

## İnsansız Hava Aracı ile Yangın Bölgesinin Tespiti ve Müdahalesinin Yapay Zeka ile Tahminlenmesi

Mehmet YÜCEL<sup>\*1</sup>, Bekir AKSOY<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup> Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Mekatronik Mühendisliği Bölümü, 32200, Isparta, Türkiye

(Alınış / Received: 09.10.2024, Kabul / Accepted: 05.12.2024, Online Yayınlanma / Published Online: 23.12.2024)

### Anahtar Kelimeler

Derin öğrenme,  
Makine Öğrenmesi,  
Görüntü işleme,  
İnsansız Hava Aracı,  
Orman Yangınları

**Öz:** Orman yangınları günümüzde, canlı yaşam alanlarını tehdit eden afetlerin başında gelmektedir. Küresel ısınmadaki artış, hava kalitesinin bozulması, hayvan ve bitki çeşitliliğindeki azalmalar, orman yangınlarının oluşturduğu başlıca zararlarıdır. Orman yangınlarının oluşturduğu tehditler ile mücadele edebilmek için tüm devletler çeşitli politikalar geliştirmekte ve ciddi maddi harcamalar yapmaktadırlar. Bu mücadelede kullanılan teknolojik ürünlerin geliştirilmesi ve orman yangınlarına daha hızlı ve kesin çözümün bulunabilmesi elzemdir. Gerçekleştirilen tez çalışmasında bu sorunlardan hareketle yapay zeka tabanlı bir insansız hava aracı sistemi geliştirilmiştir. Geliştirilen sistem olası yangın bölgesinde devriye gezerek otonom uçuş ve analiz yapma yeteneklerine sahiptir. Sistem üzerinde bulunan kamera ile anlık olarak görüntüler yer birimine aktarılmakta ve işlenmektedir. İşlenen görüntüler de yangın ve duman emareleri aranmaktadır. Olası bir yangın durumunda sistem otonom olarak yangın bölgesinde uçuş gerçekleştirmekte ve yangına müdahale etmek üzere görev icra etmektedir. Yangın anında yapay zeka modelleri ile rüzgar hızı, İHA hızı, İHA irtifası bilgileri işlenerek bir yatay atış tahmini yapılmaktadır. Tahmin sonucunda İHA hareket halinde iken yangın söndürme topunun bırakılması gereken an hesaplanmaktadır. Oluşan yatay atışın X ekseninde ne kadar yol alacağı model tarafından tahmin edilmektedir. X ekseninden alınacak yolun bitiş noktası yangın merkezi için tahminlenmektedir. Böylece doğru bir atış ile yangın söndürme topunun alevli bölgeye düşürülmesi hedeflenmiştir. Gerçekleştirilen çalışma sonucunda geliştirilen derin öğrenme mimarisi ile yangındaki alevli kısımların %100 oranında tespit edilebildiği gözlemlenmiştir. Duman tespitinde ise geliştirilen mimari %98 oranında başarı sağlamıştır. Yatay atış işleminin tahmini için Random Forest, XGB Boost ve Pycaret algoritmaları kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan algoritmalarından XGB Boost R<sup>2</sup> performans değerlendirme metriğine göre 0.99 doğruluk oranı ile en başarılı algoritma olarak tespit edilmiştir.

## Detection of Fire Zone by Unmanned Aerial Vehicle and Prediction of Fire Intervention with Artificial Intelligence

### Keywords

Deep learning,  
Machine learning,  
Image processing,  
Unmanned aerial vehicle,  
Forest fires

**Abstract:** Forest fires are among the most common disasters that threaten living spaces today. The increase in global warming, deterioration of air quality, and decreases in animal and plant diversity are the main damages caused by forest fires. In order to combat the threats posed by forest fires, all states develop various policies and make serious financial expenditures. It is essential to develop technological products used in this fight and to find faster and more definitive solutions to forest fires. In the thesis study conducted, an artificial intelligence-based unmanned aerial vehicle system was developed based on these problems. The developed system has the ability to patrol in a potential fire area and perform autonomous flight and analysis. Images are instantly transferred to the ground unit with the camera on the system and processed. Signs of fire and smoke are searched

in the processed images. In the event of a possible fire, the system autonomously flies in the fire area and performs a task to intervene in the fire. In the event of a fire, a horizontal shot estimate is made by processing wind speed, UAV speed, and UAV altitude information with artificial intelligence models. As a result of the estimate, the moment when the fire extinguishing ball should be released while the UAV is moving is calculated. The model estimates how far the horizontal shot will travel on the X axis. The end point of the path to be taken from the X axis is estimated for the fire center. Thus, it is aimed to drop the fire extinguishing ball into the flaming area with a correct shot. As a result of the study, it was observed that the flaming parts of the fire could be detected at a rate of 100% with the deep learning architecture developed. In smoke detection, the developed architecture achieved 98% success. Random Forest, XGB Boost and Pycaret algorithms were used to predict the horizontal shooting process. Among the algorithms used in the study, XGB Boost was found to be the most successful algorithm with an accuracy rate of 0.99 according to the R2 performance evaluation metric.

## 1. Giriş

Ormanlar, doğal hayatın en önemli kaynaklarından birisidir ve birçok canlının içerisinde yaşamını sürdürdüğü en önemli doğal ortamlardan birisidir. Ayrıca ormanlar, iklim durumunu dengeleme, toprağın verimliliğini artırma, doğadaki karbon dengesini kurma, su kütlelerini daha iyi seviyede tutulmasını sağlama gibi doğada birçok önemli görevi yerine getirmektedir [1]. Ekonomik açıdan bakıldığında ise ormanlar, kendisinden elde edilen endüstriyel ürünler ile hem toplum hayatındaki birçok alanda kullanılmakta ve aynı zamanda bu sektörde görev yapan birçok insana istihdam olanağı sağlamaktadır. Ancak orman yangınları ile bu alanlar gün geçtikçe daha da azalmakta ve toplum hayatını önemli ölçüde tehdit etmektedir [2].

Orman yangınları ile mücadelede yangın koruma planı, yangın önleme planı ve yangın söndürme planı olmak üzere üç farklı yöntem kullanılmaktadır. Bu yöntemlerden ilki olan yangın koruma planı için daha önceden yangın tehlike haritaları çıkarılarak orman bölgesinde özel tehlike alanları belirlenmektedir. Tehlikeli alanlar belirlendikten sonra bu alanlarının temiz tutulması, halkın eğitimi ve yasal önlemlerin alınması bu yöntemin temel ilkeleridir. İkinci yöntemde ise amaç yangın önleme planı oluşturulmaktadır. Bu plan kapsamında, alanın sınıflandırılması, yanıcı madde tehlikesinin organizesi, yangın gözetim şebekesi, ulaşım, yangın söndürme ekipleri ve haberleşme çalışmaları yer almaktadır. Yangın ile mücadelede üçüncü ve son aşama ise iyi bir yangın söndürme planının oluşturularak uygulanmasıdır. Ancak günümüz teknolojisinde yangın söndürme planı ile yapılan çalışmalar genellikle insan sağlığı açısından riskli durumlar içermektedir [3].

Söndürme çalışmalarında ise genellikle manuel sistemler kullanılmaktadır. Yangın ile mücadele personelleri, yangının türüne göre belirlenmiş pompalar, iş makineleri, farklı su kapasitelerindeki araçlar ve yangınla mücadele sistemleri ile donatılarak

yangın söndürme işlemleri gerçekleştirilmektedir. Kullanılan sistemlerin birçoğu yangına yakın mesafeden müdahaleyi zorunlu kılmakta ve personeller yangın kontrol eylemlerini yürütürken ısı, duman ve alevlere maruz kalarak sağlık problemleri yaşamaktadırlar. İtfaiyeciler yangın ile mücadele ederken hayatlarını tehlikeye atmakta ve insanları fiziksel olduğu kadar zihinsel olarak da yıpranmaktadır [4]. Ayrıca yangın ile mücadele personelleri zorlu arazi koşullarında ulaşım zorluğunu, malzeme ve insan eksikliğini ve senaryo bilgilerinin bozulmasını sıklıkla karşılaşılan problemler olarak belirlenmiştir [5]. Tüm bu problemlerin önüne geçebilmek için günümüzde farklı yazılım ve donanım sistemleri kullanılmaktadır. Geliştirilen donanımların başında ise İnsansız Hava Aracı (İHA) sistemleri gelmektedir. İHA'lar uzaktan bir yer birimi aracılığı ile kontrol edilebilen, manuel ya da otonom olarak uçuş yapabilen sistemlerdir. Özellikle askeri alanlarda, insan yaşamının tehdit altında olduğu kritik yerlerde sıklıkla tercih edilmektedir. Ayrıca tarım alanında haritalandırma, afet durumunda arama kurtarma gibi çalışmalarda büyük avantajlar sağlamaktadır [6]. Ayrıca İHA sistemlerine gelişmiş görüntü işleme ve yapay zekâ teknolojili yazılımlar kullanılarak daha kapsamlı görevler yerine getirmeleri sağlanmaktadır.

Yapay zekâ bir bilgisayarın ya da bilgisayar destekli bir sistemin, canlıya ait olan yetenekleri yerine getirebilmesi olarak tanımlanabilir. Yapay zekâ algoritmaları problemlere hızlı ve etkili çözümler getirilebilmektedir. Görüntü işleme teknikleri ise görüntülerin sayısallaştırılarak bilgisayar ortamında belirlenen bir amaç doğrultusunda analizler yapılarak anlamlı sonuçlar elde etme süreci olarak tanımlanır [7,8].

Günümüzde orman söndürme çalışmalarında, arazi tanıma, yardım götürme, yangın sürecinin anlık olarak izlenebilmesi gibi birçok alanda görüntü işleme ve yapay zekâ teknikleri kullanılmaktadır. Akademik literatür incelendiğinde yangın söndürme çalışmalarında kullanılan yapay zekaya dayalı otonom

sistemlerin yaygın olmadığı ve bu alanda yapılacak çalışmalara ihtiyaç olduğu tespit edilmiştir [5, 9,10].

Çalışmada günümüzün önemli problemlerinden birisi olan orman yangınlarına erken müdahale yapabilmek için görüntü işleme ve yapay zekâ teknolojilerine dayalı İHA kullanılarak orman yangınlarına olası coğrafi zorlukları en aza indiren bir sistem tasarlanarak yangına erken müdahale etmeye imkân tanıyan bir sistem geliştirilmiştir.

## 2. Materyal ve Metot

### 2.1. Materyal

Çalışmanın materyal bölümünde çalışmadan kullanılan İHA'nın bileşenleri ve çalışmada kullanılan yapay zekâ algoritmalarına ait detaylı bilgiler aşağıdaki alt başlıklarda verilmiştir.

#### 2.1.1. İnsansız hava aracı

Çalışma için tasarlanan İHA'nın uçuş kontrolleri Arducopter APM2 ile kontrol kartı ile gerçekleştirilmiştir. İHA uçuşu için gerekli kaldırma kuvvetini üretecek altı adet fırçasız motor kullanılmıştır. Her bir motor 30A'lık ESC'ler ile sürülmektedir. Sisteme gerekli güç 2500mAh değerinde LipoPil üzerinden sağlanmaktadır. Ayrıca İHA üzerinde veri toplamak amacıyla GPS, Telemetri Tx-Rx, Kamera ve Video Tx-Rx bileşenleri kullanılmıştır. Tablo 1'de çalışmaya özgü tasarlanan İHA'nın bileşenleri verilmiştir.

**Tablo 1.** İnsansız hava aracının bileşenleri

İnsansız Hava Aracı Bileşeni	Komponent Adı
Kontrol Kartı	Arducopter (APM2)
Eyleyici	Fırçasız motor (RS 2212-920kv)
Şase	F550
Motor Sürücü	30A'lık ESC
Güç Kaynağı	2500 mAh- 11.4V 3S Lipo
Kanat Tipi	Döner Kanat 1045 Pervane
GPS	M8N
RF Tx-Rx Alıcı Verici	HK-TR6A V2
Kontrol Yazılımı	Mission planner ardupilot
Telemetri	433 mHz Telemetri
Kamera	1000TVL CCD
Görüntü Aktarıcı	5 GHz Video Tx-Rx
Yangın Söndürme Topu	1.3 Kg-14.5R

#### 2.1.2. Extreme gradient boosting algoritması - XGB

Friedman tarafından 2001 yılında geliştirilen gradient boosting temelli bir algoritma olan aşırı gradyan

artırma (XGB), düzenli bir model biçimlendirmesi kullanmasıyla ve aşırı öğrenmeyi kontrol edebilmesi nedeniyle sıklıkla tercih edilen bir yapay zeka algoritmalarından birisidir [11,12]. XGB algoritmasının amaç fonksiyonu denklem 1'de verilmiştir [13-15].

$$L(\emptyset) = \sum_i \ell(y_i, \hat{y}_i) + \sum_k \Omega(f_k) \quad (1)$$

Denklem 1'de  $\ell$ ; gerçek değeri,  $y_i$  ile tahminlenen değeri,  $\hat{y}_i$  ise gerçek değer ile tahmin edilen değer arasındaki farkı ölçen kayıp fonksiyonudur.  $f_k$ ; bağımsız bir ağaç yapısını ve bağımsız olan yaprak ağırlıklarını ifade ederken,  $\Omega$  ise düzeltme parametresidir. Düzeltme teriminin gösterimi denklem 2'de verilmiştir [15].

$$\Omega(f) = \gamma T + \frac{1}{2} \lambda w^2 \quad (2)$$

Denklem 2'de verilen düzeltme teriminde yer alan  $\gamma$  karmaşıklık parametresi olarak yaprak düğümlerinin sayısını kontrol etmektedir. Karar ağacında bulunan yaprak sayısı T ile gösterilir ve yaprak düğümlerinin ağırlıklarını göstermektedir.  $\omega$  ve  $\lambda$  ise aşırı öğrenmeden kaçınmak için kullanılan parametrelerdir [15].

#### 2.1.3. Random forest algoritması

Ağaç tipi sınıflandırıcılardan olan Random Forest (RF) algoritması, 2001 yılında Breiman tarafından geliştirilen bir topluluk öğrenme algoritmasıdır. RF algoritması kök, düğümler, dallar ve yapraklara sahip olan gerçek karar ağaçlarından oluşmaktadır. Karar ağaçlarında kök ve düğümler kararların ölçütlerini, yapraklar verilen kararların durumlarını, dallar ise ölçütlerle kararlar arasındaki bağlantıyı göstermektedir [16].

#### 2.1.4. Pycaret algoritması

PyCaret algoritması, farklı yapay zeka algoritmalarını birlikte kullanılarak yazılımlardaki kod sayısını minimize ederek hızlı sonuçlar elde etmek için Python programlama dili ile geliştirilmiş bir makine öğrenme kütüphanesidir. Scikit-learn, XGBoost, LightGBM, CatBoost gibi makine öğrenme kütüphanelerinin aynı anda kullanılmasına imkan tanımaktadır [17].

#### 2.1.5. Evrişimli sinir ağları modeli

Evrişimli Sinir Ağları (ESA), derin öğrenme mimarileri kategorisinde sıklıkla kullanılan mimarilerden birisidir. ESA'da görüntülerden özellik çıkarma ve sınıflandırma yöntemlerinin birleşiminden oluşan bir derin öğrenme algoritmasıdır. ESA derin öğrenme mimarisi temel olarak farklı görevleri yerine getirmek

için evrişim katmanı, aktivasyon katmanı, havuzlama katmanı gibi yapılardan oluşmaktadır [18].

### 2.1.6. UFS-Net derin öğrenme modeli

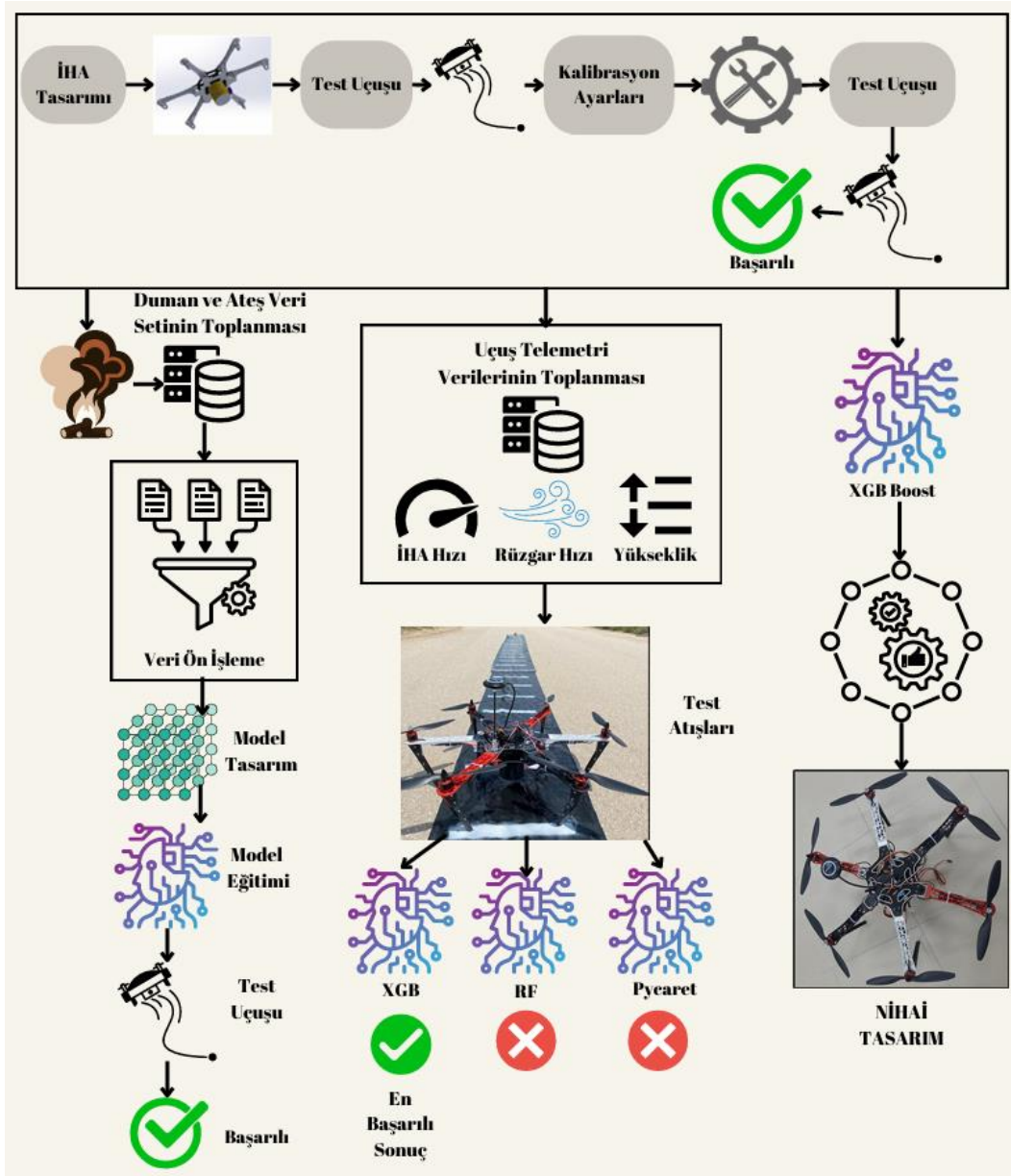
Hosseini vd, tarafından 2022 yılında önerilmiş olan ESA tabanlı bir derin öğrenme modelidir. UFS-Net'in diğer bilgisayar görü tabanlı sistemlerden en önemli farkı sadece duman veya alevi değil duman ve alevi birlikte tespit etmede kullanılmasıdır [19].

### 3.1.7. FireNet

FireNet, Seydi vd. tarafından 2022 yılında derin öğrenme tabanlı geliştirilmiş bir yapay zekâ modelidir. FireNet iki akış özellikli bir mimariden

oluşmaktadır. İlk olarak sığ özellikler çok ölçekli iki boyutlu evrişimli katmanlar tarafından çıkarılmaktadır. Ardından, çıkarılan derin özellikler, her bir derin özellik çıkarıcı kanalına beslenmektedir. Küçük yangınlar küçük alanları kapsayabileceğinden, derin özellikleri çıkarmadan önce ilk kanal için iki oranında üst örnekleme kullanılmıştır. Daha sonra, iki katmandan çıkarılan derin özellikler, toplama operatörü tarafından birleştirilmiştir. Son aşamada ise çıkarılan özellikler, son sınıf etiketine (aktif ateş veya değil) karar vermek için tek bir özellik haritası olarak 28x28 boyutlu dönüşüm katmanına beslenmektedir [20].

### 2.2. Metot

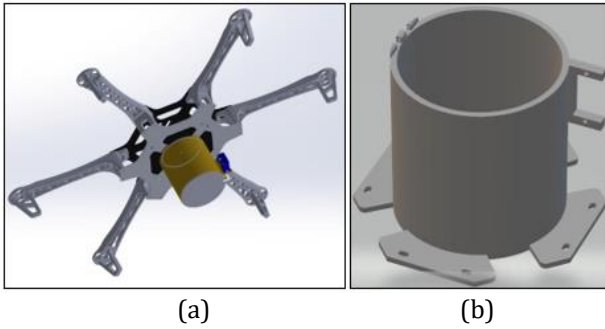


Şekil 1. Çalışmanın iş akış diyagramı

Çalışmada, insansız hava aracı ile orman yangınlarına minimum sürede müdahale edebilmek ve olası büyük

yangınların önüne geçilebilmesi için Şekil 2'de görüldüğü gibi yapay zekâ ve görüntü işleme tabanlı

bir sistem tasarımı yapılmıştır. Gerçekleştirilmiş olan çalışmaya ait iş akış diyagramı Şekil 1'de gösterilmiştir. Yapılan çalışmada Şekil 2 (a)'da görüldüğü gibi "quadcopter" özelliğinde bulunan döner kanatlı insansız hava aracı tasarımı gerçekleştirilmiştir. Şekil 2 (b)'de ise insansız hava aracına yangın ile mücadele edebilme yeteneği kazandırılmak için ateş topu mekanizma tasarımı gerçekleştirilmiştir. Bu mekanizma insansız hava aracının alt bölgesine yerleştirilmiştir. Mekanizma kapaklı olup, kapak bir adet servo motor ile kontrol edilmektedir. Mekanizma içerisine yangın söndürme topu yerleştirilmiştir ve yangın konumuna gelince mekanizma yer kontrol istasyonu üzerinden otomatik tetiklenerek kapağın açılması sağlanacaktır. Bu sayede yangına müdahale edilmesi sağlanmıştır. Şekil 2 (c)'de ise insansız hava aracının montajı gerçekleştirilmiş son hali gösterilmiştir.



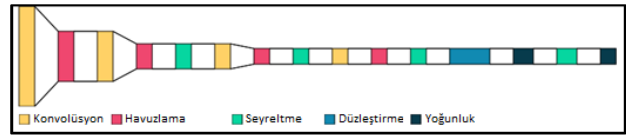
**Şekil 2.** İnsansız hava aracı için (a) quadcopter tasarımı (b) ateş topu mekanizması. (c) İnsansız hava aracının tamamlanmış hali

İHA tasarımının yapılmasının ardından uçuş testleri yapılarak gerekli kalibrasyonlar gerçekleştirilmiştir. Bu aşamanın ardından Şekil 3'te de görüldüğü gibi yangın tespiti için yapay zekâ modelinin eğitiminde kullanılacak olan özgün veri seti toplanmıştır. Ormanlık arazi üzerinde alev görüntüsünü tespit etmek ağaçların gövdeleri ve dallarından kaynaklanabilecek problemlerin önüne geçmek için veri setine duman görüntüleri de eklenerek veri setindeki görüntü sayısı artırılmıştır.



**Şekil 3.** Çalışmaya özgü toplanan veri seti için örnek görüntüler

Çalışmada gerçekleştirilen insansız hava aracı ile toplanan alev ve duman görüntüleri derin öğrenme modeli için veri ön işleme işlemlerine tabii tutulmuştur. Bu aşamada görüntülerin boyutları 640x640 piksel boyutuna getirilerek görüntüler üzerindeki alev ve duman bölgeleri poligon etiketleme ile sınırları çizilerek etiketlenmiştir. Derin öğrenme modellerini beslemek için veri setinin büyük olması gerektiğinden veri setinde bulunan 387 adet görüntüye aynalama, döndürme ve grayscale görüntü işlemlerine tabii tutularak veri setinde yer alan görüntülerin sayıları artırılmıştır. Böylece alev ve duman veri setinde toplam 1161 adet görüntü sayısına ulaşılmıştır. Veri ön işleme ve veri artırma işlemlerinden sonra veri seti derin öğrenme modelini eğitmek için hazır hale getirilmiştir. Geliştirilen derin öğrenme mimarisinin detayları Şekil 4'te gösterilmiştir.



**Şekil 4.** Çalışmaya özgü geliştirilen derin öğrenme modeli

Çalışmanın ikinci aşamasında ise çevresel değişkenlerden oluşan bir veri seti oluşturulmuştur. İHA ile toplamda 380 atış gerçekleştirilerek sayısal veriler toplanmıştır. Şekil 5'te atış anındaki insansız hava aracı ile gerçekleştirilecek olan atışın ölçümü için oluşturulan ölçüm düzeneği gösterilmiştir.





**Şekil 5.** İnsan hava aracında ateş topu düşüş yeri ile ilgili hazırlanmış olan ölçüm sistemi

Şekil 6'da ise İHA'nın yüksekliği, hızı, ortamdaki rüzgâr hızı ve yangın söndürme topunun yatay eksende aldığı mesafeler veri setine kaydedilmesi için Python programlama dilinde hazırlanmış olan kod ile toplanan verilere ait görsel verilmiştir.

yukseklık	drone_hızı	ruzgar_hızı	alınan_yol	
0	6	1	-2.85	0.98
1	6	2	-2.56	2.05
2	6	3	-4.26	3.25
3	6	4	-5.20	4.12
4	6	5	1.50	5.14
5	6	6	1.20	6.45
6	8	1	3.89	1.30
7	8	2	3.40	2.38
8	8	3	3.50	3.62
9	8	4	-5.00	4.65

**Şekil 6.** İHA'nın uçuşu esnasında toplanmış olan çevresel faktörlere ait veriler

Atış veri seti oluşturulduktan sonra makine öğrenme modellerinde en optimum sonuca ulaşmak için XGB Boost, Random Forest ve Pycaret ile model eğitimleri yapılmıştır. Makine öğrenmesi algoritmalarının eğitiminde veri setinde bulunan yükseklik, İHA hızı ve rüzgâr hızı parametreleri giriş verisi olarak alınan yol ise çıkış parametresi olarak belirlenmiştir. Makine öğrenme algoritmalarında veri setinde bulunan 380 adet verinin %80 eğitim için %20'si ise test verisi olacak şekilde ayrılarak modellerin eğitimi

gerçekleştirilmiştir. Ayrıca Pycaret kütüphanesi kullanılarak 11 adet regresyon algoritması aynı anda eğitilmiştir.

İnsansız hava aracının yangın olan bölgeyi yapay zekâ ile tespit edebilmesi için İHA'nın ön bölgesinde bulunan kamera kullanılmaktadır. Yer istasyonuna sürekli olarak bir veri akışı sağlanmıştır ve kameradan gelen görüntüler yer istasyonunda bulunan bilgisayar ile gerçek zamanlı olarak analiz edilmektedir. Yer istasyonunda bulunan bilgisayarda, alev ve duman görüntüleri derin öğrenme modeli ile işlenerek görüntüler üzerinde bir yangın durumu olup olmadığı belirlenmektedir. Derin öğrenme modeli gelen görüntüler üzerinde yangın durumunun tespit etmesi durumunda, yer istasyonu üzerinde bulunan radyo verici ile insansız hava aracını kontrol etmektedir. Daha önce eğitimleri tamamlanan ve yüksek başarı elde edilen makine öğrenmesi algoritması ile yangın alanına yaklaşarak yangın söndürme topunun bırakılması gereken nokta belirlenmektedir. İnsansız hava aracının alt bölgesindeki haznede bulunan yangın söndürme topu otomatik olarak bırakılarak yangın söndürme işlemi gerçekleştirilmiştir.

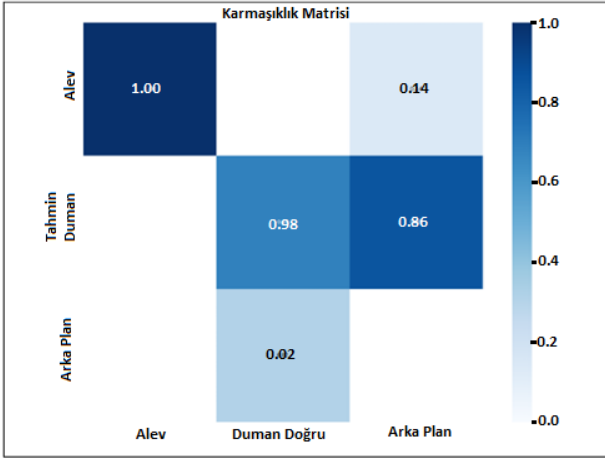
### 3. Bulgular

Bu bölümde çalışmada kullanılan mimarilerin karşılaştırması ve sonuçları verilmiştir.

#### 3.1. Alev ve duman tespiti uygulama sonuçları

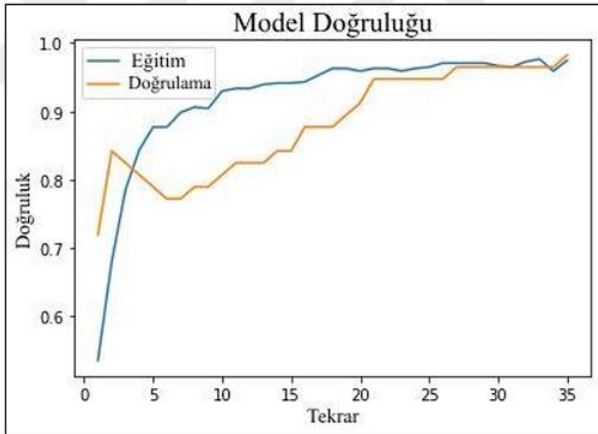
Çalışmada alev ve duman tespiti için katman tasarımları ile özgün yerli ve milli bir derin öğrenme mimarisi geliştirilmiştir. Daha sonra geliştirilen derin öğrenme mimarisinden elde edilen sonuçlar ile FireNet ve UFS-Net mimarilerinden elde edilen doğruluk değerleri karşılaştırılmıştır.

Geliştirilen derin öğrenme mimarisine ait karmaşıklık matrisi Şekil 7'de verilmiştir. Mimariden elde edilen sonuçlara göre yangındaki alevli kısımların tahmininde %100 başarı oranı elde edilmiştir. Görüntülerdeki dumanlı kısımların tespit edilmesinde ise mimari %98 doğruluk oranında sonuçlar elde edilmiştir. Karmaşıklık matrisi incelendiğinde duman olarak tespit edilmesi gereken bölgelerden %2'sinin arka plan olarak tespit edildiği görülmektedir. Bu durum hava şartlarının ve ışık değişimlerinin görüntüde parazite neden olmasından kaynaklanmaktadır.



Şekil 7. Çalışmaya özgü geliştirilen derin öğrenme mimarisinin karmaşıklık matrisi

Şekil 8'de derin öğrenme modeline ait eğitim doğrulama ve model doğruluğuna ait grafikler gösterilmiştir.



Şekil 8. Çalışmaya özgü geliştirilen derin öğrenme modeline ait doğruluk grafiği

Şekil 8 incelendiğinde model doğruluğunun ilk beş eğitim esnasında hızlı bir artış ve ardından düştüğü görülmektedir. Bunun temel nedeni veri setlerinde Eğitilen verilerde oluşan veri kayıplarından olabileceği tahmin edilmektedir. Şekil 8'deki grafik incelendiğinde geliştirilen ESA modelinin 35 eğitiminden sonra neredeyse hiç değişmediği görülmektedir. Bu nedenle çalışmada kullanılan veri setlerindeki görüntüler için 35 eğitimden sonra eğitime devam edilmemiştir.

### 3.1.1. FireNet mimarisi ile geliştirilen mimarinin karşılaştırması

Çalışma kapsamında toplanan veri seti geliştirilen mimari ile eğitilerek yeni bir mimari oluşturulmuş ve literatürde bulunan farklı bir mimari ile karşılaştırılmıştır. FireNet mimarisi ile yapılan karşılaştırma sonucunda geliştirilen mimaride daha yüksek doğruluk skoru ile alev ve duman tespiti yapılabildiği gözlemlenmiştir. Karşılaştırma sonucunda FireNet mimarisinin alev ve duman tespitinde elde ettiği doğruluk skoru %93.91 iken

gerçekleştirilen çalışmada ise modelin doğruluk skoru %98.21 olarak elde edilmiştir. FireNet ve geliştirilen mimariye ait performans değerlendirme metriklerine ait sonuçlar Çizelge 2'de verilmiştir.

Çizelge 2. Fire-Net derin öğrenme mimarisi ile çalışmaya özgü geliştirilen mimarinin karşılaştırılması

Değerlendirme Kriterleri	FireNet (%)	Geliştirilen Mimari (%)	
<b>Doğruluk</b>	93.91	98.21	
<b>Yanlış Pozitif</b>	1.95	<b>Alev</b>	<b>Duman</b>
		0	1
<b>Yanlış Negatif</b>	4.13	0	1
<b>Geri Çağırma</b>	94	100	98
<b>Keskinlik</b>	97	100	98
<b>F-Skor</b>	95	100	98

### 3.1.2. Çalışmada geliştirilen mimari ile UFS-Net mimarisinin karşılaştırması

Çalışmaya özel geliştirilen mimari ile UFS-Net mimarisi ile yapılan eğitim sonucu karşılaştırıldığında geliştirilen mimaride daha yüksek doğruluk skoru ile alev ve duman tespiti yapılabildiği gözlemlenmiştir. Karşılaştırma sonucunda UFS-Net mimarisinin alev ve duman tespitinde elde ettiği doğruluk skoru %93.63 iken çalışma için geliştirilen modelin doğruluk skoru %98.21 olarak elde edilmiştir. UFS Net ve geliştirilen mimariye ait performans değerlendirme metriklerine göre karşılaştırmalar Çizelge 3'te verilmiştir.

Çizelge 3. UFS-Net derin öğrenme mimarisi ile çalışmaya özgü geliştirilen mimarinin karşılaştırılması

Değerlendirme Kriterleri	UFS-Net (%)	Geliştirilen Mimari	
<b>Doğruluk</b>	93.63	%98.21	
<b>Yanlış Pozitif</b>	0	<b>Alev</b>	<b>Duman</b>
		0	1
<b>Yanlış Negatif</b>	6.96	0	1
<b>Geri Çağırma</b>	93	100	98
<b>Keskinlik</b>	100	100	98
<b>F-Skor</b>	96.39	100	98

### 3.2. Random forest algoritmasından elde edilen sonuçlar

Gerçekleştirilen çalışma doğrultusunda yatay atış işlemini gerçekleştirmek için toplanan veri seti random forest algoritması ile eğitilmiştir. Algoritma sonucunda tahmin edilen verilerin performans değerlendirme metriklerinden  $R^2$  (R-squared) 0.97 doğruluk oranı, mutlak hata (Mean Absolute Error MAE) ise 0.33 ve Ortalama kare hatası (Mean Square Error MSE) değeri ise 0.1640 olarak elde edilmiştir. Algoritmaya ait performans değerlendirme sonuçları Çizelge 4'de verilmiştir.

Çizelge 4. Random Forest Algoritmasının performans değerlendirme metriklerine göre sonuçları

	MAE	MSE	$R^2$
<b>Random Forest</b>	0.3306	0.1640	0.9741

### 3.3. XGB boost algoritmasından elde edilen sonuçlar

Gerçekleştirilen çalışma doğrultusunda yatay atış işlemini gerçekleştirmek için kullanılan ikinci makine öğrenme algoritması olan XGB Boost ile eğitilmiştir. Algoritma sonucunda elde edilen sonuçlar  $R^2$  performans değerlendirme metriğine göre 0.99, MAE değeri ise 0.1127 ve MSE değeri de 0.0241 elde edilerek başarılı bir sonuç alındığı gözlemlenmiştir. Algoritmaya ait skorlar Çizelge 5'te verilmiştir.

**Çizelge 5.** XGB Boost Algoritmasının performans değerlendirme metriklerine göre sonuçları

	MAE	MSE	$R^2$
<b>XGB Boost</b>	0.1127	0.0241	0.9999

### 3.4. Pycaret algoritmasından elde edilen sonuçlar

Gerçekleştirilen çalışma doğrultusunda yatay atış işlemi için yukarıda belirtilen algoritmaların dışında Pycaret algoritması eğitim işlemi gerçekleştirilmiştir. Pycaret algoritmasından elde edilen sonuçların MAE, MSE ve  $R^2$  performans değerlendirme metriklerine göre sonuçları çizelge 6'da verilmiştir.

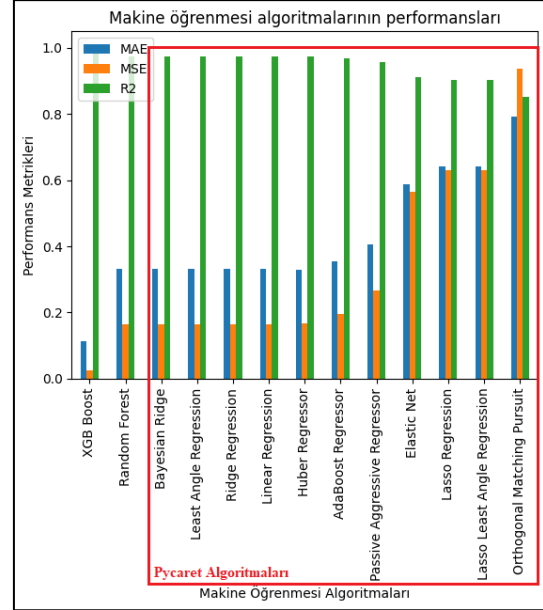
**Çizelge 6.** Pycaretoost Algoritmasının performans değerlendirme metriklerine göre sonuçları

	MAE	MSE	$R^2$
<b>Bayesian Ridge</b>	0.3305	0.164	0.9741
<b>Least Angle Regression</b>	0.3306	0.164	0.9741
<b>Ridge Regression</b>	0.3305	0.164	0.9741
<b>Linear Regression</b>	0.3306	0.164	0.9741
<b>Huber Regressor</b>	0.3275	0.1673	0.9736
<b>AdaBoost Regressor</b>	0.3538	0.195	0.9694
<b>Passive Aggressive Regressor</b>	0.4049	0.267	0.9557
<b>Elastic Net</b>	0.5874	0.5642	0.912
<b>Lasso Regression</b>	0.641	0.6309	0.9015
<b>Lasso Least Angle Regression</b>	0.6411	0.6309	0.9015

<b>Orthogonal Matching Pursuit</b>	0.7921	0.9367	0.8525
------------------------------------	--------	--------	--------

Şekil 9'da yatay atış işlemi için İHA hızı, rüzgâr hızı ve yükseklik çevresel parametrelerinin alınan yola etkisini belirlemek için tüm algoritmalara ait karşılaştırma grafiği verilmiştir.

Şekil 9 incelendiğinde XGB Boost algoritmasının çevresel parametrelerinin alınan yola etkisini en iyi modelleyen algoritma olduğu belirlenmiştir.



**Şekil 9.** Çevresel değişkenler için kullanılan makine öğrenmesi algoritmalarına ait performans grafiği

## 4. Tartışma ve Sonuç

Çalışma kapsamında gerçekleştirilen çalışma ile ilgili literatür kapsamlı olarak araştırılmıştır. Literatürde orman yangınlarında kullanılan görüntü işleme, yapay zekâ ve İHA sistemleri konusunda gerçekleştirilen çalışmalar analiz edilmiştir. Akademik çalışmalar incelendiğinde İHA sistemlerinin var olan problemler ve bunların çözüm yöntemlerinin nasıl geliştirildiği üzerinde durulmuştur.

Aksoy vd. (2021), yapmış oldukları çalışmada insansız hava aracı ile görüntü işleme ve yapay zekâ teknikleri kullanarak yangın tespiti yapabilecek bir sistem tasarlamışlardır. Çalışmada toplanan görüntülerden anlık olarak ateş tespiti yapılarak yangının ortaya çıktığı konum belirlenmektedir. Görüntülerden yangın tespitinin gerçekleştirilebilmesi için çalışmada Python programlama dili ile SqueezeNet modeli kullanılmıştır. Ayrıca görüntüler üzerinde gaussian filtreleme, eşikleme ve boyutlandırma işlemleri gerçekleştirilmiştir. Modelin performans değerlendirme sonuçlarında 0.96 doğruluk, 0.98 duyarlılık, 0.89 özgüllük ve 0.96 kesinlik değerlerini elde etmişlerdir [21].



Kinaneva vd. (2020), çalışmalarında yangınla mücadelede geleneksel yöntemlerin tehlikeli ve maliyetli olmasına dikkat çekmişlerdir. Bu nedenle İHA kullanıma uygun, gerçek zamanlı otomatik duman algılamaya yönelik bir yapay zekâ yaklaşımı sunmuşlardır. Sundukları çalışmada Tensorflow kütüphanesinden faydalanarak Faster R-CNN modeli ile toplanan görüntülerin veri kümesiyle eğitimini gerçekleştirmişlerdir. Ardından model doğruluğunu test etmek için fotoğraf değerlendirme veri setindeki durağan görüntülerden duman algılama ve bir İHA kamerasından canlı video aktarımı kullanılarak duman algılama için bir sistem üzerinde çalışmışlardır. Otomatik duman algılama için sunulan yazılım platformu, yüksek düzeyde güvenilirlik sağlamış ve durağan görüntülerde ve canlı video aktarımlarında duman varlığını tespit etmişlerdir [22].

Khan vd. (2022), çalışmalarında erken orman yangını tespiti için otomatik gözetim tabanlı bir sistemin orman yangınlarını azaltabileceğini ifade etmişlerdir. Bu nedenle, sürekli olarak orman gözetimi yapabilecek ve yangın durumunu algılayacak yapay zekâ tabanlı bir İHA sistemi önermişlerdir. Sistemde DeepFire veri seti ile 1900 renkli yangın görüntüsü kullanılmıştır. Model olarak VGG19 tabanlı transfer öğrenme ile veri seti sınıflandırma işlemi gerçekleştirilmiştir. Ayrıca makine öğrenmesi modellerinden, k-en yakın komşular, rastgele orman, naive bayes, destek vektör makinesi ve lojistik regresyon yapay zekâ modelleri ile sistem performanslarını analiz etmişlerdir. Simülasyon ortamında gerçekleştirilen çalışmada, %95.7 kesinlik, %94.2 geri çağırma ile %95'lik ortalama doğruluk değerleri elde etmişlerdir [23].

Hossain vd. (2019), çalışmalarında yapay sinir ağı (YSA) kullanarak orman yangını ve duman tespiti gerçekleştiren yeni bir algoritma önermişlerdir. Kullanılan modelde ilk olarak görüntüleri 240x320 çözünürlüğe yeniden boyutlandırmışlardır. Yeniden boyutlandırılmış olan görüntü 16x16 bloklara bölünerek her bloktan özellik vektörleri oluşturmuşlardır. 300 bloğa ait her özellik vektörü YSA'dan geçirilerek görüntünün yangın, duman ya da normal bir görüntü olup olmadığını tespit etmişlerdir. Model testlerinde görüntüde yangın duman veya her

ikisi olduğunda algoritmanın %100 algılama oranına sahip olduğunu belirlemişlerdir. Ancak sadece alevin olduğu görüntüler için doğruluk %89, sadece dumanın bulunduğu görüntüler için doğruluk %80.7 ve normal görüntüler için %87.4 doğruluk değeri elde etmişlerdir [19].

Yanık vd. (2021), çalışmalarında görüntü işleme ve nesne algılama sensörü ile donatılmış insansız hava aracı kullanılarak orman yangınlarının tespiti üzerine çalışma gerçekleştirmişlerdir. Örnek yangın görüntüleri toplayarak bir veri seti hazırlamışlardır. Geliştirmiş oldukları sistemde kontrol kartı olarak raspberry pi kartı kullanmışlar ve farklı makine öğrenmesi algoritmalarıyla eğitilerek sonuçlar test etmişlerdir. Dört adet model arasından en iyi sonucu veren model çalışmada kullanılmıştır [24].

Bushnaq vd. (2021), yaptıkları çalışmada orman yangınlarını tespit etmek için ormanlara yerleştirilen nesnelere interneti (Internet of Things IoT) tabanlı sensörler ile anlık olarak veri toplamışlardır. Toplanan verileri ayrık zamanlı markov zinciri yöntemi ile analiz ederek orman yangını olma ihtimalini tespit etmişler ve yangın olabilecek bölgeye İHA göndererek gerçek zamanlı görüntü işleme ile orman yangını olup olmadığını kontrol etmişlerdir [25].

Yukarıda verilen akademik çalışmalara ait özet bilgiler Çizelge 7'de verilmiştir.

**Çizelge 7.** Yangın sınıflandırma çalışmalarının karşılaştırılması.

Makale	Kullanılan Modeller	Tahmin Edilen Sınıf	Doğruluk (%)
Aksoy vd. (2021)	SqueezeNet	Alev	0.96
Kinaneva vd. (2020)	Faster R-CNN	Duman	0.99
Khan vd. (2022)	KNN	Alev	0.86
	RF		0.88
	LR		0.90
	SWM		0.91

	NB		0.79
Hossain vd. (2019)	YSA	Alev	0.89
		Duman	0.80
Yanık vd. (2021)	MobileNet	Duman	0.98
Bushnaq vd. (2021)	Çalışmada sadece sensör verileri kullanılarak tespit gerçekleştirilmiştir.		

Orman yangınları, tüm dünyada canlı yaşamı tehdit eden doğal afetlerin başında gelmektedir. Yalnızca hayvan ve bitki çeşitliliğinde ciddi kayıplara neden olabilecek doğal alanların yanında maddi manevi kayıplara da yol açmaktadır. Aynı zamanda orman yangınları çoğu zaman yerleşim alanlarına ve bu yerleşim alanlarında yaşayan insanlara sağlık başta olmak üzere birçok zarara neden olmaktadır. Diğer yandan, orman yangınları ciddi miktarda sera gazı salınımına neden olmakta ve bu sebeple küresel ısınmanın da temel faktörlerinden biri olmaktadır. Yukarıda verilen temel nedenlerden dolayı devletler yangın önlemede, erken teşhis ve hızlı müdahale için yöntemler geliştirmek için büyük çabalar sarfetmektedirler.

Bu yetersizlikten hareketle yapılan çalışmada bir İHA tasarımı geliştirilmiştir. Öncelikle İHA tasarımı için gerekli bileşenler hesaplanmış ve sistem kurulumu yapılmıştır. Test uçuşları yapılan İHA'nın kalibrasyon ayarları yapıldıktan sonra atış için gerekli olan mekanizma tasarımına geçilmiştir. İHA'nın alt kısmında oluşturulan top tutma ve bırakma mekanizması deneyleri yapılarak veri setlerinin toplanması adımına geçilmiştir. Güvenli bir ortamda oluşturulan yangınların görüntüleri toplanarak özgün bir veri seti oluşturulmuştur. Veri seti oluşturulan mimari ile eğitilerek literatürde var olan modeller ile karşılaştırılmış ve yüksek performans ile çalıştığı tespit edilmiştir. Duman ve yangın tespitinin ayrı ayrı yapılabildiği bir mimari yangına erken müdahale açısından oldukça önemlidir. Bu nedenle yangının başlangıç anında dahi müdahale edebilme kabiliyetine sahip bir model tasarlanmıştır.

İkinci aşamada ise yatay atış için gerekli veri seti hazırlanmıştır. Bu veri setinde İHA hızı, İHA yüksekliği ve anlık rüzgâr hızları ölçülerek farklı değerlerde atışlar yapılmıştır. Yapılan atışlarda İHA'nın topu bıraktığı nokta ile topun düştüğü nokta arası ölçülerek kaydedilmiştir. Farklı modellerde eğitilen bu veri setinin en yüksek skorla çalıştığı XGB Boost algoritması gerçek zamanlı olarak kullanılmak üzere İHA sistemine entegre edilmiştir. Son olarak İHA test atışları yapılarak yangına müdahale edebilme durumu incelenmiştir. Atışlar sonucunda İHA'nın hedefi tutturma oranının yüksek olduğu görülmüştür.

Gelecekte gerçekleştirilecek olan akademik çalışmalarda veri seti daha da genişletilerek farklı derin öğrenme algoritmaları kullanımı ile duman algılamada mesafe kaynaklı doğruluk problemlerinin en aza indirilmesi planlanmaktadır.

### Yazar Katkısı

Bu makale Mehmet YÜCEL'in Bekir AKSOY'un birinci danışmanlığında hazırlanmış olduğu yüksek lisans tezinden üretilmiştir.

### Etik Beyanı/Declaration of Ethical Code

Bu çalışmada, "Yükseköğretim Kurumları Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiği Yönergesi" kapsamında uyulması gerekli tüm kurallara uyulduğunu, bahsi geçen yönergenin "Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiğine Aykırı Eylemler" başlığı altında belirtilen eylemlerden hiçbirinin gerçekleştirilmediğini taahhüt ederiz.

### Kaynakça

- [1] Alsammak, I. L. H., Mahmoud, M. A., Aris, H., Alkilabi, M., & Mahdi, M. N. (2022). The use of swarms of unmanned aerial vehicles in mitigating area coverage challenges of forest-fire-extinguishing activities: a systematic literature review. *Forests*, 13(5), 811, 1-31.
- [2] Avcı, M., ve Korkmaz, M. (2021). Türkiye'de orman yangını sorunu: Güncel bazı konular üzerine değerlendirmeler. *Turkish Journal of Forestry*, 22(3), 229-240.
- [3] Torul, M. O. L. (1993). Orman yangınları. *Journal of the Faculty of Forestry Istanbul University*, 43(3-4), 69-78.
- [4] Caton, O., Markoski, A., Osterloh, E., & Tallan, J. 2019. Exploring the Potential for Drone Use in Firefighting: Addressing Forest Fires in Albania. [https://web.cs.wpi.edu/~rek/Projects/EXINN\\_Proposal.pdf](https://web.cs.wpi.edu/~rek/Projects/EXINN_Proposal.pdf) (Erişim tarihi: 17 Ocak 2023).
- [5] Roldán-Gómez, J. J., González-Gironda, E., ve Barrientos, A. (2021). A survey on robotic technologies for forest firefighting: applying drone swarms to improve firefighters' efficiency and safety. *Applied Sciences*, 11(1), 363, 1-18.
- [6] Akgül, A. S., ve Hacıoğlu, A. (2010). Gözetleme/saldırı amaçlı mini insansız hava aracı tasarımı ve üretimi. *Journal of Aeronautics & Space Technologies/Havacılık ve Uzay Teknolojileri Dergisi*, 4(3), 1-6.
- [7] Öztürk, K., & Şahin, M. E. (2018). Yapay sinir ağları ve yapay zekâ'ya genel bir bakış. *Takvim-i Vekayi*, 6(2), 25-36.

- [8] Bolat, T. 2022. Çelik Kalıplarda Görüntü İşleme Yöntemi İle Hasar Analizi. Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 53s, İstanbul.
- [9] Ertuğrul, M. (2005). Orman yangınlarının dünyadaki ve Türkiye'deki durumu. Bartın Orman Fakültesi Dergisi, 7(7), 43-50.
- [10] Innocente, M. S., & Grasso, P. 2019. Self-organising swarms of firefighting drones: Harnessing the power of collective intelligence in decentralised multi-robot systems. *Journal of Computational Science*, 34, 80-101.
- [11] Carmona, P., Climent, F., & Momparler, A. (2019). Predicting failure in the U.S. banking sector: An extreme gradient boosting approach. *International Review of Economics & Finance*, 61, 304-323.
- [12] Friedman, J. H. (2001). Greedy function approximation: a gradient boosting machine. *The Annals of Statistics*, 29(5), 1189-1232.
- [13] Chen, T., & Guestrin, C. 2016. Xgboost: A Scalable Tree Boosting System. *Proceedings of the 22nd Acm Sigkdd International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining*. August 13-17, California, 785-794.
- [14] Yeşilyurt, S., & Dalkılıç, H. 2021. Xgboost ve Gradient Boost Machine ile Günlük Nehir Akımı Tahmini. 3rd International Symposium of III Engineering Applications on Civil Engineering and Earth Sciences. September 22-24, Karabük, 1-9.
- [15] Büyükkör, Y. (2022). 21. In Xgboost Makine Öğrenmesi Yöntemi Kullanılarak Ham Petrol Fiyatının Tahminlenmesi. SS 219-238. *Yüzyılda İktisadî anlamak: güncel ekonometrik zaman serileri çalışmaları*. Gazi Kitabevi, Ankara.
- [16] Ercire, M., & Ünsal, A. 2021. Kısa süreli güç kalitesi bozulmalarının dalgacık analizi ve rastgele orman yöntemi ile sınıflandırılması. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 26(3), 903-920.
- [17] Arat, M. M. (2022). PyCaret ve Flask ile arkaplanında bir makine öğrenmesi modeli bulunan bir web uygulaması oluşturmak. [https://mmuratarat.github.io/turkish/2022-01-12/webapp\\_with\\_PyCaret\\_and\\_Flask#:~:text=PyCaret%2C%20Python'da%20makine%20%C3%B6%C4%9Frenmesi,%C3%B6%C4%9Frenmesi%20ve%20model%20y%C3%B6netimi%20arac%C4%B1d%C4%B1r.](https://mmuratarat.github.io/turkish/2022-01-12/webapp_with_PyCaret_and_Flask#:~:text=PyCaret%2C%20Python'da%20makine%20%C3%B6%C4%9Frenmesi,%C3%B6%C4%9Frenmesi%20ve%20model%20y%C3%B6netimi%20arac%C4%B1d%C4%B1r.) (Erişim tarihi: 27 Haziran 2023).
- [18] Sayın, H., Salman, O. K. M., Aksoy, B., ve Köse, U. 2020. EKG Sinyallerini kullanarak Kalp Ritimlerinin Yapay Zekâ ile Sınıflandırılması. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 9(1), 7-15.
- [19] Hossain, F. A., Zhang, Y., Yuan, C., ve Su, C. Y. (2019) Wildfire Flame and Smoke Detection Using Static Image Features and Artificial Neural Network. 2019 1st International Conference on Industrial Artificial Intelligence. September 30, China, 1-6.
- [20] Seydi, S. T., Saeidi, V., Kalantar, B., Ueda, N., & Halin, A. A. 2022. Fire-Net: A Deep Learning Framework for Active Forest Fire Detection. *Journal of Sensors*, 2022(1), 8044390, 1-13.
- [21] Aksoy, B., Korucu, K., Çalışkan, Ö., Osmanbey, Ş., & Halis, H. D. (2021). İnsansız hava aracı ile görüntü işleme ve yapay zekâ teknikleri kullanılarak yangın tespiti: örnek bir uygulama. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 9(6), 112-122.
- [22] Kinaneva, D., Hristov, G., Georgiev, G., Kyuchukov, P., & Zahariev, P. 2020. An Artificial Intelligence Approach to Real-Time Automatic Smoke Detection by Unmanned Aerial Vehicles and Forest Observation Systems. 2020 International Conference on Biomedical Innovations and Applications (BIA). 04 November, Bulgaria, 133-138.
- [23] Khan, A., Hassan, B., Khan, S., Ahmed, R., & Abuassba, A. (2022). DeepFire: a novel dataset and deep transfer learning benchmark for forest fire detection. *Hindawi Mobile Information Systems*, 2022, 1-14.
- [24] Yanık, A., Yanık, M., Güzel, M. S., & Bostancı, G. E. 2022. In Machine Learning-Based Early Fire Detection System Using A Low-Cost Drone, *Advanced sensing in image processing and IoT*. Gupta, R., Rana, A.K., Dhawan, S., Cengiz, K. ed. CRC Press, India, 365s.
- [25] Bushnaq, O. M., Chaaban, A., & Al-Naffouri, T. Y. 2021. The role of UAV-IoT networks in future wildfire detection. *IEEE Internet of Things Journal*, 8(23), 16984-16999.