



T.C.
NECMETTİN ERBAKAN
ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



ZİRAİ MÜCADELE İNSANSIZ HAVA
ARAÇLARINDA KULLANILAN
PERVANELERİN OPTİMİZASYONU

Mehmet PEKİN

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Ocak-2026
KONYA
Her Hakkı Saklıdır

TEZ KABUL VE ONAYI

Mehmet Pekin tarafından hazırlanan “Zirai Mücadele İnsansız Hava Araçlarında Kullanılan Pervanelerin Optimizasyonu” adlı tez çalışması .../.../... tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği / oy çokluğu ile Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS/DOKTORA TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Başkan

Prof. Dr. Hakan GÖKMEŞE

.....

Danışman

Doç. Dr. Şaban BÜLBÜL

.....

Üye

Doç. Dr. İlker ÖRS

.....

Üye

Unvanı Adı SOYADI

.....

Üye

Unvanı Adı SOYADI

.....

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu’nun .../.../20.. gün ve sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr. Havvanur UÇBEYİAY
FBE Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.

Mehmet PEKİN

Tarih: 23.12.2025

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ZİRAİ MÜCADELE İNSANSIZ HAVA ARAÇLARINDA KULLANILAN PERVANELERİN OPTİMİZASYONU

Mehmet PEKİN

NECMETTİN ERBAKAN ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Danışman: Doç. Dr. Şaban BÜLBÜL

2026, 55 Sayfa

Jüri

Doç. Dr. Şaban BÜLBÜL
Prof. Dr. Hakan GÖKMEŞE
Doç. Dr. İlker ÖRS

Bu tez çalışmasında, zirai mücadele amaçlı kullanılan insansız hava araçlarında (ZİHA) kullanılan pervane tiplerinin ilaçlama performansına etkileri incelenmiştir. Çalışmanın temel amacı; farklı pervane çapı (36 inç, 33 inç vb.) ve farklı pitch değerlerinin, santrifüj nozul ve düz nozul tipleri ile kombinasyonlarının ilaç püskürtme verimliliği üzerindeki etkisini saha testleriyle karşılaştırmalı olarak ortaya koymaktır.

Deneysel kısımda, sprej performansını nesnel olarak değerlendirmek amacıyla Water Sensitive Paper (WSP) kullanılmış ve damlacık yoğunluğu, homojenlik ve kaplama oranı gibi ölçümler görüntü işleme metodu ile elde edilmiştir.

Elde edilen bulgular, hem pervane boyutu ve pitch açısının hem de nozul tipi ile olan etkileşimin, damlacıkların hedefe ulaşma oranı, homojen dağılımı ve geri yapışma eğilimi üzerinde anlamlı etkiler oluşturduğunu göstermiştir. Bu bulgular doğrultusunda hem enerji verimliliği hem de ilaç kullanım etkinliği açısından en uygun konfigürasyon önerileri sunulmuştur ve maliyet analizi yapılmıştır.

Anahtar Kelimeler: İtki sistemi, Malzeme, Pervane, Zirai İnsansız Hava Aracı, WSP

ABSTRACT

MS THESIS

OPTIMIZATION OF PROPELLERS USED IN AGRICULTURAL SPRAYING UNMANNED AERIAL VEHICLES

Mehmet PEKİN

**THE GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCE OF
NECMETTİN ERBAKAN UNIVERSITY
THE DEGREE OF MASTER OF SCIENCE OF PHILOSOPHY
IN MECHANICAL ENGINEERING**

Advisor: Assoc.Prof.Dr. Şaban BÜLBÜL

2026, 55 Pages

**Jury
Assoc.Prof.Dr. Şaban BÜLBÜL
Prof.Dr. Hakan GÖKMEŞE
Assoc.Prof.Dr. İlker ÖRS**

In this thesis study, the effects of propeller types used in unmanned aerial vehicles (UAVs) employed for agricultural pest control on spraying performance were investigated. The main objective of the study is to comparatively evaluate, through field tests, the effects of different propeller diameters (36 inches, 33 inches, etc.) and different pitch values, in combination with centrifugal and flat-fan nozzle types, on spray application efficiency.

In the experimental phase, Water Sensitive Paper (WSP) was used to objectively assess spray performance, and measurements such as droplet density, uniformity, and coverage rate were obtained using image processing methods.

The obtained results showed that both propeller size and pitch angle, as well as their interaction with nozzle type, have significant effects on droplet target reach, distribution uniformity, and the tendency for reverse deposition. Based on these findings, optimal configuration recommendations were presented in terms of both energy efficiency and pesticide application effectiveness, and a cost analysis was conducted.

Keywords: Agricultural Unmanned Aerial Vehicle, Material, Propeller, Propulsion System, WSP

ÖNSÖZ

İnsansız hava araçları teknolojisine olan ilgim, yıllar içerisinde yalnızca bir meraktan öteye geçerek akademik bir tutkuyla birleşti. Bu tez çalışması, bu alandaki bilgi birikimimi sahaya uygulanabilir şekilde bir araya getirme gayretim somut bir ürünüdür. Özellikle zirai mücadelede kullanılan insansız hava araçlarının, pervane tasarımının ilaçlama performansı üzerindeki etkilerini hem deneysel hem de sayısal analizlerle değerlendirmek büyük bir öğrenme süreci oldu.

Çalışmam boyunca bana rehberlik eden değerli danışmanım Doç. Dr. Şaban Bülbül'e, her aşamada verdiği yapıcı eleştiriler, sabrı ve teknik yönlendirmeleri için teşekkür ederim. Aynı şekilde uçuş testlerinin yürütülmesinde ve veri analizlerinde desteklerini esirgemeyen Robosys Mekatronik Sistemleri Sanayi ve Ticaret Limited Şirketinden Kerem Evcimen, Eren Özkılınç, Zafer Sancaktaroğlu, hem Robosys ekibinden olup aynı zamanda da hayat arkadaşım ve destekçim olan Nisanur Kiraz Pekin'e minnettarım.

Bu çalışmayı, mühendisliğin yalnızca teori değil, sahada çözüm üretmek olduğunu düşünen tüm genç araştırmacılara ithaf ediyorum.

Mehmet PEKİN
KONYA-2026

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
ÖNSÖZ	vi
İÇİNDEKİLER.....	vii
ŞEKİLLER LİSTESİ	ix
ÇİZELGELER LİSTESİ	x
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xi
1. GİRİŞ	1
2. LİTERATÜR TARAMASI.....	5
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	12
3.1. ZİHA Platformları ve Uçuş Parametreleri	14
3.2. Çalışmada Kullanılan Pervaneler.....	16
3.2.1. Drone-1 pervaneleri	17
3.2.2. Drone-2 pervaneleri	19
3.3. Nozul Tipleri.....	20
3.3.1. Santrifüj nozul.....	20
3.3.2. Düz-fan nozul	21
3.4. Saha Testi Prosedürü	22
3.5. Görüntü İşleme Tabanlı Damlacık Analizi Yöntemi	22
3.6. Deneysel Uygulama	24
4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA.....	25
4.1. Drone-1 - 3011 Pervane – Santrifüj Nozul Sonuçları.....	25
4.2. Drone-1 - 3011 Pervane – Düz-Fan Nozul Sonuçları.....	26
4.3. Drone-1 - 3090 Pervane – Düz-Fan Nozul Sonuçları.....	27
4.4. Drone-1 - 3090 Pervane – Santrifüj Nozul Sonuçları.....	27
4.5. Drone-2 - 36190 Pervane – Düz-Fan Nozul Sonuçları.....	28
4.6. Drone-2 - 3390 Pervane – Düz-Fan Nozul Sonuçları.....	28
4.7. Drone-2 - 3390 Pervane – Santrifüj Nozul Sonuçları.....	29
4.8. Drone-2 - 36190 Pervane – Santrifüj Nozul Sonuçları.....	29
4.9. Genel Karşılaştırmalı Sonuçlar	31
4.9.1 Drone-1 platformunda pervane nozul kıyaslaması	34
4.9.2 Drone-2 (KD30) platformunda pervane nozul kıyaslaması.....	35
4.9.3 Drone-1 ve drone-2 platformlarının birlikte değerlendirilmesi	36
4.10 Operasyonel Maliyet Tartışması.....	37
4.11 Operasyonel Maliyet Analizi	37

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	40
KAYNAKLAR	42



ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1. CubePilot ekosistemi genel aviyonik sistemler şeması	2
Şekil 1.2. Zirai İnsansız Hava Aracı Sistem Bileşenleri.....	3
Şekil 3.1. Saha testlerinde anemometre ile rüzgar ölçüm sonuçları	15
Şekil 3.2. Drone-1 10 Litre Kapasiteli AR-GE amaçlı üretilmiş drone	16
Şekil 3.3. Drone-2 Robosys Üretimi KD-30 Model 30 Litre kapasiteli drone.....	16
Şekil 3.4. 3011 Pervane	18
Şekil 3.5. 3090 Pervane	19
Şekil 3.6. 36190 Pervane	20
Şekil 3.7. 3390 Pervane	21
Şekil 3.8. Santrifüj Nozul	22
Şekil 3.9. Düz-Fan Nozul	23
Şekil 3.10. Görüntü işleme adımları	23
Şekil 4.1. Saha testinde elde edilen WSP sonuçları	25
Şekil 4.2. TAMTEST KD-30 damla büyüklük test sonuçları (maksimum disk hızı)	30
Şekil 4.3. TAMTEST KD-30 damla büyüklük test sonuçları (minimum disk hızı)	30
Şekil 4.4. Kaplama Oranı Grafiği	31
Şekil 4.5. Ortalama Damlacık Yarı Çapı Grafiği	32
Şekil 4.6. Damlacık yoğunluğu grafiği	32
Şekil 4.7. Homojenlik endeksi.....	32

ÇİZELGELER LİSTESİ

Çizelge 3.1. Çalışmada kullanılan drone modellerinin teknik parametreleri	12
Çizelge 3.2. Test performans parametreleri.....	14
Çizelge 4.1. Drone-1 İçin Genel Karşılaştırmalı Sonuçlar	33
Çizelge 4.2. Drone-2 İçin Genel Karşılaştırmalı Sonuçlar	33
Çizelge 4.3. Drone ve Traktör-Holder ile ilaçlama işlemlerinin maliyet karşılaştırması	138



SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

SİMGELER

Dv10	Hacmin %10'unun daha küçük damlacıklarda toplandığı çap (μm)
Dv50	Hacmin %50'sinin daha küçük damlacıklarda toplandığı medyan çap (μm)
Dv90	Hacmin %90'ının daha küçük damlacıklarda toplandığı çap (μm)
CV	Homojenlik endeksi (varyasyon katsayısı) (%)
R	Uygulama dozu (litre/dönüm)
Q_m	Pompa debisi (litre/dakika)
V	Uçuş hızı (m/s)
W	İlaçlama genişliği (metre)
t	Sprey açık kalma süresi (dakika)
T	Tank kapasitesi (litre)

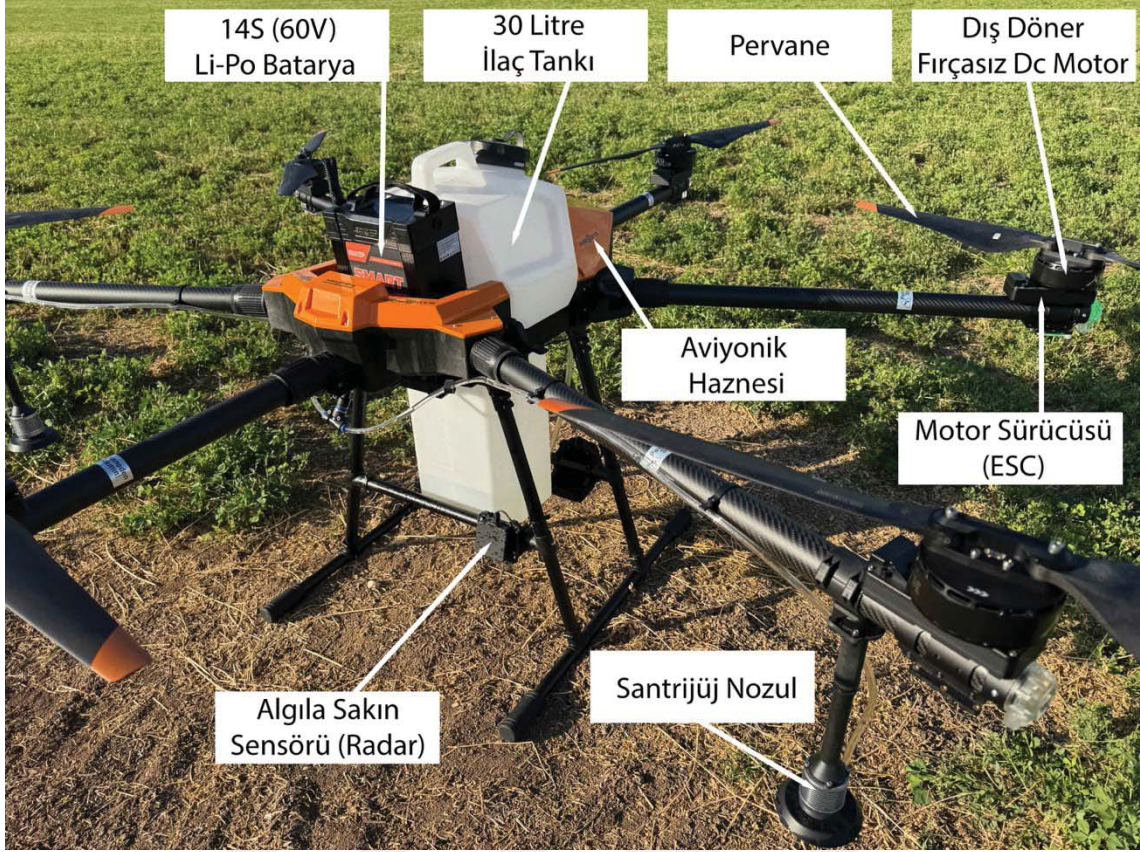
KISALTMALAR

ZİHA	Zirai İnsansız Hava Aracı
İHA / UAV	İnsansız Hava Aracı / Unmanned Aerial Vehicle
KD-30	30 litre depo hacmine sahip Robosys KD-30 drone modeli
WSP	Water Sensitive Paper / Suya duyarlı kağıt
GPS	Global Positioning System / Global pozisyonlama sistemi
VMD	Volume Median Diameter / Hacimsel medyan damlacık çapı
CV	Coefficient of Variation / Varyasyon katsayısı (homojenlik endeksi)
Rpm	Revolutions per minute / Dakikadaki devir sayısı (pervane devri)
L/dk	Litre/dakika
Mtow	Maximum take off weight / Maksimum kalkış ağırlığı
Dpi	Dots per inch / her inçteki nokta sayısı
Li-Po	Lityum polimer
mAh	Miliamper saat
RC	Radio control / Radyo kontrol
DJI	Dà-Jiāng Innovations Science and Technology Co.
Hobbywing	Hobbywing Technology CO., LTD.
TAMTEST	Tarım Alet ve Makine Test Merkezi Müdürlüğü

1. GİRİŞ

19. yüzyılda bilimsel çalışmaların arttığını gördüğümüz insansız hava araçları (Unmanned Aviation: A Brief History of Unmanned Aerial Vehicles, Newcome, 2004) 2010'lu yıllara geldiğimizde sivil kullanımının arttığı görülmüştür. 2020'li yıllara geldiğimizde ise teknolojinin ve endüstrinin gelişmesi ile birçok endüstriyel alana yayılmıştır (Shakhatreh vd., 2019; Rejeb vd., 2022) Bu endüstriyel alanları uzaktan algılama, kontrol, yük taşıma ve zirai alanda kullanımı gibi temel başlıklar altına toplayabiliriz (Shakhatreh vd., 2019; Videras Rodríguez vd., 2021).

İnsansız hava araçlarının aviyonik alt yapısı birbirlerine benzerlik göstermektedir. Faydalı yükleri değiştikçe de kullanım alanına göre özelleşmeye başlamışlardır. Şekil 1. insansız hava araçlarının aviyonik temel parçalarını göstermektedir. Bu aviyonik ekipmanlar uçuş kontrol kartı, Global Positioning System (GPS), telemetri, motor sürücüsü, motor, algıla sakın sensörleri, radyo kontrol (RC) kumanda, regülatörler, akım sensörleri ve batarya olarak sıralanabilir. (URL-1, 2025)



Şekil 1.2. Zirai insansız hava aracı sistem bileşenleri

Şekil 1.2’de yer alan hava aracının zirai amaca yönelik olmasını sağlayan bileşenler ise ilaç tankı santrifüj nozul olarak karşımıza çıkmaktadır. İlaç tankı, santrifüj nozul, spray pompası gibi bileşenler sistemin uçuşu ile alakalı olmadığı için faydalı yük olarak değerlendirmektedir. (Mohsan vd., 2023) Teknik alt yapısını yukarıda belirttiğimiz zirai uygulamalarda kullanılan insansız hava araçlarının genel tanımı, uçuşta insan pilot bulundurmayan; uzaktan kumandalı veya otomatik rota altyapısı ile uçabilen ve görevi gereği çeşitli zirai ekipman (ilaç püskürtme sistemi vb.) taşıyabilen hava platformlarıdır (Başçiftçi, Doğan ve Karaağaç, 2022)

Bitki koruma amaçlı kullanılan zirai insansız hava araçları (ZİHA), bitki koruma ürünlerinin hassas ve etkin uygulanmasında kullanılan tarım makineleridir. Bu makinelerin temel amacı ekinlerin üzerinden alçak irtifada uçarak güvenli ilaçlama yapmasıdır. Konvansiyonel sistemlere göre ekinlerin üzerinden geçerken ekine teması olmadığı için ekine zarar vermemesi, daha az su tüketmesi, rotalama seçenekleri ile otomatik ve sistematik çalışması en önemli artılarından. İnsan gücüne ihtiyaç duymaması, konvansiyonel sistemlere göre çok daha düşük enerji ihtiyacı olması,

konvansiyonel sistemlere göre yatırım ihtiyacının çok daha düşük olması ZİHA'ların ilerleyen yıllarda daha fazla yaygınlaşmasını sağlayacaktır.

Bu akıllı tarım makineleri üzerine ilgi arttıkça ve yapılan çalışmalar arttıkça çalışma verimini yükseltmek en önemli hedeflerden biri haline gelmiştir. ZİHA üzerinde yer alan depodan pompa yardımı ile çekilen sıvı ZİHA üzerinde bulunan nozullar vasıtasıyla yere doğru püskürtülmektedir. Bu püskürtülme işleminin başarısı, ekine hedeflenen tanecik yapısı, desen ve sıklıkla ulaşmasına göre belirlenmektedir. Püskürtülen sıvı ekinlere ZİHA'nın pervaneleri ile oluşan hava akımı etkisi ve desteği ile ekine ulaşmaktadır. ZİHA'nın havada uçmasında en kritik bileşenlerinden biri olan pervaneler, sadece itki sağlamakla kalmaz; aynı zamanda püskürtülen ilacın bitkiye ulaşmasında etkili olan hava akışını şekillendirir. Pervanenin geometrisi, boyutu ve pitch değeri; sprej bulutunun dağılımını, damlacıkların bitki yapraklarına ulaşmasını ve hatta aracın üzerine geri yapışmasını etkiler. Bu durum ZİHA'larda kullanılan pervanelerin tasarımının önemini gösterir.

Araştırmanın amacı

Farklı pervane boyutları ve pitch açılarının, sprej performansına olan etkisini deneysel testlerle ve analizlerle karşılaştırmalı olarak ortaya koymaktır. Ayrıca santrifüj ve düz fan nozulların bu pervane konfigürasyonlarıyla kombinasyonları incelenecektir.

Araştırmanın önemi

Optimize edilmiş pervane nozul eşleşmeleri sayesinde, ilaçlama kalitesi artarken hem batarya tüketimi azaltılabilir hem de hedef dışı alana ilaç bulaşması azaltılabilir. Bu da hem ekonomik hem çevresel faydalar sağlar.

2. LİTERATÜR TARAMASI

Zirai mücadele amaçlı insansız hava aracı (İHA) tasarımı ve sprej sistemlerinin entegrasyonu üzerine yapılan erken dönem çalışmalardan birinde Shaw ve Vimalkumar, pestisit, gübre ve dezenfektan uygulayabilen çok rotorlu bir insansız hava aracı geliştirmişlerdir. Çalışmada, belirli bir tarla büyüklüğü için gerekli tank hacmi, pompa kapasitesi, uçuş süresi ve batarya gereksinimleri mühendislik hesapları ile ortaya konmuş; seçilen itki sistemi T-Motor MN7005 motorlar ve 24×7,2" karbon pervaneler olmuştur. Araştırmacılar, farklı yük koşullarında motor pervane eşleşmesini ve gerekli itki seviyelerini hesaplayarak uygun ESC ve batarya kombinasyonunu belirlemiştir; daha sonra sahada yaptıkları denemelerle, tasarlanan İHA'nın taşıma kapasitesi, menzili ve sprej kapasitesini doğrulamışlardır. Ayrıca, gövde tasarımında kolların katlanabilir olması ve sprej hattının gövdeden ayrık yerleştirilmesi gibi pratik mühendislik çözümleri de ayrıntılı biçimde sunulmuştur. Bununla birlikte, çalışmanın odak noktasının ağırlıklı olarak mekanik ve elektriksel tasarım bileşenleri olduğu, rotor aşağı yönlü akış akımı, damlacık çap spektrumu ve yüzey kaplama homojenliği gibi aerodinamik ve püskürtme etkileşimlerinin sadece sınırlı düzeyde ele alındığı görülmektedir (Shaw ve Vimalkumar, 2020).

Pachuta ve çalışma arkadaşları, tarımsal amaçlı çok rotorlu insansız hava araçlarında pervane devir sayısının ve rotor kaynaklı aşağı yönlü akış yapısının, genç ladin ağaçlarının taç bölgesi içerisindeki sıvı yüzey kaplama kalitesi üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Agriculture dergisinde yayımlanan bu çalışmada, laboratuvar koşullarında kontrollü bir deneysel düzenek kurulmuş; İHA sistemi farklı pervane devirlerinde çalıştırılarak, ağaç tacı içinde çeşitli konumlara yerleştirilen kolektörler üzerinden ölçümler gerçekleştirilmiştir. Denemelerde tarımsal sprej nozulları kullanılmış ve taç içerisindeki yüzey kaplama, hacimsel damlacık yoğunluğu ve homojenlik parametreleri açısından değerlendirme yapılmıştır. Elde edilen bulgular, pervane dönüşünün olmadığı referans duruma kıyasla, rotor hareketinin özellikle taç dış zonlarında yüzey kaplama oranını artırdığını ve akış yapısını değiştirerek damlacıkların bitki tacı içerisine nüfuz davranışını etkilediğini göstermiştir. Araştırmacılar ayrıca, sistem kütleindeki değişimlerin rotor akış karakterini dolaylı olarak etkileyebileceğini ve bunun taç içi yüzey kaplama desenlerinde farklılıklara yol açtığını rapor etmişlerdir. Çalışma, rotor aerodinamiği ile bitki tacı içi sıvı depozisyonu arasındaki ilişkiyi deneysel

olarak ortaya koyması bakımından zirai amaçlı İHA uygulamaları için literatüre önemli bir katkı sunmaktadır (Pachuta vd., 2023).

Ismail ve arkadaşları, altı rotorlu bir zirai İHA üzerinde farklı faydalı yük ve uçuş hızı kombinasyonlarının rotor devir sayısı (RPM) ve gerçek uçuş deseni üzerindeki etkisini incelemiştir. Basrah Journal of Agricultural Sciences’de yayımlanan çalışmada, 10 kg’dan 2 kg’a kadar değişen yükler ve 1–7 m/s aralığında farklı set hızları kullanılmış; her bir uçuşta her rotorun devir sayısı ve İHA’nın gerçek yer hızı sensörler aracılığıyla kayıt altına alınmıştır. Analizler, tank boşaldıkça ve efektif ağırlık azaldıkça rotor devirlerinin yaklaşık %14–20 oranında düştüğünü, dolayısıyla aşağı yönlü akış akımının uçuş boyunca statik değil dinamik bir karakter sergilediğini ortaya koymuştur. Ayrıca, kontrol ünitesi üzerinde ayarlanan hedef hız ile gerçek ortalama hız arasında anlamlı farklar bulunduğu, örneğin 5 m/s olarak ayarlanan hızda İHA’nın gerçekte yaklaşık 3,8 m/s civarında seyrettiği gösterilmiştir. Araştırmacılar, bu sapmanın uygulama dozunun hesaplanmasında ciddi hatalara yol açabileceğini; yalnızca uçuş planında ayarlanan hızın dikkate alınması hâlinde tarlaya uygulanan hacmin hedeflenen dozdan sapacağını vurgulamışlardır. Çalışma, yük ve hız değişimlerinin rotor devri üzerinden aşağı yönlü akış yapısını dolaylı olarak etkilediğini ve zirai uygulama planlamasında bu etkileşimin mutlaka göz önünde bulundurulması gerektiğini göstermektedir (Ismail vd., 2021).

Carvalho, Costa ve Reis tarafından kaleme alınan çalışmada, uçak ve İHA ile yapılan hava ilaçlamalarında karşılaşılan temel teknik zorluklar ve çevresel riskler kapsamlı bir şekilde ele alınmıştır. Outlooks on Pest Management dergisinde yayımlanan bu derleme niteliğindeki makalede, sabit kanatlı uçaklar, helikopterler ve çok rotorlu dronlar; ilaçlama genişliği, uçuş yüksekliği, damlacık boyutu, sürüklenme potansiyeli ve doz homojenliği gibi performans kriterleri açısından karşılaştırılmıştır. Araştırmacılar, klasik uçak uygulamalarında yüksek irtifa, yüksek hız ve atmosferik türbülansın hem ilaçlama genişliği varyasyonunu hem de hedef dışı alanlara damlacık taşınımını artırdığını; buna karşılık İHA’ların düşük irtifa ve daha düşük ilerleme hızları sayesinde daha kontrollü bir yüzey kaplama profili sunabildiğini vurgulamışlardır. Bununla birlikte, çok rotorlu dronlarda rotor aşağı yönlü akışının neden olduğu karmaşık akış yapıları ve kuyruk akımında vortex oluşumları nedeniyle, damlacıkların hem düşey hem yatay doğrultuda beklenmedik şekilde taşınabildiğini, bu nedenle drone kaynaklı sürüklenme

mekanizmalarının henüz tam anlamıyla nicel olarak ortaya konmadığını belirtmişlerdir. Çalışma, bütünleşmiş zararlı yönetimi bağlamında doz doğruluğu, zamanlama, hedef hassasiyeti ve çevresel maruziyet gibi parametrelerin, hava ilaçlama sistemlerinin tasarımında ve regülasyonunda nasıl dikkate alınması gerektiğine dair geniş bir çerçeve sunmaktadır (Carvalho vd., 2020).

Ezin ve Sessiz (2023) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, bağ alanlarında ilaçlama amacıyla kullanılacak altı rotorlu bir insansız hava aracı tasarlanmış, prototipi üretilmiş ve farklı uçuş parametrelerinin yüzey kaplama üzerindeki etkileri ayrıntılı biçimde analiz edilmiştir. Araştırmacılar, uçuş hızı ve irtifasını sistematik olarak değiştirerek üst, orta ve alt taç bölgelerine yerleştirilen suya duyarlı kâğıtlar üzerinden damla birikimini değerlendirmiştir. Bulgular, 0.5 m/s gibi düşük uçuş hızlarında ve 30–50 cm irtifa bandında hem üst hem alt yaprak yüzeylerinde belirgin derecede daha yüksek kaplama elde edildiğini göstermiştir. Uçuş hızı 1.5–2.0 m/s seviyelerine çıktığında ise rotor kuyruk akımı yapısının genişleyip dağılması nedeniyle yüzey kaplama oranının hem miktar hem de homojenlik derecesi açısından anlamlı biçimde azaldığı gözlemlenmiştir. Çalışma ayrıca, bağ gibi yoğun bitki örtüsünde alt katman penetrasyonunun İHA'ların en kritik zayıf yönü olduğunu ve bunun doğrudan rotor aşağı yönlü akış gücüyle ilişkili olduğunu vurgulamaktadır. Araştırma, uçuş parametrelerinin doğru optimizasyonunun ürün kaybını azaltarak hem verimi hem de uygulama etkinliğini artırdığını deneysel olarak ortaya koymaktadır (Ezin ve Sessiz, 2023).

Okur ve Hazneci'nin (2024) Samsun ilinde yürüttüğü kapsamlı tarla araştırması, zirai drone kullanımının tarımsal üretim verimliliği ve ekonomik performans üzerindeki etkilerini ortaya koymayı amaçlamıştır. Çeltik üreticilerinden anket, üretim kayıtları ve saha gözlemleri yoluyla toplanan veriler, drone kullanımının üretim sürecinde yalnızca işçilik maliyetlerini düşürmekle kalmadığını, aynı zamanda daha homojen ekim, daha doğru gübreleme ve daha kontrollü ilaçlama sayesinde verim artışı sağladığını göstermiştir. İncelemede drone kullanılan işletmelerde brüt kârın yüzde 100'ü aşan oranlarda, net kârın ise yüzde 250'yi aşan bir artış gösterdiği rapor edilmiştir. Araştırma ayrıca dronelerin tarlaya giriş çıkış kaynaklı maliyetleri azalttığı, toprak sıkışmasını ortadan kaldırdığı ve ürün gelişim evrelerinde zamanlama doğruluğunu artırdığı için klasik yöntemlere kıyasla daha rekabetçi bir üretim yapısı sunduğunu ortaya koymuştur. Bu çalışma, ekonomik verimlilik açısından drone teknolojisinin özellikle küçük ve orta

ölçekli işletmelerde tarım ekonomisine önemli bir katkı sunduğunu göstermesi bakımından literatürde dikkat çekici bir yere sahiptir (Okur ve Hazneci, 2024).

Safaeinezhad ve çalışma arkadaşları (2025) tarafından gerçekleştirilen araştırmada, drone sprej sistemleri ile traktör bomlu sprej sistemlerinin performansı farklı ileri hızlar ve operasyon koşulları altında karşılaştırılmıştır. Deneysel düzende her iki sistem için de suya duyarlı kâğıtlar, Petri kapları ve tartrazin boyalı izleme çözeltileri kullanılarak hem hedef bölge yüzey kaplama oranı hem de sürüklenme (drift) davranışı nicel olarak değerlendirilmiştir. Bulgular, bomlu sprej sistemlerinin tüm hız aralıklarında dronlara kıyasla daha yüksek yüzey kaplama oranları sağladığını; buna karşılık drone sprejlerinde özellikle hız arttıkça sürüklenme eğiliminin belirgin biçimde yükseldiğini ortaya koymuştur. Bununla birlikte, drone sprejlerinde bazı hız aralıklarında damlacık çap dağılımı ve sprej kalite indeksi (QI) açısından daha homojen sonuçlar elde edildiği rapor edilmiştir. Araştırmacılar, dronların düşük irtifa avantajına rağmen rotorların oluşturduğu aşağı yönlü akış alanı nedeniyle damlacıkların hem düşey hem de yatay doğrultuda karmaşık bir hareket sergilediğini ve bu durumun sürüklenme davranışını klasik bomlu sistemlere kıyasla daha değişken hâle getirdiğini vurgulamışlardır.

Aynı çalışmada kullanılan ölçüm yöntemleri, damlacık karakterizasyonu açısından yüksek doğruluk sağlamaktadır. Suya duyarlı kâğıtlar üzerinden damla sayısı, kaplama oranı ve çap dağılımı analiz edilirken, Petri kaplarında toplanan çözelti miktarı sprej akışının nicel değerlendirilmesine imkân tanımıştır. Tartrazin boyası ile damla izlerinin görünürlüğü artırılmış; görüntü işleme algoritmaları kullanılarak hacimsel ortanca çap (VMD) ve damla yoğunluğu parametreleri hesaplanmıştır. Bu yöntemler sayesinde farklı hız koşullarının damlacık davranışı üzerindeki etkileri karşılaştırmalı ve tutarlı biçimde değerlendirilmiştir (Safaeinezhad vd., 2025).

Berner ve Chojnacki, “Use of drones in crop protection” başlıklı çalışmalarında insansız hava araçlarının bitki koruma uygulamalarındaki kullanım alanlarını ele almışlardır. Çalışmada, dronların zararlı ve hastalık tespiti, haritalama, değişken oranlı uygulama ve hedefe yönelik ilaçlama gibi fonksiyonları bir arada sunarak, klasik yer ekipmanlarına kıyasla daha esnek bir platform oluşturduğu belirtilmektedir. Araştırmacılar, özellikle küçük ve parçalı arazilerde dronların ekonomik ve operasyonel avantajlarına değinmiş; ancak batarya kapasitesi, hava koşullarına hassasiyet, yasal

düzenlemeler ve operatör eğitim gereksinimi gibi kısıtları da tartışmışlardır. Çalışmada, İHA tabanlı sistemlerin etkinliğinin; damlacık boyutu, uçuş yüksekliği, hız, nozul tipi ve çevresel koşullar gibi çok sayıda parametrenin birlikte optimizasyonuna bağlı olduğu vurgulanmaktadır. Bu çerçevede dronların, yalnızca “yeni bir platform” olmanın ötesinde, hassas tarımın bütünleşik bir parçası olarak ele alınması gerektiği ifade edilmektedir (Berner ve Chojnacki, 2017).

Chen ve çalışma arkadaşları, çok rotorlu bir zirai İHA’nın rotor diski altında oluşan rüzgâr alanının, hava ilaçlama damlacıklarının yüzey kaplama dağılımı üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Çalışmada, çok rotorlu bir platformun pervaneleri altında oluşan üç boyutlu rüzgâr alanı deneysel yöntemlerle karakterize edilmiş; rotor altındaki hız büyüklüğü ve yönündeki değişimlerin, zemindeki damlacık birikim desenini nasıl etkilediği analiz edilmiştir. Araştırmacılar, rotorun hemen altında yüksek hızlı bir indüklenen akım bölgesi bulunduğunu, bu bölgeden aşağıya doğru ilerledikçe hızın azaldığını ve türbülans ile kuyruk akımı yapılarının güçlendiğini göstermişlerdir. Damlacık yüzey kaplama ölçümleri ile rüzgâr alanı sonuçları birlikte değerlendirildiğinde, akımın merkez bölgede daha yoğun bir düşey taşıma sağlarken, kenar bölgelerde girdap yapıları nedeniyle hem düşey hem yatay yönde karmaşık bir damlacık hareketine yol açtığı ortaya konmuştur. Çalışma, rotor altı rüzgâr alanının, sadece itki üretimi açısından değil, aynı zamanda sprej homojenlik derecesi ve sürüklenme riski bakımından da kritik bir tasarım parametresi olduğunu göstermesi bakımından önemlidir (Chen vd., 2017).

Comba ve arkadaşları, “Vineyard detection from unmanned aerial systems images” başlıklı çalışmalarında, bağ alanlarının İHA görüntüleri kullanılarak otomatik tespiti ve sınıflandırılmasına odaklanmışlardır. Çalışmada, üzüm bağlarına ait yüksek çözünürlüklü hava görüntüleri, görüntü işleme ve makine öğrenmesi teknikleri ile analiz edilmiş; sıra yapısı, bitki–toprak kontrastı ve taç geometrisi gibi özelliklere dayanarak bağ alanlarının arka plandan ayrılması sağlanmıştır. Araştırmacılar, farklı sınıflandırma algoritmalarını karşılaştırarak, bağ alanlarının otomatik tanınmasında kullanılabilecek en uygun yöntemleri belirlemiş; böylece haritalama, değişken oranlı uygulama planlaması ve hedefe yönelik ilaçlama için temel oluşturabilecek bir konumsal veri üretmişlerdir. Çalışma, doğrudan sprej performansını incelemese de İHA kaynaklı uzaktan algılama verilerinin tarımsal karar destek sistemlerine entegre edilerek ilaçlama ve gübreleme

stratejilerinin optimize edilmesi açısından önemli bir altyapı sunduğunu göstermektedir (Comba vd., 2015).

Çolak ve çalışma arkadaşları, “Agriculture and industry 4.0” başlıklı çalışmalarında tarım sektörünün Endüstri 4.0 kavramı çerçevesinde nasıl dönüşüme uğradığını tartışmışlardır. Çalışmada, nesnelerin interneti, sensör ağları, otonom araçlar, büyük veri analitiği ve bulut tabanlı karar destek sistemleri gibi bileşenlerin, tarımsal üretim zincirinde verimlilik ve izlenebilirlik artışı sağlayacağı vurgulanmaktadır. Araştırmacılar, hassas tarım uygulamaları kapsamında insansız hava araçlarının, toprak–bitki durumunu izleyen sensörlerle ve arazi üzerindeki diğer akıllı sistemlerle bütünleşik olarak kullanılabileceğini belirtmişlerdir. Bu bağlamda, dronların yalnızca veri toplayan veya ilaçlama yapan araçlar değil, aynı zamanda dijital tarım ekosisteminin normu olarak değerlendirilmesi gerektiği ifade edilmektedir. Çalışma, ZİHA tabanlı ilaçlama ve uzaktan algılama uygulamalarının, Endüstri 4.0 yaklaşımıyla birlikte düşünüldüğünde, tarımsal üretimde hem operasyonel hem de stratejik ölçekte dönüşüme katkı sağlayacağını ortaya koymaktadır (Çolak vd., 2016).

Doering ve arkadaşları, hassas tarım uygulamalarında birden fazla İHA’nın eşzamanlı kullanımına imkân veren heterojen bir platformun tasarımı ve optimizasyonunu incelemişlerdir. Çalışmada, farklı görevleri (haritalama, gözetim, ilaçlama vb.) yerine getirebilen çeşitli tipte İHA’ların aynı komuta kontrol altyapısı altında çalışabilmesi için gerekli donanım ve yazılım mimarisi detaylandırılmıştır. Araştırmacılar, görev planlama, uçuş yollarının çakışmaması için rota optimizasyonu, iletişim ağının sürekliliği ve yer istasyonu hava aracı koordinasyonu gibi konuları ele almış; çoklu İHA görevlerinin simülasyon ve saha denemeleriyle doğrulandığını rapor etmişlerdir. Sistem düzeyinde yapılan bu çalışma, tek bir platforma bağlı kalmaksızın, değişik özelliklere sahip İHA’ların birlikte kullanılmasıyla tarımsal veri toplama ve müdahale operasyonlarının daha verimli hâle getirilebileceğini göstermektedir. Böylece, spreyci dronlarının da içinde yer aldığı karma filo yapılarının, geniş alanlı tarımsal uygulamalarda gelecekte önemli bir rol üstlenebileceğine işaret edilmektedir (Doering vd., 2014).

Faiçal ve çalışma arkadaşları, insansız hava araçları ile kablosuz sensör ağlarının birlikte kullanıldığı bir mimari önererek, pestisit uygulamalarının daha akıllı ve

uyarlanabilir biçimde yürütülmesini amaçlamışlardır. Çalışmada, tarla içine dağıtılmış sensör düğümleri ile bir veya daha fazla İHA arasında kurulan iletişim sayesinde, bitki su stresi, sıcaklık, nem veya zararlı yoğunluğu gibi parametrelerin gerçek zamanlı olarak izlenmesi ve buna bağlı olarak ilaçlama kararlarının dinamik şekilde güncellenmesi tartışılmaktadır. Araştırmacılar, önerilen sistem mimarisini benzetim ortamında test ederek, duyarlı alanlarda hedefe yönelik ilaçlama yapılması durumunda hem kimyasal kullanımının azaldığını hem de çevresel etkinin sınırlanabildiğini göstermişlerdir. Çalışma, sprey dronlarının yalnızca sabit rota ve sabit dozla çalışan sistemler olmaktan çıkarılarak, sensör verilerine dayalı karar destek mekanizmaları ile entegre edilmesinin, geleceğin hassas zirai mücadele uygulamalarında kritik bir yönelim olduğunu ortaya koymaktadır (Faiçal vd., 2014).



3. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu çalışma, zirai insansız hava araçlarında (ZİHA) kullanılan farklı pervane tasarımlarının sprey damlacık dağılımı, sürüklenme potansiyeli ve yüzey kaplama karakteristiği üzerindeki etkilerini ortaya koymak amacıyla yürütülmüştür.

Çalışmada iki farklı döner kanatlı ZİHA platformu kullanılmıştır. Her iki platformda uçuş parametrelerinin eşitlenmesi hedeflenmiş olup, optimum uçuş parametreleri Drone-2 modelinin üretici verileri ve literatürdeki uygulama hacimleri esas alınarak hesaplanmıştır. Daha sonra bu parametreler Drone-1 modeline uygulanmış; böylece değişken tek parametre pervane geometrisi olacak şekilde saha kıyaslaması gerçekleştirilmiştir. Bu yöntemle, ilaçlama performansındaki farklılıkların platform kaynaklı değil yalnızca pervane tasarımından kaynaklandığı bilimsel bir test ortamı sağlanmıştır.

Çizelge 3.1. çalışmada kullanılan drone modellerinin teknik özelliklerini içermektedir. Drone teknik özellikleri uçuş karakteristiğini belirleyen parametrelerdir.

Çizelge 3.1. Çalışmada kullanılan drone modellerinin teknik parametreleri

	Drone-1	Drone-2
Maksimum Kalkış ağırlığı (mtow):	25 KG	63,5 KG
İtke sistemi:	Hobbywing X8	Hobbywing X9 Plus
Motor sayısı:	4	6
Batarya:	12S 16000 mAh 25C Li-Po	14S 28000 mAh 25C Li-Po
Uçuş Süresi:	9-14 dakika	8-12 dakika
İlaçlama Genişliği (W):	7 metre	8 metre
İletişim mesafesi:	5 km	5 km
Algıla sakın sensörü:	İki yönlü radar sistemi	Üç yönlü radar sistemi
Uçuş kontrolcüsü:	CubePilot Orange+ Standart Set; dahili ivme ölçer, barometre, STM32H7 işlemci, pusula	CubePilot Orange+ Standart Set; dahili ivme ölçer, barometre, STM32H7 işlemci, pusula
GNSS:	RTK Destekli CubePilot Here4 GNSS (GPS ve GLONASS)	RTK Destekli CubePilot Here4 GNSS (GPS ve GLONASS)
Şarj Aleti Gücü:	3000Watt	6000Watt
Yer kontrol istasyonu:	5,5 inç dahili ekrana sahip Android işletim sistemli	7 inç dahili ekrana sahip Android işletim sistemli
Sprey tipi:	Santrifüj ya da düz-fan	Santrifüj ya da düz-fan
Pompa motoru gücü:	Maksimum 5 Litre/dakika	Maksimum 8 Litre/dakika

Çizelge 3.1’de yer alan veriler kullanılarak test uçuşlarında kullanılması gereken diğer parametreler belirlenmiştir.

Drone tabanlı tarımsal ilaçlama uygulamalarında alan bazlı dozaj litre/dönüm cinsinden değerlendirilmektedir. Uygulama hacmi (R , L/dönüm), pompa debisi (Q_m , L/dk), uçuş hızı (V , m/s) ve etkili ilaçlama genişliği (W , m) arasındaki ilişki birim dönüşümleri dikkate alınarak modellenmiştir. Pompa debisi litre/dakika biriminde iken alan faktörü litre/dönüm şeklindedir. 1 dönüm = 1000 m² ve 1 dakika = 60 saniye dönüşümleri dikkate alındığında:

$$\frac{1000}{60} = 16,67 \quad (3.1)$$

Pompa debisi / alan faktörü katsayısının 16.67 olduğu görülmektedir. Dolayısıyla birim dönüşümü yapılmış eşitlik aşağıdaki gibi tanımlanır:

$$R = 16,67 \cdot \frac{Q_m}{V \cdot W} \quad (3.2)$$

- R : uygulama dozu (L/dönüm)
- Q_m : pompa debisi (L/dk)
- V : uçuş hızı (m/s)
- W : etkili ilaçlama genişliği (m)

Drone ile fındık bahçelerinde yapılan bir çalışmada 1, 2 ve 3 L/dönüm uygulama dozlarının denenmiş olduğu rapor edilmiştir (Özyurt vd., 2022). Literatürde bu aralık yaygın olarak kullanıldığından çalışmamızda orta değer olan $R = 1.5$ L/dönüm seçilmiş ve her iki platform için optimize edilmiştir.

Çalışmada kullanılan drone modelinin üretici kılavuzunda etkili ilaçlama genişliği $W = 8$ m olarak bildirilmiştir. (Çizelge 3.1.) Pompanın maksimum debisi 8 L/dk olup üreticinin nominal çalışma aralığı olan %60–80 bandı saha uygulamalarına en yakın bölgedir. Bu doğrultuda seçilen $Q_m \approx 5.0$ L/dk, pompanın maksimum kapasitesinin yaklaşık %70'ine karşılık gelmektedir. Tank kapasitesi 30 litre olup saha uçuşlarında spreya açık kalma süresi ortalama 6 dakika ölçülmüştür.

$$Q_m = \frac{30}{6} = 5,0 \text{ L/dk} \quad (3.3)$$

Bu değer Denklem (3.2)'de yerine yazıldığında optimum uçuş hızı elde edilir:

$$V = \frac{16,67 \cdot Q_m}{R \cdot W} \quad (3.4)$$

$$V = \frac{16,67 \cdot 5,0}{1,5 \cdot 8} \simeq 7,0 \text{ m/s} \quad (3.5)$$

Denklem 3.4. ve 3.5. kullanılarak optimum uçuş hızı 7 m/s olarak hesaplanmıştır. Bu hız hem üretici kılavuzunda tanımlanan güvenli uçuş sınırları içinde olup hem de saha uygulamalarında ölçülen hızlarla birebir uyumludur.

Drone-2 modelinin optimum uçuş parametreleri bu şekilde matematiksel olarak elde edildikten sonra aynı değerler Drone-1 modelinde uygulanmış; böylece iki platformun performansları yalnızca pervane tasarımından kaynaklanan farklılık üzerinden değerlendirilebilir hale gelmiştir. Bu yöntem, çalışma tasarımının temel hedefi olan pervane etkisinin izole edilmesi ilkesini sahada doğrulamaktadır. Alt başlıklarda kullanılan platformlar, pervaneler, nozul tipleri, saha testi düzeni, damlacık ölçüm yöntemlerine ilişkin detaylar verilmiştir.

3.1. ZİHA Platformları ve Uçuş Parametreleri

Her iki platform da benzer itki ağırlık oranlarına sahip olacak şekilde optimize edilmiştir. Testlerin karşılaştırılabilir olması için uçuş parametreleri sabit tutulmuştur.

Çizelge 3.2. tez çalışması kapsamında yapılan uçuşlarda drone modellerinin uçuş parametrelerini göstermektedir.

Çizelge 3.2. Test performans parametreleri

	Drone-1	Drone-2
Kalkış ağırlığı:	20 KG	48 kg
Debi:	5 Litre/dk	5 Litre/dk
Batarya durumu:	%100 doluluk	%100 doluluk
Uçuş Hızı:	7,0 m/s	7,0 m/s
Uçuş İrtifası:	3 metre	3 metre
Nozul Konumu:	Motorun 30cm altında sabit	Motorun 30cm altında sabit
Uçuş Modu:	GPS destekli sabit rota (otomatik görev)	GPS destekli sabit rota (otomatik görev)
Rüzgar:	0–3 m/s aralığında günlerde uçulmuştur.	0–3 m/s aralığında günlerde uçulmuştur.
Görev:	3011 ve 3090 pervaneleri ile pitch farkı karşılaştırması, her pervanenin hem düz-fan nozul ile hem santrifüj nozul ile test sonuçlarının çıkarılması.	3610 ve 33190 pervaneleri arasında çap farkı karşılaştırması, her pervanenin hem düz-fan nozul ile hem santrifüj nozul ile test sonuçlarının çıkarılması.

Çizelge 3.2’de belirlenen ve dış şartlara bağlı parametrelerden olan rüzgar hızı Şekil 3.1’de görülen anemometre ile ölçülmüş ve tüm uçuşlarda rüzgar hızının belirlenen aralıkta olduğu teyit edilmiştir.

Şekil 3.2. ve Şekil 3.3. Drone-1 ve Drone-2 modellerinin uçuş testleri öncesinde çekilmiş görüntülerdir. Çizelge 3.2’de belirlenen uçuş irtifası drone modellerinin sahip olduğu radarlarla sağlanmış olup Şekil 3.2. ve Şekil 3.3’te görüldüğü üzere yonca bitkisi üzerinde uçulmuştur.



Şekil 3.1. Saha testlerinde anemometre ile rüzgar ölçüm sonuçları

Şekil 3.1’de görüldüğü üzere test yapılan sahada rüzgar değeri planlanan 0-3m/s aralığında ölçülmüştür.



Şekil 3.2. Drone-1 10 litre kapasiteli AR-GE amaçlı üretilmiş drone



Şekil 3.3. Drone-2 Robosys üretimi KD-30 model 30 litre kapasiteli drone

3.2. Çalışmada Kullanılan Pervaneler

Bu araştırmada iki farklı ZİHA platformu üzerinde toplam dört farklı pervane konfigürasyonu incelenmiştir. Pervaneler hem çap hem pitch bakımından birbirinden

farklıdır ve seçilen kombinasyonlar sprey performansını etkileyen tasarımsal değişkenleri karşılaştırma imkânı sunmaktadır.

Çalışmada kullanılan pervaneler şu anda bulunabilirliği yüksek Hobbywing ve Dà-Jiāng Innovations Science and Technology Co. (DJI) markalarının ürettiği pervanelerdir. Hobbywing Çin menşeli itki sistemleri üreticisidir. DJI ise yine Çin menşeli bir şirket olup hem itki sistemi hem drone üretimi yapan bir firmadır.

İnsansız hava araçlarında pervaneler itki sistemi paketi olarak motor, motor sürücüsü ve pervane olarak temin edilebilmektedir fakat aynı motor ve motor sürücüsünde farklı tip pervane kullanımları mümkündür.

Pervane değiştirirken itki sisteminin hava aracını havaya kaldırabilmek için üretmesi gereken itki kuvveti dikkate alınmalıdır. Düşük çaplı pervanelere geçtikçe itki kuvveti azalırken daha büyük çaplı pervanelerde ise motorun mekanik yapısının kaldıramayacağı etkilere yol açabilir. Benzer oran orantı durumu pervanelerin pitch değerinde de bulunmaktadır. Bu sebeple pervane değişimi belirli ve güvenli bir aralıkta yapılmalıdır. Bu tez çalışmasında da güvenli aralıkta değişiklikler denenmiştir.

3.2.1. Drone-1 pervaneleri

Drone-1 AR-GE amaçlı üretilmiştir ve 10 Litre ilaçlama tankına sahiptir. Üzerinde 30 inç çaplı iki farklı pitch değerine sahip pervane test edilmiştir. Bu platformun testlerdeki kalkış ağırlığı 20 kg olup ilaçlama pompası testlerde 5 Litre/dakika debi ile çalıştırılmıştır. Ana hedef çapı sabit tutarak pitch farkının ilaçlama performansına etkisini ölçmektir.

Şekil 3.4'te görülen 30×11 (3011) Pervane; 30 inç çap, 11 inç pitch boyutuna ve orta disk alanına sahiptir.

Bu özelliklerle, düşük pitch nedeniyle düşük indüklenen hız, daha düzenli akış yapısı, düşük penetrasyon ve türbülanslı akışa sahip olması beklenmektedir.

Bu pervane, pitch kaynaklı akış farklarını incelemek için baz referans görevindedir.



Şekil 3.4. 3011 Pervane

Şekil 3.5’te görülen 30×90 (3090) Pervane; 30 inç çap ve 90 inç pitch mesafesine sahiptir.

Bu özellikler ile 3011 pervane modeline göre aynı çapta daha agresif aerodinamik yapı, daha yüksek itki kuvveti, daha güçlü akış etkisi, daha yüksek türbülans ve iz genişliği oluşturması beklenmektedir.



Şekil 3.5. 3090 Pervane

3011 pervane ve 3090 pervane karşılaştırması, pitch artışının damlacık dağılımına etkisini izole eden temel veri setini oluşturmuştur. Bu set, yalnızca pitch artışının ilaçlama performansına etkisini belirlemek için kritik rol oynamıştır.

3.2.2. Drone–2 pervaneleri

Drone–2 Robosys tarafından üretilmiş KD-30 model numaralı 30 Litre ilaçlama deposuna sahip bir hava aracıdır. Bu platformda iki farklı büyük çaplı pervane test edilmiştir. Bu grup, çap değişiminin spreyci davranışı üzerindeki etkisini analiz etmek için seçilmiştir. KD-30 Platformu testlerde 48 kg kalkış ağırlığı ve 5 Litre/dk pompa gücü ile çalıştırılmıştır. Drone-1 testlerinden farklı olarak çap farkının etkilerini gözlemlemek için uygun görülmüştür.

Şekil 3.6’da görülen 36×19 (36190) Pervane; 36 inç çap, 19 inç pitch boyutuna sahiptir. Bu özelliklerle tez çalışmasındaki en büyük disk alanına sahiptir. Testteki diğer pervanelere göre en geniş ilaçlama açıklığını oluşturması beklenmektedir. Testteki diğer pervanelere göre en yüksek penetrasyon potansiyeli beklenmektedir. Testteki diğer pervanelere göre daha güçlü kuyruk türbülansı beklenmektedir

Bu pervane, bitki örtüsüne etki performansı ve lateral sürüklenme davranışı açısından referans veri sağlamıştır.



Şekil 3.6. 36190 Pervane

Şekil 3.7’de görülen 33×90 (3390) Pervane; 33 inç çap 90 pitch boyutuna sahiptir. Çapı 36x19’a göre daha yüksek olmakla birlikte pitch boyutu 36x19’a göre daha yüksektir. 36x19’a göre yüksek hava indüklenme kapasitesi ve daha yüksek türbülans yoğunluğu beklenmektedir.



Şekil 3.7. 3390 Pervane

36190 pervane ve 3390 pervane karşılaştırması ile çap küçülürken pitch artışının ilaçlama performansına etkisi incelenmiştir.

3.3. Nozul Tipleri

Sprey dağılımını doğrudan etkileyen nozul tipleri olarak iki farklı yapı kullanılmıştır; santrifüj nozul ve düz-fan nozul.

3.3.1. Santrifüj nozul

Bu nozul tipi yüksek debili uygulamalarda tercih edilmektedir. Literatür (Lan vd., 2021) rotor altında santrifüj nozulların beklenenden daha küçük damlacıklar üretebildiğini göstermektedir.

Bu çalışmada santrifüj nozul ile rotor altı damlacık parçalanması, damlacık yön sapması ve kuyruk akımı etkisi altındaki sürüklenme eğilimi detaylı olarak incelenmiştir. Şekil 3.8. Drone-1 üzerinde santrifüj nozulun yerleşimini göstermektedir.



Şekil 3.8. Santrifüj nozul

3.3.2. Düz-fan nozul

Düz-fan nozullar düz bir dağılım sağlamaktadır. Santrifüj nozullar gibi dönen bir diske sahip değildir ve pompanın üretmiş olduğu basınç sayesinde çalışmaktadırlar.

Bu çalışmada düz-fan nozul ile, şerit genişliği, yanal sürüklenme performansı pervane akımı ile etkileşim analiz edilmiştir.

Şekil 3.9’da düz-fan nozulun Drone-2 modeli üzerindeki görüntüsü bulunmaktadır.

Çalışmadaki drone modelleri hem santrifüj hem düz-fan nozulla birlikte çalışabilecek ve sahada kolaylıkla değişim yapılabilecek şekilde modifiye edilmiştir. Drone modelleri üzerinde yer alan tesisat borularının iki nozul tipine uyum sağlaması için hidrolik boru adaptörleri kullanılmıştır. Motor altındaki montaj aparatları iki nozul tipine uygun olacak şekilde yeniden tasarlanıp 3D yazıcılar ile üretilmiştir. Bu sayede sahada, iki nozul tipine geçiş dakikalar içerisinde tamamlanmıştır.



Şekil 3.9. Düz-fan nozul

3.4. Saha Testi Prosedürü

Bu araştırmanın saha testi düzeninin tekrarlanabilir ve karşılaştırmalı analiz için ideal bir yapıda olması hedeflenmiştir.

Water sensitive paper (WSP) Yerleşimi

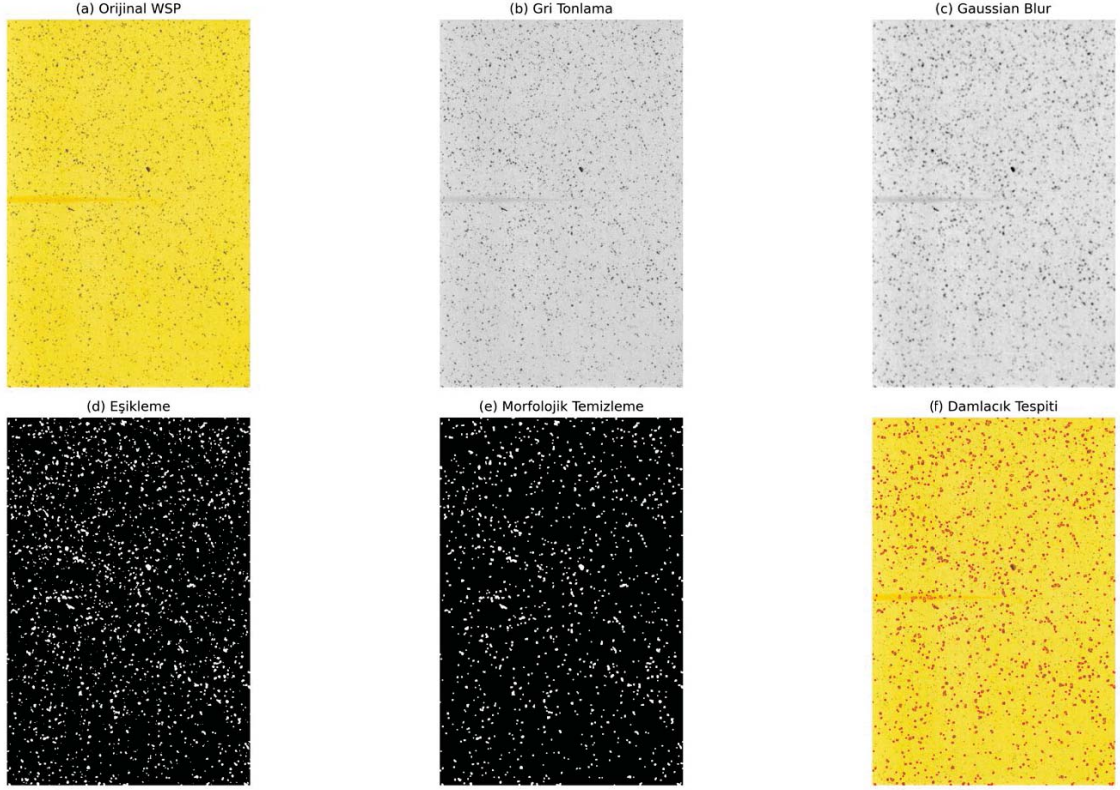
- WSP plakaları her testte aynı yere konulmuştur
- Drone rotası her seferinde aynı kalkış noktasından başlamıştır
- WSP dizisi kalkış noktasından 30 metre ileriye yerleştirilmiştir
- Tüm uçuşlar aynı görev noktalarında gerçekleştirilmiştir
- Bu çalışmada kullanılan WSP kâğıtları 50,8 mm × 76,2 mm (2 inç × 3 inç) boyutlarında olup, tüm saha testlerinde aynı ölçüler kullanılmıştır.

Bu düzen, pervane değişiminin etkisini izole etmek için gerçekleştirilmiştir.

3.5. Görüntü İşleme Tabanlı Damlacık Analizi Yöntemi

Saha testleri sonrasında toplanan tüm Water Sensitive Paper (WSP) kâğıtları, damlacık detaylarının kayıpsız şekilde elde edilebilmesi amacıyla 1200 DPI çözünürlükte

bir tarayıcı kullanılarak sayısal ortama aktarılmıştır. Yüksek çözünürlük tercih edilmesinin temel nedeni, özellikle küçük çaplı damlacıkların doğru şekilde tespit edilebilmesi ve damlacık çapı hesaplamalarında oluşabilecek hata payının en aza indirilmesidir. Sayısallaştırma işlemi sonucunda elde edilen ham WSP görüntüsü Şekil 3.10.(a)'da gösterilmiştir.



Şekil 3.10. Görüntü işleme adımları

Sayısal ortama aktarılan WSP görüntüleri üzerinde gerçekleştirilen analizler, görüntü işleme tabanlı bir iş akışı izlenerek yapılmıştır. Analiz sürecinde, renk bilgisinin ölçümleri etkilemesini önlemek amacıyla görüntüler öncelikle RGB formatından gri tonlamaya dönüştürülmüştür. Bu işlem, damlacıkların arka plan ile olan yoğunluk farklarına dayalı olarak daha sağlıklı şekilde ayrıştırılmasını sağlamaktadır. Gri tonlamaya dönüştürülmüş görüntü örneği Şekil 3.10.(b)'de sunulmuştur.

Tarama sürecinden ve WSP yüzey dokusundan kaynaklanan rastgele gürültülerin etkisini azaltmak amacıyla gri tonlamaya dönüştürülen görüntülere Gaussian bulanıklaştırma filtresi uygulanmıştır. Bu aşama, fiziksel karşılığı olmayan küçük piksel kümelerinin sahte damlacık olarak algılanmasının önüne geçilmesi açısından kritik

öneme sahiptir. Gaussian bulanıklaştırma sonrası elde edilen görüntü Şekil 3.10.(c)'de verilmiştir.

Gürültü azaltma işleminin ardından, damlacık bölgelerinin arka plandan ayrılabilmesi için otomatik eşikleme yöntemi kullanılmıştır. Bu işlem sonucunda damlacıkların beyaz, arka planın ise siyah olarak temsil edildiği ikili (binary) bir maske elde edilmiştir. Eşikleme sonucu oluşan ikili maske görüntüsü Şekil 3.10.(d)'de gösterilmektedir.

Eşikleme sonrası görüntülerde kalan tek piksellik gürültülerin ve fiziksel karşılığı olmayan küçük yapıların temizlenmesi amacıyla morfolojik açma işlemi uygulanmıştır. Bu işlem sayesinde yalnızca gerçek damlacık alanlarının analiz sürecine dahil edilmesi sağlanmıştır. Morfolojik işlemler sonrası elde edilen temizlenmiş maske görüntüsü Şekil 3.10.(e)'de sunulmuştur.

Ön işleme adımları tamamlanan görüntülerde damlacıklar, kontur tespiti yöntemi kullanılarak belirlenmiş ve her bir kontur bağımsız bir damlacık olarak kabul edilmiştir. Tespit edilen damlacıkların orijinal WSP görüntüsü üzerindeki konumları Şekil 3.10(f)'de kırmızı konturlar ile gösterilmiştir. Her bir damlacığın alanı hesaplanmış, bu alan değerlerinden eşdeğer dairesel çaplar elde edilerek damlacık çap dağılımları oluşturulmuştur. Oluşturulan dağılımlar kullanılarak Dv_{10} , Dv_{50} (VMD) ve Dv_{90} değerleri hesaplanmış; ayrıca birim alan başına düşen damlacık sayısı ile damlacık yoğunluğu (adet/cm²) ve damlacıkların WSP yüzeyi üzerindeki kaplama oranı (%) nicel olarak belirlenmiştir.

3.6. Deneysel Uygulama

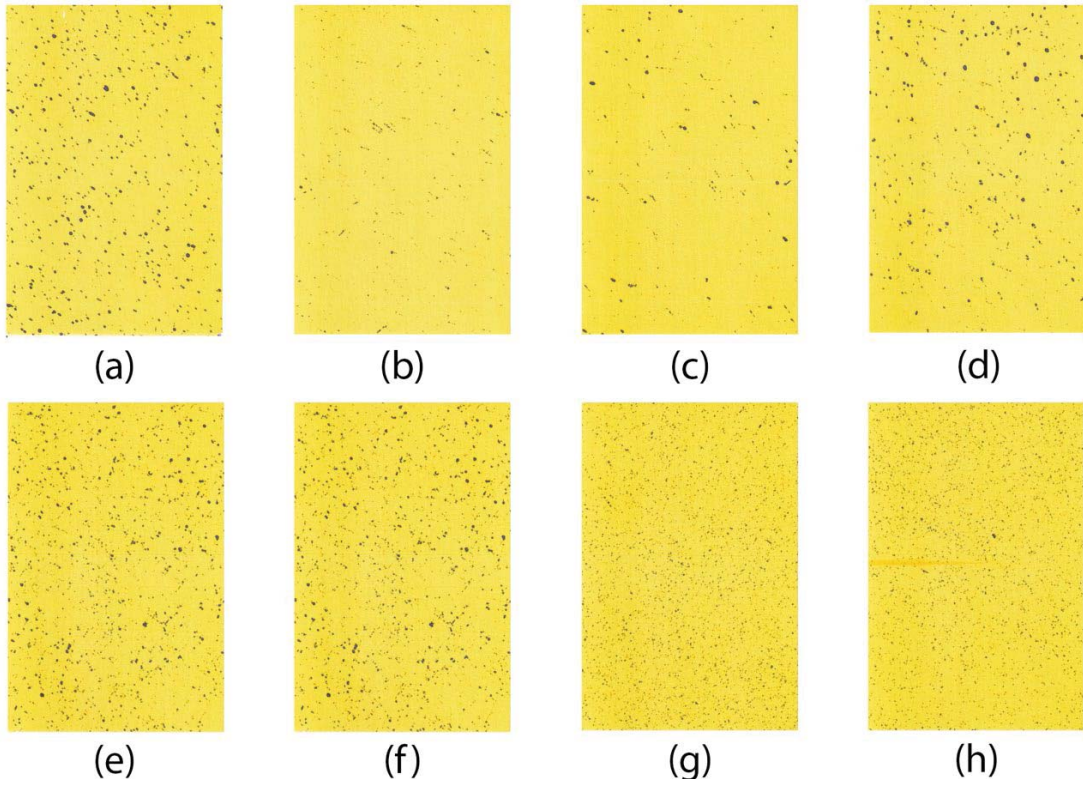
Sprey performansını hedef yüzey üzerinde somut olarak ölçebilmek amacıyla uçuş sahasına yerleştirilen Water Sensitive Paper (WSP) kâğıtları kullanılmıştır. Saha testleri sonrasında elde edilen WSP görüntüleri, Bölüm 3.5'te açıklanan görüntü işleme tabanlı yöntem kullanılarak sayısal verilere dönüştürülmüştür.

WSP kâğıtları, üzerlerindeki özel kaplama sayesinde su bazlı damlacıklarla temas ettiğinde renk değiştirerek damlacıkların düştüğü konumları ve yoğunluklarını görsel olarak ortaya koymaktadır. Bitki üstü ve çevresine yerleştirilen bu kâğıtlar aracılığıyla, farklı pervane ve nozul kombinasyonlarının damlacık yoğunluğu ve dağılım homojenliği üzerindeki etkileri görsel ve dijital yöntemlerle değerlendirilmiştir.

4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

Bu bölümde, iki farklı ZİHA platformu ile gerçekleştirilen saha uygulamalarından elde edilen WSP sonuçları, pervane tasarımının ve nozul tiplerinin ilaçlama performansına etkilerini değerlendirmek amacıyla analiz edilmiştir. Deneyler 7 m/s ilerleme hızı ve 3 m sabit uçuş irtifasında yapılmış; tüm uçuşlarda debi, rota, kalkış noktası ve WSP yerleşimi sabit tutulmuştur.

Şekil 4. pervanelerin ve nozulların değiştirilerek kullanıldığı 8 farklı tip senaryoda kullanılan WSP kağıtlarının taranmış görüntülerini içermektedir.



Şekil 4.1. Saha testinde elde edilen WSP sonuçları

4.1. Drone-1 - 3011 Pervane – Santrifüj Nozul Sonuçları

Şekil 4.1.(a) incelendiğinde, 3011 pervanesi düşük pitch nedeniyle daha düzenli ve istikrarlı bir akış üretmiş, bu da WSP yüzeylerinde daha dengeli fakat daha düşük yoğunluklu bir damlacık dağılımına yol açmıştır.

- Sürüklenme mesafesi en düşük pervanelerden biridir.
- Damlacık penetrasyonu sınırlıdır.
- İlaçlama genişliği 3090 modeline göre daha dardır.

- Sol ve sağ asimetri minimumdur.
- Yoğunluk: Orta-Yüksek
- Damlacık boyutu: 80–250 μm arası, çoğu orta boy
- Desen: Homojen, düşük türbülans
- Sürüklenme eğilimi: Minimum
- Yığılma: Üst ve orta bölgede çok az kümelenme

Damlacık Çap Dağılımı

- Baskın aralık: 80–250 μm
- İnce damlacık ($<80 \mu\text{m}$): %10–15
- Orta damlacık (80–250 μm): %70
- Kalın damlacık ($>250 \mu\text{m}$): %15

3011 pervane düşük pitch açısına sahip olduğundan laminar aşağı yönlü akış üretmiştir. Santrifüj nozul ile kullanımı en dengeli deseni ortaya çıkartmıştır.

Elde edilen WSP analizlerine göre bu kombinasyon Drone-1 için çalışmadaki en uygun sürüklenme ve penetrasyon dengesini üretmiştir.

4.2. Drone-1 - 3011 Pervane – Düz-Fan Nozul Sonuçları

Şekil 4.1.(b) incelendiğinde, Düz-fan nozullar geniş açıyla atış yaptığı için, 3011 pervanenin düşük momentumlu akışıyla birleştiğinde çok güvenli ama düşük penetrasyonlu bir dağılım oluşturmuştur.

Bu kombinasyon sürüklenme riskinin sıfıra yakın olması gereken bahçecilik uygulamaları için ideal olabilir.

- Yoğunluk: Düşük-Orta
- Damlacık dağılımı: Daha seyrek
- Damlacık boyutu: 150–300 μm (biraz daha büyük)
- Desen: Yatay çizgisel izler (düz-fan karakteristiği)
- Sürüklenme: Çok düşük
- Penetrasyon: Sınırlı

Damlacık Çap Dağılımı;

- Baskın aralık: 150–400 μm
- İnce damlacık ($<150 \mu\text{m}$): %5
- Orta (150–250 μm): %40
- Kalın ($>250 \mu\text{m}$): %55

4.3. Drone-1 - 3090 Pervane – Düz-Fan Nozul Sonuçları

Şekil 4.1.(c) incelendiğinde, 3090 pervane tipi yüksek pitch yapısına sahip olması sebebiyle agresif ve aşağı yönlü akış etkisi oluşturduğu görülmektedir.

Düz-fan geniş açılı ve düşük momentumludur. Pervane ve nozul arasındaki bu uyumsuzluk, damlacıkların rotor kuyruk akımı içinde savrulmasına neden olmuştur.

3090 pervane ve düz-fan nozul kombinasyonu sınırlı penetrasyona ve yüksek sürüklenmeye sebep olmuştur. Bu durum, söz konusu kombinasyonun çalışma koşulları açısından uygun olmadığını göstermektedir.

- Yoğunluk: Düşük gözlemlenmiştir
- Damlacık boyutu: 110–250 μm
- Desen: Düzensiz, türbülans kaynaklı yönlü çizgiler oluşmuştur
- Sürüklenme: 3011 pervaneye göre artmıştır
- Asimetri: Sol bölgede daha seyrek oluşmuştur

Damlacık Çap Aralıkları;

- Baskın aralık: 120–250 μm
- İnce (<120 μm): %20
- Orta (120–250 μm): %60
- Kalın (>250 μm): %20

4.4. Drone-1 - 3090 Pervane – Santrifüj Nozul Sonuçları

Şekil 4.1.(d) incelendiğinde, 3090 pervane ve santrifüj nozul, Drone-1 için en agresif sürüklenme üreten kombinasyon olmuştur. Ancak penetrasyon en yüksek örneklerden biri olmuştur.

Bu durum yüksek boy bitkilerde avantaj sağlayabilirken, rüzgarlı alanlarda dezavantaj sağlayabilir.

- Yoğunluk: Orta
- Damlacık boyutu: Küçük–orta
- Desen: Türbülanslı
- Sürüklenme: Yüksek
- Penetrasyon: İyi düzeydedir
- Asimetri: Belirgin pitch boyutu kaynaklı yan akım etkisi tespit edilmiştir

Damlacık Çap Dağılımı;

- Baskın aralık: 60–200 μm

- İnce (<100 μm): %30
- Orta (100–200 μm): %50
- Kalın (>200 μm): %20

4.5. Drone-2 - 36190 Pervane – Düz-Fan Nozul Sonuçları

Şekil 4.1.(e) incelendiğinde, 36190 pervane büyük disk alanı çok güçlü ve stabil akış üretmiştir.

Düz-fan nozul daha büyük damlacıklar ürettiği için sürüklenmeyi düşürdüğü gözlemlenmiştir.

Testlerde Drone-2 sınıfında en homojen ve en güvenli kombinasyonun bu olduğu gözlemlenmiştir.

- Yoğunluk: Orta
- Damlacık boyutu: Büyük–orta
- Desen: Daha kompakt ve kontrollü oluşmuştur
- Sürüklenme: Düşük miktardadır
- Penetrasyon: Yeterli görülmüştür

Damlacık Dağılımı;

- Baskın aralık: 180–350 μm
- İnce (<150 μm): %10
- Orta (150–250 μm): %40
- Kalın (>250 μm): %50

4.6. Drone-2 - 3390 Pervane – Düz-Fan Nozul Sonuçları

Şekil 4.1.(f) incelendiğinde, 3390 pervanenin yüksek pitch değerine sahip yapısı türbülansın temel kaynağı olduğu gözlemlenmiştir. Yüksek pitchli pervane düz-fan nozul gibi geniş açılı bir nozulla birleşince rastgele dağılım ve sürüklenme artışı olduğu gözlemlenmiştir.

Bu kombinasyon geniş alan homojenliği açısından olumsuz görülebilir.

- Yoğunluk: Düşük
- Desen: Türbülanslı
- Asimetri: Yüksek
- Sürüklenme: Belirgin
- Damlacık yapısı: İnce ve seyrek

Damlacık Çap Dağılımı;

- Baskın aralık: 120–250 μm
- İnce (<120 μm): %15
- Orta (120–250 μm): %70
- Kalın (>250 μm): %15

4.7. Drone-2 - 3390 Pervane – Santrifüj Nozul Sonuçları

Şekil 4.1.(g) incelendiğinde, santrifüj nozul ve yüksek pitch damlacıkların daha küçük, daha sürüklenmeye meyilli olmasını sağlamıştır.

Genel olarak penetrasyonun iyi düzeyde fakat sürüklenmenin çalışmadaki en yüksek seviyede olduğu gözlemlenmiştir.

- Yoğunluk: Orta
- Desen: Çok türbülanslı görülmüştür
- Sürüklenme: Yüksek görülmüştür
- Küme yoğunluğu: Fazla görülmüştür
- Penetrasyon: Güçlü görülmüştür

Damlacık Çap Dağılımı;

- Baskın aralık: 70–180 μm
- İnce (<100 μm): %35
- Orta (100–180 μm): %50
- Kalın (>180 μm): %15

4.8. Drone-2 - 36190 Pervane – Santrifüj Nozul Sonuçları

Şekil 4.1.(h) incelendiğinde, Drone-2 KD-30 model 30 Litre kapasiteli platform ve 36190 pervanenin testlerdeki en güçlü akışı üreten kombinasyon olduğu gözlemlenmiştir.

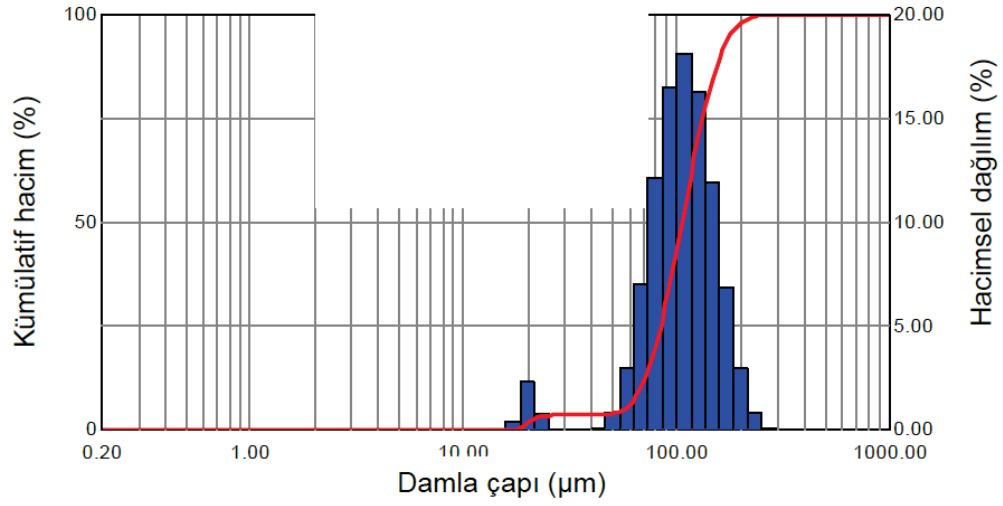
36190 pervane santrifüj nozul ile birleştğinde tüm testler arasında en yüksek penetrasyon ve en geniş ilaçlama genişliği bu kombinasyonda oluşmuştur.

- Yoğunluk: Çok yüksek
- Damlacık boyutu: Küçük–orta
- Desen: Homojen
- Sürüklenme: Orta–düşük
- Penetrasyon: En yüksek

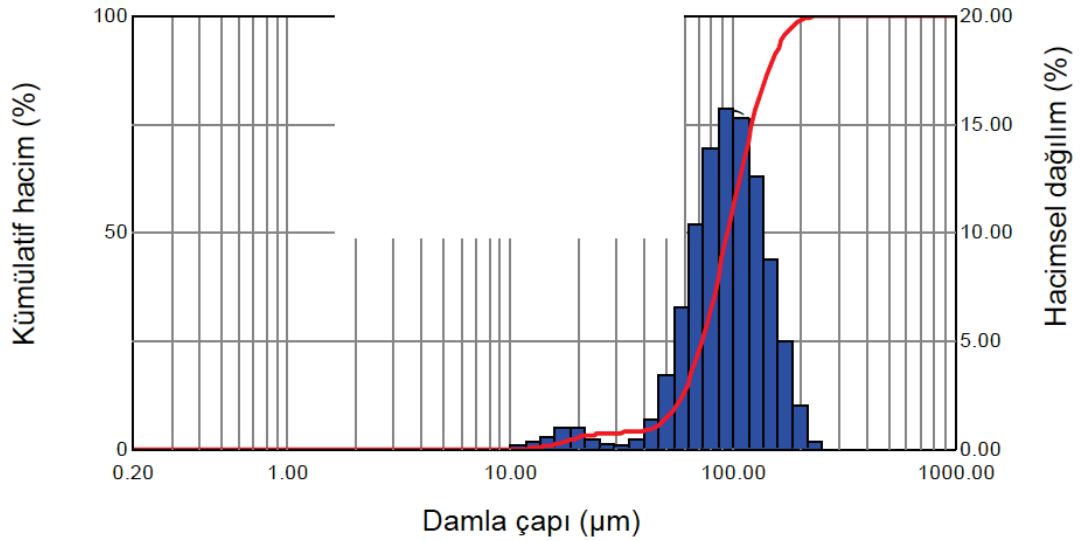
Damlacık Çap Dağılımı;

- Baskın aralık: 90–220 μm
- İnce (<100 μm): %15
- Orta (100–220 μm): %70
- Kalın (>220 μm): %15

Tarım ve Orman Bakanlığı Tarım Alet ve Makine Test Merkezi Müdürlüğü (TAMTEST) Test Merkezi'nde KD-30 ile 36190 pervane ve aynı santrifüj nozulla yapılan deneylerde, minimum ve maksimum disk dönme hızlarının damlacık dağılımı üzerinde belirgin bir etki yaratmadığı görülmüştür. Şekil 4.2. ve Şekil 4.3'te test raporundan alınan damla büyüklük test sonuçları görülmektedir.



Şekil 4.2. TAMTEST KD-30 damla büyüklük test sonuçları (maksimum disk hızı)



Şekil 4.3 TAMTEST KD-30 damla büyüklük test sonuçları (minimum disk hızı)

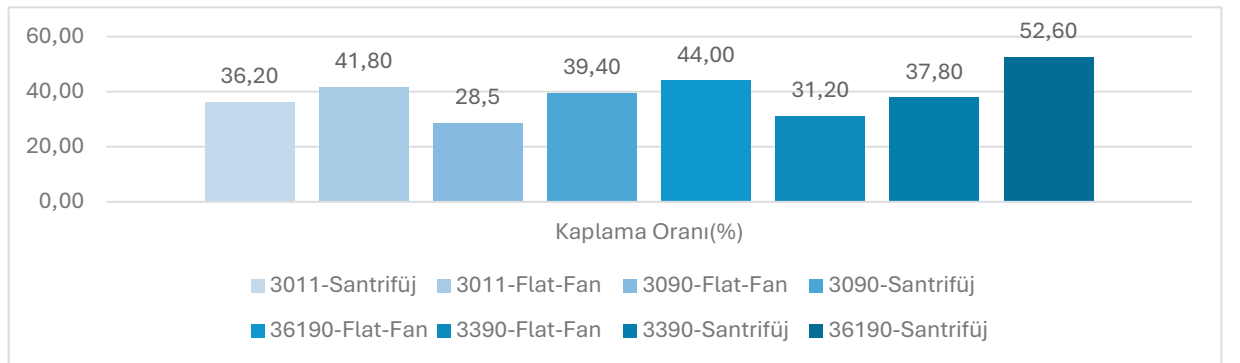
Şekil 4.2’de görüldüğü gibi damlacık çapı maksimum hızda $Dv50=106\ \mu\text{m}$ iken Şekil 4.3’te minimum hızda $Dv50=95\ \mu\text{m}$ olarak ölçülmüş, $Dv90$ değerleri ise sırasıyla $160\ \mu\text{m}$ ve $150\ \mu\text{m}$ seviyelerinde kalmıştır. Buna ek olarak hem maksimum ($\text{Span}=0.873$) hem minimum hızda ($\text{Span}=1.006$) dağılım genişliğinin dar bantta kalması, atomizasyon karakterinin hız değişimine rağmen kararlı olduğunu göstermektedir. Bu sonuçlar, saha testlerinde elde edilen damlacık dağılım profilleri ile uyumlu olup platformun ilaçlama performansının hız değişimlerinden sınırlı ölçüde etkilendiğine işaret etmektedir. (Tarım ve Orman Bakanlığı Tamtest Test Merkezi KD-30 Raporu, 2023, Robosys Şirket Arşivi)

Ayrıca drone ile ilaçlama yapan çalışmaların göstermiş olduğu gibi, damlacık geçiş boyutu (VMD) genellikle $90\text{--}160\ \mu\text{m}$ aralığındadır (Chen vd., 2020; Baio, 2025). Bu çalışmadaki Drone-2 (KD-30) platformunda kullanılan santrifüj nozulla elde edilen $95\text{--}106\ \mu\text{m}$ aralığı, literatürde raporlanan değerlerle yüksek düzeyde uyumluluk göstermektedir.

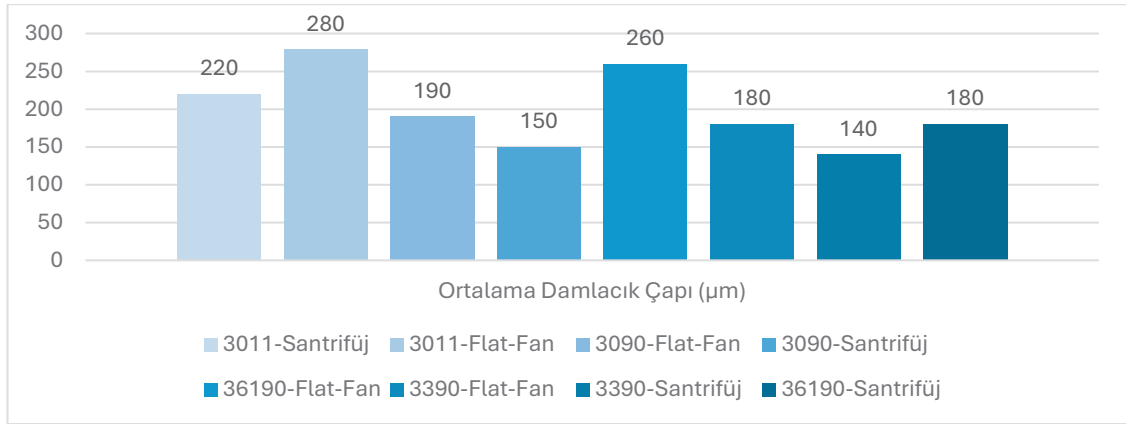
4.9. Genel Karşılaştırmalı Sonuçlar

Bu bölümde, Drone-1 (AR-GE Modeli, 10 Litre kapasiteli) ve Drone-2 (KD30 Model, 30 Litre Kapasiteli) ZİHA’larda kullanılan dört farklı pervane (3011, 3090, 3390, 36190) ile iki farklı nozul tipinin (santrifüj, düz-fan) WSP sonuçları üzerinden karşılaştırmalı değerlendirmesi yapılmıştır. Tüm kartlar aynı boyutta ($2\times 3\ \text{inç}$), aynı çözünürlükte (1200 dpi) taranmış, bu sayede görsel yoğunluk ve desen kıyaslaması doğrudan yapılabilmektedir.

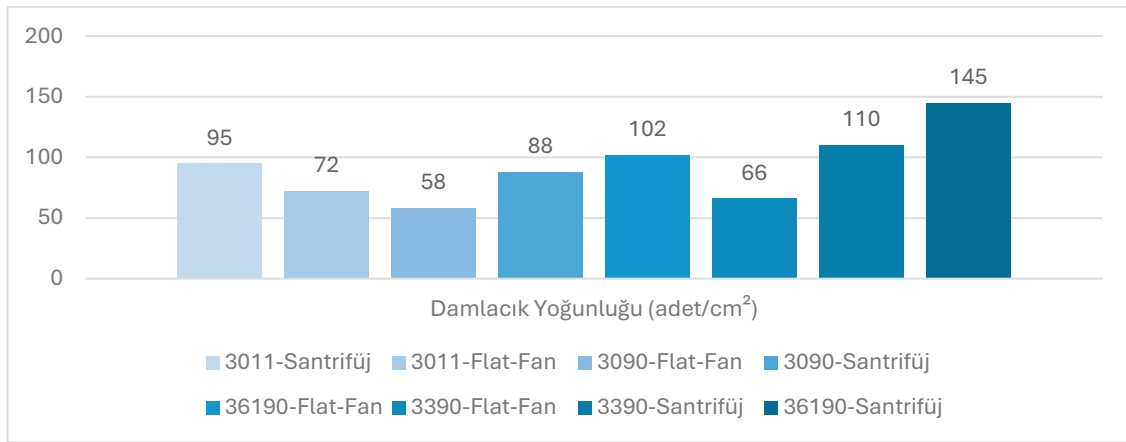
WSP kâğıtları taranarak dijital ortama aktarılmış ve görüntü işleme yazılımlarıyla damlacıklar analiz edilmiştir. Şekil 4.4, Şekil 4.5, Şekil 4.6, ve Şekil 4.7’de analiz tabloları sunulmuştur.



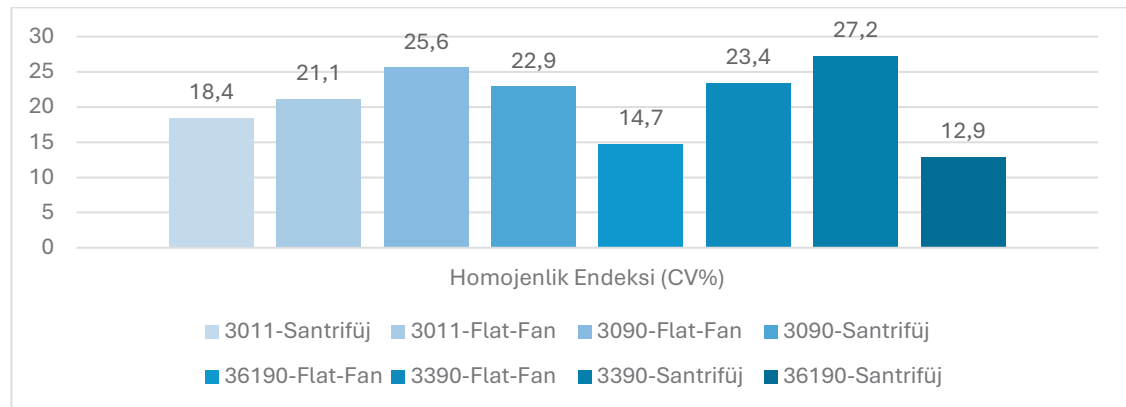
Şekil 4.4. Kaplama oranı grafiği



Şekil 4.5. Ortalama damlacık yarı çapı grafiği



Şekil 4.6. Damlacık yoğunluğu grafiği



Şekil 4.7. Homojenlik endeksi

Çizelge 4.1’te Drone-1 için Şekil 4.4, Şekil 4.5, Şekil 4.6, Şekil 4.7’de yer alan verilere göre karşılaştırmaları tablo halinde verilmiştir.

Çizelge 4.1. Drone-1 için genel karşılaştırmalı sonuçlar

Kombinasyon	Sürüklenme	Penetrasyon	Homojenlik	Sonuç
3011 ve Düz-Fan	En düşük	Orta	Orta	Güvenli ama düşük etkili sonuç
3011 ve Santrifüj	Düşük	Orta-Yüksek	Yüksek	En dengeli sonuç
3090 ve Düz-Fan	Yüksek	Düşük	Düşük	Düşük verimli sonuç
3090 ve Santrifüj	En Yüksek	Yüksek	Orta	Spesifik Duruma Özel kullanılabilir

Çizelge 4.1’te görüldüğü gibi drone-1 için 3011 pervane ve santrifüj çalışma verilerine göre nozul en optimum kombinasyon gözükmemektedir.

Çizelge 4.2’te Drone-2 için Şekil 4.4, Şekil 4.5, Şekil 4.6, Şekil 4.7’de yer alan verilere göre karşılaştırmaları tablo halinde verilmiştir.

Çizelge 4.2. Drone-2 için genel karşılaştırmalı sonuçlar

Kombinasyon	Sürüklenme	Penetrasyon	Homojenlik	Sonuç
36190 ve Düz-Fan	Düşük	Orta	En Homojen	Sürüklenme ve kontrol optimum sonuç
36190 ve Santrifüj	Orta	En yüksek	Yüksek	Güçlü etkili sonuç
3390 ve Düz-Fan	Orta	Düşük	Düşük	Düşük verimli sonuç
3390 ve Santrifüj	Yüksek	Yüksek	Orta	Yoğun sürüklenme problem gözlemlenmiştir

Çizelge 4.2’te görüldüğü gibi Drone-2 için 36190 pervane ve düz-fan nozul düşük sürüklenme ve homojenlik için öne çıkarken güçlü penetrasyon için 36190 pervane ve santrifüj en uygun kombinasyon gözükmemektedir.

Pervane çapı homojenlik ve ilaçlama genişliğini belirleyen ana faktör iken, pervane pitch boyutu sürüklenme miktarını belirleyen temel parametre olmuş; nozul tipleri ise damlacık şekli ve penetrasyon üzerinde birincil etkiyi göstermiştir.

4.9.1 Drone-1 platformunda pervane nozul kıyaslaması

Drone-1 – 3011 pervane – santrifüj nozul

Şekil 4.1.(a)'da sonucu görülen bu kombinasyonda WSP üzerinde orta yüksek yoğunlukta, oldukça homojen bir dağılım gözlenmiştir. Damlacıklar genellikle orta boyutta olup, alanın büyük kısmı benzer yoğunlukta kaplanmıştır. Lateral tarafa doğru ani boşluklar veya aşırı birikme bölgeleri görülmemektedir. Bu durum, 3011 pervanesinin düşük pitch boyutu nedeniyle daha düzenli bir aşağı yönlü akış üretmesi ve santrifüj nozulla birlikte dengeli bir desen oluşturması ile açıklanabilir.

Drone-1 – 3011 pervane– düz-fan nozul

Şekil 4.1.(b)'de sonucunda görüldüğü üzere aynı pervane düz-fan nozulla kullanıldığında damlacık yoğunluğu belirgin şekilde azalmış, WSP'de seyrek ve daha iri damlacıklar oluşmuştur. Sürüklenme izleri minimum olmakla birlikte, penetrasyonun sınırlı olduğu ve kaplama oranının santrifüj nozula göre daha düşük kaldığı görülmektedir. Bu kombinasyon güvenli, ancak etkisi daha düşük bir uygulama karakteri sunmaktadır.

Drone-1 – 3090 pervane–düz-fan nozul

Şekil 4.1.(c)'de sonucu görüldüğü üzere 3090 pervanesiyle düz-fan nozulu birlikte kullanıldığında WSP'de düşük yoğunluklu ve düzensiz bir desen ortaya çıkmıştır. Damlacıklar yer yer çizgisel izler hâlinde, yer yer geniş boşluklar bırakacak şekilde dağılmıştır. Bu yapı, yüksek pitch'li pervanenin oluşturduğu türbülanslı kuyruk akımı ile geniş açılı düz-fan nozulu arasındaki uyumsuzluğa işaret etmektedir. Bu kombinasyon hem kaplama hem homojenlik açısından Drone-1 için en zayıf kombinasyonlardan biridir.

Drone-1 – 3090 pervane – santrifüj nozul

Şekil 4.1.(d)'de sonucu görüldüğü üzere 3090 pervanesi santrifüj nozulla birlikte kullanıldığında WSP'de damla yoğunluğu tekrar artmış, damlacık sayısı yükselmiş fakat desende belirgin türbülans ve asimetri gözlenmiştir. WSP'nin bazı bölgeleri yoğun kümelenmelere sahipken, bazı alanlar nispeten seyrek kalmıştır. Bu durum, yüksek pitch ile artan aşağı yönlü akış hızının santrifüj nozulla üretilen ince damlacıkları lateral yönde daha fazla taşımasına bağlanabilir. Bu kombinasyonda penetrasyon oranı yüksektir fakat sürüklenme riski ve dağılım dalgalılığı da artmıştır.

Drone-1 için sonuç değerlendirmesi yaptığımızda, 3011 pervanesi ile yapılan saha testlerinde elde edilen homojen dağılım ve kontrollü atomizasyon, literatürde bildirilen aşağı yönlü akış etkisiyle ilaç damlacıklarının düzenli dağılım sağladığını gösteren bulgularla uyumludur (Lan vd., 2021). Lan ve arkadaşları (2021) çalışmasında, uygun uçuş yüksekliği ve rotor aşağı yönlü akış rüzgârı kullanımı ile damlacık dağılımının homojenleştiği ve kaplama miktarı etkinliğinin arttığı raporlanmıştır. 3090 pervanedeki pitch artışı, literatürde bildirildiği gibi aşağı yönlü akış hızını ve penetrasyonu artırmakta; ancak Drone-1 sınıfında sürüklenme ve türbülans nedeniyle homojenlikten ödün verilmektedir.

Drone-1 10 litre kapasiteli platformda sürüklenme ve penetrasyon dengesi açısından en uygun kombinasyon 3011 pervane ve santrifüj nozul olarak öne çıkmaktadır. 3011 pervane ve düz-fan nozul ise güvenli fakat nispeten zayıf kaplamalı bir alternatif olarak değerlendirilebilir.

4.9.2 Drone-2 (KD30) platformunda pervane nozul kıyaslaması

Drone-2 (KD30) – 36190 Pervane – Düz-Fan Nozul

Şekil 4.1.(e)'de sonucu görüldüğü üzere, 36 inç çaplı pervane ile düz-fan nozulu kombinasyonunda WSP üzerinde orta düzeyde fakat çok düzgün bir damlacık dağılımı görülmüştür. Kart genelinde yoğunluk farkları düşük, desende belirgin bir homojenlik vardır. Damlacıkların çoğu orta-büyük boyuttadır, bu da sürüklenmenin sınırlı, penetrasyonun ise yeterli düzeyde olduğunu göstermektedir. Büyük disk alanının ürettiği güçlü fakat nispeten düzenli aşağı yönlü akış, düz-fan nozulla iyi bir eşleşme sergilemiştir.

Drone-2 (KD30) –3390 pervane düz-Fan nozul

Şekil 4.1.(f)'de sonucu görüldüğü üzere, 3390 pervanesiyle düz-fan birlikte kullanıldığında damlacık yoğunluğu düşmüş, desen daha seyrek ve dalgalı hâle gelmiştir. WSP üzerinde bir yönde uzanan ince çizgisel izler ve aralarda kalan boş alanlar, rotor kuyruk akımı yapısında artan türbülans ve yönlü akış sapmalarını göstermektedir. Aynı drone ve debiyle 36190 pervanesiyle kıyaslandığında, 3390 pervane ve düz-fan nozul kombinasyonu hem kaplama hem homojenlik açısından belirgin biçimde daha zayıftır.

Drone-2 (KD30) –3390 Pervane–Santrifüj Nozul

Şekil 4.1.(g)'de sonucu görüldüğü üzere, 3390 pervanesi santrifüj nozulla kullanıldığında damlacık sayısı artsa da desen daha da türbülanslı ve düzensiz hâle

gelmiştir. Özellikle WSP'nin bazı bölgelerinde çok yoğun kümelenmeler, diğer bölgelerde ise görece seyrek dağılım göze çarpmaktadır. Bu yapı, yüksek pitch ile santrifüj nozula özgü ince damlacıkların birleşmesi sonucu sürüklenme ve geri dolaşım etkilerinin kuvvetlenmiş olmasıyla açıklanabilir.

Drone-2 (KD30) –36190 pervane santrifüj nozul

Şekil 4.1.(h)'de sonucu görüldüğü üzere 36 inç pervane santrifüj nozulla eşleştirildiğinde, çalışma boyunca elde edilen en yüksek damlacık yoğunluğu ve penetrasyon oranı gözlenmiştir. Kart neredeyse tamamen damlacıklarla kaplıdır; boş alan oranı çok düşüktür. Desen genel olarak homojen olmakla birlikte, yüksek debi ve güçlü aşağı yönlü akış nedeniyle bazı bölgelerde lokal yoğunlaşmalar mevcuttur. Yine de 3390 pervane kombinasyonlarına göre hem homojenlik hem ilaçlama açısından daha iyi bir performans sergilemiştir.

Drone-2 için sonuç değerlendirmesi yaptığımızda büyük çaplı 36190 pervanesi, 3390 pervaneye göre hem düz-fan hem santrifüj nozul ile daha geniş ve daha homojen bir kaplama sağlamıştır.

3390 pervanesi, özellikle santrifüj nozul ile kullanıldığında sürüklenme ve türbülans kaynaklı düzensiz dağılım üretmiştir.

Drone-2 30 Litre platformunda en kontrollü ve pratik kombinasyon 36190 pervane ve düz-fan nozul, en güçlü penetrasyon sağlayan kombinasyon ise 36190 pervane ve santrifüj olarak öne çıkmaktadır.

4.9.3 Drone-1 ve drone-2 platformlarının birlikte değerlendirilmesi

Platformlar arası kıyaslama yapıldığında 30 Litre sınıfı Drone-2 (KD30), 10 Litre sınıfı Drone-1'e göre daha yüksek kalkış ağırlığı ve daha büyük rotor diski nedeniyle daha stabil ve geniş bir aşağı yönlü akış alanı üretmiştir. Bu durum WSP'lerde daha geniş ilaçlama genişliği ve daha kararlı desenlerle kendini göstermiştir.

Drone-1 platformunda pitch artışı (3011'dan 3090'a), doğrudan ve belirgin olarak dağılımı bozarken; Drone-2'de 36190 pervanesinin büyük çapı, yüksek debi ile pitch agresifliğini kısmen telafi etmiş, 36190 pervane kombinasyonlarında 3390 pervanesine göre daha kararlı sonuçlar elde edilmiştir.

Genel olarak çap etkisi (disk alanı) homojenlik ve ilaçlama genişliği üzerinde baskın, pitch etkisi ise sürüklenme ve türbülans üzerinde belirleyici olmuştur.

Elde edilen veriler nozul tipleri pervane ayarından bağımsız olarak değerlendirildiğinde düz-fan nozullar, tüm pervane tiplerinde santrifüj nozullara kıyasla daha iri damlacıklar ve daha düşük sürüklenme üretmiş; bu da WSP’lerde daha sakin, daha kontrollü desenlere yol açmıştır.

Santrifüj nozullar ise özellikle yüksek pitch’li pervanelerle (3090, 3390) eşleştğinde daha küçük damlacıklar ve daha belirgin yanal sapma üretmiş, bazı kombinasyonlarda sürüklenme açısından kabul edilebilir sınırların üstüne çıkmıştır.

Büyük çaplı 36190 pervane ile kullanıldığında santrifüj nozul, yüksek penetrasyon ile kabul edilebilir seviyede sürüklenme arasında bir denge sağlayabilmiştir; fakat aynı durum küçük çap yüksek pitch kombinasyonlarında (3090 pervane ve 3390 pervane) geçerli değildir.

Yukarıda elde edilen bulgular performans analizini ortaya koymakla birlikte, saha uygulamalarına ilişkin bazı operasyonel etkiler literatür bağlamında ayrıca değerlendirilebilir.

4.10 Operasyonel Maliyet Tartışması

Çalışmada ölçülen kaplama homojenliği farklarının pratik saha şartlarında ilaçlama operasyonuna dolaylı etkileri olabileceği literatürde belirtilmektedir. Daha homojen dağılım sağlayan pervaneler aynı ilaçlama dozu ile hedef alanı daha etkin kapladığından, tekrar geçiş ihtiyacını azaltabilir. Bu durum kullanılan toplam spreyci hacminde ve toplam uçuş süresinde düşüş anlamına gelebilir (Chen vd., 2017; Lan vd., 2021). Dolayısıyla pervane tasarımı sadece teknik performansı değil, uygulama verimliliğini ve dolaylı olarak operasyonel maliyetleri de etkileyebilmektedir.

4.11 Operasyonel Maliyet Analizi

Bu bölümde iki farklı İHA platformu ve iki farklı nozul tipi ile gerçekleştirilen ilaçlama uygulamalarının dönüm (1000 m²) başına tahmini operasyon maliyetleri hesaplanmış ve kırsal bölgelerde yaygın olarak kullanılan traktör ve holder atomizer sistemi ile karşılaştırılmıştır. Maliyet analizi; nozul birim maliyetlerinin kullanım ömrüne dağıtılmış payı, enerji tüketimi, pilotaj maliyeti ve amortisman payı dikkate alınarak yapılmıştır. Traktör ve holder sistemine ait maliyetler ise mazot tüketimi, işçilik ve amortisman giderlerinden oluşmaktadır. Tüm maliyetler ABD Doları (USD) cinsinden ifade edilmiştir.

Nozul maliyet payları tarımsal uygulamalarda yaygın olarak kabul edilen kullanım ömürleri esas alınarak hesaplanmıştır. Buna göre düz fan nozullarının ekonomik kullanım ömrü 1000 dönüm, santrifüj nozullarının ekonomik kullanım ömrü 1500 dönüm olarak değerlendirilmiştir. Düz fan nozulu maliyeti 32 USD olduğunda dönüm başına maliyet 0,03 USD; santrifüj nozulu maliyeti 100 USD olduğunda dönüm başına maliyet 0,07 USD olarak elde edilmiştir.

Enerji tüketimi açısından Drone-1 platformunun maliyeti 0,10 USD/dönüm; Drone-2 platformunun maliyeti 0,23 USD/dönüm olarak hesaplanmıştır. Her iki drone platformu için pilotaj maliyeti 0,47 USD/dönüm, amortisman maliyeti ise 0,60 USD/dönüm olarak dikkate alınmıştır.

Traktör ve holder atomizer sistemi için mazot tüketimi 0,64 USD/dönüm, operatör işçilik maliyeti 0,31 USD/dönüm ve amortisman değeri 4,33 USD/dönüm olarak hesaplanmıştır. Amortisman maliyetinin yüksek olmasının sebebi, traktör yatırım bedelinin yaklaşık 130.000 USD olması ve ekonomik ömrünün 3000 saat olarak kabul edilmesidir. Traktörün saatlik ilaçlama kapasitesi 10 dönüm olarak dikkate alındığında dönüm başına amortisman maliyeti 4,33 USD olarak elde edilmektedir. Buna göre traktör ve holder uygulamasının toplam maliyeti 5,28 USD/dönüm olarak hesaplanmıştır.

Çizelge 4.3. USD cinsinden dönüm başına maliyet farklarını karşılaştırabilmek için gerekli tutarları içermektedir.

Çizelge 4.3. Drone ve traktör-holder ile ilaçlama işlemlerinin maliyet karşılaştırması.

Platform ve Nozul	Enerji (USD)	Pilotaj (USD)	Amortisman (USD)	Nozul (USD)	Toplam (USD)
Drone-1 – Düz fan	0.10	0.47	0.60	0.03	1.20
Drone-1 – Santrifüj	0.10	0.47	0.60	0.07	1.24
Drone-2 – Düz fan	0.23	0.47	0.60	0.03	1.33
Drone-2 – Santrifüj	0.23	0.47	0.60	0.07	1.37
Traktör-Holder	0.64	0.31	4.33	–	5.28

Çizelge 4.3’de görülen sonuçlarına göre drone uygulamalarının dönüm başına maliyeti, traktör ve holder sistemine kıyasla belirgin ölçüde düşüktür. En düşük maliyet 1,20 USD/dönüm ile Drone-1 platformunda düz fan nozulu kullanılarak elde edilmiştir. En yüksek drone maliyeti 1,37 USD/dönüm ile Drone-2 platformunda santrifüj nozulu kullanılarak elde edilmiş olsa dahi, traktör ve holder sisteminin maliyeti olan 5,28 USD/dönümden oldukça düşüktür. Bu durum drone uygulamalarında enerji ve işçilik

giderlerinin düşük olmasından, ayrıca amortisman maliyetinin traktöre kıyasla çok daha düşük olmasından kaynaklanmaktadır.

Traktör yöntemiyle karşılaştırıldığında Drone-1 düz fan konfigürasyonu yaklaşık yüzde 77 tasarruf, Drone-1 santrifüj konfigürasyonu yüzde 76 tasarruf, Drone-2 düz fan konfigürasyonu yaklaşık yüzde 75 tasarruf ve Drone-2 santrifüj konfigürasyonu yaklaşık yüzde 74 tasarruf sağlamaktadır. Bu bulgular drone tabanlı ilaçlama sistemlerinin yalnızca sprej performansı açısından değil, operasyonel verimlilik ve saha maliyeti açısından da önemli avantajlara sahip olduğunu göstermektedir.

Bu maliyet analizi, önceki alt başlıklarda elde edilen kaplama homojenliği ve varyasyon katsayısı sonuçlarıyla birlikte değerlendirildiğinde pervane ve nozul tasarımının sahadaki zaman ve maliyet verimliliği üzerinde dolaylı etkiye sahip olduğu anlaşılmaktadır.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, iki farklı ZİHA platformu (10 Litre ve 30 Litre kapasiteli), dört farklı pervane (3011, 3090, 3390, 36190) ve iki nozul tipi (santrifüj, düz-fan) kullanılarak, 7 m/s uçuş hızı ve 3 m irtifada su duyarlı kâğıtlar üzerinde sprej damlacık dağılımı incelenmiştir. Elde edilen bulgular özetlenmiştir.

Pervane çapı, sprej performansını belirleyen en kritik parametrelerden biri olmuştur. Büyük çaplı 36190 pervanesi 3390 ve 30 inç sınıfına göre daha geniş ilaçlama genişliği, daha yüksek penetrasyon ve daha homojen bir dağılım sağlamıştır.

Pitch artışı, tüm kombinasyonlarda aşağı yönlü akış hızını artırmıştır ancak özellikle küçük platformda sürüklenme ve türbülans nedeniyle homojenliği bozucu etki göstermiştir. Pitch'in kontrolsüz artırılması, özellikle Drone-1 sınıfında istenmeyen bir durum olarak karşımıza çıkmıştır.

10 Litre sınıfında en dengeli kombinasyon 3011 pervanesi ve santrifüj nozul kombinasyonu olmuştur. Bu kombinasyon, kabul edilebilir sürüklenme düzeyini korurken yüksek penetrasyon ve kaplama sağlamıştır.

Çalışma verilerine göre drone-2 (KD-30) sınıfında en homojen dağılım ve sürüklenme açısından en güvenli kombinasyon 36190 pervanesi ve düz-fan nozul olarak belirlenmiştir. Yüksek penetrasyonun öncelikli olduğu durumlarda 36190 ve santrifüj kombinasyonu da kullanılabilir ancak bu durumda sürüklenme riski dikkatle izlenmelidir.

Aynı debi ve uçuş parametreleri altında, düz-fan nozullar genel olarak santrifüj nozullara göre daha düşük sürüklenme ve daha sakin dağılım üretmiş; bu nedenle rüzgârın nispeten yüksek olduğu veya hedef dışı alanların hassas olduğu senaryolarda düz-fan nozul kullanımı daha uygun görünmektedir.

Santrifüj nozullar, büyük çaplı ve düşük pitch'li pervanelerle eşleştğinde özellikle KD-30 drone ve 36190 pervanesi güçlü fakat yönetilebilir bir penetrasyon

sunarken, küçük çaplı ve yüksek pitch’li pervanelerle (Drone-1–3090 pervane, Drone-2–3390 pervane) kombine edildiğinde sürüklenme açısından riskli bir davranış sergilemiştir.

Drone-2 platformunun Drone-1’e göre daha büyük kütlesi ve disk alanı, aşağı yönlü akış akımını daha stabil hâle getirerek, özellikle 36190 pervanesiyle birlikte daha kabul edilebilir ve öngörülebilir bir sprej davranışı sağlamıştır. Bu nedenle yüksek hacimli uygulamalarda 30 Litre sınıfının büyük çaplı pervane ile tercih edilmesi daha verimli sonuç oluşturmaktadır.



KAYNAKLAR

- Baio, F. H. R., de Oliveira, J. T., Alves, M. E. M., Teodoro, L. P. R., da Cunha, F. F., ve Teodoro, P. E. (2025). Characterization of droplet population generated by centrifugal atomization nozzles of UAV sprayers. *AgriEngineering*, 7(1), 15. <https://doi.org/10.3390/agriengineering7010015>
- Başçıftçı, F., Doğan, Y. ve Karaağaç, A. (2022). Examining the types of unmanned aerial vehicles and their usage areas. *Selçuk Üniversitesi Sosyal ve Teknik Araştırmalar Dergisi*, USTEK'2022 Özel Sayısı, 1–10.
- Berner, B. ve Chojnacki, J. (2017). Use of drones in crop protection. *IX International Scientific Symposium: Farm Machinery and Processes Management in Sustainable Agriculture*, 46–51, Lublin, Poland, 22–24 November.
- Carvalho, J. F., Costa, R. ve Reis, R. (2020). Challenges of aircraft and drone spray applications. *Outlooks on Pest Management*, 31(2), 58–65. https://doi.org/10.1564/v31_apr_07
- Chen, C., Lan, Y., Fritz, B., Hoffmann, W. ve Wu, Y. (2020). Effect of droplet size parameters on spray deposition and drift of aerial spraying by UAVs. *Agronomy*, 10(2), 195. <https://doi.org/10.3390/agronomy10020195>
- Chen, S., Lan, Y., Bradley, K. F., Li, J., Liu, A. ve Mao, Y. (2017). Effect of wind field below rotor on distribution of aerial spraying droplet deposition by using multi-rotor UAV. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery*, 48(8), 105–113. <https://doi.org/10.6041/j.issn.1000-1298.2017.08.011>
- Comba, L., Gay, P., Primicerio, J. ve Aimonino, D. R. (2015). Vineyard detection from unmanned aerial systems images. *Computers and Electronics in Agriculture*, 114, 78–87. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2015.03.011>
- Çolak, A., Acar, A. İ. ve Orel, O. (2016). Agriculture and Industry 4.0. *30th Agricultural Mechanization and Energy Congress*, Tokat.
- Dai, X., Quan, Q., Ren, J. ve Cai, K.-Y. (2019). An analytical design optimization method for electric propulsion systems of multicopter UAVs with desired hovering endurance. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 24, 228–239. <https://doi.org/10.1109/TMECH.2019.2890901>
- Doering, D., Benenmann, A., Lerm, R., de Freitas, E. P., Muller, I., Winter, J. M. ve Pereira, C. E. (2014). Design and optimization of a heterogeneous platform for multiple UAV use in precision agriculture applications. *IFAC Proceedings Volumes*, 47(3), 12272–12277. <https://doi.org/10.3182/20140824-6-ZA-1003.02261>
- Ezin, S. ve Sessiz, A. (2023). Design, prototype manufacturing and performance of a drone for vineyard spraying. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*, 25(4), 58–67.

- Faiçal, B. S., Costa, F. G., Pessin, G., Ueyama, J., Freitas, H., Colombo, A., Fini, P. H., Villas, L., Osório, F. S., Vargas, P. A. ve Braun, T. (2014). The use of unmanned aerial vehicles and wireless sensor networks for spraying pesticides. *Journal of Systems Architecture*, 60(4), 393–404. <https://doi.org/10.1016/j.sysarc.2014.01.004>
- Ismail, S. A., Yahya, A., Mat Su, A. S., Asib, N. ve Mustafah, A. M. (2021). Drone payload and flying speed effects on rotor blades' RPM and traveling pattern for agricultural chemical spraying. *Basrah Journal of Agricultural Sciences*, 34, 157–170. <https://doi.org/10.37077/25200860.2021.34.sp1.16>
- Lan, Y., Qian, S., Chen, S., Zhao, Y., Deng, X., Wang, G., Zang, Y., Wang, J. ve Qiu, X. (2021). Influence of the downwash wind field of plant protection UAV on droplet deposition distribution characteristics at different flight heights. *Agronomy*, 11(12), 2399. <https://doi.org/10.3390/agronomy11122399>
- Mohsan, S. A. H., Othman, N. Q., Li, Y., Alsharif, M. H. ve Khan, M. A. (2023). Unmanned aerial vehicles (UAVs): Practical aspects, applications, open challenges, and future trends. *Intelligent Service Robotics*, 16, 123–145. <https://doi.org/10.1007/s11370-022-00452-4>
- Newcome, L. R. (2004). *Unmanned aviation: A brief history of unmanned aerial vehicles. Pen and Sword Aviation*.
- Okur, B. ve Hazneci, E. (2024). The effects of agricultural drone use on agricultural production, yield and profitability: The case of Samsun Province. *Journal of Agricultural Faculty of Gaziosmanpaşa University*, 41(3), 257–264. <https://doi.org/10.55507/gopzfd.1590560>
- Özyurt, H., Ergen, E. ve Kocaman, İ. (2022). Determination of the application parameters of spraying drones for crop protection in hazelnut orchards. *Journal of Agricultural Sciences*, 28(3), 427–435. <https://doi.org/10.33462/jotaf.1105420>
- Pachuta, R., Grodecki, T., Tylek, P. ve Kocurek, P. (2023). Propellers spin rate effect of a spraying drone on quality of liquid deposition in a crown of young spruce. *Agriculture*, 13(8), 1584. <https://doi.org/10.3390/agriculture13081584>
- Rejeb, A., Abdollahi, A., Rejeb, K. ve Treiblmaier, H. (2022). Drones in agriculture: A review and bibliometric analysis. *Computers and Electronics in Agriculture*, 198, 107017. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2022.107017>
- Safaeinezhad, M., Ghasemi-Nejad-Raeini, M. ve Taki, M. (2025). Performance evaluation of spraying drones compared to boom sprayers for spray applications. *Scientific Reports*, 15, 41521. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-25353-1>
- Shakhatreh, H., Sawalmeh, A. H., Al-Fuqaha, A., Dou, Z., Almaita, E., Khalil, I., Othman, N. S., Khreishah, A., ve Guizani, M. (2019). Unmanned aerial vehicles (UAVs): A survey on civil applications and key research challenges. *IEEE Access*, 7, 48572–48634. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2909530>
- Shaw, P. ve Vimalkumar, K. (2020). Design and development of a drone for spraying pesticides, fertilizers and disinfectants. *IJERT International Journal of Engineering*

Research & Technology, 9(6), 1152–1158.
<https://doi.org/10.17577/IJERTV9IS050787>

Tarım ve Orman Bakanlığı. (2023). *KD-30 püskürtme memesi performans raporu* (Tamtest Deney Raporu). Robosys Mekatronik Sistemleri Şirket Arşivi.

URL-1: (2025). <https://docs.cubepilot.org/user-guides/cubepilot-ecosystem/cubepilot-ecosystem-autopilot-wiring-diagram>, [Erişim tarihi: 01.12.2025].

Videras Rodríguez, M., Melgar, S. G., Cordero, A. S. ve Márquez, J. M. A. (2021). A critical review of unmanned aerial vehicles (UAVs) use in architecture and urbanism: Scientometric and bibliometric analysis. *Applied Sciences*, 11(21), 9966. <https://doi.org/10.3390/app11219966>

