

## नियंत्रित पर्यावरण कृषि में आधुनिक प्रगति: सतत खाद्य सुरक्षा के लिए हाइड्रोपोनिक वर्टिकल फार्मिंग प्रणालियों का अनुकूलन

विपिन कुमार<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>बी.एससी (ऑनर्स) एग्रीकल्चर, आर.एस.एम. पी.जी. कॉलेज धामपुर, बिजनौर

\*E-mail: yaduvanshivipin343@gmail.com

नियंत्रित पर्यावरण कृषि और हाइड्रोपोनिक वर्टिकल फार्मिंग का संयोजन आधुनिक कृषि विज्ञान में एक युगप्रवर्तक बदलाव का प्रतिनिधित्व करता है। यह तकनीक भूमि क्षरण, जल की कमी और जलवायु परिवर्तनशीलता की बढ़ती चुनौतियों का प्रभावी समाधान प्रस्तुत करती है। यह लेख वर्टिकल फार्मिंग को संचालित करने वाले इंजीनियरिंग और पादप शारीरिक सिद्धांतों का एक उच्च-स्तरीय, गहन तकनीकी अवलोकन प्रदान करता है। इसके अंतर्गत न्यूट्रिएंट फिल्म तकनीक, डीप वाटर कल्चर, और एयरोपोनिक प्रणालियों के साथ-साथ स्पेक्ट्रल वेवबैंड अनुकूलन, स्वचालन, और संसाधन-उपयोग दक्षता में हुए आधुनिक सुधारों का विश्लेषण किया गया है। विशेष रूप से भारतीय संदर्भ को ध्यान में रखते हुए, उच्च मूल्य वाली फसलों के उत्पादन के लिए इसकी स्केलेबिलिटी, ऊर्जा खपत और आर्थिक व्यवहार्यता का मूल्यांकन किया गया है।

### प्रस्तावना और सैद्धांतिक ढांचा

पारंपरिक खुले खेतों की कृषि को वर्तमान में मौसम के बदलते मिजाज, उपजाऊ मिट्टी के कटाव और प्रति व्यक्ति कृषि भूमि की निरंतर कमी जैसी अभूतपूर्व चुनौतियों का सामना करना पड़ रहा है। वर्ष 2050 तक लगभग 10 अरब तक पहुंचने वाली वैश्विक आबादी के लिए खाद्य सुरक्षा सुनिश्चित करने हेतु, कृषि विज्ञान को फसल उत्पादन को भूमि के क्षैतिज क्षेत्रफल की निर्भरता से मुक्त करना होगा।

नियंत्रित पर्यावरण कृषि लॉजिस्टिक्स- अनुकूलित खाद्य उत्पादन की दिशा में एक तकनीक-आधारित दृष्टिकोण है। पौधों को पूरी तरह से बंद संरचनाओं के भीतर रखकर, पर्यावरणीय कारकों-जैसे तापमान, सापेक्ष आर्द्रता, कार्बन डाइऑक्साइड, प्रकाश और पोषक तत्वों की



आपूर्ति-को सटीकता से नियंत्रित किया जाता है। जब इस व्यवस्था को मल्टी-टियर (बहु-स्तरीय) हाइड्रोपोनिक संरचनाओं के माध्यम से वर्टिकल फार्मिंग के साथ एकीकृत किया जाता है, तो भूमि-उपयोग की दक्षता में घातीय वृद्धि होती है।

### वर्टिकल मॉड्यूल में हाइड्रोपोनिक विन्यास

वर्टिकल फार्मिंग का मुख्य आधार बिना मिट्टी की खेती है, जहां पौधों की जड़ें सीधे या परोक्ष रूप से जलीय, पोषक तत्वों से भरपूर घोल के संपर्क में आती हैं। हाइड्रोपोनिक तंत्र का चयन ही पूरी संरचना की इंजीनियरिंग और ऊर्जा गतिशीलता को तय करता है।

#### 1. न्यूट्रिएंट फिल्म तकनीक

**कार्यप्रणाली:** इसमें पोषक तत्वों से भरपूर घोल की एक बहुत पतली धारा ("फिल्म") को एक निश्चित ढलान (आमतौर पर 1% से 2%) वाले गटर या चैनलों के माध्यम से पौधों की नग्न जड़ों के ऊपर लगातार प्रवाहित किया जाता है।

**कृषि संबंधी लाभ:** यह कम समय चक्र वाली और उथली जड़ों वाली पत्तेदार सब्जियों (जैसे- लैक्टुका सैटाइवा/सलाद पत्ता, पालक) के लिए अत्यधिक कुशल है। यह जड़ों के क्षेत्र में उच्च ऑक्सीजन की आपूर्ति सुनिश्चित करता है क्योंकि जड़ों का ऊपरी हिस्सा हवा के संपर्क में रहता है।

**जोखिम कारक:** बिजली गुल होने की स्थिति में यह प्रणाली बेहद संवेदनशील है; पंप खराब होने पर कुछ ही घंटों में जड़ें पूरी तरह सूख सकती हैं।



## ख. डीप वाटर कल्चर

**कार्यप्रणाली:** इसमें पौधों को पोषक तत्वों से भरे बड़े टैंकों या चैनलों (आमतौर पर 20 से 30 सेमी गहरे) में तैरते हुए राफ्ट्स पर लटका दिया जाता है, जहाँ जड़ों को लगातार हवा दी जाती है।

**कृषि संबंधी लाभ:** पानी की इतनी बड़ी मात्रा Air Line एक थर्मल बफर के रूप में Air Stone कार्य करती है, जो आसपास के तापमान के उतार-चढ़ाव के खिलाफ जड़ों के क्षेत्र के तापमान को स्थिर रखती है।

**जोखिम कारक:** जड़ों को सड़ने से बचाने और Pythium spp. (जड़ सड़न रोग) के प्रसार को रोकने के लिए एयर स्टोन या वेंचुरी इंजेक्टर्स के माध्यम से निरंतर कृत्रिम वातन की आवश्यकता होती है।



## एयरोपोनिक एकीकरण

**कार्य प्रणाली:** इस प्रणाली में पौधों की जड़ें एक बंद कक्ष में हवा में लटकी रहती हैं और उन पर समय-समय पर पोषक तत्वों के घोल की महीन बौछार की जाती है। हाई-प्रेसर एयरोपोनिक्स में 20 से 50  $\mu\text{m}$  के ड्रॉपलेट आकार को लक्षित किया जाता है।

**कृषि संबंधी लाभ:** जड़ों को अधिकतम ऑक्सीजन मिलने से उनकी चयापचय दर बढ़ जाती है, जिससे मानक हाइड्रोपोनिक्स की तुलना में फसल चक्र 30% तक तेज हो जाता है और पानी की खपत न्यूनतम होती है।



## फसल शरीर विज्ञान और पर्यावरण अनुकूलन

नियंत्रित पर्यावरण कृषि के तहत उच्च उत्पादकता प्राप्त करने के लिए फसल की विशिष्ट विकास अवस्थाओं के साथ सूक्ष्म-जलवायु का सटीक समन्वय आवश्यक है।

**क. फोटोबायोलॉजिकल ट्यूनिंग (द लाइट रेसिपी):** एक इनडोर वर्टिकल फार्म में सूर्य के प्रकाश को पूरी तरह से कृत्रिम प्रकाश, मुख्य रूप से लाइट एमिटिंग डायोड द्वारा प्रतिस्थापित किया जाता है।

**प्रकाश-संश्लेषण सक्रिय विकिरण:** यह 400 से 700 nm के वेवबैंड पर ध्यान केंद्रित करता है।

**स्पेक्ट्रल कस्टमाइजेशन:** नीला प्रकाश (~450 nm) रंध्रों को खोलने और पौधों के सघन वानस्पतिक विकास को बढ़ावा देता है। लाल प्रकाश (~660 nm) मुख्य प्रकाश-संश्लेषण तंत्र (फोटोसिस्टम I और II) को संचालित करता है। सुदूर-लाल प्रकाश (~730 nm) को पौधों की छाया से बचने की प्रतिक्रिया को प्रबंधित कर उनके फूलने के चक्र और बायोमास विभाजन को नियंत्रित करने के लिए चुनिंदा रूप से उपयोग किया जाता है।



**लक्षित मानक:** व्यावसायिक पत्तेदार सागों को 150 250  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  के फोटोसिंथेटिक फोटॉन फ्लक्स डेंसिटी की आवश्यकता होती है, जिसमें दैनिक प्रकाश इंटीग्रल 14 18  $\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \text{d}^{-1}$  के बीच होना चाहिए।

## ख. राइजोस्फीयर डायनामिक्स

जलीय वातावरण का सटीक प्रबंधन पोषक तत्वों के लॉकआउट (Nutrient lockout) और जड़ों के रोगजनकों को रोकता है।

| पैरामीटर       | अनुकूलतम सीमा  | कृषि संबंधी महत्व                                                                                                                   |
|----------------|----------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| pH             | 5.5 - 6.5      | यह सूक्ष्म और स्थूल तत्वों की जैव-उपलब्धता को नियंत्रित करता है (जैसे, pH \ 6.8 से ऊपर जाने पर आयरन/लोहे का अवक्षेपण होने लगता है)। |
| विद्युत चालकता | 1.2 - 2.5 dS/m | यह कुल घुले हुए लवणों को मापता है। उच्च EC ऑस्मोटिक तनाव पैदा करता है; कम EC से पोषक तत्वों की कमी होती है।                         |
| भंग ऑक्सीजन    | 6.0 - 8.0 mg/L | यह जड़ों के कोशिकीय श्वसन और सक्रिय आयन परिवहन प्रणालियों के लिए अत्यंत महत्वपूर्ण है।                                              |

**ग. वायु परिसंचरण और वाष्प दबाव घाटा:** उच्च घनत्व वाले वर्टिकल रैक्स में केवल सामान्य सापेक्ष आर्द्रता का मापन पर्याप्त नहीं है। इसके लिए वैज्ञानिक वाष्प दबाव घाटे की गणना करते हैं- जो पत्ती के आंतरिक वायु स्थानों के भीतर के जल वाष्प के दबाव और आसपास की हवा के दबाव के बीच का अंतर है।

- अनुकूलतम VPD: वानस्पतिक विकास के लिए 0.8 से 1.2 kPa I
- असंतुलन के जोखिम: यदि VPD बहुत कम (<0.5 kPa) है, तो वाष्पोत्सर्जन रुक जाता है, जिससे स्थानीय कैल्शियम की कमी हो जाती है (जैसे सलाद पत्ते में "टिप-बर्न")। यदि VPD बहुत अधिक (>1.5 kPa) हो जाता है, तो पौधे खुद को निर्जलीकरण से बचाने के लिए अपने रंध्र बंद कर लेते हैं, जिससे प्रकाश संश्लेषण रुक जाता है।

## संसाधन उपयोग दक्षता: एक तुलनात्मक विश्लेषण

वर्टिकल फार्मिंग में लगने वाली उच्च प्रारंभिक पूंजीगत लागत का मुख्य तार्किक आधार इसकी अद्वितीय संसाधन संरक्षण क्षमता है।

- **जल-उपयोग दक्षता:** हाइड्रोपोनिक CEA प्रणालियां HVAC डीह्यूमिडिफिकेशन प्रणालियों के माध्यम से पत्तियों से होने वाले वाष्पोत्सर्जन के नुकसान को हवा से वापस सोख लेती हैं और इसे संघनित (Condense) करके पुनः पोषक टैंकों में रीसायकल कर देती हैं। यह प्रणाली पारंपरिक खुले खेतों की सिंचाई की तुलना में 95% से 98% कम पानी का उपयोग करती है।
- **भूमि-उपयोग दक्षता:** वर्टिकल स्तरों को 10-12 मजिलों तक व्यवस्थित करके, वर्टिकल फार्मिंग सुविधा का केवल 1 ha (हेक्टेयर) का पदचिह्न (Footprint), फसल की प्रजातियों और वार्षिक फसल चक्र के आधार पर 10 से 30 ha पारंपरिक क्षेत्रों की तुलना में अधिक उत्पादन के बराबर उपज दे सकता है।

## भारतीय कृषि के समक्ष चुनौतियाँ और रणनीतिक रोडमैप (आईसीएआर परिप्रेक्ष्य)

यद्यपि यह तकनीक तकनीकी रूप से क्रांतिकारी है, फिर भी भारतीय कृषि पारिस्थितिकी तंत्र के भीतर हाइड्रोपोनिक वर्टिकल फार्मिंग को बड़े पैमाने पर अपनाने के लिए कुछ विशिष्ट सामाजिक-आर्थिक और संरचनात्मक बाधाओं का सामना करना पड़ता है:

1. **उच्च परिचालन लागत और ऊर्जा खपत:** थर्मल प्रबंधन, आर्द्रता नियंत्रण और निरंतर LED लाइटिंग के लिए ग्रिड से भारी मात्रा में बिजली की आवश्यकता होती है। भारत में इन प्रणालियों को टिकाऊ बनाने के लिए इन्हें लिथियम-आयरन-फॉस्फेट स्टोरेज से लैस ग्रिड-इंटरैक्टिव सौर फोटोवोल्टिक प्रणालियों की ओर स्थानांतरित करना आवश्यक है।
2. **स्वदेशी सबस्ट्रेट और पोषक तत्व फॉर्मूलेशन:** वर्तमान में पानी में घुलनशील कीलेटेड उर्वरकों के लिए आयात पर अत्यधिक निर्भरता परिचालन लागत को बढ़ाती है। ICAR संस्थानों को स्थानीय संसाधनों से प्राप्त कम लागत वाले स्वदेशी पोषक तत्व फॉर्मूले और जैविक हाइड्रोपोनिक बायो-स्टिमुलेंट्स विकसित करने को प्राथमिकता देनी चाहिए।
3. **लक्षित फसलों की सीमाएं:** वर्तमान में यह तकनीक मुख्य रूप से उच्च मूल्य वाली और कम मात्रा वाली फसलों (जैसे विदेशी जड़ी-बूटियाँ, स्ट्रॉबेरी, माइक्रोग्रीन्स और बीजों के ट्यूबर प्रबंधन) तक ही सीमित है। अनुसंधान का दायरा बढ़ाते हुए वर्टिकल आर्किटेक्चर के लिए उपयुक्त बीनी, उच्च उपज वाली न्यूट्रियुटिकल और औषधीय पौधों की किस्मों को विकसित करना होगा।

## निष्कर्ष

नियंत्रित पर्यावरण कृषि के अंतर्गत हाइड्रोपोनिक वर्टिकल फार्मिंग आधुनिक कृषि विज्ञान के एक अत्यधिक परिपक्व और उच्च तकनीकी मोर्चे का प्रतिनिधित्व करती है। यह पारंपरिक व्यापक कृषि का विकल्प नहीं है, बल्कि शहरी और उप-शहरी खाद्य सुरक्षा, जलवायु लचीलापन और कीटनाशक मुक्त उच्च-घनत्व उत्पादन के

लिए एक अत्यंत आवश्यक पूरक बुनियादी ढांचा है। भारत के लिए, कम लागत वाले इंजीनियरिंग घटकों, स्वचालित IoT सेंसिंग एरे और सौर ऊर्जा एकीकरण के क्षेत्र में ICAR के नेतृत्व में किया जाने वाला लक्षित अनुसंधान ही वह माध्यम बनेगा जो इस उच्च-स्तरीय तकनीक को एक आर्थिक रूप से व्यावहारिक कृषि वास्तविकता में बदल देगा।

