-मूल्य वाले वसा को अक्सर सस्ते तेलों या वसा के साथ मिलाया जाता है। एक प्रमुख मिलावट वनस्पति है, जो हाइड्रोजनीकृत वनस्पति तेल (ताड़, बिनौला, सोयाबीन, आदि से) है जो घी की बनावट की नकल करता है । कभी-कभी लागत कम करने के लिए पशु वसा (चरबी, टाल्लो, बत्तख का वसा) को घी में मिलाया जाता है । खाद्य तेलों (जैतून, सरसों, सूरजमुखी, आदि) में मिलावट में सस्ते बीज के तेलों (सूरजमुखी, मक्का, सोयाबीन, बिनौला, ताड़ ओलीन) या यहां तक कि गैर-खाद्य तेलों के साथ मिश्रण शामिल है। उदाहरण के लिए, एक्स्ट्रा-वर्जिन जैतून तेल को आमतौर पर सूरजमुखी, रेपसीड (कनोला), या सोयाबीन तेलों के साथ मिलाया जाता है । सरसों के तेल में आर्जेमोन तेल या खनिज तेलों के साथ मिलावट से भी गंभीर विषाक्तता की घटनाएँ हुई हैं।

अंत में, खाद्य पदार्थों (फल, अनाज, मसाले) में या उन पर कीटनाशक अवशेष एक और रासायनिक "संदूषक" है जिसे अक्सर मापा जाता है। इन्हें लाभ के लिए जानबूझकर मिलावट के लिए नहीं जोड़ा जाता है, लेकिन उनकी पहचान खाद्य सुरक्षा के लिए आवश्यक है। सामान्य कीटनाशक वर्गों में ऑर्गनोफॉस्फेट्स (जैसे डाइमेथोएट) और पायरेथ्रोइड्स (जैसे साइपरमेथ्रिन) शामिल हैं, जो उपज की सतहों पर पाए जा सकते हैं।

2. सामग्री एवं विधि: रमन स्पेक्ट्रोस्कोपी के अनुप्रयोग

2.1 दूध

दूध में मिलावट (जैसे अतिरिक्त पानी, चीनी, यूरिया, मेलामाइन, डिटर्जेंट के साथ) के महत्वपूर्ण स्वास्थ्य परिणाम होते हैं। रमन स्पेक्ट्रोस्कोपी दूध में ऐसे छोटे-अणु मिलावटों की स्क्रीनिंग के लिए प्रभावी साबित हुई है । Nieuwoudt et al. (2016) ने प्रदर्शित किया कि पारंपरिक रमन (एस ई आर एस के बिना) तरल दूध में नाइट्रोजन युक्त मिलावटों (मेलामाइन, यूरिया, अमोनियम सल्फेट, डाइसाइनडाइमाइड) और यहां तक कि सुक्रोज का भी उच्च संवेदनशीलता के साथ पता लगा सकता है । रमन स्पेक्ट्रा पर केमोमेट्रिक पी एल एस रिग्रेशन का उपयोग करते हुए, उन्होंने उत्कृष्ट स्क्रीनिंग दक्षता के साथ मेलामाइन और अन्य -समृद्ध यौगिकों

के लिए और सुक्रोज के लिए की पता लगाने की सीमा प्राप्त की । उनके परिणामों ने इन स्तरों पर स्क्रीनिंग सटीकता दिखाई। अन्य अध्ययनों ने भी दूध पाउडर में मेलामाइन, और तरल दूध में यूरिया या सुक्रोज मिलावट की पहचान के लिए रमन का उपयोग किया है, जो अक्सर बहुभिन्नरूपी विश्लेषण के साथ युग्मित होने पर कम पी पी एम पता लगाने को प्राप्त करता है। व्यवहार में, मिलावटों के विशिष्ट रमन बैंड (जैसे मेलामाइन रिंग, यूरिया कंपन, चीनी शिखर) को जटिल दूध मैट्रिक्स में भी पहचाना जा सकता है। उदाहरण के लिए, मेलामाइन का के पास तेज रिंग-श्वास बैंड मिलावटी दूध के एस ई आर एस स्पेक्ट्रम में स्पष्ट रूप से दिखाई देता है। इस प्रकार, रमन संदिग्ध दूध के लिए एक तीव्र "स्क्रीन" प्रदान करता है: कोई भी असामान्य शिखर या तीव्रता विचलन मिलावट का सुझाव देता है, जिसे बाद में अंशांकन वक्र या बहुभिन्नरूपी मॉडल द्वारा मात्रा निर्धारित किया जा सकता है। SERS द्वारा संवेदनशीलता को बढ़ाया जा सकता है (उप-ppm मेलामाइन का पता लगाने के लिए), हालांकि Nieuwoudt et al. (2016) ने SERS के बिना उप- पता लगाने को प्राप्त किया।

2.2 मसाले

मसाले आर्थिक धोखाधड़ी (उनकी लागत और पाउडर के रूप के कारण) के लिए उच्च जोखिम वाले होते हैं और इनमें अक्सर जहरीले मिलावट होते हैं। रमन स्पेक्ट्रोस्कोपी को कई मसालों पर लागू किया गया है:

1.1.1 हल्दी

मिलावटों में लेड क्रोमेट और मेटानिल येलो शामिल हैं। Erasmus et al. (2021) ने हल्दी पाउडर में लेड क्रोमेट का पता लगाने के लिए एफ टी रमन का उपयोग किया। उन्होंने से पर एक विशिष्ट रमन शिखर पाया, और रैखिक रूप से इसकी तीव्रता को मिलावट स्तर के साथ सहसंबंधित कर सके । हल्दी में लेड क्रोमेट के लिए उनकी पता लगाने की सीमा थी; इस स्तर से ऊपर, रमन मिलावट की स्पष्ट रूप से पहचान कर सकता था । यह काम दिखाता है कि रमन अपेक्षाकृत सरल नमूना हैंडलिंग के साथ हल्दी को खतरनाक पीले रंगों के लिए स्क्रीन कर सकता है।

1.1.2 मिर्च पाउडर

गहरे लाल मिर्च को कभी-कभी फेरिक ऑक्साइड (सिंथेटिक लाल लौह ऑक्साइड पिगमेंट) या सुडान डाई के साथ मिलाया जाता है। एक हालिया अध्ययन (Wetzel, 2025) ने 5-20% पर मिलावटी मिर्च पाउडर में फेरिक ऑक्साइड का पता लगाने के लिए रमन (एफ टी आई आर और यूवी विज़ के साथ) का उपयोग किया । का रमन स्पेक्ट्रम विशिष्ट बैंड (उदाहरण के लिए, के आसपास एक मजबूत स्ट्रेच) प्रदर्शित करता है, जो मिर्च के कार्बनिक स्पेक्ट्रम से अलग होते हैं। केमोमेट्रिक मॉडल के साथ रमन को मिलाकर, अध्ययन ने शुद्ध और मिलावटी मिर्च के बीच स्पष्ट भेदभाव प्राप्त किया। वास्तव में, रमन के साथ बहु-तकनीक दृष्टिकोण, अद्वितीय वर्णक्रमीय मार्कर प्रदान करते हुए, मिर्च में का तीव्र, गैर-विनाशकारी पता लगाने में सक्षम हुआ । रमन का उपयोग मसाला पाउडर में सिंथेटिक रंगों का पता लगाने के लिए भी किया गया है; उदाहरण के लिए, सुडान के तीव्र रमन बैंड मिलावटी मिर्च में इसकी उपस्थिति को प्रकट कर सकते हैं।

1.2 केसर

एक महंगे मसाले के रूप में, केसर को अक्सर सस्ते पीले/नारंगी पाउडर (केसर, हल्दी) या डाई के साथ काटा जाता है। Dai et al. (2022) ने केसर मिलावट को स्क्रीन करने के लिए पतली-परत क्रोमैटोग्राफी को रमन के साथ जोड़ा । इस विधि में, केसर और संदिग्ध मिलावटों के जलीय अर्क को एक टी एल सी प्लेट पर अलग किया गया, फिर प्रत्येक स्थान का रमन द्वारा विश्लेषण किया गया। शुद्ध केसर ने क्रोसिन (इसका कैरोटीनॉयड पिगमेंट) के लिए एक मजबूत रमन संकेत दिया, जबकि सामान्य मिलावटों ने अलग-अलग स्पेक्ट्रा दिए। दाई एट अल. ने सबसे कम मिलावट स्तरों की मात्रा निर्धारित की जिसका वे पता लगा सकते थे: अल्लुरा रेड डाई, टार्ट्राज़ीन, केसर, और हल्दी । अल्लुरा रेड और टार्ट्राज़ीन के रमन फिंगरप्रिंट ने कुछ प्रतिशत स्तर पर पता लगाने की अनुमति दी। इस प्रकार, रमन (यहां तक कि एक TLC-युग्मित प्रोटोकॉल में) केसर में मिलावटी रंगों या पौधे के पाउडर की पहचान कर सकता है। ये उदाहरण बताते हैं कि रमन प्रत्येक मिलावट के लिए एक विशिष्ट फिंगरप्रिंट प्रदान करता है: कोई अक्सर अद्वितीय शिखर (उदाहरण के लिए, भारी-धातु पिगमेंट, डाई अणु) देख सकता है जो शुद्ध मसाले में अनुपस्थित हैं।

2.4 घी (स्पष्ट मक्खन)

प्रामाणिक घी (दूध-वसा स्पष्ट मक्खन) को वनस्पति तेलों (वनस्पति / हाइड्रोजनीकृत तेलों) या पशु वसा के साथ मिलाया जा सकता है। ये मिलावट वसा-एसिड प्रोफाइल को बदलते हैं और डबल बॉन्ड या अलग संतृप्ति पेश करते हैं, जो रमन स्पेक्ट्रा में दिखाई देते हैं। उदाहरण के लिए, एक हालिया रमन अध्ययन से पता चला है कि शुद्ध दूध-वसा घी में और पर प्रमुख शिखर होते हैं (वसा एसिड में पूरी तरह से संतृप्त बंधों के लिए जिम्मेदार)। इसके विपरीत, वनस्पति तेल (ताड़, सोयाबीन) के साथ मिलावटी घी ने के पास और के आसपास प्रमुख शिखर प्रदर्शित किए, जो पौधे के तेलों के विशिष्ट डबल बॉन्ड और बेंडिंग मोड से मेल खाते हैं । Patil et al. (2024) के संदर्भित पोस्टर में, एक हैंडहेल्ड रमन प्रणाली का उपयोग शुद्ध घी को वनस्पति तेल के साथ स्पाइक किए गए नमूनों से अलग करने के लिए किया गया था। वर्णक्रमीय अंतर ने मिलावट की मात्रा निर्धारित करने के लिए एक मजबूत पी एल एस अंशांकन को सक्षम किया । इसके अलावा, अध्ययन में पाया गया कि पशु वसा मिलावट (जैसे बत्तख का वसा) अपने स्वयं के वर्णक्रमीय हस्ताक्षर पेश करते हैं, जो दर्शाता है कि रमन घी में मिश्रित चरबी या टाल्लो का पता लगा सकता है । व्यवहार में, इसका मतलब है कि घी के रमन स्पेक्ट्रम को "तेल-जैसे" बैंड के लिए निरीक्षण किया जा सकता है। यदि शिखर ज्ञात वनस्पति तेलों से मेल खाते हैं (उदाहरण के लिए, पर एक स्ट्रेच जो शुद्ध घी में कमजोर होता है), तो यह मिलावट का संकेत देता है। इस प्रकार रमन घी के लिए एक तीव्र प्रामाणिकता जांच प्रदान करता है; शास्त्रीय गीले-रासायनिक परीक्षणों के विपरीत, इसके लिए किसी अभिकर्मक की आवश्यकता नहीं होती है और इसे ऑनसाइट किया जा सकता है।

2.5 खाद्य तेल

खाद्य तेलों (जैतून, सरसों, सूरजमुखी, आदि) को अक्सर सस्ते तेलों के साथ मिलाकर मिलाया जाता है। रमन स्पेक्ट्रोस्कोपी को तेलों को प्रमाणित करने के लिए व्यापक रूप से लागू किया गया है। एक्स्ट्रा-

वर्जिन जैतून तेल में, उदाहरण के लिए, सूरजमुखी, मक्का, सोयाबीन, रेपसीड (कनोला), केसर या तिल के तेल के साथ मिलावट आम है। इन तेलों के रमन स्पेक्ट्रा असंतृप्ति और वसा-एसिड श्रृंखलाओं में भिन्नताओं के कारण शिखर स्थितियों और तीव्रताओं में भिन्न होते हैं। Malavi et al. (2023) ने कई स्पेक्ट्रोस्कोपी की तुलना की और उल्लेख किया कि रमन का सफलतापूर्वक उपयोग आम जैतून तेल मिलावटों जैसे रेपसीड, मक्का, सोयाबीन और सूरजमुखी तेलों का पता लगाने के लिए किया गया है । आमतौर पर, शुद्ध जैतून तेल में अपेक्षाकृत उच्च मोनोअनसैचुरेटेड (ओलिक) सामग्री होती है (एक मजबूत स्ट्रेच और के पास एक बेंड के साथ), जबकि एक सूरजमुखी या सोयाबीन तेल मजबूत पॉलीअनसैचुरेटेड हस्ताक्षर (उदाहरण के लिए, के आसपास अधिक तीव्र बैंड) दिखा सकता है। पूर्ण रमन फिंगरप्रिंट पर बहुभिन्नरूपी मॉडल का उपयोग करके, शोधकर्ताओं ने शुद्ध बनाम मिलावटी जैतून तेल को अलग करने में वर्गीकरण सटीकता की सूचना दी है ।

इसी तरह, पोर्टेबल रमन स्पेक्ट्रोमीटर का उपयोग तिल के तेल को अन्य बीज के तेलों के साथ तनुकरण के लिए स्क्रीन करने के लिए किया गया है। उदाहरण के लिए, एक अध्ययन(एक सार के माध्यम से) में पाया गया कि रमन स्पेक्ट्रोस्कोपी तिल के तेल में कई मिलावटों का प्रभावी ढंग से पता लगा सकता है, जिससे यह ऑन-साइट परीक्षणों के लिए उपयुक्त हो जाता है । सामान्य दृष्टिकोण शुद्ध बनाम ज्ञात मिलावटी तेलों की एक वर्णक्रमीय लाइब्रेरी बनाना और पैटर्न-पहचान लागू करना है। संक्षेप में, रमन स्पेक्ट्रोस्कोपी तेलों के मिश्रण के कारण होने वाले सूक्ष्म वर्णक्रमीय परिवर्तनों को प्रकट कर सकता है, जिससे खाद्य तेलों में मिलावट का पता लगाने और मात्रा दोनों को सक्षम किया जा सकता है।

2.6 कीटनाशक अवशेष

खाद्य पदार्थों (उपज, अनाज, प्रसंस्कृत वस्तुओं) में कीटनाशक अवशेषों का पता लगाना खाद्य सुरक्षा के लिए महत्वपूर्ण है, और रमन(विशेष रूप से एस ई आर एस) ने एक भूमिका निभानी शुरू कर दी है। कीटनाशक अक्सर छोटे कार्बनिक अणु होते हैं जो विशिष्ट रमन बैंड उत्पन्न करते हैं। उदाहरण के लिए, डाइमेथोएट जैसे ऑर्गनोफॉस्फेट्स और साइपरमेथ्रिन जैसे पायरेथ्रोइड्स में अद्वितीय कंपन शिखर होते हैं। हालांकि, उनके अवशेष स्तर आमतौर पर बहुत कम होते हैं, इसलिए सीधे रमन में संवेदनशीलता की कमी हो सकती है। यहां (एस ई आर एस) आवश्यक है। Wang et al. (2024) द्वारा हालिया काम में फलों के ऊतकों में कीटनाशकों को मैप करने के लिए विशेष नैनोकणों के साथ एस ई आर एस इमेजिंग का उपयोग किया गया था। उन्होंने डाइमेथोएट और साइपरमेथ्रिन के लिए से नीचे पता लगाने की सीमा प्राप्त की —पारंपरिक परख की तुलना में परिमाण के आदेश बेहतर। इस दृष्टिकोण ने यह देखने की अनुमति दी कि कीटनाशक एक सेब की सतह से आंतरिक भाग तक कैसे प्रवेश करते हैं, रमन की "संपूर्ण-प्रक्रिया" निगरानी की क्षमता का प्रदर्शन करते हुए।

सरल अनुप्रयोगों में, एस ई आर एस डिप्स या टेस्ट स्ट्रिप्स का उपयोग फलों की खाल पर कीटनाशक बूंदों का पता लगाने के लिए किया गया है। रमन में गोल्ड-स्टैंडर्ड सीमा (पिकोग्राम या पार्ट्स-प्रति-ट्रिलियन) इसे आशाजनक बनाती है: जैसा कि (Wetzel, 2024) ने नोट किया है, एस ई आर एस इमेजिंग ने उपज में उप-पी पी टी संवेदनशीलता प्राप्त की । एस ई आर एस सबस्ट्रेट्स या एपटामर कोटिंग्स के साथ संयुक्त पोर्टेबल

रमन तीव्र कीटनाशक स्क्रीनिंग के लिए एक सक्रिय अनुसंधान क्षेत्र है। कुल मिलाकर, हालांकि पारंपरिक "मिलावट" नहीं है (कीटनाशक आर्थिक लाभ के लिए नहीं जोड़े जाते हैं), कीटनाशक अवशेषों का पता लगाने से रमन/एस ई आर एस की आणविक संवेदनशीलता और चयनात्मकता से बहुत लाभ होता है।

3. परिणाम और चर्चा

3.1 रमन स्पेक्ट्रोस्कोपी के मिलावट परीक्षण में लाभ

रमन स्पेक्ट्रोस्कोपी खाद्य लिए कई आकर्षक लाभ प्रदान करता है। यह गैर-विनाशकारी है और आमतौर पर किसी रासायनिक अभिकर्मक या व्यापक नमूना तैयारी की आवश्यकता नहीं होती है । अधिकांश खाद्य पदार्थों (यहां तक कि मैला तरल पदार्थ या पाउडर) का सीधे विश्लेषण किया जा सकता है, और पानी एक कमजोर रमन प्रकीर्णक है इसलिए जलीय नमूनों (जैसे दूध या रस) को कम हस्तक्षेप के साथ मापा जा सकता है। रमन समृद्ध रासायनिक विशिष्टता प्रदान करता है प्रत्येक मिलावट का एक विशिष्ट फिंगरप्रिंट होता है और अक्सर मल्टीप्लेक्सिंग की अनुमति देता है, यानी एक स्कैन में कई मिलावटों या घटकों का पता लगाना। इसकी वर्णक्रमीय विशेषताएं तेज (संकीर्ण बैंडविड्थ) और मात्रा निर्धारित करने योग्य (पीक क्षेत्र सांद्रता) हैं, जो गुणात्मक पहचान और मात्रात्मक अंशांकन दोनों को सक्षम करती हैं । उदाहरण के लिए, रमन तीव्रता हल्दी में लेड क्रोमेट स्तरों के साथ रैखिक रूप से सहसंबंधित होती है(की अनुमति देता है) , और जैतून तेल मिलावट अध्ययनों में कई तेलों के साथ । रमन उपकरणों को पोर्टेबल या हैंडहेल्ड भी बनाया जा सकता है, जो बाजारों या प्रसंस्करण लाइनों में तीव्र ऑन-साइट स्क्रीनिंग की सुविधा प्रदान करता है। इन विशेषताओं ने लेखकों को खाद्य धोखाधड़ी का पता लगाने के लिए पारंपरिक तरीकों के लिए रमन को एक तीव्र, “ग्रीन" (कोई विलायक नहीं) विकल्प के रूप में उजागर करने के लिए प्रेरित किया है।

3.2 रमन स्पेक्ट्रोस्कोपी की मिलावट परीक्षण में सीमाएँ

रमन स्पेक्ट्रोस्कोपी की प्राथमिक चुनौती आंतरिक रूप से कमजोर संकेत है। केवल फोटॉनों में से लगभग 1 ही रमन प्रकीर्णन से गुजरता है । इस प्रकार रमन संकेत बेहोश हो सकते हैं, खासकर कम सांद्रता वाले मिलावटों के लिए या जब मजबूत प्रतिदीप्ति पृष्ठभूमि मौजूद होती है। खाद्य पदार्थों में प्रतिदीप्तिशील घटक (जैसे रंगीन पिगमेंट, पॉलीफेनोल) रमन संकेत को तब तक भर सकते हैं जब तक कि लंबे तरंग दैर्घ्य या पृष्ठभूमि घटाव द्वारा कम न किया जाए। कम संकेत अक्सर लंबे अधिग्रहण समय या उच्च लेजर शक्ति की मांग करता है, जो थ्रूपुट को धीमा कर सकता है या नमूना गर्म होने का जोखिम उठा सकता है। एस ई आर एस संकेतों को -गुना तक बढ़ाकर कमजोरी को दूर कर सकता है , लेकिन एस ई आर एस के लिए सावधान सबस्ट्रेट तैयारी की आवश्यकता होती है और सबस्ट्रेट्स के बीच पुनरुत्पादकता के मुद्दों से पीड़ित हो सकता है। इसके अलावा, आमतौर पर केवल धातु की सतह के बहुत पास के अणुओं का नमूना लेता है, जो थोक मिलावटों को याद कर सकता है।

एक और सीमा डेटा विश्लेषण की जटिलता है। खाद्य पदार्थों के रमन स्पेक्ट्रा अक्सर अत्यधिक अतिव्यापी मिश्रण होते हैं; एक मिलावट शिखर को अलग करने के लिए बहुभिन्नरूपी केमोमेट्रिक मॉडल और व्यापक अंशांकन की आवश्यकता हो सकती है। इसके लिए बड़े वर्णक्रमीय लाइब्रेरी और डेटा प्रसंस्करण में

विशेषज्ञता की मांग है। अंत में, हालांकि पोर्टेबल रमन इकाइयाँ मौजूद हैं, हाई-एंड उपकरण(माइक्रोस्कोप या फाइबर-ऑप्टिक प्रोब के साथ) महंगे हो सकते हैं। संक्षेप में, जबकि रमन शक्तिशाली आणविक विशिष्टता प्रदान करता है, संवर्धन के बिना इसकी संवेदनशीलता क्रोमैटोग्राफिक तरीकों की तुलना में कम है। यदि आवश्यक हो तो अधिक संवेदनशील तरीकों से पुष्टि किए गए संदिग्ध सकारात्मकों के साथ, इसे एक तीव्र स्क्रीनिंग उपकरण के रूप में सबसे अच्छा उपयोग किया जाता है।

4. निष्कर्ष

रमन स्पेक्ट्रोस्कोपी वस्तुओं की एक श्रृंखला में खाद्य मिलावट का पता लगाने के लिए एक बहुमुखी उपकरण के रूप में उभरा है। इसकी आणविक विशिष्टता, गैर-विनाशकारिता और गति इसे दूध, मसाले, वसा, तेल और यहां तक कि कीटनाशक अवशेषों की अनधिकृत पदार्थों के लिए स्क्रीनिंग के लिए उपयुक्त बनाती है। हाल के अध्ययनों ने इसकी क्षमता का प्रदर्शन किया है: उदाहरण के लिए, शोधकर्ताओं ने हल्दी में लेड क्रोमेट, मिर्च पाउडर में फेरिक ऑक्साइड (5-20% स्तर पर) , केसर में सिंथेटिक डाई या फिलर , और विशिष्ट रमन चोटियों के माध्यम से घी में मिलावटी वसा का पता लगाया है। रमन की मात्रात्मक प्रकृति भी न केवल उपस्थिति/अनुपस्थिति का पता लगाने बल्कि अंशांकन मॉडल के माध्यम से मिलावट एकाग्रता के अनुमान को भी सक्षम बनाती है।

हालांकि, सीमाएं बनी हुई हैं। अंतर्निहित कमजोर रमन प्रभाव और संभावित प्रतिदीप्ति के लिए सावधानीपूर्वक विधि विकास और अक्सर आवश्यक संवेदनशीलता प्राप्त करने के लिए संवर्द्धन (एस ई आर एस) या केमोमेट्रिक्स का उपयोग आवश्यक होता है। इसके बावजूद, क्षेत्र आगे बढ़ रहा है: पोर्टेबल रमन उपकरण और उपन्यास सबस्ट्रेट्स संवेदनशीलता और उपयोग में आसानी में सुधार कर रहे हैं। व्यवहार में, रमन स्पेक्ट्रोस्कोपी पारंपरिक रासायनिक परीक्षणों का पूरक है। यह एक तीव्र फर्स्ट-लाइन स्क्रीन के रूप में काम कर सकता है। आगे के विश्लेषण के लिए संदिग्ध नमूनों को झंडी दिखाकर इस प्रकार उपभोक्ताओं की रक्षा करने और खाद्य अखंडता सुनिश्चित करने में मदद करता है।

संदर्भ

Azad, T., & Ahmed, S. (2016). Common milk adulteration and their detection techniques. Food Contamination, 3, 22.

Dai, H., Gao, Q., & He, L. (2020). Rapid determination of saffron grade and adulteration by thin-layer chromatography coupled with Raman spectroscopy. Food Analytical Methods, 13(10), 2128–2137.

Erasmus, S. W., van Hasselt, L., Ebbinge, L. M., & van Ruth, S. M. (2021). Real or fake yellow in the vibrant colour craze: Rapid detection of lead chromate in turmeric. Food Control, 121, Article 107714.

Malavi, D., Raes, K., Van Haute, S., Alamprese, C., & Malmir, M. (2023). Hyperspectral imaging and chemometrics for authentication of extra virgin olive oil: A comparative approach with FTIR, UV–Vis, Raman, and GC–MS. Foods, 12(3), 429. https://doi.org/10.3390/foods12030429

Nieuwoudt, M. K., et al. (2016). Raman spectroscopy as an effective screening method for detecting adulteration of milk with small nitrogen-rich molecules and sucrose. Journal of Dairy Science, 99(4), 2520–2536.

Patil, A., Gill, S. S., Prasad, S., & Kumta, S. (2024). Raman spectroscopy to detect the adulteration of ghee [Conference poster]. University of Melbourne.

Petersen, M., Yu, Z., & Lu, X. (2021). Application of Raman spectroscopic methods in food safety: A review. Biosensors, 11(6), 187. https://doi.org/10.3390/bios11060187

Wetzel, W. (2024, July 8). Revolutionary SERS imaging technique enhances pesticide detection in crops. Spectroscopy Online.

Wetzel, W. (2025, August 6). Advanced spectroscopy uncovers hidden adulteration in chili powder. Spectroscopy Online.

पत्तों और कृषि कचरे से निर्मित जैव-अपघटनीय कटलरी: एक हरित समाधान

दीपिका शेंडे*[1], नीता खंडेकर[2]

[1]सहायक मुख्य तकनीकी अधिकारी, [2]प्रधान वैज्ञानिक

भा.कृ.अनु.प. –केंद्रीय कृषि अभियांत्रिकी संस्थान, भोपाल

*ईमेल: deepikashende19@gmail.com

सारांश

प्लास्टिक कचरे का बढ़ता फैलाव और उसके अपघटन में अत्यधिक समय लगना पृथ्वी के पारिस्थितिकी तंत्र के लिए गंभीर संकट उत्पन्न कर रहा है। इस संकट से निपटने के लिए हमें बायोडिग्रेडेबल (जैव-अपघटनीय) उत्पादों की ओर बढ़ने की आवश्यकता महसूस हो रही है। विशेष रूप से बायोडिग्रेडेबल कटलरी, जो पत्तों, कृषि अपशिष्ट (जैसे धान की पराली, गेहूं की भूसी, गन्ने की खोई, मकई के डंठल और अन्य कृषि उप-उत्पादों से बनाई जाती है, न केवल पर्यावरण के लिए फायदेमंद है, बल्कि यह पारंपरिक और सांस्कृतिक मूल्यों को भी पुनर्जीवित कर रही है। इन कटलरी का उपयोग विभिन्न आयोजनों जैसे शादी-ब्याह, धार्मिक समारोह, पारिवारिक भोज, और सामुदायिक कार्यक्रमों में बढ़ता जा रहा है, जिससे यह एक नई शुरुआत का प्रतीक बन गया है। वृक्षों के पत्तों से बने दोने और पत्तल बनाने की कई पारंपरिक और आधुनिक विधियाँ प्रचलित हैं। जैसे ग्रामीण पद्धतियों, सिलाई मशीन द्वारा जोड़ने की तकनीक, और हाइड्रोलिक प्रेस मशीन का उपयोग। इन विधियों का चुनाव बनाने वाले की सुविधा और उपलब्धता पर निर्भर करता है। इस संदर्भ में, आवास परिसर या विश्वविद्यालय परिसरों में खाद्य अपशिष्ट के प्रभावी प्रबंधन, जैविक खाद निर्माण और सेंद्रिय सब्जी उद्यानों के एकीकरण की दिशा में किए गए अध्ययन महत्वपूर्ण हैं। कैंटीन और छात्रावासों से निकलने वाले जैविक कचरे को वैज्ञानिक तरीकों से खाद में बदल कर परिसर में पोषक तत्वों से भरपूर सब्जियाँ उगाई जा सकती हैं।यह मॉडल न केवल पर्यावरण संरक्षण की दिशा में महत्वपूर्ण कदम है, बल्कि यह अपशिष्ट कम करने, जैविक खेती को बढ़ावा देने और छात्रों को पर्यावरण संरक्षण में भागीदार बनाने के लिए भी प्रेरित करता है। इस प्रकार, बायोडिग्रेडेबल उत्पादों का उपयोग और खाद्य अपशिष्ट का वैज्ञानिक प्रबंधन न केवल पर्यावरणीय संकट से निपटने के लिए आवश्यक हैं, बल्कि यह हमारे पारिस्थितिकी तंत्र के लिए टिकाऊ समाधान प्रदान करते हैं।

संकेत शब्द:पर्यावरण संरक्षण, जैव-अपघटनीय बर्तन, बायोडिग्रेडेबल कटलरी, पत्ते, कृषि अपशिष्ट, जैविक खाद

1. परिचय :प्लास्टिक संकट और पारंपरिक समाधान

आज जब प्लास्टिक प्रदूषण पूरी दुनिया के लिए एक गंभीर चुनौती बन गया है, ऐसे समय में जैव-अपघटनीय बर्तन (बायोडिग्रेडेबल कटलरी) एक सकारात्मक विकल्प के रूप में उभर कर सामने आए हैं। खासकर पत्तों, कृषि अपशिष्ट और कृषि उप-उत्पादों से निर्मित यह पर्यावरण मित्र कटलरी न केवल पृथ्वी को प्रदूषण से बचाने में सहायक है, बल्कि हमारी पारंपरिक और सांस्कृतिक विरासत को भी पुनर्जीवित कर रही

है। विवाह समारोहों, धार्मिक आयोजनों, पारिवारिक भोजों और सामूहिक कार्यक्रमों में इनका उपयोग अब एक जागरूक और सतत जीवनशैली की ओर इशारा करता है।

20 से 30 साल पहले लोग केले के पत्तों (चित्र.1(क)), पलाश के पत्ते(चित्र.1(ख)), साल और सागौन (टीक) के पत्तों, कमल के पत्ते और अन्य हरे पत्तों का उपयोग किया करते थे (Times of India, 2023)। इन पत्तों से बनी थालियाँ और दोने (चित्र.1(ग)), जिन्हें सुखाकर और आकार देकर तैयार किया जाता था, पारंपरिक रूप से हर मौसम में उपयोग में लाई जाती थीं। शादी-ब्याह, धार्मिक आयोजनों, पारिवारिक भोजों और सामुदायिक कार्यक्रमों में पत्तों से बने बर्तनों का प्रचलन एक समय पर व्यापक था। ये बर्तन न केवल पूरी तरह पर्यावरण अनुकूल होते थे, बल्कि उपयोग के बाद सहज रूप से जैविक तरीके से नष्ट हो जाते थे। यह प्रथा व्यावहारिक होने के साथ-साथ सांस्कृतिक और सामाजिक दृष्टि से भी अत्यंत महत्वपूर्ण मानी जाती थी।

पत्तों से बने बर्तनों का उपयोग पर्यावरण की दृष्टि से अत्यधिक लाभकारी है। ये पूरी तरह जैविक होते हैं, रासायनिक रहित होते हैं और इनका विघटन प्राकृतिक रूप से हो जाता है, जिससे प्रदूषण की कोई समस्या नहीं होती। इनके निर्माण में स्थानीय संसाधनों का उपयोग होता है, जिससे ग्रामीण क्षेत्रों में रोजगार के अवसर भी सृजित होते हैं।

पत्तों की प्राकृतिक शीतलता भोजन को ताजगी प्रदान करती है और इनके रासायनिक मुक्त होने के कारण ये स्वास्थ्य के लिए भी सुरक्षित हैं। ऐसे बर्तनों का उपयोग न केवल हमारी पारंपरिक संस्कृति को जीवित रखता है (Times of India, 2023), बल्कि प्लास्टिक जैसे प्रदूषणकारी विकल्पों की तुलना में कहीं अधिक टिकाऊ और बेहतर विकल्प भी प्रदान करता है।

(क)

(ख)

(ग)

चित्र.1.(क) केले के पत्ते से बनाई प्लेट (ख) पलाश के पत्ते से बनाई प्लेट और (ग) पत्तों से बने दोने (कटोरी)

2.0 क्या है बायोडिग्रेडेबल कटलरी (बर्तन)?

बायोडिग्रेडेबल कटलरी का तात्पर्य उन उपयोगी बर्तनों से है, जैसे चम्मच, प्लेट, कटोरे या दोने आदि, जो पूरी तरह से प्राकृतिक एवं जैविक सामग्री से निर्मित होते हैं और उपयोग के पश्चात कुछ ही सप्ताहों में सूक्ष्मजीवों (माइक्रोऑर्गेनिज़्म) की क्रिया द्वारा बिना किसी हानिकारक अवशेष के पर्यावरण में स्वतः विघटित हो जाते हैं। इन कटलरी के निर्माण में ऐसे संसाधनों का उपयोग किया जाता है जो पुनः नवीकरणीय होते हैं और जिनका प्रभाव पर्यावरण पर नगण्य होता है (Anonymous, 2024) । यह आधुनिक टिकाऊ विकास की अवधारणा के अनुरूप एक महत्वपूर्ण विकल्प है।

(क) (ख) (ग) (घ)

चित्र.2 बायोडिग्रेडेबल कटलरी (क) धान की पराली , (ख) गेहूं की भूसी (ग) गन्ने की खोई और (घ) मकई के डंठल से बनाई बायोडिग्रेडेबल सामग्री

बायोडिग्रेडेबल कटलरी मुख्य रूप से विभिन्न प्रकार के पत्तों एवं कृषि अपशिष्टों से बनाई जाती है, जिनमें प्रमुख रूप से केले के पत्ते, साल, सागौन (Teak), पलाश, कमल के पत्ते, तथा धान की पराली (Gupta, 2023) (चित्र.2 (क)), गेहूं की भूसी (चित्र.2 (ख)), गन्ने की खोई (चित्र.2 (ग)), मकई के डंठल जैसे जैविक अवशेष शामिल हैं। ये सभी पदार्थ न केवल प्रचुर मात्रा में उपलब्ध हैं, बल्कि पारंपरिक रूप से भारत के ग्रामीण क्षेत्रों में लंबे समय से उपयोग में लाए जाते रहे हैं।

इन कटलरी के निर्माण में सबसे पहले पत्तों या कृषि अवशेषों को साफ किया जाता है, फिर उन्हें प्रेस मशीनों के माध्यम से विशिष्ट आकार जैसे थाली, कटोरी या चम्मच में ढाला जाता है (Times of India, 2023) । कभी-कभी इन उत्पादों की मजबूती बढ़ाने के लिए उन्हें एक विशेष प्रकार की गर्मी (थर्मल प्रोसेसिंग) और दबाव (हाइड्रॉलिक प्रेस) द्वारा सख्त बनाया जाता है (Gupta, 2023) ।

3.0 यह कटलरी (बर्तन) बनाने की पद्धति

वृक्षों के पत्तों से दोना या पत्तल बनाने की कई विधियाँ प्रचलित हैं, जैसे ग्रामीण पद्धति, सिलाई मशीन द्वारा जोड़ने की पद्धति, और आधुनिक हाइड्रोलिक प्रेस मशीन का उपयोग। ग्रामीण पद्धति में पत्तों को हाथ से जोड़कर बाँस की सलाई या कांटों की सहायता से दोना-पत्तल बनाया जाता है। यह परंपरागत, सस्ती और पर्यावरण अनुकूल विधि है, लेकिन इसमें अधिक समय और मेहनत लगती है। दूसरी ओर, सिलाई मशीन का उपयोग कर पत्तों को मजबूती से जोड़ा जाता है, जिससे पत्तल अधिक टिकाऊ बनती है। वहीं, आधुनिक हाइड्रोलिक प्रेस तकनीक से दोना-पत्तल को जल्दी, मजबूत और जलरोधक रूप में तैयार किया जा सकता है। किस पद्धति का उपयोग किया जाए, यह मुख्य रूप से बनाने वाले पर निर्भर करता है—वह किस संसाधन, समय और उद्देश्य के आधार पर किस विधि को चुनता है।

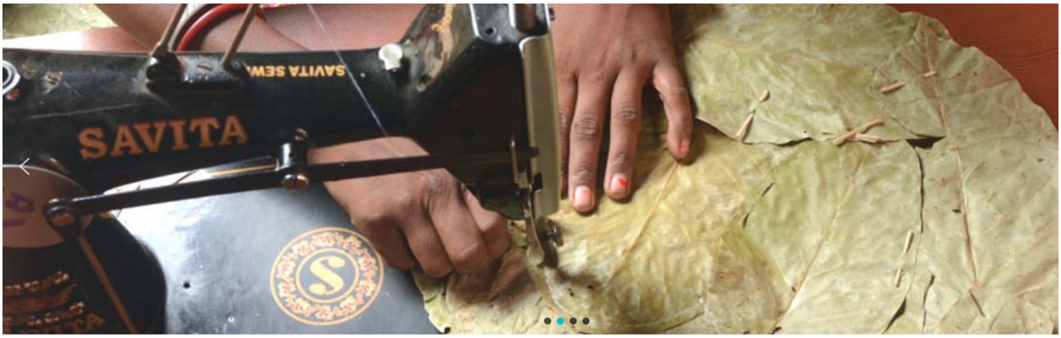
3.1 ग्रामीण पद्धति

ग्रामीण भारत में, विशेषकर मध्यप्रदेश, छत्तीसगढ़, झारखंड, ओडिशा तथा उत्तर भारत के कई क्षेत्रों में, लोग पारंपरिक रूप से साल, पलाश, केले और महुआ जैसे वृक्षों के पत्तों से दोना-पत्तल) पत्तों की प्लेटें और कटोरियाँ (बनाते हैं। यह एक पुरातन कुटीर उद्योग है, जिसमें महिलाओं और बुजुर्गों की सक्रिय भागीदारी रहती है (Times of India, 2023)। इन पत्तों को हाथ से या फिर लकड़ी अथवा बांस की बारीक सीकों की मदद से, अथवा सिलाई के धागे से जोड़कर, प्लेट और कटोरी का आकार दिया जाता है (चित्र.3)। यह प्रक्रिया न केवल पर्यावरण के अनुकूल है, बल्कि ग्रामीण रोजगार का भी एक प्रमुख साधन बन गया है।

चित्र.3: पत्तों से दोना-पत्तल बनाने की ग्रामीण पद्धति

3.2 सिलाई मशीन

सिलाई मशीन से पत्तों को जोड़ने की प्रक्रिया दोना-पत्तल बनाने का एक आधुनिक और प्रभावी तरीका है। यह न केवल समय की बचत करता है, बल्कि इससे तैयार की गई पत्तलें और कटोरियाँ अधिक मजबूत, सुंदर और आकर्षक भी होती हैं। पारंपरिक रूप से हाथ से बनाई गई पत्तलों की मजबूती सीमित होती है, जिससे उनमें रखा भोजन गिरने की संभावना रहती है। लेकिन जब इन्हें सिलाई मशीन से सिला जाता है, तो पत्ते आपस में अच्छी तरह जुड़ जाते हैं और एक मजबूत आधार तैयार होता है (चित्र.4)। इस प्रकार सिलाई मशीन द्वारा तैयार दोना-पत्तल न केवल पारंपरिक ज्ञान का आधुनिक उपयोग है, बल्कि यह स्वच्छता, पर्यावरण-संरक्षण और स्वरोजगार को बढ़ावा देने वाला एक सकारात्मक कदम भी है।



चित्र.4: सिलाई मशीन से दोना-पत्तल बनाने का एक आधुनिक तरीका

3.3 आधुनिक पद्धति

3.3.1 हाइड्रोलिक प्रेस मशीन - जलरोधकता और मजबूती के लिए

ग्रामीण भारत में दोना-पत्तल, कटोरी और प्लेटें पारंपरिक रूप से साल, पलाश, महुआ या केले के पत्तों से बनाई जाती रही हैं। पहले इन्हें हाथ से सिलकर तैयार किया जाता था, लेकिन अब इन पारंपरिक तरीकों

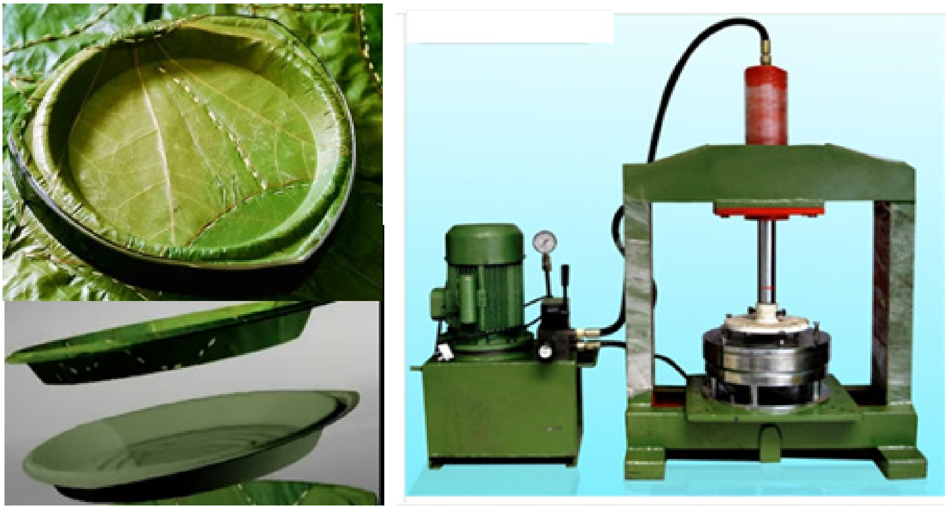
को आधुनिक तकनीक से जोड़कर हाइड्रोलिक प्रेस मशीनों का उपयोग किया जा रहा है। यह मशीनें पत्तों और कृषि अपशिष्ट से बनी कच्ची सामग्री को उच्च तापमान और दबाव देकर एक निश्चित आकार और मजबूती प्रदान करती हैं।

3.3.2 हाइड्रोलिक प्रेस मशीन का उपयोग

हाइड्रोलिक प्रेस मशीन एक प्रकार की यांत्रिक प्रणाली है, जो तरल दाब के सिद्धांत पर काम करती है। इसमें दो भारी प्लेटें होती हैं, जिनके बीच पत्तों या कृषि अपशिष्ट की शीट्स को रखा जाता है। फिर उच्च तापमान और दबाव के माध्यम से उन्हें प्लेट, कटोरी, दोना या चम्मच के आकार में ढाला जाता है।

3.3.3 जलरोधकता और मजबूती

साधारण पत्तों से बनी प्लेटें पानी में जल्दी गल जाती हैं और कमजोर हो जाती हैं। लेकिन जब इन्हें हाइड्रोलिक प्रेस में दबाया और गरम किया जाता है (चित्र.5), तो यह प्रक्रिया न केवल उन्हें एक ठोस और मजबूत संरचना देती है, बल्कि एक हद तक जलरोधकता भी प्रदान करती है। कभी-कभी इन उत्पादों पर प्राकृतिक मोम या कॉर्न स्टार्च आधारित कोटिंग भी की जाती है, जिससे वे अधिक समय तक टिकाऊ और पानी प्रतिरोधी बन सकें। बायोडिग्रेडेबल सामग्री वे पदार्थ होते हैं जो प्राकृतिक रुप से मिट्टी, जल, और वायु में मौजूद सूक्ष्मजीवों (जैसे बैक्टीरिया और फफूंद) के माध्यम से धीरे-धीरे विघटित हो जाते हैं। यह प्रक्रिया पूरी तरह से प्राकृतिक होती है, जिसमें किसी प्रकार के हानिकारक रसायन या अवशेष नहीं बचते।



चित्र.5: पत्तों से दोना-पत्तल बनाने की आधुनिक पद्धति में हाइड्रोलिक प्रेस मशीन का उपयोग

जैसे ही बायोडिग्रेडेबल कटलरी (जो पत्तों या कृषि अपशिष्ट से बनी प्लेटें, चम्मच आदि होती हैं) उपयोग के बाद मिट्टी या खाद के ढेर में डाली जाती हैं, इन पर सूक्ष्मजीवों की गतिविधि शुरु हो जाती है। नमी, तापमान और ऑक्सीजन की उपस्थिति में ये सूक्ष्मजीव इन जैविक पदार्थों को छोटे-छोटे घटकों में तोड़ने लगते हैं। यह प्रक्रिया आमतौर पर 30 से 90 दिनों में पूरी हो जाती है। विघटन के अंत में, यह सामग्री कार्बन

डाइऑक्साइड, पानी और पौधों के लिए उपयोगी जैविक खाद (ह्यूमस) में परिवर्तित हो जाती है। ह्यूमस मिट्टी की संरचना को सुधारने और उसकी उपजाऊ शक्ति बढ़ाने में मदद करता है। इस प्रकार, बायोडिग्रेडेबल कटलरी न केवल प्रदूषण को कम करती है, बल्कि कृषि क्षेत्र में पोषण भी वापस लौटाती है। इससे यह स्पष्ट होता है कि बायोडिग्रेडेबल उत्पादों का उपयोग पारिस्थितिकी तंत्र के लिए अत्यंत लाभकारी है। जब यह सामग्री विघटित होती है, तो यह न केवल पर्यावरण को साफ और सुरक्षित बनाती है, बल्कि यह खाद्य उत्पादन के लिए भी उपयुक्त पोषक तत्व प्रदान करती है। इस तरह के उत्पादों को अपनाने से हम प्रदूषण को नियंत्रित कर सकते हैं और प्राकृतिक संसाधनों का संरक्षण भी कर सकते हैं, जो लंबे समय में हमारे लिए लाभकारी साबित होगा।

4. वैज्ञानिक दृष्टिकोण से आवास परिसर में खाद्य अपशिष्ट, जैविक खाद और सब्जी उद्यानों का सामंजस्य

वर्तमान समय में सतत विकास और पर्यावरणीय संतुलन की दिशा में आवास परिसरों की भूमिका अत्यंत महत्वपूर्ण हो गई है। विशेष रूप से, खाद्य अपशिष्ट प्रबंधन, खाद निर्माण तथा सब्जी उद्यानों का आपसी एकीकरण न केवल परिसरों को हरित और आत्मनिर्भर बनाता है, बल्कि निवासी में पर्यावरणीय जागरूकता और व्यवहारिक ज्ञान भी विकसित करता है (Torrijos, et al., 2021)।

4.1 खाद्य अपशिष्ट का स्रोत और उसकी वैज्ञानिक पहचान

आवास परिसर या विश्वविद्यालयों में स्थित छात्रावासों, कैंटीनों, मैस और आयोजनों में प्रतिदिन बड़ी मात्रा में खाद्य अपशिष्ट उत्पन्न होता है। इसमें मुख्यतः बचा हुआ पका हुआ भोजन, सब्जियों के छिलके, फलों के अवशेष, अंडे के छिलके आदि शामिल होते हैं (Torrijos et al., 2021)। वैज्ञानिक रूप से यह अपशिष्ट जैविक होता है, जो उचित प्रबंधन के अभाव में मीथेन (CH_4), कार्बन डाइऑक्साइड (CO_2) जैसी ग्रीनहाउस गैसों का उत्सर्जन करता है। यदि इसे वैज्ञानिक विधियों से प्रोसेस किया जाए, तो यह एक अत्यंत उपयोगी संसाधन—खाद—में परिवर्तित किया जा सकता है।

4.2 खाद निर्माण की वैज्ञानिक प्रक्रिया

खाद्य अपशिष्ट से खाद बनाने की प्रक्रिया एरोबिक अपघटन पर आधारित होती है, जिसमें सूक्ष्मजीव (बैक्टीरिया, फफूंद आदि) ऑक्सीजन की उपस्थिति में जैव अपशिष्ट को सरल कार्बनिक यौगिकों में तोड़ते हैं। इस प्रक्रिया में कार्बन-नाइट्रोजन अनुपात (C:N ratio) का संतुलन अत्यंत महत्वपूर्ण होता है, जो सामान्यतः 30:1 आदर्श माना जाता है (Anonymous. 2024)।

खाद बनाने के लिए तीन मुख्य घटकों की आवश्यकता होती है:

- **"ग्रीन मटीरियल"** जैसे कि सब्जियों के छिलके, फल, ताजा पत्तियाँ (नाइट्रोजन स्रोत)
- **"ब्राउन मटीरियल"** जैसे सूखी पत्तियाँ, कागज, भूसा (कार्बन स्रोत)
- **नमी और वायु प्रवाह**, जो सूक्ष्मजीवों की क्रियाशीलता बनाए रखते हैं।

एक छोटे स्तर पर विश्वविद्यालय परिसर में कम्युनिटी कंपोस्टिंग यूनिट, वर्मी कंपोस्टिंग, या बायोडाइजेस्टर के माध्यम से यह कार्य सुचारु रूप से किया जा सकता है।

4.3 सब्जी उद्यानों का विकास

खाद के उपयोग से विश्वविद्यालय परिसर में सेंद्रिय सब्जी उद्यानों की स्थापना की जा सकती है। इन उद्यानों में टमाटर, पालक, धनिया, भिंडी, मैथी, बैंगन आदि मौसमी सब्जियों की खेती संभव है। यह खेती वैज्ञानिक पद्धतियों जैसे कि बायोफर्टिलाइज़र, फसल चक्र, और इंटीग्रेटेड पेस्ट मैनेजमेंट (IPM) के अंतर्गत की जा सकती है। इसके लाभ हैं : पोषणयुक्त, विष-रहित खाद्य उत्पादन, छात्रों के लिए "लर्निंग बाय डूइंग" की अवधारणा का व्यवहारिक अनुभव, परिसर की जैव विविधता में वृद्धि आदि।

4.4 एकीकरण का प्रभाव और लाभ

खाद्य अपशिष्ट, खाद और सब्जी उद्यानों के इस एकीकृत मॉडल से विश्वविद्यालय परिसर को कई बहुआयामी लाभ प्राप्त होते हैं:

- **पर्यावरणीय लाभ:** ग्रीनहाउस गैसों का उत्सर्जन घटता है, मृदा की उर्वरता बढ़ती है।
- **शैक्षणिक लाभ:** छात्रों को अपशिष्ट प्रबंधन, जैविक खेती और पर्यावरण संरक्षण का व्यावहारिक ज्ञान मिलता है।
- **आर्थिक लाभ:** खाद्य अपशिष्ट निस्तारण की लागत घटती है, और परिसर में उत्पन्न सब्जियों का उपयोग कैंटीनों में किया जा सकता है।
- **सामाजिक लाभ:** सामुदायिक भागीदारी बढ़ती है, और विश्वविद्यालय "हरित परिसर" की दिशा में अग्रसर होता है।

5. विश्लेषण एवं चर्चा

आज के समय में पर्यावरण संरक्षण एक अत्यंत महत्वपूर्ण विषय बन चुका है। बढ़ते प्रदूषण और प्लास्टिक कचरे ने पृथ्वी के संतुलन को गंभीर रूप से प्रभावित किया है। ऐसे में बायोडिग्रेडेबल कटलरी (जैसे पत्तों और कृषि अपशिष्ट से बनी प्लेटें, कटोरे, चम्मच आदि) एक प्रभावी और टिकाऊ विकल्प के रूप में उभरकर सामने आई है। यह न केवल पर्यावरण के अनुकूल है, बल्कि हमारे सामाजिक और नैतिक दायित्वों को भी दर्शाती है। पारंपरिक प्लास्टिक कटलरी का उपयोग बड़े पैमाने पर पर्यावरण को नुकसान पहुंचाता है। प्लास्टिक को नष्ट होने में सैकड़ों वर्ष लगते हैं, जिससे भूमि, जल और वायु प्रदूषण बढ़ता है। इसके विपरीत, बायोडिग्रेडेबल कटलरी प्राकृतिक रूप से कुछ ही समय में विघटित हो जाती है और पर्यावरण में कोई हानिकारक तत्व नहीं छोड़ती। पत्तों, बांस, गन्ने के बगास और अन्य कृषि अपशिष्ट से बनी कटलरी न केवल टिकाऊ है, बल्कि यह किसानों के लिए अतिरिक्त आय का स्रोत भी बन सकती है।

छोटे-छोटे निर्णय भी बड़े परिवर्तन ला सकते हैं- उदाहरण के लिए, यदि हम अपने दैनिक जीवन या समारोहों (जैसे शादी, जन्मदिन, या कॉलेज कार्यक्रम) में प्लास्टिक की बजाय बायोडिग्रेडेबल कटलरी का उपयोग करें, तो प्लास्टिक कचरे में भारी कमी लाई जा सकती है। यह एक सरल लेकिन प्रभावशाली कदम

है, जिसे हर व्यक्ति आसानी से अपना सकता है। इसके अलावा, खाद्य अपशिष्ट, खाद निर्माण (कम्पोस्टिंग) और सब्जी उद्यानों का एकीकरण एक उत्कृष्ट और वैज्ञानिक मॉडल प्रस्तुत करता है। विश्वविद्यालयों और शैक्षणिक संस्थानों में यदि इस प्रणाली को अपनाया जाए, तो यह न केवल कचरा प्रबंधन की समस्या को हल कर सकता है, बल्कि छात्रों को व्यावहारिक ज्ञान भी प्रदान कर सकता है। खाद्य अपशिष्ट से खाद बनाकर उसे उद्यानों में उपयोग करना एक चक्रीय और टिकाऊ प्रक्रिया है, जो पर्यावरण के अनुकूल है।

6. निष्कर्ष

बायोडिग्रेडेबल कटलरी न केवल एक टिकाऊ विकल्प है, बल्कि यह हमारे भविष्य के लिए एक ज़िम्मेदारी भी है। यदि हम चाहें तो अपने छोटे-छोटे निर्णयों से बड़े परिवर्तन ला सकते हैं। अगली बार जब आप किसी समारोह की योजना बनाएं, तो प्लास्टिक की बजाय पत्तों और कृषि अपशिष्ट से बनी कटलरी का चयन करें। यह न केवल पर्यावरण की रक्षा करेगा, बल्कि आने वाली पीढ़ियों को एक स्वच्छ और सुरक्षित धरती भी सौंपेगा। खाद्य अपशिष्ट, खाद और सब्जी उद्यानों का एकीकरण एक वैज्ञानिक, पर्यावरणीय और सामाजिक रुप से समृद्ध मॉडल प्रस्तुत करता है। यदि विश्वविद्यालय इस प्रणाली को अपनाते हैं तो यह न केवल अपशिष्ट प्रबंधन में क्रांति ला सकता है, बल्कि एक आत्मनिर्भर, हरित और ज्ञान-सम्पन्न शैक्षणिक वातावरण की स्थापना भी सुनिश्चित कर सकता है।

"प्रकृति से जुड़ें, प्लास्टिक से मुक्ति पाएं!

संदर्भ

Anonymous, 2024. Everything you need to know about community composting and its benefits for housing societies 2024 https://mygate.com/blog/housing-society/community-composting/

Gupta, S., 2023. "My pet can eat my plate": Brothers make tableware from waste generated in rice farming. https://thebetterindia.com/324920/brothers-biodegradable-animal-friendly-rice-agri-waste-tableware-cutlery-plates-glass/

Times of India. 2023. 5 leaves used for serving food across India and their benefits. https://timesofindia.indiatimes.com/life-style/food-news/5-leaves-used-for-serving-food-across-india-and-their-benefits

Torrijos, V., Dopico, D.C., Soto, M., 2021. Integration of food waste composting and vegetable gardens on a university campus. Journal of Cleaner Production, 315: 128175.

अनानास के छिलके के अपशिष्ट से सतत एवं जैव-अवक्रमणीय पैकेजिंग फ़िल्म का विकास

प्रिय गोंड[1]*, प्रमोद कुमार ओमरे [1], राज नारायण पटेरिया [2], प्रकाश चंद्र गोपे[3], अनिल कुमार [4]

[1] पोस्ट हार्वेस्ट प्रोसेस एवं फूड इंजीनियरिंग विभाग, जी.बी. पंत कृषि एवं प्रौद्योगिकी विश्वविद्यालय पंतनगर

[2] फार्म मशीनरी एंड पावर इंजीनियरिंग विभाग, प्रौद्योगिकी महाविद्यालय, जी.बी. पंत कृषि एवं प्रौद्योगिकी विश्वविद्यालय), पंतनगर

[3] यांत्रिक अभियंत्रण विभाग, प्रौद्योगिकी महाविद्यालय, जी.बी. पंत कृषि एवं प्रौद्योगिकी विश्वविद्यालय, पंतनगर

[4] फूड साइंस एंड टेक्नोलॉजी विभाग, प्रौद्योगिकी महाविद्यालय, जी.बी. पंत कृषि एवं प्रौद्योगिकी विश्वविद्यालय, पंतनगर

*ईमेल: priyagond45@gmail.com

सारांश

प्लास्टिक प्रदूषण वर्तमान समय में वैश्विक स्तर पर एक अत्यंत गंभीर पर्यावरणीय समस्या बन चुका है। पारंपरिक प्लास्टिक का अत्यधिक उपयोग, विशेष रूप से एकल-उपयोग उत्पादों में, इसकी अजैव-अवक्रमणीय प्रकृति के कारण पर्यावरण, जल स्रोतों, मृदा तथा जीव-जंतुओं के लिए गंभीर खतरा उत्पन्न कर रहा है। प्लास्टिक अपशिष्ट के निरंतर बढ़ते संचय ने टिकाऊ एवं पर्यावरण-अनुकूल विकल्पों की आवश्यकता को और अधिक महत्वपूर्ण बना दिया है। इसी संदर्भ में, जैव-अवक्रमणीय एवं बायोपॉलिमर आधारित पैकेजिंग सामग्रियों के विकास पर व्यापक शोध किया जा रहा है। वर्तमान अध्ययन में अनानास प्रसंस्करण उद्योग से उत्पन्न कृषि अपशिष्ट, विशेष रूप से अनानास के छिलकों, का उपयोग मूल्यवर्धित उत्पाद विकसित करने हेतु किया गया। अनानास के छिलकों से सेल्युलोज का निष्कर्षण कर उसे पॉली लैक्टिक एसिड के साथ मिश्रित किया गया, जिसके माध्यम से एक पर्यावरण-अनुकूल, सतत एवं जैव-अवक्रमणीय पैकेजिंग फिल्म विकसित की गई। प्रयोगात्मक परिणामों से यह पाया गया कि अनानास के छिलकों से औसतन 27.53% सेल्युलोज उपज प्राप्त हुई। विकसित बायोफिल्म में संतोषजनक यांत्रिक गुण, बेहतर नमी प्रतिरोधकता तथा उपयोगी पैकेजिंग विशेषताएँ पाई गईं। इसके अतिरिक्त, मृदा-दफन (Soil Burial) परीक्षण के दौरान विकसित फिल्म में 5 सप्ताह के भीतर लगभग 47% जैव-अवक्रमण देखा गया, जो इसकी पर्यावरणीय अनुकूलता को दर्शाता है। अध्ययन के निष्कर्ष यह प्रमाणित करते हैं कि कृषि अपशिष्ट का प्रभावी उपयोग कर पारंपरिक प्लास्टिक के स्थान पर एक टिकाऊ, सतत एवं पर्यावरण-अनुकूल विकल्प विकसित किया जा सकता है। यह शोध न केवल प्लास्टिक प्रदूषण को कम करने में सहायक हो सकता है, बल्कि कृषि अपशिष्ट के प्रबंधन एवं मूल्य संवर्धन की दिशा में भी महत्वपूर्ण योगदान प्रदान करता है।

संकेत शब्द: अनानास छिलका, सेल्युलोज, पॉली लैक्टिक एसिड, बायोपॉलिमर, बायोडिग्रेडेबल फिल्म, सतत पैकेजिंग

1.प्रस्तावना

प्लास्टिक आधुनिक जीवन का अभिन्न अंग बन चुका है — यह हल्का, मजबूत, सस्ता और बहुउपयोगी पदार्थ है, जिसने खाद्य पैकेजिंग, भंडारण, परिवहन और अन्य औद्योगिक क्षेत्रों में क्रांतिकारी परिवर्तन किए हैं। परंतु यही प्लास्टिक आज एक गंभीर पर्यावरणीय संकट का कारण भी बन गया है। प्लास्टिक का वैश्विक उत्पादन प्रति वर्ष लगभग 350 मिलियन टन से अधिक है और अनुमान है कि लगभग 2,50,000 टन प्लास्टिक कचरा महासागरों में तैर रहा है (Aryan *et al.*, 2019).। यह प्लास्टिक अपशिष्ट मिट्टी, जल और वायु प्रदूषण को बढ़ाने के साथ-साथ जैव विविधता पर भी दीर्घकालिक हानिकारक प्रभाव डालता है। पारंपरिक प्लास्टिक मुख्यतः पेट्रोलियम आधारित पॉलिमरों (जैसे पॉलीथिलीन, पॉलीप्रोपिलीन, पॉलीस्टाइरीन) से बनाए जाते हैं, जिनका प्राकृतिक वातावरण में विघटन सैकड़ों वर्षों में होता है। परिणामस्वरूप, एकल उपयोग प्लास्टिक विश्वभर में पर्यावरणीय एवं सामाजिक चिंता का प्रमुख विषय बन चुका है। इस समस्या के समाधान हेतु जैव-अवक्रमणीय और जैव- वैकल्पिक पैकेजिंग सामग्रियों का विकास समय की महत्वपूर्ण आवश्यकता बन गई है।

सतत विकास की दिशा में कृषि अपशिष्ट का उपयोग एक प्रभावी और पर्यावरण-अनुकूल उपाय है। फल एवं सब्ज़ी प्रसंस्करण उद्योग से प्रतिवर्ष बड़ी मात्रा में बायोवेस्ट उत्पन्न होता है, जिसे यदि वैज्ञानिक रुप से पुनः उपयोग में लाया जाए तो यह "वेस्ट टू वेल्थ" की अवधारणा को साकार कर सकता है। इन्हीं अपशिष्टों में अनानास एक प्रमुख उष्णकटिबंधीय फल है जिसका विश्व स्तर पर उत्पादन लगभग 28.65 मिलियन टन, जबकि भारत में लगभग 2.4 मिलियन टन है (Mala *et al.*, 2024)। अनानास प्रसंस्करण के दौरान लगभग 60% भाग अपशिष्ट के रुप में निकल जाता है, जिसमें से छिलका लगभग 29–40% तक योगदान देता है। यह छिलका प्रचुर मात्रा में सेल्युलोज (18–25%), हेमिसेलुलोज (20–30%), तथा लिग्निन (15–20%) से युक्त होता है (Awasthi *et al.*, 2022)। इन घटकों की उपस्थिति इसे बायोपॉलिमर निर्माण के लिए एक उत्कृष्ट और सस्ता कच्चा स्त्रोत बनाती है।

सेल्युलोज विश्व का सबसे प्रचुर मात्रा में पाया जाने वाला प्राकृतिक बहुलक है, जो β–D–glucose इकाइयों से मिलकर बना होता है। इसका क्रिस्टलीय स्वरुप इसे यांत्रिक रुप से मजबूत, रासायनिक रुप से स्थिर और नवीकरणीय बनाता है। यह न केवल पर्यावरण-अनुकूल है बल्कि अन्य जैव-आधारित पॉलिमरों जैसे पॉलीलैक्टिक एसिड, स्टार्च और चिटोसन के साथ मिलकर फिल्म की यांत्रिक शक्ति और नमी अवरोधक गुणों को भी बढ़ाता है। विशेष रुप से इसके सूक्ष्म और नैनो रुप उच्च सतही क्षेत्र और हाइड्रॉक्सिल समूहों की उपस्थिति के कारण पॉलिमर मिश्रणों में बेहतर बंधन प्रदान करते हैं।

पॉली लैक्टिक एसिड एक जैव-आधारित और जैव-अवक्रमणीय थर्मोप्लास्टिक पॉलिमर है, जिसे नवीकरणीय स्त्रोतों जैसे मकई के स्टार्च, गन्ने या कसावा से प्राप्त लैक्टिक एसिड के बहुलकीकरण द्वारा तैयार किया जाता है। यह पारदर्शी, गैर-विषैला और खाद्य संपर्क के लिए सुरक्षित है, जिसके कारण यह खाद्य पैकेजिंग उद्योग में व्यापक रुप से प्रयोग किया जा रहा है। हालांकि, शुद्ध पॉली लैक्टिक एसिड की कठोरता और नमी पारगम्यता अधिक होती है, जिससे इसकी उपयोगिता सीमित हो जाती है। इस कमी को दूर करने के लिए प्राकृतिक फाइबर या सेल्युलोज जैसी भराव सामग्रियों को सम्मिलित किया जाता है, जो पॉली लैक्टिक

एसिड के साथ मजबूत हाइड्रोजन बंध बनाकर फिल्म की यांत्रिक शक्ति, लचीलापन और नमी अवरोधकता को बढ़ाते हैं (Reshmy *et al.*, 2021).

बायोडिग्रेडेबल पैकेजिंग पारंपरिक प्लास्टिक की तुलना में पर्यावरणीय दृष्टि से अधिक सुरक्षित है। यह न केवल खाद्य पदार्थों की गुणवत्ता और भंडारण अवधि को बढ़ाती है बल्कि ऑक्सीजन और नमी अवरोधक गुणों के कारण खाद्य की ताजगी को भी बनाए रखती है। इसे सक्रिय पैकेजिंग के रूप में भी विकसित किया जा सकता है, जिसमें प्राकृतिक एंटीऑक्सीडेंट्स या रोगाणुरोधी घटकों को जोड़कर खाद्य सुरक्षा और शेल्फ-लाइफ में वृद्धि की जाती है। शोध का औचित्य एवं उद्देश्य इस पृष्ठभूमि में यह अध्ययन इस उद्देश्य से किया गया कि—

1. अनानास छिलके से सेल्यूलोज का निष्कर्षण कर उसकी उपज और गुणवत्ता का मूल्यांकन किया जाए।
2. प्राप्त सेल्युलोज को पॉली लैक्टिक एसिड के साथ मिलाकर एक जैव-अवक्रमणीय फिल्म विकसित की जाए।

2. सामग्री एवं विधि

2.1 कच्चा पदार्थ एवं रसायन

अनानास के छिलके स्थानीय फल प्रसंस्करण इकाई से एकत्रित किए गए तथा उन्हें प्रयोग हेतु स्वच्छ जल से अच्छी प्रकार धोकर अशुद्धियों से मुक्त किया गया। अध्ययन में प्रयुक्त प्रमुख रसायन, जैसे सोडियम हाइड्रॉक्साइड (NaOH), सोडियम क्लोराइट ($NaClO_2$), एसिटिक एसिड तथा पॉली लैक्टिक एसिड, सभी विश्लेषण ग्रेड के थे, ये रसायन सेल्युलोज निष्कर्षण, ब्लीचिंग तथा बायोडिग्रेडेबल फिल्म निर्माण की विभिन्न प्रक्रियाओं में प्रयुक्त किए गए।

2.2 छिलके की प्रारंभिक तैयारी

छिलकों को सबसे पहले धोकर सतही अशुद्धियाँ हटाई गईं। फिर उन्हें 60°C पर 24 घंटे तक ओवन में सुखाया गया और 250 मेष चलनी से छनकर पाउडर के रूप में संग्रहीत किया गया (Kumar *et al.*, 2021)।

2.3. सेल्युलोज निष्कर्षण प्रक्रिया

अनानास के छिलकों से सेल्युलोज निष्कर्षण की प्रक्रिया दो प्रमुख चरणों—क्षारीय उपचार तथा ब्लीचिंग उपचार— के माध्यम से सम्पन्न की गई। इस प्रक्रिया का मुख्य उद्देश्य छिलकों में उपस्थित हेमिसेलुलोज, लिग्निन तथा अन्य अशुद्ध घटकों को हटाकर शुद्ध सेल्युलोज प्राप्त करना था।

1. **क्षारीय उपचार:** प्रारंभिक चरण में सूखे एवं पिसे हुए अनानास छिलका पाउडर को 10% सोडियम हाइड्रॉक्साइड (NaOH) विलयन में उपचारित किया गया। इस मिश्रण को 80°C तापमान पर 2 घंटे तक निरंतर गर्म किया गया। क्षारीय उपचार का उद्देश्य मुख्यतः हेमिसेलुलोज, मोमीय पदार्थों तथा कुछ घुलनशील अशुद्धियों को हटाना था। NaOH के प्रभाव से रेशों की संरचना ढीली हो जाती है, जिससे गैर-सेल्युलोज घटकों का विघटन और निष्कासन आसान हो जाता है। उपचार के पश्चात प्राप्त अवशेष को बार-बार आसुत जल से धोया गया, ताकि अतिरिक्त क्षार पूर्णतः हटाया जा सके (Bhandari *et al.*, 2020)।

2. **ब्लीचिंग उपचार:** क्षारीय उपचार के बाद प्राप्त अवशेष को 1.7% सोडियम क्लोराइट ($NaClO_2$) विलयन में स्थानांतरित किया गया। इस प्रक्रिया के दौरान विलयन का pH नियंत्रित करने हेतु एसिटिक एसिड का उपयोग किया गया। मिश्रण को 80°C तापमान पर 1 घंटे तक गर्म किया गया। ब्लीचिंग उपचार का मुख्य उद्देश्य लिग्निन तथा रंगीन अशुद्धियों को हटाकर अधिक शुद्ध एवं सफेद सेल्युलोज प्राप्त करना था। इस चरण के दौरान रेशों की संरचना अधिक स्वच्छ एवं परिष्कृत हो जाती है, जिससे उनकी गुणवत्ता और उपयोगिता में वृद्धि होती है (Kumar *et al.*, 2021)। उपचार पूर्ण होने के पश्चात प्राप्त सेल्युलोज को आसुत जल से अच्छी प्रकार धोया गया तथा अवशिष्ट रसायनों को हटाने के लिए तटस्थ pH तक साफ किया गया। इसके बाद नमूनों को नियंत्रित तापमान पर सुखाया गया और अंतिम शुष्क भार मापा गया। सेल्युलोज की उपज (%) की गणना प्रारंभिक छिलका पाउडर के भार तथा अंतिम प्राप्त शुष्क सेल्युलोज के भार के आधार पर की गई। यह प्रक्रिया (Bhandari *et al.*, 2020) द्वारा वर्णित विधि के अनुसार अपनाई गई।

2.4 बायोडिग्रेडेबल फिल्म निर्माण

सेल्युलोज को पॉली लैक्टिक एसिड के साथ डाइक्लोरोमीथेन माध्यम में घोलकर अच्छी तरह द्वारा मिश्रित किया गया। प्राप्त घोल को समतल सतह पर समान रूप से फैलाकर कमरे के तापमान पर सुखाया गया। इस प्रक्रिया से प्राप्त फिल्म पारदर्शी, लचीली और समान संरचना वाली पाई गई। (हुसैन *एट अल.*, 2018)।

2.5 जैव-अपघटन परीक्षण

विकसित बायोडिग्रेडेबल फिल्म के जैव-अपघटन व्यवहार का मूल्यांकन मृदा-दफन विधि द्वारा 35 दिनों की अवधि के लिए किया गया। इस परीक्षण का उद्देश्य प्राकृतिक परिस्थितियों में फिल्म की अपघटन क्षमता का अध्ययन करना था। परीक्षण हेतु फिल्म के नमूनों को समान आकार में काटकर उनका प्रारंभिक भार सटीक रूप से मापा गया। इसके पश्चात ज्ञात भार वाले नमूनों को प्राकृतिक मिट्टी में लगभग 5 सेमी की गहराई पर दफन किया गया। परीक्षण के दौरान मिट्टी की नमी एवं तापमान को नियंत्रित रखा गया, ताकि सूक्ष्मजीवों की सक्रियता बनी रहे और जैव-अपघटन प्रक्रिया प्रभावी रूप से संचालित हो सके। निर्धारित समयांतराल 0, 7, 14, 21, 28 एवं 35 दिन पर फिल्म के नमूनों को सावधानीपूर्वक मिट्टी से बाहर निकाला गया। नमूनों की सतह पर चिपकी मिट्टी एवं अन्य अशुद्धियों को आसुत जल से धीरे-धीरे साफ किया गया। इसके बाद नमूनों को नियंत्रित तापमान पर सुखाकर उनका अंतिम भार मापा गया (Martucci and Ruseckaite 2009)। फिल्म के जैव-अपघटन की मात्रा का आकलन भार ह्रास प्रतिशत के आधार पर किया गया। भार में होने वाली कमी फिल्म के अपघटन स्तर को दर्शाती है, जो यह संकेत देती है कि विकसित फिल्म प्राकृतिक वातावरण में सूक्ष्मजीवों की क्रिया द्वारा धीरे-धीरे विघटित हो सकती है।

2.6 भौतिक गुण परीक्षण

फिल्म की मोटाई, तन्यता शक्तिऔर नमी अवरोधकता का मूल्यांकन किया गया। विकसित फिल्मों की यांत्रिक विशेषताओं अर्थात् तन्यता शक्ति एवं प्रतिशत खिंचा का निर्धारण ASTM D882-12 मानक विधि के अनुसार (UTM) (Instron Model, USA) की सहायता से किया गया। फिल्मों को परीक्षण से पहले 25

± 2°C तापमान और 50 ± 5% सापेक्षिक आर्द्रता पर 24 घंटे तक कंडीशन किया गया। तत्पश्चात, फिल्मों को 10 मिमी × 100 मिमी आकार की स्ट्रिप्स के रूप में काटा गया। परीक्षण के दौरान 50 मिमी प्रारंभिक ग्रिप दूरी और 50 मिमी/मिनट की खिंचाव गति रखी गई। प्रत्येक नमूने पर तीन बार परीक्षण दोहराया गया और औसत मान की गणना की गई (तनवर एट अल., 2021)। तन्यता शक्ति की गणना निम्न समीकरणों द्वारा की गई —

$$\text{तन्यता शक्ति (MPa)} = \frac{\text{अधिकतम भार (N)}}{\text{प्रारंभिक अनुप्रस्थ क्षेत्रफल} (mm^2)} \quad \text{..............................(1)}$$

इस परीक्षण से प्राप्त मानों के आधार पर फिल्मों की दृढ़ता का मूल्यांकन किया गया। उच्च तन्यता शक्ति यह दर्शाती है कि फिल्म में पॉली लैक्टिक एसिड और सेल्युलोज के बीच मजबूत अंतःआणविक बंध स्थापित हुए हैं.

2.7 नमी अवरोधकता परीक्षण

विकसित फिल्मों की जल वाष्प पारगम्यता का निर्धारण ASTM E-96 की संशोधित विधि (कुमार एट अल., 2021) के अनुसार किया गया। परीक्षण से पूर्व नमूनों को 55% सापेक्षिक आर्द्रता (RH) पर 24 घंटे तक कंडीशन किया गया। प्रारंभ में 10 ग्राम सिलिका जेल से भरे एल्यूमिनियम कप लिए गए, जिन पर 25 सेमी^{2} क्षेत्रफल की फिल्में सावधानीपूर्वक सील की गईं। इसके बाद इन कपों को सोडियम क्लोराइड (NaCl) के संतृप्त विलयन द्वारा बनाए गए 75% RH वाले डिसिकेटर में सुरक्षित रूप से रखा गया। डिसिकेटर को 25°C पर नियंत्रित तापमान वाले ओवन के अंदर रखा गया। फिल्मों का भार हर 24 घंटे के अंतराल पर 8 दिनों तक मापा गया। समय के साथ भार परिवर्तन (Δm) के आधार पर जल वाष्प संचरण दर (Water Vapor Transmission Rate - WVTR) की गणना की गई, जो निम्न समीकरण द्वारा व्यक्त की जाती है —

$$WVTR\ (g\ day^{-1} mm^{-2}) = \frac{\Delta m}{\Delta t\ x\ A} \quad \text{..................................(2)}$$

जहाँ, Δm= भार में परिवर्तन (g),
Δt= समय अंतराल (दिन),
A = फिल्म का संपर्क क्षेत्रफल (mm^2)।

प्राप्त WVTR के मान से जल वाष्प पारगम्यता का निर्धारण निम्न समीकरण द्वारा किया गया —

$$WVP\ (g\ mm\ day^{-1} mm^{-2} kPa^{-1}) = \frac{WVTR\ x\ X}{\Delta p} \quad \text{.........................(3)}$$

जहाँ, Δp = फिल्म सतह के नीचे और ऊपर के बीच जल वाष्प दाब का अंतर (kPa),
X = फिल्म की औसत मोटाई (mm)।

3. परिणाम एवं चर्चा

इस अध्ययन में अनानास के छिलके से सेल्युलोज का सफल निष्कर्षण कर पॉली लैक्टिक एसिड (PLA) के साथ मिलाकर एक सतत और जैव-अवक्रमणीय फिल्म विकसित की गई। प्राप्त परिणामों से यह स्पष्ट हुआ कि अनानास छिलका से प्राप्त सेल्युलोज न केवल उच्च उपज देता है बल्कि विकसित फिल्म में यांत्रिक दृढ़ता, पारदर्शिता और जैव-अवक्रमणीयता जैसे वांछनीय गुण भी प्रदर्शित करता है।

3.1 अनुकूलित सेल्युलोज़ के भौतिक एवं रासायनिक गुण

अनुसंधान के दौरान अनानास के छिलके से प्राप्त सेल्युलोज़ का गहन विश्लेषण किया गया, जिसके प्रमुख भौतिक-रासायनिक मान नीचे दिए गए हैं:

तालिका 1. अनुकूलित सेल्युलोज़ के भौतिक-रासायनिक गुण

गुणधर्म	मान
घुलनशीलता सूचकांक (%)	1.93
रंग अंतर (ΔE)	34.95
क्रिस्टलीयता सूचकांक (%)	75.8

घुलनशीलता सूचकांक (1.93%) से यह स्पष्ट होता है कि उपचारित सेल्युलोज़ पानी में लगभग अघुलनशील है। इसका अर्थ है कि NaOH और $NaClO_2$ उपचार के बाद इसकी संरचना अधिक स्थिर और सघन हो गई, जिससे यह नमी के प्रभाव से आसानी से प्रभावित नहीं होती। यह गुण बायोपॉलिमर निर्माण के लिए अत्यंत उपयुक्त है, क्योंकि अत्यधिक घुलनशील सेल्युलोज़ फिल्म की मजबूती को कम करता है।

रंग अंतर (34.95) इंगित करता है कि रासायनिक उपचारों के बाद सेल्युलोज़ का रंग गहरे भूरे से हल्के पीले-सफेद में परिवर्तित हुआ। यह परिवर्तन लिग्निन और अन्य वर्णक के हटने के कारण हुआ, जिससे सेल्युलोज़ की शुद्धता और पारदर्शिता दोनों में सुधार हुआ।

अनानास छिलका | क्षार उपचारित अनानास छिलका | अनानास छिलका सेल्यूलोज

चित्र 1: अनानास छिलके से सेल्यूलोज़ निष्कर्षण की विभिन्न अवस्थाएँ

क्रिस्टलीयता सूचकांक (75.8%) यह दर्शाता है कि ब्लीचिंग के बाद सेल्युलोज़ की अणुगठना उच्च स्तर की है। उच्च क्रिस्टलीयता का अर्थ है कि सेल्युलोज़ अणु व्यवस्थित और घने रूप में उपस्थित हैं, जो फिल्म की यांत्रिक शक्ति (mechanical strength) को बढ़ाने में सहायक होते हैं। यह मान अन्य प्राकृतिक फाइबरों जैसे केले (72–74%) और गन्ना बगास (70–73%) से थोड़ा अधिक पाया गया, जिससे यह निष्कर्ष निकलता है कि अनानास छिलका आधारित सेल्युलोज़ बेहतर संरचनात्मक स्थिरता रखता है।

3.2 विकसित फिल्म के भौतिक गुण

प्राप्त सेल्युलोज़ को पॉलीलैक्टिक एसिडके साथ मिलाकर जैव-अवक्रमणीय फिल्म विकसित की गई। विकसित फिल्म के प्रमुख गुण निम्नलिखित रहे:

तालिका 2. अनुकूलित विकसित फिल्म के भौतिक गुण

गुणधर्म	मान (Value)
तन्य शक्ति (MPa)	63.45
मोटाई (mm)	1.0

फिल्म की तन्य शक्ति (63.45 MPa) पारंपरिक बायोडिग्रेडेबल फिल्मों की तुलना में उच्च पाई गई, जो यह दर्शाती है कि सेल्युलोज़ और PLA का मिश्रण उत्कृष्ट इंटरफेसियल बंधन (interfacial bonding) प्रदान करता है। उच्च तन्य शक्ति का अर्थ है कि फिल्म पर्याप्त रूप से मजबूत है और पैकेजिंग उपयोगों के दौरान आसानी से नहीं फटती।

फिल्म की मोटाई 1.0 मिमी पाई गई, जो समान रूप से वितरित और नियंत्रित थी। यह समान मोटाई दर्शाती है कि कास्टिंग प्रक्रिया सफल रही और मिश्रण में कोई चरण पृथक्करण नहीं हुआ। फिल्म का स्वरूप चिकना, हल्का पारदर्शी और लचीला था। इसकी सतह पर किसी प्रकार की दरार या बुलबुला नहीं देखा गया, जिससे यह स्पष्ट होता है कि से ल्युलोज़ के रेशे समान रूप से फैल गए थे।

3.3 विकसित फिल्म की जैव-अवक्रमण दर

फिल्म की जैव-अवक्रमण क्षमता का मूल्यांकन मृदा-दफन परीक्षण के माध्यम से किया गया, जिसमें फिल्म के नमूनों को मिट्टी में निश्चित समयांतरालों (0, 1, 3 और 5 सप्ताह) के लिए दफन किया गया। प्रारंभिक (0 सप्ताह) अवस्था में फिल्म नई और पूर्णतः अखंड स्थिति में पाई गई। एक सप्ताह के बाद फिल्म की सतह पर हल्का खुरदरापन और किनारों पर टूटने के प्रारंभिक संकेत देखे गए। तीसरे सप्ताह तक फिल्म की सतह पर स्पष्ट दरारें एवं रंग में परिवर्तन दिखाई दिए, जो अपघटन प्रक्रिया के सक्रिय होने का संकेत था। पाँचवें सप्ताह के अंत तक फिल्म का अधिकांश भाग मिट्टी में विलय हो गया और केवल कुछ अवशेष ही शेष रहे। संपूर्ण परीक्षण अवधि के दौरान लगभग 47% जैव-अवक्रमण दर्ज किया गया। यह परिणाम इस तथ्य को इंगित करता है कि विकसित फिल्म प्राकृतिक परिस्थितियों में प्रभावी रूप से अपघटित होकर पर्यावरण में बिना किसी हानिकारक अवशेष के विलीन हो जाती है। इसके अतिरिक्त, सेल्युलोज़ की उपस्थिति ने अपघटन प्रक्रिया को गति प्रदान की, क्योंकि यह सूक्ष्मजीवों के लिए कार्बन स्रोत के रूप में कार्य करती है। फिल्म का अपघटन दर अन्य PLA-आधारित बायोपॉलिमर फिल्मों के तुलनीय पाया गया, जो इसके पर्यावरण-अनुकूल उपयोग की संभावनाओं को रेखांकित करता है।

4. निष्कर्ष

अध्ययन से यह स्पष्ट हुआ कि अनानास के छिलके से उच्च गुणवत्ता वाला सेल्युलोज (27.53%) सफलतापूर्वक निकाला गया, जिसे पॉली लैक्टिक एसिड (PLA) के साथ संयोजित कर एक ऐसी जैव-

अवक्रमणीय फिल्म विकसित की गई जो पारदर्शी, लचीली, यांत्रिक रूप से मजबूत और नमी अवरोधक गुणों से युक्त है। पाँच सप्ताह की मृदा-दफन प्रक्रिया में 47% जैव-अवक्रमण प्राप्त होने से यह सिद्ध हुआ कि यह फिल्म प्राकृतिक रूप से विघटित होकर पर्यावरण को प्रदूषित नहीं करती। इसके अतिरिक्त, यदि इसमें प्राकृतिक एंटीऑक्सीडेंट्स (जैसे लौंग तेल, ग्रीन टी या रोज़मेरी एक्सट्रैक्ट) सम्मिलित किए जाएँ, तो इसे सक्रिय पैकेजिंग के रूप में भी प्रयोग किया जा सकता है। संपूर्ण रूप से यह तकनीक “वेस्ट टू वेल्थ” की दिशा में एक महत्वपूर्ण नवाचार है, जो कृषि अपशिष्ट के उपयोग से सतत एवं पर्यावरण-अनुकूल पैकेजिंग उद्योग को बढ़ावा देने में सहायक सिद्ध होगी।

संदर्भ

Aryan, Y., Yadav, P. & Samadder, S. R. 2019. Life Cycle Assessment of the existing and proposed plastic waste management options in India: A case study. Journal of Cleaner Production, 211, 1268-1283. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.11.236

Awasthi, M. K., Azelee, N. I. W., Ramli, A. N. M., Rashid, S. A., Abdul Manas, N. H., Dailin, D. J. and Ravindran, B. 2022. Microbial biotechnology approaches for conversion of pineapple waste into emerging source of healthy food for sustainable environment. International Journal of Food Microbiology, 373, 109714. https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2022.109714

Bhandari, K., Roy Maulik, S. & Bhattacharyya, A. R. 2020. Synthesis and characterization of microcrystalline cellulose from rice husk. J. Inst. Eng. India Ser. E., 101(2): 99-108. https://doi.org/10.1007/s40034-020-00160-7

Hossain, K. M. Z., Felfel, R. M., Ogbilikana, P. S., Thakker, D., Grant, D. M., Scotchford, C. A. & Ahmed, I. 2018. Single Solvent-Based Film Casting Method for the Production of Porous Polymer Films. Macromol. Mater. Eng., 303(4): 1700628-32. https://doi.org/10.1002/mame.201700628

Kumar, P., Tanwar, R., Gupta, V., Upadhyay, A., Kumar, A. & Gaikwad, K. K. 2021. Pineapple peel extract incorporated poly (vinyl alcohol)-corn starch film for active food packaging: Preparation, characterization and antioxidant activity. Int. J. Biol. Macromol., 187: 223-231. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2021.07.136

Mala, T., Piayura, S. & Itthivadhanapong, P. 2024. Characterization of dried pineapple (Ananas comosus L.) peel powder and its application as a novel functional food ingredient in cracker product. Future Foods, 9, 100322. https://doi.org/10.1016/j.fufo.2024.100322

Martucci, J. F. & Ruseckaite, R. A. 2009. Biodegradation of three-layer laminate films based on gelatin under indoor soil conditions. Polymer Degradation and Stability, 94(8), 1307–1313. https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2009.03.018.

Reshmy, R., Philip, E., Madhavan, A., Sindhu, R., Pugazhendhi, A., Binod, P., Sirohi, R., Awasthi, M.K., Tarafdar, A. & Pandey, A., 2021. Advanced biomaterials for sustainable applications in the food industry: updates and challenges. Environ. Pollut. 283, 117071. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.117071

Shaikh, H. M., Shaikh, S. & Pathak, P. D. 2021. Biodegradable polymer-based packaging materials: Recent advances and future outlook. Materials Today: Proceedings, 46, 10234–10241.

Tanwar, R., Gupta, V., Kumar, P., Kumar, A., Singh, S. & Gaikwad, K. K. 2021. Development and characterization of PVA-starch incorporated with coconut shell extract and sepiolite clay as an antioxidant film for active food packaging applications. Int. J. Biol. Macromol., 185: 451-461. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2021.06.179

बाजरा प्रसंस्करण एवं मूल्य संवर्धन द्वारा ग्रामीण महिलाओं का सशक्तिकरण:कृषि विज्ञान केंद्र प्रशिक्षण का एक प्रकरण अध्ययन

रुपेंद्र कौर*, मंजू बाला, राजेश कुमार, अरविंद कुमार अहलावत और अमित नाथ

कृषि विज्ञान केंद्र , क्षेत्रीय केंद्र, सीफेट, अबोहर-152116

*ईमेल: ext_rupender@rediffmail.com

सारांश

बाजरा के कटाई-पश्चात प्रसंस्करण एवं मूल्य संवर्धन को बढ़ावा देना न केवल पोषण सुरक्षा एवं कुपोषण उन्मूलन की दिशा में उपयोगी है, बल्कि यह ग्रामीण समुदायों में सतत आजीविका और उद्यमिता विकास के लिए भी अत्यंत महत्वपूर्ण है। बाजरा से मूल्यवर्धित पौष्टिक एवं कार्यात्मक खाद्य उत्पादों का निर्माण, बढ़ती हुई उपभोक्ता मांग को पूरा करने के साथ-साथ संयुक्त राष्ट्र के सतत विकास लक्ष्यों की प्राप्ति में भी योगदान कर सकता है। इसी उद्देश्य से, आईसीएआर-केंद्रीय फसल कटाई पश्चात अभियांत्रिकी एवं प्रौद्योगिकी संस्थान (सीआईपीएचईटी), लुधियाना एवं केवीके, फाजिल्का द्वारा संयुक्त रूप से ग्रामीण महिलाओं के लिए एक कौशल विकास प्रशिक्षण कार्यक्रम आयोजित किया गया। इस प्रशिक्षण का मुख्य फोकस बाजरा की खेती, पोषण संबंधी महत्व तथा प्रसंस्करण एवं मूल्य संवर्धन तकनीकों पर था। कुल 26 महिला कृषकों ने इस कार्यक्रम में भाग लेकर बाजरा आधारित विभिन्न उत्पादों जैसे– रेडी मिक्स, हेल्थ मिक्स, लड्डू, पंजीरी (विंटर सुपरफूड मिक्स), नमकीन, कुकीज़, मफिन एवं पफ तैयार करने की तकनीकें सीखी। प्रशिक्षण उपरांत किए गए अनुवर्ती आकलन से ज्ञात हुआ कि प्रतिभागियों में आत्मनिर्भरता और उद्यमिता की भावना में उल्लेखनीय वृद्धि हुई। विशेष रूप से, एक महिला प्रशिक्षु ने न केवल इन तकनीकों को अपनाया बल्कि स्वयं की बाजरा प्रसंस्करण इकाई भी स्थापित की। साथ ही, उन्होंने अपने ब्रांड "ग्रीन पत्ती" के लिए भारतीय खाद्य सुरक्षा एवं मानक प्राधिकरण से पंजीकरण संख्या 30231104114903348 प्राप्त कर सफलतापूर्वक उत्पादों की लेबलिंग एवं विपणन प्रारंभ किया।यह अध्ययन दर्शाता है कि केवीके स्तर पर आयोजित ऐसे प्रशिक्षण कार्यक्रम ग्रामीण महिलाओं को आर्थिक रूप से सशक्त बनाने, उद्यमिता को प्रोत्साहन देने तथा स्थानीय स्तर पर पोषण एवं आजीविका सुरक्षा सुनिश्चित करने में प्रभावी सिद्ध हो सकते हैं।

संकेत शब्द: उद्यमिता, कृषि-प्रसंस्करण, बाजरा, महिला सशक्तिकरण, मूल्य संवर्धन, केवीके प्रशिक्षण, ग्रामीण विकास

प्रस्तावना

स्थानीय स्तर पर उपलब्ध फलों और सब्जियों के मूल्य संवर्धन और प्रसंस्करण के क्षेत्र में महिलाओं की उद्यमशीलता क्षमता ने अपनी छाप छोड़ी है। अब समय आ गया है कि फसल कटाई के बाद होने वाले नुकसान को कम करने और लघु उद्यमों की आर्थिक स्थिति को बेहतर बनाने के लिए महिलाओं की उद्यमशीलता को बड़े पैमाने पर बढ़ावा दिया जाए और उसका उपयोग किया जाए। इसी उद्देश्य से, कृषि विज्ञान केंद्र

महिलाओं के लिए लघु उद्यम स्थापित करने के उद्देश्य से कृषक महिलाओं के उत्थान के लिए कार्य कर रहा है। बाजरा के मूल्य संवर्धन और प्रसंस्करण के ज्ञान और उद्यमशीलता कौशल को बढ़ाने और ग्रामीण महिलाओं की पोषण सुरक्षा के साथ-साथ आय सृजन सुनिश्चित करने के लिए, कृषि विज्ञान केंद्र, फाजिल्का ने अंतर्राष्ट्रीय बाजरा वर्ष 2023 के अंतर्गत बाजरा की खेती और मूल्य संवर्धन पर विभिन्न प्रशिक्षण आयोजित किए। बाजरा के कई स्वास्थ्य लाभ हैं, जिनमें रक्त शर्करा और कोलेस्ट्रॉल के स्तर को कम करने में मदद करना शामिल है। ये ग्लूटेन-मुक्त भी होते हैं, इसलिए ये सीलिएक रोग या ग्लूटेन के प्रति संवेदनशीलता वाले लोगों के लिए अच्छे हैं। इन प्रशिक्षणों से श्रीमती करमजीत कौर को लाभ हुआ। वह फाजिल्का जिले के डांगर खेड़ा गाँव की 40 वर्षीय महिला किसान हैं। उनकी शिक्षा केवल आठवीं पास है। आज, एक स्वतंत्र किसान के रूप में, वह अपने परिवार को बाजरे से पौष्टिक और स्वस्थ आहार प्रदान करने और अपनी जैसी महिलाओं के लिए रोजगार के अवसर प्रदान करने में प्रसन्न हैं। इससे पहले, श्रीमती करमजीत कौर एक पारंपरिक किसान थीं, जिनके पास 1 हेक्टेयर से भी कम ज़मीन थी, और वे अपने परिवार का भरण-पोषण करने के लिए सदियों पुरानी पारंपरिक खेती करती थीं और गेहूँ और कपास उगाती थीं। कृषि-प्रसंस्करण और कटाई-पश्चात तकनीक के बारे में कम जानकारी होने के कारण, उन्हें बाजरे और उनके उत्पादों के विकास के बारे में कोई जानकारी नहीं थी।

महिला उद्यमियों को बढ़ावा देने के लिए केवीके फाजिल्का और आईसीएआर-सीआईपीएचईटी लुधियाना के एफजीओपी प्रभाग का हस्तक्षेप। वर्ष 2022 के दौरान, श्रीमती करमजीत कौर स्वरोजगार हेतु कौशल विकास प्रशिक्षण के लिए केवीके आईं; वहाँ उन्हें महिलाओं की पोषण सुरक्षा की माँग के अनुसार बाजरा-आधारित उत्पादों का मूल्यवर्धन सीखने और शुरू करने की सलाह दी गई। केवीके, फाजिल्का ने आईसीएआर-केंद्रीय फसल कटाई पश्चात अभियांत्रिकी एवं प्रौद्योगिकी संस्थान (सीआईपीएचईटी), लुधियाना के खाद्य अनाज और तिलहन प्रसंस्करण प्रभाग के साथ मिलकर बाजरा उत्पादन, पोषण और मूल्य संवर्धन पर केंद्रित प्रशिक्षण, प्रदर्शन और अन्य विस्तार गतिविधियाँ आयोजित कीं। प्रशिक्षण, प्रदर्शन, विस्तार साहित्य और प्रदर्शन यात्राओं के माध्यम से प्रोटीन, कैल्शियम, आयरन, पोटेशियम, फाइबर और अन्य आवश्यक सूक्ष्म पोषक तत्वों के भंडार के रूप में बाजरा के पोषण संबंधी महत्व को बढ़ावा देने के लिए एक कठोर अभियान चलाया गया है। और उन्होंने केवीके फाजिल्का में प्रशिक्षण के दौरान रेडी-मिक्स, हेल्थ मिक्स, लड्डू, पंजीरी, स्नैक्स, कुकीज़, मफिन और पफ जैसे मूल्यवर्धित बाजरा उत्पाद बनाने में कौशल हासिल करने का अनुभव प्राप्त किया। अब श्रीमती करमजीत कौर विभिन्न प्रकार के बाजरे के लड्डू बनाने में लगी हुई हैं। श्रीमती करमजीत कौर एक गृहिणी थीं जिनके पास नियमित आय का कोई स्रोत नहीं था; उन्होंने बाजरा के मूल्य संवर्धन में एक अवसर देखा। स्थानीय समुदाय पारंपरिक रूप से दर्द से राहत के लिए हल्दी और बाजरे के मिश्रण का इस्तेमाल करते थे, और यह देखा गया कि इस महिला ने इन कच्ची सामग्रियों को मिलाकर अपने आविष्कार की शुरुआत की। यह देखा गया कि उन्होंने स्थानीय समुदायों द्वारा इस्तेमाल की जाने वाली दवा के रूप में दर्द से राहत के लिए बाजरे के मिश्रण में कच्ची हल्दी मिलाकर अपने आविष्कार की शुरुआत की। उनके उत्पादों की लागत आवश्यकता और प्राप्त ऑर्डर के अनुसार उपयोग की जाने वाली सामग्री की विविधता पर आधारित है; उन्होंने उत्पाद तैयार करने के लिए देसी घी का इस्तेमाल किया।

वह उक्त पाठ्यक्रम में भाग लेने वालों में से एक थीं। यह तकनीक उन्हें गुणवत्तापूर्ण उत्पाद विकसित करने में मदद करती है। उन्हें उपभोक्ता सुरक्षा के लिए स्वास्थ्य और स्वच्छता प्रोटोकॉल का पालन करने की सलाह दी गई थी।

केवीके के प्रयासों से पहले आने वाली चुनौतियाँ

i. बाजरे के सेवन के स्वास्थ्य लाभों के बारे में जागरुकता की कमी।

ii. घरेलू स्तर पर बाजरे की बुनियादी प्रसंस्करण तकनीकों के बारे में जागरुकता की कमी।

iii. बाजरे के विभिन्न प्रकार के मूल्यवर्धित उत्पादों के बारे में जागरुकता की कमी।

iv. स्थापना के बारे में जानकारी का अभाव

v. विपणन योग्य उत्पादों, लेबलिंग और पैकिंग के बारे में जानकारी का अभाव।

vi. घर से उत्पाद बेचने के तरीके के बारे में जानकारी का अभाव।

vii. विकसित उत्पादों के आर्थिक विश्लेषण के बारे में जानकारी का अभाव।

viii. वित्तीय सहायता का अभाव।

ix. खाद्य पदार्थों की बिक्री से संबंधित स्वास्थ्य और स्वच्छता संबंधी मुद्दों के बारे में जानकारी का अभाव।

x. भारतीय खाद्य सुरक्षा और मानक प्राधिकरण लाइसेंस और उसके महत्व के बारे में जानकारी का अभाव।

सामग्री एवं विधि

बाजरा प्रौद्योगिकियों की खेती, पोषण और मूल्य संवर्धन पर प्रशिक्षण कार्यक्रम शिक्षित, बेरोजगार किसानों, कृषक महिलाओं और ग्रामीण युवाओं पर केंद्रित था, जो स्वरोजगार में रुचि रखते हैं। यह अध्ययन आईसीएआर केवीके, फाजिल्का, पंजाब में आयोजित किया गया था। इस प्रशिक्षण में छब्बीस प्रशिक्षुओं ने भाग लिया; उनमें से 25 महिलाएं और 1 पुरुष थे। प्रशिक्षण का अनुवर्ती अध्ययन किया गया और पाया गया कि प्रशिक्षुओं में से एक, श्रीमती। करमजीत कौर ने इस तकनीक को अपनाया और केवीके के गृह विज्ञान विशेषज्ञ द्वारा विकसित मानकीकृत नुस्खों की मदद से अपने घरेलू स्तर पर मूल्यवर्धित उत्पाद तैयार करना शुरु किया।

2.1 प्रौद्योगिकी हस्तांतरण के लिए अपनाई गई पद्धति

i. व्यावहारिक प्रशिक्षण
ii. व्यक्तिगत चर्चा
iii. मोबाइल परामर्श
iv. विधि प्रदर्शन
v. समूह बैठकें
vi. जनसंचार माध्यम
vii. वैज्ञानिकों का प्रसंस्करण इकाई का दौरा।
viii. किसानों/कृषक महिलाओं का केवीके का दौरा।

ix. साहित्य उपलब्ध कराया गया
x. बाजरा प्रसंस्करण के लिए उपलब्ध मशीनरी के बारे में जानकारी।
xi. विभिन्न विभागों/संगठनों द्वारा आयोजित विभिन्न प्रदर्शनियों के माध्यम से जानकारी प्रदान की गई।

चित्र 1 महिला उद्यमी को प्रमाण पत्र पुरस्कार

इन सभी तकनीकों का उपयोग विभिन्न प्रकार के बाजरा-आधारित उत्पादों, विकसित उत्पादों की शेल्फ लाइफ के समाधान, कम लागत वाले नुस्खों, भूनने और भिगोने, तथा उच्च पोषण मूल्यों के लिए सुखाने और भूनने की विधियों पर तकनीकी जानकारी प्रदान करने के लिए किया गया। पैकिंग और लेबलिंग आदि का महत्व।

3. परिणाम और चर्चा

केवीके द्वारा प्रशिक्षण आयोजित करने के दो महीने के भीतर, उन्होंने बाजरा आधारित उत्पादों के उत्पादन के लिए अपनी लघु-स्तरीय इकाई स्थापित की और नवंबर 2023 में पंजाब राज्य ग्रामीण आजीविका के सहयोग से खाद्य सुरक्षा विभाग, नई दिल्ली से भारतीय खाद्य सुरक्षा एवं मानक प्राधिकरण लाइसेंस (30231104114903348) प्राप्त किया। वह अपने समूह के सदस्यों को इस उद्यम में शामिल करने के लिए बहुत उत्सुक थीं और भविष्य में और अधिक महिलाओं को शामिल करके इस व्यवसाय को नियमित आय के स्रोत के रूप में स्थापित करना चाहती हैं। प्रशिक्षण और उच्च-स्तरीय प्रेरणा ने उन्हें बाजरा-आधारित रेडी मिक्स, हेल्थ मिक्स, बाजरा के लड्डू, पंजीरी, स्नैक्स, कुकीज़, मफिन, पफ आदि का अपना उद्यम शुरू करने के लिए प्रोत्साहित किया। उन्होंने लगभग एक क्विंटल बाजरे के लड्डू का उत्पादन किया और विभिन्न प्रदर्शनियों और स्थानीय बाजारों में इसका विपणन किया और अब उन्हें होम डिलीवरी के ऑर्डर मिल रहे हैं। केवीके ने सोशल

मीडिया के माध्यम से उनके प्रचार में भी भूमिका निभाई और दी गई नियमित परामर्श उनके व्यवसाय निर्माण के लिए सहायक रही।

3.1 आर्थिक लाभ

श्रीमती करमजीत कौर ने 5,000 रुपये के शुरुआती निवेश के साथ शुरुआत की और बाजरा, कोदो और रागी का उपयोग करके 10 किलो बाजरा आधारित लड्डू बनाए। उस समय स्थानीय बाजार में केवल 10-12 पैकेट ही बिकते थे, और बाकी चखने के लिए आस-पड़ोस में बाँट दिए जाते थे, क्योंकि यह उत्पाद उस क्षेत्र के लिए नया था और स्थानीय लोगों को बहुत पसंद नहीं आया। उन्होंने यह समस्या एक कृषि विज्ञान केंद्र (केवीके) विशेषज्ञ के सामने रखी; उन्हें बाजरा आधारित उत्पाद तैयार करने और उसे परिष्कृत करने की सही प्रक्रिया के बारे में मार्गदर्शन दिया गया, और बाजरा आधारित लड्डू बनाने की विधि प्रशिक्षण के दौरान अधिकांश लोगों की राय के अनुसार तैयार की गई, और उन्होंने मार्गदर्शन के अनुसार सफलतापूर्वक बाजरा आधारित लड्डू तैयार किए। वर्ष 2023 के दौरान, एक केवीके विशेषज्ञ ने उन्हें विभिन्न किसान मेलों में भाग लेने के लिए प्रेरित किया। उन्होंने मेले में 10 लाख रुपये के निवेश के साथ अपने मूल्यवर्धित बाजरा उत्पादों को प्रदर्शित करने के लिए एक स्टॉल लगाकर भाग लिया। 5,000-6,000 रुपये की लागत से शुरू हुए इस व्यवसाय में, उनके उत्पादों को अच्छी कीमत, यानी 10,000 रुपये, मिली। इस पहल से श्रीमती करमजीत कौर में आत्मविश्वास जगा। इसके बाद उन्होंने स्थानीय बाज़ार के साथ-साथ एक अलग जगह पर भी स्टॉल लगाया।

3.2 प्रशिक्षण कार्यक्रम और केवीके के प्रयासों का नवीन प्रभाव

एक लघु-स्तरीय इकाई की स्थापना और उससे होने वाली आय के कारण, अब वह अपनी इकाई में स्व-नियोजित हो गई हैं। उन्होंने अपने ही गाँव के 5 मज़दूरों को काम पर लगाया है, और कड़ी मेहनत करके, वह अधिक उत्पाद तैयार कर पा रही हैं। वह दिन-प्रतिदिन के सभी कामों और मार्केटिंग में सक्रिय रूप से शामिल हैं। अपने प्रवास के कारण, अब वह दूसरों द्वारा तैयार किए गए उत्पादों में इस्तेमाल होने वाले महत्वपूर्ण अवयवों की पहचान कर सकती हैं। उन्होंने लगभग 15,000-20,000 रुपये की मासिक आय के माध्यम से अपने परिवार की आजीविका सुनिश्चित की। मार्केटिंग के लिए उनके उत्पादों के लेबल पर ग्रीन पत्ती का एक व्यावसायिक ब्रांड नाम दिया गया है।

उपरोक्त समन्वित प्रयासों के परिणामस्वरूप, एक पूर्ण पैमाने पर प्रसंस्करण और उत्पादन इकाई स्थापित की गई है। उन्होंने सावधानीपूर्वक एक कम लागत वाला पैकेज, रेसिपी और प्रसंस्करण प्रोटोकॉल विकसित किया है। श्रीमती सुदेश, केवीके द्वारा अपने पारंपरिक ज्ञान और तकनीकों के आधार पर, आधुनिक विज्ञान और प्रौद्योगिकी इनपुट, क्षेत्र में कच्चे माल की उपलब्धता और नवीन उत्पादों की बाजार मांग के साथ उन्नत, सफल उद्यमियों - केवीके पहल 11 के लिए प्रसंस्कृत उत्पादों की पैकिंग का काम कर रही हैं। विकसित उत्पादों का अब उनके द्वारा सफलतापूर्वक विपणन किया जा रहा है, जिससे स्रोत पर ही मूल्यवर्धन के दृष्टिकोण से अधिकतम लाभ सुनिश्चित हो रहा है - इस प्रकार बिचौलियों पर निर्भरता कम हो रही है, कटाई के बाद के नुकसान कम हो रहे हैं, और परिवहन लागत और समय की बचत हो रही है। उनकी सफलता की कुंजी उनकी सीखने और समझने की उत्सुकता, कड़ी मेहनत और सकारात्मक दृष्टिकोण है।

न प्रयासों और प्रशिक्षण के परिणामस्वरूप, इस समूह ने स्वयं को एक उत्पादक समूह के रूप में संगठित किया और उन्हें राष्ट्रीय ग्रामीण आजीविका मिशन के तहत ग्राइंडिंग मशीन उपलब्ध कराई गई, जिससे उनकी उत्पादन क्षमता और आय सृजन में और वृद्धि हुई।

निष्कर्ष

केवीके वैज्ञानिकों के प्रोत्साहन और प्रेरणा से, उन्होंने अपने रास्ते की सभी बाधाओं को पार कर लिया है, और वह दिन-प्रतिदिन प्रगति कर रही हैं। उनका आत्मविश्वास भी काफी बढ़ा है। उनकी कहानी समाज के सभी सदस्यों के लिए प्रेरणा और प्रोत्साहन का स्रोत है। उनकी सफलता की कहानी को विभिन्न प्रिंट और इलेक्ट्रॉनिक मीडिया, जैसे समाचार पत्रों (हिंदी) और स्थानीय टीवी चैनलों द्वारा कवर किया गया है। कृषि विज्ञान केंद्र, फाजिल्का से प्रशिक्षण और मार्गदर्शन प्राप्त कर उन्होंने एक प्रगतिशील किसान और कृषि उद्यमी बनने की दिशा में महत्वपूर्ण प्रगति की। अब वह एक प्रतिष्ठित प्रगतिशील किसान हैं और अपने गाँव में मूल्यवर्धित उत्पादों की "ग्रीन पट्टी" इकाई की मालिक हैं। इसी क्षेत्र से उन्हें मासिक आय प्राप्त होती थी।

संदर्भ

Eshwarappa, G. (2006). Food Processing and Value Addition Technology: A Means for Empowering Rural Women. Paper presented at the International Conference on Social Science Perspectives in Agricultural Research and Development, Indian Agricultural Research Institute (IARI), New Delhi, India, p. 295.

Gupta, V. S. (2008). Capacity building for effective empowerment of women. Kurukshetra, 50(8), 4.

Malbasari, Rupati, & Hiremath, U. S. (2016). Capacity building of rural women through training. International Journal of Home Science, Extension and Communication Management, 3(1), 8–14.

Nazir, T., Wani, N., & Dar, M. A. (2012). Impact of Krishi Vigyan Kendras on the empowerment of rural women. Researcher, 4(12), 30–33.

NOTES

भा.कृ.अनु.प. - केन्द्रीय कृषि अभियांत्रिकी संस्थान
ICAR - Central Institute of Agricultural Engineering
ICAR

भाकृअनुप
ICAR

निदेशक

भा.कृ.अनु.प. - केन्द्रीय कृषि अभियांत्रिकी संस्थान

नबीबाग, बैरसिया रोड, भोपाल-462038

ईमेल: director.ciae@icar.org.in, directorciae@gmail.com

वेबसाइट: https://ciae.res.in, दूरभाष: 91-755-2521001

Design: Kavita Offset, Bhopal: 9584793722