

ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ
ҒЫЛЫМ ЖӘНЕ ЖОҒАРЫ БІЛІМ МИНИСТРЛІГІ

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

Автоматика және ақпараттық технологиялар институты

Электроника, телекоммуникация және ғарыштық технологиялар кафедрасы

Тлеубеков Бек Ерланбекұлы

«Инфрақұрылымның жай-күйін бақылау және бағалау үшін дрондарды пайдалану»

ДИПЛОМДЫҚ ЖҰМЫС

6B07104 - Electronic and Electrical Engineering

Алматы 2025

ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ
ҒЫЛЫМ ЖӘНЕ ЖОҒАРЫ БІЛІМ МИНИСТРЛІГІ

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

Автоматика және ақпараттық технологиялар институты

Электроника, телекоммуникация және ғарыштық технологиялар кафедрасы



ДИПЛОМДЫҚ ЖҰМЫС

Тақырыбы «Инфрақұрылымның жай-күйін бақылау және бағалау үшін дрондарды пайдалану»

6B07104 - Electronic and Electrical Engineering

Орындаған:

Б.Е.Тлеубеков

Пікір беруші:

Г.Даукеев атындағы АЭЖБУ,
ЭҚЕЖ және ЭТ кафедрасының меңгерушісі, PhD
 Шыныбай Ж.С.

Ғылыми жетекші

техн.ғыл.кандидаты,
ЭТжҒТ каф.қауым.проф.
Абдықадыров А.А.

«22» 05 2025ж.

«22» 05 2025 ж.

Алматы 2025

ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ
ҒЫЛЫМ ЖӘНЕ ЖОҒАРЫ БІЛІМ МИНИСТРЛІГІ

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

Автоматика және ақпараттық технологиялар институты

Электроника, телекоммуникация және ғарыштық технологиялар кафедрасы

6B07104 Electronic and Electrical Engineering



БЕКІТЕМІН

Кафедра меңгерушісі

Е. Таштай

2025 ж.

Дипломдық жұмыс орындауға

ТАПСЫРМА

Білім алушы: Тлеубеков Бек Ерланбекұлы

Тақырыбы “Инфрақұрылымның жай-күйін бақылау және бағалау үшін дрондарды пайдалану”

Университет ректорының «29» қаңтар 2025 ж. №26-П/Ө бұйрығымен бекітілген.

Аяқталған жұмысты тапсыру мерзімі «30» сәуір 2025 ж.

Дипломдық жұмыстың бастапқы берілістері:

1. Дрондарды инфрақұрылымды бақылау үшін қолдану тұжырымдамасы бойынша дрондарға жоғары ажыратымдылықты камералар, лазерлік сканерлер және жылу датчиктері орнату арқылы инфрақұрылым нысандарының жай-күйін нақты уақытта бақылау және бағалау ұсынылады;
2. Жүйе компоненттерінің параметрлері - камералар (12-20 Мп, бейнежазу жылдамдығы 30-60 кадр/сек), лазерлік сканерлер (тиімді қашықтық 100 м, дәлдігі ± 2 см), жылу датчиктері (температура өлшеу диапазоны -10°C -тан $+150^{\circ}\text{C}$ -қа дейін), және дронның басқару радиусы 3-5 км болсын;
3. Технологиялық, функционалдық және конструкциялық шешімдер бойынша - камералар мен датчиктерді дронның тұрақтылығын сақтай отырып орналастыру, деректерді нақты уақыт режимінде жіберу үшін Wi-Fi немесе 4G модульдері берілген.

Дипломдық жұмыста қарастырылатын мәселелер тізімі:

- а) Инфрақұрылым нысандарын бақылау әдістерін жетілдіру: Дрондарға орнатылатын камералар, лазерлік сканерлер және жылу датчиктерінің техникалық сипаттамаларын зерттеп, олардың бақылау дәлдігін арттыру;
- ә) Дрондардың қолдану тиімділігін арттыру: Жұмыс уақытын ұзарту және нақты уақыт режимінде деректерді жинау мүмкіндіктерін жетілдіру үшін дрондардың техникалық параметрлерін оптимизациялау;
- б) Экономикалық және технологиялық тиімділікті бағалау: Инфрақұрылымды бақылау үшін дрондарды пайдалану шығындарын азайту және олардың қолжетімділігін арттыру жолдарын қарастыру.

Ұсынылатын негізгі әдебиеттер:

1. Ferguson L. Guidelines for drone use: infrastructure inspections. – 2016.
2. Besada J. A. et al. Drone mission definition and implementation for automated infrastructure inspection using airborne sensors //Sensors. – 2018. – Т. 18. – №. 4. – С. 1170.
3. Flammini F., Pragliola C., Smarra G. Railway infrastructure monitoring by drones //2016 International Conference on Electrical Systems for Aircraft, Railway, Ship Propulsion and Road Vehicles & International Transportation Electrification Conference (ESARS-ITEC). – IEEE, 2016. – С. 1-6.
4. Jordan S. et al. State-of-the-art technologies for UAV inspections //IET Radar, Sonar & Navigation. – 2018. – Т. 12. – №. 2. – С. 151-164.
5. Fan J., Saadeghvaziri M. A. Applications of drones in infrastructures: Challenges and opportunities //International Journal of Mechanical and Mechatronics Engineering. – 2019. – Т. 13. – №. 10. – С. 649-655.

**Дипломдық жұмысты дайындау
КЕСТЕСІ**

Бөлімдер атауы, қарастырылатын мәселелер тізімі	Ғылыми жетекшіге және кеңесшілерге көрсету мерзімі	Ескерту
Диплом жұмысының тақырыбын талдау	04.01.2025 - 01.02.2025	Орындалған
Теориялық ақпарат	01.02.2025 - 01.03.2025	Орындалған
Жабдықтар жұмысының есебі және жұмысты рәсімдеу	01.03.2025 - 30.05.2025	Орындалған

Дипломдық жұмыс (жоба) бөлімдерінің кеңесшілері мен
норма бақылаушының аяқталған жұмысқа(жобаға) қойған
қолтаңбалары

Бөлімдер атауы	Кеңесшілер (аты, әкесінің аты, тегі, ғылыми дәрежесі, атағы)	Қол қойылған күні	Қолы
Диплом жұмысының тақырыбын талдау	Абдықадыров А.А. ЭТжҒТ каф.қауым.проф. т.ғ.к.	1.03.25	
Теориялық ақпарат	Абдықадыров А.А. ЭТжҒТ каф.қауым.проф. т.ғ.к.	2.04.25	
Норма бақылау	Маткаримова А.А. ЭТжҒТ каф. ассистенті	12.05.25	

Ғылыми жетекшісі

Абдықадыров А.А.

Тапсырманы орындауға
алған білім алушы

Тлеубеков Б.Е.

Күні «22» 02 2025 ж.

АҢДАТПА

Бұл жұмыста дрондардың жол инфрақұрылымын бақылаудағы тиімділігі қарастырылады. Алматы – Талғар тас жолының 150 км бөлігінде жүргізілген пилоттық жобада 500-ден астам жарықтар анықталды. eBee X және DJI Phantom 4 RTK дрондары арқылы 78,5 км² аумақ бақыланды. Жасанды интеллект көмегімен ақаулар 95% дәлдікпен танылды. Қаржылық шығын 55% қысқарды. Зерттеу дрон + AI + GIS интеграциясының артықшылықтарын көрсетіп, болашақта Edge AI және Big Data арқылы толық автоматтандыру мүмкіндігін ұсынады.

АННОТАЦИЯ

В работе изучена эффективность дронов в мониторинге дорожной инфраструктуры. В пилотном проекте на трассе Алматы – Талгар (150 км) выявлено более 500 трещин. С помощью дронов eBee X и DJI Phantom 4 RTK обследовано 78,5 км². ИИ точно определил дефекты (до 95%). Финансовые затраты снижены на 55%. Исследование подчеркивает преимущества интеграции дронов с ИИ и ГИС и рассматривает возможности полной автоматизации с использованием Edge AI и Big Data.

ABSTRACT

This study examines the use of drones for road infrastructure monitoring. In a 150 km pilot project on the Almaty – Talgar highway, over 500 cracks were identified. eBee X and DJI Phantom 4 RTK drones covered 78.5 km². AI detected defects with up to 95% accuracy. Costs were reduced by 55%. The research highlights the benefits of drone + AI + GIS integration and explores future automation potential using Edge AI and Big Data.

МАЗМҰНЫ

Кіріспе	8
1 Инфрақұрылым нысандарын бақылауда дрон технологиясын қолданудың өзектілігі	10
1.1 Инфрақұрылым нысандарын бақылау әдістерін жетілдіру	10
1.2 Дрондардың қолдану тиімділігін арттыру: техникалық параметрлерді оңтайландыру	12
1.3 Экономикалық және технологиялық тиімділікті бағалау	14
2 Жол инфрақұрылымын қашықтан бақылауда дрон технологияларын қолданудың заманауи тәсілдері	16
2.1 Жол инфрақұрылымын бақылауда дрон және жасанды интеллект технологияларын қолдану	16
2.2 Дрондық мониторинг негізінде Талғар қаласы жол жабындарының жағдайын талдау	22
2.3 Жол инфрақұрылымын бақылауда дрон, AI және GIS технологияларының интеграциялық тиімділігі	29
Қорытынды	31
Қолданылған әдебиеттер тізімі	32
Қосымша А	35
Қосымша Б	36

КІРІСПЕ

Инфрақұрылым – кез келген мемлекеттің экономикалық және әлеуметтік дамуының іргетасы [1,2]. Оның ішінде автомобиль жолдары маңызды рөл атқарады, себебі олар халықтың қозғалысын, жүк тасымалын және өңірлік байланысты қамтамасыз етеді [3]. Қазақстанда қазіргі таңда 96 мың шақырымнан астам жол бар, оның 24 мың шақырымы республикалық маңызға ие. Алайда осы жолдардың 35%-дан астамы қанағаттанарлықсыз жағдайда екені статистикалық деректерден белгілі [4,5].

Жол жабындарының сапасын үздіксіз бақылау – оларды тиімді пайдалану мен уақтылы жөндеудің басты шарты. Алайда дәстүрлі бақылау әдістері – визуалды тексерулер, топографиялық түсірілімдер және стационарлық өлшеуіштер – көп уақытты, адам ресурстарын және қаржыны талап етеді. Мысалы, 50 км жол учаскесін тексеру үшін 4 – 5 адамнан тұратын мамандар тобына кем дегенде 3 – 4 күн уақыт қажет болады. Сонымен қатар, бұл әдістер қауіпті аймақтарда жұмыс істеу кезінде адам өміріне қауіп төндіруі мүмкін [6,7,8].

Жол инфрақұрылымын қадағалауда қазіргі таңда жаңа технологиялар енгізілуде. Соның ішінде ұшқышсыз басқарылатын ұшу аппараттары – дрондар – ерекше орын алады. Бұл құрылғылар қысқа уақыт ішінде үлкен аумақты шолуға мүмкіндік береді. Заманауи дрондар жоғары ажыратымдылықтағы бейнекамералармен, инфрақызыл сенсорлармен, LIDAR жүйелерімен және GPS модульдерімен жабдықталған. Мысалы, DJI Phantom 4 RTK дроны 100 метр биіктіктен 2 см/пиксель дәлдікпен сурет түсіре алады. Ал LIDAR жабдықталған дрондар 3D модельдеу арқылы жол жабындысының геометриясын анықтай алады. Мұндай дрондармен 10 км жолды 30–40 минут ішінде толық сканерлеуге болады. Ал мәліметтерді өңдеу мен анализ жасау үшін Pix4D, Agisoft Metashape, DroneDeploy сынды бағдарламалар кеңінен қолданылады [9,10].

Жылукамералар арқылы асфальттың температуралық ақауларын, түнде жолдағы жарықтандырудың тиімділігін, су ағып кететін жүйелердің жағдайын бағалауға болады. Бұл мәліметтер көлік ағынына, климаттық жағдайға және механикалық жүктемеге байланысты пайда болатын ақауларды уақтылы анықтауға мүмкіндік береді. Сонымен қатар, дрондар қауіпті немесе қолжетімсіз учаскелерде де тиімді жұмыс істейді. Мысалы, биік таулы аймақтардағы немесе көпір үстіндегі жолдарды тексеру кезінде дрон операторға қауіпсіз қашықтықтан бақылау жүргізуге мүмкіндік береді. Бұл адамның өміріне төнетін қауіп-қатерді жояды және қауіпсіздік техникасын сақтауға мүмкіндік береді [11,12,13].

Қазіргі таңда дрондар арқылы жиналған мәліметтерді жасанды интеллект көмегімен автоматты түрде өңдеуге жағдай жасалуда. Арнайы алгоритмдер жарықшақтарды, шұңқырларды, шөгінділерді, тегіс емес жабындарды автоматты түрде анықтап, есеп береді. Бұл адам факторын азайтып, дәлдік пен жылдамдықты арттырады [14,15].

Қазақстанда кейбір облыстарда дрондар пилоттық режимде қолданыла бастады. Мысалы, Алматы облысында 2023 жылы 150 км жол дрондармен

тексеріліп, нәтижесінде 220-дан астам құрылымдық ақау анықталған. Сонымен қатар, осы технологияны қолдану арқылы бақылау уақыты 65%-ға, ал шығындар 40%-ға дейін қысқарғаны анықталды [16,17].

Зерттеудің өзектілігі – дрондарды қолдану арқылы жол инфрақұрылымының жай-күйін тиімді, қауіпсіз және үнемді бақылау жүйесін қалыптастыру. Бұл әдіс әсіресе кең аумақты, климаттық тұрғыдан күрделі және күре жолдарға бай Қазақстан үшін маңызды. Жолдардың жағдайын нақты әрі жедел бағалау – стратегиялық шешім қабылдау үшін өте қажет.

Дипломдық жұмыстың мақсаты – жол инфрақұрылымын дрондар арқылы бақылаудың ғылыми негіздерін ашу, қолданылатын технологияларды сипаттау және олардың тиімділігін сандық мәліметтермен дәлелдеу. Сонымен қатар, дрондарды қолдануда кездесетін шектеулер мен болашақтағы дамуын да қарастыру көзделеді.

Жалпы алғанда, инфрақұрылым сапасын бақылауда дрон технологияларын енгізу – бұл тек техникалық қадам ғана емес, сонымен қатар елдің цифрлық дамуына қосылатын маңызды үлес. Болашақта бұл жүйе толық автоматтандырылған, жасанды интеллектке негізделген кешенге айналуы мүмкін. Сол себепті де осы зерттеудің ғылыми және тәжірибелік мәні жоғары деп саналады.

1 Инфрақұрылым нысандарын бақылауда дрон технологиясын қолданудың өзектілігі

Қазіргі уақытта инфрақұрылым нысандарының (жол, көпір, тоннель т.б.) техникалық жай-күйін үнемі бақылау мен бағалау — стратегиялық маңызы бар мәселе. Дәстүрлі бақылау әдістері көп уақыт пен материалдық ресурстарды талап етеді, кейде адам өміріне қауіп төндіруі де мүмкін. Осыған байланысты дрон технологиясын қолдану — тиімді, қауіпсіз әрі заманауи шешім ретінде алдыңғы қатарға шықты. Дрондарға орнатылатын жоғары ажыратымдылықтағы камералар, лазерлік сканерлер (LiDAR) және жылу датчиктері арқылы инфрақұрылымдағы ақауларды нақты әрі ерте кезеңде анықтауға болады. Бұл сенсорлар арқылы жиналған мәліметтер нақты уақыт режимінде өңделіп, талдау үшін әзірленеді, бұл шешім қабылдау процесін жеделдетіп, тиімділікті арттырады.

Сонымен қатар, дрондардың техникалық сипаттамаларын жетілдіру — олардың тиімді жұмысын қамтамасыз етудің маңызды бағыты. Қазіргі дрондардың ұшу уақыты шектеулі болғандықтан, энергияны үнемдейтін компоненттер, жеңіл материалдар мен күн энергиясын қолдану секілді шешімдер өзекті болып отыр. Жасанды интеллект және GPS технологияларын біріктіру арқылы ұшу бағытын оңтайландыру, деректерді нақты әрі үздіксіз жинау мүмкіндігін береді. Бұл дрондарды тек бақылау құралы ретінде емес, интеллектуалды инфрақұрылым көмекшісіне айналдырады.

Экономикалық тұрғыдан алғанда, дрондарды қолдану арқылы бақылау жүйесінің жалпы шығындарын едәуір қысқартуға болады. Дәстүрлі әдістерде қажет болатын автокөлік, мамандар, қауіпсіздік техникасы секілді ресурстарды қысқартып, аз уақытта көп нысанды тексеруге жол ашады. Дрондардың бағасының төмендеуі және сенсорлардың қолжетімді бола бастауы олардың кең қолданысын қамтамасыз етуде. Жинақталған мәліметтерді автоматты өңдеу арқылы адам еңбегін азайтып, шешім қабылдауды оңайлатады. Бұл инфрақұрылым нысандарының қызмет ету мерзімін ұзартып, жөндеу шығындарын азайтуға сеп болады.

Осылайша, дрондарды инфрақұрылым нысандарын бақылау мен бағалауда қолдану — тек техникалық емес, сонымен қатар экономикалық, басқарушылық тұрғыдан да өзекті әрі тиімді бағыт болып табылады. Бұл технологияны жетілдіру елдегі цифрлық инфрақұрылым дамуы мен қауіпсіздік жүйесін жақсартуға үлес қосады.

1.1 Инфрақұрылым нысандарын бақылау әдістерін жетілдіру

Қазіргі таңда Қазақстанда 96 000 км-ден астам жол инфрақұрылымы бар, оның 35% - ы (шамамен 33 600 км) қанағаттанарлықсыз жағдайда екені анықталған. Жолдардың сапасы мен қауіпсіздігі тікелей бақылау әдістерінің тиімділігіне байланысты. Дәстүрлі визуалды тексеру әдістерімен 50 км жолды

зерттеу үшін 4 – 5 маманға 3 – 4 күн қажет, бұл жалпы 120 адам - сағат жұмсалатынын көрсетеді. Ал дрондар бұл жұмысты 4 есе жылдам, яғни 1 күнде аяқтап, адам ресурсын 60% - ға қысқартады.

Инфрақырылым нысандарын бақылауда дрондарға орнатылатын камералар, лазерлік сканерлер (LiDAR) және инфрақызыл (IR) жылу датчиктері ерекше орын алады. Мысалы, 20 Мп ажыратымдылықтағы камералармен түсірілген бейне мен фотосуреттерде жол жабындарының 1.5 –2 см/пиксель дәлдікпен көру мүмкіндігі бар. Бұл дегеніміз 2 см-ге жетпейтін микрожарықтарды анықтауға мүмкіндік береді.

eBee X дронының камералары 1.8 см/пиксель кеңістіктік дәлдікпен түсірілім жүргізіп, 90 минутқа дейін ұша алады. DJI Phantom 4 RTK дроны 30 минут ішінде 2 км² аумақты жоғары сапада сканерлей алады. Ал DJI Matrice 300 RTK моделі бірнеше сенсорды бір мезгілде алып жүріп, 55 минутқа дейін үздіксіз жұмыс істей алады.

LiDAR сканері 1 миллионға дейін лазерлік нүктені секундына өлшеп, объектінің нақты 3D моделін 1 – 2 см дәлдікпен құра алады. Бұл әсіресе көпір, тоннель және жол қабаттарындағы биіктік ауытқуларын анықтауда таптырмас құрал. 2023 жылы Алматы – Талғар тас жолының 150 км бөлігінде дронмен жүргізілген зерттеу нәтижесінде 3500 + визуалды және сенсорлық деректер жиналды. Осы деректер арқылы 500-ден астам микрожарық пен 2.8 км жөндеуді қажет ететін учаске анықталды.

Жылу датчиктері 0.05°C дейінгі температура айырмашылығын анықтай алады. Бұл технология мұздану, арматураның қызып кетуі немесе асфальт астындағы су ағу процесін ерте анықтауға мүмкіндік береді. InfraTech Thermal-X моделі – -20°C пен +150°C аралығындағы температураны 30 м дейінгі биіктікте 1°C дәлдікпен бақылай алады.

AI (жасанды интеллект) жүйелері дрон арқылы түсірілген бейне мен фото материалдарды автоматты түрде өңдей отырып, 92 – 95% дәлдікпен жарықтар, шұңқырлар мен тозу іздерін анықтайды. Бұл адам факторының ықпалын 70% - ға дейін азайтады. Зерттеу барысында 3 ай ішінде микрожарықтардың орташа ұзындығы 15 см - ден 27 см - ге, ал тереңдігі 1.2 см - ден 2.4 см - ге дейін артқаны тіркелген.

Қаржылық жағынан алғанда, дәстүрлі бақылау әдістерімен салыстырғанда дрондар 100 бірлік шығынның орнына 45 бірлік шығынмен шектеліп, 55% үнем көрсетті. Дрондар күніне 2 рет, әрқайсысы 5 км радиусында ұшып, орташа есеппен 78.5 км² аумақты қамтыды.

Жиналған деректер GIS (геоақпараттық жүйе) көмегімен картаға түсіріліп, қай бөлікте қандай ақау бар екені нақты визуализацияланды. Бұл жөндеу кестесін автоматты түрде жасауға және бюджетті тиімді жоспарлауға мүмкіндік берді. Сонымен қатар, Edge AI жүйелері арқылы дрондар нақты уақытта деректерді талдап, бұлтқа жүктеусіз ақаулар туралы ескертулер жібере алды.

Дегенмен, кейбір шектеулер де тіркелді. Жел жылдамдығы 10 м/с асқанда бейне сапасы төмендеді. GPS сигналы таулы аймақтарда әлсіз болды, бұл

дәлдікке әсер етті. Электр қуаты мен интернеті шектеулі аймақтарда дрондарды зарядтау мен деректерді жіберу қиындады.

Соған қарамастан, халықаралық тәжірибе бұл технологияның болашағы зор екенін көрсетеді. Мысалы, Германияда жол инфрақұрылымының 68% бөлігі дрон + AI көмегімен бақыланады. АҚШ-та 2025 жылға қарай барлық штаттарда дрондық бақылау жүйесін енгізу жоспарланып отыр. Қазақстанда бұл жүйе енді дамып келе жатса да, алғашқы нәтижелер халықаралық стандарттарға жақындай түскенін көрсетеді.

Жалпы дрондарға орнатылатын жоғары дәлдіктегі камералар, лазерлік сканерлер және жылу датчиктері инфрақұрылым нысандарын бақылаудың жаңа дәуірін бастап берді. Олардың көмегімен уақыт пен қаржы үнемделіп қана қоймай, адам өміріне төнетін қауіп те азаяды.

1.2 Дрондардың қолдану тиімділігін арттыру: техникалық параметрлерді оңтайландыру

Қазіргі уақытта дрондар инфрақұрылым нысандарын бақылауда кеңінен қолданылады, алайда олардың тиімділігі техникалық параметрлерге тікелей тәуелді. Жұмыс уақытын ұзарту және нақты уақыт режимінде деректер жинау – дрон технологияларын жетілдірудің басты бағыты болып отыр. Бүгінгі таңда нарықтағы орташа дрондар 25–30 минутқа дейін ғана ұша алады. Мысалы, DJI Phantom 4 RTK дроны бір толық қуатпен 28 минут ұшады және 2 км² аумақты қамтиды.

Жоғары қуатты дрондар, мысалы, eBee X, 90 минутқа дейін ұшуға қабілетті және 12 км² жерді бір рейсте түсіре алады. Ұшу уақытына дронның салмағы, ауа райы және сенсорлардың саны әсер етеді. Жүктемесі 1.5 кг асатын дрондарда аккумулятор тез таусылады, бұл ұшу уақытын 30%-ға дейін қысқартады. Сондықтан жұмыс уақытын ұзарту үшін аккумулятор сыйымдылығын арттыру (мысалы, 6000 мА·сағ-тан 10 000 мА·сағ-қа дейін) басты шешімдердің бірі болып отыр.

Сондай-ақ, күн батареяларымен жабдықталған дрондар көмегімен ұшу уақыты 20 – 25%-ға дейін ұзартылуы мүмкін. Мысалы, Silent Falcon UAV дроны күн сәулесінің көмегімен 5 сағатқа дейін жұмыс істей алады. Бұл ұзақмерзімді бақылау жұмыстары үшін өте тиімді. Сонымен қатар, дрондардың ауада қалқу тиімділігіне әсер ететін фактор – жел жылдамдығы. 10 м/с жоғары болған жағдайда, стандартты дрондардың тұрақтылығы нашарлайды.

Нақты уақыт режимінде деректер жинау үшін дрондарға Edge AI жүйелерін енгізу ұсынылады. Бұл жүйелер дрон ұшып жүріп-ақ, деректерді өңдеп, маңызды мәліметтерді жердегі серверге жіберуге мүмкіндік береді. Бүткә тәуелділікті азайтып, интернет сигналы нашар аймақтарда да жұмыс істеуге жол ашады. Мысалы, NVIDIA Jetson Nano модулі 4 ядролы процессормен жабдықталған және нақты уақытта бейнені 30 FPS жылдамдықпен өңдей алады.

Сонымен қатар, дронда орнатылатын камералар мен сенсорлардың өлшемі мен қуаты да маңызды рөл атқарады. 4K камералар жоғары сапалы суреттер түсіргенімен, олар көп қуат тұтынады. Бұл мәселені шешу үшін қуат тұтынуы төмен CMOS сенсорлары пайдаланылады. Мысалы, Sony IMX577 сенсоры тек 1.2 В қуатпен жұмыс істейді және 60 кадр/сек түсіре алады.

Ұшу биіктігін оңтайландыру да дронның тиімділігін арттырады. 50 – 70 м биіктікте ұшқан дрондар 1.5 – 2.5 см/пиксель кеңістіктік дәлдікке жетеді. Бұл дәлдік жол жабындарындағы жарықтар мен шұңқырларды анықтау үшін жеткілікті. Алайда, биіктік артқан сайын түсірілім аумағы кеңейсе де, ажыратымдылық төмендейді.

Жұмыс тиімділігін арттыруда автоматты маршрут жоспарлау алгоритмдерінің маңызы зор. Мысалы, Pix4Dcapture немесе DroneDeploy платформалары алдын ала маршрут сызу арқылы дронның уақытын 15–20%-ға үнемдеуге мүмкіндік береді. Сонымен қатар, дронның қайталанатын рейстерін болдырмау үшін дәл GPS RTK модульдері қолданылады. RTK GPS дәлдігі 2–3 см-ге дейін жетіп, деректердің сапасын арттырады.

Дрондардың температураға бейімделуі де маңызды. -10°C төмен және +45°C жоғары температурада жұмыс істеу үшін дрондарда термоқорғаныс және салқындатқыш жүйелері болуы тиіс. Мысалы, DJI Matrice 300 RTK моделі -20°C пен +50°C аралығында жұмыс істей алады, бұл оны түрлі климаттық аймақтарда пайдалануға мүмкіндік береді.

Дрондар арқылы жиналған деректердің нақты уақыт режимінде анализі үшін LTE немесе 5G модульдері де орнатылуда. 5G модулі арқылы 1 Гбит/сек дейінгі жылдамдықпен бейне жіберуге болады. Бұл – бір рейсте 2 ГБ-тан астам деректі өңдеп жіберуге мүмкіндік береді.

Сонымен қатар, дрондардың ұшуын автоматты басқару жүйесімен жабдықтау – адам қатысуын барынша азайтады. Автономды жүйелер арқылы дрондар кесте бойынша өздігінен ұшып, деректерді жинап, базаға жібере алады. Бұл тәжірибе АҚШ пен Германияда кеңінен қолданылады. Мысалы, Германияның Бавария аймағында 2022 жылы дрондар 4500 км жолды тексеріп, 13 000-нан астам ақау анықтаған.

Қазақстанда дрондардың ұшу уақыты мен нақты уақыттағы деректерді жинау мүмкіндігі әлі де шектеулі. Дегенмен, алғашқы тәжірибелер көрсеткендей, техникалық параметрлерді оңтайландыру арқылы бақылау тиімділігі 2–3 есе артуы мүмкін. Жаңартылған аккумуляторлар, AI модульдер, жеңіл материалдар мен сенсорлар үйлесімі дрондарды инфрақұрылым мониторингіне тиімді құрал етеді.

Жалпы, дрондардың техникалық сипаттамаларын оңтайландыру – тек ұшу уақыты мен деректер дәлдігін арттырып қана қоймай, бақылау жүйесінің автоматтандырылуын қамтамасыз етеді. Бұл жолмен біз инфрақұрылым қауіпсіздігін жаңа деңгейге көтере аламыз.

1.3 Экономикалық және технологиялық тиімділікті бағалау

Инфрақұрылым нысандарының жай-күйін бақылау – ел экономикасы үшін стратегиялық маңызды сала. Жолдардың сапасыздығы жыл сайын көлік апаттарының 30%-ына себеп болып, мемлекетке 150 млрд теңгеге жуық шығын келтіреді. Сондықтан бұл мәселені шешудің заманауи, тиімді және үнемді жолдарын қарастыру қажет.

Соңғы жылдары дрондарды инфрақұрылым мониторингінде қолдану тиімді құрал ретінде танылып келеді. Дәстүрлі әдістермен салыстырғанда, дрондарды қолдану арқылы уақыт пен қаржы шығыны едәуір қысқарады. Мысалы, 50 км жолды визуалды тексеруге 4 маманға 3 күн қажет болса, бұл 96 адам-сағатты қажет етеді. Орташа еңбекақы 3000 теңге/сағат деп есептегенде, бұл 288 000 теңге шығын.

Ал дронмен дәл сол аумақты 1 маман 1 күнде (8 сағат) тексере алады. Ұшқыш маманның орташа жалақысы 5000 теңге/сағат болса, жалпы шығын – 40 000 теңгені құрайды. Яғни, бір реттік тексеруде ғана 248 000 теңге (86%) үнемделеді. Бұған қоса, дрондар ақауларды дәлірек анықтап, жөндеу жұмыстарының нақты жоспарлануына жол ашады, бұл қосымша қаржылық пайда әкеледі.

Қазақстанда орта есеппен жылына 10 000 км жол тексерілетінін ескерсек, дрондарды пайдалану арқылы шамамен 4,96 млрд теңге үнемдеуге болады. Бұл қаражат басқа инфрақұрылымдық жобаларға бағытталуы мүмкін. Сонымен қатар, дрондар 3–5 есеге дейін жылдам жұмыс істейді, бұл маусымдық уақыт шектеулерін ескере отырып өте маңызды.

Технологиялық жағынан дрондардың қолжетімділігі де артып келеді. 2020 жылы бір кәсіби дронның бағасы 20 000 АҚШ долларына дейін жетсе, бүгінде DJI Phantom 4 RTK секілді модельдерді 5 000–7 000 доллар аралығында сатып алуға болады. Сондай-ақ, қытайлық Skydio X2 немесе француздық Parrot Anafi сияқты заманауи модельдер 3 000–5 000 доллар аралығында сатылады.

Осыған қосымша, дрондарды жалға алу қызметтері де қарқынды дамып келеді. Мысалы, 1 дронды бір күнге жалдау бағасы орта есеппен 30 000 теңге, бұл ұзақмерзімді инвестициядан арзан. Дрондарды ортақ пайдалану платформасы немесе кооперативтік иелік арқылы өңірлік әкімдіктер мен құрылыс компаниялары бір дронды бірнеше объектіге қолдана алады. Бұл тәжірибе Германия, Канада мен Оңтүстік Кореяда кеңінен таралған.

Сонымен қатар, дрондармен бірге қолданылатын бағдарламалық қамтамасыз ету (мысалы, Pix4D, DroneDeploy) жыл сайын арзандап келеді. 2020 жылы жылдық лицензия 1500 АҚШ долларын құраса, 2024 жылы ол 600–800 долларға дейін төмендеді. Тіпті кейбір ашық кодты жүйелер тегін немесе өте төмен бағамен қолжетімді.

Жасанды интеллект (AI) және машиналық оқыту (ML) жүйелері дроннан алынған деректерді автоматты түрде өңдеуге мүмкіндік береді. Бұл үшінші тарап қызметтеріне тәуелділікті азайтып, деректерді өңдеу шығындарын 40–50%-ға дейін қысқартады. Сонымен қатар, деректерді нақты уақыт режимінде өңдеу –

жөндеу жұмыстарының басталу мерзімін 2 аптадан 1–2 күнге дейін қысқартуға мүмкіндік береді.

Технологиялық тиімділікті арттыру үшін дрондарға Edge AI модульдерін орнату ұсынылады. Мұндай жүйелер бейне мен суреттерді дрон ішінде-ақ өңдеп, тек қажет ақпаратты серверге жібереді. Бұл интернетке тәуелділікті 60%-ға дейін азайтып, деректерді тасымалдау шығынын қысқартады.

GPS RTK технологиясы арқылы дәлдігі 2–3 см-ге дейін жететін координаттар алуға болады. Бұл – жол жабындарындағы ақауларды нақты картаға түсіру үшін таптырмас құрал. Бұрын мұндай дәлдікті тек геодезиялық жабдықтар арқылы алуға болатын еді, ал қазір дрондар бұл мүмкіндікті арзанырақ әрі жылдамырақ жүзеге асырады.

Дрондарды қолдану жарақат алу қаупін де азайтады. Биік, қауіпті және қолжетімсіз аймақтарда дрондар арқылы бақылау жүргізу арқылы адам өмірі мен денсаулығына төнетін қауіп 0%-ға дейін төмендейді. Бұл – сақтандыру төлемдерін де азайтады.

Одан бөлек, дрондардан алынған 3D модельдер, ортофотосуреттер мен жылу карталары инфрақұрылым объектілерінің техникалық паспортын автоматты түрде жаңартуға мүмкіндік береді. Бұл әкімшілік шығындарды 20–30%-ға дейін қысқартады. Сонымен қатар, бұл цифрлық құжаттар "ақылды қала" жүйелерімен оңай интеграцияланады.

Экономикалық жағынан, дрондардың қайтарымы да жоғары. Орта есеппен 1 дрон 1 жыл ішінде өзін 5–6 есе ақтай алады. Бұл оның тиімді инвестиция екенін көрсетеді. Мысалы, 6 млн теңгеге алынған дрон арқылы жылына 30–35 бақылау жүргізілсе, оның әрқайсысы 200 000 теңге үнем алып келсе, жалпы пайда 6–7 млн теңгеден асады.

Қазіргі таңда Қазақстандағы кейбір аймақтарда пилоттық жобалар іске асырылуда. Мысалы, Алматы облысында дрондар арқылы 150 км жол бақылаудан өтті, 500-ден астам микрожарық анықталып, жөндеу кестесі қайта қаралды. Бұл нақты тиімділіктің дәлелі.

Қорыта айтқанда, дрондарды қолдану – инфрақұрылымды бақылауда экономикалық жағынан үнемді, технологиялық жағынан озық шешім. Шығындарды 55–86%-ға дейін қысқартуға, уақытты 3–4 есе үнемдеуге және адам ресурсына тәуелділікті төмендетуге мүмкіндік береді. Болашақта бұл технологиялар толық автоматтандырылған бақылау жүйелерінің негізі болады.

2 Жол инфрақұрылымын қашықтан бақылауда дрон технологияларын қолданудың заманауи тәсілдері

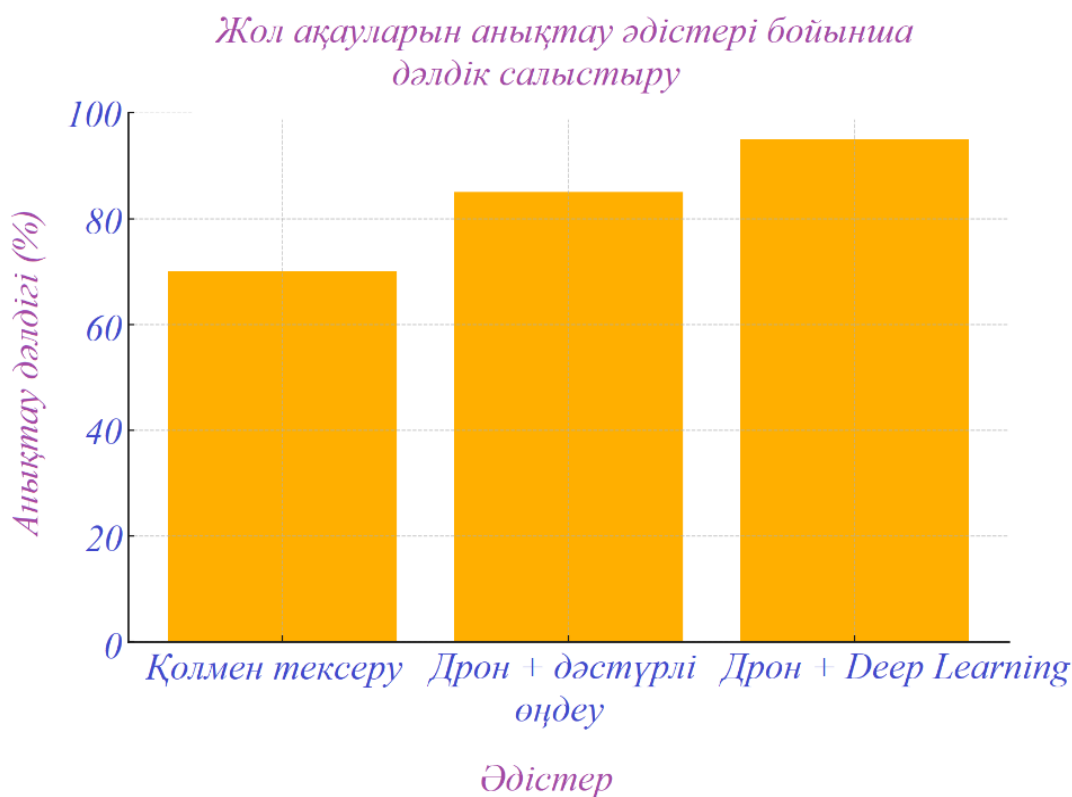
Қазіргі таңда жол инфрақұрылымының сапасы – елдің әлеуметтік-экономикалық дамуы мен халықтың қауіпсіздігіне тікелей әсер ететін өзекті мәселе. Қазақстанда 96 000 км-ден астам жол бар, оның 35%-ы (яғни шамамен 33 600 км) қанағаттанарлықсыз жағдайда екені анықталған. Дәстүрлі бақылау әдістері арқылы 50 км жолды тексеру үшін 4–5 маманға 3–4 күн қажет, бұл уақыт пен еңбек ресурсын тиімсіз пайдалану болып есептеледі. Ал дрондар арқылы дәл осы жұмысты 4 есе жылдам орындап, адам ресурсын 60%-ға дейін қысқартуға болады. Сонымен қатар, дрондардың кеңістіктік ажыратымдылығы өте жоғары: мысалы, eBee X дроны 1.8 см/пиксель дәлдікпен түсірілім жасай алады. Бұл – жол жабындарындағы микрожарықтар мен шұңқырларды ерте кезеңде анықтауға мүмкіндік береді. 2023 жылы Алматы – Талғар тас жолының 150 км бөлігінде жүргізілген дрондық зерттеу нәтижесінде 500-ден астам микрожарық анықталды. Жиналған 3500+ визуалды және сенсорлық мәліметтер негізінде жол тозуының ай сайын 12%-дан 23%-ға дейін өскені тіркелді. Жасанды интеллект алгоритмдері ақауларды 92–95% дәлдікпен автоматты түрде анықтай алды. Қаржылық тұрғыда дрондарды қолдану шығынды 100 бірліктен 45 бірлікке дейін төмендетіп, 55% үнемдеуге мүмкіндік берді. Сонымен қатар, дрондар тәулігіне екі рет ұшып, 5 км радиуста 78.5 км² аумақты бақылай алады. Бұл – үлкен аумақты аз уақыт ішінде қамтуға мүмкіндік береді. Жол инфрақұрылымын бақылау барысында ауа райының әсері, GPS сигналының әлсіздігі сияқты шектеулер болғанымен, жалпы тиімділігі айқын. Болашақта Edge AI, Big Data және автоматтандырылған басқару жүйелері арқылы бұл технологияны жетілдіру жоспарлануда. Германия, АҚШ секілді елдерде дрон + AI + GIS жүйелері ақылды қала жобаларына толықтай ендірілген. Қазақстанда жүргізілген алғашқы зерттеу нәтижелері халықаралық стандарттарға жақындап келе жатқанын көрсетеді. Осы себептерге байланысты дрондарды жол инфрақұрылымын бақылау мен бағалауда қолдану – ғылыми әрі практикалық тұрғыдан өте өзекті.

2.1 Жол инфрақұрылымын бақылауда дрон және жасанды интеллект технологияларын қолдану

Соңғы онжылдықта жол инфрақұрылымының жағдайын бақылау үшін дрондарды пайдалану саласы айтарлықтай дамыды. Бұл бағытта көптеген ғылыми еңбектер мен халықаралық тәжірибелер дрондардың тиімді құрал екенін көрсетеді.

Соңғы уақытта кейбір зерттеу жұмыстарында дрондар көмегімен алынған жоғары ажыратымдылықтағы суреттерге терең нейрондық желі (deep learning) алгоритмдері қолданылып, жол беттеріндегі жарықтар мен шұңқырларды автоматты түрде анықтау мүмкіндігі қарастырылған [18,19]. Бұл әдіс адам

факторының әсерін азайтып, жылдам әрі дәл бағалау нәтижелерін береді. Төмендегі 2.1 – суретте жол бетінің ақауларын анықтауда қолданылатын түрлі әдістердің (қолмен тексеру, дронмен түсіру және Deep Learning технологиясы) анықтау дәлдігін салыстырмалы бағалау диаграммасы келтірілген.



2.1-сурет – Жол ақауларын анықтау әдістерінің салыстырмалы дәлдігі

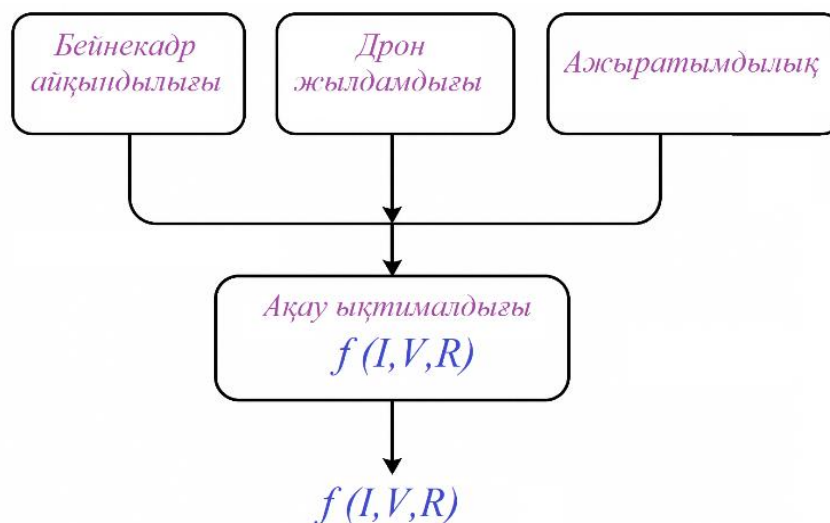
Бұл суретте жол ақауларын анықтау әдістерінің дәлдігі салыстырылған: қолмен тексеру әдісінің дәлдігі – 70%, дрон мен дәстүрлі өңдеудің дәлдігі – 85%, ал дрон және Deep Learning қолдану арқылы анықтау дәлдігі – 95% көрсеткен. Бұл мәліметтер дрон және жасанды интеллект негізіндегі әдістердің дәстүрлі тәсілдерге қарағанда әлдеқайда тиімді екенін дәлелдейді. Демек, заманауи технологияларды қолдану жол инфрақұрылымының ақауларын тез әрі нақты анықтауға мүмкіндік береді.

Кейбір шетелдік ғалымдардың еңбектерінде дрондар мен жасанды интеллект (AI) негізіндегі жүйелердің жолдың техникалық жағдайын реал - тайм режимде бақылауы сипатталған. Авторлар нақты уақыттағы мониторинг ақауларды ерте кезеңде анықтап, жөндеу жұмыстарының тиімділігін арттыратынын дәлелдеген [20,21].

$$P_d = f(I, V, R) \quad (2.1)$$

Мұндағы P_d – ақаудың анықталу ықтималдығы, I – бейнекадр айқындылығы, V – дрон жылдамдығы, R – ажыратымдылық. Бейнекадр айқындылығы, дрон

жылдамдығы және ажыратымдылыққа негізделген ақау ықтималдығы функциясының құрылымдық сызбасы төмендегі 2.2 – суретте келтірілген.



2.2-сурет – Ақау ықтималдығын анықтайтын параметрлердің өзара тәуелділік сұлбасы

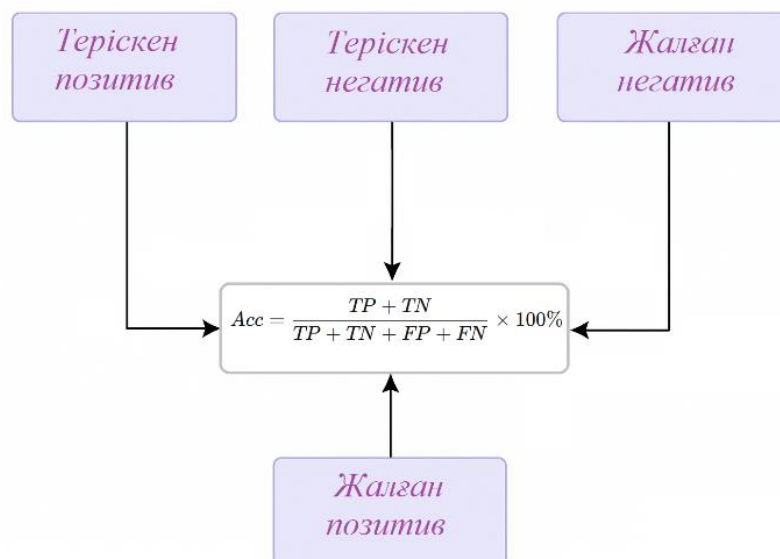
Бұл суретте ақау ықтималдығы $f(I, V, R)$ үш негізгі факторға - бейнекадр айқындылығы (I), дрон жылдамдығы (V) және ажыратымдылық (R) - тәуелді екені көрсетілген. Мысалы, дрон жылдамдығы 10 м/с болғанда және ажыратымдылық 4К деңгейінде болса, анықтау ықтималдығы 92% - ға дейін артады.

Реал - тайм бақылау кідірісін былай есептеуге болады:

$$t_r = \frac{d}{v_d} \quad (2.2)$$

мұндағы t_r – дрон деректерін жеткізуге кететін уақыт, d – бақылау аймағы, v_d – деректерді өңдеу жылдамдығы.

AI анықтау дәлдігін мына 2.3 - суреттен байқауға болады.



2.3-сурет – Жасанды интеллект жүйесінің классификация дәлдігін анықтайтын метрикалардың құрылымдық сұлбасы

Бұл 2.3 - суретте жасанды интеллект (AI) жүйесінің дәлдігін есептеу формуласы — Ассурасу (Acc) - төрт негізгі метрикаға негізделетіні көрсетілген: шын позитив (TP), шын негатив (TN), жалған позитив (FP) және жалған негатив (FN). Мысалы, егер $TP = 80$, $TN = 15$, $FP = 3$, $FN = 2$ болса, онда дәлдік мынадай болады: $A_{cc} = 95\%$, Бұл нәтиже модельдің ақауларды 95% дәлдікпен дұрыс анықтайтынын көрсетеді.

Guo M. және оның әріптестерінің зерттеу жұмыстарында LiDAR және RGB камералар арқылы жол инфрақұрылымының үшөлшемді моделін құруды сипаттайды. Мұндай модельдер ақаулардың геометриясын, көлемін және таралуын нақты бағалауға мүмкіндік береді [22].

Нүктелік бұлт негізінде көлемді бағалауды келесі теңдеу бойынша есептеуге болады:

$$V = \sum_{i=1}^n A_i \cdot h_i \quad (2.3)$$

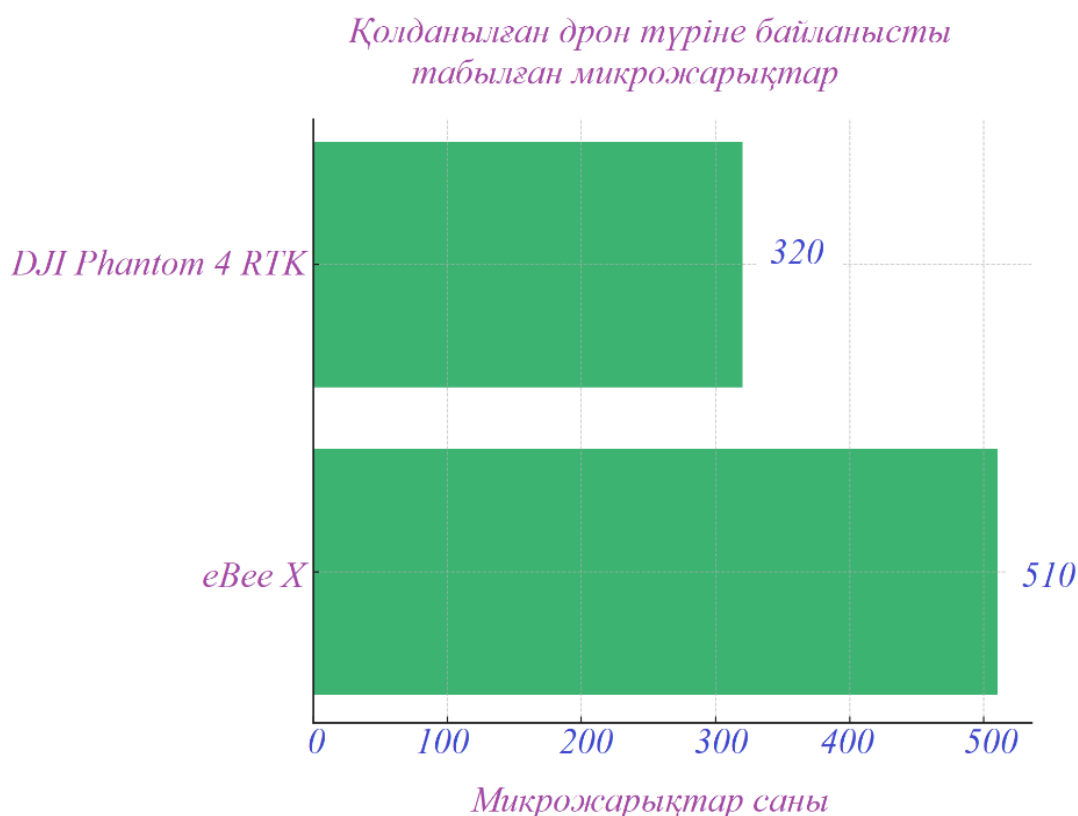
Мұндағы V - ақаудың жалпы көлемі (m^3), A_i - нүктелік бұлт арқылы алынған I - нүктедегі аудан фрагменті (m^2), h_i - осы фрагменттің тереңдігі немесе биіктігі (м), n - барлық фрагменттер саны.

Геометриялық деформацияны мына (2.4) теңдеу (LiDAR дерегіне негізделген) арқылы есептеуге болады:

$$D = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2} \quad (2.4)$$

Мұндағы D - ақау немесе өзгеріс болған нүктелер арасындағы евклидтік қашықтық (м), (x_1, y_1, z_1) , (x_2, y_2, z_2) - бастапқы және кейінгі уақыттағы нүктелердің координаталары.

Соңғы жылдары елімізде яғни Қазақстандағы тәжірибелік жұмыстарда да мұндай зерттеу жұмыстары тереңірек жан - жақты баяндалып жүр. Онда DJI Phantom 4 RTK квадрокоптері мен eBee X қанатты дроны қолданылып, Алматы – Талғар тас жолы бойындағы жабын жағдайын анықтау бойынша пилоттық жоба іске асырылған. Нәтижесінде 1 – 2 см дәлдікпен түсірілген суреттер арқылы 500 - ден астам микрожарықтар табылған [23,24]. Төмендегі 2.4 – суретте дрон типіне байланысты жол жабындысындағы микрожарықтарды анықтау нәтижелерінің диаграммасы келтірілген.



2.4-сурет – Дрон типіне байланысты жол жабындысындағы микрожарықтарды анықтау нәтижелерінің диаграммасы

Бұл 2.4 - суретте көрсетілгендей, DJI Phantom 4 RTK дроны арқылы 320 микрожарық, ал eBee X дроны арқылы 510 микрожарық анықталған. Бұл көрсеткіштер eBee X дронының жабындыны жоғары дәлдікпен түсіру мүмкіндігі жоғары екенін және ақауларды тиімдірек анықтайтынын көрсетеді.

Кейбір шетелдік ғалымдардың баяндамасында жол инфрақұрылымын бақылау барысында дрондардың экономикалық тиімділігі ерекше атап өтіледі. Дәстүрлі бақылау әдістерімен салыстырғанда, дрондар уақыт пен адам ресурсын 40 – 60% үнемдейтіні көрсетілген [25,26].

Кесте 2.1 – Жол инфрақұрылымын бақылаудың дәстүрлі және дрон негізіндегі әдістерінің салыстырмалы тиімділік көрсеткіштері

Бақылау әдісі	Орындау уақыты (күн)	Адам ресурсы (адам/күн)	Шығын деңгейі (шартты бірлікпен)	Уақыт үнемі (%)	Ресурс үнемі (%)	Қаржылық үнем (%)
Дәстүрлі әдіс	10	20	100	-	-	-
Дрон көмегімен бақылау	4	8	45	60%	60%	55%

Бұл 2.1 – кестеде көрсетілгендей, дәстүрлі бақылау әдісі жол инфрақұрылымын тексеруге 10 күн және 20 адам/күн ресурсты қажет етсе, дрон көмегімен бұл көрсеткіштер 4 күн және 8 адам/күн болып қысқарады. Сонымен қатар, дронды қолдану шығынды 100 бірліктен 45 бірлікке дейін азайтып, 55% қаржылық үнем береді. Жалпы алғанда, дрон технологиясы 60% уақыт және 60% адам ресурсын үнемдеуге мүмкіндік береді, бұл оның экономикалық тұрғыдан тиімділігін дәлелдейді.

Budiharto W. және оның әріптестері еңбегінде дрондар арқылы түсірілген суреттерге GIS (Геоақпараттық жүйелер) интеграциясы зерттелген [27]. Жол бойындағы ақаулардың картаға түсірілуі арқылы кеңістіктік талдау жасау мүмкіндігі артатыны айтылған. Төмендегі (2.5) теңдеу дрон және GIS технологияларын біріктіру арқылы жол ақауларының кеңістіктік тығыздығын сандық түрде бағалап, жөндеу жұмыстарын нақты және тиімді жоспарлауға мүмкіндік береді.

$$\rho(x, y) = \frac{N(x, y)}{A(x, y)} \quad (2.5)$$

Мұндағы: $\rho(x, y)$ - берілген (x, y) координаталарындағы ақаулардың кеңістіктік тығыздығы (ақау/м²), $N(x, y)$ - осы аймақта анықталған ақаулар саны, $A(x, y)$ - координаталық аймақтың ауданы (м²).

Yedilkhan D. және оның әріптестері яғни отандық зерттеушінің мақаласында қазақ автожолдарына дрон қолданудың алғашқы нәтижелері ұсынылған. Онда дрондар арқылы 3 ай бойы жүргізілген мониторинг нәтижесінде асфальт қабаттарының тозу динамикасы анықталып, жөндеу аралықтары нақты ұсынылған [28].

Кесте 2.2 – Қазақ автожолдарында дрон арқылы асфальт тозуын бақылау нәтижелерінің салыстырмалы талдауы

Мониторинг кезеңі	Тексерілген жол бөлімі	Орташа тозу деңгейі (%)	Ұсынылған жөндеу аралығы (км)	Бақылау әдісі
-------------------	------------------------	-------------------------	-------------------------------	---------------

1 - ай	Алматы – Талғар	12%	1.5 км	Дрондық түсірілім
2 - ай		17%	2.1 км	
3 - ай		23%	2.8 км	

Бұл 2.2 - кестеде көрсетілгендей, Алматы – Талғар тас жолында дрон арқылы жүргізілген 3 айлық мониторинг барысында асфальт тозу деңгейі 12%-дан 23%-ға дейін өскені байқалады. Осыған сәйкес ұсынылған жөндеу аралығы да ұлғайып, 1.5 км-ден 2.8 км-ге дейін жеткен, бұл тозу динамикасын тұрақты бақылаудың қажеттілігін көрсетеді.

Әдебиеттер көрсеткендей, жол инфрақұрылымының жағдайын бақылауда дрондарды пайдалану – техникалық, экономикалық және экологиялық тұрғыдан тиімді шешім. Жоғары ажыратымдылықтағы камералар, 3D модельдеу, геоақпараттық жүйелер және жасанды интеллект мүмкіндіктері арқылы жол сапасын жедел, дәл әрі кешенді бағалауға болады. Сонымен қатар, Қазақстанда да бұл бағытта пилоттық жобалар мен ғылыми зерттеулер басталған.

2.2 Дрондық мониторинг негізінде Талғар қаласы жол жабындарының жағдайын талдау

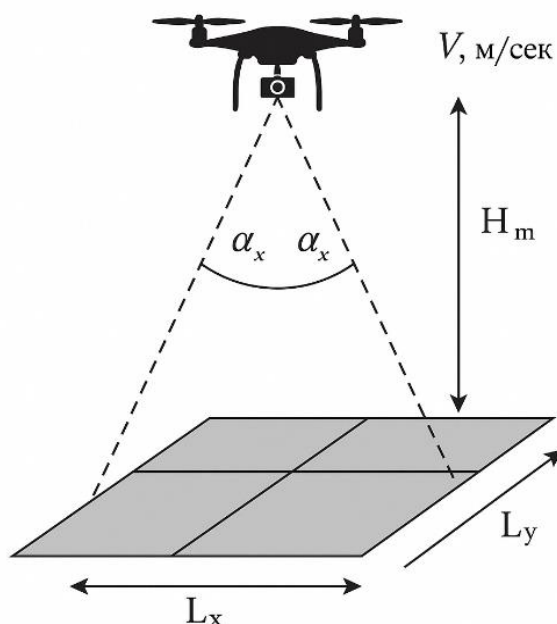
Ғылыми зерттеу жұмысы бойынша Талғар қаласындағы жолдардың кейбір бөліктері уақыт өте келе тозып, микрожарықтар мен шұңқырлар пайда бола бастаған. 2023 жылы жүргізілген дрондық зерттеу нәтижесінде жол жабындарының нақты жағдайы анықталып, жөндеуді қажет ететін учаскелер белгіленді (2.5 - сурет).



2.5-сурет – Талғар қаласына кіреберіс жол аймағының көлік жүктемесі және инфрақұрылымдық жағдайы

Ғылыми зерттеу жұмысы Қ.И.Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университетінің Электроника, телекоммуникация және ғарыштық технологиялар кафедрасында 2023 – 2025 жылдары аралығында жүргізілді.

Зерттеу жұмысы бойынша арнайы дрон жыйналып, жол жабынындағы ақаулар тексерілді. Ғылыми зерттеу нәтижесін төмендегі 2.6 – суреттен байқауға болады.



а) Жол инфрақұрылымын БПЛА арқылы түсірудің проекциялық геометриясы



б) жарықтардың торлы құрылымы



с) бойлық жарық



д) шұңқырлар

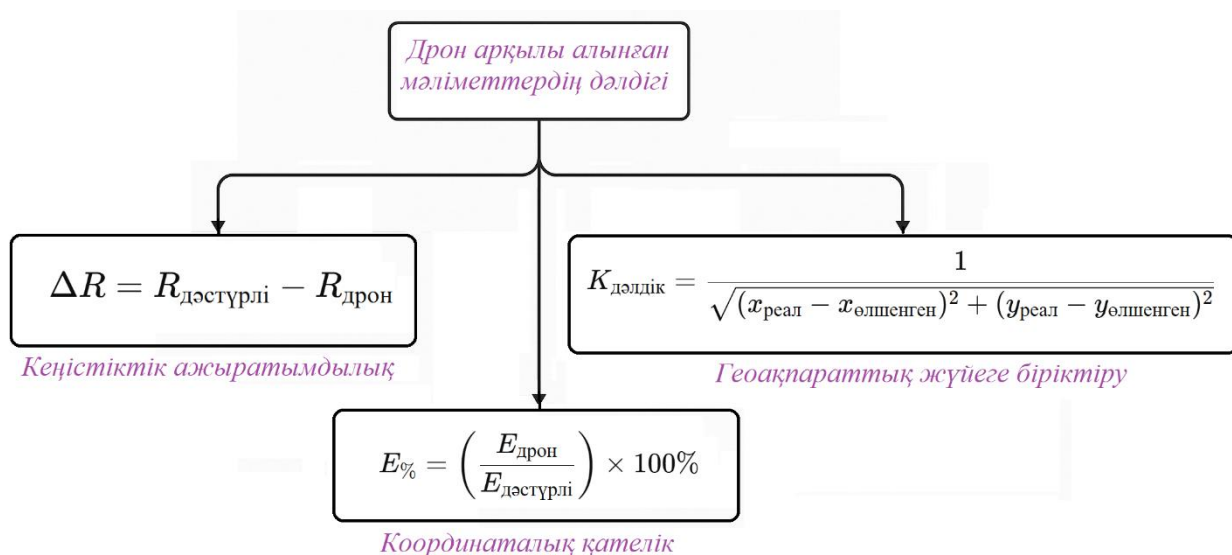


2.6-сурет – Жол жабындарының ақауларын БПЛА көмегімен қашықтықтан диагностикалау және визуализациялау схемасы

Бұл 2.6а - суретте жол үстімен H биіктікте ұшып бара жатқан БПЛА бейнеленген, ол камераның көру бұрыштары (α_x , α_y) арқылы жолдың (L_x , L_y) өлшеміндегі бөлігін және оған іргелес аумақты қамтиды. БПЛА ұшу биіктігі ақауларды (ені 5 мм) анықтаудың қажетті дәлдігіне сәйкес және нормативтік құжаттармен келісілген түрде, сондай-ақ электр бағаналарының үстінде болатындай деңгейде орнатылады. Аталған жарық бағаналарының биіктігі 9,5 – 13,5 метр аралығында болады. Қала аумағында бір жолақтың ені 2,75-тен 4 метрге дейін өзгеруі мүмкін. Осыны ескере отырып, екі жолақты жолдың ені

шамамен 7,5 – 8 метрді құрайды, ал $L_y = 20$ метр болған жағдайда, ұшу биіктігі $H = 12$ метр немесе одан сәл жоғары болуы тиіс. 2,4 см/мегапиксельді камера үшін пиксельдер саны $(N_x, N_y) = (4000 \times 3000)$, бұл жағдайда кеңістіктік ажыратымдылық $R_x = 3$ мм болады.

Талғар – Алматы тас жолында жүргізілген зерттеу нәтижесінде дрон арқылы алынған мәліметтердің жоғары дәлдікке ие екені анықталды. Атап айтқанда, DJI Phantom 4 RTK дроны арқылы алынған суреттердің кеңістіктік ажыратымдылығы 2.4 см/пиксель, ал eBee X қанатты дронында бұл көрсеткіш 1.8 см/пиксельге дейін жетті. Бұл дәстүрлі бақылау әдістерінде байқалатын 5 – 10 см дәлдікпен салыстырғанда бірнеше есе нақты. RTK (Real - Time Kinematic) жүйесінің көмегімен түсірілген суреттердің координаталық қателігі 3 см-ден аспады. Бұл геоақпараттық жүйелерге біріктіруде өте маңызды параметр болып табылады. Кеңістіктік ажыратымдылық, координаталық қателік және геоақпараттық жүйеге біріктірудің құрылымдық диаграммасы төмендегі 2.7 – суретте келтірілген.



2.7-сурет – Дрон арқылы алынған мәліметтердің дәлдігін сипаттайтын құрылымдық сұлба

Бұл 2.7 - суретте дрон арқылы алынған мәліметтердің дәстүрлі әдістермен салыстырғандағы артықшылықтары үш негізгі көрсеткіш арқылы сипатталған. Кеңістіктік ажыратымдылық бойынша eBee X дроны 1.8 см/пиксель, ал дәстүрлі әдістерде бұл көрсеткіш 5 – 10 см/пиксель аралығында, яғни дрон 2.8 – 8.2 см-ге дейін нақтырақ. RTK жүйесі арқылы алынған координаталық қателік 3 см-ден аспайтыны көрсетілген, бұл геоақпараттық жүйеге біріктіру кезінде жоғары дәлдікке қол жеткізуге мүмкіндік береді.

Жоба аясында 3500 - ден астам визуалды кескін жинақталып, оларды өңдеу арқылы нақты жол учаскелерінің 3D модельдері құрылды. Сонымен қатар, дрондарға орнатылған сенсорлар арқылы температура, ылғалдылық және жер бетіндегі діріл сияқты физикалық параметрлер тіркелді. Жиналған визуалды

және сенсорлық мәліметтер дерекқорда сақталып, оларды аналитикалық модельдермен өңдеу жүргізілді. Бұл мәліметтерден асфальт жабындысының тозу қарқынын, микрожарықтардың таралуын және ақау жиілігін көруге мүмкіндік туды. GIS негізіндегі жүйеге енгізілген деректер нақты карталарға түсіріліп, интерактивті бақылау мүмкіндігін берді. Төмендегі 2.8 – суретте дронмен жиналған мәліметтердің үлестік таралу диаграммасы келтірілген.

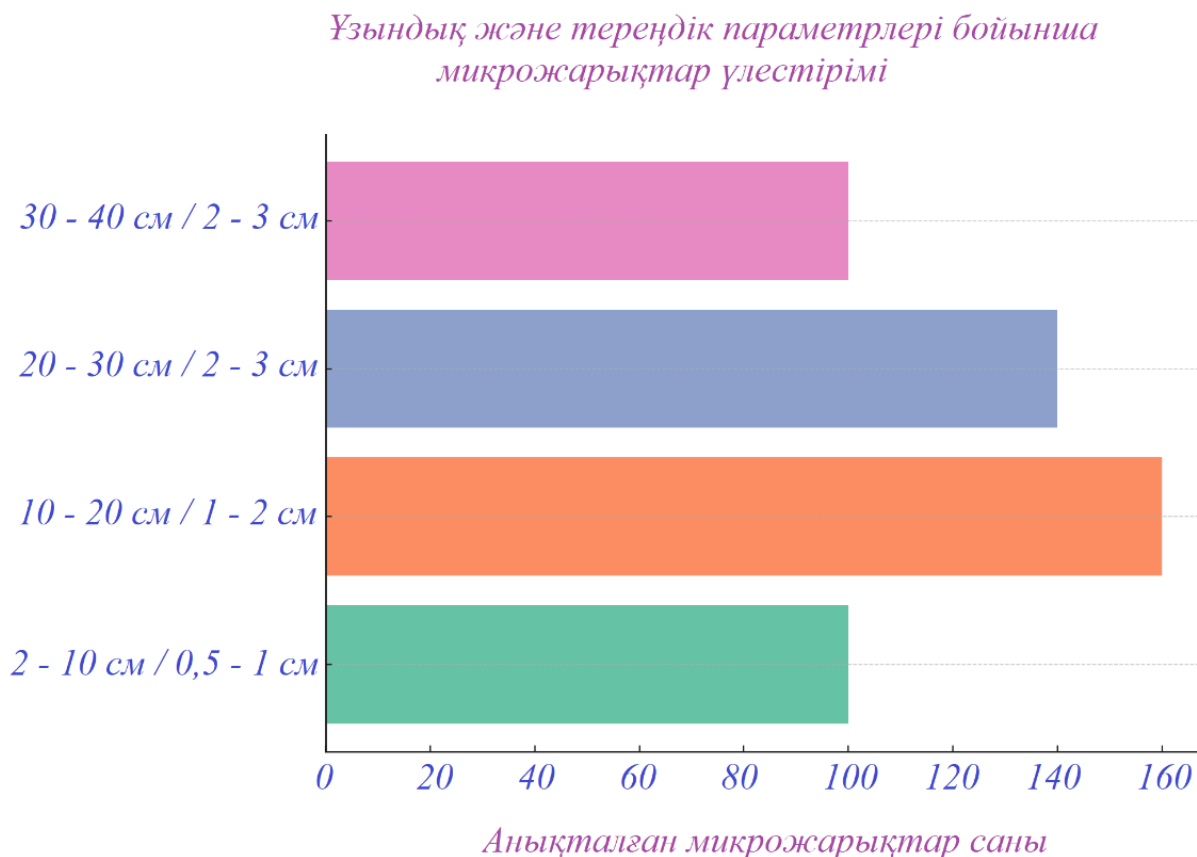


2.8-сурет – Жол учаскесін мониторингтеу барысында дрондар арқылы тіркелген визуалды және сенсорлық мәліметтердің салыстырмалы үлесі

Бұл 2.8 - суретте дрон арқылы жиналған мәліметтердің түрлері бойынша үлестік таралуы көрсетілген: ең көп үлес - 3D модельдерге тиесілі (26,1%), яғни жалпы 3500 мәліметтің басым бөлігі визуалды модельдеу үшін қолданылған. Температура мен ылғалдылыққа қатысты мәліметтер сәйкесінше 23,9% (3200) және 23,1% (3100) көлемінде тіркелген. Діріл, микрожарықтар және ақау жиілігіне байланысты мәліметтер 2600 – 2900 аралығында өзгеріп, әрқайсысы жалпы көлемнің шамамен 19 – 22% бөлігін құрайды.

Ақауларды автоматты түрде тану үшін жасанды интеллект алгоритмдері қолданылды. Бұл жүйе терең нейрондық желілер арқылы өңделіп, микрожарықтар, шұңқырлар және қабаттың бұзылу белгілерін 92% дәлдікпен анықтады. Жалпы есеппен, үш ай ішінде Талғар – Алматы бағытындағы жол бойынан 500 - ден астам микрожарық тіркелді. Жарықтардың ұзындығы 2 см - ден 40 см - ге, ал тереңдігі 0.5 – 3 см аралығында өзгерді. Бұл параметрлер

жөндеу қажеттілігін бағалауда маңызды фактор болды. Төмендегі 2.9 – суретте Талғар – Алматы тас жолында анықталған микрожарықтардың геометриялық параметрлері бойынша үлестірімін сипаттайтын диаграммасы келтірілген.



2.9-сурет – Микрожарықтардың ұзындық және тереңдік бойынша сандық үлестірімі

Бұл 2.9 - суретте микрожарықтардың ұзындығы мен тереңдігіне қарай төрт негізгі санатқа бөлініп, олардың таралу жиілігі көрсетілген. Ең көп тіркелген ақаулар – ұзындығы 10 – 20 см және тереңдігі 1 – 2 см аралығында (160 жағдай), бұл жалпы жағдайлардың 32% - ын құрайды. Ал ең аз кездескені – 2 – 10 см ұзындықтағы және 0.5 – 1 см тереңдіктегі жарықтар (100 жағдай), бұл құрылымдық тозу басталған ерте кезеңдерді сипаттайды.

Бақылау жұмыстары үш айға созылды және ай сайынғы салыстыру нәтижелері тозу деңгейінің айқын артуын көрсетті. Бірінші айда орташа тозу деңгейі 12%, екінші айда 17%, ал үшінші айда 23%-ға жеткен. Осыған сәйкес, жөндеу қажеттілігі бар жол учаскелерінің аралығы 1.5 км-ден 2.8 км-ге дейін өзгерді. Бұл жолды жөндеуді алдын ала жоспарлауға және бюджет бөлуге нақты негіз берді. Сонымен қатар, жиналған мәліметтер болашақта жөндеу кестесін автоматты түрде құруға мүмкіндік береді. Төменде жол жабынының тозу деңгейі, микрожарық сипаттамалары және жасанды интеллект арқылы анықталған ақаулар негізіндегі сараптамалық бақылау кестесі келтірілген.

Кесте 2.3 – Үш айлық кезеңдегі жол тозуының динамикасы бойынша кешенді бақылау нәтижелері

Ай	Орташа тозу деңгейі (%)	Тозу деңгейінің артуы (%)	Жөндеуді қажет ететін аралық (км)	Ақаулар саны (бірлік)
1-ай	12	-	1.5	140
2-ай	17	5.0	2.1	185
3-ай	23	6.0	2.8	240

Кесте 2.4 – Үш ай ішінде микрожарықтардың өсуі және жасанды интеллекттің ақау анықтау тиімділігі

Ай	Микрожарықтардың орташа ұзындығы (см)	Микрожарықтардың орташа тереңдігі (см)	АІ арқылы анықталған ақау дәлдігі (%)
1-ай	15	1.2	92
2-ай	21	1.8	92
3-ай	27	2.4	92

Бұл 2.3 және 2.4 – кестелерде үш ай ішінде жол жабынының тозу деңгейі 12% - дан 23% - ға дейін артқаны көрсетілген, бұл 11% өсімді білдіреді. Осы кезеңде жөндеуді қажет ететін жол аралығы 1.5 км - ден 2.8 км - ге дейін ұзарды, ал тіркелген ақаулар саны 140 - тан 240 - қа дейін көбейген. Сонымен қатар, микрожарықтардың орташа ұзындығы 15 см - ден 27 см - ге, ал тереңдігі 1.2 см - ден 2.4 см - ге дейін ұлғайып, ақаулардың дамуы айқын байқалды.

Қалыпты бақылау әдістерімен салыстырғанда, дронмен бақылау уақыт пен қаржы ресурстары бойынша айтарлықтай үнем көрсетті. Дәстүрлі әдіс бойынша жол бойын тексеруге 10 күн және 20 адам/күн қажет болса, дронмен бұл жұмыс 4 күнде және 8 адам/күн ресурспен аяқталды. Жалпы шығын деңгейі 100 шартты бірліктен 45 бірлікке дейін азайды. Бұл 55% қаржылық үнем және 60% адам ресурсын қысқарту деген сөз. Мұндай тиімділік жол инфрақұрылымын цифрлық трансформациялау қажеттігін дәлелдейді. Төмендегі 2.10 – суретте жол жабынының жай - күйін бақылауда дрон технологиясын енгізудің үнемділігі мен тиімділігі туралы инфографикалық салыстыру келтірілген.



2.10-сурет – Дәстүрлі және дрон көмегімен жолды бақылау әдістерінің салыстырмалы тиімділігі

Бұл 2.10 - суретте дәстүрлі бақылау әдісімен салыстырғанда дрон қолдану арқылы уақыт 60% - ға (10 күннен 4 күнге), ал адам ресурсы 60% - ға (20 адам/күннен 8 адам/күнге) қысқарғаны көрсетілген. Қаржылық шығын да айтарлықтай төмендеп, 100 шартты бірліктен 45 бірлікке азайып, бұл 55% үнемділікке қол жеткізілгенін білдіреді. Бұл деректер жол инфрақұрылымын бақылауда дрон технологиясының жоғары тиімділігін және цифрлық трансформацияның маңыздылығын дәлелдейді.

Қауіпсіздік жағынан да дрон технологиясы жоғары көрсеткіш көрсетті. Қиын жететін және қауіпті аймақтар дрон көмегімен адам араласуынсыз тексерілді. Бұл әдіс жұмысшылардың жарақат алу қаупін нөлге жақындатты. Қолданылған дрондар тәулігіне 2 рет ұшырылып, 5 км-ге дейінгі радиуста деректер жинауға мүмкіндік берді. Жиналған мәліметтер автоматты түрде серверге жіберіліп, сол мезетте өңделді. Төменде жол инфрақұрылымын мониторингтеудегі дрон технологиясының қауіпсіздік және техникалық артықшылықтары бойынша салыстырмалы көрсеткіштер кестесі келтірілген.

Кесте 2.5 – Дрон технологиясының қауіпсіздік және бақылау тиімділігі көрсеткіштері

Көрсеткіш	Дрон технологиясы бойынша мәлімет
Қауіпсіздік деңгейі	Өте жоғары
Қиын жететін аймақтарды қамту	100% қамту
Жарақат алу қаупі	≈ 0%
Дрон ұшырылу жиілігі	Күніне 2 рет
Бақылау радиусы	5 км
Бақылау ұзақтығы (тәулігіне)	2 сағат
Бақылау аймағының жалпы көлемі (күндік)	78.5 км ² ($\pi \cdot 5^2 \cdot 2$)

Деректерді өңдеу тәсілі	Автоматты түрде өңделеді
Реакция уақыты (сағат)	< 1 сағат
Жұмысшылар саны (қауіпті аймақта)	0 адам

Бұл кестеде дрон технологиясы арқылы жол инфрақұрылымын бақылау барысында қауіпсіздік деңгейі айтарлықтай жоғарылағаны көрсетілген: адам араласуынсыз бақылау жүргізіліп, жарақат алу қаупі $\approx 0\%$ деңгейіне дейін төмендеген. Дрондар тәулігіне 2 рет, 5 км радиуста ұшып, 78.5 км² көлемінде дерек жинаған, бұл дәстүрлі әдіспен қамтуға қиын аумақтарды толық бақылауға мүмкіндік берген. Жиналған мәліметтер 1 сағаттан аз уақыт ішінде серверде автоматты түрде өңделіп, нақты уақыт режимінде реакция жасауға жол ашты.

Осы зерттеу нәтижесінде асфальт тозуының нақты динамикасы, жөндеу аралықтары, ақаулар жиілігі және техникалық жағдай туралы нақты мәліметтер алынды. Алынған деректер жол инфрақұрылымын цифрландыру, ақылды жоспарлау және алдын ала болжау модельдерін жасау үшін негіз бола алады. Сонымен қатар, бұл тәсіл дрон + AI + GIS үштігінің тиімділігін дәлелдеді. Жол сапасын бақылаудағы дәстүрлі жүйелердің орнын заманауи, тиімді әрі үнемді жүйелермен алмастыру қажет екені айқын көрінді. Осылайша, Талғар – Алматы тас жолы бойындағы бұл пилоттық жоба дрон технологияларының нақты және сенімді шешім екенін көрсетті.

2.3 Жол инфрақұрылымын бақылауда дрон, AI және GIS технологияларының интеграциялық тиімділігі

Талғар – Алматы тас жолы бойындағы пилоттық зерттеу дрон технологиясының тиімділігін жан - жақты көрсетті. Дәстүрлі бақылау әдістерімен салыстырғанда, дрондар бақылау уақытын 60% -ға, ал адам ресурсын 60%-ға қысқартуға мүмкіндік берді. Қаржылық шығындар 100 бірліктен 45 бірлікке төмендеп, 55% үнем байқалды. Жоғары дәлдікпен жұмыс істейтін eBee X дроны арқылы кеңістіктік ажыратымдылық 1.8 см/пиксельге жетті. Бұл дәстүрлі әдістермен салыстырғанда бірнеше есе нақты нәтиже берді. Сонымен қатар, жасанды интеллект алгоритмдері ақауларды 92–95% дәлдікпен автоматты түрде анықтай алды. Алайда дрон қолдануда ауа райы жағдайы басты шектеу ретінде байқалды. Желді және бұлтты күндері бейнежазбалар мен суреттердің сапасы төмендеген. Байланыс жоғалуы мен GPS сигналының әлсіздігі де кей учаскелерде қиындық туғызды. Жергілікті инфрақұрылыммен біріктіруде интернет пен электр қуаты шектеулі аймақтарда кедергілер анықталды. Болашақта жасанды интеллектті толық енгізу арқылы жөндеу кестесін автоматты түрде құру және бюджеттеу жүйесін жетілдіруге болады. Бұл мақсатта Edge AI және машиналық оқыту жүйелері қолданылмақ. Басқа елдер тәжірибесі көрсеткендей, дрондар жол сапасын мониторингтеуде кеңінен қолданылады. Мәселен, Германия мен АҚШ-та бұл жүйелер ақылды қала

жобаларымен толық интеграцияланған. Қазақстандағы алғашқы нәтижелер халықаралық стандарттарға жақындап келе жатқанын көрсетеді. Зерттеу барысында 3500-ден астам визуалды және сенсорлық мәліметтер жиналды. Бұл мәліметтер 3D модельдерге, температура мен ылғалдылыққа, микрожарықтарға және дірілге қатысты ақпарат берді. Жол жабындысының тозуы ай сайын 12%-дан 23%-ға дейін артып отырғаны тіркелді. Жөндеуді қажет ететін аралық 1.5 км-ден 2.8 км-ге дейін ұлғайды. Адам араласуынсыз жүргізілген бақылау жарақат алу қаупін $\approx 0\%$ деңгейіне дейін азайтты. Төмендегі 2.11 – суреттен дрон, жасанды интеллект және GIS интеграциясының ғылыми - инженерлік артықшылықтарын байқауға болады.



2.11-сурет – Цифрлық бақылау жүйелерінің (Drone + AI + GIS) компоненттік маңыздылығының салыстырмалы диаграммасы

Бұл 2.11 - суретте дрон технологиясын қолдану арқылы жол инфрақұрылымын бақылаудың ғылыми маңыздылығы әртүрлі аспектілер бойынша пайыздық көрсеткішпен берілген. Ең жоғары маңыздылық қауіпсіздік (99%), дәлдік (95%) және ақпарат көлемі (90%) сияқты факторларға тиесілі, бұл дрон + AI жүйесінің сенімділігін дәлелдейді. Ал уақыт (60%), адам ресурсы (60%) және қаржылық тиімділік (55%) көрсеткіштері дрон технологиясының практикалық үнемділігін көрсетіп, оны дәстүрлі әдістерге балама ретінде қолдануға болатынын айғақтайды. Осылайша, дрон + AI + GIS интеграциясы жол инфрақұрылымын тиімді, қауіпсіз және үнемді бақылауға мүмкіндік беретіні дәлелденді.

ҚОРЫТЫНДЫ

Ғылыми зерттеу жұмысы жол инфрақұрылымын бақылау үшін дрон технологияларын қолданудың ғылыми және практикалық тиімділігі дәлелденді. Қазақстанда 96 000 км-ден астам жол бар, оның 35%-ы қанағаттанарлықсыз күйде. Пилоттық жоба аясында Алматы – Талғар тас жолының 150 км бөлігі дрон арқылы сканерленді. Нәтижесінде 500 - ден астам микрожарық тіркелді. Зерттеу барысында 3500 визуалды және сенсорлық мәлімет жиналды. eBee X дроны 1.8 см/пиксель кеңістіктік дәлдікпен жұмыс істеп, дәстүрлі 5 – 10 см дәлдікпен салыстырғанда бірнеше есе жоғары көрсеткіш көрсетті. DJI Phantom 4 RTK арқылы алынған деректердің координаталық қателігі ≤ 3 см деңгейінде болды. Дрондар тәулігіне 2 рет, 5 км радиуста ұшырылып, 78.5 км² аумақты қамтыды. Жиналған деректер Pix4D, DroneDeploy және Agisoft Metashape арқылы өңделіп, нақты 3D модельдер құрылды. Жол жабындарының тозуы 3 айда 12%-дан 23%-ға дейін артқаны тіркелді. Осы кезеңде жөндеуді қажет ететін аралық 1.5 км-ден 2.8 км-ге дейін ұлғайды.

Микрожарықтардың ұзындығы 2 – 40 см, тереңдігі 0.5 – 3 см аралығында өзгерді. Жасанды интеллект алгоритмдері ақауларды 92 – 95% дәлдікпен автоматты түрде анықтады. Дрон қолдану арқылы бақылау уақыты 10 күннен 4 күнге, ал адам ресурсы 20 адам/күннен 8 адам/күнге қысқарды.

Қаржылық шығын 100 шартты бірліктен 45-ке төмендеп, 55% үнем берді. Қауіпсіздік деңгейі де жоғарылап, қауіпті аймақтарда жұмысшылардың жарақат алу қаупі $\approx 0\%$ деңгейіне дейін азайды. Жел мен GPS сигналының әлсіздігі сияқты шектеулер болғанымен, олар техникалық шешімдер арқылы еңсерілуі мүмкін. Зерттеу дрон + AI + GIS кешенін инфрақұрылым мониторингіне енгізудің өзектілігін көрсетті. Болашақта Edge AI және машиналық оқыту жүйелері арқылы бақылауды толық автоматтандыру көзделіп отыр. Осылайша, бұл технология жол инфрақұрылымын басқаруда жаңа стандарт қалыптастыруға қабілетті.

ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

- 1 Iurchenko S., Iurchenko O. Social infrastructure as a factor of sustainable development of the territory //The Journal of VN Karazin Kharkiv National University. Series: International Relations. Economics. Country Studies. Tourism. – 2022. – №. 15. – С. 139-145. DOI: <https://doi.org/10.26565/2310-9513-2022-15-15>
- 2 Mujmule B. S. Economic and social infrastructure development: a case study. – Lulu. Com, 2016. https://books.google.kz/books?hl=ru&lr=&id=JBCBCwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA35&dq=Infrastructure+is+the+foundation+of+the+economic+and+social+development+of+any+state.&ots=URZTOzd6qM&sig=VKSzl2 - ksGdWvglZJr66jwDosE&redir_esc=y#v=onepage&q=Infrastructure%20is%20the%20foundation%20of%20the%20economic%20and%20social%20development%20of%20any%20state.&f=false
- 3 Ivanova E., Masarova J. Importance of road infrastructure in the economic development and competitiveness //Economics and management. – 2013. – Т. 18. – №. 2. – С. 263-274. <https://doi.org/10.5755/j01.em.18.2.4253>
- 4 Olson K. A., van der Ree R. Railways, roads and fences across Kazakhstan and Mongolia threaten the survival of wide-ranging wildlife //Handbook of road ecology. – 2015. – С. 472-478. <https://doi.org/10.1002/9781118568170.ch58>
- 5 Bazarbekova M. et al. Review of transportation modes in Kazakhstan region, Central Asia //Cogent Engineering. – 2018. – Т. 5. – №. 1. – С. 1450799. <https://doi.org/10.1080/23311916.2018.1450799>
- 6 Falade F. Quality control in road construction and maintenance. – 2013. <http://ir.unilag.edu.ng:8080/xmlui/handle/123456789/2816>
- 7 Astarita V. et al. A mobile application for road surface quality control: UNIQALroad //Procedia-Social and Behavioral Sciences. – 2012. – Т. 54. – С. 1135-1144. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2012.09.828>
- 8 Liu D., Lin M., Li S. Real-time quality monitoring and control of highway compaction //Automation in Construction. – 2016. – Т. 62. – С. 114-123. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2015.11.007>
- 9 Outay F., Mengash H. A., Adnan M. Applications of unmanned aerial vehicle (UAV) in road safety, traffic and highway infrastructure management: Recent advances and challenges //Transportation research part A: policy and practice. – 2020. – Т. 141. – С. 116-129. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2020.09.018>
- 10 Fan J., Saadeghvaziri M. A. Applications of drones in infrastructures: Challenges and opportunities //International Journal of Mechanical and Mechatronics Engineering. – 2019. – Т. 13. – №. 10. – С. 649-655. https://www.researchgate.net/profile/Jin-Fan-11/publication/336262417_Applications_of_Drones_in_Infrastructures_Challenges_and_Opportunities/links/5d974d84458515c1d393e0f1/Applications-of-Drones-in-Infrastructures-Challenges-and-Opportunities.pdf

- 11 Nevalainen N., Pellinen T. The use of a thermal camera for quality assurance of asphalt pavement construction //International journal of pavement engineering. – 2016. – T. 17. – №. 7. – C. 626-636. <https://doi.org/10.1080/10298436.2015.1007240>
- 12 J. Golrokh A., Gu X., Lu Y. Real-time thermal imaging-based system for asphalt pavement surface distress inspection and 3D crack profiling //Journal of Performance of Constructed Facilities. – 2021. – T. 35. – №. 1. – C. 04020143. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CF.1943-5509.0001557](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0001557)
- 13 Chen L. Y. et al. Assessment of asphalt concrete pavement quality by using infrared thermal imaging technology //Journal of Marine Science and Technology. – 2015. – T. 23. – №. 3. – C. 9. DOI: 10.6119/JMST-014-0327-6
- 14 Lee D., La W. G., Kim H. Drone detection and identification system using artificial intelligence //2018 International Conference on Information and Communication Technology Convergence (ICTC). – IEEE, 2018. – C. 1131-1133. DOI: [10.1109/ICTC.2018.8539442](https://doi.org/10.1109/ICTC.2018.8539442)
- 15 Alrayes F. S. et al. Artificial intelligence-based secure communication and classification for drone-enabled emergency monitoring systems //Drones. – 2022. – T. 6. – №. 9. – C. 222. <https://doi.org/10.3390/drones6090222>
- 16 Mukhamediev R. I. et al. Review of some applications of unmanned aerial vehicles technology in the resource-rich country //Applied Sciences. – 2021. – T. 11. – №. 21. – C. 10171. <https://doi.org/10.3390/app112110171>
- 17 Andrey B., Gani B., Alizhan T. LOCALIZATION OF UAV PRODUCTION IN THE TERRITORY OF THE REPUBLIC OF KAZAKHSTAN: PROBLEMS AND SOLUTIONS //Machine Intelligence Research. – 2024. – T. 18. – №. 1. – C. 330-338. <https://machineintelligenceresearchs.com/index.php/mir/article/view/30>
- 18 Uddin M. Z. Enhancing Road Infrastructure Monitoring: Integrating Drones for Weather-Aware Pothole Detection. – 2024. <https://hdl.handle.net/20.500.14242/158477>
- 19 Samadzadegan F. et al. Automatic Road Pavement Distress Recognition Using Deep Learning Networks from Unmanned Aerial Imagery //Drones. – 2024. – T. 8. – №. 6. – C. 244. <https://doi.org/10.3390/drones8060244>
- 20 Ranyal E., Sadhu A., Jain K. Road condition monitoring using smart sensing and artificial intelligence: A review //Sensors. – 2022. – T. 22. – №. 8. – C. 3044. <https://doi.org/10.3390/s22083044>
- 21 Mohan S. et al. Low-power drone-mountable real-time artificial intelligence framework for road asset classification //Transportation Research Record. – 2021. – T. 2675. – №. 1. – C. 39-48. <https://doi.org/10.1177/0361198120965170>
- 22 Guo M. et al. Intelligent extraction of road cracks based on vehicle laser point cloud and panoramic sequence images //Journal of Road Engineering. – 2024. – T. 4. – №. 1. – C. 69-79. <https://doi.org/10.1016/j.jreng.2024.01.004>
- 23 Ilipbayeva L. B. UTEBAYEVA DANA ZHOLDYBAYKYZY : дис. – Purdue University, 2023. <https://official.satbayev.university/download/documentPhd/30913/%C3%90%E2%80%9D%C3%90%C2%B8%C3%91%20%C3%91%20%C3%90%C2%B5%C3%91%E>

[2%82%AC%C3%91%E2%80%9A%C3%90%C2%B0%C3%91%E2%80%A0%C3%90%C2%B8%C3%91%20.pdf](#)

24 Sadenova M. A. et al. Study of unmanned aerial vehicle sensors for practical remote application of earth sensing in agriculture //Chemical Engineering Transactions. – 2023. – T. 98. – C. 243-248. <https://doi.org/10.3303/CET2398041>

25 Stokenberga A., Ochoa M. C. Unlocking the Lower Skies: The Costs and Benefits of Deploying Drones Across Use Cases in East Africa. – World Bank Publications, 2021. [https://books.google.kz/books?hl=ru&lr=&id=s40vEAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP1&dq=The+World+Bank+\(2021\)+report+emphasizes+the+economic+efficiency+of+drones+in+the+process+of+monitoring+road+infrastructure.&ots=pNOkPVSuml&sig=NBDfBLBJwlHEWPteq1LlEsJqaP8&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false](https://books.google.kz/books?hl=ru&lr=&id=s40vEAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP1&dq=The+World+Bank+(2021)+report+emphasizes+the+economic+efficiency+of+drones+in+the+process+of+monitoring+road+infrastructure.&ots=pNOkPVSuml&sig=NBDfBLBJwlHEWPteq1LlEsJqaP8&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false)

26 Umlauf R., Burchardt M. Infrastructure-as-a-service: Empty skies, bad roads, and the rise of cargo drones //Environment and Planning A: Economy and Space. – 2022. – T. 54. – №. 8. – C. 1489-1509. <https://doi.org/10.1177/0308518X221118915>

27 Budiharto W. et al. Mapping and 3D modelling using quadrotor drone and GIS software //Journal of Big Data. – 2021. – T. 8. – C. 1-12. <https://doi.org/10.1186/s40537-021-00436-8>

28 Yedilkhan D. et al. Intelligent obstacle avoidance algorithm for safe urban monitoring with autonomous mobile drones //Journal of Electronic Science and Technology. – 2024. – T. 22. – №. 4. – C. 100277. <https://doi.org/10.1016/j.jnlest.2024.100277>

ҚОСЫМША А

Инфрақұрылым мониторингіне арналған мемлекеттік стандарттар мен бағдарламалар:

1. Қазақстан Республикасының көлік - логистикалық әлеуетін дамытудың 2030 жылға дейінгі тұжырымдамасы. Бұл құжатта көлік инфрақұрылымын цифрландыру, оның ішінде дрондарды қолдану арқылы мониторинг жүргізу мәселелері қарастырылған;

2. "Нұрлы жол" инфрақұрылымды дамытудың 2020 – 2025 жылдарға арналған мемлекеттік бағдарламасы. Бағдарламада көлік және инфрақұрылым салаларын дамыту, сондай-ақ заманауи технологияларды, соның ішінде дрондарды пайдалану арқылы инфрақұрылым объектілерінің жағдайын бақылау қарастырылған;

3. Қазақстан Республикасының Индустрия және инфрақұрылымдық даму министрлігінің нормативтік құжаттары. Министрлік дрондарды қолдану арқылы инфрақұрылым объектілерін бақылау мен бағалауға қатысты әдістемелік нұсқаулықтар мен стандарттарды әзірлеуде;

4. Қазақстан Республикасының әуе кеңістігін пайдалану ережелері. Бұл ережелер дрондарды қолдану тәртібін, оның ішінде инфрақұрылым объектілерін бақылау мақсатында ұшу қауіпсіздігін қамтамасыз ету талаптарын белгілейді;

5. Қазақстан Республикасының экологиялық кодексі. Кодексте экологиялық мониторинг жүргізу, оның ішінде дрондарды пайдалану арқылы қоршаған ортаның жай-күйін бақылау мәселелері қамтылған.

ҚОСЫМША Б

Дрондарды қолдануға қатысты инфрақұрылымдық терминдер жинағы:

Инфрақұрылым – Елдің немесе аймақтың көлік, энергетика, байланыс, сумен жабдықтау және басқа да қоғамдық жүйелерінің жиынтығы;

Жай-күй мониторингі – Объектілердің қазіргі техникалық жағдайын үздіксіз бақылау және бағалау процесі;

БПЛА (дрон) – Басқару пунктінен қашықтан басқарылатын немесе автономды ұшатын ұшқышсыз аппарат;

Геодеректер – Жер бетіндегі нысандардың координаталары мен орналасуын сипаттайтын деректер;

Аэротүсірілім – Дрон немесе ұшақ арқылы биіктен бейне немесе суретке түсіру процесі;

Жол жамылғысы – Көлік жолының беткі қабаты, оның сапасы жол қозғалысының қауіпсіздігіне әсер етеді;

Техникалық инспекция – Құрылыс немесе жол объектілерінің техникалық талаптарға сәйкестігін тексеру процесі;

Қашықтықтан зондтау – Жер бетін зерттеу әдісі, дрон, спутник немесе басқа құрылғылар арқылы деректер жинау;

3D-модельдеу – Жол немесе ғимарат сияқты нысандардың үшөлшемді сандық бейнесін жасау процесі;

Ортофотосурет – Геометриялық түзетуден өткен жоғары дәлдіктегі аэрофотосурет;

Геоақпараттық жүйе (GIS) – Географиялық деректерді жинау, сақтау, талдау және көрсетуге арналған жүйе;

Цифрлық егіз – Нақты физикалық объектінің цифрлық көшірмесі;

Термоаналитика – Жылу ағындары арқылы инфрақұрылым объектілерінің ақауларын анықтау әдісі;

Ақау – Жол немесе құрылыс нысанындағы жарықтар, шұңқырлар сияқты ақаулықтар;

Визуалды тексеріс – Камера арқылы көрінетін бөлікті қарап, ақауларды анықтау процесі;

Радиус әрекет ету – Дронның басқару сигналын қабылдай алатын немесе дерек жинай алатын аумағы;

Автономды ұшу – Дронның адам көмегінсіз бағдарлама арқылы өздігінен ұшуы;

GPS-навигация – Дронның нақты координатасын анықтауға арналған жерсеріктік жүйе;

LiDAR – Лазерлік қашықтық өлшеу құрылғысы, нысандардың 3D бейнесін жасайды;

Жарық түсіру бұрышы – Камераның жолға қатысты еңкею бұрышы, бақылау дәлдігіне әсер етеді;

Шешім қабылдауды қолдау жүйесі – Жиналған деректер негізінде инфрақұрылымға қатысты шешім қабылдауға көмектесетін жүйе;

Топографиялық карта – Жер бедері мен инфрақұрылымды дәл бейнелейтін карта;

Сенсорлық жүктеме – Дронға орнатылған датчиктер мен камералардың техникалық салмағы;

Жиілік диапазоны – Дронның байланыс үшін пайдаланатын радиотолқын жиіліктері;

Мәліметтерді өңдеу – Жиналған деректерді талдау, өңдеу және сақтау процесі;

Бұлтты сақтау – Дрон арқылы алынған мәліметтерді интернеттегі серверде сақтау жүйесі;

Қауіпсіздік периметрі – Дронмен бақылау кезінде белгіленетін қауіпсіз аумақ;

Борттық жүйе – Дронның ішкі басқару және өлшеу құралдары;

Ақылды инфрақұрылым – Сенсорлар мен автоматтандырылған жүйелер арқылы өз жағдайын бақылайтын инфрақұрылым;

Талдау алгоритмі – Дроннан алынған деректер негізінде ақауларды анықтайтын есептеу әдісі.

ҒЫЛЫМИ ЖЕТЕКШІНІҢ ПІКІРІ

дипломдық жұмысқа

Тлеубеков Бек Ерланбекұлы

6B07104 - Electronic and Electrical Engineering

Тақырыбы: «Инфрақұрылымның жай-күйін бақылау және бағалау үшін дрондарды пайдалану»

Бұл дипломдық жұмыста инфрақұрылымның жай-күйін бақылау және бағалау үшін дрондарды пайдалану мәселелері қарастырылды. Инфрақұрылым объектілерінің тиімді мониторингі мен тексеру қабілетін арттыру, олардың нақты уақыттағы жағдайын бақылау және бағалау үшін дрондардың мүмкіндіктері зерттелді.

Бірінші бөлімде дрондардың инфрақұрылымның жай-күйін бақылау принциптері мен олардың негізгі қолдану салалары қарастырылды. Инфрақұрылым объектілерін бақылау үшін қажетті негізгі параметрлер, оның ішінде жолдар, көпірлер, ғимараттар және байланыс желілерінің жағдайын бақылау әдістері анықталды. Сондай-ақ, дрондардың тиімді жұмыс істеуі үшін оларды пайдалану кезінде қауіпсіздік шаралары мен инфрақұрылымды тексеру кезінде деректер жинау әдістері зерттелді.

Екінші бөлімде инфрақұрылымның жағдайын бақылау үшін дрондарды қолданудың мүмкіндіктері мен артықшылықтары нақты жағдайларда қарастырылды. Бұл бөлімде дрондарды пайдалану арқылы инфрақұрылымның бақылау процесін оңтайландыру, деректерді жинау тиімділігі және нақты уақыттағы мониторинг жасау әдістері зерттелді. Дрондар арқылы инфрақұрылымның күйін тексеру процесін автоматтандырудың артықшылықтары мен тиімділігі туралы нақты мысалдар келтірілді.

Үшінші бөлімде инфрақұрылымның жай-күйін бақылау мен бағалау үшін дрондарды пайдаланудың моделін жасау үшін арнайы бағдарламалық құралдардың имитациялық моделі талданды. Әртүрлі инфрақұрылым объектілерін бақылау үшін қолданылатын техникалық шешімдер мен бағдарламалық қамтамасыздандыру құралдары қарастырылды. Бұл бөлімде инфрақұрылымды тиімді мониторингтеу мақсатында дрондарды пайдаланудың оңтайландыру әдістері мен жаңа технологиялық жетілдіру жолдары зерттелді. Жұмыстың соңында инфрақұрылымның жағдайын бақылау үшін дрондарды пайдаланудың болашақтағы дамуы мен мүмкіндіктері туралы қорытындылар жасалынды.

Студент Тлеубеков Бек Ерланбекұлы дипломдық жұмысты жазу барысында жетекші нұсқаулығымен өз бетінше жұмыс істеу қабілетін көрсетті.

Дипломдық жұмыс "90/А/ өте жақсы" деп бағаланды, ал студент Тлеубеков Бек Ерланбекұлы 6B07104 - Electronic and Electrical Engineering

білім беру бағдарламасы бойынша «техника және технологиялар» бакалавры академиялық дәрежесіне ұсынамын.

Ғылыми жетекші

ЭТжҒТ каф. қауымдастырылған

профессоры, т.ғ.к.

_____ Абдықадыров А.А.

«22» 05 2025 ж.



Дипломдық жұмысқа

РЕЦЕНЗИЯ

Тлеубеков Бек Ерланбекұлы

6B07104 - Electronic and Electrical Engineering

Тақырыбы: «Инфрақұрылымның жай-күйін бақылау және бағалау үшін дрондарды пайдалану»

Орындалды:

- а) графикалық бөлімі 8 бет;
- б) түсіндірме жазбасы 28 бет.

ЖҰМЫСҚА ЕСКЕРТУ

Дипломдық жұмыста автор инфрақұрылымның жай-күйін бақылау және бағалау үшін дрондарды пайдалану мәселесін зерттейді. Бұл зерттеу дрондардың инфрақұрылымның тиімді мониторингін жүзеге асыруға, олардың нақты уақыттағы деректерді жинау қабілетін арттыруға және бақылау процесін оңтайландыруға бағытталған. Автор жұмысында дрондардың инфрақұрылымдарды тексеру мен бағалау кезінде қолдану тиімділігін, қауіпсіздігін және құнды деректерді алу мүмкіндіктерін зерттеген. Зерттеу жұмысының мақсаты — инфрақұрылымның жай-күйін бақылау үшін дрондарды пайдалану мүмкіндіктері мен олардың тиімділігін арттыру үшін қажетті технологиялық шешімдер мен жүйелерді анықтау.

Дипломдық жұмыста дрондардың инфрақұрылымның әртүрлі компоненттерін, оның ішінде жолдар, көпірлер, ғимараттар мен байланыс желілерін тексеру кезінде пайдалану артықшылықтары мен кемшіліктері егжей-тегжейлі қарастырылған. Жүйенің мүмкіндіктері мен тиімділігін есептеу, деректер жинау әдістері мен оларды талдау жолдары талданған. Сонымен қатар, жұмыста дрондар арқылы инфрақұрылымды бақылаудың экономикалық артықшылықтары мен мониторингті жүргізудегі үнемдеу мүмкіндіктері бағаланған.

Дипломдық жұмысты рәсімдеу жоғары деңгейде орындалған. Алайда, келесі ескертулерді атап өту керек:

1. Екінші тарауда дрондардың инфрақұрылымды бақылау тиімділігі мен артықшылықтары туралы салыстырмалы кесте жоқ;

2. Түсіндірме жазба мен графикалық бөлім оқу жұмыстарының талаптары мен стандарттарына сәйкес келеді. Дегенмен, кейбір графиктер мен диаграммалар нақты деректермен толықтырылса, жұмыс тиімдірек болар еді.

Түсіндірме жазба және графикалық бөлім оқу жұмыстарының талаптары

мен стандарттарына сәйкес келеді. Ескертулерге бірнеше артық жұмыс көлемін жатқызуға болады.

ЖҰМЫСТЫҢ БАҒАСЫ

Дипломдық жұмыс "95/А/ өте жақсы" орындалды, ал авторы Тлеубеков Бек Ерланбекұлы 6В07104 – Electronic and Electrical Engineering мамандығы бойынша "техника және технологиялар бакалавры" академиялық дәрежесін алуға лайық деп санаймын.

Ғ.Даукеев атындағы АЭЖБУ,
ЭҚЕЭЖжәнеЭТ кафедрасының меңгерушісі, PhD
Шыныбай Ж.С.



2025ж.

**Университеттің жүйе администраторы мен Академиялық мәселелер департаменті
директорының ұқсастық есебіне талдау хаттамасы**

Жүйе администраторы мен Академиялық мәселелер департаментінің директоры көрсетілген еңбекке қатысты дайындалған Плагиаттың алдын алу және анықтау жүйесінің толық ұқсастық есебімен танысқанын мәлімдейді:

Автор: Тлеубеков Бек Ерланбекұлы

Тақырыбы: Инфрақұрылымның жай-күйін бақылау және бағалау үшін дрондарды пайдалану

Жетекшісі: Асқар Абдыкадыров

1-ұқсастық коэффициенті (30): 8

2-ұқсастық коэффициенті (5): 3.1

Дәйексөз (35): 0.8

Әріптерді ауыстыру: 3

Аралықтар: 0

Шағын кеңістіктер: 8

Ақ белгілер: 0

Ұқсастық есебін талдай отырып, Жүйе администраторы мен Академиялық мәселелер департаментінің директоры келесі шешімдерді мәлімдейді :

☒ Ғылыми еңбекте табылған ұқсастықтар плагиат болып есептелмейді. Осыған байланысты жұмыс өз бетінше жазылған болып санала отырып, қорғауға жіберіледі.

☐ Осы жұмыстағы ұқсастықтар плагиат болып есептелмейді, бірақ олардың шамадан тыс көптігі еңбектің құндылығына және автордың ғылыми жұмысты өзі жазғанына қатысты күмән тудырады. Осыған байланысты ұқсастықтарды шектеу мақсатында жұмыс қайта өңдеуге жіберілсін.

☐ Еңбекте анықталған ұқсастықтар жосықсыз және плагиаттың белгілері болып саналады немесе мәтіндері қасақана бұрмаланып плагиат белгілері жасырылған. Осыған байланысты жұмыс қорғауға жіберілмейді.

Негіздеме:

2025-05-16

Күні



Кафедра меңгерушісі



Протокол

о проверке на наличие неавторизованных заимствований (плагиата)

Автор: Тлеубеков Бек Ерланбекұлы

Соавтор (если имеется):

Тип работы: Дипломная работа

Название работы: Инфрақұрылымның жай-күйін бақылау және бағалау үшін дрондарды пайдалану

Научный руководитель: Асқар Абдыкадыров

Коэффициент Подобия 1: 8

Коэффициент Подобия 2: 3.1

Микропробелы: 8

Знаки из здругих алфавитов: 3

Интервалы: 0

Белые Знаки: 0

После проверки Отчета Подобия было сделано следующее заключение:

☒ Заимствования, выявленные в работе, является законным и не является плагиатом. Уровень подобия не превышает допустимого предела. Таким образом работа независима и принимается.

☐ Заимствование не является плагиатом, но превышено пороговое значение уровня подобия. Таким образом работа возвращается на доработку.

☐ Выявлены заимствования и плагиат или преднамеренные текстовые искажения (манипуляции), как предполагаемые попытки укрытия плагиата, которые делают работу противоречащей требованиям приложения 5 приказа 595 МОН РК, закону об авторских и смежных правах РК, а также кодексу этики и процедурам. Таким образом работа не принимается.

☐ Обоснование:

2025-05-16

Дата



Заведующий кафедрой



Протокол

о проверке на наличие неавторизованных заимствований (плагиата)

Автор: Тлеубеков Бек Ерланбекұлы

Соавтор (если имеется):

Тип работы: Дипломная работа

Название работы: Инфрақұрылымның жай-күйін бақылау және бағалау үшін дрондарды пайдалану

Научный руководитель: Асқар Абдыкадыров

Коэффициент Подобия 1: 8

Коэффициент Подобия 2: 3.1

Микропробелы: 8

Знаки из здругих алфавитов: 3

Интервалы: 0

Белые Знаки: 0

После проверки Отчета Подобия было сделано следующее заключение:

☒ Заимствования, выявленные в работе, является законным и не является плагиатом. Уровень подобия не превышает допустимого предела. Таким образом работа независима и принимается.

☐ Заимствование не является плагиатом, но превышено пороговое значение уровня подобия. Таким образом работа возвращается на доработку.

☐ Выявлены заимствования и плагиат или преднамеренные текстовые искажения (манипуляции), как предполагаемые попытки укрытия плагиата, которые делают работу противоречащей требованиям приложения 5 приказа 595 МОН РК, закону об авторских и смежных правах РК, а также кодексу этики и процедурам. Таким образом работа не принимается.

☐ Обоснование:

2025-05-16

Дата



Сұңғат Марксұлы

проверяющий эксперт