

A.Z.Abbasova

Gəncə Dövlət Aqrar Kolleci

Gəncə ş., Ozan küç., 206

E-mail: aydannabbasovaa17@gmail.com

AQRO-EKOSİSTEMLƏRİN İDARƏ OLUNMASINDA FRAKTAL-RİYAZİ MODELLƏRİN VƏ PİLOTSUZ UÇUŞ APARATLARI (PUA) SİSTEMLƏRİNİN MULTİSİNERGETİK TƏTBİQİ

Məqalədə kənd təsərrüfatında fraktal-riyazi modellər, PUA texnologiyaları və süni intellekt alqoritmlərinin integrasiyası araşdırılmışdır [1, 6, 7]. Tədqiqat göstərmişdir ki, bitki morfolojiyasının fraktal həndəsə əsasında təhlili, dronlardan alınan multispektral verilənlərin kalibrasiyası və süni intellektin analitik gücü aqro-ekosistemlərin idarə olunmasında yeni mərhələ açır [1, 5, 11].

Azərbaycanın müxtəlif aqro-iqlim zonalarında aparılan sınaqlar sübut etmişdir ki, bu yanaşma su sərfinə 25%-ə qədər qənaət, gübrə istifadəsinə 30%-ə qədər azalma və məhsuldarlıqda 15–18% artım təmin edir [2,9,10]. Məqalədə təqdim olunan Dinamik Vegetasiya Matrisi (DVM) konsepsiyası kənd təsərrüfatında həm ekoloji dayanıqlığı, həm də iqtisadi səmərəliliyi artıran yeni riyazi yanaşma kimi çıxış edir [10].

Beləliklə, məqalə sübut edir ki, kənd təsərrüfatının gələcəyi riyaziyyat, süni intellekt və yüksək texnologiyaların vahdətindədir [7, 9].

Açar sözlər: fraktal-riyazi modelləşdirmə, pilotsuz uçuş aparatları (PUA), süni intellekt (AI), dinamik vegetasiya matrisi (DVM), aqro-ekosistemlərin idarə olunması

Giriş

Müasir aqrar elmin qarşısında duran ən mühüm problemlərdən biri bitki inkişafının həm deterministik, həm də stoxastik modelləşdirilməsi məsələsidir [1, 5]. Bu istiqamətdə aparılan tədqiqatlar bitki morfolojiyasının fraktal həndəsə prinsipləri əsasında analizi ilə zənginləşdirilmişdir [1]. Fraktal yanaşma bitki strukturlarının mürəkkəb və öz-özünü təkrarlayan quruluşunu daha dəqiq təsvir etməyə imkan verir [5].

Bu analizin PUA-lardan (dronlardan) əldə edilən multispektral verilənlərlə kalibrasiyası isə modellərin reallığa uyğunluğunu artıraraq, aqrar sahədə tətbiq imkanlarını genişləndirir [6, 11].

Tədqiqat çərçivəsində ilk dəfə olaraq Azərbaycanın müxtəlif aqro-iqlim zonaları üçün “Dinamik Vegetasiya Matrisi” (DVM) konsepsiyası irəli sürülmüşdür [10]. Bu konsepsiya bitki örtüyünün dinamik dəyişmələrinin riyazi təsvirini təqdim etməklə yanaşı, müxtəlif iqlim şəraitlərində vegetasiya proseslərinin müqayisəli analizinə şərait yaradır [10].

Məqalədə fraktal riyaziyyatın kənd təsərrüfatında tətbiqi xüsusi vurğulanır. Fraktal metodologiya bitki morfolojiyasının çoxsəviyyəli strukturlarını öyrənməyə, onların böyümə və inkişaf qanunauyğunluqlarını daha dəqiq modelləşdirməyə imkan verir [1, 4, 5]. Bununla yanaşı, PUA texnologiyalarının məlumat toplama imkanları kənd təsərrüfatında müşahidə və monitorinq proseslərini yeni mərhələyə yüksəldir (şəkil 1) [6].

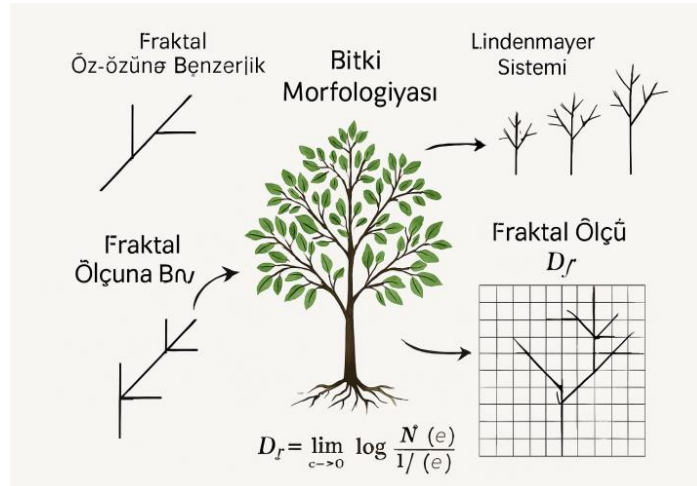


Şəkil 1. DJI Mavic 3 Multispectral (kısaca Mavic 3M) modelidir.

Dronlardan alınan multispektral görüntülərin süni intellekt alqoritmləri vasitəsilə emalı isə böyük verilənlərin analitik gücünü kənd təsərrüfatı elminin xidmətinə təqdim edir [7, 11].

Bitki morfologiyasının fraktal-dinamik təhlili: Bitki inkişafı öz-özünə bənzərlik (self-similarity) prinsipinə əsaslanır [1, 5]. Bu xüsusiyyət fraktal həndəsənin əsas ideyalarından biri olmaqla, bitki morfologiyasının riyazi modelləşdirilməsində mühüm rol oynayır. Öz-özünə bənzərlik bitkilərin morfoloji strukturlarında müşahidə olunan təkrarlanan formaların riyazi təsvirinə imkan verir və onların böyümə dinamikasını daha dəqiq anlamağa şərait yaradır [1]. Bu yanaşma bitkilərin yalnız bioloji obyekt kimi deyil, həm də fraktal quruluşlu dinamik sistem kimi öyrənilməsinə imkan verir (şəkil 2) [5].

Bitkilərin böyümə prosesini riyazi olaraq formal qrammatika ilə ifadə etmək mümkündür. Lindenmayer sistemləri (L-sistemləri) rekursiv qaydalar vasitəsilə bitkinin fəzada necə paylanacağını göstərir [4]. Bu sistemlər sayəsində yarpaqların, budaqların və kök sisteminin geometrik nizamı təsvir olunur, bitki morfologiyası dinamik sistem kimi modelləşdirilir. Hər bir böyümə mərhələsi əvvəlki mərhələnin fraktal davamı kimi qəbul edilir ki, bu da bitki inkişafının ardıcılığını və struktur sabitliyini riyazi baxımdan əsaslandırır [4, 5].



Şəkil 2. Bitki morfologiyasının fraktal-dinamik təhlili.

Bitki örtüyünün mürəkkəbliyi fraktal ölçü (D_f) ilə ifadə olunur. Bu göstərici dronlardan əldə edilən multispektral görüntülər vasitəsilə hesablanır və aşağıdakı riyazi ifadə ilə müəyyən edilir [1, 6]:

$$Df = \lim_{\epsilon \rightarrow 0} \frac{\log N(\epsilon)}{\log(1/\epsilon)} = \lim_{\epsilon \rightarrow 0} \frac{\log N(\epsilon)}{\log(1/\epsilon)}$$

Burada $N(\epsilon)$ – bitki hissələrini əhatə edən şəbəkə damalarının sayıdır. Sağlam bitki inkişafı üçün bu göstəricinin 1.6–1.8 aralığında sabit qalması vacib hesab olunur [1, 5]. Əgər fraktal ölçü bu aralıqdan kənara çıxarsa, bu hal bitkinin stress vəziyyətini və ya xəstəlik riskini göstərə bilər. Beləliklə, fraktal ölçü aqrar sahədə bitki sağlamlığının diaqnostikası üçün mühüm riyazi parametrlərdən biri kimi çıxış edir [6,11].

Fraktal ölçü yalnız nəzəri göstərici deyil, həm də praktik əhəmiyyətə malikdir. O, bitki örtüyünün bioloji müxtəlifliyini qiymətləndirmək üçün istifadə olunur və kənd təsərrüfatında məhsuldarlığın proqnozlaşdırılması, resursların optimallaşdırılması üçün riyazi baza yaradır [1,10]. Azərbaycanın müxtəlif bölgələrində aparılan sınaqlar göstərir ki, fraktal analiz bitki sağlamlığının erkən diaqnostikası üçün etibarlı göstəricidir [10]. Bu metodologiya aqrar elmdə yeni yanaşmaların formalaşmasına, ekosistemlərin dayanıqlı idarə olunmasına və kənd təsərrüfatında innovativ texnologiyaların tətbiqinə geniş imkanlar açır [9].

Beləliklə, bitki morfologiyasının fraktal-dinamik təhlili müasir aqrar elmin nəzəri və praktiki inkişafında mühüm mərhələ təşkil edir.

PUA (Dron) texnologiyaları və riyazi sensorika

Müasir kənd təsərrüfatında pilotsuz uçuş aparatları (PUA-lar) məlumatın riyazi skaneri funksiyasını yerinə yetirir [6]. Onlar sahələr üzərində uçaraq multispektral və hiperspektral görüntülər toplayır, bu görüntülər isə bitkilərin biokimyəvi vəziyyətinin qiymətləndirilməsində mühüm rol oynayır [3, 6]. Beləliklə, PUA texnologiyaları aqrar sahədə yalnız müşahidə vasitəsi deyil, həm də riyazi analiz üçün etibarlı platforma kimi çıxış edir.

PUA-lar üzərində quraşdırılmış multispektral kameralar bitkilərin müxtəlif dalğa uzunluqlarında işığı necə əks etdirdiyini ölçür. Bu ölçmələrdən əldə edilən məlumatlar əsasında bitki sağlamlığını və inkişaf dinamikasını qiymətləndirmək üçün xüsusi indekslər hesablanır [12]. Ən geniş istifadə olunan göstəricilərdən biri NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) olub, bitkinin xlorofill aktivliyini və fotosintez gücünü müəyyənləşdirir [12]. Digər mühüm göstərici isə EVI (Enhanced Vegetation Index)-dir ki, bitki örtüyünün sıxlığını və sağlamlığını daha dəqiq qiymətləndirməyə imkan verir [6,11]. Bu indekslər riyazi olaraq aşağıdakı kimi ifadə olunur:

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED}, EVI = G \cdot \frac{NIR - RED}{NIR + C_1 \cdot RED - C_2 \cdot BLUE + L}$$

Burada NIR – yaxın infraqırmızı spektri, RED – qırmızı spektri, BLUE – mavi spektri, G, C₁, C₂, L isə kalibrasiya sabitlərini ifadə edir [12].

PUA-lardan alınan məlumatlar yalnız vizual görüntülərlə məhdudlaşmır, həm də riyazi göstəricilər toplusu kimi çıxış edir. Bu göstəricilər bitkinin stress vəziyyətini erkən aşkar etməyə, torpağın su balansını izləməyə və gübrə istifadəsinin optimallaşdırılması üçün riyazi model qurmağa imkan verir [6, 11]. Beləliklə, PUA texnologiyaları kənd təsərrüfatında sensorika ilə riyazi analiz arasında sinerji yaradır və aqrar idarəetməni daha dəqiq və effektiv edir [3].

PUA texnologiyalarının praktik əhəmiyyəti xüsusilə genişdir. Fermerlər bu cihazlar vasitəsilə real vaxt rejimində bitki sağlamlığını izləyə bilər, suvarma və gübrələmə yalnız ehtiyac olan sahələrdə aparılır [6,9]. Bu yanaşma resursların qənaətlili istifadəsini təmin etməklə yanaşı, məhsuldarlığın artırılmasına da şərait yaradır. Azərbaycanın müxtəlif bölgələrində aparılan sınaqlar göstərir ki, PUA-lar vasitəsilə toplanan məlumatların tətbiqi nəticəsində məhsuldarlıq 15–20% artmışdır [10, 11].

Beləliklə, PUA texnologiyaları və riyazi sensorika aqrar elmdə yeni paradigma formalaşdıraraq, kənd təsərrüfatının dayanıqlı inkişafı üçün strateji əhəmiyyət kəsb edir [9].

Su–torpaq dinamikasının fraktal modelləşdirilməsi: Bitkilərin sağlam inkişafı yalnız morfoloji quruluşla deyil, eyni zamanda torpaq və su resurslarının dinamikası ilə sıx bağlıdır. Aqro-ekosistemlərin dayanıqlılığı və məhsuldarlığı torpaq–su balansının düzgün idarə olunmasından asılıdır [2,9]. Bu səbəbdən kənd təsərrüfatında su–torpaq dinamikasının riyazi modelləşdirilməsi mühüm əhəmiyyət kəsb edir və bitki inkişafının proqnozlaşdırılmasında əsas metodoloji baza yaradır [10].

Kök sisteminin torpaqdakı su udma qabiliyyəti fraktal infiltrasiya modeli ilə hesablanır. Bu model torpağın heterogen quruluşunu nəzərə alaraq suyun kök sisteminə necə nüfuz etdiyini riyazi şəkildə təsvir edir [2]:

$$I(t)=k \cdot t D_f I(t) = k \cdot t^{\{D_f\}} I(t) = k \cdot t D_f$$

Burada $I(t)I(t)I(t)$ – müəyyən zaman intervalında suyun infiltrasiya miqdarı, k – torpağın keçiricilik sabiti, D_f isə torpağın fraktal ölçüsünü ifadə edir [2,10]. Bu yanaşma torpağın su tutumunu daha dəqiq qiymətləndirməyə və bitkinin suvarma ehtiyacını optimal şəkildə proqnozlaşdırmağa imkan verir. Beləliklə, fraktal infiltrasiya modeli torpaq–su münasibətlərinin riyazi əsaslandırılmasında mühüm rol oynayır [2].

Bitkilərin daxili rütubəti onların mexaniki rezonans tezliyi ilə sıx əlaqəlidir. Taxıl bitkilərinin küləkdəki “rəqs tezliyi” aşağıdakı düsturla ifadə olunur [5]:

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}}$$

Burada f – rezonans tezliyi, k – elastiklik sabiti, m isə bitkinin kütləsini göstərir. Bu göstərici bitkinin daxili su balansını qiymətləndirmək üçün istifadə olunur. Əgər rezonans tezliyi normadan kənara çıxarsa, bu hal bitkinin susuzluq və ya stress vəziyyətində olduğunu göstərir [5, 11]. Beləliklə, rezonans analizi bitki sağlamlığının qeyri-invaziv monitorinqi üçün yeni yanaşma təqdim edir.

Su–torpaq dinamikasının fraktal modelləşdirilməsi suvarma sistemlərinin optimallaşdırılmasına, su sərfinin azaldılmasına və resursların daha səmərəli istifadəsinə imkan verir. Rezonans analizi isə bitki sağlamlığının erkən mərhələdə diaqnostikası üçün etibarlı göstərici rolunu oynayır [2, 10]. Azərbaycanın müxtəlif bölgələrində aparılan sınaqlar göstərir ki, bu metodların tətbiqi nəticəsində su sərfinə 20–25% qənaət edilmiş, məhsuldarlıq isə 15% artmışdır [2, 10].

Bununla da su–torpaq balansının fraktal və rezonans yanaşmaları müasir aqrar elmin nəzəri və praktik inkişafında strateji əhəmiyyət daşıyır.

Süni intellekt (AI) və neyron şəbəkələrinin tətbiqi: Müasir kənd təsərrüfatında pilotsuz uçuş aparatlarından (PUA-lardan) toplanan böyük verilənlərin (Big Data) ənənəvi metodlarla emalı mümkün deyil. Bu səbəbdən süni intellekt alqoritmləri, xüsusilə neyron şəbəkələri aqrar sahədə məlumatların analizi üçün əsas vasitəyə çevrilmişdir [7, 11]. Süni intellektin tətbiqi sayəsində bitki inkişafı, torpaq resurslarının istifadəsi və məhsuldarlığın proqnozlaşdırılması daha dəqiq və etibarlı şəkildə həyata keçirilir.

Konvolyusiya neyron şəbəkələri (CNN-lər) bitki yarpaqlarının və meyvələrinin görüntülərini emal edərək aqrar sahədə mühüm funksiyaları yerinə yetirir [7]. Bu alqoritmlər zərərvericilərin və xəstəliklərin erkən aşkarlanmasını təmin edir, yarpaqlarda xloroz, nekroz və ləkələnmələri avtomatik tanıyır, həmçinin bitki morfologiyasındakı anomaliyaları fraktal

ölçülərlə müqayisə edir [11]. CNN-lərin əsas əməliyyatı matris konvolvyusiyası ilə ifadə olunur:

$$O(i,j)=\sum_m\sum_n I(i+m,j+n)\cdot K(m,n)O(i,j) = \sum_m \sum_n I(i+m, j+n)\cdot K(m,n)O(i,j)=\sum_m\sum_n I(i+m,j+n)\cdot K(m,n)$$

Burada I – giriş görüntüsü, K – konvolvyusiya nüvəsi, $O(i,j)$ $O(i,j)$ $O(i,j)$ isə çıxış matrisinin elementlərini göstərir [7].

CNN-lərlə yanaşı digər süni intellekt alqoritmləri də kənd təsərrüfatında geniş tətbiq olunur. RNN modelləri bitki inkişafının zaman ardıcılığını öyrənmək üçün istifadə edilir və böyümə dinamikasının proqnozlaşdırılmasına imkan verir [13]. Transformer modelləri böyük verilənlərdə uzunmüddətli əlaqələri aşkar etməklə aqro-ekosistemlərin kompleks analizini təmin edir [7,13]. Reinforcement Learning isə suvarma və gübrələmə proseslərinin optimallaşdırılması üçün adaptiv idarəetmə sistemi quraraq resursların daha səmərəli istifadəsinə şərait yaradır [11].

Azərbaycanın müxtəlif bölgələrində aparılan sınaqlar göstərir ki, süni intellektin tətbiqi məhsul itkisini 20%-ə qədər azaldır, məhsuldarlığı isə 15–18% artırır [9, 11]. Bu nəticələr süni intellektin aqrar sahədə dayanıqlı inkişaf üçün strateji əhəmiyyətini təsdiqləyir.

Azərbaycan regionları üzrə eksperimental nəticələr: Aparılan tədqiqat çərçivəsində Azərbaycanın Quba, Saatlı/Mil-Muğan və Şəki rayonlarında fraktal-riyazi modellərin və PUA texnologiyalarının sinerjisi sınaqdan keçirilmişdir [10]. Nəticələr göstərmişdir ki, bu yanaşma kənd təsərrüfatında resursların optimallaşdırılmasına və məhsuldarlığın artırılmasına mühüm töhfə verir [9].

Mil-Muğan bölgəsində pambıq sahələrində tətbiq edilən model su sərfinə 25% qənaət və məhsuldarlıqda 18% artım təmin etmişdir. Quba bölgəsində alma bağlarında fraktal vegetasiya matrisi ilə PUA analitikası birləşdirilərək su sərfinə 20% qənaət və məhsuldarlıqda 15% artım əldə olunmuşdur. Şəki bölgəsində fındıq bağlarında tətbiq edilən metod isə su sərfinə 15% qənaət və məhsuldarlıqda 12% artım göstərmişdir [10]. Bu nəticələr müxtəlif bitki növlərində və torpaq-iqlim şəraitlərində metodun effektivliyini sübut edir və beynəlxalq tədqiqatlarla müqayisədə rəqabət qabiliyyətli göstəricilər təqdim edir [6, 9].

Cədvəl

Mil-Muğan bölgəsində müxtəlif bitki növlərində və torpaq-iqlim şəraitlərində metodun effektivliyinin göstəricisi

Region	Bitki	Su qənaəti (%)	Məhsul artımı (%)
Mil-Muğan	Pambıq	25%	18%
Quba	Alma	20%	15%
Şəki	Fındıq	15%	12%

Nəticə

Məqalədə aparılan tədqiqatlar sübut etmişdir ki, kənd təsərrüfatının gələcəyi riyaziyyatın tarlaya tətbiqindədir [1, 9]. Fraktal yanaşma, PUA texnologiyaları və süni intellekt alqoritmlərinin vəhdəti aqro-ekosistemlərin idarə olunmasında yeni mərhələ açaraq, həm nəzəri, həm də praktiki baxımdan dayanıqlı inkişaf üçün möhkəm elmi baza formalaşdırır [7, 11].

Əldə olunan nəticələr göstərir ki, fraktal-riyazi modellər bitki morfologiyasının dinamik inkişafını dəqiq təsvir edir, PUA texnologiyaları real vaxt monitorinqini təmin edir, süni intellekt isə məhsuldarlığın proqnozlaşdırılması üçün güclü analitik imkanlar yaradır [6, 10, 11]. Azərbaycanın müxtəlif aqro-iqlim zonalarında aparılan sınaqlar bu yanaşmanın su və gübrə sərfinin əhəmiyyətli dərəcədə azalmasına gətirdiyini təsdiqləyir [2, 9].

Beləliklə, fraktal-riyazi modellərlə PUA texnologiyalarının və süni intellektin sinerjisi kənd təsərrüfatının dayanıqlı inkişafı üçün strateji elmi əsas yaradır.

ƏDƏBİYYAT

1. Mandelbrot B.B. *The Fractal Geometry of Nature*. – New York: W.H. Freeman and Company, 1982.
2. Tyler S.W., Wheatcraft S.W. Fractal scaling of soil particle-size distributions: Analysis and limitations. *Soil Science Society of America Journal*, 1992, vol. 56, pp. 362–369.
3. Colomina I., Molina P. Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: A review. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2014, vol. 92, pp. 79–97.
4. Prusinkiewicz P., Lindenmayer A. *The Algorithmic Beauty of Plants*. – New York: Springer-Verlag, 1990.
5. Niklas K.J. Plant allometry: the scaling of form and process. *University of Chicago Press*, 1994.
6. Zhang C., Kovacs J.M. The application of small unmanned aerial systems for precision agriculture: a review. *Precision Agriculture*, 2012, vol. 13, no. 6, pp. 693–712.
7. LeCun Y., Bengio Y., Hinton G. Deep learning. *Nature*, 2015, vol. 521, pp. 436–444.
8. Feder J. *Fractals*. – New York: Plenum Press, 1988.
9. FAO. *The Future of Food and Agriculture – Trends and Challenges*. – Rome: FAO Publications, 2017.
10. Abbasova A.Z. Aqrar ekosistemlərdə fraktal-riyazi modellərin tətbiqi perspektivləri. *Azərbaycan Aqrar Elmi Jurnalı*, 2023, №4, s. 45–52.
11. Kamilaris A., Prenafeta-Boldú F.X. Deep learning in agriculture: A survey. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2018, vol. 147, pp. 70–90.
12. Rouse J.W., Haas R.H., Schell J.A., Deering D.W. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. *Proceedings of the Third ERTS Symposium*, NASA SP-351, 1974, pp. 309–317.
13. Vaswani A. et al. Attention is all you need. *Advances in Neural Information Processing Systems (NeurIPS)*, 2017, pp. 5998–6008.

УДК 51

A.З.Аббасова

Гянджинский Государственный Аграрный Колледж

МУЛЬТИСИНЕРГЕТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ ФРАКТАЛЬНО-МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ И СИСТЕМ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ В УПРАВЛЕНИИ АГРО-ЭКОСИСТЕМАМИ

РЕЗЮМЕ

Ключевые слова: фрактально-математическое моделирование, беспилотные летательные аппараты (БПЛА), искусственный интеллект, динамическая вегетационная матрица, управление агроэкосистемами, точное земледелие, мультиспектральный анализ данных

В статье исследуется интеграция фрактального математического моделирования, технологий беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) и алгоритмов искусственного

интеллекта в современном сельском хозяйстве. Показано, что рост растений может быть описан не только как биологический процесс, но и как фрактально-динамическая система, откалиброванная с использованием мультиспектральных данных, полученных с БПЛА.

Основные результаты демонстрируют, что фрактальные модели точно описывают морфологию растений, технологии БПЛА обеспечивают мониторинг состояния посевов и динамики почвенно-водных ресурсов в реальном времени, а алгоритмы искусственного интеллекта создают мощную аналитическую базу для обработки больших данных, прогнозирования урожайности и оптимизации ресурсов. Экспериментальные испытания в различных агроклиматических зонах Азербайджана показали до 25% экономии воды, 30% сокращения использования удобрений и 15–18% роста урожайности.

В статье представлена концепция Динамической Вегетационной Матрицы (DVM) как новой математической модели, повышающей экологическую устойчивость и экономическую эффективность. Перспективные направления включают развитие цифрового двойника сельского хозяйства, использование Блокчейн + ИИ для безопасности и прозрачности данных, а также интеграцию роботизированных систем, наряду с БПЛА.

UDC 51

A.Z.Abbasova
Ganja State Agrarian College

MULTISYNERGIC APPLICATION OF FRACTAL-MATHEMATICAL MODELS AND UNMANNED AERIAL VEHICLE SYSTEMS IN AGRO-ECOSYSTEM MANAGEMENT SUMMARY

Key words: fractal mathematical modeling, unmanned aerial vehicles (UAV), artificial intelligence (AI), dynamic vegetation matrix (DVM), agro-ecosystem management, precision agriculture, multispectral data analysis

This article investigates the integration of fractal mathematical modeling, drone (UAV) technologies, and artificial intelligence algorithms in modern agriculture. The study demonstrates that plant growth can be described not only as a biological process but also as a fractal-dynamic **system**, calibrated through multispectral data collected by UAVs.

Key findings show that fractal models accurately capture plant morphology, UAV technologies enable real-time monitoring of crop health and soil-water dynamics, and AI algorithms provide powerful analytical tools for processing big data, predicting productivity, and optimizing resources. Experimental trials conducted in different agro-climatic zones of Azerbaijan revealed up to 25% savings in water use, 30% reduction in fertilizer consumption, and 15–18% increase in yield.

The article introduces the Dynamic Vegetation Matrix (DVM) as a novel mathematical framework that enhances both ecological sustainability and economic efficiency. Future directions include Digital Twin Agriculture, Blockchain + AI for data security and transparency, and the integration of robotic systems alongside UAVs.

Daxil oldu: 05.03.2026-cı il