



Kahramanmaraş Sütçü İmam University

Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi : 04.12.2024
Kabul Tarihi : 22.04.2025

Received Date : 04.12.2024
Accepted Date : 22.04.2025

DRONE TABANLI TARIMSAL OPERASYONLARDA HIZ VE YÜKSEKLİĞİN ENERJİ TÜKETİMİNE ETKİSİ

THE IMPACT OF SPEED AND ALTITUDE ON ENERGY CONSUMPTION IN DRONE-BASED AGRICULTURAL OPERATIONS

Mevlüt İNAN^{1*} (ORCID: 0000-0002-9840-8404)

Ali KARCI² (ORCID: 0000-0002-8489-8617)

¹ Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Başkale Meslek Yüksekokulu Bilgisayar Programcılığı Bölümü, Van, Türkiye

² İnönü Üniversitesi, Yazılım Mühendisliği Bölümü, Malatya, Türkiye

*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Mevlüt İNAN, mevlutinan@yyu.edu.tr

ÖZET

Bu çalışma, tarımsal ve endüstriyel uygulamalarda operasyonel verimliliği optimize etme amacıyla, 5 litrelik yük taşıyan bir drone'nun enerji tüketimi üzerinde hız ve uçuş yüksekliğinin etkisini araştırmaktadır. Kontrollü çevre koşulları altında 1 hektarlık bir tarım arazisinde yürütülen çalışmada, farklı hız (2, 5, 8 m/s) ve yükseklik (5, 10, 15 m) parametrelerini birleştiren dokuz senaryoyu simüle etmek için bir dört pervaneli drone (quadcopter drone) kullanılmıştır. Kalibre edilmiş sensörler kullanılarak 600 veri noktasında enerji tüketimi verileri toplanmıştır. Sonuçlar, hız, yükseklik ve enerji tüketimi arasında net bir ilişki olduğunu ortaya koymuştur. Daha yüksek hızlar enerji tüketimini önemli ölçüde artırmış, değerler 2 m/s'de 66,67 W'tan 8 m/s'de 121,90 W'a yükselmiştir. Yükseklik değişimlerinin enerji tüketimi üzerindeki etkisi, hızın etkisine kıyasla daha sınırlı olmasına rağmen, yine de dikkate değer bir katkı sağlamıştır. Özellikle yükseklik 5 metreden 15 metreye çıkarıldığında, enerji tüketiminde %10 ila %15 arasında bir artış gözlemlenmiştir. Bu da hızın enerji tüketimi üzerinde yükseklikten daha baskın bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir. Bu bulgular, enerji verimliliği elde etmek için hız ve yükseklik parametrelerini dikkatlice optimize etme ihtiyacını vurgulamaktadır. Bu çalışma, uzun süreli operasyonlar için düşük hız(2 m/s) ve orta yükseklik kombinasyonlarını ve yalnızca zamana duyarlı görevler için yüksek hız ayarlarını önererek, dronelerin tasarımı ve işletimi için uygulanabilir iç görüler sunmaktadır.

Anahtar Kelimeler: İHA, tarım, enerji tüketimi, hız ve yükseklik, enerji verimliliği

ABSTRACT

This study investigates the impact of speed and flight altitude on the energy consumption of a drone carrying a 5-liter payload, with the aim of optimizing operational efficiency in agricultural and industrial applications. Conducted on a 1-hectare agricultural field under controlled environmental conditions, the study utilized a quadcopter drone to simulate nine scenarios combining different speed(2, 5, 8 m/s) and altitude(5, 10, 15 m) parameters. Energy consumption data were collected at 600 data points using calibrated sensors. The results revealed a clear relationship between speed, altitude, and energy consumption. Higher speeds significantly increased energy consumption, rising from 66.67 W at 2 m/s to 121.90 W at 8 m/s. Although the effect of altitude variations on energy consumption was less pronounced compared to speed, it still contributed notably; raising the altitude from 5 meters to 15 meters resulted in a 10% to 15% increase in energy consumption. This indicates that speed has a more dominant influence on energy consumption than altitude. The findings highlight the need to carefully optimize speed and altitude parameters to achieve energy efficiency. The study provides actionable insights for drone design and operation, recommending low-speed and mid-altitude combinations for long-duration operations and high-speed settings for time-sensitive tasks.

Keywords: UAV, agriculture, energy consumption, altitude and speed, energy efficiency

ToCite: İNAN, M., & KARCI, A., (2025). DRONE TABANLI TARIMSAL OPERASYONLARDA HIZ VE YÜKSEKLİĞİN ENERJİ TÜKETİMİNE ETKİSİ. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 28(2), 674-689.

GİRİŞ

Günümüzde tarım sektörü, teknolojik gelişmelerin etkisiyle hızlı bir dönüşüm süreci yaşamaktadır. Bu dönüşümün en dikkat çekici örneklerinden biri, drone teknolojisinin tarımsal uygulamadaki kullanımınıdır. Tarımsal drone teknolojisi, modern tarımın verimliliğini artırmak, doğal kaynakları daha etkin kullanmak ve çevresel etkileri minimize etmek gibi önemli hedeflere ulaşmada kritik bir rol üstlenmektedir. Tarımsal alanların izlenmesi, ürün sağlığının değerlendirilmesi, sulama yönetimi ve pestisit uygulamaları gibi farklı alanlarda kullanılan drone'lar, çiftçilere hızlı ve doğru veri sağlayarak karar verme süreçlerini iyileştirmekte ve iş gücünden tasarruf etmelerine olanak tanımaktadır (Paiva vd., 2023; McCarthy vd., 2023; Zailani vd., 2020). Ancak, bu yenilikçi teknolojinin etkin kullanımı, enerji tüketimi gibi sınırlayıcı faktörler nedeniyle operasyonel zorluklarla karşı karşıya kalmaktadır.

Drone'ların enerji kapasitelerinin sınırlı olması, operasyon sürelerini doğrudan etkileyerek bu araçların tarımsal uygulamalarda sürdürülebilir bir şekilde kullanımını zorlaştırmaktadır (Huang vd., 2023; Ali vd., 2023; Mohsan vd., 2022; Czachórski vd., 2022). Drone'ların enerji tüketimi; hız, uçuş yüksekliği, taşıdığı yük miktarı ve çevresel faktörler gibi birçok değişkene bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Bu faktörlerden özellikle hız ve yükseklik, enerji tüketimini şekillendiren en önemli parametreler arasında yer almaktadır (Wu vd., 2024; Diller vd., 2023; Wu vd., 2018; Zorbas vd., 2016). Örneğin, yüksek hızda çalışan bir drone, daha fazla itki üretmek için motorlarını zorlar ve bu da enerji tüketiminde belirgin bir artışa neden olurken, yüksek yüksekliklerde gerçekleştirilen uçuşlar ise hava yoğunluğunun azalması ve stabilite sağlama çabası nedeniyle enerji tüketimini artırabilmektedir (Beigi vd., 2023; Thibbotuwawa vd., 2019). Dolayısıyla, bu parametrelerin etkisini anlamak ve enerji tüketimini optimize etmek, tarımsal drone uygulamalarının operasyonel maliyetlerini düşürmek ve sürdürülebilirliğini artırmak için kritik bir öneme sahiptir.

Tarımsal drone uygulamalarında enerji tüketimi sorununu ele almak amacıyla bu çalışmada "Hız ve yüksekliğin enerji tüketimine olan etkisi nedir?" sorusuna odaklanılmıştır. Burada hız, İHA'nın roll/pitch düzleminde doğrusal olarak belirli bir yön doğrultusunda ilerleme hızı olarak tanımlanmıştır. Açısal hız (örneğin yaw eksenini etrafında dönüş) bu çalışmanın kapsamı dışında tutulmuştur. Bu çalışmada kullanılan "yükseklik" kavramı ise, İHA'nın yerden olan mesafesini ifade etmektedir. "İrtifa" ifadesi havacılıkta deniz seviyesine göre yükseklik anlamında kullanılsa da bu çalışmanın kapsamı içerisinde yalnızca yer düzlemi referans alınmıştır. Yukarıda verilen araştırma sorusunun yanıtlanması, drone operasyonlarında enerji verimliliğini artıracak stratejilerin geliştirilmesi ve uygulamada karşılaşılan operasyonel sınırlamaların aşılmasını sağlayacaktır. Bu çalışma kapsamında, drone'ların enerji tüketiminde hız ve yüksekliğin oynadığı rol, sistematik bir yaklaşımla ele alınmıştır. Özellikle farklı hız ve yükseklik kombinasyonlarının enerji tüketimine olan etkilerini analiz etmek amacıyla deneysel veriler toplanmış ve bu veriler ışığında enerji yönetimine dair pratik öneriler geliştirilmiştir.

Bu çalışmanın temel hedefi, enerji tüketimini optimize eden hız ve yükseklik kombinasyonlarını belirleyerek, tarımsal drone uygulamalarında enerji verimliliğini artırmaktır. Mevcut literatür incelendiğinde, tarımsal drone teknolojisinin farklı boyutlarına odaklanan birçok çalışma bulunmasına rağmen, hız ve yükseklik değişkenlerinin enerji tüketimi üzerindeki etkilerini ayrıntılı bir şekilde inceleyen çalışmaların sınırlı olduğu görülmektedir. Literatürde hız ve yükseklik kombinasyonlarının enerji tüketimi üzerindeki etkileri genellikle teorik modeller üzerinden değerlendirilmiş, ancak gerçek zamanlı operasyonel senaryolar ise yeterince incelenmemiştir. Bu durum, mevcut çalışmanın literatürdeki eksiklikleri doldurmayı ve yeni katkılar sağlamayı hedeflediğini açıkça göstermektedir.

Araştırmanın kapsamı yalnızca hız ve yüksekliğin enerji tüketimine olan etkilerini analiz etmekle sınırlı kalmayıp, aynı zamanda drone operasyonlarının sürdürülebilirliğini artırmaya yönelik öneriler geliştirmeyi de içermektedir (Almutairi vd., 2024; Askarzadeh vd., 2024; Mourgelas vd., 2023). Örneğin, düşük hız (2 m/s) ve orta yükseklik (10 m) seviyelerinin uzun süreli operasyonlarda enerji tasarrufu sağladığı, yüksek hız (8m/s) ve yükseklik (15m) kombinasyonlarının ise yalnızca zamana duyarlı uygulamalar veya engellerden kaçınmanın kritik olduğu durumlarda tercih edilmesi gerektiği belirlenmiştir.

Sonuç olarak, tarımsal drone kullanımı, modern tarımda önemli bir yere sahiptir (Singh vd., 2024). Enerji tüketimi, bu teknolojinin etkinliğini belirleyen temel faktörlerden biridir. Hız ve yükseklik gibi operasyonel parametrelerin enerji tüketimi üzerindeki etkilerinin sistematik bir şekilde analiz edilmesi (Beigi vd., 2023; Thibbotuwawa vd., 2019), drone teknolojisinin enerji verimliliği açısından optimize edilmesine önemli katkılar sağlayacaktır (Zhang vd., 2021). Bu çalışma, yalnızca literatürdeki önemli bir boşluğu doldurmakla kalmayıp, aynı zamanda tarımsal drone

operasyonlarında sürdürülebilirlik ve maliyet etkinliği için uygulanabilir stratejiler geliştirilmesine de rehberlik edecektir.

MATERYAL VE METOT

Bu bölümde öncelikle çalışmanın temel aldığı problem ele alınmış, drone tabanlı tarımsal operasyonlarda hız ve yüksekliğin enerji tüketimine etkisi incelenmiştir. Çalışmada kullanılan drone'a ait detaylı teknik özellikler sunulmuş, bu drone ile gerçekleştirilen deneyler ve veri toplama yöntemleri açıklanmıştır. Enerji tüketiminin hesaplanması için kullanılan yöntemler ve bu süreçte dikkate alınan çevresel değişkenler tanıtılmıştır. Ayrıca, elde edilen veriler üzerinden hız ve yükseklik kombinasyonlarının enerji tüketimi üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir.

Araştırma Alanı ve Çalışma Koşulları

Bu çalışmada, drone tabanlı tarımsal operasyonlarda hız ve uçuş yüksekliğinin enerji tüketimi üzerindeki etkisini incelemek amacıyla, belirli bir tarımsal alan seçilmiştir. Araştırma, Türkiye'nin Malatya Şehri, Hekimhan ilçesi Yayladamı Mahallesi bölgesinde yer alan 1 hektarlık(100x100 m) tarım alanında yürütülmüştür. Çalışmalar, rüzgâr hızının < 2 m/s ve hava sıcaklığının 21-24°C aralığında gerçekleştirilen kontrollü çevresel koşullarda yürütülmüştür. Çalışmada kullanılan dört pervaneli drone, Şekil 1'de sunulmuştur.



Şekil 1. Çalışmada Kullanılan Özel Tasarlanmış 4 Rotorlu Drone

Kullanılan Malzemeler

Araştırmada, 4 dört pervaneli drone ve GPS tabanlı otonom uçuş özelliğine sahip bir İnsansız Hava Aracı (İHA) kullanılmış olup, bu araç hassas tarım uygulamaları için akım ve gerilim değerlerini okuyabileceğimiz bir güç dağıtım kartı ile donatılmıştır. Ayrıca, uçuş sırasında enerji tüketimine ilişkin veriler İHA üzerinde depolanmıştır. Bu depolanan verilerin uçuş rotası, yakıt tüketimi ve çevresel etkileri analiz etmek amacıyla Python tabanlı özel bir analiz yazılımı geliştirilmiştir. 4 pervaneli drone'a ait ayrıntılı teknik özellikler Tablo 1'de sunulmuştur.

Deneyel Tasarım

Deney, tarımsal ilaçlama sırasında kullanılan standart operasyonel senaryoları simüle etmek amacıyla tasarlanmış ve 1 hektarlık düz bir arazi üzerinde gerçekleştirilmiştir. Uçuş senaryoları, hız (2, 5, 8 m/s) ve yükseklik (5, 10, 15 m) kombinasyonları kullanılarak oluşturulmuş ve bu kombinasyonlarla toplamda 9 farklı senaryo test edilmiştir (Tablo 2). Her bir senaryo için 5 tekrarla toplamda 45 uçuş yapılmıştır. Tüm uçuşlar, sabah 09:00 ile 12:00 saatleri arasında, gölgede ölçülen hava sıcaklığının 21-24°C arasında olduğu, rüzgâr hızının < 2 m/s olduğu günlerde gerçekleştirilmiştir. Rüzgâr hızı, yer seviyesine yakın (1.5 m) portatif anemometre ile, sıcaklık ise dijital termometre ile ölçülmüştür. Nem ve güneş ışığı ölçümleri doğrudan yapılmamış, ancak tüm testler açık hava koşullarında, doğrudan güneş ışığı altında yürütülmüş ve Meteoroloji Genel Müdürlüğü'nden alınan güncel hava durumu verileri ile desteklenmiştir. Testlerin aynı saat diliminde yapılmasına özen gösterilerek güneş konumu ve ısı değişimi gibi çevresel faktörlerin etkisi minimize edilmiştir. Her uçuşta bataryalar tamamen şarj edilmiş, taşıma yükü sabit tutulmuştur (5 litre su). Drone GPS destekli otomatik modda uçurulmuş, uçuş rotası 100 x 100 metrelik alan üzerinde grid düzeninde planlanmış ve 5 metre sıra aralığıyla gerçekleştirilmiştir. Enerji tüketimi (Wh) verileri dijital olarak kaydedilmiş, sensör kalibrasyonu ile veri doğruluğu artırılmıştır. Bu kapsamda, düşük hızda (2 m/s) ve orta

yükseklikte (10 m) enerji verimliliğinin yüksek olduğu; yüksek hızlarda (8 m/s) ise enerji tüketiminin arttığı belirlenmiştir.

Tablo 1. Mevcut Çalışmada Kullanılan İHA'nın Özellikleri

Dron Parçaları	Öğeler	Özellikler
Drone Çerçevesi	Çerçeve Tip	Karbon Fiber Quadcopter
PX4 Kontrolcü	Ana Çip CPU RAM Bağlanılabilirlik Sensörler	STM32F765 216 MHz ARM® Cortex® M4 512 KB SRAM 1× I2C, 2× CAN, 1× ADC, 4× UART İvmeölçer, 3 eksenli jiroskop, barometre, manyetometre
	Ağırlık	33.3g
Drone Motoru	Tip Ağırlık Hız Maksimum Çekme Operating Pulse Width Maksimum Giriş Voltajı Motor KV Değeri Maksimum Giriş Akımı Verimlilik	Fırçasız doğru akım motoru 1040g 5000 rpm 26.5kg/mil 1050-1950 us 60.9 V 100 KV 120 A % 5-12
Pervane	Büyükölç Malzeme Ağırlık Adet	34x11 inch Karbon Fiber 98.5 gr 2 x CW + 2 x CCW
RC Kontrolcü	Marka Kanal Sayısı RF Modülasyon sistemi Mesafe	FS-FTr10 18 2.4 G AFHDS3 >3KM
Battery	Minimum kapasite Yapılandırma Boşaltma oranı Ağırlık	22000 mAh 12S / 44.4 V 25C 6300g
GPS	Osilatör Teknoloji Bellek Navigasyon güncelleme oranı	Kristal GPS, GLONASS ROM 10 Hz'e kadar
Drone ilaçlama sistemi	Tank ağırlığı Fırçasız su pompası açılış akışı Su giriş çapı Su çıkış çapı Koruma seviyesi	16litre 8litre/dakika 10.5mm 6.5mm IP67
Güç Dağıtım Kartı	Marka	Holybro PM07

Tablo 2. Hız ve Yükseklik Kombinasyonları

Senaryo	Hız (m/s)	Yükseklik (m)
1	2	5
2	2	10
3	2	15
4	5	5
5	5	10
6	5	15
7	8	5
8	8	10
9	8	15

Veri Toplama

Uçuş sırasında, sabit 5 litre sıvı yük taşıyan drone'un enerji tüketimi, Holybro PM07 sensörü ile 1 saniye aralıklarla kaydedilen akım (A), gerilim (V), güç (W) ve toplam enerji tüketimi (Wh) değerleri üzerinden hesaplanmıştır. Veri toplama süreci, uçuş öncesi hazırlıklar, uçuş sırasında veri kaydı ve uçuş sonrası analiz olmak üzere bir dizi adımdan oluşmuştur. Hazırlık aşamasında drone bataryaları tam şarj edilerek eşit başlangıç koşulları sağlanmış, ilaç tankına sabit 5 litre sıvı yüklenmiş ve sensörlerin doğruluğu sabit yüklerle kalibre edilmiştir. Uçuş sırasında, drone önceden belirlenmiş bir grid rotasını sabit hız ve yükseklik parametreleriyle takip etmiş, akım ve gerilim verileri her saniyede bir ölçülerek toplamda 600 veri noktası toplanmıştır. Uçuş sonrası süreçte, veriler CSV formatında kaydedilip USB ile bilgisayara aktarılmış, bataryanın kalan enerji kapasitesi doğrulama amacıyla kontrol edilmiş ve ham veriler hatalı ölçümleri temizlemek için gözden geçirilmiştir. Her hız ve yükseklik kombinasyonu için beşer tekrar yapılmış, uçuşlar çevresel değişkenlerin etkisini azaltmak adına rüzgârsız günlerde gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, sistemin havada sabit durma (hover) konumundaki enerji tüketimi de gözlemlenmiştir. Yapılan ön testlerde, drone'un sabit 5 litre sıvı yük taşıdığı durumda yaklaşık %35 throttle pozisyonunda hover konumunda kalabildiği belirlenmiştir (Tablo 3). Bu esnada ortalama güç tüketimi yaklaşık 75 W olarak ölçülmüştür. Bu referans değer, hız ve yükseklik kombinasyonlarına göre yapılan uçuş senaryolarıyla karşılaştırıldığında, hareket sırasında tüketilen güç seviyelerindeki artışları değerlendirmek için temel bir kıyaslama noktası sunmuştur.

Tablo 3. Gaz Kolu Yüzdesi ve Buna Bağlı Tüketilen Enerji Miktarları

Gaz Kolu (%)	Güç (W)
20%	40 W
35%	75 W
50%	110 W
65%	140 W
80%	180 W
100%	220 W

Çalışma kapsamında elde edilen 600 veri noktasındaki çevresel koşulların tutarlılığı, uçuş öncesinde her test gününde yapılan rüzgâr ölçümleriyle kontrol edilmiştir. Rüzgâr hızı, test alanının merkez noktasında portatif bir anemometre ile ölçülmüş ve tüm test günlerinde <2 m/s olduğu doğrulanmıştır. Ancak, rüzgâr ölçümleri yalnızca yer seviyesinde gerçekleştirilmiştir. 5-15 metre arası yüksekliklerdeki olası değişimler doğrudan ölçülmemiştir. Bu durum, özellikle üst seviyelerde oluşabilecek ani rüzgâr değişimlerinin enerji tüketimi üzerindeki etkisinin göz ardı edilmesine neden olabilecektir. Bu durum potansiyel bir belirsizlik oluşturmaktadır. Gelecekte gerçekleştirilecek çalışmalarda çok noktalı ve çok seviyeli ölçüm sistemlerinin kullanılması önerilmekte olup, bu sayede farklı yüksekliklerdeki rüzgâr profillerinin detaylı şekilde analiz edilmesi ve enerji tüketimine olan etkilerinin daha doğru şekilde modellenmesi hedeflenmektedir.

Enerji Tüketimini Hesaplama

Drone'un enerji tüketimi, uçuş sırasında bataryasından geçen elektrik akımı (I) ve bataryanın uçlarındaki anlık gerilim (V) ölçülerek hesaplanmıştır. Elektrik akımı, sensörler aracılığıyla sürekli olarak ölçülen ve drone motorları ile diğer elektronik aksam tarafından çekilen enerji miktarını ifade ederken, bataryanın uçlarındaki gerilim, potansiyel farkı (V) belirlemektedir. Drone'un bir uçuş sırasında kaydettiği toplam örnek sayısı (n) olarak verilmiştir. Ayrıca, bu ölçümlerin alındığı süre ($\Delta t = 1$ olarak alınmıştır.), enerji tüketimi hesaplamalarında kullanılan bir diğer önemli değişken olup saniye cinsinden ifade edilmiştir. Bu parametrelerin birlikte değerlendirilmesiyle, drone'un uçuş süresince tükettiği toplam enerji miktarı doğru ve güvenilir bir şekilde hesaplanmıştır. Temel enerji tüketim denklemi aşağıda Eşitlik 1 olarak verilmiştir.

$$Enerji (Wh) = \sum V_k \cdot I_k \cdot \Delta t \quad (1)$$

I_k : k. saniyedeki akım değeri, V_k : k. saniyedeki gerilim değeri, Δt : Örnekleme süresi (1 saniye) olarak verilmiştir. Eşitlik 1, bir cihazın belirli bir süre boyunca tükettiği toplam gücün (Watt) hesaplanmasında kullanılmıştır. Uçuş sırasında her saniyede bir ölçüm kaydedilmiştir. Bu ölçümlerden elde edilen veriler kullanılarak anlık güç (P) hesaplanmıştır. Bu hesaplanan denklem Eşitlik 2'de verilmiştir.

$$P_k = V_k \cdot I_k \quad (2)$$

P_k : Anlık güç (Watt cinsinden), I_k : Ölçülen anlık akım değeri (Amper), V_k : Ölçülen anlık gerilim değeri (Volt) olarak verilmiştir. Enerji tüketimi, uçuş süresi boyunca sürekli olarak ölçülen güç değerlerinin toplamı alınarak hesaplanmıştır. Denklem Eşitlik 3 olarak sunulmuştur.

$$\text{Toplam Enerji (Wh)} = \sum_{k=1}^n \frac{P_k \cdot \Delta t}{3600} \quad (3)$$

n : Uçuş boyunca kaydedilen veri noktalarının sayısı, Δt : Ölçüm aralığı (saniye cinsinden) bu deneyde 1 saniye olarak belirlenmiştir, 3600 : Watt-saat birimine dönüştürme için saniyenin saate oranı olarak verilmiştir. Bir uçuş sırasında kaydedilen örnek veri tablosu Tablo 4’de verilmiştir.

Tablo 4. Veri Örneği Tablosu			
Zaman (s)	Akım (A)	Gerilim (V)	Güç (W)
1	5.29	14.88	78.73
2	7.91	14.78	116.91
3	7.87	14.95	117.66
...	...	...	...

Bu verilerden, toplam enerji tüketimi örneği Eşitlik 4’te sunulmuştur:

$$\text{Toplam Enerji (Wh)} = \frac{(78.73+116.91+117.66+...)}{3600} \quad (4)$$

Analiz ve Değerlendirme

Bu çalışma, hız ve yükseklik kombinasyonlarının enerji tüketimi üzerindeki etkilerini analiz etmeye odaklanmıştır. Veri seti, belirli hız ve yükseklik senaryolarına göre filtrelenmiş ve her bir senaryo için enerji tüketimi ortalama değerlerle değerlendirilmiştir. Enerji tüketimi, anlık güç tüketimi değerlerinin toplamının veri noktası sayısına bölünmesiyle hesaplanmıştır. Analiz sürecinde, hız ve yüksekliğin enerji tüketimiyle ilişkisini anlamak için Pearson korelasyon katsayıları hesaplanmış ve dağılımlar grafiksel yöntemlerle (ör. violin plot, box plot) incelenmiştir. Gerçekleştirilen uçuşlarda, hız değişkenine bağlı olarak drone’un kat ettiği toplam mesafe değişkenlik göstermiştir. Bu nedenle enerji tüketimi analizleri, sabit mesafe yerine sabit senaryo üzerinden (sabit uçuş rotası) değerlendirilmiştir.

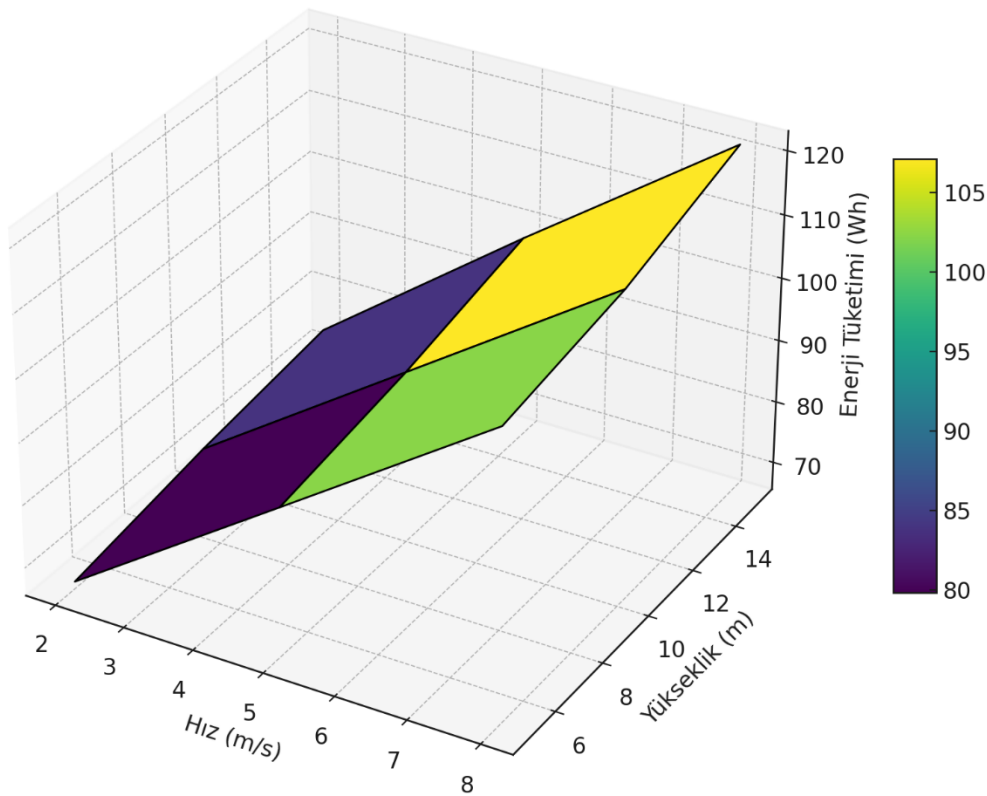
BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu çalışmada, farklı hız ve yükseklik kombinasyonlarının enerji tüketimine olan etkileri, kapsamlı istatistiksel analizler ve görsel incelemelerle detaylı bir şekilde değerlendirilmiştir. Aşağıda verilen Tablo 5, bu senaryoların enerji tüketimindeki değişikliklerini özetlemektedir.

Tablo 5. Dokuz Farklı Senaryo için Hesaplanan Ortalama Güç Değerleri

Senaryo	Hız(m/s)	Yükseklik (m)	Ortalama Güç (W)
1	2	5	66,67
2	2	10	70,61
3	2	15	73,68
4	5	5	89,08
5	5	10	92,99
6	5	15	98,24
7	8	5	111,58
8	8	10	115,39
9	8	15	121,9

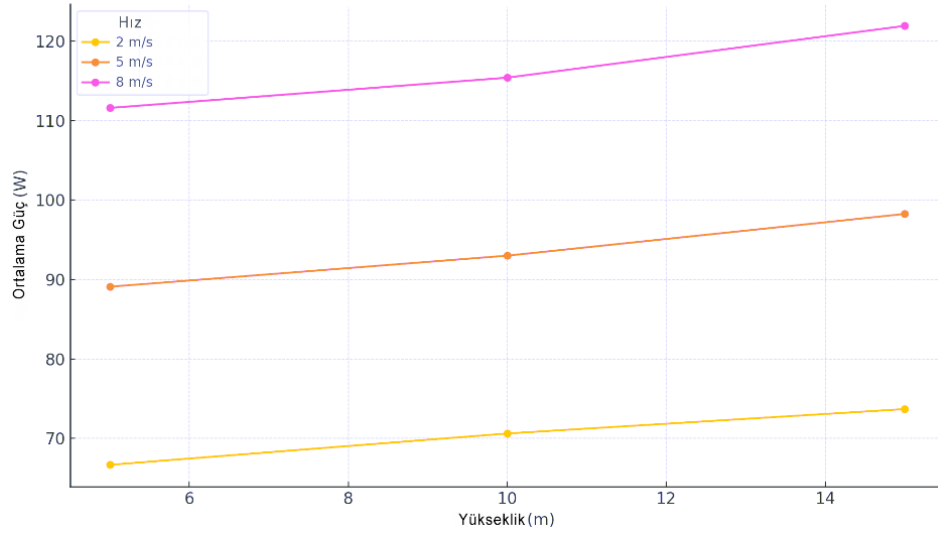
Yapılan analizler, hız ve yüksekliğin enerji tüketimi üzerinde doğrudan etkili iki temel faktör olduğunu göstermektedir. Şekil 2'de hız ve yüksekliklere göre ortalama güç tüketimi değerleri sunulmuştur. Hızın etkisi incelendiğinde, düşük hızlarda (2 m/s) enerji tüketimi ortalama 66.67 W iken, hız 8 m/s'ye yükseldiğinde bu değer 121.90 W'a ulaştığı görülmektedir. Bu, motorların daha yüksek hızlarda (8 m/s) daha fazla enerji tükettiğini ve hız arttıkça motorların daha fazla güç üretme gereksinimi nedeniyle enerji tüketiminin belirgin şekilde arttığını doğrulamaktadır (Dükkancı ve ark.; 2021; Wu vd., 2024). Yüksekliğin etkisi ise, enerji tüketiminin yükseklikle paralel bir şekilde arttığını ortaya koymaktadır (Wu vd., 2018; Zorbas vd., 2016). Örneğin, hız 2 m/s iken yükseklik 5 m'den 15 m'ye çıkarıldığında enerji tüketiminde yaklaşık %10'luk bir artış gözlemlenmiştir. Bu artış, drone'un daha yüksek yüksekliklerde stabil kalmak ve yerçekimine karşı koymak için ek enerji harcaması gerekliliğine dayandırılmaktadır (Czachórski vd., 2022; Qu vd., 2022).



Şekil 2. Hız ve Yüksekliklere Göre Ortalama Güç Tüketimi

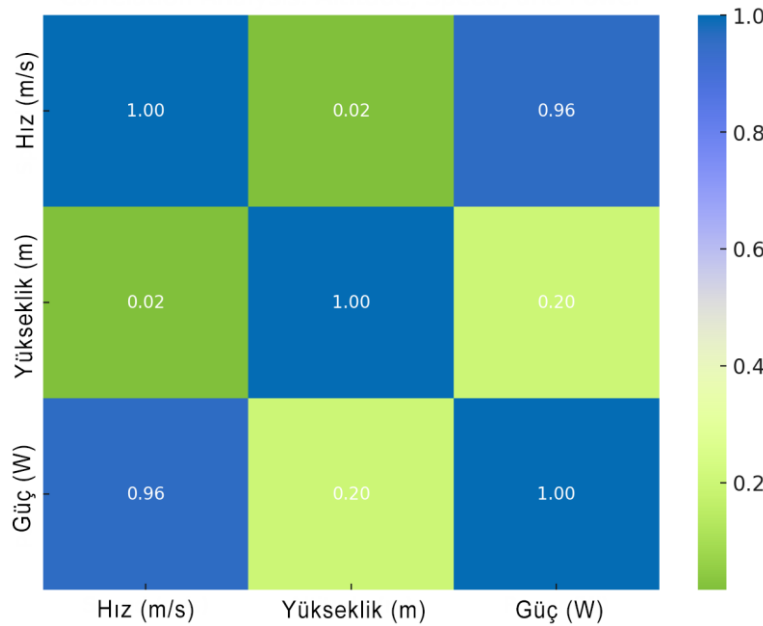
Şekil 3'te sunulan grafik, hızın enerji tüketimi üzerindeki etkisinin, yüksekliğe göre daha belirgin olduğunu açıkça göstermektedir (Gong vd., 2023; Liu vd., 2017). Hız arttıkça enerji tüketimindeki artış daha keskin bir şekilde ortaya çıkarken, yüksekliğin etkisi hızın gölgesinde kalmaktadır (Goh vd., 2023; Jacewicz ve ark.; 2022). Bu durum, hız ve yüksekliğin enerji tüketimi üzerindeki bireysel ve ortak etkilerini anlamak açısından önemli bir bulgu sunmaktadır.

Sonuç olarak, hem hız hem de yükseklik, enerji tüketimi üzerinde kayda değer bir etki yaratmakla kalmayıp, birlikte değerlendirildiklerinde bu etkiler daha da belirginleşmektedir. Enerji verimliliğini artırmak ve drone performansını optimize etmek için hız-yükseklik kombinasyonlarının dikkatle değerlendirilmesi kritik bir öneme sahiptir. ANOVA testi sonuçları da bu bulguları desteklemekte; $F(2, 18) = 5.47$, $p = 0.02$ değerleri, hız ve yüksekliğin enerji tüketimi üzerinde anlamlı bir etkisi olduğunu ortaya koymaktadır ($p < 0.05$). Şekil 3'te görüldüğü üzere, yüksek hız (8 m/s) ve düşük yükseklik (5m) kombinasyonları, enerji tüketiminde önemli bir artışa neden olmaktadır. Bu veriler, tarımsal drone uygulamalarında enerji verimliliği hedefiyle hız ve yükseklik parametrelerinin optimize edilmesinin önemini vurgulamaktadır.



Şekil 3. Yüksekliğe Göre Ortalama Güç Tüketimi

Korelasyon analizinin bulguları ise, hız ve enerji tüketimi ile yükseklik ve enerji tüketimi arasındaki ilişkileri açıkça ortaya koymaktadır (Muli vd., 2022). Şekil 4'te verilen grafikte, hız ile enerji tüketimi arasında güçlü bir pozitif korelasyon olduğunu göstermiştir ($r = 0.96$), bu da hız arttıkça enerji tüketiminin neredeyse doğrusal bir şekilde arttığını ifade etmektedir. Buna karşılık, yükseklik ile enerji tüketimi arasında orta düzeyde bir pozitif korelasyon ($r = 0.20$) bulunmuş, bu da yükseklik değişimlerinin enerji tüketimi üzerinde hıza kıyasla daha az belirgin ancak yine de anlamlı bir etkiye sahip olduğunu ortaya koymaktadır. Bu sonuçlar, hızın enerji tüketimi üzerindeki baskın etkisini vurgularken, yüksekliğin de dikkate alınması gereken bir faktör olduğunu göstermektedir.

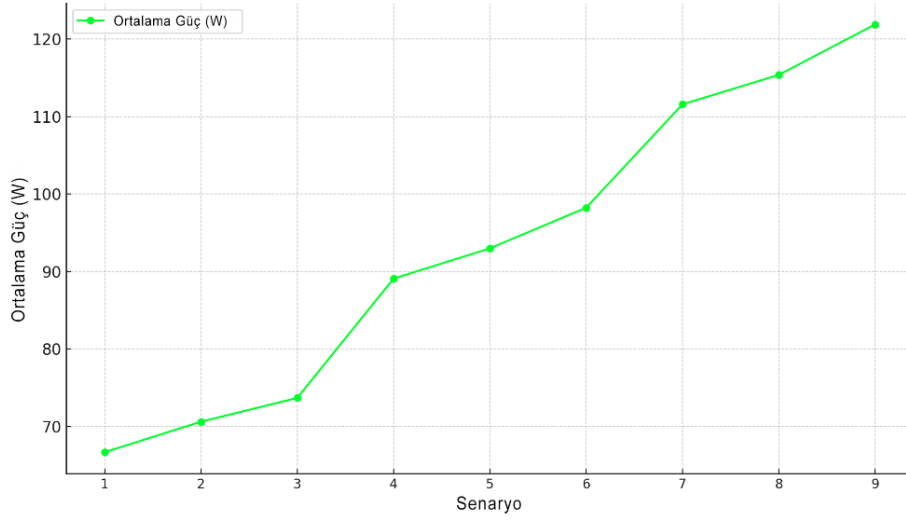


Şekil 4. Yükseklik, Hız ve Güç Parametrelerinin Korelasyon Analizi

Şekil 5'te yer alan veriler, enerji tüketiminin zamanla nasıl değiştiğini detaylı bir şekilde ortaya koymaktadır.

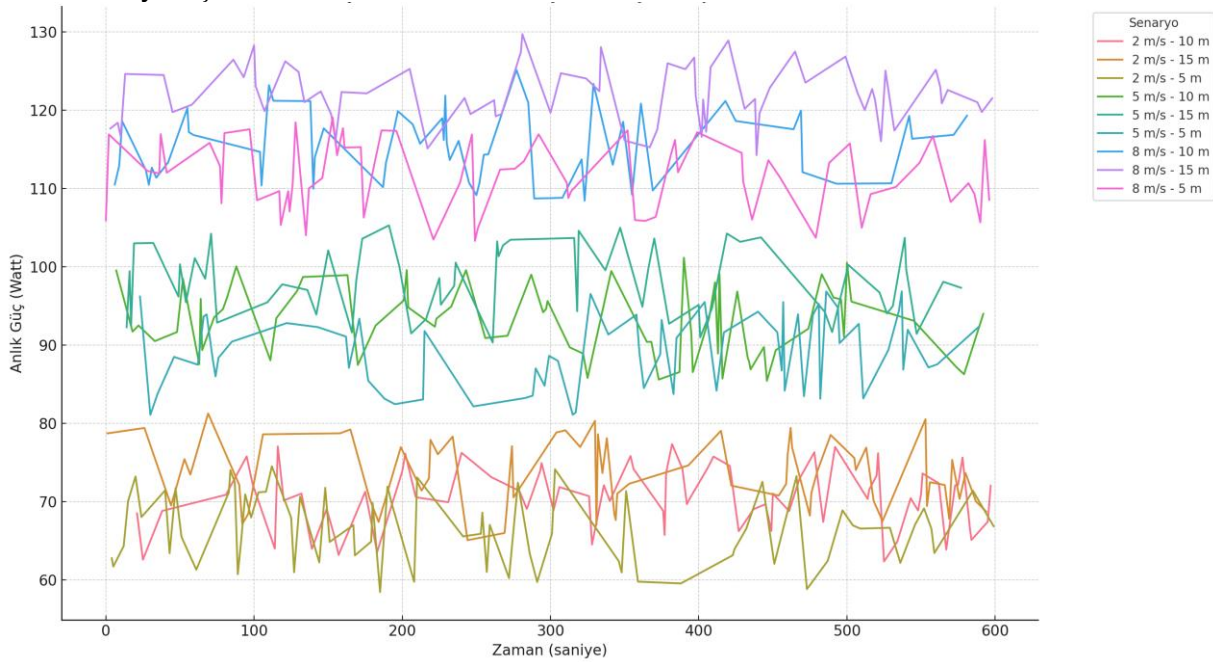
Özellikle yüksek hız (8 m/s) ve yükseklik (15 m) kombinasyonlarında enerji tüketiminde gözlemlenen dalgalanmalar, bu seviyelerde motorların dinamik yük altındaki davranışlarının daha değişken olduğunu göstermektedir (Çabuk vd., 2021). Bu dalgalanmaların motorların yüksek hızda (8 m/s) ve yüksek yükseklik (15 m) farklarında çalışırken maruz kaldığı artan stres ve hızlanma-değişim süreçlerinden kaynaklanabileceği düşünülmektedir. Buna karşın, orta hız (5 m/s) ve yükseklik seviyelerine geçildiğinde enerji tüketiminde gözle görülür bir kararlılık sağlanmış, dalgalanmaların azaldığı ve enerji tüketiminin daha düzenli bir yapıya büründüğü tespit edilmiştir. Bu bulgu, motorların orta hız (5 m/s) ve yükseklikte daha stabil bir şekilde çalıştığını ve bu seviyelerde daha verimli bir performans sergilediğini

işaret etmektedir. Zaman içerisinde gözlemlenen bu iki farklı durum, enerji tüketim dinamiklerinin hız ve yükseklik kombinasyonlarından doğrudan etkilendiğini, dolayısıyla bu parametrelerin sistemin genel enerji verimliliği üzerinde kritik bir rol oynadığını göstermektedir.



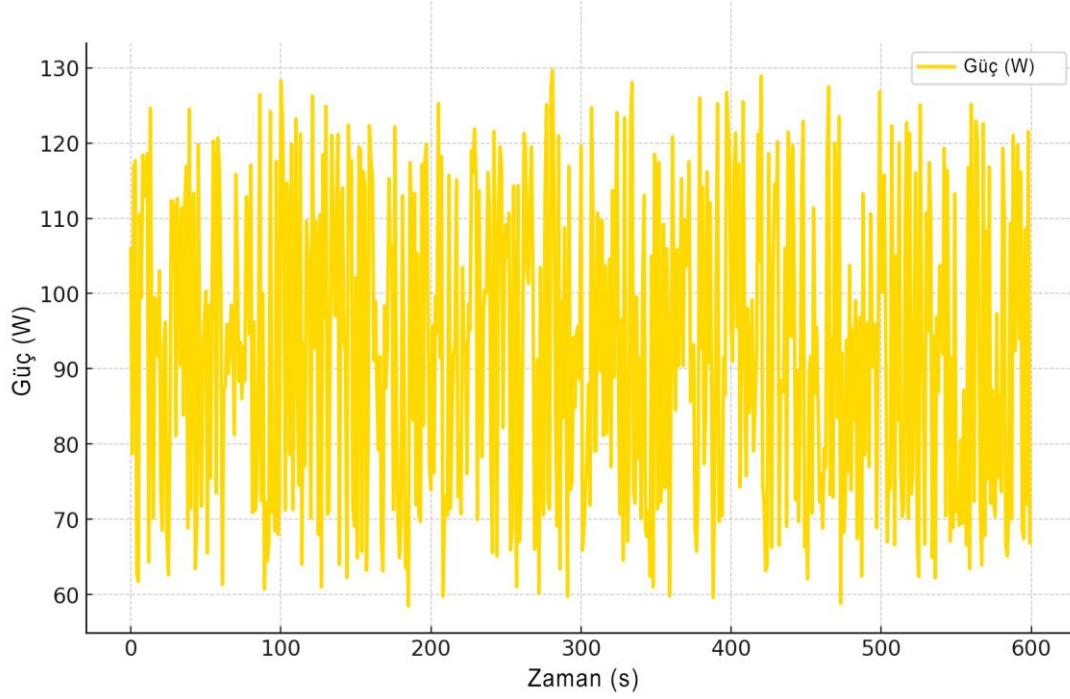
Şekil 5. Senaryolara Göre Güç Tüketimi

Enerji tüketiminin akım değerleri üzerinden dağılımı Şekil 6'da sunulmuştur. Özellikle yüksek hız ve yükseklik kombinasyonlarında, motorların ihtiyaç duyduğu anlık akım miktarının önemli ölçüde değişkenlik gösterdiği gözlemlenmiştir. Bu durum, motorların yüksek hızlarda daha fazla zorlandığını ve akım dalgalanmalarının arttığını göstermektedir. Motorların performansını artırma çabası, bu ekstra enerji ihtiyacını doğurmakta ve bu da akım dalgalanmalarına yol açmaktadır.



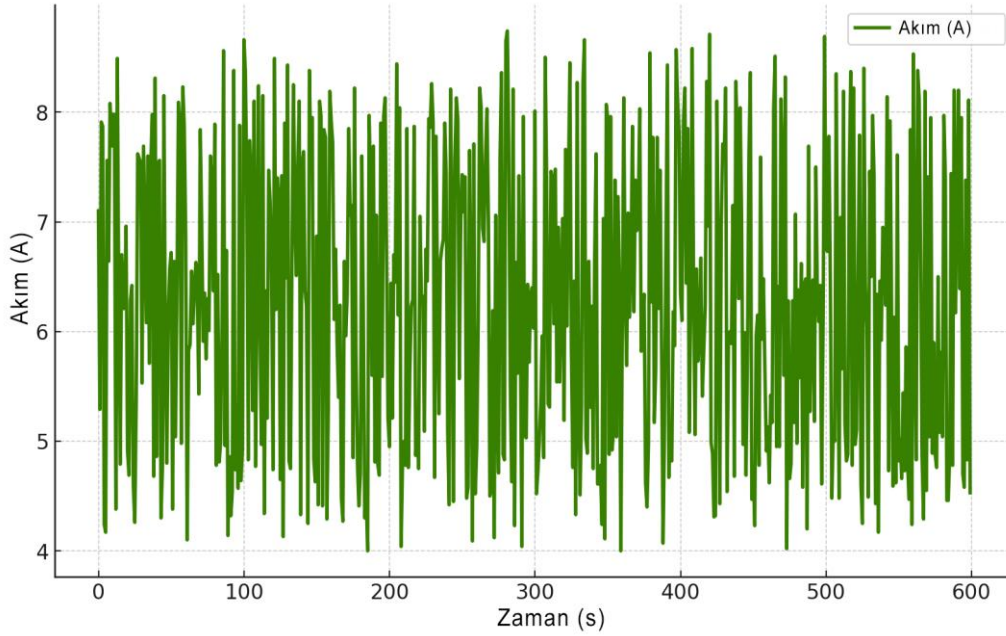
Şekil 6. Senaryolara Göre Enerji Dağılımı

Buna karşılık, Şekil 7'deki veriler, sistemin gerilim değerlerinde görece bir stabilite olduğunu ancak tamamen sabit bir yapıda olmadığını göstermektedir. Gerilim değerleri hafif miktarlarda değişmekte olup bu durum, bataryanın motorların değişen enerji taleplerine uyum sağlarken hafif dalgalanmalar yaşadığını ortaya koymaktadır. Bu dalgalanmalar, bataryanın enerji taleplerine genel olarak istikrarlı bir şekilde yanıt verdiğini, ancak yük ve hız kombinasyonlarına bağlı olarak anlık gerilim değişimleri olabileceğini göstermektedir. Bu bulgular, sistemin enerji tüketimi ve yönetimi üzerinde hem akım hem de gerilim değişimlerinin önemli olduğunu ve bataryanın performans ve enerji verimliliğinde kritik bir rol oynadığını ortaya koymaktadır.



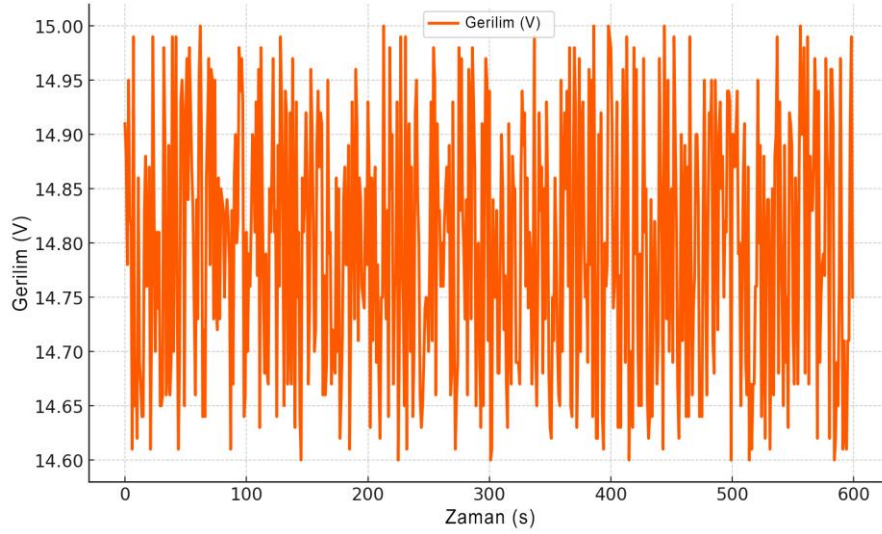
Şekil 7. Drone Güç Tüketimi Değerlerinin Zamanla Değişimi

Şekil 8 ve Şekil 9 grafiğinde ise, uçuş süresince güç ve akım değerlerinin zaman içinde nasıl değiştiğini göstermektedir. Özellikle yüksek hız ve yükseklik durumlarında, motorların hızlanma ve yavaşlama esnasında daha büyük akım tepkileri verdiği tespit edilmiştir. Bu durum enerji yönetiminde dalgalanma riskinin arttığını işaret etmektedir. Bu durum, motorların bu koşullarda hem hızlanma süreçlerini gerçekleştirmek hem de artan yükseklik farkına karşı koyabilmek için daha fazla enerji harcaması gerektiği gerçeğini doğrulamaktadır.



Şekil 8. Drone Akım Değerlerinin Zamanla Değişimi

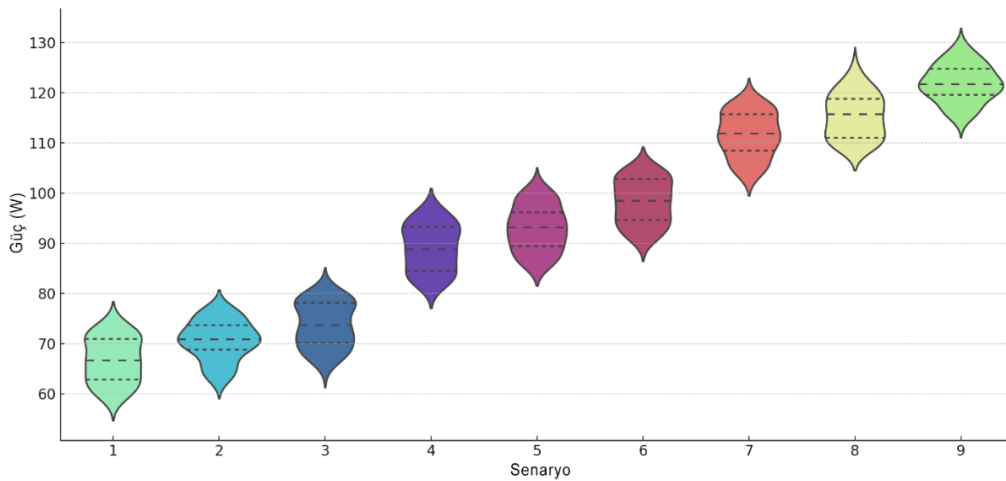
Yüksek hızlarda (8 m/s) motorlar, mekanik sürtünme, hava direnci ve ivmelenme gereksinimlerinin etkisiyle daha yüksek bir enerji talebinde bulunmaktadır. Bu talep, motorun performansını artırabilmek için daha fazla enerji çekmesini gerektirmekte ve bu da toplam enerji tüketimini önemli ölçüde artırmaktadır. Benzer şekilde, yükseklik seviyelerinde meydana gelen artış, motorların yerçekimine karşı koyarak daha fazla güç üretmesini gerektirmekte ve bu da enerji tüketiminde belirgin bir artışa yol açmaktadır.



Şekil 9. Drone Gerilim Değerlerinin Zamanla Değişimi

Şekil 8 ve Şekil 9’da gözlemlenen bu bulgular, motorların yüksek hız (8m/s) ve yükseklik (15 m) kombinasyonlarında enerji tüketim dinamiklerinin yoğun bir şekilde değiştiğini ve bu kombinasyonların sistemin genel enerji verimliliği üzerinde doğrudan etkili olduğunu göstermektedir. Bu veriler, sistem tasarımında enerji verimliliğini artırmak için hız ve yükseklik parametrelerinin dikkatle optimize edilmesi gerektiğini de vurgulamaktadır. Aynı zamanda, bu koşullar altında enerji tüketiminin maksimum seviyelere ulaşmasının batarya kapasitesi ve sistem dayanıklılığı açısından da kritik bir faktör olduğunu ifade etmektedir.

Şekil 9’da verilen grafik, enerji tüketiminin düşük ve yüksek yükseklik seviyelerine göre farklı dağılım özellikleri sergilediğini göstermektedir. Düşük yükseklik seviyelerinde enerji tüketimi daha sabit ve düzenli bir şekilde dağılmıştır. Bu durum, motorların düşük yüksekliklerde daha az zorlanması ve enerji ihtiyaçlarının minimal düzeyde kalmasıyla ilişkilendirilebilir. Motorların bu seviyelerdeki performansı, hem sistem tasarımındaki enerji verimliliğini artırmakta hem de enerji tüketiminin daha öngörülebilir bir yapıya sahip olmasını sağlamaktadır. Bu sabit enerji dağılımı, operasyonel kararlılık ve sistem dayanıklılığı açısından önemli bir avantaj sunmaktadır. Şekil 10’da verilen grafik ise, enerji tüketiminin farklı senaryolar altındaki dağılımını ve yoğunluğunu görselleştiren önemli bir araç olarak, her bir senaryodaki enerji tüketiminin dinamiklerini detaylı bir şekilde ortaya koymaktadır.

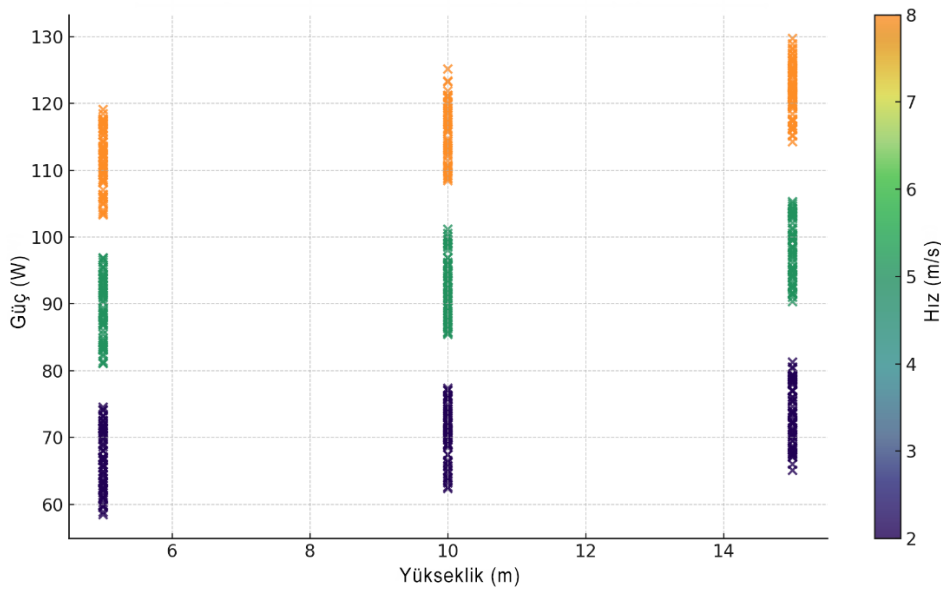


Şekil 10. Senaryolara Göre Enerji Tüketimindeki Dağılım ve Yoğunluk

Grafikte, her bir senaryoya ait enerji tüketimi verilerinin dağılımını temsil eden şekillerin genişliği, enerji tüketim değerlerinin yoğunluğunu ve çeşitliliğini göstermektedir. Siyah noktalı çizgiler, her senaryo için enerji tüketiminin ortalama değerini işaret ederek karşılaştırma için bir referans noktası sunmaktadır. Senaryo 1-3’te düşük hız (2 m/s) ve yükseklik seviyelerinde enerji tüketiminin oldukça homojen bir şekilde dağıldığı ve varyasyonların sınırlı olduğu görülmektedir. Bu durum, motorların bu seviyelerde daha kararlı çalıştığını ve enerji tüketiminin nispeten

öngörülebilir bir şekilde gerçekleştiğini göstermektedir. Bu koşullarda motorlar, düşük enerji taleplerine uyum sağlayarak verimli bir performans sergilemektedir. Senaryo 4-6'da orta hız (5 m/s) ve yükseklik (10 m) seviyelerine geçişle birlikte enerji tüketimindeki dağılımın genişlemeye başladığı fark edilmektedir. Ancak, genel ortalamaların hala dengeli olduğu ve büyük dalgalanmaların oluşmadığı gözlemlenmektedir. Bu, motorların artan enerji taleplerine karşılık verirken belirli bir kararlılık içinde çalıştığını ve sistemin orta düzey koşullarda enerji tüketimini verimli bir şekilde yönetebildiğini göstermektedir. Senaryo 7-9'da ise enerji tüketiminde belirgin bir varyasyon artışı ve dağılımın genişlemesi dikkat çekmektedir. Bu yüksek hız (8 m/s) ve yükseklik (15m) kombinasyonlarında, motorların daha fazla güç talep ettiği ve bu nedenle enerji tüketiminin daha değişken hale geldiği anlaşılmaktadır. Bu durum, motorların yoğun yük altındaki performansının daha düzensiz olduğunu ve enerji tüketiminin kontrol edilmesinin bu koşullarda daha zorlaştığını ortaya koymaktadır.

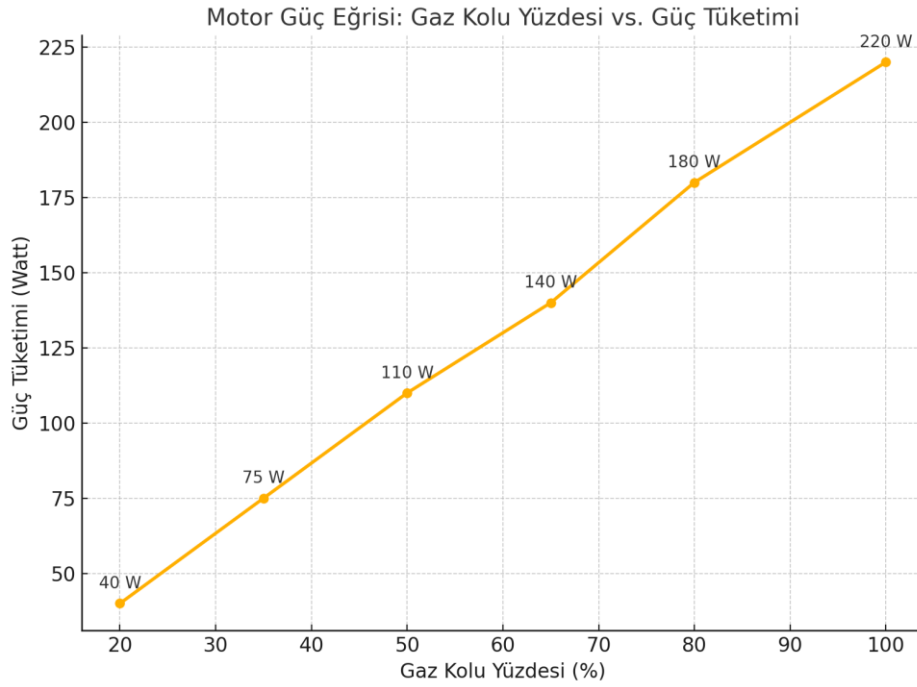
Şekil 11'deki grafik, Şekil 2'de sunulan bulguların geliştirilmiş bir versiyonudur. Şekil 11, enerji tüketiminin yükseklik ve hız ile nasıl bir ilişki içinde olduğunu detaylı bir şekilde görselleştirmektedir. Grafikte, enerji tüketimi (W), yükseklik (m) ve hız (m/s) arasındaki ilişkiyi ortaya koyarken, farklı hız seviyeleri renklerle kodlanarak bu değişkenlerin etkisi daha net bir şekilde ayrıştırılmıştır.



Şekil 11. Hız, Yükseklik ve Enerji Tüketimi Arasındaki İlişki

Düşük hızda (2 m/s) yapılan analiz, alt yüksekliklerde (5 m) enerji tüketiminin minimum seviyede olduğunu ve oldukça sabit bir dağılım sergilediğini göstermektedir. Bu, motorların düşük hız (2 m/s) ve yükseklik seviyelerinde daha az zorlanarak verimli bir şekilde çalıştığını işaret eder. Sistem, bu koşullarda enerji tüketimini kolayca kontrol edebilmektedir. Orta hızda (5 m/s), enerji tüketiminin yükseklikle birlikte artmaya başladığı gözlemlenmiştir. Ancak bu artış, dağılımın hala kontrol edilebilir bir aralıkta kalmasını sağlamış ve motorların bu hız ve yükseklik kombinasyonlarında hala dengeli bir performans gösterdiğini ortaya koymuştur. Yani, sistem bu koşullarda enerji yönetimini sürdürmekte zorlanmamaktadır. Yüksek hızda (8 m/s), enerji tüketimi özellikle yüksek yüksekliklerde (10-15 m) maksimum değerlere ulaşmıştır ve dağılımın genişlediği açıkça görülmektedir. Bu durum, motorların hızla artan enerji talebine uyum sağlamak için daha fazla güç harcaması gerektiğini ve bu nedenle enerji tüketiminin daha değişken hale geldiğini göstermektedir. Yüksek hız (8 m/s) ve yükseklik(15 m) kombinasyonlarında enerji yönetimi, sistem için en zorlu senaryoları oluşturmaktadır.

Bu durum, doğrudan fırçasız motorların gaz seviyesi (throttle) tepkisiyle ilişkilendirilebilir. Zira fırçasız motorlar genellikle düşük ve orta gaz seviyesi değerlerinde yaklaşık %35 ile %50 aralığında en verimli şekilde çalışmaktadır. Ancak gaz seviyesi %65'in üzerine çıktığında, motor daha fazla akım çekmeye başlamakta, dolayısıyla ısınmakta ve batarya daha hızlı tükenmektedir. Bu da özellikle yüksek hız ve yükseklikteki senaryolarda gözlemlenen artan enerji tüketimi ve performans dalgalanmalarının altında yatan temel nedenlerden biridir.



Şekil 12. Gaz Kolu Yüzdesine Göre Güç Tüketim Eğrisi

Şekil 12’de görülen motor güç eğrisi, düşük gaz seviyelerinde güç tüketiminin daha dengeli seyrettiğini, ancak %50’nin üzerindeki gaz konumlarında güç tüketiminin hızla arttığını göstermektedir. Bu durum, motorların düşük devirlerde daha verimli çalıştığını ve hover konumunda (%35 throttle) enerji tasarrufu sağladığını doğrulamaktadır.

Bu bulgular, hız ve yükseklik gibi operasyonel parametrelerin enerji tüketimi üzerindeki belirgin etkilerini detaylı bir şekilde ortaya koymuş, bu etkilerin dinamik bir şekilde optimize edilmesi gerektiğini göstermiştir. Özellikle tarımsal ve endüstriyel uygulamalarda, enerji tüketiminin azaltılmasına yönelik doğru hız ve yükseklik kombinasyonlarının seçimi, operasyonel maliyetlerin düşürülmesi ve sürdürülebilirlik hedeflerinin desteklenmesi açısından kritik öneme sahiptir.

SONUÇLAR

Bu çalışma, 5 litre yük taşıyan bir drone’nun hız ve uçuş yüksekliğinin enerji tüketimi üzerindeki etkilerini analiz ederek tarımsal ve endüstriyel drone uygulamalarında enerji yönetimi ve operasyonel verimliliği artırmaya yönelik önemli bulgular sunmaktadır. Yapılan değerlendirmeler, 9 farklı senaryo altında 600 veri noktası üzerinden gerçekleştirilmiş ve bu kapsamda hız ve yükseklik kombinasyonlarının enerji tüketimine olan etkileri ayrıntılı bir şekilde incelenmiştir. Çalışmanın sonuçları, drone operasyonlarında enerji tasarrufu ve verimliliği artırmak için pratik öneriler sağlamaktadır.

Elde edilen verilere göre, uçuş hızı ve yüksekliği arttıkça enerji tüketiminde düzenli bir artış gözlemlenmiştir. Örneğin, 2 m/s hız ve 5 metre yükseklik seviyesinde enerji tüketimi ortalama 66.67 W olarak kaydedilirken, bu değer 8 m/s hız ve 15 metre yükseklikte 121.90 W’a kadar yükselmiştir. Bu sonuçlar, daha yüksek hızların (8 m/s) motorlar üzerinde daha fazla yük oluşturarak enerji tüketimini artırdığına işaret etmekte ve teorik beklentilerle uyumlu bir şekilde, hız faktörünün yüksekliğe kıyasla enerji tüketimi üzerinde daha baskın bir etki yarattığını ortaya koymaktadır. Enerji tüketimini minimize etmek için, drone operasyonlarında kullanılacak hız ve yükseklik değerlerinin dikkatle optimize edilmesi gerektiği belirlenmiştir. Düşük hız (2 m/s) ve yükseklik (5 m) kombinasyonlarının, uzun süreli operasyonlarda enerji tasarrufu sağlamak için ideal olduğu; orta hız (5 m/s) ve yükseklik (10 m) seviyelerinin, geniş alanlarda hızlı ve verimli uygulamalar gerçekleştirmek için uygun bir denge sunduğu görülmüştür. Yüksek hız (8 m/s) ve yükseklik (15m) kombinasyonlarının ise sadece zamana duyarlı veya engellerden kaçınmanın kritik olduğu durumlarda tercih edilmesi gerektiği vurgulanmıştır.

Analizler, hızın enerji tüketimi üzerindeki etkisinin yüksekliğe göre daha belirgin olduğunu göstermektedir. 2 m/s hızdan 8 m/s hıza geçişte enerji tüketimindeki artış %70’i aşarken, yükseklik değişimlerinin enerji tüketimi üzerindeki etkisi daha sınırlı kalmıştır. 5 metreden 15 metreye yükseldiğinde enerji tüketiminin %10 ila %15 arasında

bir artış gösterdiği gözlemlenmiştir; bu artışın, hava yoğunluğunun azalması nedeniyle belirli bir noktaya kadar sabitlenebileceği ancak çevresel faktörlerin bu durumu etkileyebileceği belirtilmiştir. Çalışmada her senaryo, 100x100 metrelik sabit bir alan üzerinde gerçekleştirilmiştir. Bu sabit mesafe sayesinde hız değişiklikleri yalnızca uçuş süresini etkilemiş; yani hız arttıkça, aynı mesafe daha kısa sürede tamamlanmıştır. Bu nedenle, uçuş sırasında motorların çektiği ortalama güç değeri (Watt cinsinden) artsa da, toplam enerji tüketimi (Wh cinsinden) her zaman doğrusal şekilde artmamış olabilir. Çünkü kısa sürede yüksek güç tüketimi ile yapılan bir uçuş, uzun sürede düşük güçle yapılan uçuşla benzer veya daha düşük toplam enerjiye sahip olabilir. Bu çalışmada analizler, ortalama güç tüketimi üzerinden yapılmıştır. Ancak gelecekte yapılacak araştırmalarda, enerji verimliliğini daha doğru ölçebilmek adına, 'birim mesafe başına tüketilen enerji' (Wh/m) gibi yeni metriklerin kullanılması, farklı hız-yükseklik kombinasyonlarının enerji açısından karşılaştırılabilirliğini daha sağlıklı bir şekilde ortaya koyacaktır.

Yüksekliğin artışı, enerji tüketiminde belirgin bir yükselişe neden olmuş ve bu etki yapılan testlerde açıkça gözlemlenmiştir. Bu durum, artan yükseklikle birlikte hava yoğunluğunun azalması sonucu pervanelerin daha yüksek devirde çalışmak zorunda kalmasından kaynaklanmaktadır. Ayrıca, motorlar bu koşullarda yerçekimine karşı daha fazla güç üretmek zorunda kalmakta, bu da enerji tüketimini artırmaktadır. Öte yandan, test alanında rüzgâr hızının yer seviyesinde <2 m/s olarak ölçülmüş olmasına rağmen, 10 m ve 15 m yüksekliklerdeki olası rüzgâr farkları ölçülebilmiştir. Bu durum, elde edilen verilerdeki belirsizliğe katkıda bulunmuş olabilir. Bu sonuçlar ışığında, çalışmanın önerileri daha da önem kazanmaktadır. Özellikle hız ve yükseklik parametrelerinin uygulama amacına göre optimize edilmesi, enerji tüketiminin minimize edilmesi açısından kritik bir stratejidir. Örneğin, tarımsal ilaçlama gibi geniş alan uygulamalarında düşük hız (2 m/s) ve orta yükseklik (10 m) kombinasyonları önerilirken, zamana duyarlı görevlerde daha yüksek hızlar tercih edilebilir. Ayrıca, adaptif kontrol algoritmalarıyla bu parametrelerin gerçek zamanlı optimize edilmesi ve çevresel faktörlerin dikkate alındığı rota planlama sistemlerinin geliştirilmesi, enerji verimliliğini artırmada etkili çözümler sunmaktadır.

Bu çalışmada, farklı hız ve yükseklik kombinasyonlarında drone'un gerçekleştirdiği uçuş senaryoları karşılaştırılmıştır. Ancak sabit senaryo süresi boyunca kat edilen mesafenin hızla birlikte değiştiği göz önünde bulundurulduğunda, toplam enerji tüketimi değerlerinin doğrudan karşılaştırılması sınırlı olabilir. Bu bağlamda, gelecekte yapılacak çalışmalarda sabit mesafe üzerinden enerji verimliliği kıyaslamaları yapılması önerilmektedir.

Bunun yanı sıra, farklı drone modellerinin aerodinamik yapılarının ve batarya teknolojilerinin enerji tüketimi üzerindeki etkileri de gelecekteki çalışmaların odak noktası olabilir. Bu tür analizler, drone tasarım ve üretim süreçlerine rehberlik ederek daha verimli ve enerji tasarruflu sistemlerin geliştirilmesine katkıda bulunacaktır. Sonuç olarak, bu tür çalışmalar hem endüstriyel hem de akademik alanda drone operasyonlarının enerji verimliliğini artırmak ve operasyonel maliyetleri düşürmek adına değerli bir rehber sunacaktır.

KAYNAKLAR

- Ahmed, S., Mohamed, A., Harras, K., Kholief, M., & Mesbah, S. (2016). Energy efficient path planning techniques for UAV-based systems with space discretization. In 2016 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (pp. 1–6). IEEE.
- Ali, M. F. M., Jamaludin, J., Ahmedy, I., & Awalin, L. J. (2023). Energy performance review of battery-powered drones for search and rescue (SAR) operations. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 1261(1), 012021. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1261/1/012021>
- Almutairi, A., Baroom, A., Alsubey, R., & Elhag, S. (2024). Sensory system for swarm drone: A systematic review. International Journal of Computers and Informatics, 3(6), 72–108. <https://doi.org/10.59992/ijci.2024.v3n6p3>
- Askarzadeh, T., Bridgelall, R., & Tolliver, D. (2024). Monitoring nodal transportation assets with uncrewed aerial vehicles: A comprehensive review. Drones, 8(6), 233. <https://doi.org/10.3390/drones8060233>
- Beigi, P., Rajabi, M. S., & Aghakhani, S. (2023). An overview of drone energy consumption factors and models. In Proceedings of the International Conference on Advances in Computing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-97940-9_200
- Borikar, G. P., Gharat, C., & Deshmukh, S. R. (2022). Application of drone systems for spraying pesticides in advanced agriculture: A review. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 1259(1), 012015. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/1259/1/012015>

- Çabuk, U. C., Tosun, M., Dağdeviren, O., & Öztürk, Y. (2024). Modeling energy consumption of small drones for swarm missions. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 25(8), 10176–10189. <https://doi.org/10.1109/TITS.2024.3350042>
- Czachórski, T., Gelenbe, E., Kuaban, G. S., & Marek, D. (2022). Optimizing energy usage for an electric drone. *Communications in Computer and Information Science*, 61–75. https://doi.org/10.1007/978-3-031-09357-9_6
- Diller, J., & Han, Q. (2023). Energy-aware drone path finding with a fixed-trajectory ground vehicle. *Research Square*. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-3793699/v1>
- Dorling, K., Heinrichs, J., Messier, G. G., & Magierowski, S. (2016). Vehicle routing problems for drone delivery. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 47(1), 70–85. <https://doi.org/10.1109/TSMC.2016.2582745>
- Dutta, S., Singh, A., Mondal, B. P., Paul, D., & Patra, K. (2023). Perspective chapter: Digital inclusion of the farming sector using drone technology. In *Human-Robot Interaction - Perspectives and Applications*. <https://doi.org/10.5772/intechopen.108740>
- Figliozzi, M. A. (2017). Lifecycle modeling and assessment of unmanned aerial vehicles (drones) CO2e emissions. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 57, 251–261. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2017.09.011>
- Goh, C., Leow, C. Y., & Nordin, R. (2023). Energy efficiency of unmanned aerial vehicle with reconfigurable intelligent surfaces: A comparative study. *Drones*, 7(2), 98. <https://doi.org/10.3390/drones7020098>
- Gong, H., Huang, B., Jia, B., & Dai, H. (2023). Modeling power consumptions for multirotor UAVs. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1–14. <https://doi.org/10.1109/TAES.2023.3288846>
- Huang, C., Hu, K., Cheng, H., & Lin, Y. S. (2023). A mission-oriented flight path and charging mechanism for internet of drones. *Sensors*, 23(9), 4269. <https://doi.org/10.3390/s23094269>
- Jacewicz, M., Żugaj, M., Głębocki, R., & Bibik, P. (2022). Quadrotor model for energy consumption analysis. *Energies*, 15(19), 7136. <https://doi.org/10.3390/en15197136>
- LibreTexts. (n.d.). Electric power summary. LibreTexts Physics. Retrieved December 3, 2024, from <https://physics.info/electric-power/summary.shtml>
- Liu, Z., Sengupta, R., & Kurzhanskiy, A. (2017). A power consumption model for multi-rotor small unmanned aircraft systems. In *Proceedings of ICUAS 2017* (pp. 310–315). <https://doi.org/10.1109/ICUAS.2017.7991310>
- MATACHE, M. (2023). Development of a tricopter-hexarotor agricultural UAV destined for the realization of precision spraying works. *Inmateh Agricultural Engineering*, 11–20. <https://doi.org/10.35633/inmateh-70-01>
- McCarthy, C., Nyoni, Y., Kachamba, D. J., Banda, L. B., Moyo, B., Chisambi, C., & Hoshino, B. (2023). Can drones help smallholder farmers improve agriculture efficiencies and reduce food insecurity in sub-Saharan Africa Local perceptions from Malawi. *Agriculture*, 13(5), 1075. <https://doi.org/10.3390/agriculture13051075>
- Merkert, R., & Bushell, J. (2020). Managing the drone revolution: A systematic literature review into the current use of airborne drones and future strategic directions for their effective control. *Journal of Air Transport Management*, 89, 101929. <https://doi.org/10.1016/j.jairtraman.2020.101929>
- Mohsan, S. A. H., Othman, N. Q. H., Khan, M. A., Hussain, A., & Żywiołek, J. (2022). A comprehensive review of micro UAV charging techniques. *Micromachines*, 13(6), 977. <https://doi.org/10.3390/mi13060977>
- Mourgelas, C., Micha, E., Chatzistavrakis, E., & Voyiatzis, I. (2023). Meteorolojide insansız hava araçlarının sınıflandırılması: Bir araştırma. 16. Uluslararası Meteoroloji, Klimatoloji ve Atmosfer Fiziği Konferansı COMECAP 2023, 135. <https://doi.org/10.3390/environsciproc2023026135>
- Muli, C., Park, S., & Liu, M. (2022). A comparative study on energy consumption models for drones. In A. González-Vidal, A. M. Abdelgawad, E. Sabir, S. Ziegler, & L. Ladid (Eds.), *Internet of Things. GIoT 2022 (Lecture Notes in Computer Science, Vol. 13533)*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-20936-9_16
- Özgüven, M. M., Altaş, Z., Güven, D., & Çam, A. (2022). Tarımda drone kullanımı ve geleceği. *Ordu Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 12(1), 64–83. <https://doi.org/10.54370/ordubtd.1097519>
- Paiva, D. Z., & Reis, T. (2023). The use of drones in agriculture: A literature review between 2012 and 2022. *Journal of Agricultural Sciences Research*, 3(7), 2–14. <https://doi.org/10.22533/at.ed.973372330051>

- Panjaitan, S., Dewi, Y., Hendri, M., Wicaksono, R., & Priyatman, H. (2022). A drone technology implementation approach to conventional paddy fields application. *IEEE Access*, 10, 120650–120658. <https://doi.org/10.1109/access.2022.3221188>
- Qu, Z., & Willig, A. (2022). Sensorless and coordination-free lane switching on a drone road segment—a simulation study. *Drones*, 6(12), 411. <https://doi.org/10.3390/drones6120411>
- Singh, N., Gupta, D., Joshi, M., Yadav, K., Nayak, S., Kumar, M., & Rajpoot, A. S. (2024). Application of drone technology in agriculture: A modern approach. *Journal of Scientific Research and Reports*, 30(7), 142–152. <https://doi.org/10.9734/jsrr/2024/v30i72131>
- Stolaroff, J. K., Samaras, C., O'Neill, E. R., Lubers, A., Mitchell, A. S., & Ceperley, D. (2018). Energy use and life cycle greenhouse gas emissions of drones for commercial package delivery. *Nature Communications*, 9(1), 409. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-07015-5>
- Thibbotuwawa, A., Nielsen, P., Zbigniew, B., & Bocewicz, G. (2019). Energy consumption in unmanned aerial vehicles: A review of energy consumption models and their relation to UAV routing. In J. Świątek, L. Borzemski, & Z. Wilimowska (Eds.), *Information Systems Architecture and Technology: Proceedings of 39th International Conference on Information Systems Architecture and Technology* (pp. 853–865). Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-99996-8_16
- Wu, K., Lu, S., Chen, H., Feng, M., & Lu, Z. (2024). An energy-efficient logistic drone routing method considering dynamic drone speed and payload. *Sustainability*, 16(12), 4995. <https://doi.org/10.3390/su16124995>
- Wu, Q., Zeng, Y., & Zhang, R. (2018). Joint trajectory and communication design for multi-UAV enabled wireless networks. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 17(3), 2109–2121. <https://doi.org/10.1109/twc.2017.2789293>
- Xu, L., Yang, Z., Huang, Z., Ding, W., & Buck-Sorlin, G. (2023). Effects of flight parameters for plant protection UAV on droplets 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>
- Yu, S. (2023). Comparison of the spray effects of air induction nozzles and flat fan nozzles installed on agricultural drones. *Applied Sciences*, 13(20), 11552. <https://doi.org/10.3390/app132011552>
- Zailani, M. A. H., Sabudin, R. Z. A. R., Rahman, R. A., Saiboon, I. M., Ismail, A., & Mahdy, Z. A. (2020). Drone for medical products transportation in maternal healthcare. *Medicine*, 99(36), e21967. <https://doi.org/10.1097/md.00000000000021967>
- Zhang, J., Campbell, J. F., Sweeney II, D. C., & Hupman, A. C. (2021). Energy consumption models for delivery drones: A comparison and assessment. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 90, 102668. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2020.102668>
- Zorbas, D., Pugliese, L. D. P., Razafindralambo, T., & Guerriero, F. (2016). Optimal drone placement and cost-efficient target coverage. *Journal of Network and Computer Applications*, 75, 16–31. <https://doi.org/10.1016/j.jnca.2016.08.009>