

ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ ҒЫЛЫМ ЖӘНЕ ЖОҒАРҒЫ БІЛІМ МИНИСТРЛІГІ

«Қ.И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті» коммерциялық
емес акционерлік қоғамы



Автоматика және ақпараттық технологиялар институты

«Робототехника және автоматиканың техникалық құралдары» кафедрасы

Сыдыканов Серікболсын Мұхтарбекұлы

«Қоршаған орта датчиктері мен өсімдік морфологиясының деректері негізінде
жылыжайдағы микроклимат жағдайын болжау және бақылау үшін машиналық оқыту
моделін әзірлеу.»

МАГИСТРЛІК ДИССЕРТАЦИЯ

7M07107 – Робототехника және мехатроника

Алматы 2025

ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ ҒЫЛЫМ ЖӘНЕ ЖОҒАРҒЫ БІЛІМ МИНИСТРЛІГІ
«Қ.И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті» коммерциялық
емес акционерлік қоғамы



SATBAYEV
UNIVERSITY

Автоматика және ақпараттық технологиялар институты

ӘОЖ 665.622.43.046.6-52 (043)

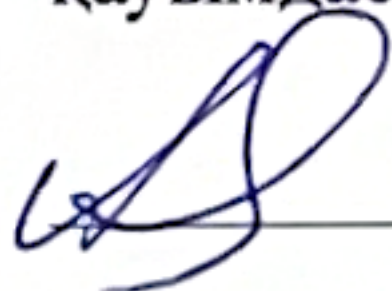
Қолжазба құқығында

Сыдыканов Серікболсын Мұхтарбекұлы

Магистр академиялық дәрежесін алу үшін
МАГИСТРЛІК ДИССЕРТАЦИЯ (ЖОБА)

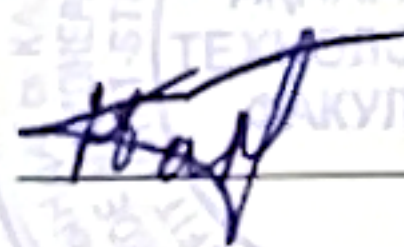
Диссертацияның атауы Қоршаған орта датчиктері мен өсімдік морфологиясының
деректері негізінде жылыжайдағы микроклимат жағдайын
болжау және бақылау үшін машиналық оқыту моделін әзірлеу.
Дайындау бағыты 7М07107 – Робототехника және мехатроника

Ғылыми жетекші
Ph.D Докторы,
қауымдастырылған профессор

 Алимбаев Ч.А.

«__» _____ 2025 ж.

Рецензент
Ph.D Докторы,
қауымдастырылған профессор

 Карымсакова Н.Т.

«__» _____ 2025 ж.

Норма бақылаушы
Тех. ғылым. маг., оқытушы,

 Кальменов Е.Т.

«16» июня 2025 ж.

ҚОРҒАУҒА ЖІБЕРІЛДІ

Кафедра меңгерушісі РТжАТҚ
Техника ғылымының кандидаты,
профессор



Қ.Ә. Өжікенов

«__» _____ 2025 ж.

Алматы 2025

ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ ҒЫЛЫМ ЖӘНЕ ЖОҒАРҒЫ БІЛІМ МИНИСТРЛІГІ
«Қ.И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті» коммерциялық
емес акционерлік қоғамы



SATBAYEV
UNIVERSITY

Автоматика және ақпараттық технологиялар институты

«Робототехника және автоматиканың техникалық құралдары» кафедрасы

7M07107 – Робототехника және мехатроника

БЕКІТЕМІН
Кафедра меңгерушісі РТЖАТҚ
Техника ғылымының кандидаты,
профессор

 Қ.Ә. Өжікенов

«___» _____ 2025 ж.

Магистрлік диссертацияны орындауға арналған ТАПСЫРМА

Магистрант Сыдыканов Серікболсын Мұхтарбекұлы
Тақырыбы Қоршаған орта датчиктері мен өсімдік морфологиясының деректері негізінде жылыжайдағы микроклимат жағдайын болжау және бақылау үшін машиналық оқыту моделін әзірлеу.

Университет ректорының 2022 ж. « 25 » 03 № 430 - М бұйрығымен бекітілген
Аяқталған жұмысты тапсыру мерзімі «___» маусым 2025 ж.

Магистрлік диссертацияның бастапқы деректері:

Магистрлік диссертацияда қарастырылатын мәселелер тізімі:

а) *Өсімдіктің морфологиялық ерекшеліктерін талдау және машиналық оқыту модельін жасау.*

б) *Интеллектуалды жүйе архитектурасын жобалау.*

в) *ESP32 және Raspberry pi арқылы жүйені іске асыру.*

г) *Жүйенің тиімділігін бағалау және эксперименттік нәтижелер*

Графикалық материалдың тізімі (міндетті сызбаларды дәл көрсете отырып):

жұмыс презентациясы слайтарда ___ көрсетілген

Ұсынылатын негізгі әдебиеттер: ___ әдебиеттер тізімі және ___ қосымша

Магистрлік диссертацияны дайындау
КЕСТЕСІ

Бөлімдер атауы, әзірленетін сұрақтар тізбесі	Ғылыми жетекшіге ұсыну мерзімдері	Ескерту
Өсімдіктің өсу кезеңін болжау міндетін модельдеу	16.01-12.02.2025 ж	Орындалды
Интеллектуалды жүйе архитектурасын жобалау	12.02-20.04.2025 ж.	Орындалды
Техникалық көру және болжалды қызмет модельдерін әзірлеу	20.03-17.04.2025 ж.	Орындалды
Жүйенің тиімділігін бағалау және эксперименттік нәтижелер	17.04-15.05.2025 ж.	Орындалды
Қорытынды бөлім	16.05-19.05.2025 ж	Орындалды

Аяқталған магистрлік диссертация үшін, оған қытысты бөлімдердегі
диссертациялар кеңесшілері мен қалып бақылаушының
қолдары

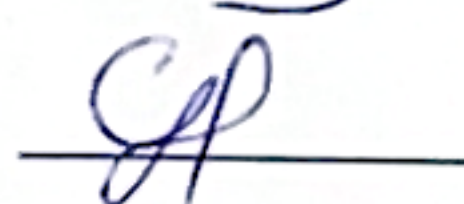
Бөлімдердің атауы	Кеңесшілер, тегі, аты, әкесінің аты, (ғылыми дәрежесі, атағы)	Қол қойылған күні	Қол
Еңбекті қорғау бөлімі	Аймуханбетов Е.А., Ph.D техника ғылымдарының магистрі, аға оқытушы	10.06.2025	
Норма бақылаушы	Кальменов Е.Т., техника ғылымдарының магистрі, оқытушы	16.06.2025	

Ғылыми жетекшісі



Алимбаев Ч.А.

Білім алушы тапсырманы орындауға алды



Сыдыканов С.М.

Күні

« _____ » 2025 ж.

Мазмұны

Кіріспе	3
1. Зерттеу бөлімі	8
1.1 Микроклиматты басқару мәселелері.....	8
1.1.1 Қызып кету және гипотермия.....	8
1.1.2 Тұрақты емес ылғалдылық және конденсация	10
1.1.3 Тиімсіз желдету және ауа айналымы.....	11
1.1.4 CO ₂ концентрациясының жеткіліксіздігі және жарық тапшылығы	13
1.1.5 Әлсіз Автоматтандыру және басқару.....	14
1.1.6 Жүйелердің энергия тиімділігінің жеткіліксіздігі.....	15
1.2 Микроклиматтың өсімдіктердің физиологиясы мен өнімділігіне әсер	17
1.2.1 Микроклиматты қолмен басқару	19
1.2.2 Шекті (екі позициялы) басқару.....	20
1.2.3 PID реттеу.....	20
1.2.3 PLC негізіндегі басқару жүйелері.....	22
1.2.4 SCADA-жүйелер (диспетчерлеу)	23
1.2.5 Интеллектуалды басқару жүйелері.....	24
1.3 Өсімдіктерді өсіру әдістері және жасанды интеллектті қолдану.....	26
1.3.1 Топырақта өсіру	27
1.3.2 Субстрат өсіру (инертті субстраттар).....	27
1.3.3 Гидропоника	28
1.3.4 Аэропоника	28
1.3.5 Аквапоника	29
1.3.6 Тік егіншілік.....	30
1.3.7 Өсімдіктерді бақылаудағы AI пен компьютерлік көрудің рөлі	31
1.3.8 Өсімдік кескіндерін өңдеу үшін CNN қолдану.....	33
1.4 Салаттың өсу кезеңдерінің морфологиялық ерекшеліктері.....	34
2. Практикалық бөлім.....	37
2.1 Жүйенің архитектурасы.....	37
2.2 Аппараттық компоненттер.....	40
2.3 Қосылу схемасы	43
2.4 Бағдарламалық қамтамасыз етуді іске асыру.....	44
2.5 Нәтижелер мен графиктер	46

Қорытынды	49
Әдебиеттер тізімі	50

Аннотация

Бұл зерттеуде жылыжай өсімдік шаруашылығында өсімдіктің нақты күйіне негізделген микроклиматты басқарудың интеллектуалды жүйесі әзірленіп, іске асырылды. Ұсынылған әдіс өсімдіктің өсу белгілерін компьютерлік көру арқылы талдауға және кері биологиялық байланысты қамтамасыз етуге негізделген. Жүйе жылыжайдағы қоршаған орта параметрлерін — температураны, ылғалдылықты, жарықтандыруды және көмірқышқыл газының (CO₂) құрамын — нақты уақыт режимінде автоматты түрде реттейді. Жүйе архитектурасы суреттерді өңдейтін Raspberry Pi есептеу модуліне, сенсорлық диагностика мен атқарушы құрылғылардың өзара әрекеттесуіне негізделген. Бағдарламалық орта ESP32 микроконтроллерлері мен бейнекамераларды біріктіретін көпағынды мониторинг пен визуализацияны жүзеге асырады. Эксперименттік нәтижелер өсімдіктің даму кезеңін жоғары дәлдікпен тану, телеметриялық арналардың сенімді жұмыс істеуі және басқару алгоритмдерінің икемділігін көрсетті. Бұл жүйе — агротехнология саласында автоматтандыруды, компьютерлік көруді және нақты уақыттағы басқару интерфейстерін интеграциялау арқылы жылыжай процестерін интеллектуаландырудың перспективалық шешімі болып табылады.

Аннотация

В работе предложена и реализована интеллектуальная система управления микроклиматом в тепличном растениеводстве, ориентированная на физиологическое состояние культивируемых растений. Методология основана на применении биологической обратной связи, где визуальные признаки роста растений, извлекаемые с помощью алгоритмов компьютерного зрения, используются для автоматической корректировки климатических условий — температуры, влажности, освещённости и уровня CO₂. Архитектура системы представляет собой скоординированное взаимодействие между модулем анализа изображений, контроллером сенсорной диагностики и исполнительными механизмами. Программная платформа поддерживает многопоточную обработку данных, управление несколькими микроконтроллерами ESP32 и камерами, а также визуализацию текущего состояния в реальном времени. Результаты испытаний показали высокую точность распознавания стадий роста растений, устойчивую работу телеметрических каналов и адаптивность управляющих алгоритмов. Разработанная система демонстрирует практический путь к интеллектуализации агротехнологических процессов с применением современных средств автоматизации и цифрового зрения.

Abstract

This study presents the development and implementation of an intelligent microclimate control system for greenhouse crop production, with a specific focus on the physiological state of cultivated plants. The approach integrates biofeedback mechanisms, utilizing visual indicators of plant growth captured via computer vision algorithms to dynamically adjust key environmental parameters — including temperature, humidity, illumination, and CO₂ concentration. The system architecture enables real-time interaction between an image analysis computation module, a sensor diagnostics controller, and actuation mechanisms. The software component features a multi-threaded environment capable of monitoring, visualizing, and controlling multiple ESP32 microcontrollers and video cameras simultaneously. Experimental validation demonstrates high accuracy in identifying plant growth stages, robust telemetry communication, and adaptive behavior of the control algorithms. This work offers a practical and scalable solution for greenhouse automation, leveraging advances in image processing, embedded systems, and real-time interface technologies.

Қысқартулар

IOT — Internet of Things — Заттар интернеті

ML — Machine Learning — Машиналық оқыту

CNN — Convolutional Neural Network — Конволюциялық нейрондық желі

ПИД реттегіш — Пропорционалды интегралды дифференциалды реттегіш

CFD — Computational Fluid Dynamics — Есептеу гидродинамикасы

УК — Ультракүлгін сәулелер (ультрафиолет)

ФАР — Фотосинтетикалық белсенді радиация

ЖИ/AI — Artificial Intelligence — Жасанды интеллект

АТФ — Аденозинтрифосфат

PLC — Programmable Logic Controller — Бағдарламаланатын логикалық контроллер

SCADA — Қадағалау Бақылау Және Деректерді Жинау

HMI — Human–Machine Interface — Адам-машина интерфейсі

АТ — Information Technology — Ақпараттық технологиялар

SVM — Support Vector Machine — Анықтамалық векторлар әдісі

CEA — Controlled Environment Agriculture — Бақыланатын ортадағы өсімдік

шаруашылығы

BBCH — Biologische Bundesanstalt, Bundessortenamt und CHemische Industrie —

Фенологиялық фазалар шкаласы

NDIR — Nondispersive Infrared — Дисперсиялық емес инфрақызыл газ анализаторы

PAR — Photosynthetically Active Radiation — Фотосинтетикалық белсенді радиация

GPU — Graphics Processing Unit — Графикалық процессор

UART — Universal Asynchronous Receiver-Transmitter — Өмбебап асинхронды

трансивер HOG — Histograms of Oriented Gradients — Бағдарланған градиенттердің

гистограммасы

F1-score — F1 өлшемі (дәлдік пен толықтықтың гармоникалық орташа мәні)

Кіріспе

Қазіргі ауыл шаруашылығы, өндіріс тиімділігін арттыру және ресурстарды ұтымды пайдалану қажеттілігінен туындаған терең технологиялық қайта құру кезеңін бастан кешіп отыр. Жылыжайда өсімдіктерді өсіру – микроклиматты басқару арқылы жыл бойы сапалы өнім алуға мүмкіндік беретін перспективалы бағыт ретінде ерекшеленеді. Алайда, жылыжайларда өсімдіктің нақты күйін ескермейтін, бекітілген қондырғыларға негізделген дәстүрлі микроклиматты басқару жүйелерімен шектеледі. Мұндай тәсілдер егін жинау мүмкіндігін толық пайдаланбауға, ресурстарды шамадан тыс жұмсауға, әсіресе құбылмалы сыртқы орта жағдайында, алып келеді.

Қолданыстағы микроклиматты басқару жүйелері бірқатар күрделі мәселелерге тап болуда. Олардың қатарында:

- **Қызып кету:** Ыстық мезгілде жылыжай ішіндегі температура 60 °С-тан асып кетуі мүмкін, бұл өсімдіктерге жылу стресін тудырып, фотосинтезді тежейді және зақым келтіреді.
- **Тұрақсыз ылғалдылық:** Артық ылғал конденсацияға алып келіп, жабын материалдарының жарық өткізгіштігін төмендетеді және аурулардың дамуына ықпал етеді; ал жеткіліксіз ылғал өсімдіктің өсуін баяулатады.
- **Тиімсіз желдету:** Ауаның тоқырауы температура мен ылғалдылықтың экстремумдарын ушықтырады.
- **CO₂ және жарықтың жетіспеушілігі:** CO₂ деңгейі бақылаусыз қалса, фотосинтез процесі төмендеп, өсімдік дамуы тежеледі. Зерттеулерге сәйкес, жылыжай ішіндегі CO₂ концентрациясын 800–1000 ppm деңгейіне дейін көтеру биомассаның өсуін 30–50%-ға, ал өнімділікті 50%-ға дейін арттыруы мүмкін. Жарықтың жеткіліксіздігі (әсіресе қыс мезгілінде) де өнім әлеуетін жүзеге асыруға мүмкіндік бермейді.
- **Автоматтандырудың әлсіздігі:** Көптеген жылыжайлар әлі күнге дейін қолмен басқаруға немесе тек жеке параметрлерге жауап беретін қарапайым екі позициялы контроллерлерге сүйенеді. Мұндай жүйелер әртүрлі факторлардың өзара әрекетін ескермейді, бұл өсімдіктердің күйзелісіне және энергияны артық тұтынуға алып келеді.
- **Энергия тиімділігінің төмендігі:** Дәстүрлі жүйелердің дәл бақылау құралдарының болмауына байланысты жылыту, салқындату, желдету құрылғылары қажеттіліктен ұзағырақ немесе қарқынды жұмыс істейді. Жылыжайдағы жалпы энергия тұтынудың 65–85%-ын жылыту мен салқындату құрайды, сондықтан бұл процестердің тиімсіздігі үлкен шығындарға алып келеді.

Осы аталған мәселелер ауыл шаруашылығында, соның ішінде жылыжай саласында автоматтандырудың маңыздылығын көрсетеді. Интеллектуалды басқару жүйелері микроклиматты өсімдіктердің қажеттіліктеріне бейімдей отырып, бұл кемшіліктерді еңсере алады. Соңғы жылдардағы зерттеулер климаттық параметрлермен қатар өсімдіктің өсу фазалары мен физиологиялық күйін де ескеретін басқару стратегиялары арқылы максималды өнім алуға болатынын көрсетті.

Қолжетімді сенсорлардың, микроконтроллерлердің және жасанды интеллект технологияларының дамуы — қоршаған ортаны да, өсімдіктің өзін де нақты уақыт режимінде бақылауға және осы мәліметтер негізінде микроклиматты автоматты реттеуге мүмкіндік беретін жүйелерді жасауға жол ашты.

Осылайша, зерттеу тақырыбының өзектілігі — аграрлық секторда өнімнің сапасы мен өнімділігін арттыруға, энергия шығынын азайтуға және адам факторына тәуелділікті төмендетуге бағытталған икемді әрі интеллектуалды микроклиматты басқару жүйелеріне деген қажеттілікпен айқындалады.

Зерттеудің мақсаты мен міндеттері — өсімдіктерді өсірудің тиімділігін арттыру мақсатында биологиялық кері байланыс принципіне негізделген, компьютерлік көру және ESP32 микроконтроллерлері желісі арқылы жұмыс істейтін жылыжай микроклиматын басқарудың интеллектуалды жүйесін әзірлеу және оны эксперименттік тұрғыда негіздеу.

Басқаша айтқанда, бұл жүйе компьютерлік көру әдістерімен анықталған өсімдіктердің физиологиялық жағдайын ескере отырып, жылыжай ішіндегі климаттық параметрлерді — температураны, ылғалдылықты, жарықтандыруды және CO₂ деңгейін — автоматты түрде реттеуі тиіс.

Зерттеу міндеттері:

Жұмыста қойылған мақсатқа жету үшін келесі ғылыми және қолданбалы міндеттер дәйекті түрде шешілді:

1. Интеллектуалды жүйеге қойылатын талаптарды негіздеу мақсатында микроклиматты басқарудың өзекті мәселелеріне талдау жүргізу және жылыжайды автоматтандырудың заманауи тәсілдеріне (сенсорлар, IoT, жасанды интеллект алгоритмдері) шолу жасау.
2. Өсімдіктерді бақылауға арналған, конволюциялық нейрондық желіге (CNN) негізделген компьютерлік көру модулін және жергілікті басқаруға арналған үлестірілген микроконтроллерлерді қамтитын биологиялық кері байланысқа негізделген интеллектуалды микроклиматты бақылау жүйесінің жалпы архитектурасын әзірлеу.
3. Өсімдіктердің өсу кезеңдерін кескіндер бойынша тану үшін CNN моделін жасап, оқыту (салат өсімдігі мысалында), және оны микроклиматты басқару тізбегінде қолдануға жеткілікті дәлдікпен жіктеу нәтижесін қамтамасыз ету.
4. Жүйенің бағдарламалық-аппараттық прототипін іске асыру: есептеу модулін (мысалы, Raspberry Pi микрокомпьютері) ESP32 микроконтроллерлерімен, камералармен және климаттық атқарушы құрылғылармен (жылыту, желдету, суару, жарықтандыру және т.б.) біріктіру; көпағынды деректерді жинау, кескіндерді өңдеу және нақты уақыт режимінде басқару шешімдерін қабылдау үшін бағдарламалық қамтамасыз етуді әзірлеу.
5. Жылыжай жағдайында әзірленген жүйеге эксперименттік сынақтар жүргізу: өсу кезеңдерін тану алгоритмдерінің дәлдігі мен жылдамдығын бағалау, модульдер арасындағы деректерді беру сенімділігін тексеру, берілген климаттық параметрлерді сақтау тиімділігін және жүйенің энергия тұтынуына әсерін өлшеу. Нәтижелерді талдау, оларды дәстүрлі тәсілдермен салыстыру және ұсынылған жүйенің артықшылықтары мен мүмкін шектеулері туралы қорытынды жасау.

Зерттеу нысаны мен пәні

Зерттеу нысаны — қорғалған топырақ жағдайында өсімдіктерді өсіруге арналған жылыжайдағы микроклиматты басқару процестері. Басқаша айтқанда, зерттеу нысаны — ауыл шаруашылығы дақылдарының өсуі мен дамуына әсер ететін жылыжай ортасын климаттық тұрғыда бақылаудың автоматтандырылған жүйелері.

Зерттеу пәні — компьютерлік көру технологиялары мен микроконтроллерлерді қолдану арқылы микроклиматты басқарудың интеллектуалды жүйесін іске асыруға арналған әдістер мен техникалық құралдар. Зерттеу тақырыбына мыналар кіреді: өсімдіктердің физиологиялық күйін бағалауға арналған компьютерлік көру алгоритмдері (әсіресе, өсу кезеңдерін тануға арналған CNN), камералар мен сенсорларды атқарушы құрылғылармен біріктіру архитектурасы, сондай-ақ ESP32 негізіндегі таратылған контроллерлерді нақты уақыт режимінде үйлестіретін бағдарламалық қамтамасыз ету.

Ғылыми жаңалық

Зерттеу барысында жұмыстың ғылыми жаңалығын құрайтын бірқатар жаңа нәтижелер алынды. Негізгі инновациялық аспектілерге мыналар жатады:

- **Климатты басқарудағы биологиялық кері байланыс.** Микроклиматты басқарудың жаңа тәсілі ұсынылып, жүзеге асырылды, ол өсімдіктің нақты жағдайын ескереді: реттеу тек физикалық датчиктердің көрсеткіштеріне негізделген дәстүрлі жүйелерден айырмашылығы, әзірленген жүйе визуалды ақпаратты – өсімдіктердің бейнесін — пайдаланады. Жылыжай микроклиматын басқаруда алғаш рет компьютерлік көру және

конволюциялық нейрондық желілер (CNN) қолданылды. Бұл өсімдіктердің өсуінің морфологиялық белгілерін анықтауға және осы негізде қоршаған орта параметрлерін бейімдеуге мүмкіндік береді. Биологиялық кері байланыс контурын (plant-in-the-loop) іске асыру өсімдіктің даму кезеңдеріне сәйкес климаттық параметрлерді дәл сәйкестендіруге жол ашады, бұл бұрын іс жүзінде сирек қолданылған әдіс.

CNN және ESP32 микроконтроллерлерін біріктіретін жүйенің түпнұсқа архитектурасы әзірленді. Ол өсімдіктердің бейнесін талдауға арналған нейрондық желі модулін және климаттық жабдықтарды басқару үшін таратылған бірнеше ESP32 микроконтроллерлерін қамтиды. Компоненттердің үйлесімді жұмысы қамтамасыз етілген: орталық есептеу торабы (Raspberry Pi) кескіндерді өңдеп, өсу кезеңін анықтайды, ал басқару командалары нақты уақытта жылыжайдың әртүрлі аймақтарында орналасқан ESP32 контроллерлеріне жіберіледі. Бұл гибриді тәсіл жасанды интеллект пен ендірілген жүйелерді біріктіріп, күрделі алгоритмдерді (CNN) нақты уақытта қолжетімді аппараттық платформаларда іске асырудың мүмкіндігін көрсетеді.

- **Мультисенсорлық басқаруды қолдайтын көпағынды бағдарламалық платформа.** Жұмыста бір мезгілде бірнеше деректер ағынын өңдей алатын бағдарламалық шешім жасалды: бейнеағын (бір немесе бірнеше камерадан) арқылы өсімдіктерді талдау және әртүрлі ESP32 құрылғыларынан температура, ылғалдылық, CO₂ және жарық деңгейі сияқты микроклиматтық сенсорлардан телеметриялық деректер жинау. Қоршаған орта мен өсімдіктің күйі туралы біріктірілген деректер негізінде бірнеше атқарушы құрылғылардың — жылыту, желдету, суару, жарықтандыру — бір уақытта басқарылуы қамтамасыз етілді. Бірнеше камералармен және микроконтроллерлермен бір уақытта тұрақты байланыс орнату мүмкіндігі эксперименттік түрде дәлелденді. Осылайша, жүйенің ауқымдылығы мен икемділігі — таратылған сенсорлар мен атқарушы құрылғылар желісі арқылы үлкен жылыжай кешендеріне бейімделуі әлеуеті көрсетілді.

- **Өсімдіктің күйін тану алгоритмдері мен дәлдігі.** Салаттың өсу кезеңдерін жіктеуге арналған конволюциялық нейрондық желі өсімдіктердің даму фазаларын анықтауда жоғары дәлдікке (сынақ деректері бойынша 88,2%) қол жеткізді. Ғылыми жаңалық ретінде CNN моделін зертханалық емес, нақты жылыжай жағдайында өсуді бақылау міндетіне бейімдеу және қолдану атап өтіледі. Сонымен қатар, нейрондық желі нәтижелері классикалық әдістермен салыстырылды (мысалы, HOG дескрипторлары мен SVM): CNN ~88% дәлдік көрсетті, ал дәстүрлі әдістер ~83%-ға жетті. Бұл терең оқытудың жылыжай мониторингі міндеттеріне тиімділігі мен маңыздылығын растайды.

Контроллерлердің шектеулі есептеу ресурстары жағдайында да терең оқыту архитектураларын (соның ішінде MobileNetV2 модификациясын) қолдану тиімділігі дәлелденді. Бұл ауыл шаруашылығына арналған **TinyML** бағытындағы зерттеулердің дамуына үлес қосады.

Практикалық маңыздылығы

Диссертациялық жұмыстың нәтижелері жылыжай өсімдік шаруашылығы саласы үшін жоғары практикалық құндылыққа ие. Әзірленген интеллектуалды жүйе микроклиматты басқаруды жаңа сапалық деңгейде автоматтандыру мақсатында нақты жылыжай шаруашылықтарына енгізілуі мүмкін. Жүйені қолданудың нақты әсерлері мен артықшылықтарына мыналар жатады:

- **Өнімнің өнімділігі мен сапасын арттыру.** Өсімдіктердің өсуінің барлық кезеңдерінде оңтайлы климаттық жағдайларды дәлірек сақтау — қызып кету, суық соғу, ылғалдылықтың күрт өзгеруі сияқты стресс факторларын азайтады. Бұл өсімдіктің қарқынды өсуіне және биомассаның артуына ықпал етеді. Мысалы, CO₂ концентрациясының жеткілікті деңгейін және тиімді жарықтандыруды автоматты түрде қолдау өсімдіктің потенциалын толық жүзеге асыруға мүмкіндік береді. Зерттеулерге сәйкес, бұл факторларды оңтайландыру өнімділікті дәстүрлі режиммен салыстырғанда 30–50%-ға арттыруы мүмкін. Осылайша, жүйені енгізу жылыжай өнімділігін арттырып, жыл

бойына тұрақты өнім алуға мүмкіндік береді.

• **Энергия тиімділігі және шығындарды азайту.** Интеллектуалды басқару жүйесі жабдықтың артық жұмыс істеуін болдырмайды. Жылытқыштар, желдеткіштер, суару сорғылары мен жарықтандыру құрылғылары тек қажет болған жағдайда және қажетті деңгейде іске қосылады. Бұл жабдықтың босқа жұмыс істеу уақытын қысқартады және артық энергия тұтынуға жол бермейді (мысалы, артық қыздыру немесе салқындату жағдайларында). Эксперименттер көрсеткендей, бейімделетін басқару алгоритмі климаттық жабдықтың жалпы энергия тұтынуын дәстүрлі тұрақты режиммен салыстырғанда шамамен 15%-ға төмендеткен (қоршаған орта сапасын сақтау деңгейі бірдей болған жағдайда). Бұл – электр қуаты мен отынды үнемдеу, өнімнің өзіндік құнын төмендету және агроөнеркәсіп өндірісінің тұрақтылығын арттыру деген сөз.

• **Еңбек шығындары мен адами факторды азайту.** Өсімдіктердің жағдайын компьютерлік көру арқылы автоматты бақылау операторларды жылыжайды үнемі аралап, көзбен бағалау қажеттілігінен босатады. Жүйе өсімдіктер мен климаттық құрылғыларды өздігінен және үздіксіз бақылайды. Басқару шешімдері (мысалы, терезені ашу, жарық қосу) орнатылған алгоритмдер негізінде автоматты түрде қабылданады, ал оператор тек интерфейс арқылы бақылап, қажет болған жағдайда параметрлерге түзету енгізеді. Бұл агрономдардың уақытын күрделі және маңызды міндеттерге (мысалы, отырғызу жоспары немесе ауруларды диагностикалау) арнауына мүмкіндік береді және басқарудағы субъективті қателіктерді азайтады. Мұндай автоматтандыру әсіресе кең көлемді жылыжай кешендерінде аса маңызды, өйткені қолмен бақылау барлық жерде бірдей тиімді емес.

• **Әртүрлі дақылдарға бейімділік және жүйенің масштабталуы.** Ұсынылған шешім әртүрлі өсімдік түрлеріне және жылыжай конфигурацияларына бейімделе алады. Жаңа дақылға бейімделу үшін компьютерлік көру моделін қайта үйрету жеткілікті, содан кейін жүйе осы дақылдың өсу ерекшеліктерін ескере отырып климатты реттейді. Мысалы, қызанақтың гүлдену фазаларын немесе қиярдың стресс белгілерін тануға арналған CNN-ді оқыту арқылы сол архитектураны пайдалана отырып, басқа да өсімдіктердің өсу жағдайын оңтайландыруға болады. ESP32 негізіндегі аппараттық платформа оңай кеңейтіледі — қажетті параметрлерге жаңа сенсорлар мен атқарушы құрылғыларды қосу немесе қайта баптау (мысалы, топырақ ылғалдылығы, pH, тыңайтқыш дозасы және т.б.) мүмкін. Осылайша, ұсынылған шешім тек салат өсіруге ғана емес, кең көлемді ауыл шаруашылығы қосымшалары үшін де тиімді құрал ретінде қолданылады.

Жалпы алғанда, практикалық маңыздылығы — әзірленген жүйенің дайын прототип ретінде жылыжай шаруашылықтарының қолданыстағы инфрақұрылымына оңай біріктірілу мүмкіндігінде. Оның қолданылуы экономикалық тиімділікке (өнімділіктің өсуі және шығындардың азаюы) және бақыланатын ортада өсімдіктерді өсіру технологиясының сапалық жақсаруына тікелей ықпал етеді.

Нәтижелердің негізділігі мен сенімділігі

Алынған нәтижелер мен тұжырымдардың дұрыстығы бірнеше өзара байланысты факторлар кешенімен расталады.

Біріншіден, жүйені әзірлеу кезінде дәлелденген ғылыми әдістер мен заманауи технологиялар қолданылды: стандартталған микроклиматтық сенсорлар, кеңінен қолданылатын ESP32 микроконтроллерлері және танымал компьютерлік көру кітапханалары пайдаланылды. Оқыту және тану алгоритмдері тұрақты математикалық базаға — конволюциялық нейрондық желілерге (CNN) — негізделіп, олардың параметрлері бірқатар эксперименттік зерттеулер нәтижесінде таңдалды. Екіншіден, жүйеге нақты жұмыс жағдайына жақын ортада кешенді эксперименттік сынақтар жүргізілді. Прототип толыққанды жылыжайға орнатылып, онда сыртқы ортаның өзгермелі жағдайлары толықтай бақыланды. Жүйе ұзақ уақыт бойы үздіксіз жұмыс істеп, оның жұмысын сипаттайтын нақты статистикалық деректер жинауға мүмкіндік берді.

Негізгі тиімділік көрсеткіштері тіркелді:

- өсудің морфологиялық кезеңдерін жіктеу дәлдігі;
- байланыс арналарының сенімділігі;
- микроклимат параметрлерін тұрақты сақтау деңгейі және т.б.

Мысалы, CNN моделі салаттың өсу сатыларын 88,2% дәлдікпен таныды, бұл тестілік деректермен толық сәйкес келеді. Бұл – компьютерлік көру әдістерін қолданудың дұрыстығын көрсетеді. Сонымен қатар, дәлсіздік матрицалары мен қосымша метрикалар (толықтық, F₁-мөлшері) есептеліп, алгоритмнің теңгерімділігі мен сапасын растады. Классикалық машиналық оқыту әдістерімен (мысалы, HOG + SVM) салыстырмалы талдау жүргізілді, олардың ешқайсысы CNN көрсеткіштерінен жоғары нәтижеге жеткен жоқ.

Телеметрия мен басқару сенімділігі де тәжірибе барысында дәлелденді. Жүйе үздіксіз жұмыс істеп, Raspberry Pi мен ESP32 арасындағы байланыста деректер жоғалуы тіркелген жоқ. Байланыс нақты уақыт режимінде жүзеге асты, сенсорлардан сауалнама жиілігі бірнеше секундты құрады, ал барлық ақпараттық пакеттер мекенжайына дәл жетті. Сымсыз сигнал деңгейі мен арна өткізу қабілеті деректерді жедел жеткізуге жеткілікті болды, бұл басқару командаларының уақтылы орындалуын қамтамасыз етті.

Климаттық параметрлерді сақтау дәлдігі де жоғары болды:

- температураның ауытқуы белгіленген мәннен $\pm 1,5$ °C-тен аспады;
- салыстырмалы ауа ылғалдылығы $\pm 5\%$ шегінде тұрақты ұсталды.

Жүйе экстремалды ауытқулардың алдын алды — бірде-бір тәжірибеде өсімдіктердің қызып кетуі тіркелген жоқ, ал температура төмендеген жағдайда жылыту құрылғылары дер кезінде іске қосылды. Бұл нәтиже дәстүрлі PID басқару жүйелерімен салыстыруға келеді, бірақ ұсынылған алгоритмдер өздігінен бейімделіп, қосымша адамдық түзетусіз жұмыс істей алады.

Осы деректердің жиынтығы диссертацияда ұсынылған ғылыми ережелердің дұрыстығын жан-жақты дәлелдейді. Биологиялық кері байланыс пен жасанды интеллект әдістерін қолдану теориялық болжамдарға және әдеби деректерге толық сәйкес келеді. Эксперименттердің қайталануы және нәтижелердің тұрақтылығы алынған қорытындылардың сенімділігін дәлелдейді: CNN қайта үйретілгенде тұрақты дәлдік береді, жүйе бірдей климаттық өзгерістерге ұқсас реакция танытады.

Осылайша, ұсынылған интеллектуалды жүйенің сенімділігі мен тиімділігі эксперименттік түрде дәлелденіп, диссертация қорытындылары күшті дәлелдер базасына сүйенеді.

Автордың жеке үлесі

Жұмыста ұсынылған зерттеудің, жобалаудың және жүйені енгізудің барлық негізгі кезеңдерін автор дербес орындады.

Атап айтқанда, автор жылыжай микроклиматы саласындағы қазіргі жағдайға талдау жүргізді: әдеби деректерді зерттеп, дәстүрлі тәсілдердің шектеулерін және перспективалық бағыттарды (IoT, CNN, биологиялық кері байланыс) анықтады, тақырыптың өзектілігін негіздеді.

Автор интеллектуалды климаттық басқару жүйесінің тұжырымдамасы мен архитектурасын ұсынды. Өсімдіктерден кері байланысты пайдалану идеясы дербес әзірленді. Компьютерлік көру модулінің микроконтроллерлермен және жылыжай жабдықтарымен өзара әрекеттесу құрылымы жобаланды. Аппараттық компоненттер (сенсорлар, атқарушы құрылғылар, камералар, Raspberry Pi және ESP32) нақты уақыттағы жұмысқа және сенімділік талаптарына сәйкес таңдалды.

Келесі кезеңде автор CNN моделін әзірледі және оқытты:

- әртүрлі өсу кезеңдеріндегі өсімдік суреттерінен деректер жиынтығын жинады және белгіледі,
- желі архитектурасын және гиперпараметрлерді реттеу бойынша эксперименттер жүргізді,
- қажетті жіктеу дәлдігіне қол жеткізді.

Сонымен қатар, автор бағдарламалық жасақтаманы өзі әзірледі:

- сенсорлардан деректер жинау,
- кескіндерді OpenCV және TensorFlow көмегімен өңдеу,
- жабдықты басқару логикасын Python/C тілдерінде жүзеге асыру,
- көпағынды жұмысты қамтамасыз ету және жүйе тұрақтылығын сақтау.

Прототипті жинау және іске қосу да автордың өз қолымен орындалды:

- сенсорлар жылыжайға орнатылды,
- реле арқылы атқарушы механизмдер ESP32-ге қосылды,
- сымсыз байланыс желісі бапталды.

Соңғы кезеңде автор тәжірибелік сынақтар жүргізді:

- оқу жылыжайында эксперимент ұйымдастырды,
- телеметриялық деректерді жинады,
- параметрлерді тіркеп, нәтижелерді бастапқы гипотезалармен салыстырды.

Диссертацияда келтірілген барлық ғылыми және практикалық нәтижелер — алгоритмдер әзірлеу, бағдарламалық-аппараттық кешен құру, жүйені сынау және нәтижелерді талдау — автордың жеке еңбегінің нәтижесі болып табылады.

Сонымен қатар, зерттеу нәтижелері автор тарапынан жыл сайынғы "SATBAYEV International CONFERENCE – 2025" конференциясында ұсынылды. "Artificial Intelligence in Engineering and Production Systems: Solution for Optimization and Automatization of Processes" атты секцияда баяндалған жұмыс ғылыми қауымдастық тарапынан оң баға алып, жоғары дәрежелі сертификатқа ие болды.

Сондай-ақ, **AIR 2025 (Artificial Intelligence and Robotics)** халықаралық конференциясы аясында ағылшын тілінде ғылыми мақала дайындалып, жіберілді. Бұл мақала **Springer LNCS (Scopus)** жинағында жариялануға қабылданды. Бұл әзірленген жүйенің өзектілігін және ғылыми-қоғамдық құндылығын дәлелдейді, әрі болашақта халықаралық ауқымда таралуына мүмкіндік береді.

1. Зерттеу бөлімі

1.1 Микроклиматты басқару мәселелері

Жылыжайда оңтайлы микроклиматты сақтау — қорғалған топырақ жағдайында ауыл шаруашылығы дақылдарын сәтті өсірудің негізгі және міндетті шарты болып табылады. Микроклиматтың басты параметрлеріне температура, ауаның салыстырмалы ылғалдылығы, көмірқышқыл газының концентрациясы (CO_2) және жарықтандыру деңгейі жатады. Жылыжай ішіндегі климатты тиімді басқару осы факторлардың арасындағы оңтайлы тепе-теңдікті қамтамасыз етуі тиіс, себебі бұл өсімдіктердің максималды өнімділігіне тікелей әсер етеді [1]. Алайда, тәжірибе көрсеткендей, тұрақты микроклиматты қамтамасыз ету айтарлықтай қиындықтармен байланысты. Олардың қатарына қызып кету және гипотермия, ылғалдылықтың тұрақсыздығы мен конденсация түзілуі, желдетудің және ауа айналымының жеткіліксіздігі, CO_2 деңгейінің төмендігі мен жарық тапшылығы, басқару процестерінің жеткіліксіз автоматтандырылуы, энергия тиімділігінің төмендігі, сондай-ақ қолайсыз микроклиматтың өсімдіктердің физиологиялық процестеріне және өнімділігіне кері әсері жатады. Осы мәселелердің әрқайсысы қазіргі ғылыми дәлелдерге сүйене отырып, төменде егжей-тегжейлі талданады.

1.1.1 Қызып кету және гипотермия

Температуралық режим — жылыжайда бақылауға алынатын ең маңызды әрі ең күрделі параметрлердің бірі. Қызып кету көбінесе күннің шуақты сағаттарында немесе ыстық мезгілде байқалады, бұл кезде жылыжай құрылымы ішінде жылу жиналып, ауаның температурасы шамадан тыс көтеріледі. Ыстық климат жағдайында салқындату жүйесі жоқ жылыжай ішінде температура 60°C -тан да асып кетуі мүмкін [1].

Мысалы, құрғақ аймақтарда жүргізілген бақылаулар сыртқы ауаның орташа тәуліктік температурасы шамамен 45°C болған жағдайда, ұйымдастырылмаған желдетуге ие жылыжай ішінде температура 60°C -тан жоғары болатынын көрсетті [1]. Мұндай жоғары

температура өсімдіктерге айтарлықтай теріс әсер етеді: көптеген дақылдар үшін оңтайлы температура диапазоны 15–30 °C аралығында болса, одан жоғары температурада фотосинтез және тыныс алу бәсеңдеп, жылу стресі мен өсімдік тіндерінің зақымдануы орын алады [2].

Жоғары температура, әсіресе жас өсімдіктер үшін қауіпті, өйткені олардың тамыр жүйесі әлі толық дамымаған және жапырақтарының булануға арналған беткейі аз болады. Қызып кету кезінде ферменттік белсенділік бұзылып, фотосинтездің тиімділігі төмендейді, транспирация күшейіп, солып қалу қаупі артады. Сонымен қатар, ауа температурасы 35–40 °C-тан жоғары болған жағдайда көптеген дақылдарда тозаңның ұрықтандыру қабілеті күрт төмендейді, бұл жеміс беру процесінің әлсіреуіне алып келеді. Мысалы, қызанақ өндірісінде жылыжай ішіндегі жоғары температура тозаңның стерилді болуына әкеліп соғады, бұл өз кезегінде өнімнің төмендеуіне әсер етеді.

Температуралық теңгерімнің қарама-қарсы жағында гипотермия мәселесі орын алады (қ. 1.1-сурет). Қыста немесе түнгі уақыттарда жылыту жеткіліксіз болған жағдайда, жылыжай ішіндегі температура өсімдіктердің өсуіне қажет деңгейден төмен түсіп кетуі мүмкін. Температура оңтайлы мәннен төмендегенде өсімдіктің физиологиялық процестері баяулайды: тұқымдардың өнуі тежеледі, қашу мен жапырақтардың өсуі кешеуілдейді, гүлдену және пісу уақыты ұзартылады.



Сурет 1.1 - Өсімдіктердің гипотермиясы.

Өте төмен температура суық күйзеліске және өсімдік тіндерінің зақымдануына әкелуі мүмкін (мысалы, жасушаларда мұз кристалдарының түзілуі салдарынан). Аяз деңгейіне жетпеген жағдайда да топырақ пен ауаның ұзақ уақыт төмен температурада болуы тамыр жүйесінің белсенділігін тежеп, өсімдіктердің иммундық жүйесінің әлсіреуіне себеп болады. Осылайша, суық кезеңде тиімді жылыту жүйесінің және жылу оқшаулауының болмауы жылу сүйгіш дақылдардың дамуының баяулауына немесе тіпті жойылуына алып келіп, егіннің айтарлықтай жоғалуына себеп болуы мүмкін. Қызып кету де, гипотермия да, көп жағдайда микроклиматты басқару жүйесінің жеткіліксіздігінен туындайтынын атап өту маңызды. Қызып кету жағдайы салқындату жүйелерінің жеткіліксіз болуынан (мысалы, желдетудің, көлеңкелеудің, буландыру арқылы салқындатудың жоқтығынан) туындаса, гипотермия — тиімсіз жылыту жүйесінің немесе құрылымның нашар жылу оқшаулауына байланысты орын алады. Бұл екі фактор да температураның оңтайлы диапазонынан ауытқуына себеп болып, өсімдіктердің өсуі мен өнімділігіне теріс әсер етеді [2]. Жылыжай микроклиматына қатысты жүргізілген шолулар көрсеткендей, температураны оңтайлы

шектерде ұстап тұру — дақылдардың сау және қарқынды дамуының негізгі шарты болып табылады. Ал температураның айтарлықтай ауытқуы өсімдіктер үшін стресстік фактор болып, өнімділіктің төмендеуіне әкеледі [1]. Сондықтан қызып кету мен гипотермия микроклиматты басқарудағы басты мәселелер ретінде қарастырылады.

1.1.2 Тұрақты емес ылғалдылық және конденсация

Жылыжайдағы ауаның ылғалдылығы — температуралық режиммен және өсімдіктердегі транспирация процестерімен тығыз байланысты маңызды параметр. Салыстырмалы ылғалдылықты оңтайлы диапазонда (көптеген дақылдар үшін әдетте 60–80%) ұстап тұру — климатты басқарудағы ең күрделі міндеттердің бірі [2]. Тұрақсыз ылғалдылық бұл көрсеткіштің тәуліктің әртүрлі уақыттарында немесе жылыжайдың әртүрлі аймақтарында күрт ауытқуын білдіреді — артық ылғалдылықтан шамадан тыс құрғақтыққа дейін. Бұл екі шекті жағдай да өз алдына күрделі мәселелерге алып келеді. Жоғары ылғалдылық (100%-ға жуық) жылыжайдың ішкі беттерінде (шатыр, қабырғалар) конденсация түзілуіне әкеледі. Бұл ылғалдылық өсімдіктерге оралып қана қоймай (жапырақтарды суландырып, фитопатогендердің дамуына жол ашады), сонымен қатар жабын материалдары бетінде тамшы түзеді, нәтижесінде жарықтың енуі шектеледі. Зерттеулер көрсеткендей, конденсаттың болуы жабынның жарық өткізгіштігін төмендетіп, фотосинтетикалық белсенді сәулеленудің өтуін шектейді. Бұл фотосинтездің төмендеуіне және өсімдіктердің өсуінің баяулауына әкелуі мүмкін [2]. Сонымен қатар, артық ылғал саңырауқұлақ және бактериялық аурулардың дамуына қолайлы жағдай тудырады. Жылыжай микроклиматы жөніндегі шолуларда ылғалдылықтың шамадан тыс болуы саңырауқұлақ ауруларының (ұнтақты көгеру, ботрит, жапырақ көгеруі және т.б.) негізгі қоздырғыш факторы екені көрсетілген [2]. Мұндай аурулар егіннің айтарлықтай бір бөлігін жоғалтуға алып келуі мүмкін. Төмен ылғалдылық (тым құрғақ ауа) да өсімдіктер үшін зиянды. Ол су стрессін тудырады: төмен салыстырмалы ылғалдылық кезінде жапырақ бетінен булану күшейіп, өсімдік транспирация арқылы ылғалды тез жоғалтады. Егер тамыр жүйесі бұл жоғалтуды өтеуге үлгермесе, тіндерде су тапшылығы пайда болады. Нәтижесінде устьицалар (stomata) жабылып, фотосинтез қарқындылығы төмендейді, өркендердің өсуі баяулайды, жапырақ беті кішірейеді [2]. Зерттеулер көрсеткендей, ауа ылғалдылығының төмендеуі өсімдіктің өсуін тежейді, сабақтардың қысқаруына және жапырақ массасының азаюына алып келеді [2]. Күн мен түн арасындағы ылғалдылықтың ауытқуы да қосымша стресс факторы болып табылады. Мысалы, түнде салқындаған кезде салыстырмалы ылғалдылық күрт артып, конденсация түседі; ал күндіз температура жоғарылаған кезде ылғалдылық төмендейді. Мұндай циклдер түнде аурулардың, ал күндіз — су тапшылығының дамуына ықпал етеді. Мәселе желдетудің жеткіліксіздігімен де қиындайды: ылғалды ауаны уақтылы шығарып отырмай, ішкі ылғалдылықты оңтайлы деңгейде ұстау қиын. Сонымен қатар, жылыжайдың құрылымдық ерекшеліктері де маңызды рөл атқарады: шатырдың көлбеулігі жеткіліксіз болса, конденсат ағып кетпей өсімдіктерге тамшылап түседі. Бұл жағдайда шатырды дұрыс жобалау және арнайы жабын материалдарын қолдану ішінара шешім бола алады [2].

Дегенмен, жалпы алғанда, тұрақты ылғалдылықты күрт өзгерістерсіз ұстап тұру жылыжай микроклиматын басқарудағы ең қиын міндеттердің бірі болып қала береді (қ. 1.2-сурет) [2].



Сурет 1.2 - Ылғалдылық деңгейін таңдау

Осылайша, жылыжайдағы тұрақсыз ылғалдылық пен конденсация екі негізгі жағымсыз салдарға әкеледі: біріншіден, өсімдіктерге қолжетімді жарық мөлшерінің азаюы және артық ылғалдану жағдайында фитопатогендердің белсенділігінің артуы; екіншіден, ауаның шамадан тыс кебуі кезінде өсімдіктердің су тапшылығынан туындайтын стрессі. Бұл екі құбылыс та жылыжай дақылдарының өнімділігіне тікелей кері әсер етеді. Академиялық зерттеулер көрсеткендей, ылғалдылықты бақылау — микроклиматты басқарудағы ең күрделі аспектілердің бірі, ал оның оптималды деңгейден ауытқуы өсімдіктердің физиологиялық күйіне жылдам және айқын әсер етеді [2].

1.1.3 Тиімсіз желдету және ауа айналымы

Желдету — жылыжайдан артық жылу мен ылғалды шығару және сырттан таза ауаны енгізудің негізгі механизмі. Тиімсіз желдету жылыжай ішіндегі және сыртқы орта арасындағы ауа алмасудың біркелкі климатты ұстап тұру үшін жеткіліксіз екенін білдіреді. Мұндай жағдай бірнеше себептерден туындауы мүмкін: ашылатын фрамугалар мен терезелердің жеткіліксіз ауданы, олардың сәтсіз орналасуы, сорғыш желдеткіштердің әлсіз немесе мүлде болмауы, сондай-ақ ішкі кеңістіктегі ауа айналымының біркелкі еместігі.

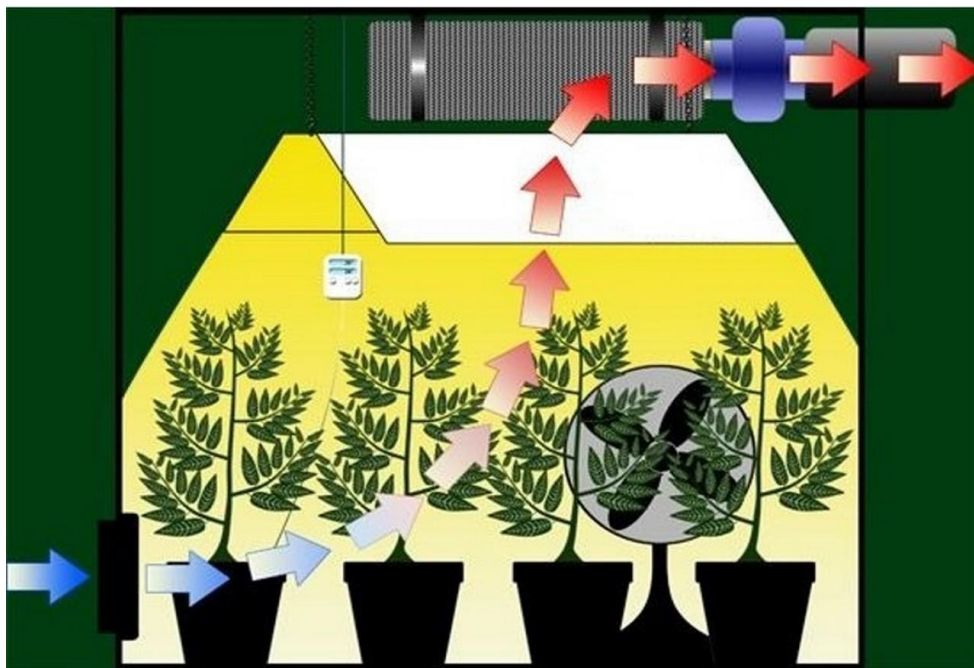
Нәтижесінде, жылыжай ішінде микроклиматтың гетерогенділігі пайда болады — құрылымның жоғарғы аймақтарында немесе бұрыштарында температура мен ылғалдылығы жоғары ауаның тоқырау аймақтары түзіледі [3]. Күндіз желдету жеткіліксіз болған жағдайда, жиналған жылу шығарылған жылудан басым болады, бұл қызып кетуге әкеледі. Сонымен қатар, әсіресе түнгі уақытта ауа алмасу шектелсе, жылыжай ішіндегі ылғалдылық тым жоғары күйде сақталады. Бұл артық ылғалды ауа конденсация түзіп, патогендердің дамуына жағдай жасайды.

Оған қоса, таза ауаның жеткіліксіздігі күндізгі уақытта CO_2 концентрациясының төмендеуіне әкеледі: фотосинтез процесінде өсімдіктер белсенді түрде CO_2 сіңіреді, ал жабық кеңістікте оның деңгейі бірнеше сағат ішінде атмосфералық шамадан (~400 ppm) едәуір төмендеп, фотосинтез қарқындылығын шектейді (бұл мәселе төмендегі тарауда жеке қарастырылады).

Осылайша, желдетудің жеткіліксіздігі микроклиматтың бірқатар жағымсыз өзгерістеріне — қызып кету, ылғалдылықтың жоғарылауы және CO_2 жетіспеушілігіне — әкелетін кешенді фактор болып табылады. Желдетуді дұрыс ұйымдастыру — табиғи әдістермен (фрамугалар мен терезелер арқылы) және мәжбүрлі жүйелермен (механикалық

желдеткіштер көмегімен) — жылыжай ішінде біркелкі климатты қамтамасыз етудің шешуші шарты болып табылады.

Зерттеулер көрсеткендей, жылыжайдағы климаттық параметрлердің сақталуы ауа алмасу қарқындылығына тікелей тәуелді [3] (к. 1.3-сурет).



Сурет 1.3 - Классикалық жылыжайдың желдету жүйесі

Ауаның алмасу жиілігі артқан кезде температура мен ылғалдылық жылыжай көлемінде біркелкі таралады, ал жоғарғы және төменгі деңгейлер арасындағы күрт градиенттер жойылады. Керісінше, тиімсіз желдету ауаның стратификациясына әкеледі: төбе астында қызып кеткен әрі ылғалданған ауа жиналады, ал топырақ бетінде салыстырмалы түрде салқын әрі дымқыл қабаттар қалыптасады.

Нәтижесінде, жылыжайдың әртүрлі аймақтарында өсімдіктер әркелкі микроклиматтық жағдайларға тап болып, біркелкі емес өседі. Мысалы, көп аралықты (модульді) жылыжайларда желдетудің жеткіліксіздігі кезінде температура мен ылғалдылықтың едәуір көлденең және тік градиенттері байқалады, бұл өз кезегінде егіннің гетерогенділігіне (біркелкі еместігіне) алып келеді.

Ішкі ауа айналымының болмауы бұл мәселелерді одан әрі ушықтырады. Ауа тоқырауын жою үшін жылыжай ішіндегі ауа айналымын ұйымдастыру қажет (мысалы, айналмалы желдеткіштер немесе жылыту кезінде пайда болатын конвекция арқылы). Ауа араластырылмаған жағдайда өсімдіктің жапырақтарының айналасында ылғалдылығы және температурасы жоғары шекаралық қабаттар түзіледі. Бұл өсімдіктің суды және жылуды сыртқа шығаруын шектеп, транспирацияны және жапырақтардың салқындау тиімділігін төмендетеді. Бұл құбылыс әсіресе тығыз отырғызылған екпелерде айқын байқалады.

Сол сияқты, CO_2 концентрациясының біркелкі таралмауы да ішкі ауа айналымының жеткіліксіздігімен байланысты. Газ жапырақтардың жанында белсенді түрде сіңіріліп, егер араластыру болмаса, оның диффузиясы шектеледі.

Заманауи зерттеулер, оның ішінде есептеулік сұйықтық динамикасы (CFD) әдістері мен далалық эксперименттер арқылы жүргізілген талдаулар, микроклимат көрсеткіштерінің желдету жүйесінің конфигурациясы мен тиімділігіне қатты тәуелді екенін растады [3].

Жылыжайды жобалау технологияларына арналған шолулар желдету жүйесін оңтайландыру — қызып кетудің алдын алу және микроклиматтың барлық көлемі бойынша біркелкі жағдайларды қамтамасыз етудің маңызды шарты екенін атап өтеді [3]. Ал керісінше, тиімсіз желдету микроклимат параметрлерін бақылауды қиындатады: егер ауа қозғалысы мен жаңаруы қамтамасыз етілмесе, кез келген шаралардың — салқындату,

ылғалдандыру немесе CO₂ байыту — тиімділігі күрт төмендейді.

Сондықтан, желдету мен ішкі ауа айналымын жақсарту — жылыжай микроклиматының сапасын арттырудағы басым бағыттардың бірі болып табылады.

1.1.4 CO₂ концентрациясының жеткіліксіздігі және жарық тапшылығы

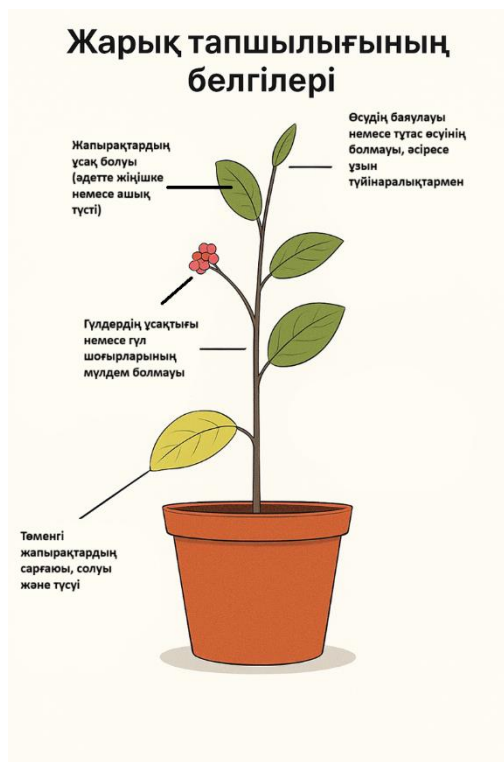
CO₂ концентрациясы мен жарықтандыру — фотосинтездің қарқындылығын, демек, өсімдіктердің өсу қарқыны мен әлеуетті өнімділігін анықтайтын екі негізгі фактор болып табылады. Табиғи атмосферада көмірқышқыл газының мөлшері шамамен 0,04% немесе ~400 ppm деңгейінде болады және бұл концентрация дақылдардың максималды өнімділігі үшін көбіне жеткіліксіз.

Жабық жылыжайларда, егер қосымша CO₂ көзі қамтамасыз етілмесе, онда оның ауадағы концентрациясы күндізгі уақытта айтарлықтай төмендеуі мүмкін. Себебі, қарқынды өсіп жатқан өсімдіктер көмірқышқыл газын белсенді түрде сіңіреді, ал желдету шектеулі жағдайда сырттан келетін ауа ағыны бұл шығынды өтей алмайды. Нәтижесінде CO₂ жетіспеушілігі фотосинтездің шектеуші факторына айналады: жарық пен температура оңтайлы болған күннің өзінде, көміртекті сіңіру жылдамдығы төмендейді, бұл өсудің баяулауына, биомассаның азаюына және өнімділіктің төмендеуіне алып келеді [4].

Көптеген зерттеулер жылыжай атмосферасын фондық деңгейден жоғары CO₂ концентрациясына дейін байыту өсімдіктердің өнімділігін едәуір арттыратынын дәлелдеді. Жақында жүргізілген жүйелі ғылыми шолу нәтижелері бойынша, CO₂ концентрациясын шамамен 800–1000 ppm деңгейіне дейін арттыру өсімдіктердің биомассасын байытусыз жағдаймен салыстырғанда орта есеппен 30–50%-ға дейін көбейте алады [4].

Түрлі көкөніс дақылдары (қызанақ, бұрыш, насыбайгүл және т.б.) бойынша жүргізілген тәжірибелерде CO₂ байыту өсудің жеделдеуіне, жапырақтар саны мен беткейінің ұлғаюына, сондай-ақ өнімділіктің 50%-ға дейін артуына себеп болған [4]. Осы себепті көптеген өнеркәсіптік жылыжайларда CO₂-ны дозалап енгізу жүйелері кеңінен қолданылады.

Егер мұндай жүйе болмаса, онда, әсіресе күн шыққаннан кейінгі таңертеңгі уақыттарда, жылыжай ішіндегі CO₂ деңгейі ~200 ppm немесе одан да төмен деңгейге дейін түсуі мүмкін. Бұл фотосинтез үшін қажетті оңтайлы шектен едәуір төмен, сондықтан өсімдіктердің өсуі айтарлықтай тежеледі (қ. 1.4-сурет).



Сурет 1.4 - Жарықтың жетіспеушілігінің белгілері

CO₂ жетіспеушілігі микроклиматтың маңызды мәселелерінің бірі ретінде қарастырылады, себебі ол өсімдіктің потенциалды өнімділігіне қарағанда нақты өнімнің төмен болуына алып келеді [4]. CO₂ байыту тек жеткілікті жарықпен бірге тиімді жұмыс істейді, бұл екі фактор синергетикалық әсер етіп, фотосинтезді күшейтеді және өнімділікті арттырады, ал олардың бірінің жетіспеушілігі жалпы өсімдік даму процесін шектейді [4].

Жарықтың жетіспеушілігі — жылыжайларда, әсіресе күзгі-қысқы кезеңде және жоғары ендіктердегі аудандарда жиі кездесетін тағы бір шектеуші фактор, өйткені өсімдіктер қалыпты өсу үшін тәуліктік фотосинтетикалық белсенді сәулеленудің жиынтық дозасын қажет етеді, бұл күн радиациясының жиынтық көрсеткіші күндізгі жарық интегралы деп аталады. Қыс мезгілінде күн ұзақтығының қысқаруы мен бұлтты күндердің жиілеуі табиғи жарықтың жеткіліксіздігіне алып келеді, ал бұл өз кезегінде өсімдіктердің жарыққа деген физиологиялық қажеттілігін толық қамтамасыз ете алмайды.

Жылыжайда бұл жағдай жабын материалдарының (шыны, поликарбонат, пленка) ластануымен немесе конденсатпен жабылуымен күрделене түседі, себебі бұл жарықтың жұтылуы мен шағылуын арттырып, ішкі жарық мөлшерін азайтады. Нәтижесінде фотосинтез қарқындылығы жарық жетіспеушілігімен шектеледі, тіпті температура, CO₂ және ылғалдылық деңгейі оңтайлы болған күннің өзінде. Жарықтың жетіспеушілігі өсімдіктердің бозғылт жасыл жапырақтарымен, хлорофилл мөлшерінің азаюымен, ұзартылған түйінаралықтармен және биомассаның төмендеуімен сипатталады, бұл өндірістік жағдайда жеміс саны мен сапасының төмендеуімен, өсіру уақытының ұзаруымен көрініс табады.

Қыста жылытылатын қоңыржай аймақтардағы жылыжайларда жарықтың шектелуі әсіресе өзекті, себебі тіпті қажетті температура сақталғанымен, жарық қарқындылығы жеткіліксіз болған жағдайда фотосинтез деңгейі айтарлықтай төмендейді. Мұндай жағдайларда табиғи жарықты жасанды көздермен толықтыру қажет болады, күн шамдары мен жарықдиодты шамдар арқылы жарық қарқындылығын арттыру, жарық уақыты мен сапасын жақсарту қажет. Жасанды жарықсыз өсімдіктер қыста депрессияға түсіп, гүлденуді тоқтатады, жемістердің мөлшері мен сапасы төмендейді, жалпы өнімділік күрт азаяды.

Мысалы, күзден көктемге дейін жарықтандыруды шамамен 200 мкмоль/м²·с деңгейінде, ал CO₂ концентрациясын 800 ppm-ге дейін байыту арқылы қолданған жағдайда, бақылау тобымен салыстырғанда қызанақтың өнімділігі 60 пайыздан астам артуы мүмкін [4], бұл бастапқы жарық және көмірқышқыл газы тапшылығының қаншалықты елеулі екенін және оны жою кезінде қандай өсу потенциалы іске асатынын айқын көрсетеді.

Осылайша, CO₂ мен жарықтың жетіспеушілігі жылыжайдағы өсімдіктердің өнімділігін шектейтін екі өзара байланысты фактор болып табылады, бұл жағдайда тіпті температура мен ылғалдылық деңгейі оңтайлы болғанның өзінде фотосинтез және өсу жылдамдығы максималды деңгейге жете алмайды, нәтижесінде өнімнің мөлшері мен сапасы төмендейді. Бұл шектеулер әсіресе жыл бойы дақыл өсіруді мақсат ететін қарқынды жылыжайлар үшін өзекті, себебі қыс мезгілінде жарықтандыру мен газдандыру технологияларын қолданбайынша жоғары өнімділікке қол жеткізу мүмкін емес [4]. Сондықтан микроклиматты басқару жүйелері CO₂ концентрациясын бақылау үшін газдандыру жүйелерін, ал жарықты арттыру үшін мөлдір және шағылыстыратын материалдарды тиімді қолдану, сондай-ақ қажет жағдайда жасанды жарық көздерін енгізуді қамтуы тиіс.

1.1.5 Әлсіз Автоматтандыру және басқару

Микроклиматты тиімді басқару автоматты жүйелердің қолданылуына барынша тәуелді, алайда көптеген жылыжай шаруашылықтарында автоматтандыру деңгейі жеткіліксіз күйінде қалып отыр, бұл орта параметрлерінің қолмен немесе қарапайым басқару құрылғыларымен реттелуіне, ал

кешенді бақылау мен оңтайландырудың болмауына әкеледі. Дәстүрлі жылыжайларда көбіне қарапайым термостаттар, суару таймерлері, ультракүлгін сәулеге негізделген датчиктер немесе операторлардың субъективті шешімдері арқылы жылыту мен желдету жүзеге асырылады, мұндай тәсіл нақты жағдайға дәл және шапшаң әрекет етуге мүмкіндік бермейді.

Автоматтандырудың жеткіліксіздігі жүйелердің климаттық өзгерістерге кеш және оқшау әрекет етуімен көрінеді, мысалы, желдету терезелері температура оптимумынан жоғары көтерілгеннен кейін ғана кеш ашылып, қызып кету мен күрт салқындау циклдеріне себеп болуы мүмкін, суару немесе ауаны ылғалдандыру жұмыстары нақты ылғалдылық деңгейін ескермей, тек уақыттық кесте бойынша жүзеге асырылады, бұл артық құрғақтық немесе батпақтану қаупін арттырады.

Микроклимат параметрлері өзара тығыз байланысты болғанымен, орталықтандырылған басқарудың болмауы олардың әрқайсысының жеке, үйлестірілмеген түрде реттелуіне алып келеді, бұл өз кезегінде жүйенің жалпы тиімділігін төмендетеді. Қазіргі ғылыми еңбектерде басқару жүйелерінің көбісі тек физикалық параметрлерді тұрақтандыруға бағытталғаны, ал өсімдіктердің физиологиялық жағдайы есепке алынбайтыны атап өтіледі [5], Маревастың (2023) интеллектуалды жылыжайларға арналған шолуы осыны растай отырып, өсімдіктердің нақты күйін ескеретін бақылау тізбектерін енгізу — болашақ дамудың басты бағыты екенін көрсетеді.

Бұл қазіргі автоматтандыру деңгейінің өсімдіктің нақты қажеттіліктеріне толық сәйкес келмейтіндігін білдіреді, яғни жүйе ортаның белгілі бір көрсеткіштерін қолдап тұрғанымен, өсімдіктің шынайы жағдайын ескермейді. Сонымен қатар, экономикалық және техникалық шектеулер күрделі интеллектуалды жүйелерді жаппай енгізуге кедергі келтіреді, себебі мұндай жүйелердің бағасы жоғары, қызмет көрсетуін қамтамасыз ететін білікті кадрлар жеткіліксіз, жаңа технологиялардың сенімділігі мен инвестициялық қайтарымдылығы шаруашылықтарда күмән тудырады.

Осы себепті әлемдегі көптеген жылыжайлар әлі күнге дейін минималды автоматтандырумен жұмыс істейді, бұл температураның ауытқуы, ылғалдылықтың тұрақсыздығы, жарық пен CO₂ тапшылығы сияқты негізгі микроклиматтық мәселелердің жиі туындауына себеп болады. Автоматты жүйе орнатылған жағдайда да, егер ол дұрыс конфигурацияланбаған немесе барлық факторларды қамтымайтын болса, бұл басқарудың тиімділігіне кепілдік бермейді, жүйеде бейімделусіз қолданылатын қарапайым пропорционалды немесе интегралды реттегіштер сыртқы орта өзгерістеріне уақытылы жауап бере алмай, параметрлердің тұрақсыздығын арттыруы немесе артық энергия шығынын тудыруы мүмкін.

Қазіргі тенденциялар интеграцияланған сенсорлар, үлгіге негізделген болжау және жасанды интеллект алгоритмдерін қолдана отырып, «интеллектуалды жылыжайлар» құруға бағытталған, мұндай жүйелер жылыту, желдету, тұмандандыру, жарықтандыру секілді ішкі жүйелерді үйлестіріп басқаруға мүмкіндік береді [5], алайда Хемминг және әріптестері атап өткендей, бұл технологиялар практикаға әлі толық енбей, зертханалық кезеңнен тәжірибелік ендіру фазасына өту кезінде техникалық қиындықтарға тап болуда.

Бүгінде автоматтандырудың жеткіліксіздігі микроклиматты толыққанды бақылауға мүмкіндік бермейтін басты шектеу болып табылады, адам факторы мен қарапайым басқару схемалары климаттың тәуліктік ауытқуын толық тегістеуге және төтенше жағдайлардың алдын алуға жол бермейді. Қазіргі шешімдерге жасалған шолулар негізінде, автоматтандыру деңгейін арттыру микроклиматпен байланысты көптеген проблемаларды шешудің қажетті шарты болып табылады, ал бұл проблемалардың өзектілігі көбіне қолданыстағы басқару жүйелерінің шектеулі мүмкіндіктерімен түсіндіріледі.

1.1.6 Жүйелердің энергия тиімділігінің жеткіліксіздігі

Микроклиматты басқару энергия ресурстарын тұтынумен тікелей байланысты, жылыту, желдету, салқындату, ультракүлгін жарықтандыру сияқты жүйелердің барлығы жылу немесе электр энергиясын қажет етеді, ал энергия тиімділігінің жеткіліксіздігі

қолайлы климатты сақтауды тым қымбат немесе мүлде мүмкін емес етіп көрсетеді. Дәстүрлі жылыжайларда микроклиматты қамтамасыз етуге жұмсалатын энергия шығыны өте жоғары болып келеді, мысалы, жылыту мен салқындату жүйелері кейбір жағдайларда жылыжай шаруашылығының жалпы энергия тұтынуының 65–85 пайызын құрауы мүмкін [6], ал Жерорта теңізі жағдайында 1 гектар жылыжайды салқындату үшін жылына 100 000 кВт·сағ дейін энергия жұмсалуы мүмкін [6].

Ыстық климатты аймақтарда электр энергиясының негізгі бөлігі желдеткіштерге, буландырғыш салқындату жүйелерінің сорғыларына немесе тоңазытқыш қондырғыларына жұмсалса, солтүстік аймақтарда энергияның басым бөлігі қыста жылытуға бағытталады, ал климатты бақылау жүйелері жеткіліксіз тиімді болған жағдайда бұл негізсіз жоғары энергия шығындарына алып келеді. Жақсы оқшауланбаған жылыжай түнгі уақытта жылуды жоғалтады, бұл температураны ұстап тұру үшін қосымша жылу қуатын қажет етеді және жалпы шығындарды арттырады, сонымен қатар ескі, өнімділігі төмен желдеткіштер сияқты тиімсіз салқындату жүйелері жылыжай ішіндегі температураны түсіруге толық шамасы жетпей, электр энергиясының көп бөлігін тұтынғанымен, қажетті нәтижеге қол жеткізе алмайды.

Мысалы, желдету жеткіліксіз болған кезде фермер үнемі толық қуатта жұмыс істейтін бірнеше желдеткіштер мен сорғыларды қосуға мәжбүр болуы мүмкін, алайда жылыжайдың құрылымдық кемшіліктері қажетті салқындату әсеріне кедергі келтіреді және энергияның үлкен бөлігі тиімсіз жұмсалады. Мұндай жағдайларда төмен энергия тиімділігі микроклимат мәселелерін күшейтеді, бір жағынан, фермер энергия шығындары шамадан тыс болғандықтан жылыту немесе салқындату жүйелерін шектеуі мүмкін, бұл температура мен ылғалдылықтың рұқсат етілген шектен шығуына және нәтижесінде өнімділіктің төмендеуіне әкеледі, ал екінші жағынан, тіпті жүйелер толық қуатта жұмыс істегеннің өзінде, олардың жетілмеген құрылымы немесе конфигурациясы салдарынан мақсатты микроклимат параметрлеріне жету мүмкін болмайды.

Заманауи зерттеулер жылыжайларда энергияны үнемдеуге арналған технологияларды енгізудің өзектілігін көрсетеді [6], мысалы, микроклимат жүйелерінің энергетикалық қажеттілігін ішінара жабу үшін күн энергиясын қолдану болашағы бар бағыт ретінде қарастырылуда [6], көлеңкелі торлар мен буландырғыш салқындату секілді пассивті әдістер, сондай-ақ жылуды қалпына келтіру мен жылу сорғыларын қамтитын белсенді салқындату тәсілдері климатты сақтаудағы энергия шығынын азайту үшін ұсынылуда.

Энергия тиімділігі жөніндегі есептерде қазіргі Парсы шығанағы елдеріндегі қорғалған көкөніс өндірісінің энергия сыйымдылығы бір цикл ішінде бір шаршы метрге шаққанда 10–15 кВт·қа дейін жететіні, ал энергияның басым бөлігі қазба отын көздерінен алынатыны көрсетілген [6], бұл ұзақ мерзімді перспективада тұрақсыз, себебі энергия бағасының өсуі мен экологиялық шектеулер тұтынуды азайтуды талап етеді. Егер энергия тиімділігі арттырылмаса, микроклиматты басқару экономикалық жағынан тиімсіз және экологиялық тұрғыдан тұрақсыз жүйеге айналады, сондықтан микроклиматтық бақылау жүйелеріндегі энергия тиімділігінің жеткіліксіздігі бір жағынан онтайлы агроклиматтық режимдерді ұстап тұруға кедергі жасайтын фактор болса, екінші жағынан жылыжай өндірісінің көміртекті ізін үлкейтетін жүйелік экологиялық мәселе ретінде қарастырылады.

Бұл мәселені шешу заманауи техникалық құралдарды енгізу арқылы, оқшаулағыш құрылымдарды жақсарту, артық энергия тұтынуды болдырмауға бағытталған автоматтандыру, баламалы энергия көздерін қолдану арқылы жүзеге асырылады, алайда қазіргі уақытта көптеген шаруашылықтар әлі де болса энергияны көп қажет ететін ескі жабдықты және тиімсіз тәсілдерді пайдаланып келеді, бұл ресурстардың босқа ысырап болуына немесе мақсатқа сай қолданылмауына алып келеді [6]. Сонымен қатар, энергия тиімділігі алдыңғы баяндалған автоматтандыру проблемасымен тығыз байланысты, себебі ақылды басқару жүйелері энергияны үнемдеуге қабілетті, қажет болған жағдайда ғана жабдықты қосып-өшіруді қамтамасыз етеді, ал әлсіз автоматтандыру жүйелерінде жылытқыштар немесе желдеткіштер жиі үзіліссіз жұмыс істеп тұрады, бұл жалпы

тиімділікті күрт төмендетеді. Сол себепті энергия тиімділігін арттыру мәселесі техникалық жаңғырту және басқару жүйесін оңтайландыру секілді кешенді шараларды талап етеді.

1.2 Микроклиматтың өсімдіктердің физиологиясы мен өнімділігіне әсер

Барлық аталған микроклиматтық проблемалар өсімдіктердің физиологиялық жағдайына және олардың өнімділігіне тікелей ықпал етеді, себебі өсімдіктер – қоршаған ортаның өзгерістеріне нәзік реакция беретін тірі организмдер. Микроклимат параметрлерінің оптимумнан ауытқуы өсімдіктерде стресс реакцияларын тудырып, фотосинтез, тыныс алу, транспирация, минералдық қоректену сияқты негізгі физиологиялық процестердің бұзылуына әкеледі, ал бұл, өз кезегінде, олардың биологиялық және экономикалық өнімділігінің төмендеуіне себеп болады.

Температура өсімдіктердегі барлық биохимиялық реакциялардың жылдамдығын анықтайды, ферменттік белсенділік оңтайлы температура кезінде максималды деңгейде жүреді және бұл өсудің жоғары қарқынын қамтамасыз етеді. Егер температура оңтайлы шектен асып кетсе, ферменттер денатурацияға ұшырап, жасушалық құрылымдар зақымдалады, фотосинтез әлсірейді, ал қызып кетудің ұзаққа созылуы оның толық тоқтауына дейін алып келуі мүмкін. Зерттеулер температура жоғарылаған кезде, тіпті CO_2 байыту жүргізілсе де, фотосинтездің таза өнімділігі төмендейтінін және бұл өнімнің азаюына әсер ететінін көрсетеді [7]. Жылу стрессі гүлдену және жеміс түзілу кезеңдерінде әсіресе қауіпті, ол гүлдердің түсуіне, тозаң стерильділігіне және ұрықтанудың нашар жүруіне әкеліп соғады, мысалы, 35°C -тан жоғары температурада қызанақтың және басқа да дақылдардың тозаңының жарамдылығы күрт төмендеп, ұрықтандырылған гүлдердің пайызы айтарлықтай азаяды. Мұндай әсерлер нәтижесінде өнімнің саны да, сапасы да төмендейді – жеміс аз, ұсақ және жиі деформацияланған болады. Төмен температуралар өсімдіктің өсуін баяулатады, гүлдену мен жетілу кезеңдерін кешіктіреді, ал суық стресс жағдайында метаболизм бұзылып, хлороз, некроз секілді белгілермен қатар тіндердің зақымдануы орын алады, ал аяз тіндердің тұрақты бұзылуына әкелуі мүмкін. Осылайша, температураның кез келген жағынан оптимумнан ауытқуы өсімдіктердің физиологиясына елеулі кері әсерін тигізіп, өнімділіктің жоғалуына себеп болады [7].

Су режимі мен ауаның салыстырмалы ылғалдылығы да өсімдіктердің күйіне тікелей әсер етеді. Төмен ылғалдылық жағдайында өсімдіктер суды стоматалар арқылы қарқынды жоғалтады, бұл олардың жабылуына, тиісінше CO_2 жеткізілімінің азаюына және фотосинтез қарқынының баяулауына әкеледі. Ылғалдың жетіспеушілігі ұзаққа созылса, тіндер дегидратацияға ұшырап, жапырақтар солып, жаңа мүшелердің дамуы тоқтайды. Керісінше, ылғалдылықтың шамадан тыс жоғары болуы транспирацияны азайтып, тіндерде артық су жиналуына, тамырдан қоректік элементтердің тасымалдануының бұзылуына себеп болуы мүмкін. Сонымен қатар, артық ылғалдылық өсімдіктерде саңырауқұлақ ауруларының (шірік, көгеру және т.б.) дамуына ықпал етеді, бұл фотосинтездік белсенділіктің төмендеуіне және өнімділіктің күрт азаюына алып келеді. Мысалы, Botrytis немесе ұнтақты көгеру секілді инфекциялар өсімдіктің ассимиляциялық аппаратын толықтай зақымдап, нәтижесінде өсімдіктердің тіршілік әрекетін шектейді. Ғылыми зерттеулер көрсеткендей, тіпті ылғалдылық деңгейінің аз ғана артуы өсімдіктердің ауруға бейімділігін арттырып, өнімділікке кері әсерін тигізеді [2].

Көмірқышқыл газы – фотосинтездің негізгі шикізаты, оның концентрациясы өсімдіктің органикалық заттарды синтездеу жылдамдығын анықтайды. CO_2 концентрациясы төмен болған жағдайда фотосинтетикалық жүйе толық қуатта жұмыс істей алмайды, ал бұл өсімдіктің өсуін шектейді. Жабық кеңістікте, әсіресе жылыжайда, сырттан CO_2 жеткізілмесе, оның деңгейі фотосинтез үшін шектеулі мәнге дейін төмендеуі мүмкін [4]. Бұл жағдай өсімдіктің өсуін тежейді, ал фотосинтезге қажетті көміртектің жетіспеушілігі өнімнің азаюына әкеледі. Керісінше, CO_2 байыту фотосинтезді белсенді түрде ынталандырып, өсімдіктің биомассасын, жапырақ алаңын, өнім санын және сапасын арттырады, бұл көптеген ғылыми еңбектермен дәлелденген [4].

Жарық та – фотосинтездің басты энергия көзі және өсімдіктердің өсу, даму, метаболизм процестерін қамтамасыз ететін негізгі фактор. Жарық жетіспесе, АТФ пен көмірсулардың синтезі тежеледі, бұл өсімдіктің өсу қарқынының баяулауына, сабақтардың ұзаруына, жапырақтың жұқаруына және генеративті мүшелердің дұрыс қалыптаспауына әкеледі. Жемістерде қант пен құрғақ зат мөлшері азайып, өнім сапасы төмендейді. Тіпті барлық басқа жағдайлар оңтайлы болғанның өзінде, жарықтың жетіспеушілігі өсімдіктің генетикалық өнім беру әлеуетін толық жүзеге асыруға мүмкіндік бермейді. Жазға қарағанда қыста өнімнің аз болуы фотосинтетикалық белсенді радиация мөлшерінің төмен болуымен байланысты. Сонымен қатар, артық жарықтың өзі сирек мәселе болғанымен, ол жоғары температура және төмен ылғалдылықпен бірге жапырақ тіндерінің күйіп кетуіне және хлорофиллдің деградациясына әкелуі мүмкін.

Іс жүзінде микроклимат факторлары бір-бірінен тәуелсіз емес, олар кешенді түрде әрекет етеді, бір фактордағы стресс көбіне басқа факторлармен күшейтіледі. Мысалы, жоғары температура төмен ылғалдылықпен ұштасса, өсімдіктер транспирацияның күрт артуынан күйзеліске ұшырайды, немесе жарық жетіспесе, тіпті жоғары CO_2 деңгейінің өзі фотосинтезді арттыра алмайды, өйткені жарық – шектеуші фактор ретінде әрекет етеді [4]. Осылайша, микроклиматтың өсімдіктерге әсері – күрделі, көпфакторлы процесс, ал әрбір параметрдегі ауытқу бүкіл физиологиялық жүйенің бұзылуына себеп болуы мүмкін. Қолайсыз микроклимат жалпы алғанда өсімдіктердің физиологиялық белсенділігін төмендетіп, өнімділікке тікелей кері әсер етеді. Егер жағдайлар бірнеше параметрлер бойынша оңтайлы болмаса, бұл егіннің айтарлықтай азаюына, кейде тіпті толық жойылуына әкелуі мүмкін. Мысалы, жоғары температура жағдайында желдетусіз қалдырылған жылыжайда өсімдіктердің ыстықтан курауы немесе қыс мезгілінде жылу жүйесінің істен шығуы салдарынан аяздан қатып қалуы жиі кездесетін құбылыстар. Осындай төтенше жағдайлар егінге орны толмас зиян келтіруі мүмкін. Биохимиялық және физиологиялық деңгейде мұндай жағдайлар өсімдіктерде стресс реакцияларын тудырады: құрғақшылық жағдайында абсциз қышқылының артық синтезделуі, қызып кету кезінде жылу шоғы ақуыздарының белсенуі, липидтердің асқын тотығу өнімдерінің жиналуы, жасушалардың бөлінуінің тоқтауы байқалады. Бұл процестер өсімдіктің энергетикалық және қоректік ресурстарын өсу мен өнім қалыптастырудан алып, тек қорғаныс механизмдеріне бағыттайды, нәтижесінде жалпы өнімділік төмендейді.

Ауылшаруашылық физиологиясының деректері бойынша микроклиматтың қысқа мерзімді қолайсыз әсері де ұзақмерзімді нәтижелерге алып келуі мүмкін. Мысалы, бүршіктену сатысында болған бір реттік қызып кету қалыптасатын гүлдердің немесе жемістердің санын азайтып, тіпті одан кейінгі оңтайлы климат кезінде де жалпы өнімге әсерін тигізуі ықтимал. Сондықтан микроклиматтың тұрақтылығы тек орташа мәндерге емес, жағдайлардың өзгерістеріне де тәуелді. Ғылыми еңбектерде өнімділіктің микроклиматтық факторларға тікелей тәуелділігі нақты дәлелдермен сипатталады. Мәселен, температураның оңтайлы деңгейден жоғарылауы басқа барлық жағдайлар қалыпты болған күннің өзінде өнімнің төмендеуіне себеп болады [7], ал CO_2 концентрациясын және жарықтандыру деңгейін оңтайландыру, керісінше, өсімдіктің физиологиялық белсенділігін арттырып, өнім көлемін едәуір ұлғайтады [4].

Практикалық тәжірибе көрсеткендей, микроклиматты басқару технологияларын енгізу (мысалы, тұмандату жүйелері, көлеңкелеу пленкалары, салқындату жабдықтары) өнім сапасы мен көлемін арттыруға елеулі әсер етеді. Ал бұл жүйелердің болмауы немесе тиімсіз жұмысы, керісінше, өнімнің үнемі жетіспеушілігіне, сапасының нашарлауына алып келеді. Демек, микроклиматтың өсімдік физиологиясына әсері өте ауқымды, ал жылыжай жағдайында алынған егіннің сапасы мен көлемі көбінесе осы микроклиматты қаншалықты дұрыс қолдағанымыздың көрінісі болып табылады. Бұл тәуелділіктер заманауи зерттеулермен расталып отыр және жоғарыда сипатталған микроклиматтық мәселелерді шешудің қаншалықты маңызды екенін көрсетеді.

Жылыжайдағы микроклиматты басқарудың қазіргі тәжірибелеріне шолу жасай отырып, бұл жүйелердің негізгі мақсаты өсімдіктердің өсуі мен дамуы үшін оңтайлы ортаны қамтамасыз ету, сонымен қатар энергия ресурстарын тиімді пайдалану болып

табылатыны анықталады. Температура, ылғалдылық, жарықтандыру, CO₂ концентрациясы сияқты параметрлерді басқару үшін түрлі әдістер қолданылады. Басқару жүйелерінің дамуы қарапайым қолмен реттеу әдістерінен бастап интеллектуалды алгоритмдерге дейінгі кең ауқымды қамтиды. Микроклиматты басқарудың негізгі тәсілдеріне оператор арқылы жүргізілетін қолмен басқару, шекті автоматтандырылған (екі позициялы) жүйелер, PID-регуляторлар арқылы басқару, бағдарламаланатын логикалық контроллерлер (PLC), SCADA негізіндегі орталықтандырылған жүйелер және жасанды интеллектке негізделген интеллектуалды шешімдер жатады. Бұл әдістердің әрқайсысы жұмыс істеу принциптерімен, артықшылықтарымен және белгілі бір шектеулерімен сипатталады. Олардың тиімділігі ғылыми зерттеулермен дәлелденген, және оларды салыстырмалы түрде бағалау заманауи жылыжай өндірісінде микроклиматты басқару деңгейін арттыруға ықпал етеді.

1.2.1 Микроклиматты қолмен басқару

Қолмен басқару тәсілі жағдайында жылыжай ішіндегі микроклиматтық параметрлерді реттеу шешімдері толығымен адамның бақылауы мен тәжірибесіне сүйене отырып жүзеге асырылады. Мұндай басқару режимінде оператор термометрлер мен гигрометрлер сияқты қарапайым өлшеу құралдарының көрсеткіштеріне сүйеніп, желдету жүйелерін ашады, жылытқыштар мен желдеткіштерді қосады немесе сөндіреді, сондай-ақ суару жүйелерін қолмен басқарады. Бұл тәсілдің басты артықшылығы – арнайы күрделі техникалық құралдарды қажет етпеуі; жылыжайдың өзі мен қарапайым бақылау құрылғылары жеткілікті болып табылады. Сонымен қатар, қолмен басқару агрономның жеке бақылауларына икемді түрде жауап бере алады, мысалы, өсімдіктердің визуалды жағдайын немесе ауа райы болжамдарын ескеру арқылы. Шағын жылыжайларда немесе техникалық қызметкерлер үнемі қатысып отыратын жағдайда бұл әдіс тұрақты және қанағаттанарлық нәтижелер көрсетуі мүмкін.

Алайда, қолмен басқарудың бірқатар елеулі шектеулері де бар. Ең алдымен, бұл әдіс адамның субъективтілігіне тәуелді: әртүрлі операторлар микроклиматты әртүрлі жолдармен реттеуі мүмкін, бұл параметрлердің тұрақсыздығына алып келеді. Бұдан бөлек, температура мен ылғалдылық деңгейлерін дәл сақтап тұру мүмкін болмайды – бұл көрсеткіштердің күн ішінде едәуір тербелуі байқалады. Сондай-ақ қолмен басқару режимінде өзгерістерге реакция кешігеді, әсіресе түнгі уақытта, бұл өсімдіктер үшін стресс факторы болуы мүмкін. Жылыжай көлемі ұлғайған сайын бұл тәсілдің еңбек сыйымдылығы артып, практикалық қолданылуы қиындай түседі. Қазіргі заманғы кешенді жылыжайлар микроклиматты қолмен тұрақты түрде ұстап тұру үшін тым күрделі және динамикалық жүйелерге айналды.

Зерттеушілер бұл мәселені нақты атап көрсетеді: техникалық жабдықталған ірі жылыжайларда дәстүрлі қолмен басқару тәсілі қазіргі таңда өзектілігін жоғалтқан. Автоматтандыру жүйелері климатты басқару тиімділігін арттырып қана қоймай, еңбек шығындарын да едәуір азайтады. Бұл тұрғыда қолмен басқарудан автоматты реттеуге көшу жағдайлардың тұрақтылығын арттыруға, сондай-ақ бақылау дәлдігін қамтамасыз етуге мүмкіндік береді. Ғылыми шолу деректеріне сәйкес [8], бүгінгі таңда кең ауқымды жылыжайлардағы микроклимат параметрлерін тек қолмен реттеу – жүйенің инерциясы мен күрделілігіне байланысты тиімсіз шешім ретінде қарастырылады. Авторлар ортаны автоматты басқару процестері өнімділік пен өсімдіктер жағдайын тұрақты ұстап тұруда едәуір тиімді екенін айқын көрсетеді.

2010 жылдардың басынан бастап PID-бақылау жүйелеріне негізделген автоматты реттеу контурлары микроклиматты басқарудың ең тиімді әдісі ретінде танылды. Ал қазіргі «интеллектуалды» басқару жүйелері де, шын мәнінде, қолмен басқару тәсілдерінің кемшіліктерін жою үшін классикалық автоматтандыру қағидаттарына сүйенеді. Қорытындылай келе, қолмен басқару жылыжай технологиясының дамуындағы бастапқы кезеңдер үшін маңызды рөл атқарғанымен, қазіргі талаптар шеңберінде дәлдік пен

сенімділіктің жетіспеуіне байланысты ол автоматтандырылған басқару жүйелеріне жол беріп отыр.

1.2.2 Шекті (екі позициялы) басқару

Автоматтандырылған микроклиматтық басқарудың алғашқы кезеңдерінің бірі ретінде шекті екіпозициялық реттеу жүйелері кеңінен қолданылды. Бұл әдістің жұмыс принципі қарапайым: реттегіш құрылғы белгілі бір параметрдің, мысалы, температураның нақты мәнін алдын ала белгіленген шекті деңгеймен салыстырады. Егер өлшенген мән осы диапазоннан тыс шықса, жүйе екі күйдің біріне – қосулы немесе сөндірулі – өтеді. Бұл басқарудың классикалық үлгісі ретінде термостатты мысалға келтіруге болады: температура белгіленген шектен төмен түссе, жылыту жүйесі қосылады, ал жоғарылаған жағдайда өшіріледі. Осы тәсіл арқылы жүйе жабдықты ауыстырып қосу немесе өшіру жолымен параметрді белгіленген диапазонда ұстап тұрады.

Шекті басқару тәсілінің артықшылықтарының бірі – оның орындалу қарапайымдылығы. Бұл әдіс күрделі модельдеуді немесе алгоритмдерді қажет етпейді, тек рұқсат етілген шектерді орнату жеткілікті. Сонымен қатар, дұрыс таңдалған гистерезис арқылы жүйе реленің жиі іске қосылуынан сақтана алады, бұл оның сенімділігін арттырады. Мұндай реттегіштер арзан, кең таралған және технологиялық тұрғыдан көп қолданыс тапқан: көптеген жылыжайларда температура мен ылғалдылықты бақылау осы қарапайым құралдар арқылы жүзеге асырылған. On/off алгоритмінің энергия үнемдеуші сипаты да маңызды – жүйе тек қажеттілік туындаған сәтте ғана жұмыс істейді, бұл ресурстардың артық жұмсалыуына жол бермейді. Әсіресе инерциясы жоғары құрылымдарда, мысалы, топырақ пен жылыжай ғимараты сияқты нысандарда, мұндай қарапайым реттеу климатты тиімді қолдау үшін жеткілікті бола алады.

Алайда бұл тәсілдің шектеулері де бар. Шекті басқару бір мәнге дәл тұрақтандыруды қамтамасыз ете алмайды. Параметрлер белгіленген шектердің маңында үнемі тербеліп тұрады: мысалы, температура жылытқыш қосылған мен сөндірілген деңгейлер арасында ауытқып отырады. Бұл тербелістердің қарқындылығы және жиілігі объектінің инерциясына, сондай-ақ гистерезис параметрлерінің нақты таңдалуына тәуелді. Гистерезис аймағы тым тар болса, жүйе жиі іске қосылып-сөнуі мүмкін, ал бұл техникалық тозуға және энергия шығынының артуына алып келеді. Мұндай тұрақсыздық өсімдіктердің физиологиялық процестеріне теріс әсер етуі ықтимал.

Сонымен қатар, екіпозициялық басқару әсерді мөлшерлеп беруге қабілетсіз. Жабдық тек екі күйде – толық қуатта немесе толық сөндірілген күйде жұмыс істейді, бұл кей жағдайларда ресурстардың артық жұмсалыуына себеп болуы мүмкін. Жылдам өзгеретін сыртқы жағдайларға, мысалы, күн радиациясының күрт көтерілуі немесе ауа температурасының тез өзгеруі сияқты факторларға on/off типіндегі реттегіш тиісті түрде әрекет ете алмайды, себебі мұндай жүйе параметрлердің өзгеру қарқынын ескермейді. Бірнеше микроклимат параметрін бір мезгілде басқару қажеттілігі туындаған жағдайда да бұл тәсіл шектеулі болып табылады – әрбір арна үшін жеке реттегіш қажет, әрі олардың жұмысы өзара келіспеушіліктерге алып келуі мүмкін.

Дегенмен, бұл жүйелер тәжірибеде кеңінен қолданылған. Егер объектінің математикалық моделі жоқ болса немесе күрделі басқару контурын орнату мүмкін болмаса, шекті басқару тиімді балама ретінде қарастырылды. Зерттеулер көрсеткендей, жинақталған эмпирикалық деректерге сүйене отырып жасалған on/off жүйесі сыртқы бұзылулардың әсерін белгілі бір деңгейде өтей алады. Мысалы, жылу реттегіш шекті мәндерді біртіндеп бейімдеп өзгерте отырып, жылу қуатын жұмсақ ауыстыру арқылы мақсатты температураны салыстырмалы түрде біркелкі ұстап тұруға мүмкіндік берген. Сонымен қатар, кейбір қолданбаларда шекті басқару үздіксіз бақылау әдістерімен біріктірілген: мысалы, жылыту мен желдету үшін PI-регуляторлар қолданылса, ал суару немесе тыңайтқыш беру жүйесінде on/off басқару пайдаланылған. Мұндай интеграция түрлі параметрлерді өзара кедергісіз тиімді тұрақтандыруға мүмкіндік береді.

Осылайша, шекті on/off басқару жүйелері қарапайымдылығы, қолжетімділігі және сенімділігімен ерекшеленгенімен, олардың дәлдік пен бейімделу қабілеті шектеулі. Микроклиматты тиімді әрі икемді басқару қажеттілігі арта түскен сайын, бұл жүйелердің орнына доза бойынша реттеу мүмкіндігін беретін үздіксіз басқару әдістері қолданысқа енді.

1.2.3 PID реттеу

Пропорционалды интегралды дифференциалды (PID) реттегіштер – қазіргі жылыжайлардағы микроклиматты автоматтандырылған басқарудың ең кең таралған құралдарының бірі. Бұл реттегіштер басқару сигналын есептеу кезінде тек нақты уақыттағы

қателікті ғана емес, сонымен қатар оның жинақталуын (интегралды компонент) және өзгеру қарқынын (дифференциалды компонент) ескере отырып, үш компоненттің жиынтығына негізделеді. Мұндай құрылым қарапайым екіпозициялық басқарумен салыстырғанда реттелетін параметрді әлдеқайда тұрақты және дәл ұстап тұруға мүмкіндік береді. Осы себепті PID алгоритмдері өнеркәсіптік климаттық бақылау жүйелерінде стандарт ретінде қолданылады.

PID реттегіштердің негізгі артықшылығы – басқарушы әсердің үздіксіз және икемді берілуі. Жүйе жылу көзін бірден толық іске қосудың орнына, қажеттілікке байланысты қуатты біртіндеп арттыра алады. Бұл қызып кету, салқындау және басқа да тербелістердің алдын алады. Жақсы бапталған PID тізбегі температура немесе ылғалдылық секілді параметрлерді өте кіші қателікпен, берілген мәнге барынша жақын деңгейде сақтай алады. Сонымен қатар, орнату барысы салыстырмалы түрде қарапайым: басқарушы коэффициенттердің үшеуін (K_p , K_i , K_d) таңдау жеткілікті, бұл көбіне тәжірибе арқылы немесе автоматты баптау әдістерімен іске асады.

PID басқару алгоритмдері ғылыми негізделген, олардың теориялық сипаттамасы жақсы дамыған және болжамды. Бұл қасиеттер оларды өнеркәсіптік автоматтандыру жүйелерінде, соның ішінде агротехникада, жаппай енгізуге себеп болды. Ауылшаруашылық саласында PID реттегіштердің танымалдығы олардың жүйе инерциясын ескере алуымен түсіндіріледі. Интегралды бөлік ұзақ мерзімді ауытқуларды жояды, ал дифференциалды бөлік жылдам өзгерістерге жедел әрекет етуге мүмкіндік береді. Статистикалық деректерге сәйкес, агротехникалық жүйелердегі автоматты басқару контурларының 90%-ға жуығы PID принципіне негізделген, бұл олардың инженерлік сенімділігі мен практикалық тиімділігін дәлелдейді. Бүгінгі таңда да, жетілдірілген интеллектуалды әдістердің дамуымен қатар, PID өз тиімділігінің арқасында микроклиматты басқаруда негізгі технология болып қала беруде.

Соған қарамастан, классикалық PID реттегіштерінің белгілі бір шектеулері бар. Оларды тиімді пайдалану үшін нақты жылыжайға тән жүйе параметрлерін ескере отырып теңшеу қажет. Параметрлерді дұрыс таңдамау тербелмелі немесе тұрақсыз жұмыс режиміне әкелуі мүмкін. Сонымен қатар, PID алгоритмі әдетте бір ғана параметр мен сенсорға бағытталған. Ал жылыжайда температура, ылғалдылық және көмірқышқыл газы секілді параметрлер бір-бірімен тығыз байланысты. Бұл өзара әсерлерді ескерместен бірнеше PID тізбектерін қатар қолдану жүйенің үйлесімділігіне қауіп төндіреді.

PID алгоритмдерінің тағы бір кемшілігі – олардың статикалық табиғаты. Коэффициенттер алдын ала беріледі және әртүрлі маусымдарда немесе өсімдіктердің даму сатыларында өзгермейді. Нәтижесінде, бір режим кейбір жағдайларда тиімді болғанымен, басқа жағдайда қанағаттанарлық нәтиже бермейді. Күрт сыртқы әсерлер кезінде, мысалы, кенеттен ауа райының өзгеруі кезінде, PID тізбегі жеткілікті түрде бейімделе алмай, параметрлерді қалпына келтіргенге дейін қайта реттеу процесінен өтуі мүмкін.

Осы шектеулерді еңсеру үшін PID басқаруды бейімдеу және көпөлшемді басқару тәсілдері енгізілуде. Әдеби деректерде PID алгоритмдерін нақты жылыжай жағдайларына бейімдеудің әртүрлі жолдары зерттелген. Мысалы, [10] жұмысында ұсынылған тәсіл параметрлік бейімделуге негізделген: PID құрылымын сақтай отырып, оның коэффициенттері нақты уақыт режимінде автоматты түрде жаңартылып отырады. Жүйеде температура, ылғалдылық және CO_2 секілді бастапқы айнымалылар декомпозиция арқылы жеке PID тізбектеріне бөлініп, әрқайсысы үшін басқару әсері жеке есептеледі. Бұл тәсіл өзара әсерлерді азайтып, көпфакторлы бақылау жүйесін тұрақты етеді. Сонымен қатар, коэффициенттерді оңтайландыру үшін Левенберг–Марквардт алгоритмі қолданылады, бұл жүйенің өзін-өзі бейімдеу мүмкіндігін қамтамасыз етеді.

Модельдеу нәтижелері ұсынылған PID тәсілінің жоғары дәлдікті және тұрақтылықты қамтамасыз ететінін көрсетті. Классикалық PID-ке қарағанда, параметрлерді бейімдеудің арқасында көп параметрлі микроклимат жүйесін тиімді басқару мүмкіндігі артты. Осылайша, PID реттегіштері қарапайымдылық, сенімділік және тиімділік балансын сақтап қала отырып, қазіргі жылыжай жүйелерінде микроклиматты басқарудың өзекті және тиімді

шешімі болып қала береді. Сонымен қатар, бұл тәсіл жаңа буын интеллектуалды басқару жүйелеріне көшудің сенімді негізін қалайды.

1.2.3 PLC негізіндегі басқару жүйелері

Электрондық технологияның дамуымен нақты жылыжай шаруашылықтарында сипатталған алгоритмдерді – бағдарламаланатын логикалық контроллерлерді (PLC) сенімді жүзеге асыруға мүмкіндік беретін техникалық шешім пайда болды. PLC - бұл технологиялық процестерді автоматтандыруға арналған мамандандырылған өнеркәсіптік микрокомпьютерлер. Олар датчиктер мен атқарушы құрылғыларды қосуға арналған модульдік кірістерге/шығыстарға ие, нақты уақыт режимінде жұмыс істейді және жылыжайлар үшін маңызды болып табылатын қатаң жағдайларда (жоғары ылғалдылық, шаң, температураның өзгеруі) жұмыс істейді. PLC негізіндегі микроклиматты басқару жүйелері 1980-1990 жылдардан бастап аз сенімді дербес компьютерлерді вытестира бастады: Егер ДК жылыжайдың агрессивті ортасына жақсы төзбесе, контроллерлер арнайы осындай тапсырмаларға арналған. PLC жүйесінің жұмыс принципі: барлық датчиктер (термометрлер, гигрометрлер, Жарық датчиктері, CO₂ және т.б.) PLC кірістеріне қосылады, ал PLC шығыстары клапан жетектеріне, сорғыларға, жылытқыштарға, желдеткіштерге, ылғалдандырғыштарға қосылады. Контроллердің жадында басқару бағдарламасы (алгоритмі) бар – қарапайым шекті ережелерден бастап күрделі PID немесе түсініксіз реттегіштерге дейін. PLC сенсорлармен циклдік түрде сұхбаттасады, белгіленген алгоритмге сәйкес қажетті басқару әсерін есептейді және жетектерге командалар береді. Мысалы, контроллер температура мен ылғалдылықты бірнеше секунд сайын оқиды, берілгендермен салыстырады және логикаға сәйкес желдеткіштерді аздап жауып немесе желдеткіштің айналуын азайта алады. PLC жүйелерінің артықшылықтары: PLC бір құрылғыда өлшеу, есептеу және басқару функцияларын біріктіреді, бұл көптеген жеке термостаттар немесе таймерлер қажеттілігін жояды. Мұндай контроллерлер өте сенімді-өнеркәсіптік PLC-де істен шығудың орташа уақыты ондаған мың сағатты құрайды, олар кедергіге төзімді. PLC оңай кеңейеді: қосымша жабдықты (артқы жарық, суару жүйелері) басқару үшін жаңа сенсорларға арналған модульдерді (мысалы, CO₂) немесе шығыс модульдерін қосуға болады. Бағдарламалаудың икемділігі кез – келген логиканы жүзеге асыруға мүмкіндік береді-бекітілген шектерден бастап күрделі басқару заңдарына дейін. Жылыжайларда PLC енгізу бірден бірнеше реттеу тізбектерін бір құрылғыда біріктіруге және олардың жұмысын үйлестіруге мүмкіндік берді. Мысалы, контроллер жылу датчиктері мен ылғалдылық датчиктерінің деректерін бір уақытта өңдей алады және кешенді шешімдер қабылдай алады (егер ол ыстық және ылғалды болса – желдетуді ашыңыз, егер ол ыстық болса, бірақ құрғақ болса – тұманды қосыңыз және т.б.). Бұл әртүрлі құрылғылармен салыстырғанда әртүрлі орта параметрлерін басқару консистенциясын жақсартты. Сонымен қатар, PLC деректерді сақтау және тасымалдау мүмкіндігін ұсынады: заманауи модельдер микроклимат журналын жүргізе алады, компьютермен немесе бұлттық қызметпен байланыста бола алады, бұл диспетчерлікке жол ашады (SCADA, IoT). Тағы бір артықшылығы – ресурстарды дәлірек мөлшерлеу арқылы энергияны үнемдеу. PLC-дегі ақылды Алгоритмдер жабдықты уақытында өшіре алады, оңтайландырылған сценарийлер бойынша жұмыс істей алады. Мысалы, [11] PLC контроллерін енгізу олардың жылдамдығын реттеу арқылы желдеткіштердің қуат тұтынуын азайтуға мүмкіндік беретін нақты мысал келтірді. Зерттеу [11] осы тәсілдің артықшылықтарын көрсететін PLC негізіндегі автоматтандырылған климаттық бақылау жүйесін әзірледі. Бұл жүйеде бір өнеркәсіптік контроллер жылыжайды желдетуге, салқындатуға және көлеңкелеуге жауап береді. PLC желдеткіштің жиілікті басқару блогымен, буландырғыш салқындату жүйесімен (ылғалдандыратын түтік қабырғалары) және күннен қорғайтын жетектермен біріктірілген. Контроллер жылыжайдың ішінде де, сыртында да күн радиациясы, температура және ылғалдылық сенсорларынан ақпарат алады. Осы деректерге сүйене отырып, PLC оңтайландырылған салқындату стратегиясын жүзеге асыратын алгоритмді орындайды.

Атап айтқанда, температураның шамалы жоғарылауымен жүйе желдеткіштерді толығымен өшірмейді, бірақ олардың айналымын төмендетеді, осылайша электр қуатын үнемдейді және климаттың күрт өзгеруіне жол бермейді. Егер сыртқы жағдайлар өзгерсе (мысалы, күн белсенділігі төмендейді), контроллер жұмыс режимін бейімдейді: желдеткіш саңылауларды ашуы немесе желдеткіштердің бір бөлігін өшіруі мүмкін. Нәтижелер бойынша [11], PLC-ді дискіні біркелкі реттей отырып қолдану температуралық режимге зиян келтірместен желдетудің қуат тұтынуын азайтуға мүмкіндік берді. Шын мәнінде, мұндай жүйе бұрын сипатталған екі жақты-модуляцияланған басқару принципін жүзеге асырады: толық қосу/өшірудің орнына қуат дозасы пайда болады. PLC пайдаланудың артықшылығы- барлық логика (деректерді жинау, оңтайлы режимді есептеу, дискілерге командаларды жіберу) бір құрылғы автоматты режимде орындалады. Оператор тек қажетті температура/ылғалдылық параметрлерін орнатады, ал контроллердің өзі барлық ішкі жүйелерді Үйлестірілген басқаруды жүзеге асырады. PLC шектеулері: аталған артықшылықтарға қарамастан, кейбір нюанстарды ескеру қажет. Біріншіден, PLC бағдарламалау біліктілікті талап етеді-дұрыс алгоритм құру керек, барлық мүмкін жағдайларды (апаттар, датчиктердің істен шығуы) ескеру қажет. Нашар конфигурацияланған PLC жүйесі Қарапайым құрылғылардан жақсы жұмыс істемеуі мүмкін. Екіншіден, PLC аппараттық ресурстары шектеулі: қазіргі контроллерлер жеткілікті қуатты болғанымен, оларда өте күрделі есептеу алгоритмдерін (мысалы, үлкен нейрондық желілер) орындау қиын. Зерттеулер көрсеткендей, алдыңғы буындардың микроконтроллерлік платформаларында жад пен жылдамдық шектеулері болды, бұл нақты уақыт режимінде есептеу қабілеттілігін басқару әдістерін енгізуге кедергі келтірді. Мұндай жағдайларда олар алгоритмді жеңілдетеді немесе сыртқы компьютермен PLC байланысын пайдаланады. Үшіншіден, өнеркәсіптік PLC және онымен байланысты жабдықтардың құны шағын шаруашылықтар үшін жоғары болуы мүмкін. Дегенмен, PLC жаппай таралуы жылыжайды автоматтандыруды стандарттауға әкелді: бүгінгі күні өндірушілердің көпшілігі оңтайлы микроклиматты сақтауда тиімділігі дәлелденген PLC-де дайын басқару шкафтарын ұсынады.

1.2.4 SCADA-жүйелер (диспетчерлеу)

Жылыжай микроклиматын басқару жүйелерінің дамуындағы маңызды кезеңдердің бірі — жергілікті контроллерлерді (мысалы, PLC) бірыңғай ақпараттық желіге біріктіру және оларды орталықтан басқару мүмкіндігін енгізу болды. Бұл міндетті шешуде SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) жүйелері кеңінен қолданылады. SCADA – нақты уақыт режимінде объектінің жағдайын бақылауға, деректерді жинауға және атқарушы құрылғыларды басқаруға арналған бағдарламалық-аппараттық кешендер класы. Жылыжай кешендерінде SCADA жүйесі микроклимат параметрлерін орталықтан қадағалау мен басқаруды қамтамасыз ете отырып, кешеннің "ақпараттық жүйе орталығы" рөлін атқарады.

SCADA жүйесінің жұмыс істеу принципі келесідей: төменгі деңгейде орналасқан PLC контроллерлері немесе микрокомпьютерлер жеке жылыжайлар мен олардың бөлімшелерінде температура, ылғалдылық, CO₂ деңгейі және жабдықтардың ағымдағы күйі секілді параметрлерді өлшейді. Бұл мәліметтер желілік протоколдар (Modbus, Ethernet және т.б.) арқылы орталық серверге немесе басқару станциясына жіберіледі. Мұнда SCADA бағдарламалық жасақтамасы ақпаратты визуализациялап, мнемосхемалар, графиктер мен кестелер түрінде операторға ұсынады. Сонымен қатар, оператор SCADA интерфейсі арқылы басқару командаларын жібере алады — мысалы, желдеткішті қосу немесе жылыту режимін өзгерту. Бұл командалар автоматты түрде тиісті контроллерге жеткізіліп, нақты әсер етеді.

SCADA жүйелерінің негізгі артықшылықтарының бірі — орталықтандырылған мониторинг пен басқару мүмкіндігі. Бір оператор бірнеше жылыжай немесе бөлімшелердің жұмысын бір мезгілде бақылап, жалпы жүйенің жұмысын нақты уақыт режимінде көре алады. Бұл ірі агрокомбинаттарда жоғары тиімділік береді, себебі жеке жылыжайларды қолмен тексеруге кететін уақыт пен күш айтарлықтай қысқарады.

Екінші маңызды артықшылық — тарихи деректердің жиналуы. SCADA жүйелері әдетте барлық параметрлер бойынша телеметрия мұрағатын жасайды. Бұл деректер агрономиялық талдау,

жұмыс тиімділігін бағалау және климаттық режимдерді оңтайландыру үшін өте құнды. Мысалы, өсімдіктің өсу маусымындағы температура мен өнімділік арасындағы корреляцияны анықтауға болады.

Үшінші артықшылық — қашықтан қол жеткізу мүмкіндігі. Заманауи SCADA жүйелері интернетке қосылуға қабілетті, бұл агрономдар мен инженерлерге жүйені кеңседен немесе мобильді құрылғы арқылы бақылауға мүмкіндік береді. Бұл басқарудың ыңғайлылығы мен жеделдігін арттырады.

Төртінші аспект — жоғары деңгейлі алгоритмдердің енгізілуі. SCADA жүйелері өздігінен ақылды қабат ретінде әрекет ете отырып, жергілікті контроллерлерге динамикалық тапсырмалар жібере алады. Мысалы, ауа райы болжамына сәйкес параметрлерді өзгертіп отыру немесе өсімдіктің даму фазасына байланысты белгілі бір әрекеттерді орындау мүмкіндігі бар. Сонымен қатар, сараптамалық модульдер SCADA деңгейінде жүзеге асырылуы мүмкін: олар трендтерді талдап, операторға шешім ұсынады немесе автономды түрде әрекет етеді.

Бұған қоса, SCADA жүйелері адам-машина интерфейсінің (HMI) ыңғайлы және визуалды түрін ұсынады. Анимацияланған схемалар, индикаторлар және сенсорлық экрандар операторға параметрлерді оңай өзгертуге және жүйенің күйін жылдам түсінуге мүмкіндік береді.

SCADA технологияларын жылыжайда қолдану нақты жобаларда дәлелденген. Мысалы, [12] жұмысында LabVIEW негізіндегі SCADA платформасы арқылы толық автоматтандырылған жылыжай құрылған. Жүйе операторға температура мен ылғалдылық мәндерін қадағалауға мүмкіндік берген, ал басқару алгоритмдері арқылы атқарушы құрылғыларды автоматты түрде іске қосу немесе өшіру жүзеге асырылған. Бұл зерттеу 2005 жылы IEEE/ASME конференциясында ұсынылып, басқарудың толық дербестілігін көрсететін шешім ретінде танылған.

Қазіргі заманғы SCADA шешімдері одан әрі дамып, интеграциялық мүмкіндіктерін кеңейтті. Олар тек локалды контроллерлермен ғана емес, сонымен қатар метеостанциялармен, бейнебақылау жүйелерімен және агрономиялық деректер базаларымен байланыс орната алады. Мысалы, кейбір жүйелер агрономдарға нақты уақытта мобильді ескерту жіберіп, бұлттық сервер арқылы ресурстар жеткізушілерімен өзара әрекеттесуге қабілетті.

Сонымен қатар, SCADA жүйелері тұрақты микроклиматты ұстап тұрумен қатар, агрономиялық шешімдерді қолдау құралдары ретінде де дамуда. Жасанды интеллектке негізделген талдау жүйелері SCADA құрамына енуде, дегенмен бұл функциялар әлі де шектеулі деңгейде.

SCADA жүйелерінің негізгі шектеулеріне енгізу құны мен техникалық күрделілік жатады. Ірі агрокешендер үшін бұл жүйелер орынды болса, шағын шаруашылықтарда олардың қажеттілігі мен экономикалық тиімділігі күмән тудыруы мүмкін. Сонымен қатар, жүйенің орталықтандырылған құрылымы сервердің істен шығу қаупін арттырады. Осы себепті резервтік қуат көздері мен артық жүйелік компоненттер қажет етіледі.

Қорытындылай келе, SCADA жүйелері жылыжай микроклиматын орталықтан және қашықтан басқарудың тиімді құралдары ретінде кеңінен таралған. Олар бақылау дәлдігін, шешім қабылдау жылдамдығын және жалпы агротехнологиялық процестердің тиімділігін арттыра отырып, заманауи жылыжай кешендерінің ажырамас бөлігіне айналды.

1.2.5 Интеллектуалды басқару жүйелері

Ең заманауи және күрделі категория — жылыжайдың микроклиматын басқарудың интеллектуалды жүйелері. Оларға бақылау тиімділігін арттыру үшін жасанды интеллект, машиналық оқыту элементтерін немесе күрделі оңтайландыру алгоритмдерін қолданатын әдістер жатады. Мұндай тәсілдердің пайда болуы классикалық PID және тіпті SCADA шектеулеріне жауап болды, өйткені олар өсімдіктердің өсу факторларын жан-жақты есепке ала алмайды.

Интеллектуалды әдістердің мысалдарына fuzzy control (анық емес басқару), нейрондық желілер, генетикалық алгоритмдер, білімге негізделген шешім қабылдау жүйелері (сараптамалық жүйелер), Model Predictive Control (MPC) және осы тәсілдердің будандары жатады. Бұл әдістердің ерекшелігі — объектінің сызықтық емес және өзгергіштігіне бейімделу, адамның шешім қабылдау логикасына жақындау және деректерге негізделген стратегияларды өз бетінше жетілдіру мүмкіндігі.

Артықшылықтары: интеллектуалды алгоритмдер классикалық схемалармен салыстырғанда дәлірек және тұрақты микроклиматты қамтамасыз ете алады, әсіресе

стандартты емес жағдайларда. Мысалы, fuzzy controller агрономның тәжірибесіне ұқсас "егер тым ыстық әрі құрғақ болса, терезелерді сәл аш" секілді лингвистикалық ережелермен жұмыс істейді. Мұндай басқарушылар нақты математикалық модельді талап етпейді — ережелерді анықтау жеткілікті және олар күрделі, сызықтық емес байланыстарда тиімді жұмыс істей алады.

Нейрондық желілер өлшеу деректерінің негізінде қоршаған орта параметрлері мен өсімдіктердің өсуі арасындағы жасырын тәуелділіктерді анықтап, осы негізде климатты реттей алады. Ал болжамды модельдер (MPC) болашақ өзгерістерді ескере отырып, басқаруды оңтайландырады — мысалы, температура төмендейтінін болжап, жылыжайды алдын ала жабады. Нәтижесінде өнімділік артып, энергия шығындары азаяды.

Кемшіліктері: интеллектуалды жүйелерді құрастыру мен ендіру күрделі. Бұл үшін терең талдау, үлкен деректер жинақтары және жоғары есептеу қуаты қажет. Сонымен қатар, бұл жүйелер көбіне "қара жәшік" тәрізді — олардың шешім қабылдау логикасы пайдаланушы үшін ашық болмауы мүмкін. Белгілі деректер ауқымынан тыс жағдайлар туындағанда қате шешімдер қабылдау немесе қайта оқыту қажеттілігі туындайды. Жүйенің өнеркәсіптік тұрақтылығын қамтамасыз ету үшін сенімділік пен резервтеу талап етіледі.

Қазіргі тенденциялар осы кедергілерді жеңуге бағытталған. Жоғары өнімді IoT процессорларының, бұлттық платформалардың дамуы интеллектуалды әдістерді қолдануға мүмкіндік береді. Жаңа шолуларға сәйкес [13], жылыжай контроллерлерінің болашағы нейрондық желілер мен оңтайландыру алгоритмдерінің үйлесімінде. Мысалы, нейрондық желі жылыжай реакциясын болжай алады, ал генетикалық алгоритм немесе үйір алгоритмі (swarm optimization) ең жақсы басқару шешімін таңдайды. Бұл тәсіл өсімдіктердің өсуін жақсартып, энергия үнемдеуді қамтамасыз етеді.

Тағы бір мысал — нейрондық желілер. Нейрондық желі контроллері сызықтық емес басқару стратегиясын құра отырып, климаттық бақылаудың тарихи деректері бойынша өздігінен білім алуға қабілетті. Эксперименттік жұмыстарда болашақ температураны ағымдағы және сыртқы жағдайлар бойынша болжау үшін нейрондық желілер қолданылды, содан кейін профилактикалық реттеу (нейро болжамды басқару деп аталады). Осындай зерттеулердің нәтижелері бойынша нейрондық модельдерді қолдану температураның ауытқуын азайтуға және бұзылуларға стандартты PID тізбегіне қарағанда тезірек жауап беруге мүмкіндік берді.

Нейро-бұлыңғыр жүйелер сияқты гибриді тәсілдер екі әдістің де артықшылықтарын біріктіреді және одан да жоғары сапа береді. Сонымен, бірқатар жұмыстарда нейро-бұлыңғыр реттегіштер өсу жағдайларын оңтайландырды және тиімділігі бойынша жеке әдістерден асып түсті.

Сонымен қатар, генетикалық алгоритмдер және басқа оңтайландыру әдістері бақылау параметрлерін теңшеу үшін қолдануды тапты. PID коэффициенттерін немесе түсініксіз ережелерді қолмен реттеудің орнына оңтайландыру алгоритмі (мысалы, бөлшектерді жинау әдісі немесе эволюциялық алгоритм) егінді көбейтетін немесе климаттың ауытқуын азайтатын параметрлерді автоматты түрде таңдайды. [13] мәліметтері бойынша, жылыжайдың климаттық бақылауын оңтайландыру үшін генетикалық алгоритмдерді қолдану өсімдіктердің өсуінің айтарлықтай жақсаруына және энергия шығындарының төмендеуіне әкелді. Бұл алгоритмдер модельденген жағдайларда басқарудың көптеген мүмкін стратегияларын қарастырады және ең жақсысын таңдайды, содан кейін олар іс жүзінде қолданылады. Осылайша, баптаудағы адам факторы азаяды және жүйенің өзі оңтайлы болады.

Интеллектуалды жүйелер IoT (Internet of Things) тұжырымдамасымен көбірек интеграциялануда. Бұл көптеген датчиктер (соның ішінде стандартты емес — мысалы, өсімдіктердің өсуін бақылау камералары, спектрлік жарық датчиктері) және атқарушы құрылғылар интернет платформасы арқылы біріктірілгенін білдіреді. Деректер бұлтты қоймада жиналады, онда қуатты машиналық оқыту алгоритмдері оларды талдайды және басқару шешімдерін жасайды, командаларды жергілікті контроллерлерге қайтарады.

Мысалы, машиналық оқытуға негізделген бұлттық қызмет өсімдіктердің суреттерін (компьютерлік көру) және климаттық деректерді талдау арқылы жылыжайдың микроклиматын реттейтін жобалар қазірдің өзінде бар, бұл басқару кезінде өсімдіктердің күйін ескеруге мүмкіндік береді (мысалы, ауа температурасы қалыпты болса да, нәзік көшеттердің қызып кетуіне жол бермейді). Мұндай әзірлемелер ғылым мен техниканың алдыңғы қатарында және біртіндеп практикалық қолдануға көшуде.

Шолуға сәйкес [13] жылыжайды басқарудың интеллектуализациясы тек артады. Қазірдің өзінде жылыжайдың "цифрлық егіздері" — виртуалды ортадағы микроклимат пен өсімдіктердің өсуіне толығымен еліктейтін компьютерлік модельдер ұсынылады. Бұл нақты уақыт режимінде жағдайдың дамуын болжауға және оны нақты өсімдіктерге қолданбас бұрын басқаруды оңтайландыруға мүмкіндік береді. Жылыжайларға арналған Digital twin технологиясын енгізудің алғашқы нәтижелері бақылау дәлдігі мен жауап беру уақытының перспективалы жақсартуларын көрсетеді [13].

Интеллектуалды жүйелердің шектеулері: айтылғандай, олардың күрделілігі үлкен кедергі болып қала береді. Сенімді инфрақұрылым қажет (бірдей IoT — көптеген сенсорлар, байланыс, есептеу қуаты). Әрбір агрокешен жасанды интеллект алгоритмдерімен эксперименттерге инвестиция салуға дайын емес, дәлелденген PLC және SCADA-ны артық көреді. Алайда, интеллектуалды жүйелердің тиімділігі мен қайтарымы дәлелденген сайын, олар стандартты бола бастайды. Жасанды интеллектуалды контроллерлерді сәтті пайдалану үшін агрономдар мен АТ мамандарының ынтымақтастығы қажет: жүйе оңтайлы климаттық параметрлерді бере алады, бірақ олардың өсімдік биологиясына әсерін агроном бағалауы керек (мысалы, энергияны үнемдеу үшін ылғалдылықтың тым агрессивті төмендеуі белгілі бір мәдениетке зиян тигізуі мүмкін). Ең дұрысы, интеллектуалды жүйе өсімдіктердің күйіне қатысты критерийді де қамтуы керек — және мұндай интеграцияланған тәсілдер (био кері байланыс) өзекті ғылыми зерттеулердің тақырыбы болып табылады.

Қорытындылай келе, микроклиматты басқарудың интеллектуалды жүйелері жылыжайларда автоматтандыру технологияларын дамытудың шыңы болып табылады. Олар табиғаттың өзгергіштігі мен өсімдіктердің қажеттіліктеріне бейімделе отырып, адамның ең аз қатысуымен өсу жағдайларын мүмкіндігінше дәл орындауға уәде береді. Заманауи зерттеулерді талдау негізінде [13] алдағы жылдары нейрондық желілердің, адаптивті алгоритмдердің және қуатты есептеу платформаларының тіркесімі "ақылды жылыжайлардың" ажырамас бөлігі болады деп болжауға болады, бұл қорғалған жер шаруашылығының тиімділігін арттырады.

1.3 Өсімдіктерді өсіру әдістері және жасанды интеллектті қолдану

Қазіргі заманғы жылыжай шаруашылығында өсімдіктерді өсірудің әртүрлі агротехнологиялық әдістері қолданылады — дәстүрлі топырақта өсіруден бастап, жоғары технологиялық топырақсыз жүйелерге дейін. Бұл әдістерге топырақтық, субстраттық, гидропондық, аэропондық, аквапондық жүйелер мен тік егіншілік жатады. Әр тәсілдің өзіндік артықшылықтары, технологиялық ерекшеліктері және қолдану шектеулері бар. Таңдалған әдістің тиімділігі өсімдіктердің физиологиялық қажеттіліктеріне, қоректік заттардың сіңірілу механизміне және микроклиматтық басқару мүмкіндіктеріне тікелей байланысты.

Агротехнологиялар эволюциясымен қатар, өсімдіктердің өсу жағдайын автоматтандырылған бақылау жүйелерімен қамтамасыз ету өзекті мәселеге айналды. Бұл контексте жасанды интеллект (AI) пен компьютерлік көру технологияларының рөлі ерекше. Өсіресе, конволюциялық нейрондық желілерге (CNN) негізделген бейнеаналитикалық әдістер өсімдіктердің денсаулығы мен даму сатыларын визуалды түрде бақылауға мүмкіндік береді. Бұл тәсілдер аурулар мен стресстік жағдайларды ерте анықтауға, ресурстарды дәл бөлуге және егіннің сапасы мен көлемін арттыруға септігін тигізеді.

Осы бөлімде жылыжайларда қолданылатын өсіру әдістері жіктеліп, олардың сипаттамалары мен тиімділіктері талданады. Сонымен қатар, өсімдіктерді бақылауда жасанды интеллект пен компьютерлік көрудің интеграциясының артықшылықтары қарастырылады.

1.3.1 Топырақта өсіру

Топырақтық әдіс — өсімдіктерді табиғи топырақта немесе топырақ негізіндегі қоспаларда өсірудің ең көне әрі кең таралған тәсілі болып табылады. Жылыжай жағдайында бұл әдіс органикалық заттар мен микроорганизмдерге бай табиғи орта құрудың салыстырмалы түрде қарапайымдылығымен ерекшеленеді. Ол агротехникалық жағынан жақсы зерттелген және көптеген фермерлік және ғылыми тәжірибелерде кеңінен қолданылады.

Алайда, топырақтық әдіс бірқатар технологиялық шектеулерге ие. Ең алдымен, топырақтың қоректік сапасын тұрақты сақтау үшін жүйелі түрде тыңайтқыштар енгізу және ылғалдылықты бақылау қажет. Сонымен қатар, топырақта тіршілік ететін фитопатогендер мен зиянкестер өсімдіктерге қауіп төндіреді. Бұл топырақтық ортаның саңырауқұлақтық, бактериялық инфекциялар көзіне айналуына себепші болуы мүмкін, сондықтан фитосанитарлық шараларды сақтау және химиялық өңдеу (пестицидтер) қажеттілігі туындайды.

Жылыжайларда сыртқы климаттың әсері азайтылғанымен, топырақ арқылы таралатын аурулар мен зиянкестерден толықтай құтылу мүмкін емес. Маусымдық тәуелділік те топырақтық әдіске тән кемшілік болып қала береді. Қазіргі кезде бұл әдіс жаңа технологиялық баламалармен қатар қолданылса да, су мен тыңайтқыштар сияқты ресурстарды тиімді пайдалану тұрғысынан топырақсыз өсіру жүйелерінен төмен көрсеткіштерге ие. Соған қарамастан, топырақтық әдіс өзінің бейімділігі мен қолжетімділігіне байланысты жылыжай шаруашылығында әлі де кеңінен пайдаланылады.

1.3.2 Субстрат өсіру (инертті субстраттар)

Субстраттық әдіс — топырақты пайдаланбай, өсімдіктерді жасанды инертті ортада өсіруді көздейтін технология. Бұл әдісте субстрат ретінде өсімдік тамырларын ұстап тұруға арналған кеуекті материалдар қолданылады, олардың құрамында қоректік заттар болмайды. Кеңінен таралған субстраттарға минералды жүн, кокос талшығы, перлит, вермикулит, кеңейтілген саз және қиыршық тас жатады. Қоректік заттар өсімдіктерге арнайы суару ерітіндісі арқылы жеткізіледі, ал субстрат тек механикалық тірек пен ылғал-ауа балансының қолайлы ортасын қамтамасыз етеді.

Субстраттық әдіс *soilless culture* (топырақсыз өсіру) жүйесіне жатады және гидропоникаға ұқсас. Жылыжай көкөніс шаруашылығында бұл әдіс, әсіресе, қызанақ, қияр және бұрыш секілді дақылдарды минералды жүн немесе кокос шымтезегі негізіндегі төсеніштерде өсіруде кеңінен қолданылады.

Бұл технологияның артықшылықтарына өсімдіктердің қоректенуін жоғары дәлдікпен бақылау мүмкіндігі мен топырақ ауруларының таралу қаупін едәуір төмендету жатады. Инертті субстраттарда зиянды микроорганизмдер болмайтындықтан, фунгицидтер мен басқа да агрохимикаттарды қолдану қажеттілігі азаяды. Сонымен қатар, қоректік ерітінді артық мөлшерде жиналып, қайта өңделіп қолданылуы мүмкін, бұл суды және тыңайтқышты үнемдеуге жағдай жасайды.

Алайда, субстраттық әдістің белгілі бір шектеулері де бар. Атап айтқанда, субстрат материалдарының құны жоғары болуы мүмкін және қоректік ерітіндінің құрамын нақты бақылауды талап етеді. Соған қарамастан, бақыланатын жылыжай жағдайында бұл әдіс өнімділікті арттырып, жер мен су ресурстарын тиімді пайдалануға мүмкіндік береді. Осы себепті, субстраттық өсіру қазіргі заманғы жылыжай технологиясында маңызды рөл атқарады.

1.3.3 Гидропоника

Гидропоника — бұл өсімдіктерді топырақсыз өсіру әдісі, онда тамыр жүйесі тікелей судағы қоректік ерітіндіде немесе капиллярлық суару жүйесінде орналасады. Барлық қажетті макро- және микроэлементтер ерітілген түрде қоректік ерітінді құрамында болады және тамырға тұрақты түрде жеткізіледі. Гидропоникалық жүйелердің бірнеше түрлері бар: мезгіл-мезгіл су басу жүйесі (ebb and flow), қоректік қабық әдісі (Nutrient Film Technique, NFT), субстраттағы тамшылатып суару, фитильдік жүйе, терең су мәдениеті (Deep Water Culture, DWC) және басқалар. Бұл жүйелердің барлығының ортақ белгісі — топырақтың өсіру ортасы ретінде мүлде қолданылмауы.

Гидропоника әдісінің артықшылықтары, әсіресе жылыжай жағдайында, айқын көрініс табады. Атап айтқанда, қоректік заттардың мөлшерін дәл реттеуге және әр дақылға жеке оңтайлы рН мен иондық тепе-теңдікті қамтамасыз етуге мүмкіндік береді. Осылайша, өсімдіктер қоректік заттарды жеңіл сіңіріп, топырақпен салыстырғанда анағұрлым жедел өсу қарқынын және жоғары өнімділікті көрсетеді.

Сонымен қатар, топырақтың болмауы өсіру үдерісін бірқатар типтік агрономиялық мәселелерден босатады: гидропоникалық ортада арамшөптер іс жүзінде болмайды, ал патогендік микроорганизмдердің таралу қаупі едәуір азаяды. Ғылыми деректерге сәйкес, гидропоникалық әдіспен өсірілген көкөністер көбіне пестицидтерді аз қажет етеді, себебі инфекция көзі болатын топырақ компоненті жоқ. Мысалы, [14] зерттеуінде гидропоникалық өнімдердің микробиологиялық қауіпсіздігі жоғары екендігі, пестицид қалдықтарының мөлшері аз және нитраттардың деңгейі төмен болатындығы атап өтілген.

Гидропоника кең ауқымды дақылдарға қолданылады: салаттар, шөптесін өсімдіктер, қызанақ, құлпынай және басқа жидектер. Бұл әдіс жоғары өнімділік пен таза агротехнологиялық цикл талап етілетін жағдайларда тиімділігін дәлелдеді. Алайда, жүйенің тұрақты жұмыс істеуі үшін автоматтандырылған ерітінді жеткізу жүйелері мен параметрлерді үздіксіз бақылау (қоректік ерітіндінің деңгейі, электрөткізгіштігі, элементтік құрамы) қажет. Электрмен жабдықтаудың немесе сорғы жүйелерінің істен шығуы өсімдіктердің күйіне жылдам әсер етуі мүмкін, сондықтан сенімділік — гидропоникалық жүйелер үшін маңызды талап.

Жалпы алғанда, гидропоника басқарылатын ортада ауыл шаруашылығын (Controlled Environment Agriculture — CEA) жүргізудің перспективалы бағыттарының бірі ретінде қарастырылады. Ол заманауи сенсорлар мен басқару жүйелерімен жақсы үйлеседі және жоғары технологиялық жылыжай шаруашылықтарының негізін құрайды.

1.3.4 Аэропоника

Аэропоника — бұл гидропониканың жетілдірілген формасы, онда өсімдіктің тамыр жүйесі арнайы камера немесе құбыр жүйесінде ауада ілініп тұрады және мезгіл-мезгіл қоректік ерітіндінің аэрозоль күйіндегі жұқа тұманымен (20–100 мкм тамшылармен) бүркіледі. Мұндай әдіс тамырларды 100% оттегіге қанық ортада ұстауға мүмкіндік береді, бұл оттегімен қамтамасыз етуді оңтайландырып, қоректік заттардың сіңірілу тиімділігін арттырады.

Ғылыми зерттеулерге сәйкес, аэропондық жүйелер оттегінің жоғары деңгейі мен қоректік заттардың жылдам жеткізілуі нәтижесінде өсімдіктердің өсу қарқынын айтарлықтай арттыра алады. Атап айтқанда, [17] жұмыста аэропониканың су мен қоректік ресурстарды пайдаланудағы тиімділігі жоғары екендігі, сондай-ақ өсімдік өсуінің жылдамдығын едәуір арттыра алатыны көрсетілген. Аэропониканың маңызды артықшылықтарының бірі — суды тұтынудың айтарлықтай төмендеуі: дәстүрлі топырақ немесе гидропоникалық әдістермен салыстырғанда су шығыны 70–95% азаяды. Бұл сипаттама тұщы су тапшылығы өзекті болып отырған аймақтар үшін маңызды.

Сонымен қатар, бұл жүйелерде қоректік ерітінділердің жоғалуы болмайды: өсімдіктермен сіңірілмеген ерітінділер жиналып, қайта өңделеді және жүйеге қайтарылады. Жылыжай жағдайында аэропондық технологиялар жоғары отырғызу тығыздығын

камтамасыз ете отырып, жапырақты дақылдар (мысалы, салаттар, насыбайгүл) мен шөптерді жедел айналымда өсіруге мүмкіндік береді. Алайда, аэропоника күрделі техникалық инфрақұрылымды және үздіксіз бақылауды талап етеді.

Бүрку жиілігінің, тұман бөлшектерінің мөлшерінің және қоректік ерітіндінің концентрациясының тұрақты бақылануы — жүйенің тиімді жұмысы үшін шешуші факторлар. Бүркегіш жүйедегі сәтсіздіктер немесе үзілістер тамырлардың тез кебуіне әкелуі мүмкін. Сонымен қатар, саптамалардың бітелуі мен биологиялық ластану тәуекелі жоғары, бұл жүйенің стерильдігін сақтауға қосымша талаптар қояды. Тағы бір техникалық шектеу — кейбір макроэлементтердің, атап айтқанда, азоттың, тұман түрінде тиімді жеткізілуінің шектеулігі. [17] зерттеуінде бұл мәселе өсімдіктерде стресс реакцияларының пайда болуына әкелуі мүмкіндігімен байланыстырылады.

Осы қиындықтарға қарамастан, аэропоника — жабық өсімдік шаруашылығында ең жоғары өнімділік пен ресурстарды үнемдеуді қамтамасыз ете алатын перспективалы бағыт. Бұл әдіс, әсіресе, жасанды интеллект (AI) және Интернет заттар (IoT) жүйелерімен біріктірілгенде өзінің толық әлеуетін ашады. Қазіргі уақытта AI модельдері аэропондық жүйелердегі бүрку циклдарын, қоректік ерітінділердің концентрациясын және басқа да параметрлерді нақты уақыт режимінде бақылау және басқару үшін сәтті қолданылып отыр. Мұндай интеграция аэропониканы жоғары дәлдікпен басқарылатын, технологиялық жағынан жетілген өсіру әдісіне айналдырады.

1.3.5 Аквапоника

Аквапоника — бұл гидропоникалық өсіру жүйелеріне балама ретінде ұсынылатын кешенді технология, ол өсімдіктерді өсіру процесін аквамәдениетпен біріктіреді. Krastanova және авторлар ұсынған зерттеуде (2022) аквапоникалық жүйелердің биологиялық және инженерлік сипаттамалары егжей-тегжейлі қарастырылып, олардың экологиялық тұрақтылығы мен тұйық су айналымы арқылы ресурстарды тиімді пайдалану мүмкіндігі атап өтілген [16].

Аквапоникалық кешендерде балықтардың тіршілік әрекетінің нәтижесінде пайда болатын қалдықтар — аммиак (негізінен несеппен және желбезек секрецияларымен бөлінеді) және ыдыраған жем қалдықтары — арнайы нитрификациялаушы бактериялар арқылы нитратты қосылыстарға айналдырылады. Бұл қоректік заттарға бай ерітінді өсімдіктер бөліміне түсіп, мұнда өсімдіктер оларды өз биомассасын құру үшін пайдаланады және суды биологиялық түрде тазартады. Тазартылған су қайтадан балық резервуарына қайтарылады. Осылайша, жүйе балық, бактерия және өсімдік арасындағы биологиялық симбиозға негізделген жабық экожүйе ретінде жұмыс істейді.

Аквапониканың басты артықшылықтарының бірі — екі түрлі өнімді (өсімдіктер мен гидробионттарды) бір жүйеде алу мүмкіндігі. Сонымен қатар, бұл технология суды үнемдеуге және синтетикалық тыңайтқыштарды пайдалануды азайтуға мүмкіндік береді, себебі балық қалдықтары өсімдіктер үшін табиғи қоректік орта қызметін атқарады. Бұл, өз кезегінде, қоршаған ортаға түсетін экологиялық жүктемені төмендетіп, өндірістің экологиялық қауіпсіздігін арттырады. Су жабық контурда айналымда болады, ал жүйеге тек булану мен өсімдіктердің транспирациясы нәтижесінде жоғалған көлем ғана қайта қосылады.

Жүйенің жылыжай жағдайларына бейімделуі оның тұрақты микроклиматқа — температура мен ылғалдылықтың бақыланатын деңгейіне — негізделген. Мұндай жағдайлар аквапон жүйесінің екі негізгі компоненті үшін де (өсімдіктер мен балықтар) оңтайлы болып табылады. Жиі қолданылатын өсімдік дақылдарына жапырақты салаттар, насыбайгүл, жалбыз, қызанақ және қияр жатады. Ал гидробионттар қатарында тилапия, форель, сом және асшаяндар жиі кездеседі.

Технологиялық тұрғыдан алғанда, аквапониканың табысты жұмыс істеуі балық пен өсімдіктер арасындағы биомассалық тепе-теңдікті сақтауға тікелей байланысты. Бұл зиянды заттардың жиналуына жол бермей, жүйенің өзін-өзі тазартып тұру қабілетін

қамтамасыз етеді. Сонымен қатар, су аэрациясы, механикалық және биологиялық сүзу, рН мен ерітінді құрамының екі биологиялық жүйе үшін де сәйкес болуын бақылау міндетті түрде қарастырылады.

Аквапоникалық жүйелердің кемшіліктеріне олардың басқарудағы күрделілігі жатады: өсімдіктер мен балықтарды бір мезгілде өсіру екі түрлі биологиялық циклдерді үйлестіруді талап етеді және бұл жүйені басқару үшін арнайы дайындықтан өткен мамандар қажет. Сонымен қатар, бастапқы инвестициялық шығындар жоғары болуы мүмкін, себебі жүйені құру үшін арнайы жабдықтар — балық резервуарлары, биофилтрация блоктары, су айдау және бақылау жүйелері қажет етіледі.

Алайда, ғылыми деректер мен практикалық қолдану тәжірибелері аквапониканың тиімділігін растайды. Жақсы жобаланған және теңгерілген аквапон жүйелері жоғары өсімдік өнімділігін қамтамасыз ете алады, ал бір мезгілде қосымша өнім — балық өсіру — экономикалық қайтарымдылықты арттырады. Сонымен қатар, аквапоника қалалық ауыл шаруашылығында, заманауи қалалардағы жабық экожүйелер мен ресурсты үнемдейтін айналмалы экономиканы дамыту контекстінде ерекше тартымды технология ретінде қарастырылады.

1.3.6 Тік егіншілік

Тік егіншілік — бұл өсімдіктерді тігінен орналасқан көп деңгейлі құрылымдарда өсіруді көздейтін инновациялық агротехнология. Бұл әдіс кеңістікті барынша тиімді пайдалану арқылы аудан бірлігіне шаққанда өнімділікті едәуір арттыруға мүмкіндік береді. Тік фермалар тұжырымдамасы, әдетте, гидропоникалық немесе аэропоникалық технологиялармен, жасанды жарықтандырумен (мысалы, LED шамдар) және көп деңгейлі сөрелерге орналастырылған қатаң бақыланатын климат жүйесімен бірге қолданылады.

Жылыжай нұсқаларында мұндай жүйелер күн сәулесін пайдалануы мүмкін (мысалы, мөлдір қабырғалары бар жоғары құрылымдарда), алайда «тік ферма» термині көбінесе жарықтандыру толықтай жасанды жолмен қамтамасыз етілетін, оқшауланған ғимараттармен — «өсімдік фабрикаларымен» — байланыстырылады.

Тік егіншіліктің негізгі артықшылығы — CEA (Controlled Environment Agriculture) тұжырымдамасына толық сай келуі. Яғни, өсіру жағдайлары (жарық, температура, ауа ылғалдылығы, көмірқышқыл газының деңгейі, қоректік ерітінді құрамы) тәулік бойы және жыл бойы бақыланып, оңтайлы деңгейде ұсталады. Бұл әсіресе жарық пен температураға сезімтал, өсу циклі қысқа жасыл дақылдар (салаттар, шөптер, микрожасылдар) үшін тиімді.

Ғылыми зерттеулер тік егіншіліктің өнімділігіне айтарлықтай оң әсерін дәлелдеді. Мысалы, [15] деректеріне сәйкес, мұндай жүйелер бір шаршы метрден алынатын өнімді дәстүрлі тәсілдермен салыстырғанда ондаған есе арттыра алады. Сонымен қатар, жабық ортаның арқасында өндіріс маусымға, ауа райына немесе географиялық орналасуға тәуелді болмайды. Бұл қала орталықтарында жыл бойы жаңа піскен көкөністерді өндіруге мүмкіндік береді.

Тік егіншілік суды тұйық циклмен қайта пайдалану, минералдық тыңайтқыштардың шығынын азайту және зиянкестер мен арамшөптердің алдын алу сияқты биоқауіпсіздік артықшылықтарын да ұсынады. Артық қоректік ерітінділер жиналып, сүзгіден өткізіліп, қайта айналымға енгізіледі. Жабық жүйе арамшөптердің таралуын болдырмайды және пестицидтерді қолдану қажеттілігін төмендетеді.

Алайда, бұл әдістің бірқатар кемшіліктері де бар. Біріншіден, жоғары бастапқы инвестициялық шығындар — көп деңгейлі құрылымдар, климаттық жүйелер, жарықтандыру және автоматтандыру құралдарын орнату едәуір капитал салуды талап етеді. Екіншіден, энергия тұтынуы өте жоғары, әсіресе жасанды жарықтандыру мен ауа реттеу жүйелеріне тәуелділік жағдайында. Егер бұл энергия жаңартылатын көздерден алынбаса, жүйенің экологиялық тиімділігі төмендеуі мүмкін. Үшіншіден, жүйені басқару мен қызмет көрсету жоғары біліктілікті қажет етеді; мысалы, кондиционер істен шықса, барлық деңгейлердегі дақылдарға кері әсері бірден байқалады.

Осы қиындықтарға қарамастан, тік егіншілік қалалық жерлердегі азық-түлік қауіпсіздігін қамтамасыз етудің болашағы зор әдісі ретінде қарастырылып отыр. Қазіргі уақытта AeroFarms, Plantagon және Spread сынды компаниялар тік жүйелерді пайдалана отырып салат, шөп және жидек дақылдарын коммерциялық негізде сәтті өндіруде. Кейбір тік фермаларда аквапоникалық модульдермен біріктіру, сондай-ақ қызмет көрсету процестерін роботтандыру арқылы операциялық тиімділік арттырылуда.

Салыстырмалы шолу және қорытынды.

Жоғарыда сипатталған әдістердің барлығы — топырақтық және топырақсыз жүйелер — бірін-бірі толықтыратын немесе нақты мақсаттарға бейімделген шешімдер ретінде бірге қолданылуы мүмкін. Мысалы, бір жылыжайда кейбір дақылдар топырақта өсірілуі мүмкін, ал басқалары гидропоника немесе аквапоника жүйелерімен қамтамасыз етіледі. Сонымен қатар, аквапон қондырғылары классикалық гидропоникалық модульдермен бірге жұмыс істеуі мүмкін.

Топырақсыз технологиялар — субстрат әдісі, гидропоника, аэропоника және тік егіншілік — ресурстарды тиімді пайдалануымен, қоректенуді нақты бақылаумен және автоматтандырумен үйлесуімен ерекшеленеді. Олар өсімдіктердің тез өсуін қамтамасыз етіп, экологиялық қауіптерді (патогендер, пестицидтер) азайтады. Алайда, кейбір жағдайларда дәстүрлі топырақ әдістері әлі де маңызын жоғалтпаған: мысалы, жеміс ағаштары немесе бұталар сияқты ірі дақылдар үшін топырақ қолайлы орта болып табылады.

Әдісті таңдауда негізгі факторлар — экономикалық мүмкіндіктер, дақылдың түрі, жоспарланған өндіріс көлемі және инфрақұрылымның қолжетімділігі. Қазіргі заманғы жылыжайларда гидропоника мен оның туынды әдістеріне басымдық берілуде, себебі олар автоматтандырылған басқару жүйелерімен және компьютерлік көру, жасанды интеллект платформаларымен тиімді интеграцияланады. Бұл агроөндірістің жаңа деңгейіне шығуына мүмкіндік береді.

1.3.7 Өсімдіктерді бақылаудағы AI пен компьютерлік көрудің рөлі

Жасанды интеллектті, атап айтқанда машиналық оқыту мен компьютерлік көру әдістерін қолдану жылыжай ауыл шаруашылығын автоматтандыруда түбегейлі өзгерістерге әкелді. Бұрынғы климатты бақылау мен қоректендіру жүйелері өсімдіктің нақты жағдайын ескермей, белгіленген параметрлер бойынша жұмыс істейтін болса, қазіргі таңда камералар мен сенсорлар және оқытылған алгоритмдердің көмегімен өсімдіктің күйін нақты уақытта бағалап, өсу ортасын динамикалық басқаруға мүмкіндік бар.

AI технологиялары жылыжайдағы өсімдіктерді бақылау бойынша бірнеше негізгі міндеттерді шешуге бағытталған. Біріншіден, бұл — ауруларды ерте анықтау. Жылыжайларда монокультуралардың таралуы инфекция ошақтарының тез өршуіне себеп болуы мүмкін. Мұндай жағдайларда аурудың бастапқы белгілерін уақтылы анықтау эпидемияның алдын алу үшін өте маңызды. Дәстүрлі тәсіл — агрономдардың визуалды бақылауы — субъективті әрі уақытты қажет етеді. Ал компьютерлік көру жүйелері, керісінше, камералар арқылы жапырақтар мен жемістерді тұрақты сканерлеу арқылы дақ, тақта, түссіздену, деформация сияқты белгілерді анықтайды. Кейін бұл кескіндер нейрондық желіге беріледі, ал ол аурудың түрін (санырауқұлақ, вирустық немесе бактериялық) немесе физиологиялық бұзылысты автоматты түрде классификациялайды.

2024 жылы жүргізілген зерттеулердің бірінде [18] терең оқыту негізінде құрылған интеллектуалды жүйе қызанақ дақылдарындағы ауруларды 99%-ға жуық дәлдікпен анықтаған. Бұл жүйе классикалық әдістерден — мысалы, қолмен жинақталған белгілер мен SVM, шешім ағаштары сияқты алгоритмдерден асып түседі. Мұндай модельдер, сонымен қатар, насыбайгүл, куркума және басқа да дақылдардағы жапырақ ауруларын тануда сарапшылардан жоғары нәтиже көрсетті. Қазіргі таңда кейбір жылыжайларда роботталған арбалар өсімдіктерді автономды түрде аралап, ауруы бар үлгілерді белгілейтін жүйелер орнатылған.

Екінші маңызды міндет — өсімдіктердің өсу кезеңдерін тану және фенологиялық

бақылау. Өсіру циклі бойында (көшет, жапырақ өсуі, бүршіктену, гүлдеу, жеміс пісуі) өсімдіктің қай кезеңде екенін анықтау агротехникалық шешімдер қабылдау үшін өте маңызды. Дәстүрлі бақылау күнтізбе негізінде немесе визуалды бағалау арқылы жүзеге асса, AI негізіндегі жүйелер өсімдіктің морфологиясына (жапырақ саны, көлемі, бүршік пайда болуы) қарап автоматты бағалау жүргізе алады. Мысалы, конволюциялық нейрондық желілер мен трансформерлер көмегімен жүгері, қызанақ және салат өсімдіктерінің даму сатыларын 98%-дан астам дәлдікпен жіктейтін жүйелер ұсынылған.

Осындай бақылаулар агрономдарға жарықтандыруды, қоректендіруді, суаруды нақты кезеңге бейімдеуге мүмкіндік береді. Мысалы, гүлдену сатысында жарық ағынын арттыру, ал жеміс беру кезінде тыңайтқыш құрамын өзгерту. Сонымен қатар, өсу мониторингі арқылы өсімдіктің баяу дамуы немесе күтпеген ауытқулар ерте сатыда анықталады — бұл жасырын стресс немесе қолайсыздықтың белгісі болуы мүмкін. [19] зерттеуінде салат өсімдіктеріндегі жапырақ ауданы мен биомассаны бағалау үшін CNN моделін қолдану жақсы корреляциялық нәтиже беріп, R^2 шамамен 0.89–0.92 деңгейінде болған.

Үшінші аспект — жапырақтардың күйін талдау және қоректенуді бақылау. Жапырақтар өсімдіктің жалпы физиологиялық жағдайының сенімді индикаторы саналады. Минералды жетіспеушіліктер, су стрессі, зиянкестерден зақымдану немесе жарық артықтығы сияқты факторлар жапырақтың түсі, құрылымы және орналасуы арқылы көрінеді. CNN желілері арқылы жапырақтың түріне қарап қандай элемент (N, P, K, Fe) жетіспей жатқанын анықтайтын жүйелер құрылды. Мысалы, [21] зерттеуінде күріш пен банан дақылдарында NPK жетіспеушілігі 98% дәлдікпен анықталған.

Осындай жүйелер арқылы автоматты түрде тыңайтқыш дозасын реттеу мүмкіндігі туады. Камерада байқалған хлорозға AI "азот жетіспеушілігі" деп жауап беріп, тиісті шешімді ұсынады. Сонымен қатар, SPAD индексіне ұқсас визуалды құрылғылар жасалып, олар жапырақ түсі мен тығыздығы бойынша азотпен қамтамасыз етілуді жылдам бағалайды. Жапырақтардағы тургор жағдайы немесе су тапшылығы да компьютерлік көру алгоритмдерімен сандық түрде есепке алынады.

Төртінші міндет — зиянкестерді тану және автоматты бақылау. Камералар арқылы жапырақтарда немесе тұзақтарда байқалған жәндіктер (мысалы, тли, ақ шыбын) саналып, зиянкестердің таралуы туралы ескерту беріледі. Мұндай жүйелер фитосанитарлық бақылауды уақытылы және дәл етеді.

Бесінші бағыт — өнімділікті болжау. Жылыжай шаруашылықтары үшін өнімді жинау мен сатуды жоспарлау маңызды міндет. AI көмегімен бұл мәселені екі жолмен шешуге болады: өсімдіктегі жемістерді тікелей санау немесе жапырақ ауданы мен көлемге қарап биомассаны болжау. Бірінші әдіс қызанақ, қияр, бұрыш сияқты жемісі көрінетін дақылдарға қолайлы. Мысалы, YOLOv3 нейрондық желісі алмалардың санын санап, жалпы өнімділікті $F1=0.94$ дәлдікпен болжаған. Жылыжайларда мұндай шешімдер арқылы қызанақ пен бұрыштағы жасыл және қызыл жемістердің саны автоматты түрде анықталып, жинау мерзімі жоспарланады.

Ал салат, шпинат тәрізді биомасса өнімдері үшін өсімдіктің көлемі, жапырақтың ауданы арқылы салмағы болжанады. Бұл жерде де CNN модельдері арқылы жоғары дәлдікке жетуге болады. Сонымен қатар, кейбір жүйелер нақты уақытта камералар мен сенсорлардан жиналған деректер негізінде егін мөлшерінің өзгеру динамикасын модельдейді.

Қорыта айтқанда, жасанды интеллект және компьютерлік көру жылыжай өсімдіктерін бақылаудағы негізгі аспектілерді — ауруларды, өсу сатыларын, жапырақ жағдайын, қоректік күйін, зиянкестерді және өнімділікті — нақты әрі үздіксіз бағалауға мүмкіндік береді. Бұл автоматтандырылған жүйелер агротехникалық шешімдерді тезірек қабылдауға жағдай жасап, өнімділікті арттыру мен ресурс үнемдеуге ықпал етеді. Болашақта AI шешімдері IoT платформаларымен және роботтандырылған жүйелермен толық интеграцияланып, СЕА тұжырымдамасын толық жүзеге асыруға мүмкіндік береді.

1.3.8 Өсімдік кескіндерін өңдеу үшін CNN қолдану

Ауыл шаруашылығында қолданылатын AI құралдарының ішінде конволюциялық нейрондық желілер (Convolutional Neural Networks, CNN) ерекше орын алады. Соңғы жылдары CNN-дің пайда болуы мен дамуы компьютерлік көру міндеттерін сапалы жаңа деңгейге көтеріп, өсімдік кескіндеріндегі күрделі үлгілерді дәл тануға мүмкіндік берді. Ауыл шаруашылығы дақылдарының өсу сатыларын жіктеудің дәлдігін арттыру үшін конволюциялық желілер мен өзіндік зейін механизмдеріне негізделген гибриді модельдер қолданылады. Мысалы, Ні және тең автор. (2024) дрондардан алынған ортофотосуреттер арқылы жүгерінің өсу кезеңдерін талдауға арналған CNN және Self-Attention негізіндегі жүйені әзірледі, бұл танудың жоғары дәлдігін қамтамасыз етеді [20].

Дәстүрлі қолдан жасалған алгоритмдерден айырмашылығы, конволюциялық желілер автоматты түрде шикі пиксельдік деректерден ақпараттық ерекшеліктерді бөліп көрсетуге үйретіледі. Жылыжай өсімдіктерінің контекстінде бұл модельдің өзі сау және ауру жапырақ арасындағы нәзік айырмашылықтарды байқауды, жемістің жетілу кезеңдерін оның түсімен ажыратуды немесе кескін құрылымымен жапырақ аймағын анықтауды "үйренеді" дегенді білдіреді. CNN өзін Ауыл шаруашылығы мәселелеріндегі кескіндерді талдаудың ең тиімді әдісі ретінде көрсетті. Шолулар шамамен 2015 жылдан бастап, есептеу қуаты (GPU) көпшілікке қол жетімді болған кезде, аграрлық секторда терең конволюциялық желілерді қолдану бойынша зерттеулер саны күрт өскенін атап өтті. Бүгінгі таңда CNN жоғарыда аталған барлық бақылау міндеттерінде қолданылады: ауруларды диагностикалауда, ұрықты анықтауда және өсуді бағалауда.

Мысалы, ауруларды жіктеу үшін бастапқыда объектілерді жалпы тану үшін жасалған архитектуралар кеңінен қолданылады: AlexNet, VGG, ResNet, Inception, Efficient Net және олардың модификациясы. Өсімдік кескінінің деректер жиынтығында оқытылған бұл модельдер контрастты белгілері бар жағдайларда 95-99% - дан жоғары ауруларды тану дәлдігіне қол жеткізді. Неғұрлым күрделі жағдайлар үшін арнайы ансамбльдер мен модификациялар жасалады. Сонымен, екі түрлі CNN-ден (мысалы, VGG 16 және AlexNet) белгілерді біріктіру сынақ үлгісінде бұрыш ауруларын жіктеу дәлдігін ~95,8% дейін арттыруға мүмкіндік берді. Тағы бір мысал-аурудың түрін жіктей отырып, жапырақтың зардап шеккен аймақтарын бөлу үшін конволюциялық желілерге негізделген сегменттеуді қолдану (мысалы, mask R-CNN әдісі немесе толық конволюциялық желілер); мұндай жүйелер патологияны жоғары дәлдікпен оқшаулауды және тануды қамтамасыз етеді.

Жемістерді анықтау және санау тапсырмасында объектілерді анықтау үшін конволюциялық желілер кеңінен қолданылады (YOLO, SSD, Faster R-CNN): олар суретте белгілі бір класстағы объектілерді (жеміс, гүл) табуға үйретілген және конволюциялық қабаттардың арқасында масштабтың, бұрыштың өзгеруіне, жапырақтардың ішінара қабаттасуына төзімді. Неліктен CNN өсімдік кескіндерін талдауда соншалықты тиімді? Бұл олардың көп қабатты белгілерді автоматты түрде алу қабілетіне қатысты. Бірінші қабаттарда желі қарапайым элементтерді – шекараларды, контурларды, түс дақтарын ажыратады. Архитектурада барған сайын күрделі абстракциялар пайда болады-мысалы, Текстураның тән үлгісі, жапырақ венациясының түрі, дақ жиегінің пішіні және т.б. нәтижесінде CNN-дің соңғы қабаттары жоғары деңгейлі көрініске ие болады, оны оңай ажыратуға болады, мысалы, жапырақ дақтары күйіп қалудан немесе сау жеміс артық піскеннен.

Сонымен қатар, заманауи тәсілдер үлкен кескін массивтерінде (мысалы, ImageNet) оқытылған, содан кейін салыстырмалы түрде шағын аграрлық деректер жиынтығында оқытылған алдын ала дайындалған модельдерді (алдын ала оқытылған CNN) пайдалануға мүмкіндік береді. Мұндай оқыту трансфері тамаша нәтиже көрсетті: жылыжай суреттерінің деректер жиынында тек жүздеген мысалдар болса да, алдын ала дайындалған CNN пайдалану нөлден бастап оқумен салыстырғанда дәлдікті айтарлықтай арттырады. Табыстың тағы бір себебі – gan (generative Adversarial Networks) көмегімен деректерді ұлғайту (data augmentation) және жаңа үлгілерді генерациялау әдістерінің болуы. Ауыл

шаруашылығы үшін жиі проблема-белгіленген суреттердің болмауы (әсіресе сирек кездесетін аурулар немесе штаттан тыс жағдайлар үшін). Мұнда үлгіні ұлғайту әдістері көмекке келеді: бұрылыстар, шағылысулар, өсімдік кескіндерінің жарықтығын өзгерту, сондай-ақ арнайы нейрондық желілер арқылы синтетикалық жапырақ кескіндерін жасау (мысалы, жұмыста [18], мұнда dcgan көмегімен датасетті жақсарту қызанақ ауруларының жіктелуінің дәлдігін арттырды).

Жылыжай шаруашылығында конволюциялық нейрондық желілерді қолдану қазірдің өзінде зерттеу жазықтығынан практикалық енгізуге көшуде. AI модельдерімен бекітілген камералар ақылды жылыжайдың "көздеріне" айналады, бұл сізге бұрын қол еңбегін қажет ететін нәрсені көруге мүмкіндік береді. Қоршаған орта датчиктерімен және атқарушы құрылғылармен үйлескенде, CNN өсімдіктер туралы көрнекі ақпаратқа негізделген автономды шешім қабылдау жүйесінің өзегі бола алады. Мысалы, аталған салаттарды бақылау жүйесі автоматты түрде тазалауға дайын екендігін көрсете алады. Жапырақтардың күйін бақылайтын конволюциялық желілер тыңайтқыштарды мөлшерлеу жүйесімен тікелей интеграциялануы мүмкін: жетіспеушіліктің алғашқы белгілерінде – ерітіндіні түзетуге бұйрық беру. Жылыжайды басқарудағы толық автономды "көру" әлі де дамып келе жатқанымен, алғышарттар қазірдің өзінде жасалған.

Жылыжайдағы өсімдік шаруашылығында CNN қолдану тиімділігін негіздеуде көптеген ғылыми нәтижелер бар деп айтуға болады: ауруларды 95-99% дәлдікпен жіктеу, 10% - дан аз қателікпен өсу параметрлерін бағалау, 90% - дан жоғары дәлдік көрсеткіштері бар объектілерді (жемістерді, Гүлдерді) анықтау және т. б. бұл жетістіктер конволюциялық нейрондардың күрделі нейрондық желілерді шешуге қабілетті екенін көрсетеді дәстүрлі әдістер енді жеңе алмайтын суреттерді талдау міндеттері.

Қорытындылай келе, жасанды интеллект әдістері, әсіресе конволюциялық нейрондық желілер жылыжайларда өсімдіктерді өсіру технологиясының ажырамас бөлігі болып табылады. Өсіру әдістерінің жіктелуі олардың ішіндегі ең перспективалысы – гидропоника, аэропоника, аквапоника, тік фермалар – автоматтандырумен және жоғары дәлдіктегі бақылау жүйелерімен тығыз байланысты екенін көрсетеді. Дәл осы Агротехнология мен AI қиылысында инновациялық шешімдер пайда болады: "ақылды" жылыжайлар, онда камералар мен нейрондық желілер әр парақты бақылайды және жүйе өсімдіктердің қажеттіліктеріне бірден жауап береді. CNN қолдану агрономдар мен инженерлік жүйелерге бұрын-соңды болмаған егжей-тегжейлі ақпарат бере отырып, өсімдіктердің көрнекі деректерін өңдеудің керемет қабілетімен негізделген. Бұл бағытты одан әрі дамыту (Автоматты күтім мен егін жинау үшін робототехникамен біріктіруді қоса алғанда) жылыжай ауыл шаруашылығының өнімділігі мен тұрақтылығын айтарлықтай арттырады, ресурстардың минималды шығындарымен өсіп келе жатқан азық- түлік қажеттіліктерін қанағаттандырады деп күтілуде.

1.4 Салаттың өсу кезеңдерінің морфологиялық ерекшеліктері

Салат (*Lactuca sativa* L.) BBCH шкаласы бойынша стандартталған бірқатар фенологиялық өсу кезеңдерінен өтеді – Өсімдіктердің даму фазаларын сипаттайтын Халықаралық екі таңбалы код жүйесі. Ерте кезеңде (BBCH 10-19) жапырақтардың дамуы және жапырақ розеткасының қалыптасуы жүреді. Котиледондар пайда болғаннан бастап (код 10) алғашқы шынайы жапырақтар дәйекті түрде ашылады: бірінші жапырақ (bbch 11), екінші (12), үшінші (13) және т.б. 9 немесе одан да көп нақты жапырақтар (bbch 19) орналастырылған күйге дейін. Биологиялық тұрғыдан бұл кезең кәмелетке толмаған және кәмелетке толмаған-вегетативті өсуге сәйкес келеді: өсімдік қысқартылған негізгі сабағы бар жапырақтардың розеткасын құрайды. Салат жапырақтары спираль түрінде орналасады және генеративті даму басталғанға дейін тығыз жер розеткасын құрайды. Жас жапырақтары әдетте ашық жасыл, салыстырмалы түрде кішкентай, жұқа және нәзік, беті тегіс немесе сәл толқынды. Олардың саны өсіп, көбейген сайын олар үлкенірек және пішіні жағынан күрделене түседі, осы сортқа тән тістер немесе бұйра жиектер пайда болуы мүмкін. Жалпы,

19-кезеңнің соңына қарай өсімдік радиалды симметриялы Розетка болып табылады, ол топыраққа тығыз жабысады, жапырақтары біртіндеп үлкейеді. Бұл кезеңнің морфологиялық белгілері-өте қысқа сабақтың арқасында өсімдіктің кішкентай биіктігі, көлденең орналасқан жапырақтардың басым болуы, жапырақ массасының салыстырмалы түрде төмен тығыздығы (жас жапырақтар арасындағы люмендер әлі де байқалады), жас жапырақтардың ашық немесе ашық жасыл түсі.

Салаттың фенологиялық жіктелуі және өсу кезеңдері (BBCH 10-19)

УК сәуленің әсері: Розетканы орналастыру кезеңінде УК сәуленің қосылуы салаттың морфологиясына айтарлықтай әсер етеді. Тәжірибелер көрсеткендей, ультракүлгін-а диапазонының тұрақты жарықтандыруы жапырақ тақталарының кеңеюін тежейді және жапырақтардың жалпы биомассасының төмендеуіне әкеледі. Ультрафиолет өсімдіктерде "компам" деп аталатын фенотипті тудырады: кішкентай жапырақтар мен қысқартылған жапырақшалар пайда болады, сабағы одан да қысқарады. Сонымен қатар, қорғаныс пигменттерінің – флавоноидтардың, әсіресе антоцианиндердің синтезі күшейіп, жапырақтарға қызғылт реңк береді. Нәтижесінде УК сәулелену кезінде өсірілген өсімдіктердің тығыз және қалың жапырақтары болады (меншікті жапырақ беті төмендейді) және көбінесе қарқынды түске ие болады, ал ультракүлгінсіз жеңіл жапырақты розетка жіңішке нәзік ашық жасыл жапырақтармен көбірек таралады. Бұл айырмашылықтарды өсу кезеңдерін визуалды бағалау кезінде ескеру қажет.

BBCH 20-29: бүйірлік өсінділер және бұтақтардың болмауы

BBCH кодтарының бұл тобы өсімдіктерде бүйірлік өсінділердің (бұтақтардың) пайда болу кезеңіне сәйкес келеді. Алайда, салат жапырақтары үшін бүйірлік өсінділердің дамуы бүкіл вегетациялық кезеңде тән емес. Латук салаты негізгі өркеннің апикальды меристемасынан бір Розетканы құрайды және генеративті фаза басталғанға дейін іс жүзінде бүйірлік өсінділер түзбейді. Қырыққабаттың басын құрайтын жапырақты көкөністерге арналған bbch классификациясында 20-29 кезеңдері алынып тасталады, бұл салатта өсінділердің болмауын көрсетеді. Биологиялық тұрғыдан алғанда, бұл өсімдік тармақталмайды дегенді білдіреді: барлық ресурстар орталық розетканың өсуіне бағытталған. Жапырақ қолтығында ұйықтап жатқан бүршіктер болса да, олар негізгі қашу гүлдену кезеңіне өткенге дейін белсенді емес болып қалады. Осылайша, салаттың морфологиялық айырмашылығы-вегетативті кезеңдерде бұтасыз өсудің моноподиалды түрі. Бұл өсімдіктің көрнекі құрылымын жеңілдетеді-бірыңғай өсу орталығы бар және бүкіл жапырақ массасы бір розеткаға шоғырланған.

УК сәулеленудің әсері: BBCH 20-29 кезеңдерінде салатта Жаңа органдар болмағандықтан (бүйірлік қашу пайда болмайды), УК сәулелену тек қолданыстағы розетканың күйіне әсер етеді. УК сәулеленуді жалғастыру өсудің ақтам сипатын қолдайды: тіпті бүйір розеткаларды қалыптастыру мүмкіндігі болса да (мысалы, негізгі өсу нүктесін қысқаннан кейін), салат көбінесе бүйірлік өсінділердің дамуымен емес, бар жапырақтардың тамыр түзілуін және қалыңдатылуын күшейтеді. Осылайша, УК шамдар қашу түзілуін индукцияламайды, бірақ Розетканы тығыз ұстай отырып, бұрыннан бар тіндердің созылуын одан әрі тежей алады.

BBCH 30-39: сабақтың ұзаруы (гүлденуден бұрын болмауы)

Bbch негізгі 3 фазасы әдетте негізгі өркеннің (сабақтың) созылуының басталуын немесе өсімдіктердегі сабақтың өсуін сипаттайды. Салатта вегетативті кезеңде негізгі сабақтың айтарлықтай ұзаруы болмайды-ол генеративті даму басталғанға дейін қысқарады. Бұл ерекшелік Розетка өсімдігі ретінде салат биологиясымен байланысты: өнімді орган пайда болғанға дейін сабақ қатты қысылған күйінде қалады. Анықтамалықтарда вегетативті кезеңде салат сабағы қатты қысқарады, ал оның қарқынды созылуы тек генеративті фазада басталады. Осылайша, салатқа арналған bbch 30-39 кодтары іс жүзінде қолданылмайды (немесе көрінетін өзгерістердің болмауына тең). Морфологиялық тұрғыдан алғанда, осы кезеңде салат өсімдіктің жалпы биіктігін өзгертпестен розеткадағы жапырақтарды өсіруді жалғастырады (1-кезеңнің инерциясы бойынша). Розетка жаңа жапырақтардың орналасуына байланысты диаметрі сәл ұлғаюы мүмкін, бірақ тік архитектура дерлік

өзгермейді. Сабақтың дамымауының сыртқы белгісі-бұл жапырақтар арасындағы интеродтардың болмауы-олар әлі күнге дейін жерге жақын орналасқан.

Сондай-ақ, сабақтың алдындағы кезеңде УК сәулелену өркеннің ұзаруын кешіктіреді. Салаттың сабағы белгілі бір сигналға дейін дамымағандықтан, УК фактор бұл әсерді күшейте алады. Әдебиетте УК әсерінен морфогенетикалық ергежейлі өсудің фото феномені сипатталған: тіпті сабаққа бейім түрлерде де УК-Б интеродтардың ұзындығын төмендетеді. Салат үшін бұл атуға көшу біршама кешіктірілуі мүмкін, ал розетка скват болып қалады. Көрнекі түрде әдеттегі өсуден аздап айырмашылық бар, өйткені УК сабақ әлі гүлдегенге дейін дамымайды; дегенмен, ультракүлгінмен жапырақтары одан да көлденең және орталыққа қарай тығыз орналасуы мүмкін, бұл сабақтың болмауының әсерін күшейтеді.

ВВСН 40+: бастың қалыптасуы және генеративті кезеңдер

ВВСН 41-49 сатысында салатта жемісті вегетативті орган – қырыққабат басы дамиды (егер біз салаттың бас сорттары туралы айтатын болсақ). Бұл фаза розетканың қайта құрылуымен сипатталады: жас ішкі жапырақтар сыртқа қарай ашылуды тоқтатады және тығыз жабық қабат түзе бастайды. ВВСН шкаласына сәйкес, бас түзілуінің басталуы 41-кодпен бекітілген – "Бас түзілуінің басталуы: ең жас екі жапырақ ашылмаған күйінде қалады". Әрі қарай, бас тез тығыздалады және мөлшері артады: соңғы өлшемнің 20% (ВВСН 42), 30% (43), ... 80% дейін (48) және бастың типтік пішіні мен тығыздығына қол жеткізу (bbch 49). Биологиялық тұрғыдан алғанда, осы кезеңде сыртқы жапырақтар өсіп, орталықпен қабаттасады, ал ішкі жаңа жапырақтар кішкентай болып қалады және басын қалыптастыру үшін бүктеледі. Мысалы, майлы сорттарда (Butterhead) жапырақтардың сыртқы қабаты жұмсақ, сәл қабаттасады, ал ішкі жағы жарықтың болмауына байланысты нәзік, сарғыш – кремді болады. Қытырлақ бас сорттарында (crisphead, айсберг түрі) жапырақтары тығыз және қатты қабаттасып, қатты, сфералық бас жасайды. Бұл кезеңнің морфологиялық белгілері: жапырақ массасының тығыздығының күрт өсуі (жапырақтары тығыз оралған, Бос орындар қалмайды), Розетка пішінінің жазықтан күмбез тәрізді немесе сфералық болып өзгеруі, симметриялы бастың пайда болуы. Сыртқы жапырақтардың түсі жасыл болып қалады (әр түрлі сорттарда әр түрлі реңктерде), ал басындағы ішкі жапырақтары хлорофиллден айырылып, ашық сарыға дейін ағарады. Егер сорта антоцианиндер болса, онда қарқынды жарық жағдайында экстремалды жапырақтар қызғылт реңкке ие болуы мүмкін, ал бастың ішінде пигментация әлсіз.

Толық тауарлық массаға жеткеннен кейін (bbch 49 – бастың әдеттегі мөлшері мен тығыздығы) және вегетациялық кезең жалғасқан кезде салат генеративті дамуға көшеді. Негізгі түсірілімде ату басталады (bbch 50+): Розетка меристемасы репродуктивті түрге айналады және гүлді сабақтың тез өсуі басталады. Bbch 51 сатысында негізгі қашу (бастың ішінде жасырылған) созыла бастайды. Сабақ басын теседі, ондағы жапырақтар едәуір кішірейіп, сирек болады. Бұтақтар пайда болады-ұзартылған сабаққа екінші ретгі бүйірлік өсінділер салынады, оларда гүлшоғырлар (себеттер) болады. Көрнекі түрде өсімдік Розетка пішінін жоғалтады: биіктігі 1-1,2 м-ге дейін жоғары тармақталған педункул пайда болады. Бұтақтардың ұштарында себет тәрізді гүлшоғырлар дамиды, олардың әрқайсысында 10-20 Сары қамыс гүлдері бар. Салаттағы гүлдену кезеңі (bbch 60-69) кішкентай сары гүлдердің жаппай гүлденуімен сипатталады, содан кейін тұқымдар - қыртысы бар ашендер пайда болады. Морфологиялық тұрғыдан гүлдейтін өсімдік бастапқы кезеңдердің тығыз жапырақ розеткасына мүлдем ұқсамайды: генеративті өркеннің жапырақтары тар, ланцет тәрізді, негізі сабақты ішінара қоршап тұрады, ал биомассаның көп бөлігі ұзартылған сабақ пен гүлге ауысады. Өмірлік цикл аяқталады-тұқымдар пісіп болғаннан кейін (ВВСН 80-89) жер үсті бөлігі өледі (90+кезең). Ультракүлгін-жарықтандырудың әсері: бастың қалыптасу кезеңіндегі УК шамдар бастың тығыздығы мен түсіне әсер етуі мүмкін. УК - в егін жинау алдында қысқа мерзімде қолданылатын сәуле фотосинтезді төмендетпей жапырақтардағы антиоксиданттар мен пигменттердің синтезін арттыратыны белгілі. Бұл бастың сыртқы жапырақтарының қарқынды түсінде және пигментті сорттардағы антоцианиндердің жоғарылауында көрінуі мүмкін. Сонымен қатар, бас түзілу кезеңінде тұрақты УК сәулелену

жапырақ аймағын азайту арқылы бастың мөлшерін біршама азайтуға қабілетті, дегенмен жинау алдындағы қысқа әсер, керісінше, өнім сапасын жақсарту үшін агротехникалық әдіс ретінде қолданылады. Атуға көшу кезінде УК әсері де екі жақты: бір жағынан, УК-В гүлденудің басталуын кешіктіруі мүмкін (жеңіл стресс факторы ретінде), екінші жағынан, гүлді өсімділерде қорғаныс қосылыстарының жиналуын ынталандырады. Жалпы алғанда, УК астындағы генеративті органдардың (педункулалардың) морфологиялық айырмашылықтары жапырақтарға қарағанда аз көрінеді: негізгі өзгерістер химиялық құрамы мен физиологиясына қатысты, ал макроскопиялық тұрғыдан спикер (гүлденген салат) УК астында біршама төмен болып қалады және сабағы сәл қалың болуы мүмкін.

Сипатталған морфологиялық ерекшеліктерге негізделген салаттың фенологиялық кезеңдері арасындағы нақты шекара компьютерлік көру жүйелері арқылы өсуді автоматты түрде тану үшін практикалық маңызы бар. Дамудың әртүрлі кезеңдерінде өсімдіктердің сыртқы сипаттамалары пішіні, өлшемі және құрылымы бойынша айтарлықтай ерекшеленеді – бұл көрнекі айырмашылықтар Машиналық оқыту алгоритмдері үшін сенімді белгілер бола алады. Сонымен, bbch 10-19 кезеңінде салатта сирек жапырақтары бар кішкене розетка бар, ал бас сатысында (41-49) – массивті тығыз бас тәрізді форобласт; атудан кейін (50+) – биік, тармақталған сабағы бар мүлдем басқа силуэт. Дәл осы ботаникалық негізделген класстарды адам да, машина да оңай ажырата алады. Конволюциялық нейрондық желілерге (CNN) негізделген заманауи модельдер суреттерден сипатталған үлгілерді – жапырақ контурларын, бетінің құрылымын, жасыл массаның таралуын, объектінің симметриясын – аталған морфологиялық белгілерге сәйкес келетін автоматты түрде алуға қабілетті. Мысалы, өсу кезеңдерін ажыратуға үйретілген CNN моделі жас өсімдіктердің суреттерінде топырақтың қарама-қарсы фонында жеке дөңгелек жапырақтар басым болатынын, ал жетілген бастың суреттерінде бүкіл кадр біркелкі жасыл құрылыммен толтырылғанын анықтайды. Кезеңдер арасындағы пішін, түс және өлшемдегі мұндай айырмашылықтар алгоритмге даму кезеңін сенімді түрде жіктеуге мүмкіндік береді.

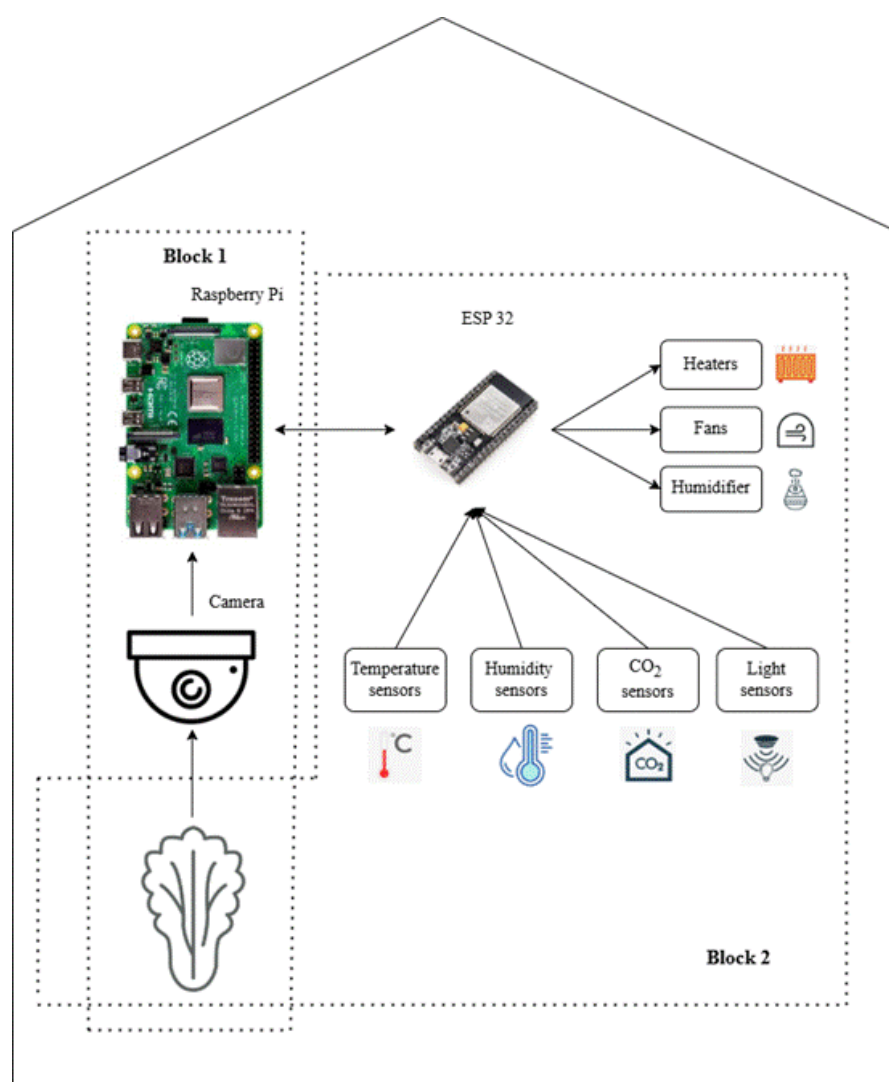
Модельмен ерекшеленетін визуалды класстар нақты фенологиялық фазалармен қатаң корреляциялануы маңызды. Модель архитектурасы әртүрлі деңгейдегі сүзгілердің каскадтарын қамтуы мүмкін: кейбір нейрондар қарапайым шекаралар мен қисықтарды таниды (мысалы, жапырақтардың шеттеріне сәйкес), басқалары күрделі құрылымдарды (розетканың орналасуы немесе бастың сфералық пішіні) таниды. Осы иерархиялық танудың арқасында CNN тұрақты морфологиялық белгілерге сүйенеді: жапырақтардың саны мен мөлшері, олардың кеңістікте орналасуы, топырақ бетінің тығыздығы және т. б. Бұл белгілер түсіру жағдайларының өзгергіштігіне аздап тәуелді. Мысалы, әр түрлі жарықта жапырақтардың түсі өзгеруі мүмкін, бірақ геометриялық параметрлер (Розетка пішіні, жапырақ контурлары) танылады. Осылайша, морфологияға назар аудару алгоритмінің жарық пен фонның өзгеруіне төзімділігін арттырады. Автоматты фенотиптеу жұмыстары өсудің әр кезеңіндегі сыртқы морфологиялық сипаттамалар кезеңді анықтау үшін сенімді нұсқаулық ретінде қызмет ететіндігін көрсетеді. Салат жағдайында bbch шкаласына негізделген класстарды пайдалану нәтижелердің биологиялық интерпретациясына кепілдік береді: жіктеу моделі дерексіз категорияларды емес, ботаникамен расталған өсімдік дамуының нақты фазаларын ажыратуға үйретілген. Бұл дегеніміз, шешім қабылдау кезінде CNN агрономның сараптамалық бағасын имитациялайды, суреттегі өсу кезеңін агрономиялық тәжірибеде анықтайтын белгілерді (розетканың мөлшері мен пішіні, басы немесе педункуласының болуы және т.б.) бөліп көрсетеді. Бұл тәсіл модельге сенімділікті қамтамасыз етеді және өсу кезеңдерін бағалау процесін объективті, қайталанатын және ғылыми негізделген ете отырып, салаттың өсуін агро-бақылау жүйесіне терең оқыту әдістерін біріктіруді жеңілдетеді.

2. Практикалық бөлім

2.1 Жүйенің архитектурасы

Жылыжай ауыл шаруашылығындағы микроклиматты бақылаудың жобаланған интеллектуалды жүйесі кері биологиялық байланыс тұжырымдамасына негізделген, онда климаттық параметрлерді түзетудің негізгі критерийі қоршаған ортаның мақсатты мәндерден ауытқуы ғана емес, сонымен қатар өсімдіктің нақты жағдайы болып табылады. Шекті немесе PID реттелетін алгоритмдермен шектелетін классикалық автоматтандырылған жүйелерден айырмашылығы, бұл тәсіл сенсорлық телеметрияны, өсімдіктің визуалды мониторингін және оның даму кезеңдеріне негізделген адаптивті логикалық басқаруды біріктіретін көп деңгейлі архитектураны жүзеге асырады.

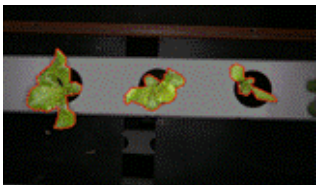
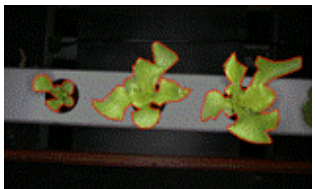
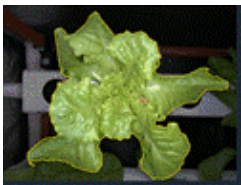
Архитектура үлестірілген модульдік жүйе қағидаты бойынша құрылған. Ол өзара байланысты үш деңгейді қамтиды: визуалды бақылау деңгейі, қоршаған ортаны сенсорлық диагностикалау деңгейі және орындаушылық реттеу деңгейі. Барлық модульдер жергілікті сымсыз желі арқылы өзара әрекеттеседі және қоршаған орта параметрлерінің ғана емес, сонымен қатар өсімдіктің морфофизиологиялық белгілерінің ауытқуларын талдай отырып, жабық басқару тізбегінде жұмыс істейді. Іске асырылған жүйенің архитектурасы 2.1-суретте көрсетілген.



Сурет 2.1 - Өсімдіктердің морфологиялық талдауына негізделген жылыжайдағы климатты басқарудың интеллектуалды жүйесінің архитектурасы

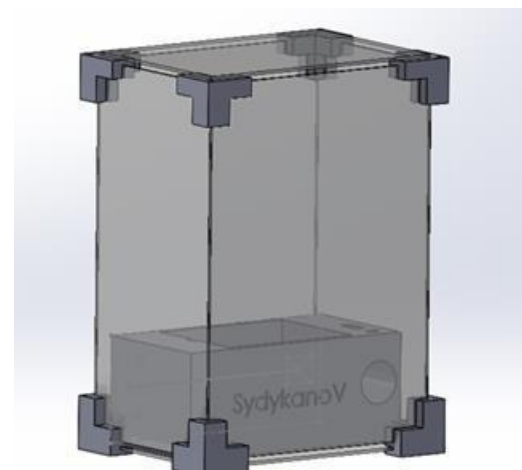
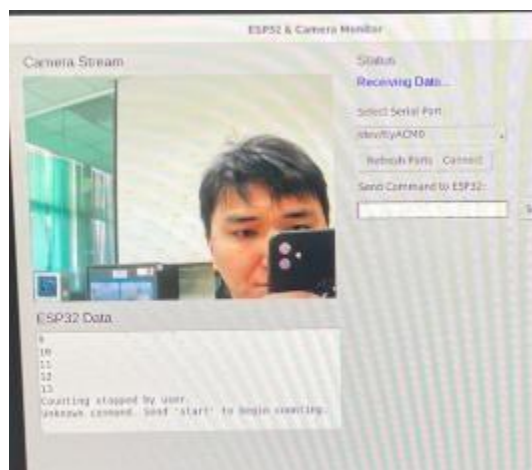
Архитектураның орталық элементі-өсімдік өсімдіктерінің ағымдағы кезеңін бақылауға және микроклиматтың өзгеруіне себеп болатын визуалды белгілерді түсіндіруге бағытталған визуалды талдау модулі. Архитектуралық Схема шеңберінде бұл модуль компьютерлік көру операцияларын орындауға қабілетті есептеу түйінінде жүзеге

асырылады, атап айтқанда түрлі-түсті кескіндерді өңдеу, жапырақ массасын анықтау және өсу кезеңдері бойынша жіктеу. Жылыжайдың ішіне орнатылған камерада алынған кескіндер алдын-ала сүзгіленіп, қалыпқа келтіріледі, содан кейін өсу фазасын тануға үйретілген нейрондық желі моделінің кірісіне беріледі. Модуль жұмысының нәтижесі морфологиялық белгілерге – жапырақтардың саны мен конфигурациясына, олардың түсіне, ауданына, симметриясына және тығыздығына негізделген объектінің ағымдағы биологиялық күйі туралы құрылымдық сигнал болып табылады. Дерекқорда қолданылатын класстар сурет. 2.2.

		
Класс 1 Өсудің бастапқы кезеңі (жас көшеттер, жапырақтардың аз саны)	Класс 2 Өсудің орташа кезеңі (жапырақтардың көбеюі, белсенді өсу)	Класс 3 Соңғы өсу немесе жетілу кезеңі (үлкен жапырақтар, салат жинауға дайын)
		
Класс 4 Өсудің бастапқы кезеңі УК шам астында	Класс 5 УК шам астында өсудің орташа кезеңі	Класс 6 Өсудің соңғы кезеңінде УК шамның астында жетілу

Сурет 2.2 - Салаттың өсу кезеңдерінің жіктелуі (*Lactuca sativa*) әр түрлі жарық жағдайларында

Архитектураның келесі деңгейі – сенсорлық, - микроклиматтың ағымдағы күйін параллель бақылауға арналған сурет. 2.3. Бұл деңгей температураны, ауаның салыстырмалы ылғалдылығын, көмірқышқыл газының концентрациясын және нақты уақыттағы жарық деңгейін бақылауға жауапты әртүрлі Сенсорлардан көп арналы деректерді жинауды жүзеге асырады. Сенсорлардан алынған ақпарат біріктіріліп, басқару Түйініне жіберіледі, онда ағымдағы мәндер өсімдік дамуының белгілі бір кезеңі үшін анықталған анықтамалық Климаттық үлгілермен салыстырылады. Ортаның барлық параметрлері дербес және белгіленген мақсатты мәндермен басқарылатын дәстүрлі тәсілдерден айырмашылығы, бұл архитектурада анықтамалық мәндерді қалыптастыру өсімдіктің күйін талдау нәтижесіне байланысты динамикалық түрде жүзеге асырылады.



Сурет 2.3 - Мониторинг жүйесі және шағын жылыжай макеті

Үшінші деңгей-атқарушы-жүйенің соңғы контурын білдіреді. Ол жылыту, желдету, ылғалдандыру, жарықтандыру және CO₂ беруді қоса алғанда, атқарушы механизмдерді қолдану арқылы Климаттық параметрлерге белсенді әсер етеді. Бұл деңгейдің жұмыс принципі параметрлердің ағымдағы вегетативті фазаға байланысты динамикалық анықталған мақсатты мәндерден ауытқуына негізделген. Мысалы, егер өсімдік Белсенді фотосинтетикалық өсу фазасына ауысса, жүйе жарық деңгейін және көмірқышқыл газының концентрациясын арттырып, температураны тұрақтандыру үшін желдету режимін реттей алады. Осылайша, микроклиматты басқару тек сыртқы әсерлер емес, объектінің күйі шешуші рөл атқаратын биологиялық бағытталған бейімделу режимінде жүзеге асырылады.

Ұсынылған архитектураның басты артықшылықтарының бірі-оператордың қатысуынсыз өзін-өзі оқыту және бейімделу мүмкіндігі. Қатаң белгіленген Климаттық сценарийлерден өсімдікке бағытталған контурлық басқаруға көшу жағдайды сақтаудың дәлдігін едәуір арттыруға, стресстік әсерді азайтуға және мәдениеттің біркелкі дамуына қол жеткізуге мүмкіндік береді. Жүйе қоршаған ортаның ауытқуларын жойып қана қоймайды, сонымен қатар басқару әсерлерін автоматты түрде реттеу арқылы ағымдағы жағдайлардың зауыттың қажеттіліктеріне қаншалықты сәйкес келетінін талдайды. Мұндай архитектура ресурстарды пайдалану тиімділігі мен егіннің тұрақтылығын арттыра отырып, дәлдік ауылшаруашылық принциптерін жүзеге асыруға мүмкіндік береді.

Техникалық тұрғыдан архитектураны көлденеңінен де (қызмет көрсетілетін аймақтар санын кеңейту арқылы) де, тігінен де масштабтауға болады (қосымша модульдерді біріктіру арқылы — мысалы, ауруларды талдау, өнімділікті болжау немесе сыртқы агрономиялық платформалармен байланыс). Мұндай икемділік модульдік топологияға енгізілген, онда әрбір функционалды блок стандартталған хаттамалар арқылы басқалармен өзара әрекеттеседі. Осылайша, ұсынылған архитектура классикалық микроклиматтық реттеу схемаларымен салыстырғанда автоматтандырудың жоғары деңгейін қамтамасыз ететін зауыттан кері байланысы бар интеллектуалды жылыжай салу үшін әмбебап негіз болып табылады.

2.2 Аппараттық компоненттер

Микроклиматты автоматтандырылған бақылау жүйесінің аппараттық негізі модульдік, энергия тиімділігі және визуалды талдау және физикалық басқару функцияларының есептеу оқшаулануы принциптеріне негізделген. Мұндай құрылым биологиялық объектінің күйін жоғары деңгейлі интерпретациялау және сенсорлармен және атқарушы құрылғылармен төмен деңгейлі жұмыс істеу міндеттерін бөлуге мүмкіндік береді, бұл ауыспалы жүктемесі бар агротехникалық объект жағдайында шешімнің сенімділігі мен масштабталуын қамтамасыз етеді.

Көрнекі блоктың негізі компьютерлік көру алгоритмдерін қолдайтын есептеу түйіні болып табылады. Бұл модуль сандық камера арқылы алынған өсімдік кескіндерін түсіруге және талдауға мүмкіндік береді. Камера бақыланатын вегетациялық аймаққа бағытталған және өсімдік физиологиялық белгілерін жазады: пішіні, түсі, жапырақ симметриясы, жапырақ массасының өсу дәрежесі. Дизайнға түсіру бұрышы мен фокустық қашықтықты реттеу мүмкіндігі қарастырылған, бұл оны әртүрлі дақылдар мен отырғызу масштабтарына бейімдеуге мүмкіндік береді. Камера GPU немесе нейро модульдермен жабдықталған жергілікті процессор Түйініне қосылады дамуының, олар шектеулі қуат пен ресурстарды тұтыну жағдайында терең оқыту модельдерінің интерференциясын орындай алады. Есептеу құрылғысы нақты уақыттағы операциялық жүйені немесе Linux тәрізді ортаны қолдайды, онда кескінді өңдеу кітапханалары және фазалық классификацияны орындайтын конвульсиялық Нейрон орналастырылған.

Кесте 1. Машиналық оқыту моделіне беру үшін кескінді өңдеу кезеңдері

Кезең	Сипаттама
Масштабтау	Кескіндерді 128×128 px өлшеміне келтіру
Қалыпқа келтіру	Пиксель мәндерін 255 - ке бөлу (0-ден 1-ге диапазонға дейін)
Кіші үлгілерді қалыптастыру	70% - оқыту (1075), 20% – валидация (307), 10% – тест (154)
Орындау ортасы	ImageDataGenerator Keras-тан
Күшейту	Қолданылмады

Жүйенің сенсорлық бөлігі-жоғары жиілікті қоршаған ортаны бақылауды қамтамасыз ететін көп параметрлік сенсорлардың жиынтығы. Температура мен салыстырмалы ылғалдылықты өлшеу үшін терморезистивті және сыйымдылық принциптеріне негізделген интегралды температура мен ылғалдылық сипаттамалары бар электронды цифрлық Модульдер қолданылады. Көмірқышқыл газының концентрациясы фотосинтетикалық белсенді орталарға тән диапазонда жоғары өлшеу дәлдігін қамтамасыз етуге қабілетті NDIR сенсорларымен (сызықтық емес инфрақызыл сіңіру) тіркеледі. Жарықтандыру өсімдіктердің сезімталдық қисығына (par) жақын кең спектрлі диапазоны бар фотоэлектрлік сенсормен басқарылады. Барлық сенсорлар жылыжайдың агрессивті ылғалды ортасында байланыс сенімділігі мен кедергілерден қорғауды қамтамасыз ететін сандық деректер құралдарымен (I2C, UART немесе SPI) жабдықталған.

Телеметрияны өңдеуге және басқару сигналдарын генерациялауға жауапты басқару микроконтроллері бірнеше енгізу / шығару арналары және біріктірілген сымсыз байланыс модульдері бар энергияны үнемдейтін платформа болып табылады. Ол мезгіл-мезгіл сенсорлармен сұхбаттасады, анықтамалық мәндер контекстіндегі деректерді түсіндіреді (өсімдіктің өсу кезеңін талдау арқылы анықталады) және атқарушы құрылғыларға басқару импульстарын береді. Микроконтроллердің құрылымы деректерді жинау, басқару логикасы және визуалды модульмен алмасу міндеттерін қатар орындауға мүмкіндік береді, сыни параметрлерді циклдік бултракулгинеризациялау арқылы ақауларға төзімділікті

қамтамасыз етеді.

Басқару модуліне қосылған атқарушы механизмдер микроклиматқа әсер етудің белсенді контурын құрайды. Ол мыналарды қамтиды:

Термо-модуль: берілген диапазондағы температураны көтеруге қабілетті мәжбүрлі немесе табиғи конвекциясы барактам қыздыру элементі. Қатты күйдегі реле немесе транзистор кілті арқылы басқарылады. Сурет. 2.4



Сурет 2.4 – Қыздыру элементі

Желдету қондырғысы: қызып кеткен немесе көмірқышқыл газымен қаныққан ауаның шығуын қамтамасыз ететін айналымды модуляциялау мүмкіндігі бар осьтік немесе орталықтан тепкіш желдеткіш. Тексеру клапандарымен және сүзгілермен жабдықталуы мүмкін. Сурет 2.5



Сурет 2.5 Вентилятор

Ылғалдандыру жүйесі: ультрадыбыстық немесе саптамалық тұман генераторын қамтиды, ол іске қосылған кезде бақыланатын көлемдегі ылғалдылықты қажетті мәндерге дейін арттырады. Ол қызып кетуден қорғайтын төмендету модулі арқылы басқарылады. Сурет.2.6.



Сурет 2.6 – Насос

Фото-блок: қарқындылығын реттеу үшін PWM немесе аналогтық сигнал арқылы басқарылатын фотосинтетикалық белсенді радиацияға (PAR) жақын спектрі бар LED-шамдар массиві. Сурет. 2.7.



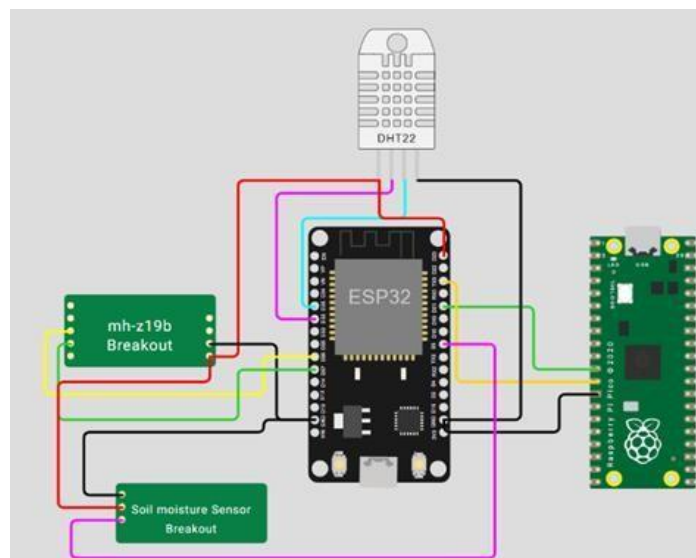
Сурет 2.7 – УК шам

CO₂ газ тізбегі: концентрация болмаған кезде контроллердің командасы бойынша газ беруді реттейтін көзді (цилиндр немесе генератор) және электромагниттік клапанды білдіреді.

Барлық компоненттерді қосу электр тізбектерінен гальваникалық ажыратумен қауіпсіз хаттамалар бойынша жүзеге асырылады. Басқару тізбектерінде индуктивті қорғаныс оптрондары мен релелері қолданылады. Жүйенің барлық негізгі тораптары IP65 қорғанысы бар герметикалық корпустарда орналастырылған, бұл жоғары ылғалдылық, конденсация және температураның өзгеруі жағдайында сенімділікті қамтамасыз етеді. Кабельдік қосылыстар экрандалған қабықта жасалады, ал модульдердің өзі тез ауыстыру және масштабтау мүмкіндігін қамтамасыз етеді.

2.3 Қосылу схемасы

Үш ESP32 UART арқылы Raspberry Pi-ге қосылған. Жетектерді басқару үшін бөлек релелер қолданылады. Датчиктер жылыжайдың барлық аймағында оңтайлы орналастырылған. Сурет. 2.5.

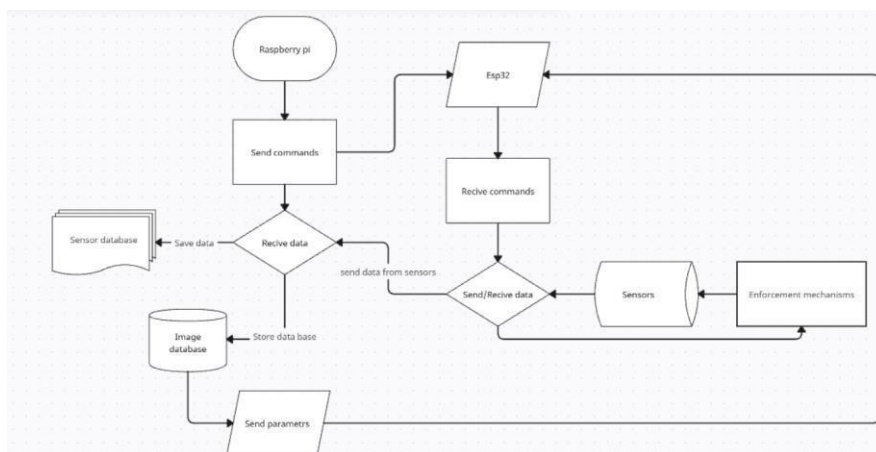


Сурет 2.8 – Датчиктерді қосу схемасы

2.4 Бағдарламалық қамтамасыз етуді іске асыру

Жүйенің бағдарламалық жасақтамасы-бұл жылыжай қондырғысында болып жатқан процестерді автоматтандырылған бақылауды, басқаруды және визуализацияны қамтамасыз ететін интеграциялық платформа. Бағдарламалық жасақтама архитектурасы жалпы мақсаттағы бір тақталы компьютер мен бірнеше микроконтроллерлерді қолдана отырып, таратылған деректерді өңдеу принципіне негізделген, олардың әрқайсысы өзінің функционалды аймағына жауап береді. Кешен көп ағынды, оқиғаға бағытталған басқару және ішкі жүйелер арасындағы асинхронды байланыс механизмдерін қолдану арқылы жүзеге асырылады.

Бас басқару түйіні-бұл Python бағдарламалау тілі, пайдаланушы интерфейсін құруға арналған tkinter кітапханасы және бейне ағынымен жұмыс істеуге арналған OpenCV пакеті арқылы жүзеге асырылатын графикалық бақылау ортасы. Интерфейс бір уақытта тәуелсіз, бірақ синхронды жұмыс істейтін бірнеше (үшке дейін) микроконтроллерлерді қосу және басқару мүмкіндігімен жасалған. Жүйе үш камерадан кескіндерді бейнелейді, олардың әрқайсысы өсімдік аймағының күйін көрсетеді және бір уақытта үш бөлек микроконтроллерден келетін телеметрияны бақылайды. Осылайша, әрбір бақылау аймағының өз жұбы бар: бейнебақылау арнасы және сериялық байланыс арқылы келетін телеметриялық деректер арнасы. Сурет. 2.9.



Сурет 2.9 – Жүйенің жұмыс алгоритмі

Әрбір ESP32-ге қосылу механизмі анықталған құрылғылар тізімінен COM портын

таңдау арқылы жүзеге асырылады. Қосылымды орнатқаннан кейін бағдарламалық жасақтама модулі микроконтроллерден келетін деректерді үздіксіз қабылдау үшін фондық ағынды бастайды. Серияланған ақпарат ағыны нақты уақыт режимінде парсимондалады: арнайы сигналдық маркерлер ("--- Sensor Data ---") бойынша топырақтың ылғалдылығы, ауа температурасы, шикі және есептелген түрдегі CO₂ концентрациясы туралы деректерді қамтитын пайдалы блоктар сүзіледі. Бұл мәндер жол ағынынан алынады, Excel файлында сақталады және оператор интерфейсіне көрсетіледі. Әрбір микроконтроллер аймағы үшін уақыт белгілері мен өлшеу мәндерін қамтитын бірегей атауы және ішкі құрылымы бар өзінің деректер файлы құрылады. Сонымен қатар, бағдарламалық жасақтама өсімдіктерді автоматтандырылған суретке түсіруді жүзеге асырады. Әрбір бейнебақылау арнасы камерада кескінді үнемі оқитын, оны Берілген өлшемдерге дейін масштабтайтын және интерфейске шығаратын арнайы ағынмен жұмыс істейді. Әр ESP32 бойынша жеке каталогтарға уақыт белгілерімен мұрағатталған суреттер тізбегін сақтау функциясы (бес кескін пакеті) мезгіл-мезгіл іске қосылады. Бұл өсімдік морфологиясының динамикасын кейінгі талдауға негіз жасайды және нейрондық желі үлгілерін оқыту немесе өзгерістерді визуалды тексеру үшін кіріс материалы ретінде пайдаланылуы мүмкін. Автоматтандырудың орталық компоненті-мерзімді командалар жүйесі. Белгіленген уақыт аралықтарынан кейін әр микроконтроллерге су сорғысының (PUMP_ON) және УК шамның (UV_ON) сигналдарын, ал 45 секундтан кейін осы элементтерді (PUMP_OFF, UV_OFF) өшіру сигналдарын жіберетін фондық процесс жүзеге асырылады. Сонымен қатар, ESP32-ге сенсорлық ақпараттың пакеттік шығуын бастайтын күй сауалнамасы (GET_DATA) командалары жіберіледі. Команданың әрбір жіберілуі интерфейс терезесінде аймақты, уақытты және команданы көрсететін логинмен бірге жүреді, бұл ашықтықтың жоғары деңгейін және қосымша жабдықысз күйін келтіру мүмкіндігін қамтамасыз етеді.

Микроконтроллерлер жағында командалардың тікелей интерпретациясын және кері телеметрияны қамтамасыз ететін микробағдарлама енгізілген. Командалар UART интерфейсі арқылы жол түрінде беріледі және негізгі циклде өңделеді. Сорғы мен УЛЬТРАКҮЛГІН-шамды бақылайтын реледегі екі атқарушы арнаны басқару схемасы, сондай-ақ датчиктерден: температурадан (инфрақызыл датчик), топырақ ылғалдылығынан (аналогтық модуль) және көмірқышқыл газынан (NDIR-датчик) деректерді түсіру рәсімі іске асырылды. Соңғысы эмпирикалық формула бойынша ppm-дегі CO₂ концентрациясына жуықтау мен қайта есептеуді қамтитын сандық өңдеуден өтеді. Мәндер оқылатын көріністе ресімделеді және орталық жүйеге қайта жіберіледі. Командаларды өңдеу UART-bultraculginer шамадан тыс жүктемесін болдырмау үшін кідірістерді ескере отырып орындалады. Көрнекі және телеметриялық ақпаратты біріктіру операторға өсімдіктің өсуін бір уақытта бақылауға және қоршаған ортаның объективті сандық көрсеткіштерін алуға мүмкіндік береді. Бұл әсіресе эксперименттік және өндірістік жағдайларда өте маңызды, мұнда байқалған өзгерістер негізінде микроклимат жағдайларын түзету туралы тез шешім қабылдау қажет. Интерфейс логикасын, кескінді түсіруді және ағынды басқаруды бөлу ұзақ уақыт бойы үздіксіз пайдалану кезінде де бағдарламаның тұрақты жұмысын қамтамасыз етеді. Бағдарламалық жасақтаманы енгізу тестілеу кезінде тұрақтылық пен дәлдікті көрсетті. Микроконтроллерлермен тұрақты байланыстар, командалардың дұрыс берілуі, телеметрияны сақтау және бірнеше камералардың синхронды жұмысы расталды. Көп ағынды Архитектура интерфейсті бұғаттаудан аулақ болды және әр арнаны тәуелсіз өңдеуді жүзеге асырды. Масштабтау мүмкіндігі, модульдік ұйымдастыру және стандартты Python кітапханаларын пайдалану жүйені әртүрлі жұмыс жағдайларына бейімдейді. Қажет болса, функционалдылықты кеңейтуге болады — өсу сатысының жіктелуімен кескінді талдауды біріктіру немесе оператордың қатысуынсыз қоршаған орта параметрлерінің маңызды мәндеріне автоматты түрде жауап беру.

Осылайша, әзірленген жүйенің бағдарламалық бөлігі визуалды деректер, сенсорлық Ақпарат және атқарушы командалар арасында дәл синхрондауды қамтамасыз ететін интеллектуалды автоматтандыру элементтері бар жылыжай шаруашылығындағы

микроклиматты көп деңгейлі басқаруға арналған толық функционалды платформа болып табылады.

2.5 Нәтижелер мен графиктер

Іске асырылған модельдердің тиімділігін бағалау үшін дәлдік, толықтығы және F-өлшемін қоса алғанда, жіктеу сапасының негізгі көрсеткіштері пайдаланылды және қате матрицалары, жылу карталары және корреляция графиктері салынды. Алынған нәтижелер диаграммалар мен жылу кескіндерін қолдану арқылы көрсетілді, бұл модельдердің әрқайсысының жұмыс сапасын егжей-тегжейлі көрсетуге мүмкіндік берді. Зерттеу барысында конволюциялық нейрондық желі архитектурасы әзірленді, оның ішінде әрқайсысы maxpooling субдискретизация операциясымен бірге екі қатарлы конволюциялық қабат бар. Бума блогынан және кіші іріктемеден кейін соңғы жіктеуді орындайтын толық байланысқан қабат қолданылды. Модельді оқыту 3224 кескіннен тұратын жаттығу жиынтығында жүргізілді және жоғары тиімділікті көрсетті, 154 кескіннің сынақ үлгісіндегі дәлдік 88,2% құрады. Нәтижелер кескінді тану және жіктеу тапсырмаларында конволюциялық нейрондық желілерді қолданудың тиімділігін көрсететін алдыңғы зерттеулермен расталады. Негізгі модельден басқа, mobilenetv2 архитектурасы трансферттік оқыту механизмін қолдана отырып жүзеге асырылды, онда модель imagenet-тің үлкен деректер жиынтығында алдын-ала дайындалған таразылармен инициализацияланды. Бұл тәсілді қолдану сынақ үлгісінде 85,2% деңгейінде жіктеу дәлдігін қамтамасыз етті. Бұл архитектура жіктеу сапасы мен есептеу тиімділігі арасындағы теңдестірілген қатынасты көрсетті, бұл оны мобильді және ендірілген құрылғылар сияқты шектеулі ресурстарда пайдалану үшін әсіресе перспективалы етеді.

CNN және MobileNetV2 модельдерінен айырмашылығы, бағытталған градиенттердің гистограмма дескрипторымен біріктірілген анықтамалық векторлық әдіс белгілерді алдын-ала қолмен шығаруды қажет етеді. Кескінді дайындау кезеңінде HOG дескрипторы қолданылды, оның көмегімен SVM моделін оқыту үшін қолданылатын ерекшелік векторлары пайда болды. Сынақ үлгісінде бұл тәсіл 83% деңгейінде жіктеу дәлдігін көрсетті. Нейрондық желілік архитектуралармен салыстырғанда біршама төмен көрсеткіштерге қарамастан, SVM әдісі іске асырудың қарапайымдылығы мен төмен есептеу талаптарының арқасында өзекті болып қала береді.

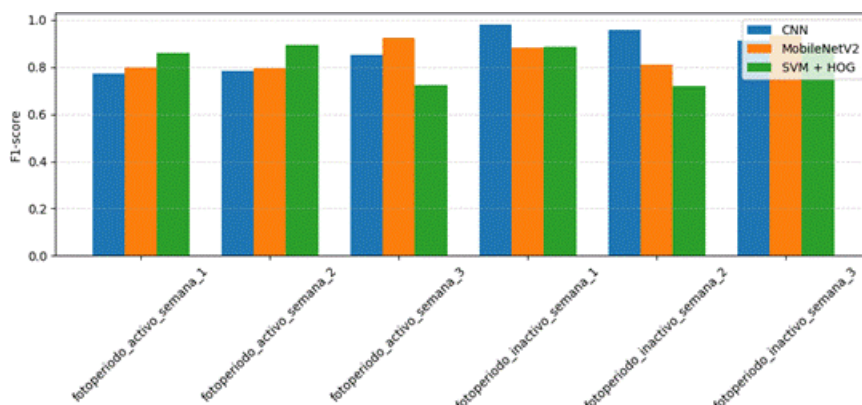
Кесте 2. Іске асырылған модельдерді салыстыру

Модель	Түрі	Дәлдік (%)	F1-score	Артықшылықтары	Кемшіліктері
CNN	Конволюциялық нейрондық желі	88.2	0.88	Жоғары дәлдік, белгілерді автоматты түрде алу	Ол айтарлықтай есептеу ресурстарын қажет етеді
MobileNetV2	Трансферлік оқыту (ImageNet)	85.2	0.85	Мобильді/ендірілген құрылғыларда тиімді	Дәлдігі бойынша CNN-ден сәл төмен
SVM + HOG	Классикалық ML + қол белгілері	83.0	0.83	Іске асырудың қарапайымдылығы, төмен есептеу талаптары	Қолмен белгілерді алу қажеттілігі (HOG)

Үш тәсілдің салыстырмалы талдауы 2-кестеде келтірілген, онда нәтижелер конволюциялық нейрондық желі, MobileNetV2 және HOG дескрипторы бар SVM сияқты іске асырылған модельдердің тиімділігіндегі айырмашылықтарды растайды.

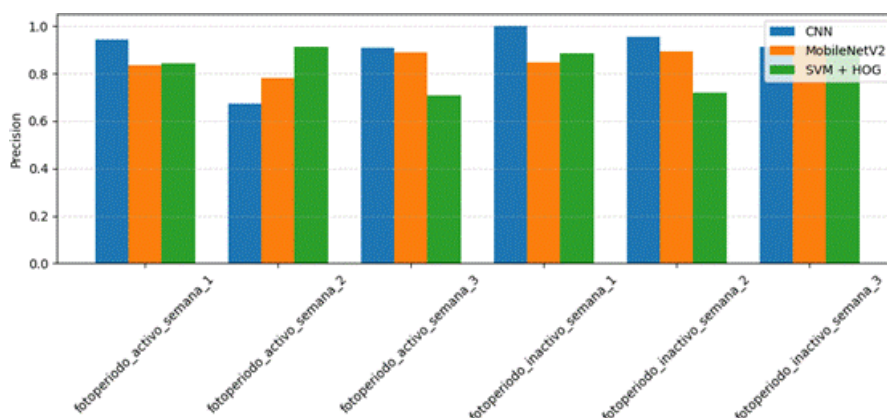
4-суретте көрсетілген F1-score көрсеткіштерін класстар бойынша салыстыру CN моделі өсімдіктердің өсуінің барлық кезеңдерінде, әсіресе белсенді емес фотопериод жағдайында

тұрақты нәтиже беретінін көрсетеді. Mobile net v2 архитектурасы сонымен қатар жоғары F1-score мәндерін көрсетеді, кейбір жағдайларда CNN-ден сәл төмен, бірақ жиынтық көрсеткіштер бойынша HOG-мен SVM-ден айтарлықтай асып түседі. Сурет. 2.10.



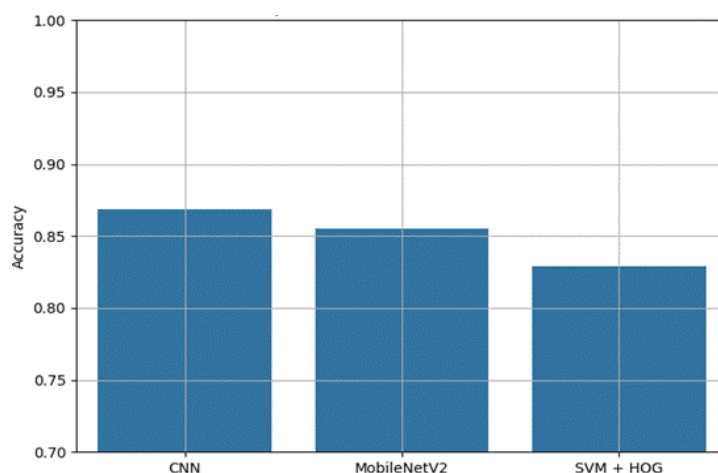
Сурет 2.10 - Класстар бойынша F1-score салыстыру

5-суретте келтірілген класс бойынша дәлдік көрсеткішін талдау HOG көмегімен SVM әдісі жеке класстарда жоғары дәлдікке қол жеткізетінін көрсетті, дегенмен CNN және MobileNetV2 модельдерінен орта есеппен төмен, әсіресе белсенді өсу кезеңдеріне тән күрделі визуалды белгілері бар кескіндерді жіктеу кезінде. Сурет. 2.11



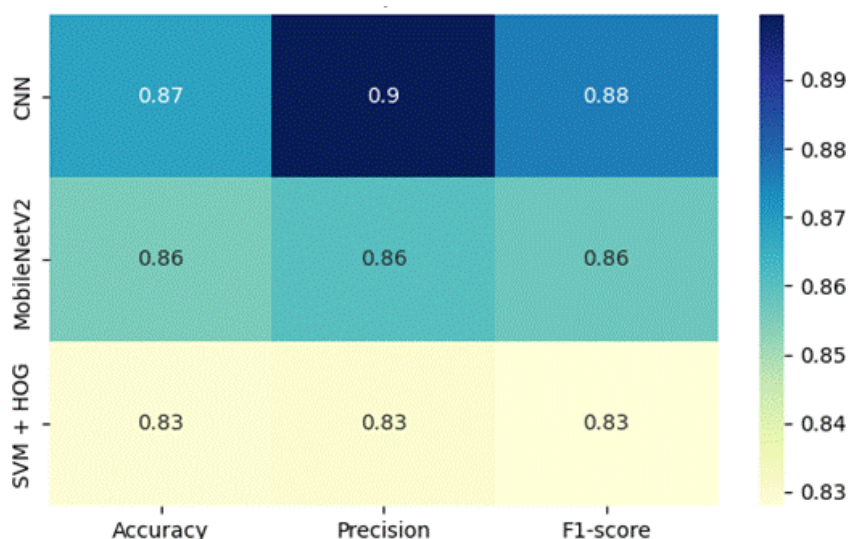
Сурет 2.11 - Класс бойынша дәлдік көрсеткішін талдау

2.12-суретте келтірілген модель дәлдігінің жиынтық салыстыруы CNN барлық іске асырылған шешімдер арасында ең жоғары нәтижелерге қол жеткізетінін көрсетеді. Mobile Net V2 шектеулі есептеу ресурстары жағдайында оны қолданудың орындылығын растай отырып, жоғары тиімділікті сақтайды. HOG бар SVM әдісі, салыстырмалы түрде төмен көрсеткіштерге қарамастан, іске асырудың қарапайымдылығы мен үнемділігі басымдық болып табылатын тапсырмалар үшін қолданылады. Сурет. 2.12.



Сурет 2.12 - Модельдердің дәлдігін жалпы салыстыру

7-суретте келтірілген көрсеткіштердің жалпыланған жылу картасы барлық негізгі критерийлер бойынша CNN жетекші позициясын растайтын әдістердің әрқайсысының артықшылықтары мен шектеулерін көрсетеді. Mobilenav2 екінші орында, ал HOG бар SVM әдісі соңғы мәндер бойынша үшінші орында. Сурет. 2.13



Сурет 2.13 - Жалпыланған көрсеткіштердің жылу картасы

Жүргізілген талдау негізінде CNN және MobileNetV2 архитектуралары өсудің әртүрлі кезеңдерінде, әсіресе жоғары дәлдік пен сенімділікті қажет ететін жағдайларда өсімдік кескіндерін жіктеу мәселелеріне арналған ең перспективалы шешімдерді ұсынады деп қорытынды жасауға болады. HOG дескрипторын қолданатын SVM әдісін есептеу мүмкіндіктері шектеулі жағдайларда және қажет болған жағдайда қарапайым және жылдам іске асыру кезінде қолданған жөн.

Қорытынды

Өсімдік жағдайынан кері байланысы бар интеллектуалды микроклиматты басқару жүйесін әзірлеу дәл Ауыл шаруашылығы саласында жаңа перспективалар ашады. Тек тұрақты Климаттық параметрлерді сақтауға бағытталған классикалық жүйелерден айырмашылығы, іске асырылған архитектура биологиялық Объектінің нақты қажеттіліктерін ескереді, қоршаған ортаны қазіргі даму кезеңіне динамикалық түрде бейімдейді. Компьютерлік көру, сенсорлық бақылау және автоматтандырылған атқарушы басқару әдістерін біріктіру технологиялық икемділікті, масштабталуды және ғылыми негізділікті біріктіретін жүйені құруға мүмкіндік берді. Модульдік тәсілді таңдау, көп құрылғы және көп камералы бақылау оның жеке жылыжайларда да, масштабталатын Агротехнологиялық кластерлерде де қолданылуын қамтамасыз етті.

Мұндай жүйені енгізу өнімнің өнімділігі мен сапасын арттырып қана қоймайды, сонымен қатар дәлірек реттеу арқылы су, электр және химиялық өңдеу шығындарын азайтады. Болашақта оны толық дербестендіру бағытында дамытуға болады: ауруларды болжау, тыңайтқыштарды реттеу және энергия шығындарын оңтайландыру, сондай-ақ Агро мониторингтің бұлтты платформаларына интеграциялау үшін жасанды интеллектті пайдалану.

Әдебиеттер тізімі

1. Choab N., Allouhi A., El Maakoul A., Kousksou T., Saadeddine S., Jamil A. Review on greenhouse microclimate and application: design parameters, thermal modeling and simulation, climate controlling technologies // *Solar Energy*. 2019. Vol. 191. P. 109–137.
2. Soussi M., Chaibi M.T., Buchholz M., Saghruni Z. Comprehensive Review on Climate Control and Cooling Systems in Greenhouses under Hot and Arid Conditions // *Agronomy*. 2022. Vol. 12, no. 3. P. 626.
3. Badji A., Benseddik A., Bensaha H. et al. Design, technology, and management of greenhouse: A review // *Journal of Cleaner Production*. 2022. Vol. 373. P. 133753.
4. Villagran E., Espitia J.J., Amado G. et al. CO₂ Enrichment in Protected Agriculture: A Systematic Review of Greenhouses, Controlled Environment Systems, and Vertical Farms—Part 2 // *Sustainability*. 2025. Vol. 17, no. 7. P. 2809.
5. Maraveas C. Artificial intelligence applications in smart greenhouse farming: current trends and future prospects // *Applied Sciences*. 2023. Vol. 13, no. 1. P. 14.
6. Gorjian S., Calise F., Kant K. et al. A review on opportunities for implementation of solar energy technologies in agricultural greenhouses // *Journal of Cleaner Production*. 2021. Vol. 285. P. 124807.
7. Hatfield J.L., Prueger J.H. Temperature extremes: Effect on plant growth and development // *Weather and Climate Extremes*. 2015. Vol. 10. P. 4–10.
8. Xiao H., Feng L., Zhi Y. Tuning the PID parameters for greenhouse control based on CFD simulation // *Proceedings of the 2nd International Conference on Agro-Geoinformatics (IEEE)*. 2013. P. 354–359.
9. Duarte-Galván C., Torres-Pacheco I., Guevara-González R.G. и др. Review. Advantages and disadvantages of control theories applied in greenhouse climate control systems // *Spanish Journal of Agricultural Research*. 2012. Vol. 10, no. 4. P. 926–938.
10. Su Y., Yu Q., Zeng L. Parameter Self-Tuning PID Control for Greenhouse Climate Control Problem // *IEEE Access*. 2020. Vol. 8. P. 186157–186171.
11. Wu W.X., Zhao Y., Zhao J.Q. A controller development based on PLC for climate control of agricultural greenhouses // *Applied Mechanics and Materials*. 2013. Vol. 336–338. P. 1266–1270.
12. Bhutada S., Shetty S., Malye R. и др. Implementation of a fully automated greenhouse using SCADA tool like LabVIEW // *Proc. of the 2005 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*. 2005. P. 741–746.
13. Chen S., Liu A., Tang F. и др. A review of environmental control strategies and models for modern agricultural greenhouses // *Sensors*. 2025. Vol. 25, no. 5. P. 1388.
14. Sela Saldinger S., Rodov V., Kenigsbuch D., Bar-Tal A. Hydroponic Agriculture and Microbial Safety of Vegetables: Promises, Challenges, and Solutions // *Horticulturae*. – 2023. – Vol. 9, no. 1. – P. 51.
15. Beacham A. M., Vickers L. H., Monaghan J. M. Vertical farming: a summary of approaches to growing skywards // *Journal of Horticultural Science and Biotechnology*. – 2019. – Vol. 94, no. 3. – P. 277–283.
16. Krastanova M., Sirakov I., Dimitrova M., Orozova P. Aquaponic systems: biological and technological parameters // *Biotechnology & Biotechnological Equipment*. – 2022. – Vol. 36, no. 1. – P. 305–316.
17. Qureshi W. A., Gao J., Elsherbiny O., et al. Boosting Aeroponic System Development with Plasma and High-Efficiency Tools: AI and IoT—A Review // *Agronomy*. – 2023. – Vol. 15, no. 3. – P. 546.
18. Mac T. T., Nguyen T.-D., Dang H.-K., Nguyen D.-T., Nguyen X.-T. Intelligent agricultural robotic detection system for greenhouse tomato leaf diseases using soft computing techniques and deep learning // *Scientific Reports*. – 2024. – Vol. 14, no. 1. – P. 23887.
19. Zhang L., Xu Z., Xu D., et al. Growth monitoring of greenhouse lettuce based on a convolutional neural network // *Horticulture Research*. – 2020. – Vol. 7. – P. 124.
20. Ni X., Wang F., Huang H., et al. A CNN- and Self-Attention-Based Maize Growth Stage Recognition Method and Platform from UAV Orthophoto Images // *Remote Sensing*. – 2024. – Vol. 16, no. 14. – P. 2672.
21. Mkhatshwa J., Kavu T., Daramola O. Analysing the performance and interpretability of CNN-based architectures for plant nutrient deficiency identification // *Computation*. – 2024. – Vol. 12, no. 6

«7М07107 – Робототехника және Мехатроника» білім беру бағдарламасының 2 курс магистранты Сыдыканов Серікболсын Мұхтарбекұлының
«Қоршаған орта датчиктері мен өсімдік морфологиясының деректері негізінде жылыжайдағы микроклимат жағдайын болжау және бақылау үшін машиналық оқыту моделін әзірлеу» тақырыбындағы магистерлік диссертациясына

ҒЫЛЫМИ ЖЕТЕКШІНІҢ ПІКІРІ

Сыдыканов Серікболсын Мұхтарбекұлының «Қоршаған орта датчиктері мен өсімдік морфологиясының деректері негізінде жылыжайдағы микроклимат жағдайын болжау және бақылау үшін машиналық оқыту моделін әзірлеу» тақырыбы бойынша жазылған магистрлік диссертациялық жұмысы – ауылшаруашылық өндірісін цифрландыру мен жасанды интеллект технологияларын біріктіру тұрғысынан өзекті әрі жоғары ғылыми және практикалық маңызға ие зерттеу болып табылады.

Зерттеу мақсаты – бейнебақылау камералары мен қоршаған орта датчиктерінен алынған деректер негізінде өсімдіктің өсу кезеңін дәл анықтап, микроклимат параметрлерін интеллектуалды түрде реттейтін жүйе құру. Бұл мақсатты іске асыру барысында келесі маңызды міндеттер орындалды:

- RoboFlow платформасы арқылы морфологиялық бейнелерге негізделген деректер жиынтығы жинақталды және өңделді;
- Бірнеше нейрондық желі архитектуралары салыстырылып, CNN моделі негізінде жоғары дәлдікке қол жеткізілді (88.2%);
- Raspberry Pi мен ESP32 негізінде деректерді өңдеу және климатты басқару модулі іске асырылды;
- Жүйенің екі негізгі блогы (талдау және басқару) өзара тиімді байланыста жұмыс істейтін кешенді құрылым ретінде сипатталды.

Диссертациялық жұмыстың бірінші бөлімінде микроклиматты басқару саласындағы заманауи тәсілдер мен өсімдік морфологиясын анықтауға арналған компьютерлік көру әдістеріне теориялық шолу жасалған. Екінші бөлімде жүйенің архитектурасы мен бағдарламалық іске асырылуы көрсетілсе, үшінші бөлімде – модельдердің өнімділігі мен жүйенің жалпы жұмыс қабілеттілігі эксперименттік тұрғыда дәлелденген. Зерттеу нәтижелері 2025 жылы өтетін «AIR Conference» халықаралық конференциясына ұсынылып, баяндамалар тізіміне енді. Диссертациялық жұмыс құрылымы жағынан логикалық түрде құрылған, алынған нәтижелер ғылыми негізделген және тәжірибелік қолдануға бейімделген. Әдеби шолу мазмұнды және заманауи еңбектерге негізделген. Техникалық шешімдер өзектілігімен және инновациялық тәсілдерімен ерекшеленеді. Зерттеу барысында магистрант Сыдыканов Серікболсын өзін ізденімпаз, жүйелі ойлай алатын, инженерлік және ғылыми тапсырмаларды өз бетінше шеше алатын маман ретінде көрсетті.

Ұсынылып отырған диссертациялық жұмыс магистрлік деңгейге қойылатын барлық талаптарға толық сәйкес келеді және қорғауға ұсынылады, ал оның авторы – Сыдыканов Серікболсын «өте жақсы» деген бағаға және «магистр» академиялық дәрежесіне лайық деп есептеймін.

Ғылыми жетекші:

PhD, қауымдастырылған профессор



Алимбаев Ч. А.

«___» _____ 2025 ж.

7M07107 – «Робототехника және мехатроника»

Сыдыканов Серікболсын Мұхтарбекұлының

Магистрлік диссертациясына

СЫН ПІКІР

Тақырыбы: Қоршаған орта датчиктері мен өсімдік морфологиясының деректері негізінде жылыжайдағы микроклимат жағдайын болжау және бақылау үшін машиналық оқыту моделін әзірлеу.

Сыдыканов Серікболсынның магистрлік диссертациясы «Қоршаған орта датчиктері мен өсімдік морфологиясының деректері негізінде жылыжайдағы микроклимат жағдайын болжау және бақылау үшін машиналық оқыту моделін әзірлеу» болып табылады.

Бұл зерттеуде жылыжай өсімдік шаруашылығында өсімдіктің нақты күйіне негізделген микроклиматты басқарудың интеллектуалды жүйесі әзірленіп, іске асырылды. Ұсынылған әдіс өсімдіктің өсу белгілерін компьютерлік көру арқылы талдауға және кері биологиялық байланысты қамтамасыз етуге негізделген. Жүйе жылыжайдағы қоршаған орта параметрлерін — температураны, ылғалдылықты, жарықтандыруды және көмірқышқыл газының (CO_2) құрамын — нақты уақыт режимінде автоматты түрде реттейді. Жүйе архитектурасы суреттерді өңдейтін Raspberry Pi есептеу модуліне, сенсорлық диагностика мен атқарушы құрылғылардың өзара әрекеттесуіне негізделген. Бағдарламалық орта ESP32 микроконтроллерлері мен бейнекамераларды біріктіретін көпағынды мониторинг пен визуализацияны жүзеге асырады.

Жұмыс мәтіндік және графикалық материалдардың құрылуына, баяндалуына, ресімделуіне және мазмұнына қойылатын жалпы талаптарға сәйкес ұйым стандарты бойынша жасалған.

Магистрант Сыдыканов Серікболсынның зерттеу жұмысы толығымен орындалған деп есептеймін. Жұмысын «Жақсы» деп бағалап, магистрант Сыдыканов Серікболсынды магистр академиялық дәрежесіне лайық деп есептеймін.

Сын пікір беруші

әл-Фараби атындағы ҚазҰУ,
Жасанды интеллект және
Big Data кафедрасының доценті, PhD
« ____ » _____ 2025ж



Қарымсақова Н.Т



Отчет подобия

Метаданные

Название организации

Satbayev University

Название

Қоршаған орта датчиктері мен өсімдік морфологиясының деректері негізінде жылыжайдағы микроклимат жағдайын болжау және бақылау үшін машиналық оқыту моделін әзірлеу.

Автор

Научный руководитель / Эксперт

Сыдыканов Серікболсын МұхтарбекұлыЧингиз Алимбаев

Подразделение

ИАИИТ

Объем найденных подобиий

КП-ия определяют, какой процент текста по отношению к общему объему текста был найден в различных источниках.. Обратите внимание!Высокие значения коэффициентов не означают плагиат. Отчет должен быть проанализирован экспертом.



КП1

25

Длина фразы для коэффициента подобия 2



КП2

20071

Количество слов



КЦ

170712

Количество символов

Тревога

В этом разделе вы найдете информацию, касающуюся текстовых искажений. Эти искажения в тексте могут говорить о ВОЗМОЖНЫХ манипуляциях в тексте. Искажения в тексте могут носить преднамеренный характер, но чаще, характер технических ошибок при конвертации документа и его сохранении, поэтому мы рекомендуем вам подходить к анализу этого модуля со всей долей ответственности. В случае возникновения вопросов, просим обращаться в нашу службу поддержки.

Замена букв		0
Интервалы		0
Микропробелы		4
Белые знаки		0
Парафразы (SmartMarks)		0

Подобия по списку источников

Ниже представлен список источников. В этом списке представлены источники из различных баз данных. Цвет текста означает в каком источнике он был найден. Эти источники и значения Коэффициента Подобия не отражают прямого плагиата. Необходимо открыть каждый источник и проанализировать содержание и правильность оформления источника.

10 самых длинных фраз

Цвет текста

ПОРЯДКОВЫЙ НОМЕР	НАЗВАНИЕ И АДРЕС ИСТОЧНИКА URL (НАЗВАНИЕ БАЗЫ)	КОЛИЧЕСТВО ИДЕНТИЧНЫХ СЛОВ (ФРАГМЕНТОВ)
из базы данных RefBooks (0.00 %)		
ПОРЯДКОВЫЙ НОМЕР	НАЗВАНИЕ	КОЛИЧЕСТВО ИДЕНТИЧНЫХ СЛОВ (ФРАГМЕНТОВ)
из домашней базы данных (0.00 %)		
ПОРЯДКОВЫЙ НОМЕР	НАЗВАНИЕ	КОЛИЧЕСТВО ИДЕНТИЧНЫХ СЛОВ (ФРАГМЕНТОВ)

из программы обмена базами данных (0.00 %)



порядковый номер	название	количество идентичных слов (фрагментов)
------------------	----------	---

из интернета (0.00 %)



порядковый номер	источник URL	количество идентичных слов (фрагментов)
------------------	--------------	---

Список принятых фрагментов (нет принятых фрагментов)

порядковый номер	содержание	количество идентичных слов (фрагментов)
------------------	------------	---