

DOI: <https://doi.org/10.36719/2663-4619/118/159-170>

Kənan Əlizadə

Azərbaycan Dövlət Neft və Sənaye Universiteti
magistrant

<https://orcid.org/0009-0007-3377-4546>

kenane317@gmail.com

Pilotsuz uçuş aparatları (dronlar) vasitəsilə real vaxt rejimində monitoring sistemlərinin səmərəliliyinin artırılması yolları

Xülasə

Real vaxt rejimində monitoring sistemlərinin pilotsuz uçuş aparatları (dronlar) vasitəsilə effektivliyini artırmaq üçün bir sıra texnoloji və əməliyyat baxımından yanaşmalar mövcuddur. Əvvəla, AI əsaslı analiz alqoritmlərinin tətbiqi ilə obyektlərin avtomatik tanınması və anomaliyaların real vaxtda aşkarlanması mümkündür. Bu, insan müdaxiləsini minimuma endirir və cavab müddətini azaldır. İkinci əsas amil bulud və kənar hesablama texnologiyalarının istifadəsidir – məlumatlar lokal olaraq işlənərək şəbəkə gecikmələri və yük azaldılır.

Enerji səmərəliliyinin artırılması məqsədilə akkumulyator texnologiyalarında innovasiyalar və enerji istehlakını optimallaşdıran uçuş alqoritmləri tətbiq olunur. Eyni zamanda, swarm texnologiyası vasitəsilə çoxsaylı dronların koordinasiyalı fəaliyyəti geniş ərazilərin daha sürətli və tam əhatəli monitoringinə imkan verir.

5G və LoRaWAN kimi yüksək sürətli rabitə protokolları real vaxtda məlumat ötürülməsini dəstəkləyir. Bütün bu yanaşmaların inteqrasiyası nəticəsində dron əsaslı monitoring sistemləri daha çevik, etibarlı və səmərəli hala gəlir.

Açar sözlər: *Real vaxt monitoringi, dron texnologiyası, swarm koordinasiyası, enerji səmərəliliyi, AI analiz alqoritmləri, kənar hesablama, 5G rabitə sistemləri*

Kanan Alizadeh

Azerbaijan State Oil and Industry University

Master student

<https://orcid.org/0009-0007-3377-4546>

kenane317@gmail.com

Ways to Improve the Efficiency of Real-Time Monitoring Systems Using Drones

Abstract

There are several technological and operational approaches to enhancing the efficiency of real-time monitoring systems using unmanned aerial vehicles (drones). Firstly, the implementation of AI-based analysis algorithms enables automatic object recognition and real-time anomaly detection. This minimizes human intervention and reduces response time. Another key factor is the use of cloud and edge computing technologies, where data is processed locally to reduce network latency and load.

To improve energy efficiency, innovations in battery technologies and flight algorithms that optimize energy consumption are applied. Additionally, swarm technology allows multiple drones to operate in a coordinated manner, enabling faster and more comprehensive monitoring of large areas.

High-speed communication protocols such as 5G and LoRaWAN support real-time data transmission. The integration of all these approaches makes drone-based monitoring systems more agile, reliable, and efficient.

Keywords: *Real-time monitoring, drone technology, swarm coordination, energy efficiency, AI analysis algorithms, edge computing, 5G communication systems*

Giriş

Son illərdə pilotsuz uçuş aparatlarının (PUA-ların), yəni dronların tətbiqi real vaxt rejimində monitoring sistemlərində əsl inqilab yaradıb. Onların geniş əraziləri tez və dəqiq müşahidə etmək imkanları, ətraf mühitin nəzarəti, infrastrukturun yoxlanması və fəvqəladə hallara operativ cavab kimi sahələrdə böyük əhəmiyyət daşıyır. Süni intellekt, kənar hesablama və yüksək sürətli rabitə texnologiyalarının integrasiyası bu sistemlərin çevikliyini və etibarlılığını artıraraq, daha ağıllı və sürətli qərarverməyə şərait yaradır (Kritikal Solutions, n.d.).

Tədqiqat

Bu tədqiqatın məqsədi real vaxt rejimində monitoring sistemlərinin dronlar vasitəsilə səmərəliliyinin artırılması yollarını araşdırmaqdır. Əsas diqqət süni intellekt, kənar hesablama, swarm texnologiyası və enerji effektivliyi kimi müasir texnoloji həllərin tətbiqinə yönəldilmişdir.

Dronlarla real vaxt rejimində izləmə sistemlərinin səmərəliliyinin artırılması yolları

Dronlarla real vaxt rejimində izləmə sistemlərinin səmərəliliyinin artırılması yolları aşağıdakı əsas sahələr üzrə həyata keçirilə bilər. Bu sahələrin hər biri texnoloji, əməliyyat və təşkilatı baxımdan inkişaf etdirilərsə, müşahidə sistemlərinin effektivliyi əhəmiyyətli dərəcədə yüksələ bilər:

- ❖ Yüksək qətnaməli sensorların integrasiyası;
- ❖ Avtomatlaşdırılmış missiya planlaşdırılması və uçuş yönləndirilməsi;
- ❖ Süni intellekt və maşın öyrənməsi alqoritmləri;
- ❖ Bulud hesablama və kənar hesablama texnologiyalarının tətbiqi;
- ❖ Operator panel və idarəetmə interfeysinin təkmilləşdirilməsi;
- ❖ Çoxsaylı dronların koordinasiyası (Swarm Technology);
- ❖ Məlumat təhlükəsizliyinin gücləndirilməsi;
- ❖ Akkumulyator və enerji effektivliyinin təmin edilməsi;
- ❖ İntegrasiya olunmuş analitik platformalar;
- ❖ Tətbiq sahələrinə uyğunlaşma və testlər (Qurbanov, 2022, s. 75).

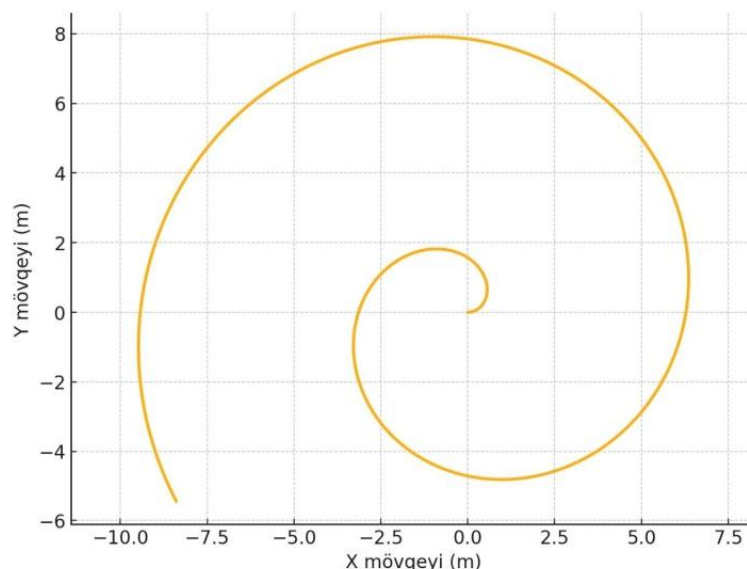
Yüksək qətnaməli sensorların integrasiyası

Yüksək qətnaməli sensorların dronlara integrasiyası, real vaxt rejimində izləmə sistemlərinin effektivliyini əhəmiyyətli dərəcədə artıran mühüm texnoloji inkişaflardan biridir. Bu cür sensorlar vasitəsilə əldə edilən məlumatlar həm vizual keyfiyyət baxımından, həm də analitik imkanlar baxımından ənənəvi metodlarla müqayisədə çox daha üstün nəticələr verir. Dronlara quraşdırılan yüksək qətnaməli optik kameralar, termal görüntüləyicilər, multispektral və hiperspektral sensorlar müxtəlif işıq dalğa uzunluqlarında görüntülər əldə etməyə imkan verir ki, bu da obyektlərin daha dəqiq tanınmasını və analizini mümkün edir.

Məsələn, təhlükəsizlik sahəsində yüksək qətnaməli RGB kameralar insan və obyektlərin dəqiq konturlarla müəyyən edilməsinə, sərhəd nəzarətində isə hərəkətdə olan hədəflərin izlənməsinə şərait yaradır. Kənd təsərrüfatı sahəsində multispektral sensorlar bitkilərin sağlamlıq vəziyyətinin təhlilinə imkan verərək xəstəliklərin erkən mərhələdə aşkarlanmasına səbəb olur. Termal kameralar isə gecə şəraitində və ya görünüşün zəif olduğu mühitlərdə istilik dəyişikliklərinə əsasən obyektlərin aşkarlanmasını təmin edir. Bu texnologiyalar, xüsusilə fəvqəladə hallarda (məsələn, yanğın və ya axtarış-xilasətmə əməliyyatlarında) kritik əhəmiyyət daşıyır.

Həmçinin yüksək qətnaməli sensorlar ilə təchiz olunmuş dronlar infrastruktur obyektlərinin (körpülər, enerji xətləri, sənaye qurğuları və s.) monitoringində də yüksək dəqiqliklə çatlar, korroziya və digər struktur qüsurları aşkar edə bilər. Sensorların bu şəkildə yüksək keyfiyyətli məlumat toplaması, eyni zamanda süni intellekt əsaslı analiz sistemləri ilə integrasiya olunduqda avtomatik qərarvermə və təhlükənin proqnozlaşdırılması kimi qabaqlayıcı tədbirlərin həyata keçirilməsini mümkün edir.

Yüksək qətnaməli sensorların dron sistemlərinə tətbiqi yalnız görüntünün aydınlığını deyil, həm də məlumatların funksional istifadəsini artırmaqla ümumi monitoring sisteminin səmərəliliyinə və təhlükəsizliyinə mühüm töhfə verir (Qurbanov, 2021, s. 35).



Şəkil 1. Dronun trayektoriyası

Avtomatlaşdırılmış missiya planlaşdırılması və uçuş yönləndirilməsi

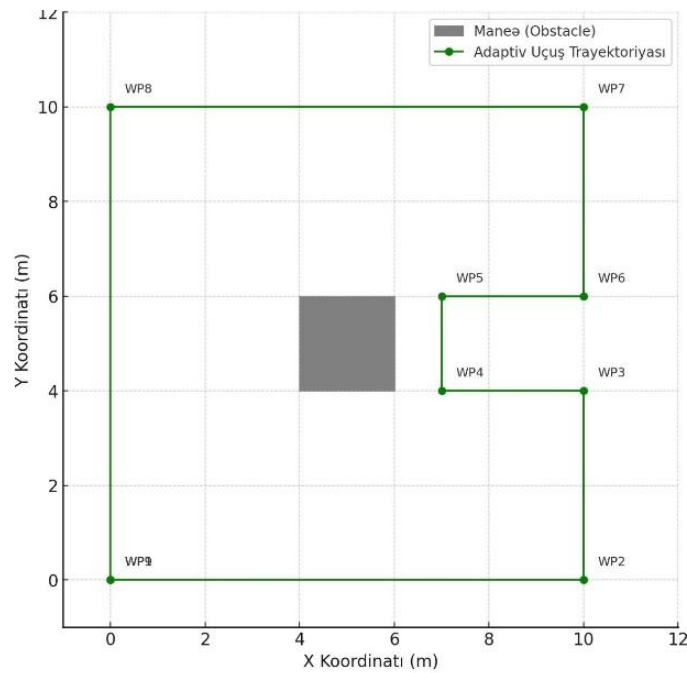
Avtomatlaşdırılmış missiya planlaşdırılması və uçuş yönləndirilməsi, pilotsuz uçuş aparatlarının (PUA/dronların) effektivliyini maksimum səviyyəyə çatdırmaq üçün tətbiq olunan qabaqcıl idarəetmə üsullarından biridir. Ənənəvi şəkildə operator tərəfindən əl ilə idarə olunan uçuşlar zamanla, enerji ilə və insan səhvləri ilə məhdudlaşır. Halbuki avtomatlaşdırılmış sistemlər süni intellekt və sensor məlumatları əsasında əvvəlcədən proqramlaşdırılmış və ya adaptiv şəkildə dəyişə bilən uçuş planlarını həyata keçirməyə imkan verir. Bu texnologiya xüsusilə geniş ərazilərin monitorinqi, kənd təsərrüfatı sahələrinin təhlili, sərhəd mühafizəsi, axtarış-xilasetmə və sənaye infrastrukturalarının yoxlanması kimi sahələrdə böyük üstünlüklər təqdim edir.

Avtomatlaşdırılmış missiya planlaşdırılması, dronun uçuş marşrutunun, hündürlüyünün, sürətinin, dayanma nöqtələrinin və məlumat toplama intervalllarının əvvəlcədən sistemə daxil edilməsi ilə həyata keçirilir. Bu planlar ya coğrafi informasiya sistemləri (CİS/GIS) ilə integrasiya olunmuş proqram təminatlarında (məsələn, DroneDeploy, Pix4D, UgCS və s.), ya da xüsusi hazırlanmış mobil tətbiqlər üzərindən idarə olunur. Sistem uçuş zamanı toplanmış məlumatlara əsasən trayektoriyayı real vaxtda da dəyişə bilər. Məsələn, əgər dron müəyyən bir maneə (bina, ağac və s.) aşkar edərsə, onun ətrafından keçmək üçün trayektoriyayı avtomatik şəkildə yenidən hesablaya bilər.

“Uçuş zonalarının optimallaşdırılması” prinsipi də mühüm rol oynayır. Ərazi qapalı, çətin keçilən və ya təhlükəli olduqda sistem həmin zonaları avtomatik istisna edir və alternativ marşrutlar hazırlayır. Bu texnologiya əsasən süni intellekt və maşın öyrənməsi modelləri ilə dəstəklənir. Dron, əvvəlki uçuş təcrübələrindən öyrənərək daha səmərəli marşrutlar təklif edə və enerji sərfiyyatını minimuma endirə bilər (StruxHub, n.d.).

Avtomatlaşdırılmış yönləndirmə sistemləri adətən GNSS (Qlobal Naviqasiya Peyk Sistemi) və IMU (İnertial Measurement Unit – İnerisial Ölçü Bloku) ilə birlikdə işləyərək dəqiq mövqeləndirmə təmin edir. Bu isə, xüsusilə də yüksək həssaslıq tələb edən ərazilərdə (məsələn, sənaye avadanlıqlarının üzərində) sabit və təhlükəsiz uçuş təmin edir. Əlavə olaraq, uçuş zamanı toplanmış məlumatlar real vaxtda baza stansiyaya və ya bulud sistemə ötürülür, burada onlar təhlil olunur və qərarvericilərə vizual və statistik hesabatlar şəklində təqdim edilir.

Avtomatlaşdırılmış missiya planlaşdırılması və uçuş yönləndirilməsi sistemləri, dronların funksionallığını artırmaqla yanaşı, insan resurslarından daha az asılılıq, əməliyyatların çevikliyi və təhlükəsizliyin yüksəldilməsi baxımından gələcək nəzarət və monitorinq texnologiyalarının əsas sütunlarından birini təşkil edir (Əliyev, 2023, s. 78).



Şəkil 2. Adaptiv avtomatlaşdırılmış missiya planlaşdırılması

Süni intellekt və maşın öyrənməsi alqoritmləri

Süni intellekt (AI) və maşın öyrənməsi (ML) alqoritmlərinin dronlarla real vaxt rejimində izləmə sistemlərinə integrasiyası, bu texnologiyaların səmərəliliyini, çevikliyini və ağıllı qərarvermə qabiliyyətini əhəmiyyətli dərəcədə artırır. Ənənəvi sistemlərdə toplanmış məlumatlar operator tərəfindən sonradan təhlil edilirdisə, AI və ML texnologiyaları sayəsində bu analizlər avtomatik və dərhal aparılır. Bu isə vaxt itkisini aradan qaldırmaqla yanaşı, insan səhvlərini də minimuma endirir.

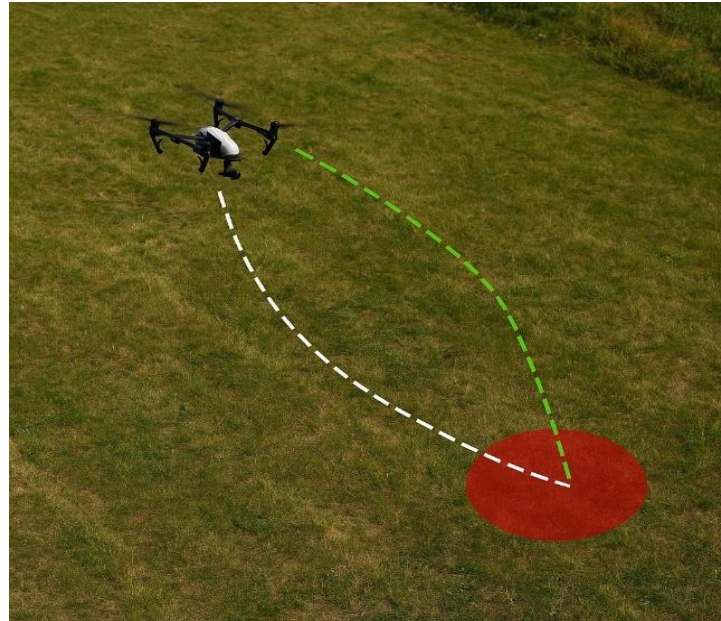
AI alqoritmləri vasitəsilə dronlar obyektləri tanıya, izah edə və təqib edə bilər. Məsələn, konvolusion neyron şəbəkələri (CNN) real vaxt video axınında insanları, nəqliyyat vasitələrini, heyvanları və digər obyektləri müəyyən edə bilər. Bu texnologiya şəhər müşahidəsində, sərhəd nəzarətində, hərbi kəşfiyyatda və fəvqəladə hallar zamanı axtarış-xilasetmə əməliyyatlarında geniş tətbiq olunur. Yol tanıma və obyekt izləmə (object detection and tracking) kimi funksiyalar vasitəsilə hədəf dron tərəfindən müəyyən olunduqdan sonra hərəkət trayektoriyası təhlil edilir və sistem təhdidin səviyyəsini qiymətləndirə bilər.

Maşın öyrənməsi alqoritmləri, dronların topladığı böyük həcmdə məlumatlar üzərində məşq etdirilərək gələcəkdə daha dəqiq proqnozlar və qərarlar verməyə imkan yaradır. Məsələn, SVM (Support Vector Machine), Random Forest, KNN (K-Nearest Neighbors) və dərin öyrənmə modelləri əvvəlki məlumatlar üzərində təlim alaraq dronun mühitdə hansı davranışı seçməli olduğunu müəyyən edir. Əgər müəyyən ərazidə təkrarlanan nümunələr müşahidə olunursa (məsələn, tez-tez hərəkət edən avtomobillər və ya insanlar), sistem bu sahəyə xüsusi diqqət ayırır və resursların bölüşdürülməsini optimallaşdırır.

AI sistemləri eyni zamanda anomaliya aşkarlanması (anomaly detection) kimi kritik funksiyaları yerinə yetirə bilər. Bu xüsusilə təhlükəsizlik və nəzarət sahələrində önəmlidir. Məsələn, əgər müəyyən bölgədə normaldan kənar hərəkət və ya obyekt aşkarlansa, dron dərhal həmin istiqamətə yönləndirilir və real vaxt hesabatı təqdim olunur.

AI və ML həmçinin trayektoriyanın optimallaşdırılması və enerji idarəetməsi sahələrində də istifadə olunur. Dronların hansı marşrutla daha az enerji sərf edərək daha çox məlumat toplaya biləcəyi AI alqoritmləri ilə öncədən hesablanı bilər. Bu, batareya ömrünün effektiv istifadəsi və missiyaların daha uzun müddət davam etməsi baxımından önəmlidir.

Süni intellekt və maşın öyrənməsi dron izləmə sistemlərini sadə müşahidə vasitəsindən ağıllı analiz və reaksiya verən sistemlərə çevirir. Bu texnologiyalar sayəsində dronlar yalnız görüntü toplayan deyil, analiz edən, qərar verən və tədbir görən müstəqil texnoloji vahidlərə çevrilir. İstəyirsinizsə, bu prosesi vizual şəkildə də təsvir edə bilərəm (Vasil'yev, Novikov, 2020, s. 76).



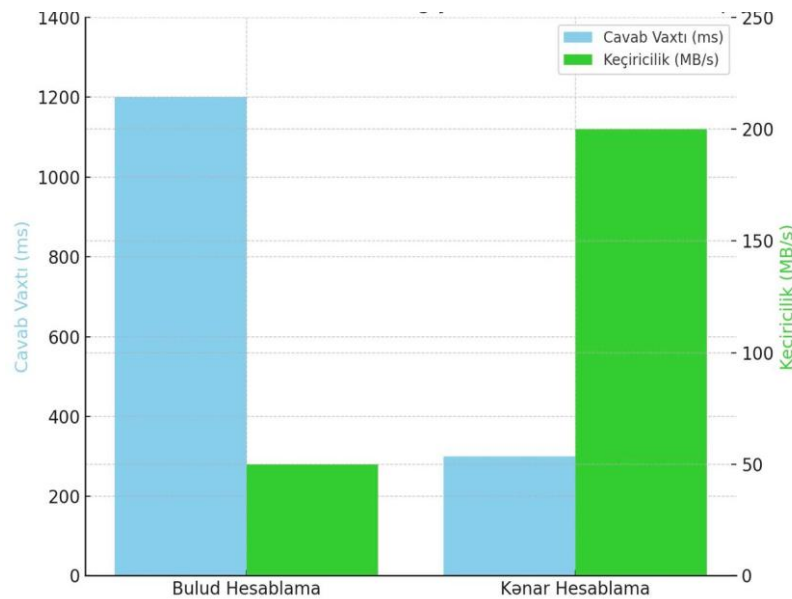
Şəkil 3. Təhlükəni aşkar edərək ətrafından manevr edən dron

Bulud hesablama və kənar hesablama texnologiyalarının tətbiqi

Bulud hesablama və kənar hesablama texnologiyalarının real vaxt rejimində izləmə sistemlərində tətbiqi, dron texnologiyalarının çevikliyini, sürətini və analitik imkanlarını nəzərəcarpacaq dərəcədə artırır. Ənənəvi sistemlərdə toplanan məlumatların mərkəzləşdirilmiş serverlərə ötürülərək emal edilməsi zaman və resurs baxımından itkilərə səbəb ola bilər. Lakin bulud hesablama texnologiyası bu prosesi avtomatlaşdıraraq, dronlardan gələn böyük həcmdə video, şəkil və sensor məlumatlarını uzaq, yüksək performanslı serverlərdə saxlayır və süni intellekt alqoritmləri ilə dərhal emal edir. Bu yanaşma imkan verir ki, bir neçə bölgədən eyni vaxtda məlumat toplayan dronlar real vaxtda mərkəzləşdirilmiş analize cəlb edilsin və nəticələr əsas qərarverici qurumlara ötürülsün.

Kənd təsərrüfatından tutmuş hərbi izləmə əməliyyatlarından bir çox sahədə, bulud hesablama sayəsində multispektral görüntülərin təhlili, məhsuldarlıq modelləşdirilməsi və təhlükə səviyyələrinin qiymətləndirilməsi kimi kompleks vəzifələr saniyələr içində yerinə yetirilə bilər. Digər tərəfdən, kənar hesablama texnologiyası, məlumatların mərkəzə göndərilmədən dərhal dronun özündə və ya ona yaxın lokal cihazda emal olunmasını təmin edir. Bu xüsusilə o hallarda əhəmiyyət kəsb edir ki, dronlar internet bağlantısı zəif olan bölgələrdə fəaliyyət göstərir və ya qərarların dərhal verilməsi tələb olunur. Məsələn, sərhəd boyu patrul edən bir dron qeyri-adi hərəkət müşahidə etdikdə, həmin görüntü cihazın özündə yerləşən maşın öyrənməsi modeli ilə təhlil olunur və şübhəli obyekt aşkarlandığında xəbərdarlıq signalı birbaşa yerli təhlükəsizlik qrupuna ötürülür. Bu halda bulud serverlərinə ehtiyac qalmır, qərar yerində və dərhal verilir (Elisair, n.d.).

Lakin uzunmüddətli analiz və hesabatlar üçün bu məlumatlar sonradan bulud mühitinə ötürülərək arxivləşdirilə bilər. Həm bulud, həm də kənar hesablama birlikdə tətbiq olunduqda isə bu sistemlər yüksək səmərəlilik, az gecikmə, enerji qənaəti və çevik məlumat emalı baxımından ideal bir hibrid model meydana gətirir. Beləliklə, izləmə sistemlərinin operativliyi və funksionallığı süni intellekt və bu cür hesablama modellərinin vəhdəti ilə yeni bir mərhələyə yüksəlir (D'yakov, 2021, s. 45-47).



Şəkil 4. Bulud və kənar hesablama texnologiyalarının performans müqayisəsi

Operator panel və idarəetmə interfeysinin təkmilləşdirilməsi

Operator panel və idarəetmə interfeysinin təkmilləşdirilməsi, dronların real vaxt izləmə sistemlərində istifadəçi təcrübəsini artırmaq, qərarverməni sürətləndirmək və ümumi əməliyyat səmərəliliyini yüksəltmək baxımından kritik əhəmiyyət daşıyır. Bu sahədəki texnoloji inkişafлар təkcə vizual interfeyslərin gözəlləşdirilməsi ilə kifayətlənmir, eyni zamanda məlumatların daha funksional və interaktiv şəkildə təqdim olunması, süni intellektlə inteqrasiya olunmuş idarəetmə mexanizmlərinin yaradılması və çox dronlu idarəetmədə insan faktoru yükünün azaldılması kimi əsas funksiyaları da əhatə edir.

Müasir operator panelləri artıq sadə xəritə əsaslı görüntülərlə məhdudlaşmır. Bu interfeyslərdə real vaxtda yüksək keyfiyyətli video axını, dronun mövqeyi, sürəti, uçuş hündürlüyü, akkumulyator səviyyəsi və sensor məlumatları eyni anda vizuallaşdırıla bilər. İnteqrasiya olunmuş idarəetmə paneli vasitəsilə operator birbaşa interaktiv xəritə üzərində drona yeni tapşırıq verə, trayektoriyasını dəyişə və ya təcili qayıtma əmrini göndərə bilər. Bu cür interfeyslər adətən GIS (Coğrafi İnformasiya Sistemləri) ilə inteqrasiya olunur ki, bu da istənilən ərazi haqqında detallı topoqrafik və meteoroloji məlumatların əldə olunmasını mümkün edir.

Süni intellekt ilə təchiz olunmuş idarəetmə panelləri operatorlara sistemin öz təhlil nəticələrini təqdim etməsinə və təkliflər verməsinə imkan yaradır. Məsələn, əgər dron müəyyən ərazidə təkrarlanan hərəkət və ya anomal davranış aşkar edirsə, paneldə avtomatik xəbərdarlıq görünür və istifadəçiyə həmin sahəyə yönəlmək üçün alternativ trayektoriya təklif olunur. Eyni zamanda səsli xəbərdarlıqlar, rəng kodlaşdırılmış risk zonaları, təhlükəsizlik xəbərdarlıqları, avtomatik loqaritmik analizlər və təhlükənin proqnozlaşdırılması kimi modullar istifadəçiyə çevik və məlumatlı qərarvermə imkanı verir.

Təkmilləşdirilmiş interfeyslər həmçinin çoxlu dronların eyni anda idarə olunmasına da şərait yaradır. Operator bir mərkəzdən müxtəlif missiyalar üzrə fərqli dronlara nəzarət edə bilər, onların fəaliyyətini izləyib təhlil edə və birindən digərinə resurs yönləndirə bilər. Bu texnologiya xüsusilə geniş ərazilərin eyni anda monitorinqini tələb edən kənd təsərrüfatı, sərhəd nəzarəti və təbii fəlakətlərin qiymətləndirilməsi sahələrində səmərəliliyi artırır.

Operator panel və idarəetmə interfeysinin təkmilləşdirilməsi yalnız funksionallıq və vizual rahatlıq deyil, eyni zamanda qərarların daha sürətli, daha dəqiq və daha təhlükəsiz qəbul edilməsini təmin edən texnoloji transformasiyadır. Bu işə dron sistemlərinin gələcəkdə daha geniş tətbiq sahələrinə inteqrasiyasını təmin edir. İstəsən, bu sistemi vizual olaraq da göstərə bilərəm (Kumari, Gosula, Lokhande, 2024, p. 24).

Operator paneli üzrə təkmilləşdirmə Cədvəl 1.

Modul / Funksiya	Təkmilləşdirilmiş Xüsusiyyətlər	Əldə olunan Üstünlüklər
İnteraktiv Xəritə İdarəetməsi	GIS integrasiyası, real vaxtda koordinat yenilənməsi	Ərazinin dəqiq təhlili və vizual nəzarət
Video Axını Monitorinqi	HD/4K axın, gecə-gündüz rejimi, çoxdronlu görüntülmə	Obyektlərin aydın müşahidəsi və təhlili
Sensor Məlumatlarının Vizualı	Temperatur, nəm, hava axını, GPS, LiDAR integrasiyası	Mühitə dair real vaxt təhlil və risklərin aşkarlanması
Süni İntellekt Analizi	CNN, YOLO, obyekt tanıma və risk qiymətləndirmə alqoritmləri	Təhlükələrin avtomatik aşkarlanması və reaksiya
Təhlükə Xəbərdarlıqları	Səsli/vizual siqnallar, rəng kodları, prioritetli bildirişlər	Operatorun sürətli və düzgün qərar verməsi
Trayektoriya Dəyişimi Sistemi	AI əsaslı yönləndirmə, maneə ətrafından keçmə, enerji optimizasiyası	Missiyanın təhlükəsiz və səmərəli tamamlanması
Tapşırıq Verilməsi Modulu	Dronlara fərdi və ya qrup tapşırıqları, avtomatik bölüşdürmə	Koordinasiyalı və sürətli əməliyyat icrası
Çox Dron Nəzarəti	Paralel idarəetmə, real vaxt status paneli, yük balanslaşdırması	Eyni anda böyük sahənin izlənməsi və idarəetmə çevikliyi
İstifadəçi İnterfeysi Dizaynı (UI)	Sadələşdirilmiş dizayn, fərdiləşdirilə bilən menyular, qaranlıq/ışıq rejimi	Operator üçün rahat istifadə və azaldılmış təlim ehtiyacı
Hesabat və Loglama Modulu	Uçuş tarixçəsi, fəaliyyət analizi, PDF/CSV ixrac	Məlumatların arxivləşdirilməsi və qərar dəstəkləyici analitik imkanlar

Çoxsaylı dronların koordinasiyası (Swarm Technology)

Çoxsaylı dronların koordinasiyası – Swarm Technology (qısa olaraq “svorm texnologiyası”) – müasir pilotsuz uçuş aparatlarının kollektiv şəkildə sinxron və adaptiv fəaliyyət göstərməsinə imkan verən yüksək səviyyəli texnoloji yanaşmadır. Bu texnologiya təbiətdəki qarışqalar, arılar və quş sürülərinin davranış modellərindən ilham alaraq hazırlanmışdır. Məqsəd odur ki, bir-birindən müstəqil olan çoxsaylı dronlar eyni anda eyni məqsədə xidmət edən bir sistem daxilində qarşılıqlı əlaqədə çalışsın və mərkəzləşdirilməmiş, lakin koordinasiyalı hərəkət forması təmin olunsun. Hər bir dron lokal olaraq ətraf mühitini təhlil edir, digər dronların mövqeyi və davranışı ilə uyğunlaşır və qərar qəbul edərkən qlobal komanda əmrindən asılı olmadan çevik hərəkət edə bilər.

Bu texnologiyanın əsasını təşkil edən swarm alqoritmləri – məsələn, “boid modeli”, “flocking behavior”, “leader-follower” və ya “decentralized coordination” modelləri – dronlara bir-biri ilə real vaxtda məlumat mübadiləsi aparmaqla sabit formasiya saxlamaq, qarşılıqlı toqquşmadan yayınmaq və dinamik tapşırıqları adaptiv şəkildə bölüşdürmək imkanı verir. Belə yanaşma xüsusilə geniş ərazilərin paralel monitorinqi və ya tapşırıq bölgüsünün zəkalı şəkildə paylanması tələb olunan əməliyyatlarda istifadə olunur. Məsələn, axtarış-xilasetmə əməliyyatlarında swarm texnologiyası ilə təchiz edilmiş dronlar itkin düşmüş şəxslərin axtarışını bir-birindən müstəqil şəkildə, lakin koordinasiyalı şəkildə apararaq vaxt və resurslara qənaət edə bilər.

Bu texnologiyanın ən böyük üstünlüklərindən biri mərkəzsiz idarəetmə prinsipidir. Əgər sistemdə bir və ya bir neçə dron sıradan çıxarsa belə, digər dronlar vəziyyəti qiymətləndirərək öz aralarında yeni planlama edə bilər və missiyanı davam etdirə bilirlər. Bu, əməliyyatın fasiləsizliyini və texniki davamlılığını təmin edir. Digər vacib üstünlük isə formasiya uçuşlarıdır – dronlar müxtəlif formalarda (V şəkilli, sıra, halqa, grid və s.) sinxron hərəkət edərək həm estetik görüntülər yarada, həm də obyektlərin sistemli monitorinqini təmin edə bilirlər (Sniffer Robotics, n.d.).

Texniki baxımdan swarm texnologiyasının effektivliyi sabit və aşağı gecikməli kommunikasiya protokollarından asılıdır. WiFi Direct, 5G və mesh şəbəkə texnologiyaları vasitəsilə dronlar bir-biri ilə məlumat mübadiləsi aparır və reaksiya zamanları minimuma endirilir. Eyni zamanda, süni intellekt və kənar hesablama imkanlarının bu sistemlərə inteqrasiyası sayəsində dronlar artıq öz üzərində real vaxt analizlər apararaq qərar verə bilər. Bu isə bulud serverlərinə ehtiyacı azaldır və cavab sürətini artırır.

Çoxsaylı dron koordinasiyası kənd təsərrüfatında məhsul vəziyyətinin geniş sahələr üzrə eyni vaxtda monitorinqi, meşə yanğınlarının erkən aşkarlanması, şəhər infrastrukturunun yoxlanması, sərhəd nəzarəti, ekoloji tədqiqatlar və logistik daşımalarda səmərəli şəkildə tətbiq oluna bilər. Beləliklə, swarm texnologiyası pilotsuz sistemlərin təkamülündə yeni mərhələni təşkil edir və yaxın gələcəkdə mülki, sənaye və hərbi sahələrdə genişmiqyaslı tətbiq imkanlarına sahib olacaq (Askarzadeh, Bridgelall, 2025, p. 71).

Swarm texnologiyası koordinasiya modelləri

Cədvəl 2.

Model	İdarəetmə Tipi	Əlaqə Tipi	Üstünlüklər	Çatışmazlıqlar
Boid Modeli	Tam mərkəzsiz	Yerli	Sadə və çevik davranış, dinamik uyğunlaşma	Çətin planlama və məsafə saxlamada qeyri-müəyyənlik
Çətin planlama və məsafə saxlamada qeyri-müəyyənlik	Yarı-mərkəzsiz	Yerli	Formasiya saxlamaq və sinxron hərəkət	Yönsüz davranışların qarşısının alınması çətindir
Leader-Follower	Mərkəzli	Mərkəzi	Effektiv istiqamətləndirmə və idarəetmə	Liderin sıradan çıxması bütün sistemi təsir edə bilər
Decentralized Coordination	Tam mərkəzsiz	Yerli	Məhdud resurslarla davamlı fəaliyyət	Sinxronizasiya çətin ola bilər
Grid-based Swarm	Yarı-mərkəzsiz	Yerli + koordinasiyalı	Ərazilərin səmərəli bölüşdürülməsi	Hərəkət çevikliyi aşağı ola bilər

Akkumulyator və enerji effektivliyinin təmin edilməsi

İlk mərhələdə akkumulyator texnologiyasının seçimi kritik rol oynayır. Hal-hazırda ən çox istifadə olunanlar litium-polimer (Li-Po) və litium-ion (Li-ion) batareyalardır. Li-Po batareyalar yüksək enerji sıxlığına və yüngüllüyə görə sürətli manevrlər üçün ideal olsa da, Li-ion batareyalar daha uzunmüddətli enerji təmin edir və dözümlüdür. Son illərdə isə solid-state (bərk-hal) batareyalar, hidrogen yanacaq hüceyrələri və günəş enerjisi ilə dəstəklənən sistemlər kimi alternativ enerji mənbələri üzərində tədqiqatlar intensivləşib.

Enerji effektivliyinin artırılması üçün tətbiq olunan texnoloji üsullardan biri də enerji idarəetmə sistemləridir (Battery Management Systems – BMS). Bu sistemlər batareyanın real vaxtda doluluq səviyyəsini, temperaturunu və gərginliyini izləyərək onun təhlükəsiz və balanslı şəkildə istifadəsini təmin edir. BMS həmçinin dronun enerji sərfiyyatını optimallaşdırmaq üçün müxtəlif modulların iş rejimini tənzimləyə və lazımsız enerji itkisinin qarşısını ala bilər.

Uçuş trayektoriyasının optimallaşdırılması və yükün balanslaşdırılması da enerji qənaətində mühüm rol oynayır. Əgər dronun uçuş planı hava axınları və relyefə uyğun olaraq proqramlaşdırılarsa, o zaman enerji sərfi azalar və uçuş məsafəsi artar. Eyni zamanda, dronun daşdığı avadanlıqların çəkisi və yerləşmə mərkəzi düzgün tənzimlənsə, bu da enerji itkilərinin qarşısını alır.

Modul əsaslı enerji istifadəsi də başqa bir effektiv yanaşmadır. Bu üsulda yalnız aktiv istifadə edilən hissələr (kamera, sensor, rabitə modulu və s.) enerji ilə təmin olunur, istifadə edilməyən modullar isə avtomatik şəkildə enerji qənaət rejiminə keçir. Bu yanaşma xüsusilə uzunmüddətli müşahidə missiyalarında əhəmiyyətlidir.

Enerji yığıma və bərpaetmə üsulları, məsələn, hava axınlarından istifadə ilə mexaniki enerjinin elektrikə çevrilməsi və ya günəş panelləri ilə uçuş zamanı enerji toplama texnologiyaları da enerji effektivliyini artırmaq üçün mühüm alternativlər hesab olunur (Əliyev, 2023, s. 34).

Akkumulyator və enerji effektivliyi məsələsi yalnız batareya texnologiyası ilə məhdudlaşmır. Bu, eyni zamanda sistemli uçuş planlaması, intellektual enerji idarəetməsi və texnoloji integrasiya ilə kompleks şəkildə yanaşılmalı olan mühüm funksional sahədir. Gələcəyin dron sistemləri məhz bu cür integrasiya olunmuş enerji strategiyaları ilə daha uzunömürlü, etibarlı və iqtisadi baxımdan səmərəli olacaq.

Məlumat təhlükəsizliyinin gücləndirilməsi, dronlarla real vaxt rejimində izləmə sistemlərində toplanan, ötürülən və analiz olunan məlumatların qorunması üçün həyati əhəmiyyət daşıyan bir mərhələdir. Çünki bu sistemlər həm mülki, həm də hərbi məqsədlərlə istifadə olunduğundan, əldə edilən vizual və sensor məlumatlar strateji və konfidensial ola bilər. İnformasiyanın üçüncü tərəflərin əlinə keçməsi ciddi təhlükəsizlik və məxfilik problemlərinə səbəb ola bilər. Buna görə də dron sistemlərində istifadə edilən məlumat təhlükəsizliyi yanaşmaları çoxsəviyyəli və hərtərəfli şəkildə dizayn edilməlidir.

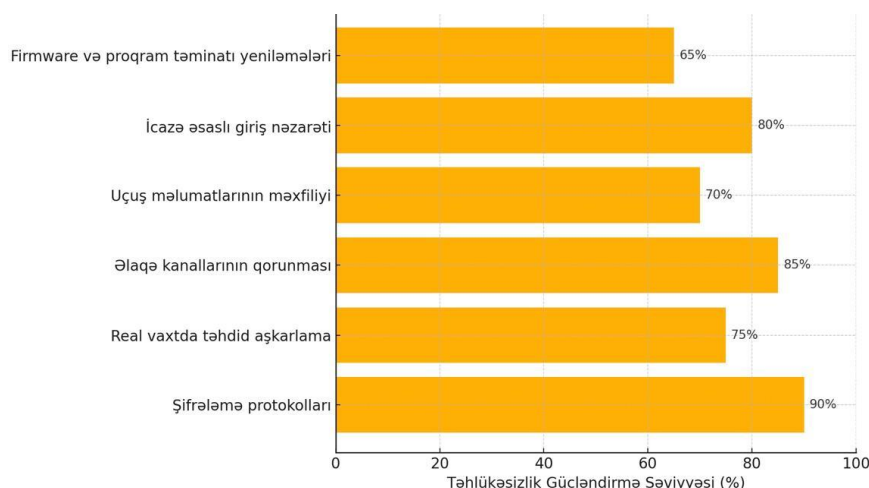
İlk növbədə, məlumatların şifrələnməsi (encryption) əsas rol oynayır. Dronlar tərəfindən toplanan video görüntülər, sensor məlumatları və digər telemetriya axınları ötürülməzdən əvvəl AES-256 kimi güclü simmetrik şifrələmə alqoritmləri ilə kodlaşdırılır. Bu məlumatlar bulud serverlərinə və ya digər dronlara ötürülərkən TLS (Transport Layer Security) və ya VPN tunelləri vasitəsilə qorunur. Beləliklə, məlumatların ötürülməsi zamanı onların üçüncü tərəflər tərəfindən kəsilməsi və ya dəyişdirilməsi riski əhəmiyyətli dərəcədə azaldılır.

İkincisi, identifikasiya və autentifikasiya sistemləri məlumat təhlükəsizliyinin digər əsas sütununu təşkil edir. Hər bir dron, operator və server vahidi sistemə daxil olmaq üçün unikal rəqəmsal sertifikatlara, tokenlərə və ya iki addımlı doğrulama mexanizmlərinə malik olmalıdır. Bu, yalnız icazəsi olan istifadəçilərin sistemə girişini təmin edir və qeyri-qanuni giriş cəhdlərinin qarşısını alır. Bununla yanaşı, blokçeyn texnologiyasının tətbiqi vasitəsilə məlumatların dəyişdirilə bilməyən və izlənə bilən formada saxlanması da son illərdə geniş tətbiq tapır. Bu texnologiya uçuş məlumatlarının, sensor qeydlərinin və qərar jurnalının tam şəffaf şəkildə qeydə alınmasına və sonradan yoxlanmasına şərait yaradır.

Üçüncü səviyyədə, real vaxt təhlükə aşkarlama və anomaliya izləmə sistemləri yerləşdirilməlidir. Süni intellekt modelləri (məsələn, anomaly detection alqoritmləri) şəbəkədə və cihazlarda normaldan kənar hərəkətləri müəyyənəşdirərək dərhal təhlükə xəbərdarlığı verə bilər. Bu, DDoS hücumlarının qarşısını almaqda, içəridən gələn sızıntıların aşkarlanmasında və sistemdə qeyri-qanuni fəaliyyətlərin qarşısının alınmasında çox effektivdir.

Təhlükəsizlik üzrə təlim və protokol sistemləri də vacib yer tutur. Operatorlar və texniki heyət üçün mütəmadi olaraq kibertəhlükəsizlik təlimləri təşkil olunmalı, sistemlər üçün isə fəvqəladə hallar (məsələn, məlumat sızması və ya sistemin hack olunması) üzrə reaksiya protokolları və ehtiyat planları (contingency plans) hazırlanmalıdır. Bu, informasiya təhlükəsizliyi pozulduqda itkilərin minimuma endirilməsini təmin edir.

Məlumat təhlükəsizliyinin gücləndirilməsi təkcə texnoloji yox, həm də təşkilati, hüquqi və əməliyyat səviyyəsində kompleks yanaşma tələb edir. Dron sistemlərinin davamlılığı və etibarlılığı üçün bu yanaşmaların tətbiqi müasir dövrdə zərurətdən də artıq bir şərtə çevrilmişdir (Rzayev, 2020, s. 85).



Şəkil 6. Dronlarda məlumat təhlükəsizliyinin gücləndirilməsi üzrə prioritet sahələr

İnteqrasiya olunmuş analitik platformalar

İnteqrasiya olunmuş analitik platformalar dron texnologiyalarında çevik idarəetmənin, real vaxtda təhlilin və effektiv qərar qəbuletmənin aparıcı alətlərindən biri kimi çıxış edir. Müasir dövrdə çoxsaylı dronların koordinasiya fəaliyyəti zamanı müxtəlif sensorlardan, kameradan və digər müşahidə modullarından toplanan məlumatlar yüksək həcmdə və sürətli şəkildə axın təşkil edir. Bu məlumatların ayrı-ayrılıqda və ya yalnız lokal cihazlarda təhlili qeyri-effektiv olmaqla yanaşı, əməliyyat qərarlarının gecikməsi ilə nəticələnə bilər. Məhz bu səbəbdən, dron sistemlərinin analitik imkanları birləşdirən inteqrasiya olunmuş platformalar vasitəsilə idarə olunması zərurətə çevrilmişdir.

Bu platformalar dronlardan gələn GPS koordinatları, istilik görüntüləri, multispektral məlumatlar, video axınları və digər sensor dataalarını vahid informasiya mərkəzində toplayaraq, onların həm real vaxtda, həm də sonradan analizinə imkan verir. Analitik platformalar bu məlumatları avtomatik şəkildə təsnif edir, anomaliyaları müəyyən edir, hədəf obyektləri aşkar edir və eyni zamanda pilot və ya operatorlara vizual panellər vasitəsilə informasiyanı çatdırır. Məsələn, meşə yanğınlarının aşkarlanması üçün istifadə olunan dronlar termal kameralar vasitəsilə temperatur dəyişikliklərini müşahidə edir və bu dəyişiklikləri platforma üzərindən proqnoz modelləri ilə birləşdirərək operatorlara kritik zonaları göstərir. İnteqrasiya olunmuş analitik platformalar həmçinin swarm texnologiyası ilə işləyən çoxsaylı dronların koordinasiyasını daha da təkmilləşdirir. Bu sistemlər hər bir dronun mövqeyini, trayektoriyasını, enerji səviyyəsini və yerinə yetirilən tapşırıqları izləyərək onların ümumi fəaliyyətdə balanslı və optimal şəkildə iştirakını təmin edir. Eyni zamanda platforma daxilində süni intellekt və maşın öyrənməsi alqoritmləri tətbiq edilməklə uçuş ssenariləri təhlil edilir, davranış modelləri öyrədilir və gələcək əməliyyatlar üçün qabaqlayıcı qərarlar formalaşdırılır (ScienceDirect, 2024).

Belə platformalar məlumat təhlükəsizliyi baxımından da üstünlüklərə malikdir. Dronlardan ötürülən bütün məlumatlar şifrələnmiş kanallarla ötürülür, identifikasiya sistemləri vasitəsilə məlumatlara icazəsiz girişlərin qarşısı alınır və audit mexanizmləri ilə əməliyyatlar qeydə alınır. Bu isə dronların istifadəsinin təkcə mülki sektorda deyil, təhlükəsizlik, hərbi və sərhəd nəzarəti kimi sahələrdə də etibarlı şəkildə tətbiqini təmin edir.

İnteqrasiya olunmuş analitik platformalar dron sistemlərinin imkanlarını sadə müşahidə alətindən çıxarıb, onları kompleks analitik və qərar dəstək sisteminə çevirir. Bu yanaşma dronların sadəcə görüntü toplamaqla kifayətlənməyib, operativ qərarların verilməsinə və strateji planlamaların aparılmasına birbaşa xidmət etməsinə imkan yaradır. Beləliklə, texnologiyanın gələcəyi bu platformaların daha da inkişaf etdirilərək dron texnologiyaları ilə daha sıx inteqrasiya olunması ilə formalaşacaqdır (Mohanty, Ravindra, Surya, Pattnaik, Mohamed, 2023, p. 23).

Tətbiq sahələrinə uyğunlaşma və testlər

Tətbiq sahələrinə uyğunlaşma və testlər, pilotsuz uçuş aparatlarının (dronların) fərqli mühitlərdə və məqsədlərdə effektiv və təhlükəsiz şəkildə fəaliyyət göstərməsi üçün əsas texniki və əməliyyat mərhələsidir. Dron texnologiyası artıq təkcə hava çəkilişi ilə məhdudlaşmır, o həm kənd təsərrüfatı, hərbi sahə, sənaye monitorinqi, axtarış-xilasetmə, ətraf mühitin izlənməsi, energetika infrastrukturalarının yoxlanması və logistik xidmətlər daxil olmaqla çoxsaylı sahələrdə tətbiq olunur. Hər bir sahə isə özünəməxsus ekoloji, texniki və hüquqi tələblərlə xarakterizə olunur və bu səbəbdən dron sistemlərinin uyğunlaşdırılması və sınaqdan keçirilməsi zəruri mərhələdir.

Uyğunlaşdırma prosesi, ilk növbədə mühitə əsaslanan sensor konfigurasiyasının qurulması ilə başlayır. Məsələn, kənd təsərrüfatı üçün istifadə olunan dronlar multispektral və ya termal kameralarla təchiz edilir, halbuki sənaye boru xətlərinin yoxlanması üçün yüksək qətnaməli RGB kameralar və LiDAR texnologiyası vacibdir. Hər bir sahədə fərqli tip məlumat toplanmalı və sistem bu məlumatı emal edə biləcək şəkildə proqramlaşdırılmalıdır.

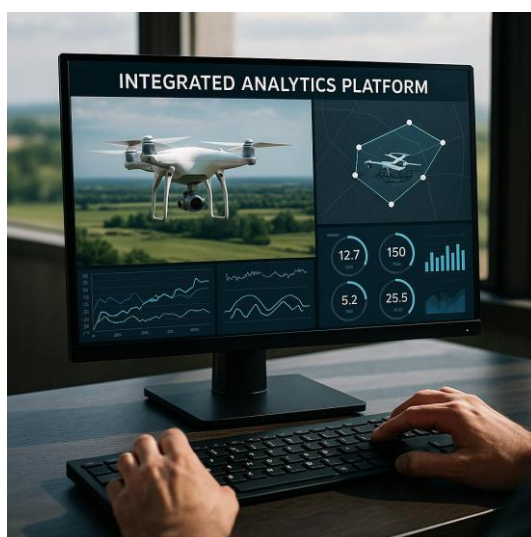
İkinci mərhələdə, fiziki və funksional testlər həyata keçirilir. Bu testlərə uçuş sabitliyi, GPS koordinasiya dəqiqliyi, akkumulyator dayanıqlığı, hava şəraitinə qarşı müqavimət (külək, yağış, temperatur dəyişiklikləri), məlumat ötürülmə gecikməsi və toplanan datanın dəqiqliyi daxildir. Tətbiq sahəsi dağlıq ərazi, dəniz sahili və ya sıx şəhər mühiti kimi fərqli coğrafi zonalara uyğun gəldikdə, sınaqlar da həmin mühitdə aparılmalıdır. Məsələn, sərhəd mühafizəsi üçün dronlar gecə uçuş testləri, termal görüntülmə və uzun məsafəli rabitə simulyasiyalarından keçirilməlidir.

Daha sonra, sistem integrasiyası testləri aparılır. Bu mərhələdə dron digər sistemlər – məsələn, mərkəzi idarəetmə platformaları, məlumat analiz proqramları, fəvqəladə hallarda avtomatik xəbərdarlıq sistemləri və istifadəçi interfeysləri ilə sinxronlaşdırılır. Məqsəd, dronun real istifadə zamanı texniki və əməliyyat baxımından digər resurslarla tam uyumlu işləməsinə təmin etməkdir.

Əlavə olaraq, istifadəçi təlimi və sahə ssenariləri üzrə demo uçuşlar təşkil olunur. Operatorlar sahəyə uyğun olaraq hazırlanmış uçuş missiyalarını yerinə yetirir, sistemin interfeysi ilə işləmə bacarıqları yoxlanılır və istifadəçilərin geribildirimlərinə əsasən sistemdə son düzəlişlər edilir. Bu mərhələ həmçinin hüquqi və etik baxımdan da əhəmiyyətlidir: fərdi məlumatların toplanması, məxfilik məsələləri və hava məkanına dair milli qaydalar nəzərə alınır.

Tətbiq sahəsi üzrə standartlara və normativlərə uyğunluq qiymətləndirilir. Bəzi sahələrdə (xüsusilə müdafiə, səhiyyə və nəqliyyat) konkret sertifikatlaşdırma və lisenziya tələbləri mövcuddur. Bu halda dron sistemləri beynəlxalq və ya lokal texniki auditlərdən keçməlidir.

Tətbiq sahələrinə uyğunlaşma və test prosesi yalnız ilkin sınaq uçuşları ilə məhdudlaşmır. Bu, çoxsəviyyəli və sahəyə spesifik yanaşma tələb edən kompleks bir prosesdir. Yaxşı planlaşdırılmış uyğunlaşma və test mərhələləri dron sistemlərinin səmərəliliyini və etibarlılığını artırır, texniki uğursuzluqların və əməliyyat risklərinin qarşısını alır (Ələkbərov, 2024, s. 78).



Şəkil 7. Drone analytics paneli ilə real vaxt monitorinqi

Nəticə

Dronlarla real vaxt rejimində izləmə sistemlərinin səmərəliliyini artırmaq üçün bir neçə mühüm addım önəmlidir. Avtomatlaşdırılmış uçuş planlaması, çoxsaylı dronların sinxron fəaliyyəti (swarm texnologiyası) və süni intellektlə gücləndirilmiş analiz sistemləri bu sahədə əsas rol oynayır. Sensor inteqrasiyası və bulud əsaslı məlumat ötürülməsi müşahidə keyfiyyətini artırır, məlumatların daha tez və effektiv emalını təmin edir. Eyni zamanda, enerji effektivliyi və uzunmüddətli uçuş imkanları da əməliyyat müddətini artıraraq daha geniş ərazilərin əhatə olunmasına şərait yaradır.

Ədəbiyyat

1. Askarzadeh, T., & Bridgelall, R. (2025). Cost efficiency and effectiveness of drone applications in bridge condition monitoring. *Infrastructures*, 10(3), 63.
2. D'yakov, M. A. (2021). *Analiz sredstv i sposobov protivodeystviya bespilotnym letatel'nyim apparatam*. Moskva: Izd. tsentr "Nauka".
3. Ələkbərov, K. (2024). *Texnoloji innovasiyalar və ətraf mühitin monitorinqi*. Bakı: UNEC nəşriyyatı.
4. Elisair. (n.d.). *Monitoring traffic drone*. <https://elistair.com/monitoring-traffic-drone>
5. Əliyev, F. (2023). *Dronların tətbiqi və aqrar sahədə monitorinq imkanları*. Bakı: AzMİU nəşriyyatı.
6. Kritikal Solutions. (n.d.). *How drones can enhance traffic monitoring systems*. <https://kritikalsolutions.com/how-drones-can-enhance-traffic-monitoring-systems>
7. Kumari, P., Gosula, H. S., & Lokhande, N. (2024). *Real-time monitoring and battery life enhancement of surveillance drones*. Springer Nature.
8. Mohanty, S. N., Ravindra, J. V. R., Surya, N. G., Pattnaik, C. R., & Mohamed, S. Y. (2023). *Drone technology: Future trends and practical applications*. John Wiley & Sons.
9. Qurbanov, H. (2022). *Dəqiq əkinçilikdə rəqəmsal texnologiyalar*. Gəncə: Aqromexanika Elmi-Tədqiqat İnstitutu.
10. Qurbanov, H. N., & Zeynalov, A. M. (2021). *Dəqiq suvarma*. Gəncə: Aqromexanika Elmi-Tədqiqat İnstitutu.
11. Rzayev, S. (2020). *Mülki aviasiyada pilotsuz uçuş aparatlarının istifadəsi*. Bakı: Milli Aviasiya Akademiyası.
12. ScienceDirect. (2024). *Achieving peak operational efficiency: Deep dive into drone technologies and actionable insights*. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2590123024015317>
13. Sniffer Robotics. (n.d.). *Achieving peak operational efficiency: Deep dive into drone technologies and actionable insights*. <https://www.snifferrobotics.com/post/achieving-peak-operational-efficiency-deep-dive-into-drone-technologies-and-actionable-insights>
14. StruxHub. (n.d.). *Best guide to drones in construction: Improving site management and jobsite efficiency*. <https://struxhub.com/blog/best-guide-to-drones-in-construction-improving-site-management-and-jobsite-efficiency>
15. Vasil'yev, I. P., & Novikov, S. A. (2020). *Bespilotnaya aviatsiya v chrezvychaynykh situatsiyakh*. Sankt-Peterburg: Tekhnopolis.

Daxil oldu: 13.02.2025

Qəbul edildi: 17.04.2025