

ELECTRONIC GOVERNMENT IN KAZAKHSTAN: CURRENT STATE
AND DIRECTIONS OF DIGITALIZATION OF PUBLIC SERVICES

G. Zh. Doskeyeva^{1*}, A. G. Ulasbek²

¹Narxoz University, Almaty, Republic of Kazakhstan

²«Alatau City Bank» JSC, Almaty, Republic of Kazakhstan

ABSTRACT

The purpose of this research is to determine the impact of digital tools on Kazakhstan's public administration system, to identify the development dynamics of the country's e-government system at the international level, and to assess its current state.

Methodology – the study employs statistical and econometric methods. These methods, which are typically used to analyze changes within specific economic environments using statistical data, were applied to evaluate the quality of e-government services based on usage data. The results were presented in the form of graphs and charts.

Originality of the research lies in analyzing the outcomes of digital development in Kazakhstan's public administration system, assessing e-government indicators from 2005 to 2024, and using these results to make forecasts.

Research results demonstrate the impact of digital tools on the public administration system and offer a forecast of the dynamic development index based on an analysis of e-government performance indicators.

Keywords: public administration, digitalization, digital tools, e-government, information systems.

АВТОРЛАР ТУРАЛЫ

Доскеева Гулашар Жармагамбетовна – экономика ғылымдарының докторы, «Мемлекеттік және жергілікті басқару» ББ профессоры, Университет Нархоз, e-mail: gulashar.doskeeva@narxoz.kz, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-6216-1545>.*

Ұласбек Аяулым Ғалымжанқызы – «Alatau City Bank» АҚ басқарма менеджері, email: ulasbekovaaaulym@gmail.com

МРНТИ: 68.01.77

JEL Classification: Q16

DOI: <https://doi.org/10.52821/2789-4401-2025-3-199-224>

АГРОӨНЕРКӘСІП САЛАСЫНДАҒЫ ЦИФРЛЫҚ ЕГІЗДЕР:
ТҰЖЫРЫМДАМАЛАР МЕН ПРАКТИКА

Б. С. Амирханов¹, Г. А. Амирханова¹, А. А. Раева^{1*}

¹ Өл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті,
Алматы, Қазақстан Республикасы

АНДАТПА

Зерттеу мақсаты - цифрлық егіздер технологиясының ақылды ауыл шаруашылығындағы мүмкіндіктерін жан-жақты зерттеп, олардың фермерлік шаруашылықтарда қолданылуы арқылы өнімділік пен тұрақтылықты арттыру жолдарын көрсету. Сонымен қатар, цифрлық егіздерге тән негізгі ұғымдарды, типтерді, жобалау және енгізу тәсілдерін жүйелеп, олардың нақты өндірістік процестерге ықпалын талдау көзделді.

Әдіснамасы. Зерттеу барысында пәнаралық жүйелік тәсіл қолданылды. Цифрлық егіздер типологиясы қалыптастырылып, оларды жобалау үшін IoT-A (Заттар интернеті архитектурасы) негізіндегі құрылымдық модель ұсынылды. Бұл модель фермерлік шаруашылықтардағы нақты технологиялық процестерге бейімделіп, шынайы уақыт режимінде деректер алмасуды және автоматтандырылған бақылау мен болжау мүмкіндіктерін қарастырады. Сонымен қатар, Еуропалық Одақтың IoF2020 жобасы аясындағы бес нақты мысал: егін шаруашылығы, сүт өндірісі, жылыжай көкөніс өсіру, органикалық көкөніс шаруашылығы және мал шаруашылығы салалары бойынша салыстырмалы талдау жүргізілді.

Зерттеудің бірегейлігі / құндылығы. Бұл жұмыс ауыл шаруашылығында цифрлық егіздер тұжырымдамасын алғаш рет кешенді түрде жүйелейтін еңбектердің бірі болып табылады. Зерттеу барысында тек технологиялық жаңашылдық емес, сонымен қатар басқару моделіне енгізілетін өзгерістер мен фермерлік процестерді трансформациялау жолдары да нақты ұсынылды. Зерттеу нәтижелері цифрлық егіздердің болашақ аграрлық сектордағы орны мен маңызын ғылыми негізде дәлелдеуге мүмкіндік береді.

Зерттеу нәтижелері. Зерттеу нәтижелері цифрлық егіздер көмегімен фермерлік шаруашылықтарды шынайы уақыттағы мәліметтер негізінде тиімді басқаруға болатынын көрсетті. Дәстүрлі тәсілдерге қарағанда, бұл модельдер процестерді болжау, ресурстарды оңтайлы бөлу және климаттық немесе нарықтық өзгерістерге бейімделу тұрғысынан жоғары тиімділік береді. IoF2020 жобасы мысалында ұсынылған модельдердің практикалық нәтижелері цифрлық егіздердің кең ауқымды қолдану мүмкіндігін және олардың агроөнеркәсіптік кешенді цифрландырудағы рөлін дәлелдеді. IoF2020 жобасындағы бес пилоттық қолдану цифрлық егіздердің шаруашылық тиімділігі мен тұрақтылығын айтарлықтай күшейтетінін сандық тұрғыда дәлелдеді. Мысалы, Potato Data Processing Exchange пилотында картоп өсірушілер IoT-құрылғылар арқылы даладан қоймаға дейінгі өнім ағынын толық бақылай бастады; соның нәтижесінде егіс өнімділігі орташа 10 %-ға өсті, жанар-жағармай шығыны 10 %-ға қысқарды, ал жалпы маржа 5 %-ға артты.

Түйін сөздер: Цифрлық егіздер, ақылды ауыл шаруашылығы, заттар интернеті (IoT), агроөнеркәсіптік жүйелер, ауыл шаруашылығын цифрландыру.

Алғыс: Бұл зерттеу Қазақстан Республикасы Ғылым және жоғары білім министрлігі Ғылым комитетінің (BR24992975 гранты) қаржылық қолдауымен жүзеге асырылды.

КІРІСПЕ

Ақылды ауыл шаруашылығы өндірісі заманауи ақпараттық шешімдерсіз елестету қиын. Фермалар менагроөнеркәсіптік жүйелер барған сайын цифрлық технологияларға, соның ішінде сенсорлар, бақылау жүйелері, интеллектуалды аналитика және автоматтандырылған жабдықтарға сүйенеді. Ауыл шаруашылығы жылдам дамып келе жатқан технологиялардың әсерінен цифрландыруға, соның ішінде бұлтты есептеу, заттар интернеті, үлкен деректер, машиналық оқыту, толықтырылған шындық және робототехникаға бағдарланған жаңа кезеңге өтуде. Ақылды фермерлік жүйелер — бұл нақты уақыттағы деректерге негізделген, қашықтан басқарылатын, автоматтандырылған басқару шешімдерін ұсынатын цифрлық жүйелер. Цифрлық егіздер бұл үрдісті сипаттайтын маңызды құрал болып табылады, олар нақты объектілердің сандық көшірмелері ретінде олардың мінез-құлқын, жағдайын және болашақтағы дамуын виртуалды түрде көрсетуге мүмкіндік береді. Цифрлық егіздер ақылды ауыл шаруашылығының өнімділігі мен тұрақтылығын жаңа деңгейге көтеруге мүмкіндік береді. Қазақстан — «Атамекен-Агро» холдингі. 2019 жылы холдинг құрамындағы «Шатило и К» шаруашылығы озым бидайдан 71,4 ц/га рекордтық өнім алды. Компания Agrostream АЖ-ын енгізу арқылы далалық техниканы GPS-пен қадағалап, элеватор логистикасын, астық қозғалысын және сапаны толық автоматтандырды. Нәтижесінде өндірістік шығындар азайып, жалпы түсім 10–15 %-ға өсті. Ауыл шаруашылығы — табиғи тәуекелдерге бейімделген сала. Өнімділік пен тұрақтылыққа жету үшін технологиялық трансформация қажет. Қазіргі таңда фермерлердің нақты уақыттағы шешім қабылдауын қамтамасыз ететін жүйелер аз. Мәселені шешу үшін олардың әзірленуі мен енгізілуі әлі де дамып келеді. Бұл мақалада цифрлық егіздердің ақылды ауыл шаруашылығында рөлін талқылау арқылы осы олқылықтарды жоюға үлес қосу мақсат етіледі.

Негізгі үш мақсаты:

Цифрлық егіздер ұғымын анықтау және олардың типологиясын ұсыну;

Цифрлық егіздерді жобалау мен енгізу үшін жүйелі негіздеме әзірлеу;

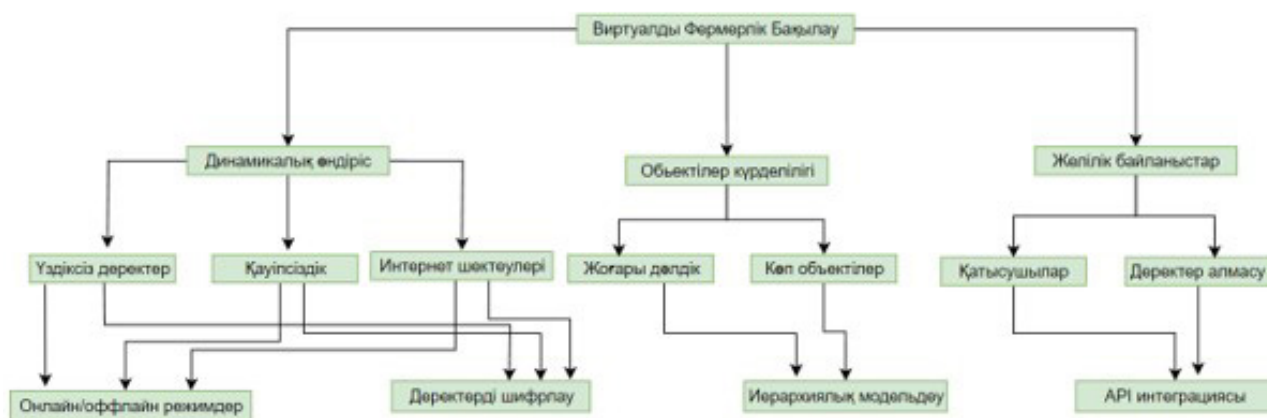
Тұжырымдамалық негіздемені Еуропаның IoF2020 жобасындағы бірнеше жағдайлық зерттеуде қолдану және тексеру.

Мақаланың келесі бөлімдерінде зерттеу әдістемесі және нәтижелері сипатталады. Негізгі бөлімде домендік талдау жүргізіліп, цифрлық егіздер ұғымы мен олардың әртүрлі басқару мүмкіндіктері қарастырылады, жүйелік тәсілге негізделген басқару моделі мен ақпараттық архитектура сипатталады, IoF2020 жобасындағы жағдайлық зерттеулерде тұжырымдамалық негіздеменің қолданылуы талқыланады. Ақырында, соңғы бөлімде негізгі тұжырымдар қорытындыланып, талқыланады.

ЗЕРТТЕУДІҢ НЕГІЗГІ БӨЛІГІ

Концептуалдық негіздеме әзірлеу – белгілі бір мәселені шешуге бағытталған жаңа артефакт құруды мақсат ететін дизайнға бағытталған әдіснама. Бұл мақалада әзірленген дизайн артефакты ферма басқару саласында цифрлық егіздерді жобалау мен енгізуге арналған. Цифрлық егіздер ұғымы күрделі болғандықтан, жағдайлық зерттеу тиімді тәсіл ретінде қолданылды. Зерттеу Еуропаның IoF2020 жобасы аясында жүргізілді, ол 19 IoT пайдалану жағдайын қамтыды, оның ішінде нақты және виртуалды нысандардың динамикалық бейнеленуі бар.

Бұл суретте (1-сурет) виртуалды фермерлік бақылаудың үш негізгі бағытын көрсетеді. Орталық элемент - виртуалды фермерлік бақылау, одан үш негізгі тармақ тарайды: динамикалық өндіріс, объектілер күрделілігі және Желілік байланыстар [1]. Әр бағыттың өз қиындықтары бар: мысалы, динамикалық өндірісте - деректер жинау, қауіпсіздік және интернет мәселелері. Диаграмманың төменгі бөлігінде осы қиындықтарды шешу жолдары көрсетілген: онлайн/оффлайн режимдер, шифрлау, модельдеу және API интеграциясы.



1-сурет – Виртуалды Фермерлік Бақылау Архитектурасы.

Ескерту: Сурет [1] дереккөзі негізінде автормен құрастырылған

Зерттеудің гипотезасы

Осы зерттеудің гипотезасы – ауыл шаруашылығында цифрлық егіздерді (ЦЕ) IoT, бұлттық есептеулер және жасанды интеллект негізінде қолдану агроөндірістік процестерді автоматтандыруға мүмкіндік береді, бұл өнімділіктің артуына, ресурстар шығындарының төмендеуіне және экологиялық жүктеменің азаюына алып келеді.

Цифрлық егіздерді интеграциялау үлкен деректерді талдау арқылы өнімділікті дәлірек болжауға мүмкіндік береді.

ЦЕ-ді пайдалану су тұтыну мен тыңайтқыш енгізуді оңтайландырып, ресурстардың тиімділігін арттырады.

Цифрлық егіздер негізіндегі автоматтандырылған бақылау адами фактордың әсерін төмендетіп, ферма басқару дәлдігін арттырады.

Осы зерттеудің ғылыми жаңалығы – ауыл шаруашылығында цифрлық егіздерді қолданудың жаңа әдісін ұсыну, яғни IoT, бұлттық есептеулер және жасанды интеллектті біріктіре отырып, агроөндірістік процестерді оңтайландыру. Цифрлық егіздердің функциялары, соның ішінде мониторинг, болжамдау және ресурстарды нақты уақыт режимінде басқару жүйелі түрде зерттелді. Оларды агроөнеркәсіптік жүйелерге интеграциялау үшін концептуалды архитектура жасалды, бұл топырақ пен климаттық деректерді автоматты түрде талдауға, өнімділікті модельдеуге және шығындарды азайтуға мүмкіндік береді. Сонымен қатар, цифрлық егіздердің тұрақты дамуға әсері зерттелді, оның ішінде экологиялық жүктемені төмендету, су мен тыңайтқыштарды тиімді пайдалану мәселелері қарастырылды.

Зерттеу жоғары ғылыми маңызға ие, өйткені ол цифрлық егіздер негізінде ауыл шаруашылығындағы интеллектуалды технологияларды дамытуға ықпал етеді. Әзірленген тұжырымдама агроөндірістік процестерді автоматтандыруға, ресурстарды тиімді пайдалануды арттыруға және экологиялық тәуекелдерді төмендетуге мүмкіндік береді. Алынған нәтижелер дәлме-дәл егіншілік саласындағы болашақ зерттеулер үшін негіз бола алады, сондай-ақ агроөнеркәсіптік жүйелерге цифрлық егіздерді практикалық енгізуге септігін тигізеді.

Модельдердің тексеру тәсілдері

Цифрлық егіздерді енгізудің нәтижелері үш негізгі көрсеткіш бойынша бағаланды:

Өнімділіктің артуы – нақты учаскелерде жыл сайынғы өнім көлемі (ц/га) салыстырылды;

Ресурстарды үнемдеу – су, тыңайтқыш, отын және БҚҚ шығыны бойынша пайыздық төмендеу анықталды;

Экологиялық жүктеме – CO₂ шығарындылары мен топырақ эрозиясына әсері өлшенді.

ROI және тиімділік

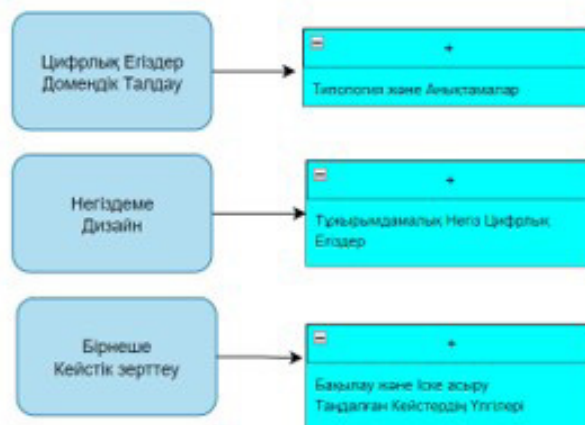
Фермерлік шаруашылықтарда енгізу алдында және кейінгі Return on Investment (ROI) көрсеткіштері салыстырылды. Мысалы, “Олжа Агро”-да инвестиция қайтарымы 2 жыл ішінде 185% құрады.

Статистикалық сенімділік

Модельдерге негізделген нәтижелерге $\pm 5\%$ қателік шегінде сенімділік интервалы қолданылды. Графиктердегі ауытқулар сенсорлық деректер мен нақты өлшемдер арасындағы сәйкестік арқылы расталды.

3. Цифрлық егіздердің анықтамасы және типологиясы

Бұл суретте (2-сурет) цифрлық егіздерді енгізудің құрылымдалған процесін көрсетеді, оған үш кезең кіреді: доменді талдау, тұжырымдамалық негізді жобалау және кейстік зерттеулер. Жаңа тәсіл цифрлық егіздердің типологиясын әзірлеу және оларды нақты мысалдарда сынақтан өткізу болып табылады. Алғаш рет теория мен практикалық қолдануды байланыстыратын жүйелік тұжырымдаманы құруға ерекше назар аударылады. Кезеңдердің өзара әрекеттесу логикасы талдау нәтижелерін жобалау мен одан әрі енгізуде қалай қолданылатынын көрсетеді. Бұл процесті әртүрлі салаларға, мысалы, ауыл шаруашылығына бейімделетін және қайталанатын етеді.

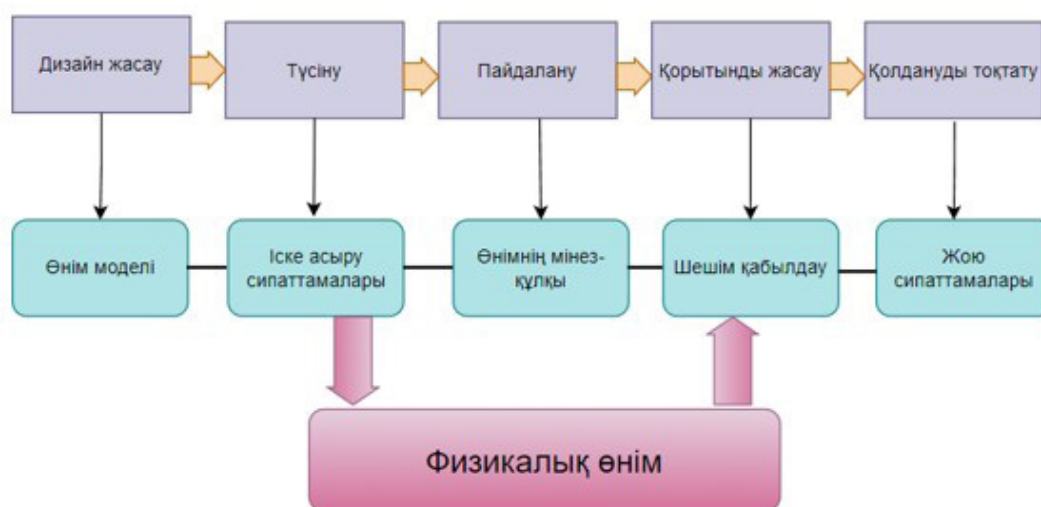


Сурет 2 – Қолданылған зерттеу әдіснамасы.

Ескерту: Сурет [1] дереккөзі негізінде автормен құрастырылған

Цифрлық егіз ұғымының негіздері өнімнің өмірлік циклін басқару саласынан шыққан [2]. Бұл тұрғыда өнімнің әр кезеңінде пайдаланушылар үшін қолжетімді кешенді басқару жүйесінде өнімге қатысты барлық ақпаратты біріктіру қажеттілігі бар, мысалы, өнімнің пайдалану нәтижелері, жобалау процесін оңтайландыру және өндірістік жүйені жетілдіру үшін [3]. Өнім деректерін басқарудың негізгі құралы ретінде әрбір физикалық өнімнің сандық аналогын пайдалану ұсынылды. Майкл Гривз алғашқы рет бұл идеяны ұсынды, ол өнімнің физикалық жүйесі мен оның сандық аналогы арасындағы байланысты нақты көрсеткен [4]. NASA бұл идеяны қолдану арқылы ғарыш кемесінің жоғары дәлдіктегі симуляциясын жасады, бұл инженерлерге нақты уақыттағы жағдайларды бақылауға мүмкіндік берді [5; 6]. Негізінен, цифрлық егіздер – бұл физикалық объектілердің виртуалды, цифрлық баламалары [4; 7]. Олар нақты объектілермен нақты уақыт режимінде және қашықтан байланысады, бұл объектілер мен олардың контекстінің бай сипаттамаларын ұсынады. Мұндай цифрлық егіздер статикалық өнім дизайнынан, мысалы, CAD модельдерінен әлдеқайда асып түседі, өйткені олар динамикалық мінез-құлықты қамтиды [4;8]. Цифрлық егіздердің бұл динамикалық табиғаты нақты объектілердің қазіргі мінез-құлқын ғана емес, болашақтағы мінез-құлықты модельдеу немесе болжау, сондай-ақ тарихи мінез-құлықты қалпына келтіруді қамтиды [8;9]. Цифрлық егізді объектінің өмірлік циклі жобасының кезеңінде жасауға болады, бұл жаңа өнімдерді ойлап табу және оларды егжей-тегжейлі модельге айналдыруды жеңілдетеді. Осы кезеңде цифрлық егіз дизайн шешімдерінің өнім сапасы мен қызметіне әсерін ерте бағалауға мүмкіндік береді, бұл қымбат физикалық прототиптерді әзірлеу қажеттілігін азайтады. Жобалау кезеңінен кейін физикалық кезеңге өту жүзеге асады, мұнда цифрлық егіз негізінде физикалық объект өндіріледі және кез келген ауытқуларды түзетуге мүмкіндік беріледі. Пайдалану кезеңінде физикалық өнімнің ағымдағы және тарихи күйі сенсорлар мен AutoID құрылғыларын пайдалану арқылы бақыланады. Сонымен қатар, цифрлық егіз объектіні қашықтан басқару үшін қолдануға болады. Ақырында, жою кезеңі орындалады, мұнда физикалық объект жойылады, бірақ цифрлық егіз ақпаратты іздестіру, сәйкестендіру және оқыту мақсатында сақталуы мүмкін.

Бұл суретте (3-сурет) физикалық өнімнің өмірлік циклі мен оны басқару кезеңдерін көрсетеді. Процесс дизайн жасаудан басталып, өнімнің моделін құру арқылы жүзеге асады. Кейін түсіну кезеңінде өнімнің іске асырылу сипаттамалары анықталады [3;9]. Пайдалану кезеңінде өнімнің мінез-құлқы бақыланып, ол туралы деректер жинақталады. Қорытынды жасау кезінде шешім қабылданып, өнімнің келесі әрекеттері жоспарланады. Соңында, қолдануды тоқтату кезінде өнімнің жою сипаттамалары анықталып, цикл аяқталады. Бұл процесс өнімді тиімді басқаруға мүмкіндік береді.

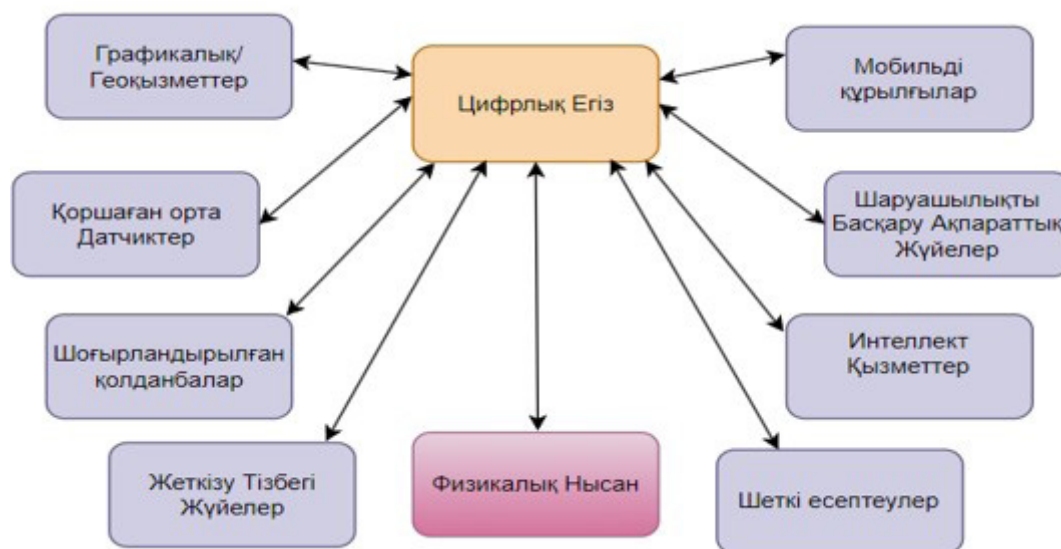


Сурет 3 – Өнімнің өмірлік циклі барысында цифрлық егіздердің рөлі.

Ескерту: Сурет [1] дереккөзі негізінде автормен құрастырылған

Бұл суретте (4-сурет) цифрлық егіздің негізгі компоненттері мен оның байланысын көрсетеді. Цифр-

лық егіз физикалық нысанмен тығыз байланыста болып, оның жағдайын бақылайды және модельдейді. Цифрлық егізді басқару үшін қоршаған орта датчиктері, мобильді құрылғылар, шаруашылықты басқару ақпараттық жүйелері және шеткі есептеулер қолданылады [10]. Сонымен қатар, графикалық/геоқызметтер мен жеткізу тізбегі жүйелері деректерді талдауға және шешім қабылдауға көмектеседі. Бұл құрылым цифрлық егіздің физикалық нысанды тиімді басқаруға және бақылауға мүмкіндік беретінін көрсетеді.



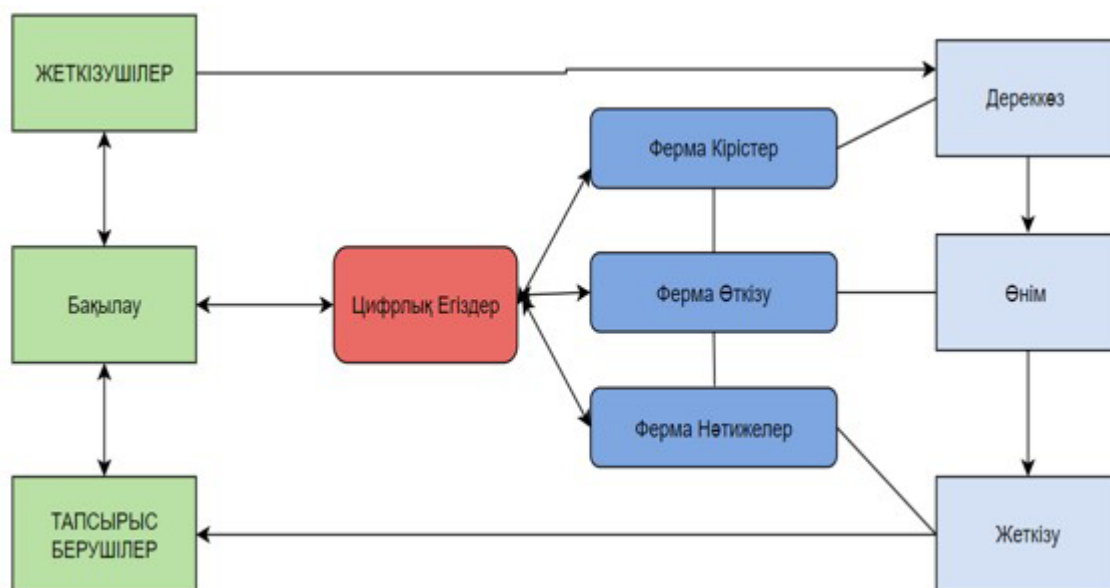
Сурет 4 – Заттар интернетіндегі цифрлық егіз.
Ескерту: Сурет автормен құрастырылған

4. Цифрлық Егіздер ауыл шаруашылығында

Ауыл шаруашылығы – табиғи жағдайларға тәуелді, күрделі сала. Өндіріс ауа райы, аурулар, топырақ жағдайы, маусымдық өзгерістер мен климатқа байланысты. Сонымен қатар: Фермерлер тағам қауіпсіздігі, тұрақтылық және экология талаптарын қанағаттандыруы тиіс. Нарықтың өзгермелі талаптарына тез бейімделу қажет. Бұл фермерлерден өндіріс стратегияларын үнемі қайта қарауды және процестерді нақты бақылауды талап етеді.

Бұл суретте (5-сурет) ауыл шаруашылығындағы цифрлық егіздердің жұмыс процесін көрсетеді [11]. Жүйенің орталық бөлігі - цифрлық егіздер, олар жеткізушілер, бақылау және тапсырыс берушілер арасындағы байланысты қамтамасыз етеді. Үш түрлі ферма (кірістер, өткізу және нәтижелер) деректерді өңдеп, дерекқор, өнім және жеткізу процестерін басқарады. Сызбадағы көк түсті блоктар негізгі өндіріс процестерін, жасыл түстілер - сыртқы қатысушыларды, ал ашық көк түстілер - нәтижелерді көрсетеді. Жүйе барлық қатысушылар арасында тиімді ақпарат алмасуды қамтамасыз етеді.

Тұжырымдамалық негіз фермерлік процестерді жоспарлау, бақылау және оңтайландыру үшін Цифрлық Егіздерді енгізуге берік платформа ұсынуы қажет. Ол ақылды ауыл шаруашылығының кибер-физикалық басқару циклін қамти отырып, барлық шаруашылық процестерін үйлестіруді қамтамасыз етуі тиіс. Шаруашылық объектілерінің толық өмірлік циклін қолдау үшін алты түрлі Цифрлық Егізді қамтиды: көрнекі, мониторинг, болжау, ұсынушы, автономды және еске алу. Цифрлық Егіздердің негізгі сипаттамаларын – уақтылылық, сенімділік, интеграция, интеллект және күрделілік қолдайды. Шаруашылықты басқарудағы негізгі қиындықтарды шешуге бағытталған: объектілердің күрделілігі, желі динамикасы және процестердің өзгергіштігі. Бұл негіз екі түрлі модельді ұсынады: басқару моделі және техникалық архитектураны қарастыратын енгізу моделі.



Сурет 5 – Цифрлық Егіздер арқылы қамтамасыз етілген виртуалды фермерлік бақылау.

Ескерту: Сурет [1] дереккөзі негізінде автормен құрастырылған

Басқару жүйелік динамикадағы маңызды ұғым болып табылады, жүйенің мақсаттарына қол жеткізуді қамтамасыз етеді, тіпті бұзушылықтар болған жағдайда да. Басқару – жүйенің мінез-құлқын өлшейтін және нәтижелер стандарттарға сәйкес келмесе, түзететін басқарушының енгізілуі. Шаруашылық процестері басқарылатын болып саналады, егер олардың операциялары тұрақты күйде болса. Бұл процестер кибернетикалық жарамдылықты қамтитын кибернетикалық басқару функцияларын қамтуы тиіс, яғни сенсор, айырушы, шешім қабылдаушы және орындаушы сияқты кері байланыс жолын білдіреді. Басқару моделі кірісті қажетті нәтижеге айналдыратын әрекеттерді жүзеге асырады, бұл ауыл шаруашылығы жүйелерінде соңғы өнімді тұтынушыға дейін дайындайтын бизнес процестер болып табылады.

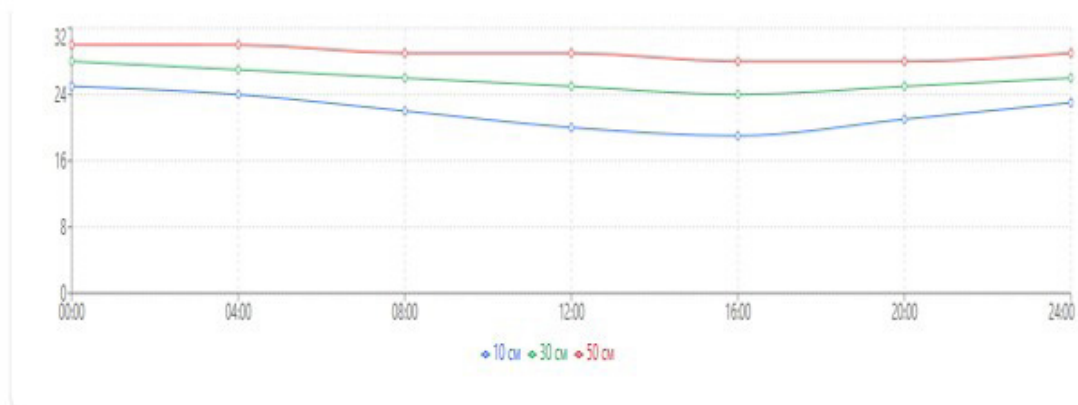
Заманауи ауыл шаруашылығында топырақ пен қоршаған ортаны бақылауға арналған бірнеше негізгі сенсор түрлері қолданылады. Біріншіден, әртүрлі тереңдіктерге тікелей топыраққа орнатылатын топырақ сенсорлары. Топырақ ылғалдылығы датчиктері өлшеу дәлдігі 1%-ға дейін жетеді және 10-100 см тереңдікте орнатылады, бұл топырақтың ылғалдылық профилін толық зерттеуге мүмкіндік береді. Температура датчиктері -40 -тан $+85^{\circ}\text{C}$ -қа дейінгі кең диапазонда жұмыс істейді, бұл оларды кез келген климаттық жағдайда пайдалануға мүмкіндік береді. Топырақ pH датчиктері ± 0.1 pH дәлдікпен топырақтың қышқылдығын анықтауға көмектеседі, бұл тыңайтқыштарды жоспарлы енгізу үшін өте маңызды. Екіншіден, метеорологиялық сенсорлар, олар автоматты метеостанцияларға біріктіріледі. Бұл сенсорлар ауа температурасы мен ылғалдылығын ($\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ және $\pm 2\%$ дәлдікпен), желдің жылдамдығы мен бағытын, жауын-шашын мөлшерін, күн радиациясының деңгейін және атмосфералық қысымды бақылайды. Бұл деректер ауа райын болжау және ауыл шаруашылығы жұмыстарын жоспарлау үшін өте маңызды. Үшіншіден, биологиялық сенсорлар, олар тікелей өсімдіктердің параметрлерін өлшейді. Хлорофилл сенсорлары фотосинтетикалық белсенділікті бағалауға мүмкіндік береді, биомасса сенсорлары өсімдіктердің даму деңгейін анықтайды, ал спектралды сенсорлар өсімдіктердің жалпы жағдайын бағалайды. Жапырақ индексі сенсорлары жапырақ бетінің ауданын өлшеу арқылы өсімдіктің өнімділігін болжауға көмектеседі.

Барлық сенсорлық жүйелердің тиімді жұмыс істеуі үшін мәліметтерді беру протоколдары қолданылады. LoRaWAN технологиясы деректерді 15 км-ге дейінгі қашықтыққа жіберуге мүмкіндік береді, бұл ірі ауыл шаруашылығы кәсіпорындары үшін маңызды. Қашықтағы аймақтар үшін NB-IoT технологиясы пайдаланылады, ал үлкен көлемдегі деректерді тасымалдау үшін 4G/5G желілері қолданылады. MQTT протоколы құрылғылар арасындағы сенімді хабар алмасуды қамтамасыз етеді.

Жүйенің дәлдігі мен сенімділігіне ерекше назар аударылады. Барлық деректер көпдеңгейлі тексеруден өтеді, соның ішінде әртүрлі сенсорлар көрсеткіштерін салыстыру және жер үсті өлшеулерімен сәйкестігін тексеру. Үздіксіз жұмыс істеуін қамтамасыз ету үшін маңызды сенсорлар резервтеледі, күн панельдерінен тәуелсіз қуат беріледі, сондай-ақ байланыс жоғалған жағдайда деректер буферлік жадта сақталады.

Бұл сенсорлар жүйесі ауыл шаруашылығы кәсіпорнының цифрлық егізін қалыптастырады, оның көмегімен нақты уақыт режимінде дақылдардың жай-күйі мен қоршаған орта туралы дәл және өзекті ақпарат алуға болады. Бұл өндірісті тиімді басқаруға және ресурстарды оңтайлы пайдалануға мүмкіндік береді.

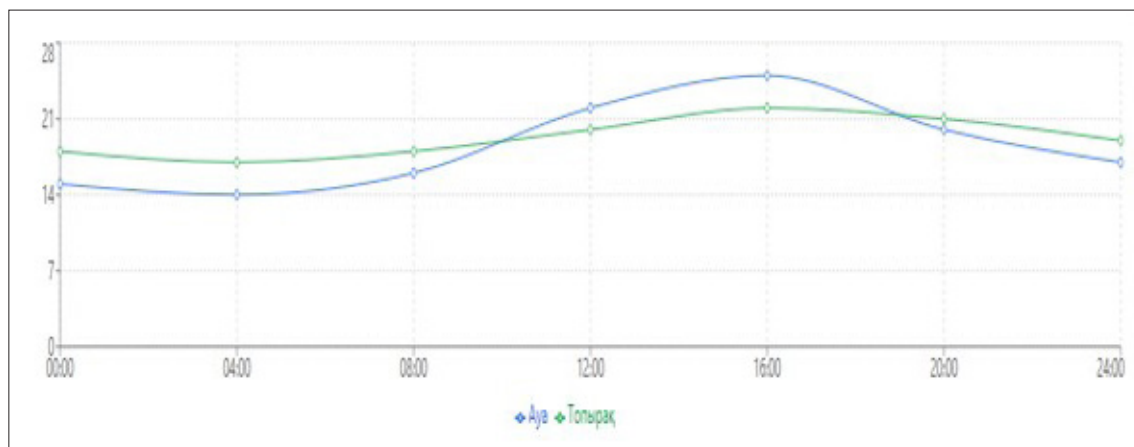
Бұл суретте (6-сурет) әртүрлі тереңдіктегі (10 см, 30 см және 50 см) топырақ ылғалдылығының тәуліктік өзгерісін көрсетеді [12]. Ылғалдылық пайызбен өлшенеді, ал X осі бірнеше сағаттық интервалдармен уақыт белгісін көрсетеді. Көріп тұрғанымыздай, 50 см тереңдіктегі ылғалдылық тұрақты болып қалады, ал 10 см тереңдікте көбірек өзгерістер байқалады. Күндіз ылғалдылық төмендеп, түскі уақытқа қарай минимумға жетеді, содан кейін кешке қарай біртіндеп қалпына келеді. Бұл күннің жылуының әсерінен топырақтың жоғарғы қабатынан ылғалдың булануымен байланысты болуы мүмкін.



Сурет 6 – Әр түрлі тереңдіктегі топырақ ылғалдылығы.

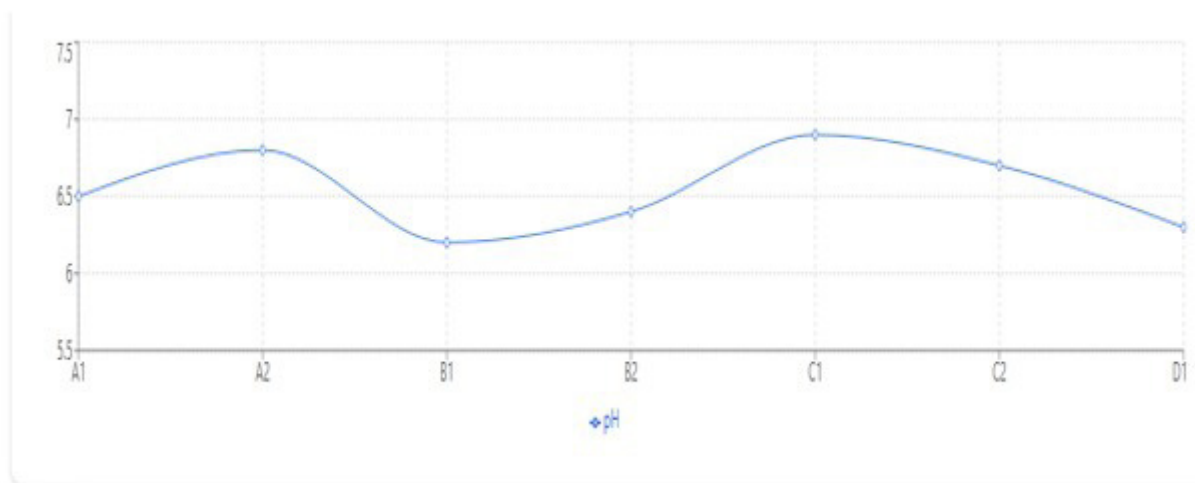
Ескерту: Сурет автормен құрастырылған

Бұл суретте (7-сурет) ауа мен топырақ температурасының тәуліктік өзгерісін көрсетеді. Көріп тұрғанымыздай, түнде ауа температурасы төмен болып, таңға қарай біртіндеп көтеріледі. Күндіз температура максималды мәніне жетіп, кешке қарай қайтадан төмендей бастайды. Топырақ температурасы ауаның температурасына қарағанда тұрақтырақ және кенет өзгерістерге азырақ ұшырайды. Күндіз ауа температурасы топырақ температурасынан жоғары болса, түнде керісінше топырақ жылуын баяу жоғалтып, жоғарырақ температураны сақтайды. Бұл табиғи жылу алмасу процесімен байланысты.



Сурет 7 – Ауа және топырақ температурасы.

Ескерту: Сурет автормен құрастырылған



Сурет 8 – Егістік участкелері бойынша топырақтың рН көрсеткіші.

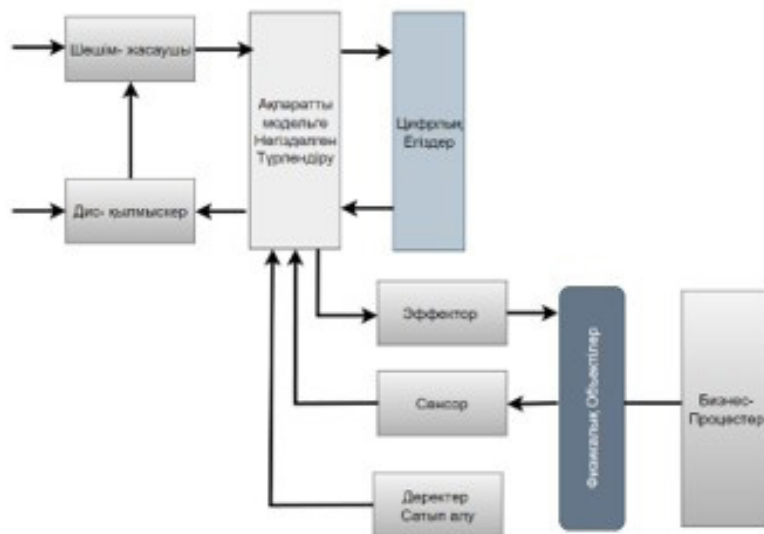
Ескерту: Сурет автормен құрастырылған

Бұл суретте (8-сурет) егістік участкелері бойынша топырақтың рН көрсеткішінің өзгерісін көрсетеді [13]. Әрбір белгіленген нүкте белгілі бір учаскедегі топырақтың қышқылдық немесе сілтілік деңгейін сипаттайды. Көріп тұрғанымыздай, кейбір учаскелерде рН мәні жоғары болса, кейбір жерлерде төмендеуі байқалады. Мысалы, А2 және С1 учаскелерінде рН деңгейі ең жоғары, ал В1 және D1 учаскелерінде ең төмен. Бұл топырақтың химиялық құрамының әртүрлілігіне немесе тыңайтқыштар мен сыртқы факторлардың әсеріне байланысты болуы мүмкін.

Цифрлық егіздер және басқару циклі

Цифрлық егіздер фермерлерге шаруашылық операцияларын ақпараттық аспектілерден физикалық ағындардан ажыратуға мүмкіндік береді. Басқару циклі объект жүйесінің жағдайын сенсор арқылы өлшеуден және қажетті деректерді алу процесінен басталады. Бұл деректер модель негізінде басқарылатын виртуалды үлгіге (meta model негізінде) айналады. Цифрлық егіз барлық қажетті ақпаратты қамтиды, бұл meta model-де анықталған басқару мақсаттарына байланысты. Виртуалды көрініс қажетсіз ақпаратты сүзгіден өткізіп, арнайы пайдаланушылар үшін (meta model негізінде) оңтайлы түрде ұсынылуы мүмкін. Шешім қабылдау функциясы виртуалды көріністі нақты басқару нормасымен салыстырады және ауытқулар үшін қажетті араласуды таңдайды. Ақырында, таңдаған араласу эффектор функциясымен немесе сандық егіз арқылы басқару жүйелері арқылы жүзеге асырылады.

Бұл суретте (9-сурет) цифрлық егіз жүйесінің күрделі жұмыс процесін көрсетеді. Сол жақта дискриминация мен шешім жасаушы блоктар орналасқан, олар ақпаратты модельге негізделген түрлендіру арқылы цифрлық егізге жібереді [14]. Жүйенің орталық бөлігі - физикалық объектілер, олар сенсорлар арқылы ақпарат жинап, эффекторлар арқылы әсер етеді. Бизнес-процестер деректерді сатып алу және басқару арқылы жүйенің жұмысын реттейді.



Сурет 9 – Цифрлық егіздерге негізделген басқару үшін концептуалды модель.

Ескерту: Сурет [1] дереккөзі негізінде автормен құрастырылған

Бұл суретте (10-сурет) әртүрлі шаруашылық түрлері бойынша инвестициялар мен жылдық үнемдеуді көрсетеді. Көк түспен инвестиция көлемі, ал жасыл түспен жылдық үнемдеу мөлшері бейнеленген. Көріп отырғанымыздай [15], ірі шаруашылықтарға салынған инвестициялар ең жоғары, сонымен қатар олардың жылдық үнемдеуі де басқа санаттарға қарағанда көп. Орта шаруашылықтарда инвестиция көлемі де, жылдық үнемдеу де орташа деңгейде. Шағын шаруашылықтарда инвестиция көлемі ең төмен, ал жылдық үнемдеу де аз. Бұл шаруашылықтың ауқымы ұлғайған сайын инвестиция көлемі мен үнемдеу мүмкіндігі де арта түсетінін көрсетеді.



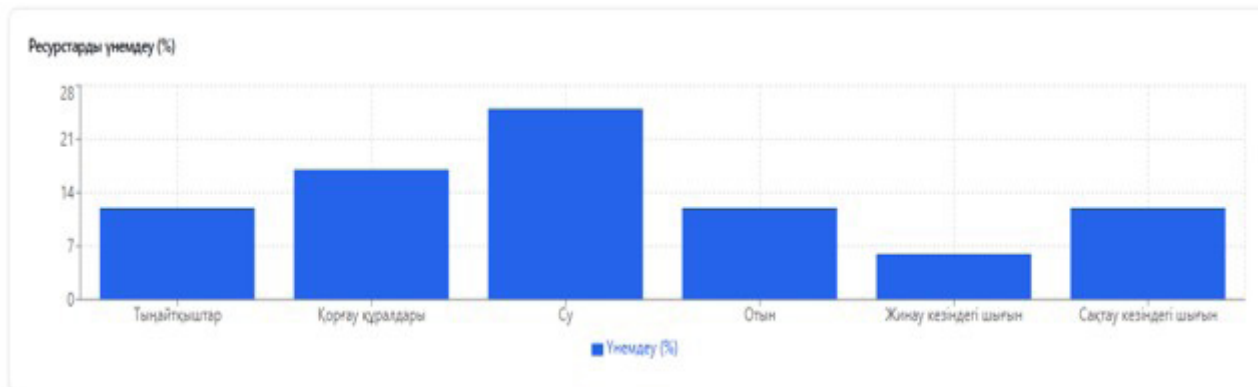
Сурет 10 – Шаруашылық түрлері бойынша инвестициялар мен жылдық үнемдеу.

Ескерту: Сурет автормен құрастырылған

Бұл суретте (11-суретте) әртүрлі ресурстарды үнемдеу пайызын көрсетеді. Берілген мәліметтерге сәйкес, ең жоғары үнемдеу суды пайдалануда байқалады, бұл оның шығынын азайтуға баса назар аударылатынын көрсетеді [16]. Қорғау құралдары мен тыңайтқыштарды үнемдеу де айтарлықтай деңгейде. Отын мен сақтау кезіндегі шығындарды үнемдеу орташа деңгейде болса, жинау кезіндегі шығындарды үнемдеу ең төмен көрсеткішке ие. Бұл әртүрлі ресурстарды пайдалану кезінде үнемдеу мүмкіндіктерінің әртүрлі болатынын және қай салаларда оңтайландыру қажеттігін көрсетеді.

Құрастырылған бақылау моделі алты санаттағы Цифрлық егіздерді біріктіреді, олар иммитивті, қазіргі, болашақ және өткен сандық объектілерді қамтиды. Иммитивті объектілер болашақ виртуалды объектілерді бейнелейді, қазіргі объектілер – нақты физикалық объектілердің күйі мен мінез-құлқын, болашақ объектілер – болашақ жағдайларды және өткен объектілер тарихи күй мен мінез-құлқын білдіреді.

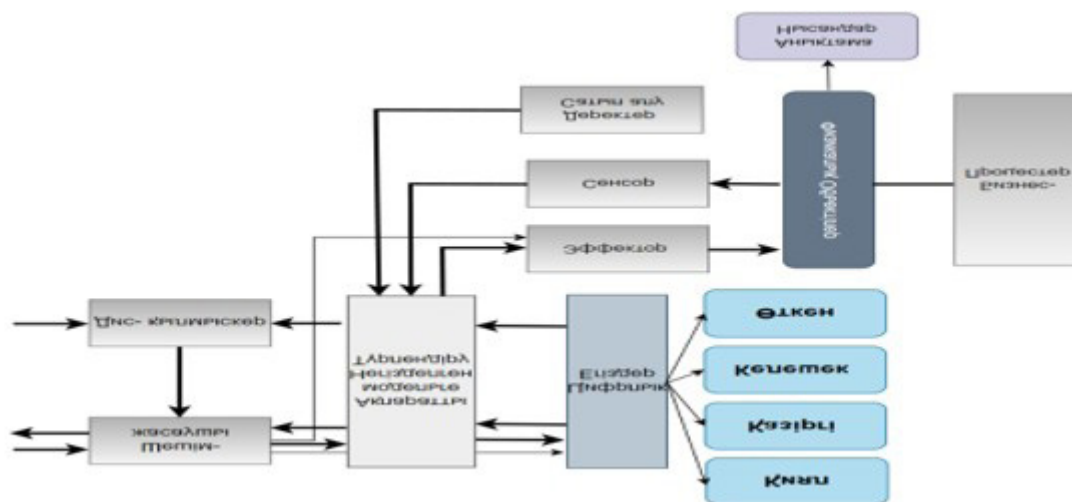
Сонымен қатар, шеберлік объектісі қосылады, ол концептуалды бірліктерді бейнелейді, нақты физикалық объектілермен байланыстырылып, виртуалды түрде сақталатын өмірлік циклды қамтиды.



Сурет 11 – Ресурстарды үнемдеу көрсеткіштері.

Ескерту: Сурет автормен құрастырылған

Бұл суретте (12-сурет) цифрлық егіздің толық жұмыс процесін көрсетеді. Орталық бөлігінде ақпаратты модельге негізделген түрлендіру жүйесі орналасқан, ол сенсорлар мен эффекторлар арқылы физикалық объектілермен байланысады [9]. Цифрлық егіз төрт түрге бөлінеді: қиял, қазіргі, келешек және өткен. Бизнес-процестер мен анықтама нұсқаулар жүйенің жұмысын реттейді. Дисквалмыскер мен шешім жасаушы блоктар арқылы жүйені басқару жүзеге асырылады.



Сурет 12 – Құрастырылған бақылау моделі үшін Цифрлық егіздер.

Ескерту: Сурет автормен құрастырылған

Ақырында, шешім қабылдаушы функция мен Цифрлық егіздердің арасындағы интерактивтілік талқыланады. Прескриптивті Цифрлық егіздер арқылы ұсынылған араласулар болашақ Цифрлық егіздерге айналады, ал шешім қабылдаушы бұл модельденген араласуларды соңғы шешім қабылдау үшін пайдаланады. Автономды Цифрлық егіздер бұл араласуды жоспарланған объектіге және әрекет етуші нұсқауларға түрлендіреді. Қазіргі уақытта Цифрлық егіздер мен оның күрделілігі анықталды. Келесі бөлімде осы концепцияны іске асыруға арналған техникалық модель ұсынылады.

Іске асыру моделі

Бұл бөлімде Цифрлық егіздерді іске асыру үшін техникалық модель ұсынылады. Техникалық архитектура жүйенің компоненттерін, олардың арасындағы әрекеттерді және жүйенің жалпы ортадағы

әрекеттерін сипаттайды. Қазіргі уақытта Цифрлық егіздер үшін бірнеше техникалық архитектуралар ұсынылған. [17] абстрактілі реферат архитектурасын ұсынды, ол физикалық және виртуалды әлем қасиеттерін қамтиды. Cloud-based кибер-физикалық [18] жүйелер үшін аналитикалық сипаттамаларға ие архитектураны әзірледі. [19] өндірістік жүйелерге арналған алты қабаттан тұратын архитектураны ұсынды. Қазіргі зерттеу үшін IoT-А рефераттық архитектурасы қабылданды, өйткені ол виртуалды ұғымдарды нақты анықтайды. Осы бөлімде IoT-А рефераттық архитектурасы және оны іске асыруды қолдайтын компоненттер көрсетіледі.

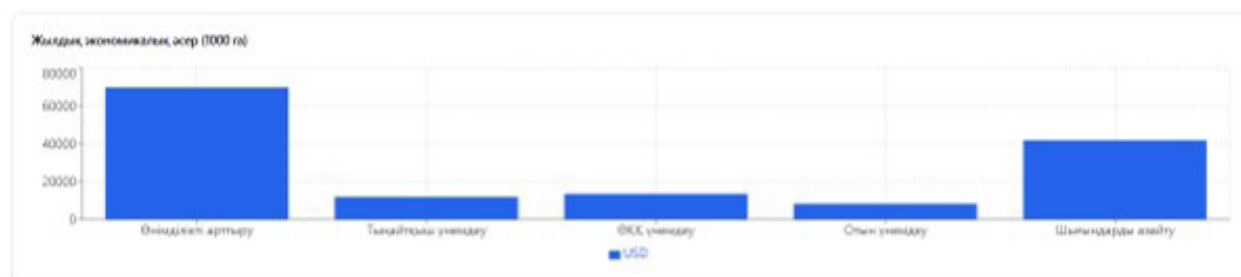
Бұл суретте (13-сурет) инвестициялардың құрылымын (1000 га базалық жиынтық) пайыздық қатынаста көрсетеді [15]. Ең үлкен инвестиция көлемі нақты егіншілік жүйелеріне (35 000) бағытталған, бұл ауыл шаруашылығында технологияларды енгізудің маңыздылығын көрсетеді. Одан кейінгі орындарды IT-инфрақұрылым (25 000) және мониторинг жүйелері (19 000) алады, бұл сандық бақылау мен автоматтандыруға басымдық берілетінін білдіреді. БҚ және лицензиялар (10 000) мен оқыту және кеңес беру (7 000) инвестициялары салыстырмалы түрде аз болса да, олар инновацияларды тиімді енгізу үшін маңызды рөл атқарады. Жалпы, график ауыл шаруашылығында технологияларды дамыту мен цифрландыруға баса назар аударылатынын көрсетеді.



Сурет 13 – Инвестициялар құрылымы.

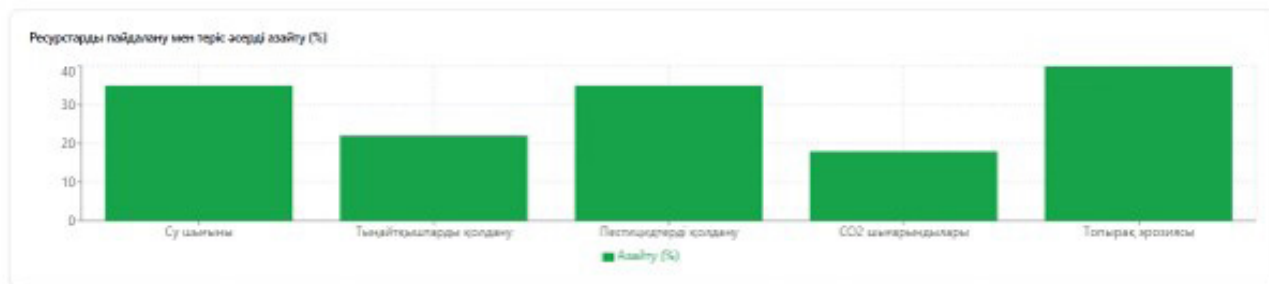
Ескерту: Сурет автормен құрастырылған

Бұл суретте (14-сурет) жылдық экономикалық әсердің негізгі факторларын (1000 га) көрсетеді [20]. Ең үлкен экономикалық пайда өнімділікті арттырудан байқалады, бұл инвестициялардың негізгі мақсаты өнім көлемін көбейту екенін көрсетеді. Шығындарды азайту да елеулі әсерге ие, бұл өндіріс тиімділігін арттыруға бағытталғанын білдіреді. Тыңайтқыш үнемдеу, БҚК (биологиялық қорғау құралдары) үнемдеу және отын үнемдеу экономикалық әсері жағынан салыстырмалы түрде төмен. Жалпы, график ауыл шаруашылығында қаржылық тиімділікті арттыру үшін негізгі бағыттардың өнімділік пен шығындарды оңтайландыруға негізделгенін көрсетеді.



Сурет 14 – Жылдық экономикалық әсер.

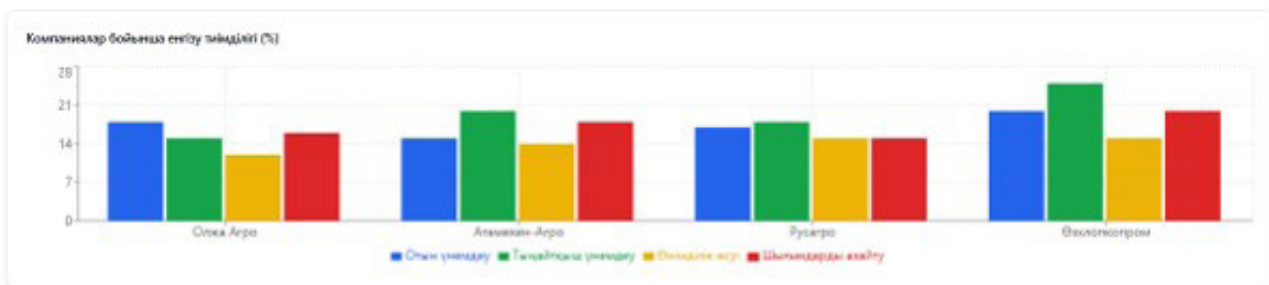
Ескерту: Сурет автормен құрастырылған



Сурет 15 – Шаруашылық көлеміне байланысты инвестициялар мен жылдық әсер.

Ескерту: Сурет автормен құрастырылған

Бұл суретте (15-сурет) шаруашылық көлемі бойынша инвестициялар мен жылдық экономикалық әсердің арақатынасын көрсетеді [16]. Қызыл түспен инвестиция көлемі, ал жасыл түспен жылдық экономикалық әсер бейнеленген. Көріп отырғанымыздай, шаруашылық көлемі ұлғайған сайын инвестиция мөлшері де артады, бірақ жылдық экономикалық әсер одан да қарқынды өседі. Ірі шаруашылықтар (10 000 га) ең жоғары инвестицияны талап етсе де, олардың жылдық экономикалық пайдасы айтарлықтай үлкен. Орта шаруашылықтарда (3000 га) бұл көрсеткіш орташа деңгейде, ал шағын шаруашылықтарда (1000 га) инвестиция мен пайда ең төменгі деңгейде. Бұл ірі шаруашылықтардың инвестицияларды тиімдірек пайдаланып, жоғары қайтарым алатынын көрсетеді.



Сурет 16 – Ресурстарды пайдалану мен теріс әсерді азайтуды.

Ескерту: Сурет автормен құрастырылған

Бұл суретте (16-сурет) ресурстарды пайдалану мен олардың қоршаған ортаға теріс әсерін азайтуды пайыздық көрсеткіштер арқылы сипаттайды [1]. Ең жоғары азаю топырақ эрозиясы мен су шығынында байқалады, бұл ресурстарды ұтымды пайдалану шараларының тиімділігін көрсетеді. Тыңайтқыштар мен пестицидтерді қолдану да төмендеп, ауыл шаруашылығының экологиялық тұрақтылығын арттыруға ықпал етеді. CO2 шығарындарының азаюы басқа көрсеткіштерге қарағанда төмен болғанымен, бұл да экологиялық әсерді азайту үшін маңызды қадам болып табылады. Жалпы, график ауыл шаруашылығында ресурстарды тиімді пайдалану мен қоршаған ортаға тигізетін зиянды төмендетуге бағытталған шаралардың әсерін көрсетеді.

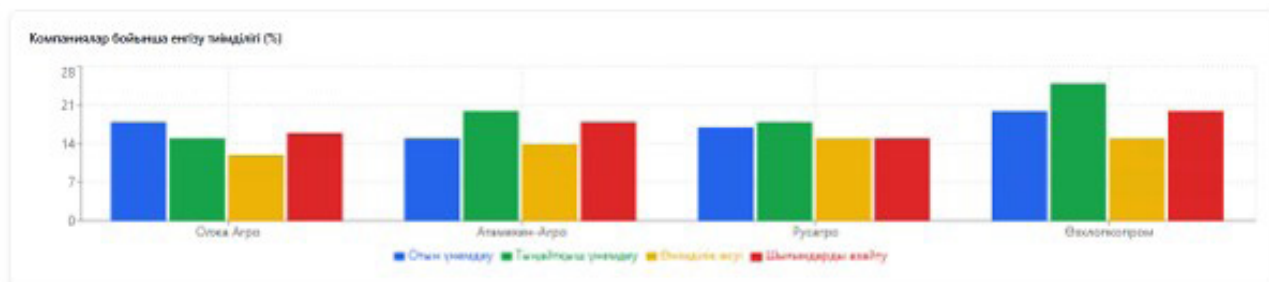
Цифрлық Twin іске асыру моделі

Digital Twin архитектурасы нақты кеңістіктегі физикалық объектіден, оның виртуалды бейнесінен және деректермен алмасуды басқару үшін байланыстан тұрады. Digital Twin жүйесі сегіз қабаттан тұрады: құрылғы, коммуникациялық, IoT қызметтері және Digital Twin басқару қабаттары. Әрбір қабат белгілі бір функцияларды орындайды: физикалық объектілермен тікелей өзара әрекеттесу, байланыс басқару, қызметтерді басқару және виртуалды бірліктерді басқару. Құрылғы қабаты физикалық объектілермен тікелей өзара әрекеттесу үшін қажет аппараттық құралдарды: бірегей идентификация

үшін тегтер, сенсорлар мен орындаушыларды қамтамасыз етеді. Ауыл шаруашылығында қолданылатын негізгі сәйкестендіру технологиялары, мысалы, штрих-кодтар мен RFID тегтері, физикалық объектілердің динамикалық қасиеттерін өлшеу үшін түрлі сенсорлар, соның ішінде температура, ылғалдылық, CO₂ және pH мәндері қолданылады. Сонымен қатар, бұл қабат ұшқышсыз ұшу аппараттары мен қашықтан басқарылатын платформаларды қамтиды, бұл фермерлерге қашықтан сезу мен басқару мүмкіндіктерін береді. Коммуникациялық қабат құрылғылар арасындағы өзара әрекеттестікті басқаруды және құрылғылардан IoT қызметтеріне дейінгі байланысты қамтамасыз етеді. Ол желілерді, деректерді тасымалдауды және әртүрлі желілік ортада соңынан-соңына байланыс мүмкіндігін қамтамасыз етеді. IoT қызметтер қабаты IoT қызметтерін табу, іздеу және атауларды шешу үшін қажетті функцияларды қамтиды. Бұл қабат сенсор құрылғысынан алынған ақпаратты өңдеу және бақылау құрылғысына деректер жеткізу үшін қолданылады. Digital Twin Management қабаты виртуалды бірліктер арқылы IoT жүйесімен өзара әрекеттесуді қамтамасыз етеді. Ол Digital Twin туралы барлық ақпаратты жинап, сенсорлардан, деректер базаларынан немесе қосымшалардан алуды қамтамасыз етеді. Сонымен қатар, физикалық объектілермен байланыстарды басқару және олардың күйін бақылау үшін қажетті барлық функционалдылықтарды ұсынады. IoT процесін басқару қабаты IoT-aware процестерді модельдеу мен іске асыру үшін орта ұсынады. Бұл процесс модельдері IoT қызметтерін пайдалану арқылы орталықтарға орналастырылады және Қызмет көрсету ұйымы қабатында үйлестіріледі. Қабат коммуникациялық хаб рөлін атқарып, әртүрлі абстракцияларды біріктіреді. Қауіпсіздік қабаты жүйелер мен пайдаланушылардың қауіпсіздігі мен құпиялылығын қамтамасыз етеді. Ол авторизация, аутентификация және сәйкестендіру басқармасын қамтиды. Басқару қабаты жүйені конфигурациялау және күйін анықтау мәселелерімен айналысады, ақауларды анықтап, жалпы күйін баяндайды. Қолданба қабаты виртуалды объектілерге негізделген нақты басқару тапсырмалары үшін интеллект ұсынады. Бұл қабат Digital Twins-тің өмірлік циклін пайдалану мүмкіндіктерін қамтиды, оның ішінде симуляция, оптимизация, статистикалық болжам, машиналық оқыту және пайдаланушы интерфейстері (2D және 3D).

5. Digital Twins-ті ақылды ауыл шаруашылығында қолдану

Құрылғылар қабаты нақты салаға бағытталған датчиктерді және үш жағдайда нақты орындаушыларды пайдаланады. Техникалық байланыс технологиялары сымдық желілердің стандартталған протоколдары мен соңғы жылдардағы LoRaNet сияқты сымсыз IoT желілерін қамтиды. «Бақытты сиыр» жағдайы бірнеше километрге дейін байланысқа мүмкіндік беретін теңшелген желіні қолданады. IoT қызметтер қабаты әртүрлі технологияларды біріктіреді, бірақ процесс негізіндегі оркестрация әзірге қарастырылмаған. Digital Twin Management қабатында құралдар әртүрлі дерек көздерінен жинақталған деректерді біріктіріп, үйлестірілген виртуалды бірліктерді бейнелейді. Бұл симуляция және шешім қабылдау үшін интеллектті қамтамасыз етеді. Қолданба қабатында барлық қолдану жағдайлары пайдаланушылармен өзара әрекеттесу үшін арнайы панельдер ұсынады. Кейбір қолдану жағдайлары ферма басқару жүйелерімен интеграцияланған. Қызметті ұйымдастыру, қауіпсіздік және басқару үшін жалпы техникалық функциялар қолданылады.



Сурет 17 – Компаниялар бойынша енгізу тиімділігі.

Ескерту: Сурет автормен құрастырылған

Бұл суретте (17-сурет) әртүрлі компаниялар бойынша егіншіліктің тиімділік көрсеткіштерін салыстырады [20]. Тиімділік отын үнемдеу (көк), тыңайтқыш үнемдеу (жасыл), өнімділік өсуі (сары) және шығындарды азайту (қызыл) секілді параметрлер арқылы бағаланған. "Өзхлопкопром" компаниясында тыңайтқыш үнемдеу көрсеткіші ең жоғары, ал басқа компанияларда көрсеткіштер салыстырмалы түрде тең. "Атамекен-Агро" және "Олжа Агро" компанияларында отын үнемдеу мен шығындарды азайту көрсеткіштері жақын мәндерге ие. Жалпы, барлық компанияларда тиімділік көрсеткіштері салыстырмалы түрде тең таралған, бірақ кейбір бағыттарда айырмашылықтар бар.

Қазақстандық компаниялар туралы қосымша ақпарат:

"Олжа Агро" (Ақмола облысы) - 250,000 га алқапта цифрлық егіздерді сәтті қолданады. Компания John Deere метеостанцияларын және 80 техника бірлігінде нақты егіншілік жүйелерін енгізген.

"Атамекен-Агро" (Солтүстік Қазақстан облысы) - 120,000 га жерде DJI дрондарын және RTK-навигациясын қолданады. Тыңайтқыштарды нақты енгізу жүйесі арқылы 20% үнемдеуге қол жеткізді.

Ресей компаниялары:

"Русагро" - 600,000 га алқапта өзіндік өндірісті басқару платформасын қолданады. Қант қызылшасының өнімділігін 8%-ға арттырған.

"Мираторг" - 1,000,000 га алқапта мал шаруашылығы кешендерінің цифрлық егіздерін енгізген. Жем-шөп конверсиясын 12%-ға жақсартқан.

Өзбекстан:

"Өзхлопкопром" - 10,000 га алқапта IoT-басқарылатын тамшылатып суару жүйесін енгізген. Су шығынын 40%-ға азайтып, мақта өнімділігін 15%-ға арттырған.

Қырғызстан:

"Ыстықкөл" агрокластері - 5,000 га алқапта автоматтандырылған жылыжайлар мен тамшылатып суару жүйелерін қолданады. Көкөніс өнімділігін 30%-ға арттырып, пестицидтер қолдануды 20%-ға азайтқан.

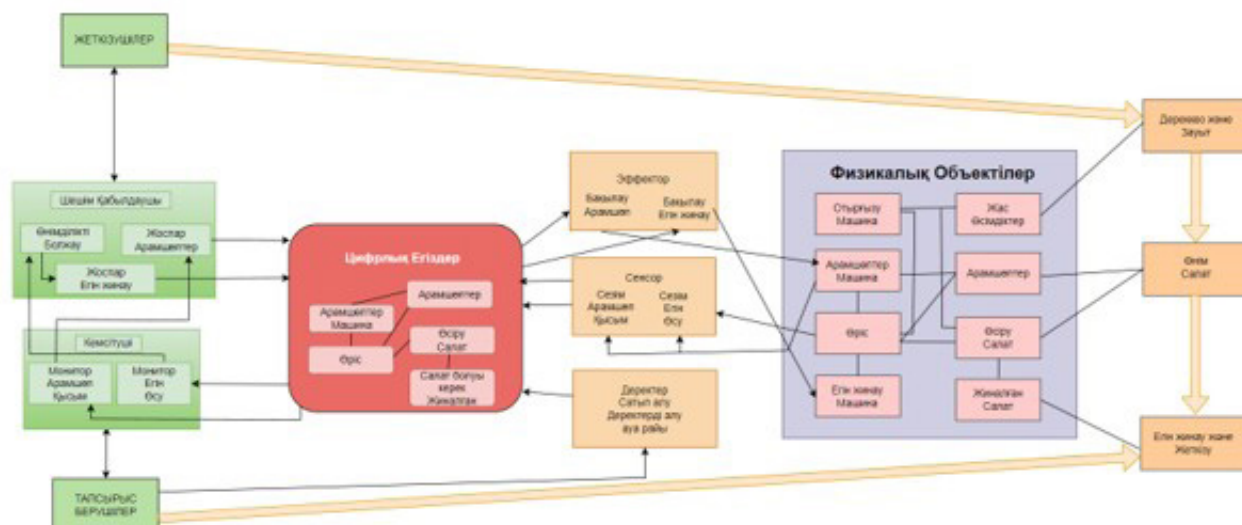
Жалпы, графиктер мен мысалдар көрсеткендей, цифрлық егіздерді енгізу ауыл шаруашылығында ресурстарды үнемдеу, өнімділікті арттыру және шығындарды азайту бойынша айтарлықтай нәтижелер береді. Аймақтық ерекшеліктерге қарамастан, барлық компаниялар тұрақты оң динамика көрсетеді.

«Қосымша құнды арамшөп деректері» қолдану жағдайына шолу

Органикалық көкөністер өсіру кезінде арамшөптерді тазалау егін сапасы мен өнімділігін бақылау үшін маңызды міндеттердің бірі болып табылады (Lockeretz, 2007). Жаңа технологиялар, атап айтқанда автоматтандырылған жол аралық арамшөптерді тазалау машиналары, арамшөптерді тазалау процесін едәуір жеңілдетті. Бұл машиналар арамшөптерді жою үшін машиналық көру қолданбаларын пайдаланады, бұл тек арамшөптерді тазалауды автоматтандыруға ғана емес, сонымен қатар ферма басқару үшін құнды деректерді жинауға мүмкіндік береді. Digital Twins бұл жағдайларда арамшөп жоятын машинаның орналасу деректерін пайдаланып, шөптердің таралуын, өсімдіктердің мәртебесін және ең жақсы жинау уақытын түсіну үшін жасалады. Осылайша, арамшөптердің, өсімдіктердің және егін алқаптарының Digital Twins-і егіннің өсуін бақылау және салат дақылдарының салмағы мен көлемін болжау үшін қолданылып, тиімді ферма басқаруға мүмкіндік береді.

Басқару моделін қолдану.

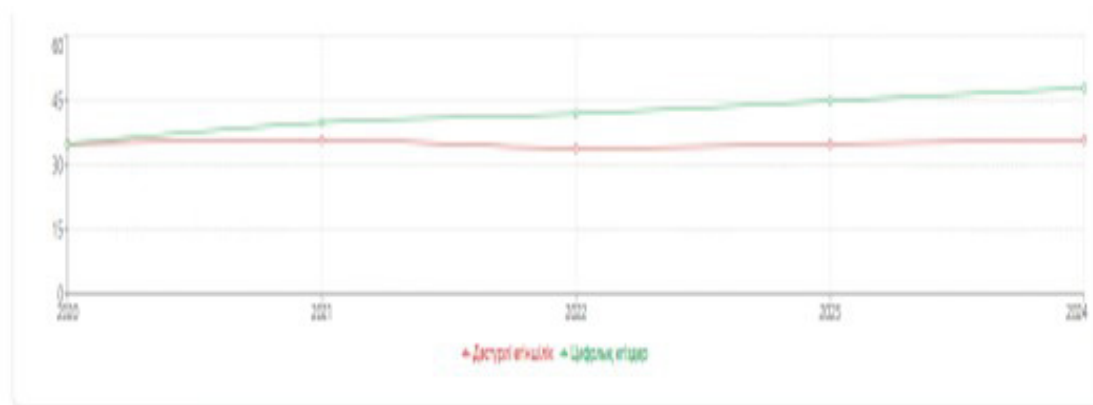
«Қосымша құнды арамшөп деректері» қолдану жағдайының қолданылған басқару моделі 22-суретте көрсетілген. Негізгі ауыл шаруашылығы процестері – жас салат өсімдіктерін жеткізу және отырғызу, салатты алқапта өсіру, тұтынуға дайын салатты жинау және оны нарыққа жеткізу. Қатысатын негізгі физикалық объектілер – отырғызу машиналары мен жас өсімдіктер, арамшөптер мен өсіп келе жатқан салаттары бар алқаптар, арамшөптерді тазалайтын машиналар, жинау машиналары және жиналған салаттар.



Сурет 18 – Егіс айналымының қарапайым моделі.

Ескерту: Сурет автормен құрастырылған

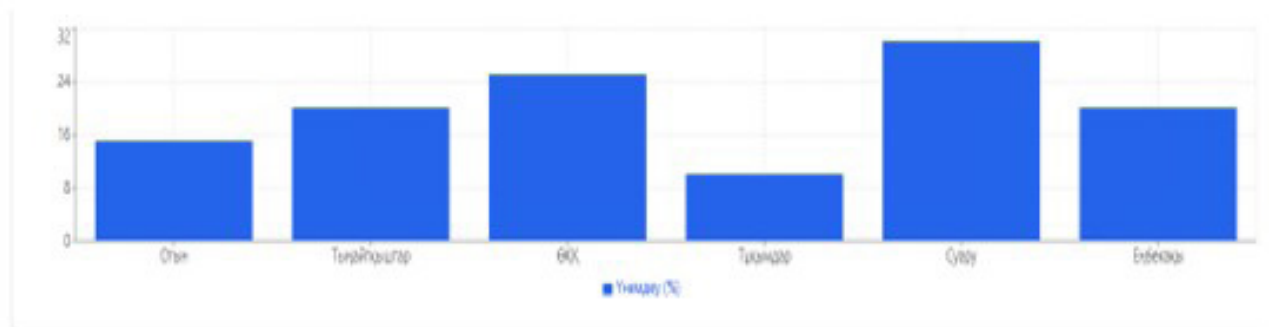
Бұл суретте (18-сурет) қолдану жағдайында Цифрлық Егіздер арамшөптердің қысымын бақылау, дақылдардың өсуін басқару және жинау уақытын болжау үшін пайдаланылады. Сенсорлық камера кескіндері арқылы дақылдар параметрлері есептеледі, ал жергілікті климаттық деректер мен дала сипаттамалары (температура, ылғалдылық, күн радиациясы) қосылады. Цифрлық Твиндер негізінен дала карталарын виртуализациялау үшін пайдаланылады, бұл арамшөптердің тығыздығы мен дақылдардың санын қамтиды. Арамшөптерді жою және жинау жоспарланатын дәлдікті қамтамасыз ету үшін Цифрлық Твиндер автоматтандырылған түрде пайдаланылады, операторлық қолдаумен немесе қашықтан фермерлердің бақылауымен жүзеге асады.



Сурет 19 – Өнімділік динамикасы.

Ескерту: Сурет автормен құрастырылған

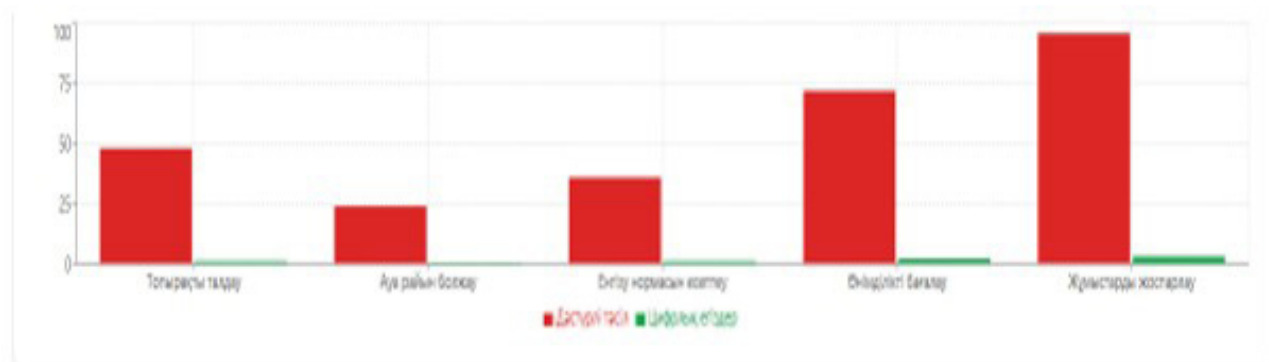
Бұл суретте (19-сурет) дәстүрлі және цифрлық егіншіліктің өнімділік динамикасын (ц/га) 2020-2024 жылдар аралығында салыстырады [13]. Көріп отырғанымыздай, екі әдісте де өнімділік жыл сайын біртіндеп артып келеді. Дегенмен, цифрлық егіншіліктің өнімділік көрсеткіші дәстүрлі егіншілікке қарағанда жоғарырақ. Бұл цифрлық технологияларды қолданудың ауыл шаруашылығында өнімділікті арттыруға оң әсер ететінін көрсетеді. Жалпы, цифрлық егіншіліктің енгізілуі уақыт өте келе дәстүрлі әдістерге қарағанда тиімдірек болатынын дәлелдейді.



Сурет 20 – Санаттар бойынша шығындарды азайту.

Ескерту: Сурет автормен құрастырылған

Бұл суретте (20-сурет) әртүрлі салалар бойынша шығындарды азайтудың пайыздық көрсеткішін көрсетеді [14]. Суару шығындарын үнемдеу ең жоғары деңгейде, бұл суды тиімді пайдалану шараларының маңыздылығын көрсетеді. Биологиялық қорғау құралдары (БҚК) мен тыңайтқыштарды үнемдеу де айтарлықтай жоғары, бұл ауыл шаруашылығында ресурстарды оңтайлы қолдану қажеттілігін көрсетеді. Отын мен еңбекші шығындарын үнемдеу орташа деңгейде болса, тұқым шығынын азайту көрсеткіші ең төмен. Жалпы, график ресурстарды басқару мен шығындарды төмендетудің ауыл шаруашылығы тиімділігіне тигізетін оң әсерін көрсетеді.



Сурет 21 – Деректерді өңдеу уақыты.

Ескерту: Сурет автормен құрастырылған

Бұл суретте (21-сурет) дәстүрлі әдістер мен цифрлық егіншіліктің деректерді өңдеу уақытының айырмашылығын (сағатпен) көрсетеді [12]. Дәстүрлі тәсілдерде (қызыл) деректерді өңдеу уақыты барлық процестер үшін едәуір ұзақ, әсіресе жұмыстарды жоспарлау, өнімділікті бағалау және топырақты талдау барысында. Ал цифрлық егіншілікте (жасыл) барлық процестер айтарлықтай жылдам жүзеге асады, себебі автоматтандыру мен деректерді нақты уақыт режимінде өңдеу мүмкіндігі бар. Бұл цифрлық технологияларды енгізу еңбек өнімділігін арттырып, шешім қабылдау уақытын қысқартатынын көрсетеді. Жалпы, цифрлық егіншілік дәстүрлі әдістерге қарағанда едәуір тиімді екені байқалады.

АЛЫНҒАН НӘТИЖЕЛЕР



Сурет 22 – Цифрлық егіздерді енгізу кезеңдерінің таралуы
Ескерту: Сурет автормен құрастырылған

```
import React from 'react';
import { PieChart, Pie, Cell, Tooltip, Legend } from 'recharts';

const ImplementationStages = () => {
  const data = [
    { name: 'Доментті талдау', value: 30 },
    { name: 'Негіздеме дизайны', value: 40 },
    { name: 'Кейстік зерттеулер', value: 30 }
  ];

  const COLORS = ['#0082c2', '#ffc000', '#8da0cb'];

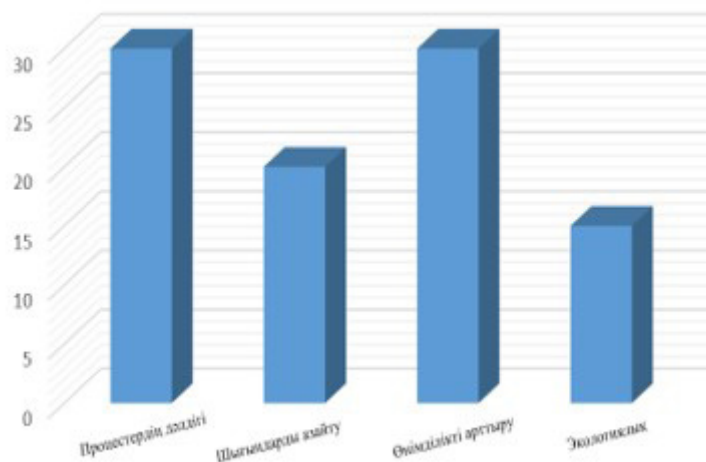
  const renderLabel = ({ cx, cy, midAngle, innerRadius, outerRadius, percent }) => {
    const radius = innerRadius + (outerRadius - innerRadius) * 0.5;
    const x = cx + radius * Math.cos(-midAngle * Math.PI / 180);
    const y = cy + radius * Math.sin(-midAngle * Math.PI / 180);
    return ` ${(percent * 100).toFixed(1)}%`;
  };

  return (
    <div className="w-full h-96 flex justify-center items-center">
      <PieChart width={400} height={400}>
        <Pie
          data={data}
          dataKey="value"
          nameKey="name"
          cx="50%"
          cy="50%"
          outerRadius={150}
          label={renderLabel}
        />
        {data.map((entry, index) => {
          <Cell key={`cell-${index}`} fill={COLORS[index % COLORS.length]} />
        })}
      </Pie>
      <Tooltip />
      <Legend />
    </PieChart>
  </div>
  );
};

export default ImplementationStages;
```

Сурет 23 – Цифрлық егіздерді енгізу кезеңдерінің таралу коды.
Ескерту: Сурет автормен құрастырылған

Цифрлық егіздерді енгізу (22-сурет) үш негізгі кезеңнен тұрады: домендік талдау, негіздеме дизайн және кейстік зерттеулер. Домендік талдау (30%) кезеңінде облыстың ерекшеліктері зерттеліп, мәліметтер жиналады. Бұл қадамда негізгі типология мен анықтамалар анықталады. Негіздеме дизайн (40%) ең көп уақыт алатын кезең болып табылады, себебі бұл жерде концепцияны жобалау және архитектура құрылады. Соңғы кезең – кейстік зерттеулер (30%), мұнда концепция нақты мысалдарда тексеріліп, енгізілу тиімділігі бағаланады. Әр кезең бір-бірімен тығыз байланысты және барлық процестің сәттілігін қамтамасыз етеді.



Сурет 24 – Цифрлық егіздерді енгізу нәтижелері
Ескерту: Сурет автормен құрастырылған

```
import React from 'react';
import { BarChart, Bar, XAxis, YAxis, CartesianGrid, Tooltip, Legend } from 'recharts';

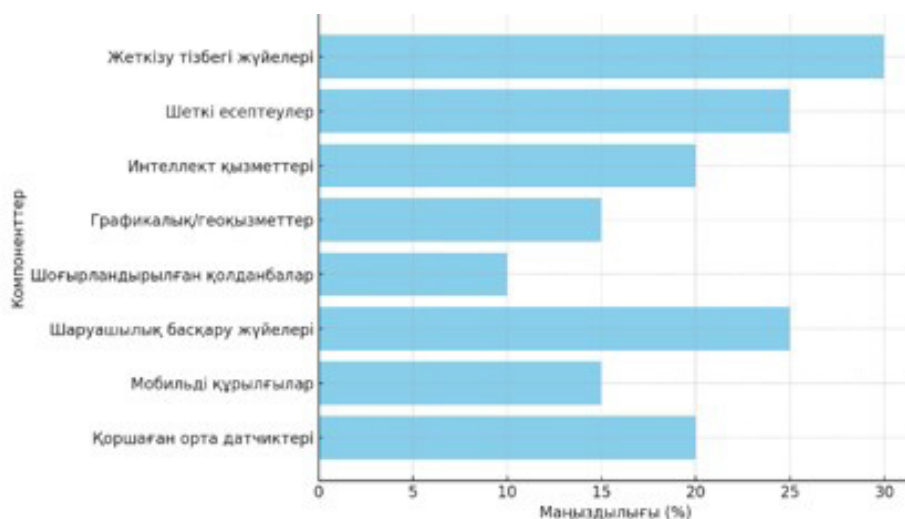
const ImplementationResults = () => {
  const data = [
    { name: 'Проекттердің дизайні', value: 30, color: '#66c2c5' },
    { name: 'Шығарымды жасау', value: 25, color: '#f08080' },
    { name: 'Өнімділікті арттыру', value: 30, color: '#40d0d0' },
    { name: 'Экономиканы', value: 15, color: '#e78ac3' }
  ];

  return (
    <div className="w-full h-96 p-4">
      <BarChart
        width={600}
        height={400}
        data={data}
        margin={{ top: 20, right: 30, left: 20, bottom: 50 }}
      >
        <CartesianGrid strokeDasharray="3 3" />
        <XAxis
          dataKey="name"
          angle={15}
          textAnchor="start"
          height={60}
          interval={8}
        />
        <YAxis label={{ value: 'Әлеуметтік', angle: -90, position: 'insideLeft' }} />
        <Tooltip />
        <Bar dataKey="value">
          {data.map((entry, index) => (
            <Cell key={`cell-${index}`} fill={entry.color} />
          ))}
        </Bar>
      </BarChart>
    </div>
  );
};

export default ImplementationResults;
```

Сурет 25 – Цифрлық егіздерді енгізу нәтижелерінің коды.
Ескерту: Сурет автормен құрастырылған

Цифрлық егіздерді қолдану (24-сурет) бірнеше маңызды нәтижелер береді. Біріншіден, процесстердің дәлдігі (30%) артады, бұл бақылау мен басқаруды жақсартады. Екіншіден, шығындарды азайту (25%) арқылы ресурстар үнемделеді. Сонымен қатар, өнімділікті арттыру (30%) цифрлық егіздердің ең басты артықшылықтарының бірі болып табылады. Экологиялылық (15%) нәтижесінде қоршаған ортаға әсер азайып, тұрақты даму қағидалары сақталады. Бұл нәтижелер цифрлық егіздерді енгізудің тиімділігін көрсетеді.



Сурет 26 – Цифрлық егіздің компоненттері

Ескерту: Сурет автормен құрастырылған

```
import React from 'react';
import { BarChart, Bar, XAxis, YAxis, CartesianGrid, Tooltip, Legend } from 'recharts';

const DigitalTwinComponents = () => {
  const data = [
    { name: 'Қоршаған орта датчиктері', value: 20 },
    { name: 'Мобильді құрылғылар', value: 15 },
    { name: 'Шаруашылық басқару жүйелері', value: 25 },
    { name: 'Шоғырландырылған қолданбалар', value: 10 },
    { name: 'Графикалық/геоқызметтер', value: 15 },
    { name: 'Интеллект қызметтері', value: 20 },
    { name: 'Шеткі есептеулер', value: 25 },
    { name: 'Жеткізу тізбегі жүйелері', value: 30 }
  ];

  return (
    <div className="w-full h-96 p-4">
      <BarChart
        layout="vertical"
        width={800}
        height={400}
        data={data}
        margin={{ top: 20, right: 30, left: 200, bottom: 5 }}
      >
        <CartesianGrid strokeDasharray="3 3" />
        <XAxis type="number" label={{ value: 'Маңыздылығы (%)', position: 'bottom' }} />
        <YAxis dataKey="name" type="category" />
        <Tooltip />
        <Bar dataKey="value" fill="#007CE8" />
      </BarChart>
    </div>
  );
};

export default DigitalTwinComponents;
```

Сурет 27 – Цифрлық егіздің компоненттерінің коды.

Ескерту: Сурет автормен құрастырылған

Цифрлық егіздің әртүрлі компоненттерінің маңыздылығы пайызбен көрсетілген. Графиктен көріп отырғанымыздай, жеткізу тізбегі жүйелері ең жоғары маңыздылыққа (30%) ие, ал шеткі есептеулер екінші орында (25%). Шоғырландырылған қолданбалар ең төменгі маңыздылыққа (10%) ие екенін көреміз

Талқылау

Цифрлық егіздер ауыл шаруашылығындағы процестерді басқарудың тиімді шешімі ретінде танылу-да. Олар нақты объектілердің виртуалды көшірмесін жасап, олардың жұмысын бақылауға, модельдеуге және болжауға мүмкіндік береді. Еуропаның IoF2020 жобасы цифрлық егіздерді егін шаруашылығы, сүт өндірісі, жылыжай көкөніс өсіру және мал шаруашылығында қолданудың артықшылықтарын дәлелдеді. Зерттеуде бұл технологиялардың шығындарды азайтып, өндіріс тиімділігін арттыратыны көрсетілді. Мысалы, су ресурстарын пайдалану 40%-ға дейін азайтылса, тыңайтқыштар шығыны 20%-ға оңтайландырылды. Сенсорлық жүйелер арқылы нақты уақыттағы деректерді жинау және талдау процестерді басқарудағы дәлдікті арттырады. Цифрлық егіздер фермерлерге қашықтан басқару мүмкіндігін беріп, жергілікті бақылау қажеттілігін төмендетеді. Бұл әдіс табиғи ресурстарды тиімді пайдаланып, экологиялық тұрақтылықты қамтамасыз етеді. Цифрлық егіздерді енгізудің экономикалық тиімділігі де жоғары, себебі өндірістің қаржылық көрсеткіштері айтарлықтай жақсарады. Сонымен қатар, бұл технология климаттық деректер мен топырақ сипаттамалары негізінде болашақ жағдайларды болжауға мүмкіндік береді. IoT-A архитектурасына негізделген техникалық модель фермерлер үшін ыңғайлы басқару жүйесін ұсынады. Басқару моделі арқылы фермерлер нақты уақыттағы деректерді өңдеп, қажетті шараларды жоспарлай алады. Бұл әдіс адами факторды азайтып, өндіріс тиімділігін арттырады. Цифрлық егіздердің алты негізгі түрі зерттелді, олардың әрқайсысы басқарудың ерекше функцияларын орындайды. Мысалы, болжамды цифрлық егіздер фермерлерге болашақ жағдайларды алдын ала жоспарлауға көмектеседі. Нәтижелер цифрлық егіздердің экологиялық жүктемені азайтуға ықпал ететінін көрсетті. Сонымен қатар, фермерлер өнімділікті арттыру үшін климаттық және топырақ деректерін тиімді пайдалана алады. Цифрлық егіздер фермерлік шаруашылықтардағы автоматтандыру деңгейін көтеріп, өндіріс сапасын жақсартады. Бұл технология фермерлердің еңбек шығындарын азайтып, шешім қабылдау уақытын қысқартады. Жалпы, цифрлық егіздер ауыл шаруашылығындағы процестерді оңтайландыруға, инновацияларды дамытуға және тұрақты дамуға ықпал етеді.

ҚОРЫТЫНДЫ

Бұл зерттеу цифрлық егіздердің ақылды ауыл шаруашылығын дамытуға қосатын үлесін жан-жақты қарастырды. Алға қойылған үш негізгі мақсат толықтай орындалды. Біріншіден, цифрлық егіздердің ұғымы мен олардың типологиясы анықталды. Цифрлық егіз – бұл нақты объектінің динамикалық цифрлық көшірмесі, ол объектінің өмірлік циклі бойындағы жағдайын, мінез-құлқын және болашақ өзгерістерін бақылауға, модельдеуге және талдауға мүмкіндік береді. Зерттеу барысында алты түрлі цифрлық егіз анықталды: кескіндік, бақылау, болжамдық, ұсынушылық, автономды және еске алу егіздері. Екіншіден, ауыл шаруашылығында цифрлық егіздерді енгізуге арналған тұжырымдамалық негіз ұсынылды. Бұл негіз жалпы жүйелік тәсілге сүйеніп, IoT-A (Интернет заттары – Архитектура) үлгісіне негізделген енгізу моделін қамтиды. Бақылау моделі цифрлық егіздердің негізінде құрылған жүйелер үшін ақпараттық ағындар мен басқару функцияларын сипаттайды. Ал енгізу моделі құрылғылардан бастап қолдану деңгейіне дейінгі техникалық талаптарды қамтиды. Үшіншіден, ұсынылған тұжырымдамалық негіз Еуропаның IoF2020 жобасында сынақтан өтті. Зерттеу нәтижелері цифрлық егіздердің (digital twins) типологиясын анықтап, олардың архитектурасын нақты өндірістік модельдер негізінде әзірледі. IoF2020 (Интернет және Ақылды Фермерлік) жобасының бес кейс-стадисы арқылы ұсынылған тұжырымдамалар тексеріліп, олардың жұмыс істеу қабілеттілігі расталды. Жұмыста сенсорлық жүйелердің (LoRaWAN, MQTT), архитектуралық қабаттардың және басқару модельдерінің техникалық сипаттамалары келтіріліп, нақты өндіріс процестеріне қолданылуы талданды. Теориялық-әдіснамалық талдаумен қатар, диаграммалар, графиктер және цифрлық егіздердің платформалық шешімдері көрсетілген, бұл технологиялардың тиімділігін және іс жүзіндегі қолданылу мүмкіндіктерін айқындайды. Ұсынылған тәсілдердің ғылыми маңызы – цифрлық егіздердің ақпараттық-физикалық жүйелерін (CPS) оңтайландыруға, өндірістік процестерді мониторинг және басқаруды жаңа деңгейге көтеруге

мүмкіндік береді. Нәтижелер агроөнеркәсіптік және өнеркәсіптік секторларда инновациялық шешімдерді енгізу үшін негіз болып табылады. Бұл жоба егін шаруашылығы, сүт өндірісі, жылыжай көкөніс өсіру, органикалық көкөніс шаруашылығы және мал шаруашылығы сияқты салаларда цифрлық егіздерді қолданудың тиімділігін көрсетті. Нәтижесінде, цифрлық егіздер негізіндегі басқару модельдері нақты уақыттағы деректерге негізделген шешімдерді қабылдауға мүмкіндік беріп, техникалық архитектураны жетілдіруге ықпал етті. Жалпы, зерттеу нәтижелері цифрлық егіздердің ауыл шаруашылығында процестерді оңтайландыруға, шығындарды азайтуға және өндірістің тиімділігін арттыруға айтарлықтай үлес қосатынын көрсетті. Бұл технологияны әрі қарай дамыту және кеңейту ауыл шаруашылығы саласындағы инновацияларды жеделдетуге мүмкіндік береді.

ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

1. Verdouw C., Tekinerdogan B., Beulens A. J. M., Wolfert S. Digital twins in smart farming // *Agricultural Systems*. – 2021. – № 189. – P. 103046. – DOI: 10.1016/j.agsy.2020.103046.
2. Grieves M. W. Product lifecycle management: The new paradigm for enterprises // *International Journal of Product Development*. – 2005. – № 2 (1–2). – P. 71–84. – DOI: 10.1504/IJPD.2005.006669.
3. Philpotts M. An introduction to the concepts, benefits and terminology of product data management // *Industrial Management & Data Systems*. – 1996. – № 96 (4). – P. 11–17. – DOI: 10.1108/02635579610117467.
4. Grieves M., Vickers J. Digital twin: Mitigating unpredictable, undesirable emergent behaviour in complex systems // *Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems* / Ed. by F.-J. Kahlen, S. Flumerfelt, A. Alves. – Springer International Publishing, 2017. – P. 85–113. – DOI: 10.1007/978-3-319-38756-7_4.
5. Shafto M., Conroy M., Doyle R., Glaessgen E., Kemp C., LeMoigne J., Wang L. Modeling, Simulation, Information Technology and Processing Roadmap: Technology Area 11 // *National Aeronautics and Space Administration (NASA)*. – 2010. https://www.researchgate.net/publication/280310295_Modeling_Simulation_Information_Technology_and_Processing_Roadmap
6. Glaessgen E., Stargel D. The digital twin paradigm for future NASA and U.S. Air Force vehicles // *53rd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference*. – American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2012. – DOI: 10.2514/6.2012-1818.
7. Fuller A., Fan Z., Day C., Barlow C. Digital twin: Enabling technologies, challenges and open research // *IEEE Access*. – 2020. – № 8. – P. 108952–108971. – DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2998358.
8. Boschert S., Rosen R. Digital twin—The simulation aspect // *Mechatronic futures: Challenges and solutions for mechatronic systems and their designers* / Ed. by P. Hehenberger, D. Bradley. – Springer International Publishing, 2016. – P. 59–74. – DOI: 10.1007/978-3-319-32156-1_5.
9. Verdouw C. N., Beulens A. J. M., Reijers H. A., van der Vorst J. G. A. J. A control model for object virtualization in supply chain management // *Computers in Industry*. – 2015. – № 68. – P. 116–131. – DOI: 10.1016/j.compind.2014.12.011.
10. Schleich B., Anwer N., Mathieu L., Wartack S. Shaping the digital twin for design and production engineering // *CIRP Annals*. – 2017. – № 66 (1). – P. 141–144. – DOI: 10.1016/j.cirp.2017.04.040.
11. Verdouw C. N., Wolfert S., Beulens A. J. M., Rialland A. Virtualization of food supply chains with the Internet of Things // *Journal of Food Engineering*. – 2016. – № 176. – P. 128–136. – DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2015.11.009.
12. Morchid A., Et-taibi B., Oughannou Z., El Alami R. IoT-enabled smart agriculture for improving water management: A smart irrigation control using embedded systems and server-sent events // *Scientific African*. – 2024. – № 27. – P. e02527. – DOI: 10.1016/j.sciaf.2024.e02527.
13. Poornima G., Gowda S. M. A. Digital twin for smart farming // *Data science for agricultural innovation and productivity*. – Bentham Science Publishers, 2024. – P. 1–16. – DOI: 10.2174/9789815196177124010004.
14. Zhang R., Zhu H., Chang Q., Mao Q. A Comprehensive Review of Digital Twins Technology in Agriculture // *Agriculture*. – 2025. – № 15 (9). – P. 903. – DOI: 10.3390/agriculture15090903.
15. Purcell W., Neubauer T. Digital twins in agriculture: A state-of-the-art review // *Smart Agricultural Technology*. – 2023. – № 3. – P. 100094. – DOI: 10.1016/j.atech.2022.100094.

16. Schleich B., Anwer N., Mathieu L., Wartzack S. Shaping the digital twin for design and production engineering // *CIRP Annals – Manufacturing Technology*. – 2017. – № 66 (1). – P. 141–144. – DOI: 10.1016/j.cirp.2017.04.040.
17. Alam K. M., El Saddik A. C2PS: A digital twin architecture reference model for the cloud-based cyber-physical systems // *IEEE Access*. – 2017. – № 5. – P. 2050–2062. – DOI: 10.1109/ACCESS.2017.2657006.
18. Redelinghuys A. J. H., Kruger K., Basson A. H. A six-layer architecture for digital twins with aggregation // *Service Oriented, Holonic and Multi-agent Manufacturing Systems for Industry of the Future* / Ed. by T. Borangiu, D. Trentesaux, A. Thomas, S. Cavalieri. – Springer, 2020. – P. 171–182. – DOI: 10.1007/978-3-030-27477-1_13.
19. Wang L. Digital Twins in Agriculture: A Review of Recent Progress and Open Issues // *Electronics*. – 2024. – № 13 (11). – P. 2209. – DOI: 10.3390/electronics13112209.
20. Awais M., Wang X., Hussain S., Aziz F., Mahmood M. Q. Advancing Precision Agriculture Through Digital Twins and Smart Farming Technologies: A Review // *AgriEngineering*. – 2025. – № 7 (5). – P. 137. – DOI: 10.3390/agriengineering7050137.

REFERENCES

1. Verdouw, C., Tekinerdogan, B., Beulens, A. J. M. and Wolfert, S. (2021), "Digital twins in smart farming", *Agricultural Systems*, Vol. 189, p. 103046. DOI: 10.1016/j.agry.2020.103046.
2. Grieves, M. W. (2005), "Product lifecycle management: The new paradigm for enterprises", *International Journal of Product Development*, Vol. 2 No. 1–2, pp. 71–84. DOI: 10.1504/IJPD.2005.006669.
3. Philpotts, M. (1996), "An introduction to the concepts, benefits and terminology of product data management", *Industrial Management & Data Systems*, Vol. 96 No. 4, pp. 11–17. DOI: 10.1108/02635579610117467.
4. Grieves, M. and Vickers, J. (2017), "Digital twin: Mitigating unpredictable, undesirable emergent behaviour in complex systems", in Kahlen, F.-J., Flumerfelt, S. and Alves, A. (Eds.), *Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems*, Springer International Publishing, pp. 85–113. DOI: 10.1007/978-3-319-38756-7_4.
5. Shafto, M., Conroy, M., Doyle, R., Glaessgen, E., Kemp, C., LeMoigne, J. and Wang, L. (2010), *Modeling, Simulation, Information Technology and Processing Roadmap: Technology Area 11*, National Aeronautics and Space Administration (NASA). Retrieved November 26, 2023, from URL: https://www.researchgate.net/publication/280310295_Modeling_Simulation_Information_Technology_and_Processing_Roadmap.
6. Glaessgen, E. and Stargel, D. (2012), "The digital twin paradigm for future NASA and U.S. Air Force vehicles", in *53rd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference*, American Institute of Aeronautics and Astronautics. DOI: 10.2514/6.2012-1818.
7. Fuller, A., Fan, Z., Day, C. and Barlow, C. (2020), "Digital twin: Enabling technologies, challenges and open research", *IEEE Access*, Vol. 8, pp. 108952–108971. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2998358.
8. Boschert, S. and Rosen, R. (2016), "Digital twin—The simulation aspect", in Hehenberger, P. and Bradley, D. (Eds.), *Mechatronic futures: Challenges and solutions for mechatronic systems and their designers*, Springer International Publishing, pp. 59–74. DOI: 10.1007/978-3-319-32156-1_5.
9. Verdouw, C. N., Beulens, A. J. M., Reijers, H. A. and van der Vorst, J. G. A. J. (2015), "A control model for object virtualization in supply chain management", *Computers in Industry*, Vol. 68, pp. 116–131. DOI: 10.1016/j.compind.2014.12.011.
10. Schleich, B., Anwer, N., Mathieu, L. and Wartzack, S. (2017), "Shaping the digital twin for design and production engineering", *CIRP Annals*, Vol. 66 No. 1, pp. 141–144. DOI: 10.1016/j.cirp.2017.04.040.
11. Verdouw, C. N., Wolfert, S., Beulens, A. J. M. and Rialland, A. (2016), "Virtualization of food supply chains with the Internet of Things", *Journal of Food Engineering*, Vol. 176, pp. 128–136. DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2015.11.009.
12. Morchid, A., Et-taibi, B., Oughannou, Z. and El Alami, R. (2024), "IoT-enabled smart agriculture for improving water management: A smart irrigation control using embedded systems and server-sent events", *Scientific African*, Vol. 27, p. e02527. DOI: 10.1016/j.sciaf.2024.e02527.

13. Poornima, G. and Gowda, S. M. A. (2024), "Digital twin for smart farming", in *Data science for agricultural innovation and productivity*, Bentham Science Publishers, pp. 1–16. DOI: 10.2174/9789815196177124010004.
14. Zhang, R., Zhu, H., Chang, Q. and Mao, Q. (2025), "A Comprehensive Review of Digital Twins Technology in Agriculture", *Agriculture*, Vol. 15 No. 9, p. 903. DOI: 10.3390/agriculture15090903.
15. Purcell, W. and Neubauer, T. (2023), "Digital twins in agriculture: A state-of-the-art review", *Smart Agricultural Technology*, Vol. 3, p. 100094. DOI: 10.1016/j.atech.2022.100094.
16. Schleich, B., Anwer, N., Mathieu, L. and Wartack, S. (2017), "Shaping the digital twin for design and production engineering", *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, Vol. 66 No. 1, pp. 141–144. DOI: 10.1016/j.cirp.2017.04.040.
17. Alam, K. M. and El Saddik, A. (2017), "C2PS: A digital twin architecture reference model for the cloud-based cyber-physical systems", *IEEE Access*, Vol. 5, pp. 2050–2062. DOI: 10.1109/ACCESS.2017.2657006.
18. Redelinghuys, A. J. H., Kruger, K. and Basson, A. H. (2020), "A six-layer architecture for digital twins with aggregation", in Borangiu, T., Trentesaux, D., Thomas, A. and Cavalieri, S. (Eds.), *Service Oriented, Holonic and Multi-agent Manufacturing Systems for Industry of the Future*, Springer, pp. 171–182. DOI: 10.1007/978-3-030-27477-1_13.
19. Wang, L. (2024), "Digital Twins in Agriculture: A Review of Recent Progress and Open Issues", *Electronics*, Vol. 13 No. 11, p. 2209. DOI: 10.3390/electronics13112209.
20. Awais, M., Wang, X., Hussain, S., Aziz, F. and Mahmood, M. Q. (2025), "Advancing Precision Agriculture Through Digital Twins and Smart Farming Technologies: A Review", *AgriEngineering*, Vol. 7 No. 5, p. 137. DOI: 10.3390/agriengineering7050137.

DIGITAL TWINS IN THE AGRICULTURAL INDUSTRY: CONCEPTS AND PRACTICES

B. S. Amirkhanov¹, G. A. Amirkhanova¹, A. A. Raeva^{1*}

¹Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan

ABSTRACT

Purpose of the research. The methods and criteria for comprehensively assessing the effectiveness of a country's economic integration within the framework of the Eurasian Economic Union (EAEU) can be identified. Three main methods for evaluating the effectiveness of economic integration within the EAEU can be distinguished. The first method is the method of trade integration among EAEU member states, which assesses the dynamics, structure, and volumes of mutual trade between the countries of the union. The second method is the method of assessing the effectiveness of economic integration based on a set of strategic priorities for economic development. The third method is the method of national competitiveness, which evaluates how participation in the EAEU affects the overall competitiveness of the national economy. Despite the fact that certain aspects of evaluation, such as competitiveness analysis, are universal, these methods will require adaptation for countries outside the EAEU. This is due to differences in the specifics of regional cooperation (e.g., in the EU or ASEAN) and integration mechanisms (such as currency or customs unions with varying regulations). Thus, the proposed methods can be developed with consideration for the specifics of the EAEU, but with some adaptation, they could also be used to assess integration in other unions.

Methodology. A variety of methods were used in the course of the study: macroeconomic analysis, comparative analysis of national economic models, econometric modeling, and a comprehensive approach to assessing the achievement of economic benefits, stability, and competitiveness of the country within the framework of the EAEU. A literature review of academic works on the topic of the study was conducted, which allowed for an examination of Kazakhstan's role in the development of trade and economic relations between the member states of the EAEU.

Originality / value. The originality and value of the study lie in examining the impact of global and regional integration on Kazakhstan's economic stability and development, considering the changes in the country's economy since its accession to the Eurasian Economic Union (EAEU). This provides insights into the effectiveness of the integration and helps identify future development vectors for Kazakhstan, based on improving trade relations and strengthening economic ties among EAEU member states.

Findings. The study's findings demonstrate that farm enterprises can be managed efficiently in real time by leveraging digital twins. Compared with traditional approaches, these models offer superior performance in process forecasting, optimal resource allocation, and adaptation to climatic or market fluctuations. Practical results from the IoF2020 project confirm the wide applicability of digital twins and their pivotal role in the digitalisation of the agri-food sector. All five IoF2020 pilot deployments quantitatively proved that digital twins significantly enhance both operational efficiency and sustainability. For example, in the "Potato Data Processing Exchange" pilot, potato growers used IoT devices to monitor the entire flow of produce from field to storage; as a result, average crop yield increased by 10 %, fuel consumption fell by 10 %, and overall margins rose by 5 %.

Keywords: Kazakhstan, export potential, Eurasian Economic Union, integration, investments, competitiveness.

Acknowledgments: This research was financially supported by the Science Committee of the Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan (grant No. BR24992975)

ЦИФРОВЫЕ ДВОЙНИКИ В АГРОПРОМЫШЛЕННОЙ ОТРАСЛИ: КОНЦЕПЦИИ И ПРАКТИКА

Б. С. Амирханов¹, Г. А. Амирханова¹, А. А. Раева^{1*}

¹ Казахский национальный университет имени аль-Фараби,
Алматы, Республика Казахстан

АННОТАЦИЯ

Цель исследования — всесторонне изучить потенциал технологии цифровых двойников в сфере умного сельского хозяйства и показать, как их внедрение в фермерские хозяйства способствует повышению продуктивности и устойчивости. Кроме того, в работе систематизируются ключевые понятия, типы, методы проектирования и внедрения цифровых двойников, а также анализируется их влияние на реальные производственные процессы.

Методология. В исследовании использован междисциплинарный системный подход. Разработана типология цифровых двойников и предложена структурная модель на основе архитектуры Интернета вещей (IoT-A) для их проектирования. Эта модель адаптирована к конкретным технологическим процессам в фермерских хозяйствах, обеспечивая обмен данными в реальном времени, автоматизированный мониторинг и прогнозирование. Также проведен сравнительный анализ пяти реальных примеров из проекта Европейского Союза IoF2020: растениеводство, производство молока, тепличное овощеводство, органическое земледелие и животноводство.

Научная новизна / ценность. Данная работа является одной из первых, комплексно систематизирующих концепцию цифровых двойников в сельском хозяйстве. В исследовании рассматриваются не только технологические инновации, но и предлагаются конкретные изменения в управленческих моделях и трансформации фермерских процессов. Полученные результаты позволяют научно обосновать значимость и перспективность цифровых двойников в будущем аграрного сектора.

Результаты. Результаты исследования показали, что цифровые двойники позволяют эффективно управлять фермерскими хозяйствами на основе данных в реальном времени. В сравнении с традицион-

ными методами предложенные модели обеспечивают более высокую эффективность прогнозирования, оптимальное распределение ресурсов и адаптацию к климатическим или рыночным изменениям. Практические итоги пилотных проектов IoF2020 подтверждают широкие перспективы применения цифровых двойников и их важную роль в ускорении цифровизации агропромышленного комплекса. Так, в пилоте Potato Data Processing Exchange картофелеводы получили сквозную видимость потоков продукции от поля до склада через IoT-устройства; урожайность возросла в среднем на 10 %, расход топлива сократился на 10 %, а общая маржа увеличилась на 5 %.

Ключевые слова: цифровые двойники, умное сельское хозяйство, интернет вещей (IoT), агропромышленные системы, цифровизация сельского хозяйства.

Благодарность: Данное исследование выполнено при финансовой поддержке Комитета науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (грант № BR24992975).

АВТОРЛАР ТУРАЛЫ

Бауыржан Амирханов – Жасанды интеллект және үлкен деректер, әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы, Қазақстан Республикасы, E-mail: amirkhanov.b@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4915-0347>

Гүлшат Амирханова – PhD, әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы, Қазақстан Республикасы, E-mail: gulshat.aa@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3933-5476>

Алина Раева – Бакалавр, әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы, Қазақстан Республикасы, E-mail: alinaraevali18@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-4257-6919>*