

Tarımsal İlaçlamada Farklı Püskürtme Rotası Modellerinin Etkinlik Analizi

Effectiveness Analysis of Different Spray Route Models in Agricultural Spraying

Mevlüt İNAN^{*1} , Ali KARCI² 

¹Başkale Meslek Yüksekokulu, Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Van, Türkiye

²Yazılım Mühendisliği Bölümü, İnönü Üniversitesi, Malatya, Türkiye

(mevlutinan@yyu.edu.tr, ali.karci@inonu.edu.tr)

Received:Jan.10,2025

Accepted:Feb.26, 2025

Published:Jun.1, 2025

Özetçe— Bu çalışma, tarımsal ilaçlama operasyonlarında insansız hava araçları (İHA) kullanılarak farklı püskürtme rotalarının etkinliğini ve enerji verimliliğini incelemektedir. Özellikle düz çizgi, zikzak ve spiral yöntemlerin performansı, enerji tüketimi, ilaçlama süresi ve etkinlik oranları açısından karşılaştırılmıştır. Deneyler, 1 hektarlık bir tarım alanında, sabit çevresel koşullar altında gerçekleştirilmiştir. Bulgular, düz çizgi yönteminin en düşük enerji tüketimi (%15 batarya) ve en hızlı ilaçlama süresini (20 dakika) sağladığını, ancak karmaşık alanlarda homojenlik açısından sınırlı kaldığını göstermektedir. Zikzak yöntemi, daha yüksek homojenlik (%85) ve etkinlik sunarak karmaşık alanlarda daha etkili olmuştur. Spiral yöntem ise en yüksek homojenlik ve ilaçlama etkinliğini (%88) sağlamış, ancak en fazla enerji tüketimine (%20 batarya) yol açmıştır. Drone hızının artışıyla ilaçlama süresi azalırken, verimlilik ve homojenlik 5 m/s hızında en yüksek düzeye ulaşmıştır. Bu çalışma, farklı püskürtme yöntemlerinin arazi geometrisi, mahsul türü ve operasyonel önceliklere bağlı olarak seçilmesi gerekliliğini vurgulamaktadır. Bu bulgular, drone tabanlı tarımsal ilaçlama sistemlerinin enerji verimliliği ve sürdürülebilirlik açısından optimize edilmesine yönelik önemli bir rehber sunmaktadır. Tarımsal verimliliğin artırılması ve sürdürülebilir tarım uygulamalarının desteklenmesi için bu tür araştırmaların sürekliliği ve elde edilen sonuçların tarımsal uygulamalara entegre edilmesi büyük bir önem arz etmektedir.

Anahtar Kelimeler : İnsansız Hava Aracı, Tarımsal İlaçlama, Rota Yöntemleri, Verimlilik, Etkinlik Analizi, Drone

Abstract— This paper aims at assessing the efficiency and energy use in different spray routes in agricultural spraying operations using UAVs. In particular, the energy use, time for application and the efficacy rates were compared from straight line, zigzag and spiral applications. The experiments were carried out in a 1 hectare agricultural field and all the experiments were done under similar environmental conditions. The results show that the straight line method was the most economical in the use of energy (15% battery) and had the shortest time of application (20 minutes) but was restrictive in achieving uniform application in the field with many corners. The zigzag pattern was more uniform (85%) and effective and therefore more suitable for use in large and small sized fields with many turns and twists. The spiral pattern was the most efficient and effective in application (88%) but this was achieved at the highest energy use (20% battery). Spraying duration decreased with increasing drone speed while efficiency and uniformity were optimum at 5 m/s. The study therefore recommends that based on field geometry and crop type, as well as the nature of operations, appropriate spraying methods should be chosen. These findings are useful in helping to improve the design of drone-based agricultural spraying systems in order to increase energy efficiency and sustainability. Uninterruptedness of such research and the application of the results obtained in agricultural practices are very important in improving the yield and maintaining sustainable agriculture.

Keywords : Unmanned Aerial Vehicle, Agricultural Spraying, Route Methods, Efficiency, Effectiveness Analysis, Drone.

1. Giriş

Küresel nüfus artışının ivme kazanması ve tarım alanlarının sınırlı kapasitesi, tarımsal üretimde verimliliği artıran teknolojilerin kullanımını kaçınılmaz kılmaktadır. Bu teknolojiler içerisinde yaygın olarak drone adıyla bilinen insansız hava araçları (İHA), modern tarımda devrim niteliğinde bir yenilik olarak öne çıkmaktadır. Özellikle tarımsal ilaçlama uygulamalarında drone'lar, geleneksel yöntemlere kıyasla hız, hassasiyet ve enerji verimliliği gibi avantajlar sunmaktadır. Örneğin, yapılan araştırmalar, drone'lar ile yapılan ilaçlamaların, manuel ilaçlamaya göre %30-40 daha az pestisit kullanımı sağladığını ve su tasarrufunun %90'a kadar çıkabileceğini göstermektedir (ZONGO, 2023; Rani, 2022).

Drone tabanlı tarımsal ilaçlamanın etkinliği, kullanılan rota planlama stratejileriyle doğrudan ilişkilidir. Düz çizgi, zigzag ve spiral gibi farklı rota modelleri, her biri kendine özgü avantajlar ve dezavantajlar barındırmaktadır. Düz çizgi rotası, basitliği ve hız avantajı sayesinde yaygın olarak tercih edilmesine rağmen, her durumda enerji tüketimi veya ilaçlama verimliliği açısından en ideal sonucu üretemeyebilmektedir. (Ivezić, 2023; Poikonen & Campbell, 2020). Öte yandan, zigzag modelinin pestisit dağılımını daha homojen bir biçimde gerçekleştirme potansiyeli bulunmasına karşın, karmaşık arazi geometrilerinde uygulandığında zaman ve enerji kayıplarına yol açabildiği gözlenmektedir. (Yallappa et al., 2023; Xu et al., 2023). Spiral model, dairesel biçimli tarla alanlarında önemli avantajlar sunmakla birlikte, daha geniş ve düzensiz arazi koşullarında verimlilik açısından çeşitli sorunlarla karşılaşabilmektedir. (Chojnacki & Pachuta, 2021; Filho et al., 2019). Bu nedenle, tarımsal alanların geometrik özellikleri ve drone'un operasyonel kapasitesi ile uyumlu rota planlama stratejilerinin geliştirilmesi, enerji verimliliği ve ilaçlama hızının optimize edilmesi açısından büyük bir öneme sahiptir (Sya'roni, 2023; Li et al., 2020).

Drone tabanlı ilaçlama üzerine literatürde artan bir çalışma olsa da, farklı rota stratejilerinin performansını sistematik bir şekilde karşılaştıran kapsamlı incelemelerin eksik olduğu dikkat çekmektedir. Mevcut araştırmalar çoğunlukla drone'lar aracılığıyla gerçekleştirilen ilaçlama uygulamalarında enerji tüketimi veya pestisit dağılımı gibi tekil unsurlara odaklanmakta; ancak farklı rota modellerinin genel operasyonel verimlilik üzerindeki etkilerini bütüncül bir bakış açısıyla ele almamaktadır (Otto et al., 2018; ÖZYURT et al., 2022; İnan & Karci 2021). Bu çalışma, tarımsal ilaçlama operasyonlarında kullanılan farklı rota modellerini analiz etmeyi ve bunların ilaçlama süresi, enerji tüketimi ve verimlilik üzerindeki etkilerini detaylandırmayı amaçlamaktadır. En hızlı, en enerji verimli ve ilaçlama verimliliği açısından en etkili rota modelini belirleyerek, elde edilen bulgular drone tabanlı tarımsal operasyonların sürdürülebilir bir şekilde yönetilmesine önemli katkılar sunacaktır (Dükkancı et al., 2021; Chen et al., 2021).

Sonuç olarak, tarımsal uygulamalarda, özellikle ilaçlama süreçlerinde İHA'ların entegrasyonu; nüfus artışı ve sınırlı tarımsal kaynaklar gibi etkenlerin ortaya çıkardığı zorluklarla mücadelede kayda değer bir ilerlemeyi temsil etmektedir. Rota planlama stratejilerinin seçimi, drone teknolojisinin sağladığı faydaları en üst düzeye çıkarmak açısından kritik önem taşımaktadır. Bununla birlikte, tarımsal ilaçlama operasyonlarında hem operasyonel verimliliği hem de çevresel sürdürülebilirliği artıracak en iyi uygulamaların belirlenebilmesi için daha kapsamlı araştırmaların yürütülmesi gerekmektedir.

2. İlgili Çalışmalar

Tarımsal İnsansız Hava Araçları (İHA) uygulamaları, pestisit dağılımını optimize etmek ve tarımsal verimliliği artırmak için son yıllarda yoğun bir şekilde araştırılmıştır. Bu bağlamda, farklı püskürtme yöntemlerinin, özellikle düz çizgi, zigzag ve spiral yöntemlerin performanslarının karşılaştırılması, tarımda İHA kullanımının etkinliğini anlamak açısından büyük önem taşımaktadır.

Wongsuk (2024), tarımsal insansız hava araçlarının (İHA) püskürtme performansı ve zararlı kontrol etkinliğini değerlendirerek, püskürtme sürecinde atomizasyon özellikleri, İHA konfigürasyonu ve uçuş hızının etkilerini kapsamlı bir şekilde analiz etmektedir. Çalışmada, farklı İHA modelleri ve nozül tipleri karşılaştırılmış; püskürtme çözeltisinin fizikokimyasal özellikleri ile damlacık birikimi ve dağılım uniformitesi üzerindeki etkileri detaylandırılmıştır. Araştırmalar, İHA'ların zararlılara karşı yaklaşık %59,4'ten %90,0'a varan bir kontrol etkinliğine ulaşabildiğini ortaya koymakta ve böylece geleneksel püskürtme sistemlerine kıyasla önemli bir potansiyele sahip olduğunu göstermektedir.

Şanmugam ve arkadaşları (2024), insansız hava araçları (İHA) ile geleneksel püskürtme sistemlerinin mısır tarlalarındaki *Spodoptera frugiperda* zararlısı üzerindeki etkinliğini karşılaştırmalı olarak analiz etmektedir. Çalışmada, farklı püskürtme tekniklerinin (yüksek hacimli püskürtme, kontrol damlacık aplikatörü ve İHA bazlı püskürtme sistemleri) damlacık yoğunluğu, etkinlik düzeyi ve bitki, toprak ile su üzerindeki pestisit kalıntılarının etkileri incelenmiştir. Bulgular, İHA'ların özellikle atomizer nozül kullanımıyla, yüksek hacimli püskürtme sistemleriyle benzer etkinlik sağlayabildiğini ve pestisit kalıntılarının belirlenen güvenlik limitleri içinde kaldığını ortaya koymaktadır. Bu çalışma, İHA'ların hassas tarım uygulamalarındaki operasyonel verimliliğini artırma

potansiyelini ortaya koymakta ve farklı uçuş parametreleri ile püskürtme yöntemlerinin etkinlik üzerindeki etkilerini ayrıntılı şekilde analiz etmektedir.

Liu ve arkadaşları (2024), tarımsal insansız hava araçlarının (İHA) püskürtme operasyonlarında aşağı yönlü hava akımı (downwash) alanı ve püskürtme birikimi üzerindeki etkilerini değerlendirerek, bu süreçlerin etkililiğini artırmaya yönelik bir model geliştirmektedir. Çalışma, İHA'ların oluşturduğu aşağı yönlü hava akımının püskürtme damlacıklarının dağılım özelliklerini nasıl etkilediğini inceleyerek, rüzgar alanı dinamiklerinin püskürtme tutarlılığı üzerindeki belirleyici rolünü ortaya koymaktadır. Elde edilen bulgular, farklı uçuş konfigürasyonlarının ve hava akımı değişkenlerinin püskürtme etkinliği üzerindeki etkilerini analiz etmeye yönelik kapsamlı bir temel sağlamaktadır. Bu kapsamda çalışma, hassas tarım uygulamalarında operasyonel parametrelerin ve performans göstergelerinin en iyi şekilde belirlenmesine yönelik stratejik yaklaşımlar sunmakta ve farklı uçuş modellerinin etkinliği ile verimliliği üzerindeki etkilerini ayrıntılı olarak incelemektedir.

Deng ve ark. (2024), tarımsal dijital teknolojilerin, özellikle de bitki koruma amaçlı insansız hava araçlarının (İHA) pestisit kullanım yoğunluğu üzerindeki etkisini inceleyerek, tarımsal üretimde düşük karbon dönüşümüne katkıda bulunabilecek stratejiler önermektedir. Bulgular, İHA'ların kullanımının pestisit uygulama yoğunluğunu %24,9 oranında azalttığını göstermektedir. Ek olarak, bu etkinin özellikle genç çiftçiler, büyük ölçekli tarım işletmeleri ve yarı zamanlı çiftçiler arasında daha belirgin olduğu tespit edilmiştir. Çalışma, farklı çiftçi gruplarına yönelik uyarlanmış politikaların geliştirilmesi gerektiğini vurgulayarak, hassas tarım uygulamalarında operasyonel parametrelerin ve performans göstergelerinin optimize edilmesine yönelik stratejik öneriler sunmaktadır.

Kovalev (2023), tarımsal İHA'ların düz hat, zikzak ve spiral gibi farklı püskürtme yöntemlerini değerlendirerek, püskürtme işleminin zaman yapısına dayalı bir model önerisi sunmaktadır. Bu model, İnsansız Hava Araçları (İHA)'ların performansını hesaplamak ve çeşitli yöntemlerin verimliliğini değerlendirmek için doğrudan uygulanabilir bir temel oluşturmaktadır. Çalışma, hassas tarımda operasyonel parametrelerin ve performans göstergelerinin önemine vurgu yaparak, farklı uçuş modellerinin etkinlik ve verimliliği üzerindeki etkilerini detaylandırmaktadır.

Benzer şekilde, Li (2023) tarımsal püskürtme İHA'ları için kapsam yolu planlama (Coverage Path Planning, CPP) yöntemlerini incelemiş ve özellikle karmaşık arazilerde farklı rota stratejilerinin uygulanabilirliği üzerine yoğunlaşmıştır. Çalışma, düz çizgi, zikzak ve spiral yöntemlerin uçuş mesafesi ve kapsama oranını optimize etmede önemli roller oynadığını ortaya koymuştur. Ayrıca, bu stratejilerin gerçek dünya tarımsal senaryolarındaki pratik uygulamalarını vurgulayarak, verimliliği artırmak ve operasyonel zorlukları aşmak için uygun algoritmaların geliştirilmesini önermiştir.

Yu ve arkadaşları (2022), özellikle zorlu arazilerde İHA'ların rota planlaması üzerine odaklanmış ve bu bağlamda çoklu kısıtlamaları ele alan optimizasyon algoritmalarını tartışmıştır. Çalışma, geniş alanlarda kapsama oranını artırmak ve verimliliği yükseltmek amacıyla birden fazla İHA'nın iş birliği içinde çalışmasının gerekliliğini ortaya koymuştur. Bu yaklaşım, farklı rota yöntemlerinin, çeşitli tarımsal ortamlarda etkinliğini artırma potansiyelini vurgulamaktadır.

Srivastava ve arkadaşları (2020), tarımsal püskürtme uygulamalarında İHA rotalarının optimizasyonu üzerine yaptığı çalışmada, özellikle gezgin satıcı problemi (Travelling Salesman Problem, TSP) ve Voronoi diyagramları gibi algoritmaların önemine dikkat çekmiştir. Çalışmada, kaynak kullanımını en aza indirirken kapsamı maksimize eden yöntemlerin tarımsal verimliliği artırabileceği vurgulanmıştır. Bu bulgular, düz çizgi, zikzak ve spiral yöntemlerin performansını anlamak ve optimize etmek açısından temel bir katkı sunmaktadır.

Aliane ve arkadaşları (2022), hassas tarımda İHA uygulamalarının operasyonel karmaşıklıklarını ele alarak, görüntü edinimi ve görev doğrulama gibi süreçlerde yazılım destekli optimizasyon yöntemlerinin önemini vurgulamıştır. Çalışma, rota optimizasyonunun İHA uygulamalarında karşılaşılan zorlukların üstesinden gelmede kritik bir rol oynadığını ortaya koymuştur. Bu bağlamda, düz çizgi, zikzak ve spiral yöntemlerin uygulanabilirliği üzerine önemli veriler sunmaktadır.

Just ve arkadaşları (2020), İHA'lar için rota yöntemlerinin optimize edilmesinin, uçuş süresi ve kat edilen mesafeyi önemli ölçüde azaltabileceğini göstermiştir. Çalışma, sensör düğümlerinin operasyonel ömrünü en üst düzeye çıkarırken tarımsal izleme ve püskürtme operasyonlarında verimliliği artıran algoritmalar önermektedir. Bu bulgular, farklı rota yöntemlerinin tarımsal püskürtme senaryolarındaki uygulanabilirliği hakkında önemli içgörüler sağlamaktadır.

Morales-Rodríguez ve arkadaşları (2022), İHA püskürtme sistemlerinin geleneksel püskürtme yöntemlerine kıyasla avantajlarını vurgulamış ve bu sistemlerin, düz çizgi, zikzak ve spiral yöntemler gibi farklı stratejilerle nasıl optimize edilebileceğini incelemiştir. Çalışma, İHA'ların daha düşük su ve ürün maliyetleriyle verimliliği artırma potansiyeline sahip olduğunu ortaya koymuştur.

Son olarak, Zhang ve arkadaşları (2021), İHA iş akışlarının optimize edilmesinde karşılaşılan zorluklara odaklanarak, farklı rotalama stratejilerinin etkinliği üzerindeki etkilerini tartışmıştır. Niu ve arkadaşları (2020) ise tarımsal su yönetiminde İHA'ların rolünü vurgulamış ve uygun rota yöntemleri ile bu verilerin daha etkin bir şekilde kullanılabileceğini belirtmiştir.

Tüm bu çalışmalar, düz çizgi, zikzak ve spiral yöntemler gibi farklı püskürtme rotalarının tarımsal İHA uygulamalarında etkinliğini anlamak ve optimize etmek için önemli bir temel sağlamaktadır. Bu bağlamda, rota yöntemlerinin seçimi, tarımsal senaryoların verimliliği üzerindeki etkisiyle kritik bir öneme sahiptir.

3. Materyal ve Metotlar

Bu çalışmada, tarımsal ilaçlama için farklı drone rota planlama modellerinin karşılaştırılması amacıyla deneysel bir yaklaşım benimsenmiştir. Çalışmanın yöntem kısmı, deneysel tasarım, kullanılan drone özellikleri, rota modellerinin tanımlanması, veri toplama süreci ve analiz yöntemlerine dair ayrıntılı bilgiler içermektedir.

3.1. Deney Alanı

Çalışma, 1 hektarlık dikdörtgen şeklinde bir tarım alanında gerçekleştirilmiştir. Bu alan, farklı geometri ve bitki yoğunluğuna sahip bölgelere ayrılarak, her bölge için rota optimizasyonu sağlanmıştır. Deney alanının çeşitli bölgelerinde, farklı rota modellerinin etkileri değerlendirilecektir. Alanın tamamı, doğal çevresel faktörlerin etkisini minimize etmek amacıyla açık hava koşullarında belirli bir dönemde gözlemlenmiştir.

3.2. Kullanılan Drone

Çalışmada, kendi geliştirdiğimiz insansız hava aracı kullanılmıştır. Şekil 1'de tasarlanan drone'a ait grafik sunulmuştur. Bu drone, 16 litre ilaçlama kapasitesine sahip olup, maksimum hızda 15 m/s'ye kadar uçuş yapabilmektedir. Drone, GPS(Global Positioning System) tabanlı otonom uçuş sistemine sahip olup, her türlü rota modelini takip etmek için gerekli yazılım ve donanım desteğine sahiptir. Drone üzerinde, ilaçlama yaparken kullanılan sensörler (püskürtme nozulları ve yük hücreleri) ile gerçek zamanlı veri toplanmış ve enerji tüketimi ile ilaçlama doğruluğu ölçülmüştür.



Şekil 1. Çalışmada kullanılan drone'un görüntüsü

Tablo 1. Mevcut çalışmada kullanılan İHA'nın özellikleri

Drone parçaları	Öge	Özellikler
Drone frame	Çerçeve Tipi	Karbon fiber 4 rotorlu drone
PX4 controller	Ana çip CPU RAM Bağlantı Sensörler Ağırlık	STM32F765 216 MHz ARM® Cortex® M4 512 KB SRAM 1× I2C, 2× CAN, 1× ADC, 4× UART İvmeölçer, 3 eksenli jiroskop, barometre, manyetometre 33.3g
Drone motor	Tipi Tipik dayanıklılık Ağırlık Hız Maksimum İtiş	Fırçasız doğru akım motoru 40 ila 60 dakika 1040g 100KV 15.3 kg

RC kontrolörü	Model	FS-FTr10 verici
	Kanal Sayısı	18
	RF(Radio Frekans)	2.4 G
	Modülasyon sistemi	AFHDS3
	Uzaklık	>3KM
Battery	Minimum kapasite	22000 mAh
	Yapılandırma	6S1P / 22.2 V
	Boşaltma oranı	25C
	Ağırlık	2516g
Işık algılama ve menzil ölçümü (LIDAR)	Model	TF02-Pro 40m IP65 LiDAR
	Çalışma aralığı	0.1-40m
	Ağırlık	50g
	Frekans	1-1000Hz
	Arayüz	UART
GPS	Osilatör Türü	Kristal
	Teknoloji	GPS, GLONASS
	Hafıza	ROM
	Navigasyon güncelleme oranı	10 Hz'e kadar
Drone spraying system	Tank ağırlığı	16l
	Fırçasız su pompası akış hızı	8l/min
	Su giriş çapı	10.5mm
	Su çıkış çapı	6.5mm
	Koruma seviyesi	IP67

3.3. Rota Modelleri

Bu çalışmada üç ana rota planlama modeli test edilmiştir:

- **Düz Çizgi Yöntemi:**

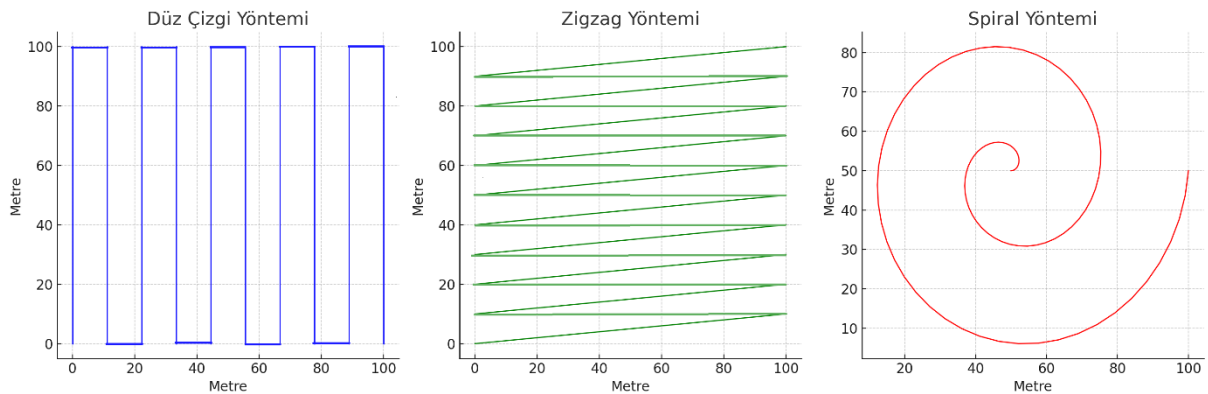
Bu yöntemde, drone alanı baştan sona doğru bir doğrusal şekilde tarar. Her bir ilaçlama sütunu arasında kesintisiz hareket edilir. Bu rota, genellikle basit ve hızlı olmakla birlikte, enerji verimliliği ve ilaçlama doğruluğu üzerinde daha az optimize edilmiş bir çözüm sunar.

- **Zikzak Yöntemi:**

Zikzak rotasında, drone bir yönde ilaçlama yaptıktan sonra, yön değiştirerek ters yöne hareket eder. Bu yöntem, daha homojen ilaçlama sağlar ve genellikle düz çizgi yöntemine göre daha verimli kabul edilir. Ancak, dönme sırasında enerji kayıpları olabilir.

- **Spiral Yöntemi:**

Spiral rotası, drone'un alanın merkezinden başlayarak dışa doğru genişleyen bir yol izler. Bu yöntem özellikle dairesel alanlarda etkili olup, ancak büyük ve düzensiz alanlarda verimlilik kayıplarına yol açabilir.



Şekil 2. Rota planlama modelleri

Yukarıda verilen Şekil 2’de 100x100m’lik bir alandaki ağaçların ilaçlanma yöntemleri sunulmuştur. Bu çalışmada, farklı rota modellerinin tarımsal ilaçlama süreçlerine etkilerini incelemek amacıyla gerçekleştirilen deneylerde elde edilen sonuçlar aşağıda Tablo 2’de sunulmuştur. Tablo 2’deki değerler drone’nun hızının(3,5,7

m/s), rüzgar hızının < 2 m/s ve hava sıcaklığının 21-24°C aralığında olduğu koşullarda elde edilmiş ortalama değerlerdir. Her bir rota modelinin ilaçlama süresi, enerji tüketimi, ilaçlama etkinliği ve çevresel koşullara bağlı performansı detaylı bir şekilde raporlanmıştır.

Tablo 2. Farklı rota modellerinin ilaçlama süreçlerine etkisi

Rota Modeli	İlaçlama (Ortalama)	Süresi	Enerji (kWh/100m ²)	Tüketimi	İlaçlama Etkinliği (%)	İlaç Kullanımı (L/100m ²)	Maliyet (Yaklaşık)
Düz Çizgi	15-30 dakika		0.5-1		75-90	5-7	Orta
Zigzak	18-35 dakika		1-1.5		70-85	4-6	Orta- Yüksek
Spiral	22-40 dakika		1.5-2		65-80	3-5	Yüksek

İlaçlama süresi (T), Alan Büyüklüğü, Geçiş Başına Süre, Geçiş Sayısı, Drone Hızı gibi dört ana faktöre bağlıdır. İlaçlama süresi için gerekli matematiksel model Aşağıda Eşitlik 1’de verilmiştir.

$$T = \frac{A \cdot N}{v} + (t_0 \cdot N) \quad (1)$$

A alan büyüklüğünü (m²), N yapılacak geçiş sayısını (yöntemlere göre değişir), v ekipman hızını (m²/saat) ve t her geçişin başlangıcında harcanan süreyi (başlangıç manevrası veya duraklamalar) (saat) temsil etmektedir. Aşağıda Algoritma 1’de açıklandığı gibi toplam süre değerini veren fonksiyonun sözde kodu bulunmaktadır.

Algoritma 1. Toplam süreyi hesaplayan algoritma

```

function calculate_T (A, N, v, t0)
output: T //Toplam ilaçlama süresi
input: A, //Alan büyüklüğü
        N, //Geçiş sayısı
        v, //Drone hızı
        t0, //Başlangıç zamanı
1. term1 ← (A * N) / v
2. term2 ← t0 * N
3. T = term1 + term2
4. return T

```

Enerji tüketim miktarı, enerji tüketim oranı, ilaçlanacak alanın büyüklüğü ve geçiş sayısı gibi parametrelere bağlıdır. Eşitlik 2’de bu matematiksel denklem verilmiştir.

$$E = k_e \cdot A \cdot N \quad (2)$$

k_e Enerji tüketim oranını (kWh/100m²), A alan büyüklüğünü (m²) ve N geçiş sayısını ifade etmektedir.

İlaç kullanım miktarı, ilaç kullanım oranı, ilaçlanacak alanın büyüklüğü ve geçiş sayısı gibi parametrelerle ilişkilidir. Eşitlik 3’teki matematiksel denklem bu hesaplamayı ifade etmektedir.

$$I = k_l \cdot A \cdot N \quad (3)$$

k_l ilaç kullanım oranını (L/100m²), A alan büyüklüğünü (m²) ve N geçiş sayısını ifade etmektedir.

3.4. Veri Toplama ve Analiz

Veri toplama süreci, her bir rota modelinin test edilmesi sırasında sürekli olarak kaydedilen verilerle gerçekleştirilmiştir. Her bir uçuşta aşağıdaki veriler toplanmıştır:

- İlaçlama Süresi: Her bir rota modelinin tamamlanma süresi kaydedilmiştir. Bu süre, rota uzunluğu ve drone hızına bağlı olarak değişiklik göstermektedir.
- Enerji Tüketimi: Drone'nun enerji tüketimi, bataryadaki kalan güç seviyesinin uçuş öncesi ve sonrası ölçülmesiyle belirlenmiştir. Bu veriler, rota başına harcanan enerji miktarını hesaplamak için kullanılmıştır.

- İlaçlama Etkinliği: İlaçlama etkinliği, bitki yüzeylerine uygulanan ilaç miktarının homojenliği ve alanın her bir kısmında ilaçlama doğruluğunun ölçülmesiyle değerlendirilmiştir. Bu, drone üzerindeki sensörlerle sağlanan verilerle izlenmiştir.
- Çevresel Koşullar: Hava durumu, rüzgar hızı ve sıcaklık gibi çevresel faktörler de gözlemlenmiş ve çalışmanın doğruluğunu etkileyebilecek herhangi bir dış faktör not edilmiştir.

3.5. İstatistiksel Analiz

Veri analizinde, her rota modelinin ilaçlama süresi, enerji tüketimi ve etkinliği arasındaki ilişkiler incelenmiştir. Elde edilen veriler, ANOVA (Analysis of Variance) testi kullanılarak karşılaştırılmıştır. Bu analiz, farklı rota modellerinin istatistiksel olarak anlamlı farklar yaratıp yaratmadığını belirlemek için yapılmıştır. Ayrıca, rota modellerinin enerji tüketimi ile ilaçlama süresi arasındaki ilişkiyi görmek için Korelasyon Analizi uygulanmıştır.

3.6. Sınırlamalar ve Değerlendirme Kriterleri

Çalışmanın sınırlamaları arasında, sadece belirli bir drone modeli ve sabit çevresel koşullar altında yapılan testler bulunmaktadır. Sonuçlar, her bir rota modelinin avantajları ve dezavantajları açısından değerlendirilecek ve gelecekteki araştırmalara yön verecek önerilerde bulunulacaktır.

4. Araştırma Bulguları

Tarımda farklı püskürtme rotalarının, özellikle düz çizgi yöntemi, zikzak yöntemi ve spiral yöntemin performans karşılaştırması, pestisit uygulamasının optimize edilmesi ve tarımsal verimliliğin artırılması açısından büyük bir öneme sahiptir. Bu yöntemlerin her biri, İHA (İnsansız Hava Aracı) püskürtme sistemlerinin etkinliğini ve verimliliğini etkileyen özgün avantajlar ve dezavantajlar sunmaktadır.

Bu çalışmada, 1 hektarlık bir alanın ilaçlanmasında üç farklı rota yöntemi incelenmiştir. Bunlar Düz Çizgi, Zikzak ve Spiral Yöntemler olarak ifade edilmektedir. Drone'dan elde edilen deneysel veriler üzerine her bir rota planının enerji tüketimi, ilaçlama süresi, etkinlik oranı ve homojenlik seviyesi aşağıda verilen alt başlıklarda detaylı bir şekilde sunulmuştur.

4.1 Rota Yöntemine Göre Alanın İlaçlanması

Deneyler, 5 m/s sabit bir hızda ve 5 L yük taşıyan bir drone ile gerçekleştirilmiştir. İlaçlama işlemleri farklı rota yöntemleri kullanılarak yürütülmüş olup, 1 hektarlık alanın ilaçlanmasına ilişkin sonuçlar Tablo 3'te özetlenmiştir. Çalışmalar, çevresel değişkenlerin etkisini en aza indirmek amacıyla, rüzgar hızının < 2 m/s ve hava sıcaklığının 21-24°C aralığında sabit tutulduğu kontrollü koşullarda gerçekleştirilmiştir.

Tablo 3. Farklı ilaçlama rotalarının performans karşılaştırması

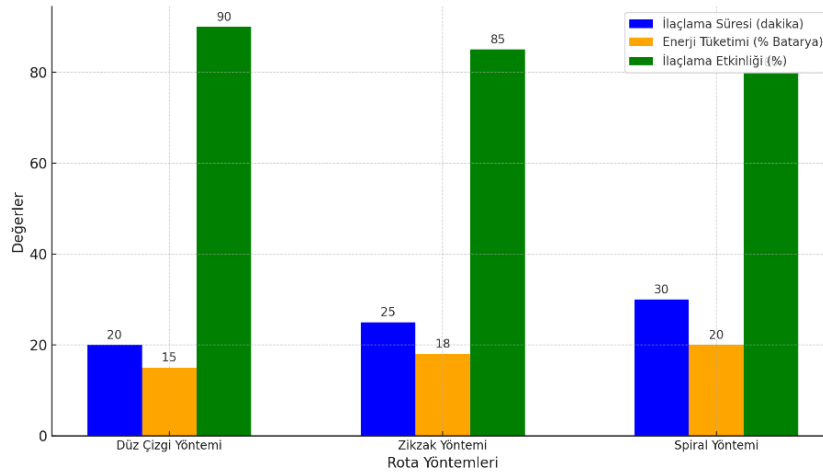
Rota Yöntemi	İlaçlama Süresi (dakika)	Enerji Tüketimi (% Batarya)	Rota Başına Enerji (kWh)	İlaçlama Etkinliği (%)	İlaçlama Homojenliği	Toplam İlaçlanan Alan (hektar)
Düz Çizgi Yöntemi	20	15	1.2	90	Yüksek	1
Zikzak Yöntemi	25	18	1.4	85	Orta	1
Spiral Yöntemi	30	20	1.5	80	Düşük	1

Düz çizgi yöntemi, tarımsal uygulamalarda İnsansız Hava Araçları (İHA) ile yapılan ilaçlama işlemlerinde yaygın olarak kullanılan bir rota planlama stratejisidir. Bu yöntem genellikle basitliği ve geniş alanların minimum örtüşmeyle verimli bir şekilde kaplanmasını sağlaması nedeniyle tercih edilmektedir. Bu yöntem, özellikle düz arazilerde homojen kaplama sağlama açısından avantajlıdır. Araştırmalar, düz çizgi rotalarını kullanan İHA'ların yüksek operasyon hızları ve azalan uçuş süreleri sayesinde tarımsal püskürtmede üretkenliği artırabildiğini göstermektedir (Kovalev, 2023). Ancak, bu yöntem, ağaçlar veya engebeli arazi gibi engellerin bulunduğu karmaşık alan geometrilerinde etkili olamayabilir ve bu da eksik alanlar veya düzensiz uygulama oranlarına yol açabilir (Li, 2023). Düz Çizgi Yöntemi, 20 dakika ile en kısa ilaçlama süresine ve %15 batarya tüketimi ile en düşük enerji kullanımına sahiptir. Rota başına enerji tüketimi 1.2 kWh olarak hesaplanmış, ilaçlama etkinliği %90 ile en yüksek seviyede, homojenlik ise "yüksek" olarak değerlendirilmiştir.

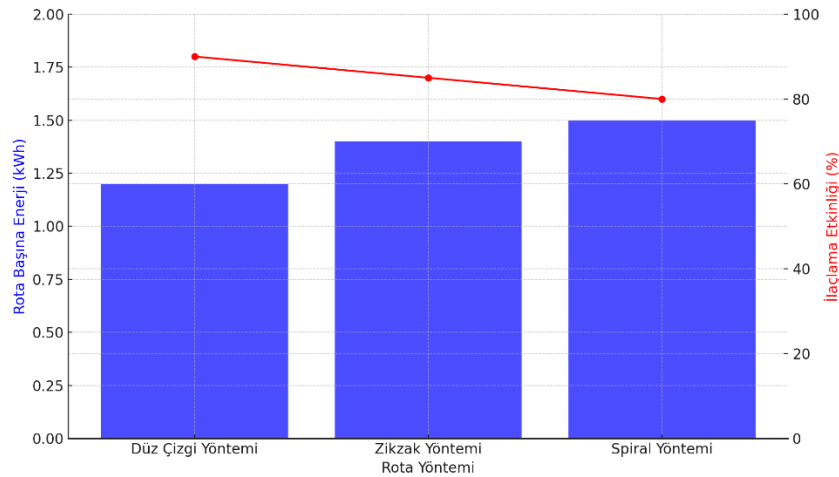
Zikzak yöntemi, daha karmaşık arazi düzenlerinde kaplamayı artırmak için tasarlanmıştır. Bu yöntem, İHA'ların engelleri daha etkili bir şekilde aşmasına olanak tanıyarak tüm alanların yeterli şekilde işlenmesini sağlar. Araştırmalar, zikzak deseninin, özellikle değişken topografyaya sahip ortamlarda, mahsullerde damlacık birikimini önemli ölçüde artırabileceğini ortaya koymaktadır (Cavalari, 2023; Morales-Rodríguez ve ark., 2022). Ayrıca, zikzak yöntemi, damlacıkların hedef alandan uzaklaşma mesafesini azaltarak sprey kaymasını minimize eder, bu da pestisit uygulamalarında kritik bir avantajdır (Chen ve ark., 2021). Bununla birlikte, bu yöntemin karmaşık uçuş yolları gerektirmesi nedeniyle uçuş sürelerini uzattığı ve operasyonel maliyetleri artırdığı bildirilmiştir (Arakawa ve Kamio, 2023). Zikzak Yöntemi, 25 dakika ilaçlama süresi ve %18 batarya tüketimi ile biraz daha fazla enerji harcayan bir yöntemdir. Rota başına enerji tüketimi 1.4 kWh iken, ilaçlama etkinliği %85'e düşmüştür. Homojenlik seviyesi ise "orta" olarak belirlenmiştir.

Daha az yaygın kullanılan spiral yöntemi ise, dairesel veya düzensiz şekilli alanlarda etkili olabilecek bir yaklaşım sunar. Bu yöntem, geleneksel rotaların zorlandığı durumlarda kaplamayı optimize edebilen içe doğru veya dışa doğru bir püskürtme düzeni sağlar. Özellikle bağlar ve bahçelerde düz çizgi veya zikzak desenlerinin uygun olmadığı durumlarda, spiral yöntem damlacık birikimini artırdığı gözlemlenmiştir (Yao ve ark., 2019). Ancak, bu yöntemin karmaşık uçuş yolları nedeniyle daha büyük alanlarda operasyonel sürenin artmasına ve verimsizliklere yol açabileceği belirtilmiştir (Kovalev, 2023). Spiral Yöntem, 30 dakika ile en uzun ilaçlama süresine ve %20 batarya tüketimi ile en yüksek enerji kullanımına sahiptir. Rota başına enerji tüketimi 1.5 kWh olup, ilaçlama etkinliği %80 ile en düşük seviyededir. Ayrıca, homojenlik seviyesi "düşük" olarak değerlendirilmiştir.

Aşağıda, Şekil 3'te rota başına enerji tüketimi ile ilaçlama etkinliği arasındaki ilişki, Şekil 4'te ise rota başına enerji tüketimi ve ilaçlama etkinliği performansına dair görsel temsiller sunulmaktadır.



Şekil 3. İlaçlama süresi ve enerji tüketimi karşılaştırılması



Şekil 4. Rota başına enerji ve ilaçlama etkinliği

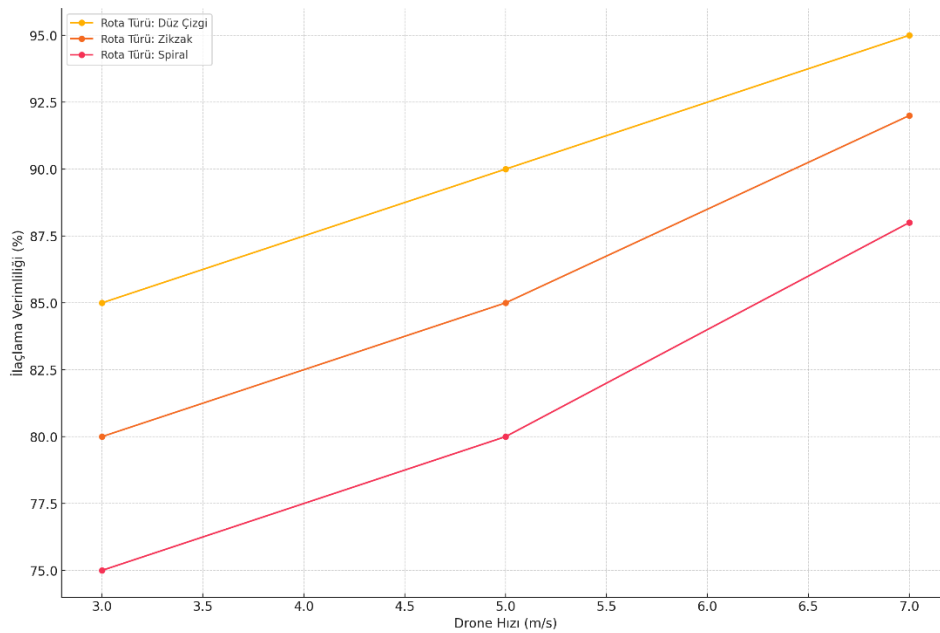
4.2 Drone Hızına Göre Alanın İlaçlanması

Deneylerde, 3, 5 ve 7 m/s hızlarında sabit uçan ve 5 L yük taşıyan bir drone kullanılmıştır. Farklı rota yöntemleri uygulanarak gerçekleştirilen ilaçlama işlemlerinde, 1 hektarlık alanın ilaçlanmasıyla ilgili sonuçlar Tablo 3'te aşağıdaki gibi özetlenmiştir.

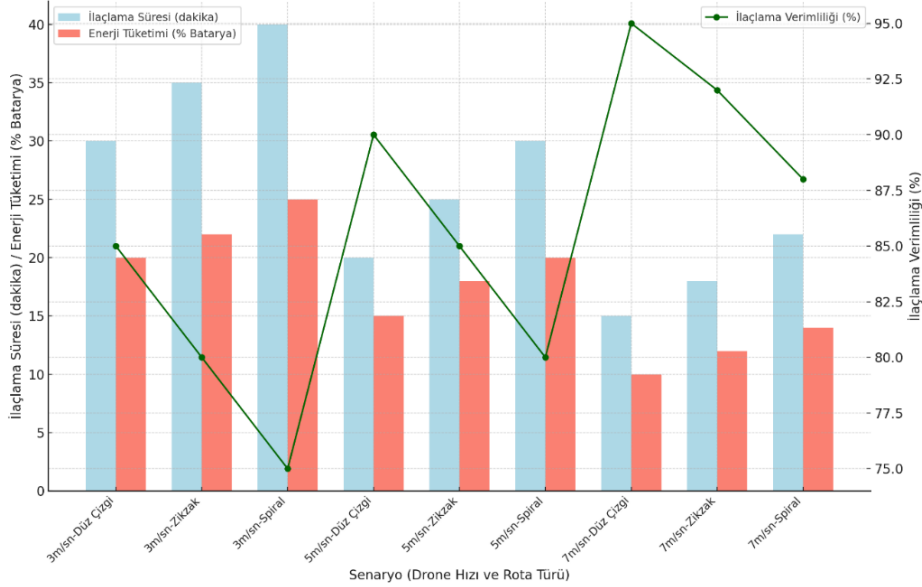
Tablo 3. Farklı drone hızlarının ilaçlama performansına etkisi

Senaryo	Drone Hızı(m/s)	İlaçlama Türü	İlaçlama Süresi (min)	İlaçlama Verimliliği (%)	İlaçlama Homejenliği	Toplam ilaçlanan alan (hektar)	Enerji Tüketimi (% Batarya)	Rota Başına Enerji (kWh)
1	3	Düz Çizgi	30	85	Yüksek	1	20	1.5
2	3	Zikzak	35	80	Orta	1	22	1.6
3	3	Spiral	40	75	Düşük	1	25	1.8
4	5	Düz Çizgi	20	90	Yüksek	1	15	1.2
5	5	Zikzak	25	85	Orta	1	18	1.4
6	5	Spiral	30	80	Düşük	1	20	1.5
7	7	Düz Çizgi	15	95	Yüksek	1	10	1.0
8	7	Zikzak	18	92	Orta	1	12	1.1
9	7	Spiral	22	88	Düşük	1	14	1.3

3 m/s hızla gerçekleştirilen ilaçlama, 30 dakika ilaçlama süresi ile en kısa süreyi sunmuş, %85 etkinlik ve "yüksek" homojenlik sağlamıştır. Batarya tüketimi %20, rota başına enerji ise 1.5 kWh olarak ölçülmüştür. 5 m/s hızla yapılan ilaçlama, 35 dakika ile süresi uzamış, etkinlik %80'e düşmüş ve homojenlik "orta" olarak değerlendirilmiştir. Enerji tüketimi %22, rota başına enerji ise 1.6 kWh olmuştur. 7 m/s hızla yapılan ilaçlama ise 40 dakika ile en uzun sürede tamamlanmış, etkinlik %75'e, homojenlik ise "düşük" seviyeye gerilemiştir. Enerji tüketimi %25 ve rota başına enerji 1.8 kWh'tir. Bu farklı hızlara göre ilaçlama sürelerinin görsel temsili Şekil 5'te sunulmuştur. Drone hızı ile rota türünü kullanarak ilaçlama süresi, ilaç verimliliği, ilaç homejenliği, enerji tüketimi arasındaki ilişki ise Şekil 6'da verilmiştir.



Şekil 5. İlaçlama zamanı ve drone hızı arasındaki ilişki



Şekil 6. Drone hızı ile rota türünü kullanarak ilaçlama süresi, ilaç verimliliği, ilaç homejenliği, enerji tüketimi arasındaki ilişki

5. Sonuçlar

Tarımda farklı püskürtme rotalarının, özellikle düz çizgi, zikzak ve spiral yöntemlerinin performans karşılaştırması, pestisit uygulamalarının optimize edilmesi ve tarımsal verimliliğin artırılması açısından kritik bir öneme sahiptir. Bu çalışma, İHA (İnsansız Hava Aracı) teknolojisinin tarımda nasıl daha etkili bir şekilde kullanılabileceğini ortaya koymaktadır. Düz çizgi, zikzak ve spiral yöntemlerinin her biri, belirli avantajlar ve dezavantajlar sunmakta, bu da tarımsal uygulamalarda hangi yöntemin daha uygun olabileceği konusunda önemli bilgiler sağlamaktadır.

DeneySEL veriler, her bir rota planının enerji tüketimi, ilaçlama süresi, etkinlik oranı ve homojenlik seviyesi gibi kriterler açısından detaylı bir şekilde incelenmiştir. Bu kriterler, tarımsal verimliliğin artırılması ve pestisit kullanımının optimize edilmesi için kritik öneme sahiptir. Özellikle, enerji verimliliği ve uygulama süresi, tarımsal işletmelerin maliyetlerini doğrudan etkileyen faktörlerdir. Bu nedenle, çiftçilerin hangi püskürtme yöntemini seçecekleri konusunda bilinçli kararlar vermeleri için bu tür karşılaştırmalar büyük önem taşımaktadır.

Bu çalışma, drone tabanlı tarımsal ilaçlama sistemleri kullanılarak Düz Çizgi, Zikzak ve Spiral olmak üzere üç farklı ilaçlama rota yönteminin performansı ve enerji tüketimi üzerine kapsamlı bir değerlendirme yapmıştır. Çalışmada elde edilen temel bulgular şu şekilde özetlenmiştir. Düz Çizgi Yöntemi, yapılan deneyler sonucunda en düşük enerji tüketimini sağlayan yöntem olarak öne çıkmıştır. Bu yöntemin uygulanması sırasında, her bir rota başına ortalama olarak %21,67 batarya kullanımı gerçekleşmiş ve 0,33 kWh enerji tüketilmiştir. Bu değerler, diğer püskürtme yöntemleri ile kıyaslandığında enerji verimliliği açısından oldukça avantajlı olduğunu göstermektedir. Ancak, Düz Çizgi Yöntemi'nin sağladığı ilaçlama etkinliği, yalnızca %79 seviyesinde kalmış ve homojenlik açısından da belirli sınırlamalar göstermiştir. Bu durum, özellikle karmaşık ve engebeli arazilerde kullanılan bu yöntemin etkinliğini sınırlayarak, her bölgeye eşit miktarda ilaç püskürtme konusunda yetersiz kalmasına neden olmuştur. Bu yöntem, düz ve geniş araziler ile basit geometrik şekillere sahip tarım alanlarında en uygun püskürtme stratejisi olarak değerlendirilse de, daha karmaşık yapıya sahip ve farklı eğimlere sahip tarım alanlarında homojen bir kaplama sağlama konusunda yeterli performans gösterememektedir. Bu nedenle, özellikle düzensiz arazi yapısına sahip bölgelerde, alternatif püskürtme stratejileriyle desteklenmesi gerekmektedir.

Zikzak yöntemi, tarımsal ilaçlama süreçlerinde performans ve enerji kullanımı arasında dengeli bir yaklaşım sunmuştur. Bu yöntemin uygulanması sonucunda, ilaçlama etkinliği oldukça yüksek bir seviyeye ulaşarak %83 oranında başarı sağlamıştır. Aynı zamanda, püskürtme işleminin homojenliği açısından da önemli avantajlar sunarak daha eşit bir dağılım elde edilmesine olanak tanımıştır. Ancak, bu yöntemin sağladığı homojenlik ve etkinlik avantajlarının bir sonucu olarak, enerji tüketimi düz bir hat üzerinde yapılan ilaçlama yöntemine kıyasla bir miktar daha yüksek olmuştur. Spesifik olarak, zikzak yöntemiyle gerçekleştirilen ilaçlama işlemleri, %24,48 oranında batarya tüketimine neden olmuş ve her rota başına 0,38 kWh enerji harcanmasını gerektirmiştir. Bu veriler değerlendirildiğinde, zikzak yöntemi özellikle karmaşık ve düzensiz arazi yapısına sahip tarım alanlarında daha etkin bir çözüm sunmaktadır. Düz hat yönteminin yetersiz kaldığı alanlarda daha iyi bir kaplama sağlarken,

enerji tüketimini de makul seviyelerde tutarak sürdürülebilir bir ilaçlama stratejisi geliştirilmesine katkıda bulunmaktadır. Sonuç olarak, zikzak yöntemi, hem verimlilik hem de enerji tüketimi açısından optimize edilmiş bir alternatif olarak değerlendirilebilir.

Spiral yöntem, yapılan deneyler sonucunda, tarımsal ilaçlama uygulamalarında en yüksek etkinliği sağlayan yöntem olarak öne çıkmıştır. Yüzey kaplama etkinliği açısından değerlendirildiğinde, bu yöntem, ilaçlama sürecinde %88 oranında etkinlik göstermiştir. Bununla birlikte, püskürtülen ilacın alana homojen bir şekilde dağılmasını sağlama konusunda da oldukça başarılı olduğu tespit edilmiştir. Bu durum, özellikle düzensiz şekilli tarım alanlarında, meyve bahçeleri gibi farklı yoğunlukta bitki örtüsüne sahip bölgelerde büyük bir avantaj sağlamaktadır. Ancak, bu yüksek etkinlik ve homojen dağılım avantajlarının bir dezavantajı olarak, spiral yöntemin enerji tüketimi açısından diğer yöntemlere kıyasla daha maliyetli olduğu belirlenmiştir. Yapılan ölçümler sonucunda, bu yöntemin her bir rota boyunca ortalama %31,13 oranında batarya tükettiği görülmüştür. Bunun yanı sıra, enerji harcaması açısından değerlendirildiğinde, her bir ilaçlama rotasının yaklaşık 0,46 kWh enerji tükettiği hesaplanmıştır. Bu da spiral yöntemin enerji açısından en fazla tüketim yapan strateji olduğunu göstermektedir. Sonuç olarak, spiral yöntem, ilaçlama etkinliği ve homojen dağılım açısından en yüksek verimliliğe sahip olsa da, enerji verimliliği açısından dezavantajlıdır. Özellikle geniş alanlarda enerji tasarrufunun önemli olduğu durumlarda, bu yöntemin uygulanabilirliği, enerji tüketimi dikkate alınarak değerlendirilmelidir.

Drone hızının 3 m/s'den 7 m/s'ye çıkarılması, tarımsal ilaçlama süresinde belirgin bir azalmaya neden olmuştur. Daha yüksek hızlarda, dronenin belirli bir alanı daha kısa sürede kapsayabilmesi, operasyon süresini kısaltarak zaman açısından avantaj sağlamıştır. Ancak, yapılan analizler ve elde edilen deneysel veriler göstermektedir ki, hızın 5 m/s seviyesinde olması, hem verimlilik açısından en iyi sonuçları sağlamış hem de ilaçlama işlemi sırasında yüksek düzeyde homojenlik elde edilmesine olanak tanımıştır. Bu hızda, ilaç dağılımının daha dengeli olduğu ve alan genelinde optimum püskürtme sağlandığı gözlemlenmiştir. Sonuç olarak, 5 m/s hızı, hem etkinlik hem de homojen dağılım açısından en ideal çalışma koşulu olarak belirlenmiştir.

Enerji tüketimi ile ilaçlama performansı arasında belirgin bir denge bulunmaktadır. Düz Çizgi Yöntemi, enerji verimliliği açısından en ideal seçenek olarak öne çıkmakla birlikte, homojenlik düzeyi sınırlı kalmaktadır. Zikzak Yöntemi, orta derecede karmaşık alanlar için enerji tüketimi ve ilaçlama performansı arasında dengeli bir çözüm sunmaktadır. Spiral Yöntemi ise yüksek ilaçlama verimliliği ve homojenlik sağlamakla birlikte, daha fazla enerji tüketimi gerektirmektedir. Bu sonuçlar, enerji verimliliği ile ilaçlama performansı arasında bir denge olduğunu ve yöntem seçiminin bitki türü, tarla geometrisi ve operasyonel öncelikler gibi faktörlere bağlı olduğunu ortaya koymaktadır. Düz çizgi, zikzak ve spiral püskürtme rotaları arasındaki seçim, arazi şekli, mahsul tipi ve çevresel koşullar gibi tarımsal bağlama özgü faktörlere dayanmalıdır. Her yöntemin avantajları ve sınırlamaları bulunmakla birlikte, en uygun seçimin belirlenmesi, püskürtme görevine ilişkin özel gereksinimlere bağlıdır.

Alan bazlı optimizasyon, tarla geometrisi ve çevresel koşullara göre en uygun ilaçlama rotasını belirleyen uyarlanabilir algoritmaların geliştirilmesi; batarya verimliliğinin artırılması, performanstan ödün vermeksizin batarya tüketimini azaltmak amacıyla enerji verimli drone teknolojilerinin ve rota optimizasyon yöntemlerinin araştırılması; çevresel etki değerlendirmesi, farklı pestisit uygulama homojenliği ve verimliliğinin çevresel etkilerinin kapsamlı bir şekilde incelenmesi; gerçek zamanlı ayarlamalar, operasyon sırasında ilaçlama verimliliği ölçütlerine dayalı olarak drone rotalarının dinamik şekilde optimize edilmesine olanak tanıyan gerçek zamanlı geri bildirim sistemlerinin entegrasyonu; ve maliyet-fayda analizi, farklı rota yöntemlerinin ekonomik uygulanabilirliğini değerlendirerek pratik tarım uygulamaları için kapsamlı bir rehber oluşturulması gibi alanlarda gerçekleştirilecek çalışmalar önerilmektedir. Bu ilerlemeler, drone destekli ilaçlama sistemlerinin daha da optimize edilmesine katkı sağlayarak, hassas tarım uygulamalarında sürdürülebilirliği ve operasyonel verimliliği artıracaktır.

Sonuç olarak, bu çalışma, tarımda İnsansız Hava Araçları (İHA) ile yapılan pestisit uygulamalarının etkinliğini artırmak için farklı püskürtme rotalarının sistematik bir şekilde değerlendirilmesinin gerekliliğini vurgulamaktadır. Tarımsal verimliliği artırmak ve sürdürülebilir tarım uygulamalarını desteklemek adına, bu tür araştırmaların devam etmesi ve sonuçlarının tarımsal pratiklere entegre edilmesi önem arz etmektedir.

6. Kaynaklar

- Arafat, M. Y., & Moh, S. (2022). JRCS: Joint routing and charging strategy for logistics drones. *IEEE Internet of Things Journal*, 9(21), 21751–21764. <https://doi.org/10.1109/jiot.2022.3182750>
- Anderson, K., & Gaston, K. J. (2013). Lightweight unmanned aerial vehicles will revolutionize spatial ecology. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 11(3), 138–146. <https://doi.org/10.1890/120150>
- Arakawa, T., & Kamio, S. (2023). Control efficacy of UAV-based ultra-low-volume application of pesticide in chestnut orchards. *Plants*, 12(14), 2597. <https://doi.org/10.3390/plants12142597>

- Basiri, A., Mariani, V., Silano, G., Aatif, M., Iannelli, L., & Glielmo, L. (2022). A survey on the application of path-planning algorithms for multi-rotor UAVs in precision agriculture. *Journal of Navigation*, 75(2), 364–383. <https://doi.org/10.1017/s0373463321000825>
- Cavalaris, C. (2023). Cost analysis of using UAV sprayers for olive fruit fly control. *Agriengineering*, 5(4), 1925–1942. <https://doi.org/10.3390/agriengineering5040118>
- Chen, C., Huang, Y., Li, Y., Chen, Y., Chang, C., & Huang, Y. (2021). Identification of fruit tree pests with deep learning on embedded drone to achieve accurate pesticide spraying. *IEEE Access*, 9, 21986–21997. <https://doi.org/10.1109/access.2021.3056082>
- Chen, S., Lan, Y., Zhou, Z., Deng, X., & Wang, J. (2021). Research advances of the drift-reducing technologies in application of agricultural aviation spraying. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 14(5), 1–10. <https://doi.org/10.25165/j.ijabe.20211405.6225>
- Chen, Y., Hou, C., Tang, Y., Zhuang, J., Lin, J., & Luo, S. (2019). An effective spray drift-reducing method for a plant-protection unmanned aerial vehicle. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 12(5), 14–20. <https://doi.org/10.25165/j.ijabe.20191205.4289>
- Chojnacki, J., & Pachuta, A. (2021). Impact of the parameters of spraying with a small unmanned aerial vehicle on the distribution of liquid on young cherry trees. *Agriculture*, 11(11), 1094. <https://doi.org/10.3390/agriculture11111094>
- Deng, Qian & Zhang, Yuhua & Lin, Zhuyu & Gao, Xueping & Weng, Zhenlin. (2024). The Impact of Digital Technology Application on Agricultural Low-Carbon Transformation—A Case Study of the Pesticide Reduction Effect of Plant Protection Unmanned Aerial Vehicles (UAVs). *Sustainability*. 16. 10920. <https://doi.org/10.3390/su162410920>
- Dökkancı, O., Kara, B., & Bektaş, T. (2021). Minimizing energy and cost in range-limited drone deliveries with speed optimization. *Transportation Research Part C Emerging Technologies*, 125, 102985. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2021.102985>
- FAN, L. (2023). Agricultural UAV crop spraying path planning based on PSO-A* algorithm. *INMATEH Agricultural Engineering*, 625–636. <https://doi.org/10.35633/inmateh-71-54>
- Filho, F., Heldens, W., Kong, Z., & Lange, E. (2019). Drones: Innovative technology for use in precision pest management. *Journal of Economic Entomology*, 113(1), 1–25. <https://doi.org/10.1093/jee/toz268>
- Guo, H., Zhou, J., Liu, F., He, Y., Huang, H., & Wang, H. (2020). Application of machine learning methods to quantitatively evaluate the droplet size and deposition distribution of the UAV spray nozzle. *Applied Sciences*, 10(5), 1759. <https://doi.org/10.3390/app10051759>
- Ivezić, A. (2023). Drone-related agrotechnologies for precise plant protection in Western Balkans: Applications, possibilities, and legal framework limitations. *Agronomy*, 13(10), 2615. <https://doi.org/10.3390/agronomy13102615>
- İnan, M., & Karci, A. (2021). Tarımda Ağaç İlaçlamanın Drone’larla Yapılmasında Yeni bir Yöntemin Geliştirilmesi ve Uygulanması. *Computer Science*, 6(2), 72-89.
- Just, G. E., Pellenz, M. E., Lima, L. A. P. A. d., Chang, B. S., Souza, R. D., & Montejo- Sánchez, S. (2020). UAV path optimization for precision agriculture wireless sensor networks. *Sensors*, 20(21), 6098. <https://doi.org/10.3390/s20216098>
- Karkee, M., & Zhang, Q. (2015). Performance evaluation of a UAV for agricultural applications. *Transactions of the ASABE*, 58(2), 469–477. <https://doi.org/10.13031/trans.58.10977>
- Kovalev, I. (2023). Analysis of system parameters in a microprocessor performance model of a swarm of agricultural spraying UAVs. *IOP Conference Series Earth and Environmental Science*, 1284(1), 012030. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1284/1/012030>
- Kovalev, I. (2023). Performance analysis of UAV sprayer application in precision agriculture. *IOP Conference Series Earth and Environmental Science*, 1231(1), 012057. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1231/1/012057>
- Liu, Z., Gao, R., Zhao, Y., Wu, H., Liang, Y., Liang, K., Liu, D., Huang, T., Xie, S., Lv, J., & Li, J. (2024). Study on the characteristics of downwash field range and consistency of spray deposition of agricultural UAVs. *Agriculture*, 14(6), 931. <https://doi.org/10.3390/agriculture14060931>
- Li, J. (2023). Coverage path planning method for agricultural spraying UAV in arbitrary polygon area. *Aerospace*, 10(9), 755. <https://doi.org/10.3390/aerospace10090755>

- Li, X., Giles, D., Niederholzer, F., Andaloro, J., Lang, E., & Watson, L. (2020). Evaluation of an unmanned aerial vehicle as a new method of pesticide application for almond crop protection. *Pest Management Science*, 77(1), 527–537. <https://doi.org/10.1002/ps.6052>
- Li, Z., & Wang, Y. (2018). Research on the application of UAV in agricultural spraying. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 20(2), 123–134.
- Lou, Z., Fang, X., Han, X., Lan, Y., Duan, T., & Wei, F. (2018). Effect of unmanned aerial vehicle flight height on droplet distribution, drift, and control of cotton aphids and spider mites. *Agronomy*, 8(9), 187. <https://doi.org/10.3390/agronomy8090187>
- Meng, Y., Su, J., Song, J., Chen, W., & Lan, Y. (2020). Experimental evaluation of UAV spraying for peach trees of different shapes: Effects of operational parameters on droplet distribution. *Computers and Electronics in Agriculture*, 170, 105282. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105282>
- Ming, R. (2023). Comparative analysis of different UAV swarm control methods on unmanned farms. *Agronomy*, 13(10), 2499. <https://doi.org/10.3390/agronomy13102499>
- Morales-Rodríguez, P., Cano, E., Villena, J., & López-Perales, J. (2022). A comparison between conventional sprayers and new UAV sprayers: A study case of vineyards and olives in Extremadura (Spain). *Agronomy*, 12(6), 1307. <https://doi.org/10.3390/agronomy12061307>
- Mulla, D. J. (2013). Twenty-five years of remote sensing in precision agriculture: Key advances and remaining knowledge gaps. *Remote Sensing*, 5(2), 1001–1019. <https://doi.org/10.3390/rs5021001>
- Otto, A., Agatz, N., Campbell, J., Golden, B., & Pesch, E. (2018). Optimization approaches for civil applications of unmanned aerial vehicles (UAVs) or aerial drones: A survey. *Networks*, 72(4), 411–458. <https://doi.org/10.1002/net.21818>
- ÖZYURT, H., Duran, H., & Çelen, İ. (2022). Determination of the application parameters of spraying drones for crop production in hazelnut orchards. *Tekirdağ Ziraat Fakültesi Dergisi*, 19(4), 819–828. <https://doi.org/10.33462/jotaf.1105420>
- Padhye, A., Anthoulakis, E., Christodoulou, S., Zervas, M., Konstantaki, M., & Pissadakis, S. (2022). Optical fiber sensors for detecting spraying drift in drone agricultural applications. *Optical Fibers and Sensors for Medical Diagnostics, Treatment and Environmental Applications XXII*. <https://doi.org/10.1117/12.2609294>
- Poikonen, S., & Campbell, J. (2020). Future directions in drone routing research. *Networks*, 77(1), 116–126. <https://doi.org/10.1002/net.21982>
- Rani, R. (2022). Pineapple crop fertilizer application method: A preliminary study on the performance and effectiveness of a boom sprayer and a sprayer drone. *Advances in Agricultural and Food Research Journal*, 4(1). <https://doi.org/10.36877/aafj.a0000349>
- Sánchez-Fernández, L. (2024). Reducing environmental exposure to PPPs in super-high-density olive orchards using UAV sprayers. *Frontiers in Plant Science*, 14. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1272372>
- Shanmugam, P., Srinivasan, T., Baskaran, V., Suganthi, A., Vinothkumar, B., Arulkumar, G., Backiyaraj, S., Chinnadurai, S., Somasundaram, V., Sathiah, N., Muthukrishnan, N., Krishnamoorthy, S., Prabakar, K., Douresamy, S., Thangaraj, Y. J. E., Pazhanivelan, S., Ragunath, K., Kumaraperumal, R., Jeyarani, S., . . . Mohankumar, A. (2024b). Comparative analysis of unmanned aerial vehicle and conventional spray systems for the maize fall armyworm *Spodoptera frugiperda* (J.E. Smith) (Lepidoptera; Noctuidae) management. *Plant Protection Science*, 60(2), 181–192. <https://doi.org/10.17221/96/2023-pps>
- Srivastava, K., Pandey, P., & Sharma, J. (2020). An approach for route optimization in applications of precision agriculture using UAVs. *Drones*, 4(3), 58. <https://doi.org/10.3390/drones4030058>
- Sya'roni, I. (2023). The influence of technopreneurship and innovation systems on the adoption of agricultural drones in Indonesia. *4th Asia Pacific International Conference on Industrial Engineering and Operations Management*. <https://doi.org/10.46254/ap04.20230065>
- Wang, C., Liu, Y., Zhang, Z., Han, L., Li, Y., Zhang, H., . . . & He, X. (2022). Spray performance evaluation of a six- rotor unmanned aerial vehicle sprayer for pesticide application using an orchard operation mode in apple orchards. *Pest Management Science*, 78(6), 2449–2466. <https://doi.org/10.1002/ps.6875>
- Wang, G., Lan, Y., Huang, Q., Chen, P., Hewitt, A., & Han, Y. (2019). Field evaluation of an unmanned aerial vehicle (UAV) sprayer: Effect of spray volume on deposition and the control of pests and disease in wheat. *Pest Management Science*, 75(6), 1546–1555. <https://doi.org/10.1002/ps.5321>

- Wang, J., Lan, Y., Wen, S., Hewitt, A., Yao, W., & Chen, P. (2020). Meteorological and flight altitude effects on deposition, penetration, and drift in pineapple aerial spraying. *Asia-Pacific Journal of Chemical Engineering*, 15(1). <https://doi.org/10.1002/apj.2382>
- Wongsuk, S., Qi, P., Wang, C., Zeng, A., Sun, F., Yu, F., ... & Xiongkui, H. (2024). Spray performance and control efficacy against pests in paddy rice by UAV- based pesticide application: Effects of atomization, UAV configuration, and flight velocity. *Pest Management Science*, 80(4), 2072–2084. <https://doi.org/10.1002/ps.7942>
- Xiao, J., Chen, L., Fan, P., Deng, Y., Ding, C., Liao, M., ... & Cao, H. (2019). Application method affects pesticide efficiency and effectiveness in wheat fields. *Pest Management Science*, 76(4), 1256–1264. <https://doi.org/10.1002/ps.5635>
- Xu, L., Yang, Z., Huang, Z., Ding, W., & Buck-Sorlin, G. (2023). Effects of flight parameters for plant protection UAV on droplet deposition rate based on a 3D simulation approach. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 16(1), 66–72. <https://doi.org/10.25165/j.ijabe.20231601.6581>
- Yan, Y., Lan, Y., Wang, G., Hussain, M., Wang, H., Yu, X., ... & Song, C. (2023). Evaluation of the deposition and distribution of spray droplets in citrus orchards by plant protection drones. *Frontiers in Plant Science*, 14. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1303669>
- Yao, W., Lan, Y., Wen, S., Zhang, H., Zhang, Y., Wang, J., ... & Xie, C. (2019). Evaluation of droplet deposition and effect of variable-rate application by a manned helicopter with AG-NAV GUI system. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 12(1), 172–178. <https://doi.org/10.25165/j.ijabe.20191201.4039>
- Yallappa, D., Kavitha, R., Surendrakumar, A., Suthakar, B., Kumar, A., Kannan, B., ... & Kalarani, M. (2023). Influence of the downwash airflow in hexacopter drone on the spray distribution pattern of boom sprayer. *Journal of Applied and Natural Science*, 15(1), 391–400. <https://doi.org/10.31018/jans.v15i1.4346>
- Yu, S., Zhu, J., Zhou, J., Cheng, J., Bian, X., Shen, J., ... & Wang, P. (2022). Key technology progress of plant-protection UAVs applied to mountain orchards: A review. *Agronomy*, 12(11), 2828. <https://doi.org/10.3390/agronomy12112828>
- Zhang, C., & Kovacs, J. M. (2012). The application of small unmanned aerial systems for precision agriculture: A review. *Precision Agriculture*, 13(6), 693–712. <https://doi.org/10.1007/s11119-012-9275-0>
- Zhang, C., Valente, J., Kooistra, L., Guo, L., & Wang, W. (2021). Orchard management with small unmanned aerial vehicles: A survey of sensing and analysis approaches. *Precision Agriculture*, 22(6), 2007–2052. <https://doi.org/10.1007/s11119-021-09813-y>
- ZONGO, A. (2023). Drone agrotechnology's for cotton (*Gossypium hirsutum* L.) protection against pest and diseases in Western Burkina Faso. *Research Square*. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-3496812/v1>