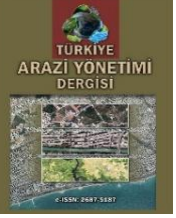




# Türkiye Arazi Yönetimi Dergisi

https://dergipark.org.tr/tr/pub/tayod  
e-ISSN: 2687-5187



## Derleme Makale

## İklim Değişikliği Bağlamında Arpa Tarlalarında İHA Tabanlı Akıllı İzleme ve Yönetim Sistemleri

Çağdas Can Toprak\*<sup>1</sup>, Zeki Erden<sup>1</sup>, Fatih Çığ<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Tillo Tarım ve Orman İlçe Müdürlüğü, 56870, Merkez /Siirt; cagdascan.toprak@siirt.edu.tr; zekierden@gmail.com

<sup>2</sup>Siirt Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Tarla Bitkileri Bölümü, 56220, Pınarca/Siirt; fatih@siirt.edu.tr

\*Sorumlu Yazar

### Makale Bilgisi

**Geliş** : 28/07/2025  
**Revize** : 09/02/2026  
**Kabul** : 05/05/2026  
**Yayın** : 26/06/2026



### Öz

İklim değişikliğinin tarımsal üretim üzerindeki etkileri, özellikle kuraklık, aşırı sıcaklık ve besin maddesi eksiklikleri gibi stres faktörlerinin sıklığı ve şiddetinin artmasıyla daha belirgin hâle gelmiştir. Bu doğrultuda, arpa (*Hordeum vulgare* L.) gibi stratejik tahıl ürünlerinde sürdürülebilir üretim modellerine duyulan ihtiyaç giderek artmaktadır. Arpanın görece kuraklığa dayanıklı yapısına rağmen, uzun süreli çevresel stres koşullarının verim ve kaliteyi olumsuz etkilediği bilinmektedir. Son yıllarda tarımsal izleme ve yönetim süreçlerinde öne çıkan insansız hava araçları (İHA), özellikle kuraklık, ısı stresi ve azot eksikliği gibi sorunların erken safhada belirlenmesinde etkili araçlar olarak dikkat çekmektedir. Multispektral ve termal sensörlerle donatılan İHA sistemleri, uzaktan algılama ve yapay zekâ destekli analizlerle entegre edilerek karar destek mekanizmalarına veri sağlamaktadır. Bu doğrultuda, İHA tabanlı akıllı tarım uygulamalarının arpa üretiminde çevresel streslerin izlenmesi ve yönetimi üzerindeki potansiyeli tartışılmakta, iklim değişikliğine uyumlu üretim stratejileri çerçevesinde teknolojik olanaklar ile arazi kullanımı ve mülkiyet boyutu ele alınmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** İklim, arpa, sensör, tarım, üretim stratejisi.

Bu çalışma, [Creative Commons Attribution \(CC BY-SA\) lisansı](#) kapsamında açık erişim olarak [yayımlanmak üzere sunulmuştur.](#)



**Telif Hakkı:** © 2026 Yazara aittir.

## UAV-Based Smart Monitoring and Management Systems in Barley Fields in the Context of Climate Change

### Abstract

The effects of climate change on agricultural production have become increasingly evident, particularly with the rising frequency and intensity of stress factors such as drought, extreme heat, and nutrient deficiencies. In this context, there is a growing need for sustainable production models in strategic cereal crops like barley (*Hordeum vulgare* L.). Although barley is relatively tolerant to drought, prolonged exposure to environmental stress conditions is known to negatively impact both yield and quality. In recent years, unmanned aerial vehicles (UAVs) have gained prominence in agricultural monitoring and management processes, offering effective tools for the early detection of critical issues such as drought, heat stress, and nitrogen deficiency. Equipped with multispectral and thermal sensors, UAV systems provide high-resolution data that can be integrated with remote sensing and artificial intelligence-based analytical tools to support decision-making processes. Accordingly, the potential of UAV-based smart farming applications for monitoring and managing environmental stresses in barley production is examined, with technological opportunities, land use, and property rights discussed within the framework of climate change-adaptive production strategies.

**Keywords:** Climate, barley, sensor, agriculture, production strategy.

### Kaynak Göster

Toprak, Ç. C., Erden, Z., & Çığ, F. (2026). İklim Değişikliği Bağlamında Arpa Tarlalarında İHA Tabanlı Akıllı İzleme ve Yönetim Sistemleri. *Türkiye Arazi Yönetimi Dergisi*, 8, 1, 01-13. <https://doi.org/10.51765/tayod.1750188>

## 1. Giriş

Küresel iklim değişikliği, tarımsal üretim sistemlerinde öngörülemeyen çevresel stres faktörlerinin sıklığını ve şiddetini artırarak özellikle tahıl üretiminde sürdürülebilirliği tehdit eden başlıca sorunlardan biri hâline gelmiştir. Bu değişim, tarım alanlarının sıcaklık, yağış ve toprak besin dengesi açısından giderek daha değişken koşullara maruz kalmasına neden olmakta ve özellikle su stresi, ısı dalgaları ve azot yetersizliği gibi abiyotik stres faktörlerinin yaygınlaşmasına yol açmıştır (Lesk vd., 2016).

Arpanın (*Hordeum vulgare* L.), dünya genelinde hem insan tüketimi hem de hayvan yemi olarak yaygın kullanılan stratejik bir tahıl türü olduğu bilinmektedir. Kuraklığa dayanıklı yapısıyla öne çıkan arpanın, yarı kurak bölgelerde alternatif ürün olarak benimsenmiş olsa da, iklim değişikliğiyle birlikte artan çevresel stresler bu bitkinin verim ve kalite özelliklerini olumsuz yönde etkilediği bildirilmiştir (Baik & Ullrich, 2008). Özellikle yetiştirme döneminde karşılaşılan kuraklık ve yüksek sıcaklık, başaklanma ve dane dolum süreçlerinde fizyolojik bozulmalara yol açarak üretim potansiyelini sınırlandırmaktadır (Rollins vd., 2013). Bu doğrultuda, tarımda dijital teknolojilerin entegrasyonu, iklimsel risklere karşı erken uyarı sistemlerinin geliştirilmesi açısından büyük önem taşımaktadır.

Son yıllarda, insansız hava araçları (İHA) ile donatılmış uzaktan algılama sistemleri, bitki sağlığının değerlendirilmesinde, stres koşullarının haritalanmasında ve üretim kararlarının optimize edilmesinde yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır (Zhang & Kovacs, 2012). İHA'lar, multispektral ve termal görüntüleme teknolojileriyle entegre edildiğinde, geleneksel izleme yöntemlerine kıyasla daha hızlı, daha doğru ve daha düşük maliyetli çözümler sunmaktadır (Tripicchio vd., 2015). Söz konusu sistemlerin, topraktan veya bitkiden gelen görsel ve spektral verileri analiz ederek, su eksikliği, ısı stresi ya da besin noksanlıklarını erken dönemde saptama imkânı sağladığı rapor edilmiştir (Mulla, 2013).

Özellikle arpa gibi çevresel koşullara duyarlı ürünlerde, insansız hava araçları (İHA) destekli akıllı tarım sistemlerinin kullanımı, sürdürülebilir üretim hedefleri doğrultusunda hem verimliliğin artırılmasına hem de su ve gübre gibi girdilerin daha rasyonel kullanılmasına olanak sağlamaktadır. Bu bağlamda, İHA tabanlı uzaktan algılama teknolojilerinin arpa tarımında çevresel streslerin erken tespiti, müdahale stratejilerinin geliştirilmesi ve iklim değişikliğine uyum süreçlerindeki rolü ele alınarak derlenmiş, çalışma, arpa (*Hordeum vulgare* L.) üretiminde İHA tabanlı stres izleme ve yönetim uygulamalarının mevcut durumunu ortaya koymak amacıyla yürütülmüştür. İncelenen literatür, sensör, fenoloji ve stres etkileşimi çerçevesinde sınıflandırılarak sentezlenmiş ve arpa üretimine yönelik uygulamaya dönük çıkarımlar ortaya konulmuştur.

## 2. İHA Tabanlı Tarımsal Gözlem ve Teknolojilerin Evrimi

Tarımsal üretimde izleme, değerlendirme ve karar destek süreçleri, uzun yıllar boyunca geleneksel yöntemlerle yürütülmüştür. Bu yöntemler genellikle manuel gözlem, arazi bazlı örnekleme ve laboratuvar analizlerine dayanmaktadır. Ancak bu yaklaşımlar, büyük tarım alanlarında hem zaman hem de iş gücü açısından yüksek maliyetli olmakta, ayrıca stres faktörlerinin mekânsal değişkenliğini anlık olarak yansıtmakta yetersiz kalmaktadır (Mulla, 2013). Tarımsal verimliliğin artırılması ve çevresel risklere karşı zamanında müdahale edilebilmesi açısından daha hassas, hızlı ve bütüncül gözlem teknolojilerine ihtiyaç duyulmaktadır.

İnsansız hava araçları (İHA), son on yılda tarımsal uzaktan algılama alanında devrim niteliğinde bir dönüşüm oluşturmuştur. Multispektral, hiperspektral ve termal kameralarla donatılan İHA'lar, bitki örtüsünün büyüme durumu, su içeriği, fotosentetik aktivite düzeyi ve stres belirtilerine ilişkin yüksek çözünürlüklü görüntüler sağlayarak, üretim alanlarının dijital haritalanmasına olanak tanımıştır (Zhang & Kovacs, 2012). Bu sayede, bitki gelişiminin mekânsal

ve zamansal değişimi milimetre düzeyinde hassasiyetle takip edilebilmekte; bu da kaynak kullanımının optimizasyonuna ve verim kayıplarının önlenmesine doğrudan katkı sunmuştur.

Multispektral görüntüleme, özellikle bitki indekslerinin (Normalize Edilmiş Bitki Örtüsü İndeksi) hesaplanmasında yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu indeksler sayesinde, bitki sağlığı ve yeşil aksam gelişimi hakkında hızlı yorumlar yapılabilmekte, kuraklık ve azot eksikliği gibi abiyotik stresler erken evrede saptanabildiği kaydedilmiştir (Bendig vd., 2014). Termal kameralar ise yaprak yüzeyi sıcaklığını ölçerek su stresi ve stomal aktiviteye ilişkin dolaylı veriler üretmektedir. Hiperspektral sistemler ise çok daha dar spektral bant aralıkları sayesinde fizyolojik bozuklukları erken aşamada teşhis etme potansiyeline sahip olduğu belirlenmiştir (Aasen vd., 2018).

İHA'ların sağladığı bu yüksek çözünürlüklü, zamana duyarlı veriler; yapay zekâ, makine öğrenmesi ve Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) ile entegre edilerek modern tarımda karar destek mekanizmalarının temel bileşeni hâline gelmiştir (Tsouros vd., 2019). Özellikle arpa gibi iklim duyarlılığı yüksek ürünlerde, bu sistemler sayesinde çevresel stres faktörlerine karşı proaktif müdahaleler mümkün hâle gelmekte, hem verim hem kalite açısından olumlu kazanımlar elde edilmiştir.

Arpa tarımında insansız hava araçlarına (İHA) dayalı uzaktan algılama uygulamalarının etkinliği, bitkinin fenolojik gelişim evreleri ile doğrudan ilişkili olup, sensör performansının zamansal değişkenliğini ortaya koymaktadır. Son yıllarda yürütülen çalışmalar, multispektral ve termal görüntüleme sistemlerinin arpa bitkisinde ortaya çıkan çevresel stres faktörlerini belirleme kapasitesinin, bitkinin gelişim dönemine bağlı olarak farklılaştığını göstermiştir. Bendig vd., (2014), İHA tabanlı RGB ve multispektral görüntüleme tekniklerinin arpa biyokütle tahmininde yüksek doğruluk sağladığını ve özellikle kardeşlenme ile sapa kalkma dönemlerinde elde edilen NDVI değerlerinin bitki gelişimini güçlü biçimde temsil ettiğini bildirmiştir. Bu bulgu, erken vejetatif dönemlerde spektral indekslerin bitki büyüme dinamiklerini izleme açısından yüksek duyarlılığa sahip olduğunu ortaya koymaktadır. Ayrıca, arpa bitkisinde çevresel streslerin etkisi yalnızca bitki gelişimi ile sınırlı kalmamakta, fizyolojik ve metabolik süreçleri de kapsamaktadır. Rollins vd., (2013), kuraklık ve yüksek sıcaklık stresinin başaklanma ve dane dolum evrelerinde protein sentezi, fotosentetik aktivite ve su kullanım etkinliği üzerinde belirgin bozulmalara yol açtığını ortaya koymuştur. Söz konusu kritik dönemlerde termal görüntüleme tekniklerinin bitki su durumundaki değişimleri izleme kapasitesinin öne çıktığı belirlenmiştir. Jones vd., (2009), tepe örtüsü sıcaklığı ölçümlerinin stomal kapanma ve transpirasyon değişimlerini yansıtarak su stresinin erken teşhisinde yüksek doğruluk sunduğunu rapor etmiştir. Araştırmada termal sensörlerin özellikle üreme döneminde stres tespitinde multispektral sistemlere kıyasla tamamlayıcı bir rol üstlendiği belirtilmiştir.

Bitki beslenmesi bağlamında değerlendirildiğinde, spektral yansıtım temelli indekslerin azot durumunun belirlenmesinde önemli bir potansiyele sahiptir. Hansen & Schjoerring (2003), hiperspektral veriler ile yaprak azot içeriği arasında güçlü doğrusal ilişkiler bulunduğunu ortaya koyarken, Li vd., (2014) kırmızı kenar bantlarına dayalı indekslerin klorofil yoğunluğu ve azot seviyelerinin belirlenmesinde yüksek doğruluk sağladığını göstermiştir. Yürütülen bu çalışmalarda, multispektral ve hiperspektral sensörlerin vejetatif gelişim döneminde bitki beslenme yönetimine yönelik karar destek sistemlerinde kritik veri sağlayıcılar olduğu ortaya konulmuştur.

Mevcut literatür ışığında, arpa üretiminde İHA tabanlı uzaktan algılama uygulamalarının başarısının yalnızca kullanılan sensör tipine değil, aynı zamanda ölçümlerin gerçekleştirildiği fenolojik döneme ve uygulama zamanlamasına da güçlü biçimde bağlı olduğu kaydedilmiştir (Zhang & Kovacs, 2012). Özellikle termal, multispektral ve hiperspektral sensörlerin farklı gelişme dönemlerinde stres sinyallerine verdikleri tepkilerin değişkenlik gösterdiği bildirilmiştir (Cabrera-Bosquet vd., 2012; Sankaran vd., 2015). Mevcut çalışmaların büyük bir kısmı sensör performansını kuraklık, azot eksikliği veya ısı stresi gibi tekil stres faktörleri üzerinden

değerlendirilmiş, çoklu stres etkileşimlerinin fenolojik dönemlere bağlı dinamiklerini bütüncül olarak ele alan çalışmaların ise sınırlı kaldığı belirlenmiştir (Simic Milas vd., 2018). Bu durum, arpa üretiminde çoklu stres temelli izleme yaklaşımlarının, sensör-zamanlama-fenoloji etkileşimi çerçevesinde entegre biçimde ele alınmasına yönelik yeni araştırma gereksinimlerini açık biçimde ortaya koymaktadır.

### 3. Kuraklık Stresinin İHA ile Tespiti

Kuraklık, tarımsal üretimde en yaygın ve yıkıcı abiyotik stres faktörlerinden biridir. Arpa gibi kuraklığa dayanıklı tahıllarda dahi uzun süreli su kıtlığına bağlı olarak ciddi verim kayıpları ile sonuçlandığı belirtilmiştir (Blum, 2011). Özellikle dane dolum ve başaklanma gibi gelişimin kritik fenolojik evrelerinde su stresine maruz kalan bitkilerde, hem biyokütle üretimi hem de tane kalitesi belirgin şekilde azalmaktadır (Samarah, 2005). Bu çerçevede, kuraklık stresinin zamanında ve doğru bir şekilde tespit edilmesi, hem verim kayıplarının önlenmesi hem de su kaynaklarının verimli kullanımı açısından büyük önem taşımaktadır.

İnsansız hava araçları (İHA), kuraklık stresinin erken teşhisinde yüksek çözünürlüklü uzaktan algılama verileri sunarak, klasik gözlem yöntemlerinin ötesinde mekânsal ve zamansal doğruluk sağlamaktadır. Multispektral kameralarla elde edilen veriler, Normalize Edilmiş Bitki Örtüsü İndeksi (NDVI), Normalize Edilmiş Kırmızı Kenar İndeksi (NDRE) gibi bitki indekslerinin hesaplanmasında kullanılmakta; bu indeksler aracılığıyla araştırmacılar tarafından bitkideki fotosentetik aktivite, yaprak yoğunluğu ve klorofil içeriği gibi parametrelerin değerlendirilerek su stresi düzeyi analiz edilmiştir (Bendig vd., 2014; Hunt vd., 2005).

NDVI değerlerindeki düşüşler genellikle bitkinin su stresine maruz kaldığını gösterirken, NDRE gibi daha hassas indeksler, özellikle erken dönem stres tespiti için daha yüksek doğruluk sağlamaktadır (Gitelson vd., 1996). Öte yandan, termal görüntüleme sistemleri ile yaprak sıcaklığı ölçülebilmekte ve bu sayede stomal kapanma, transpirasyon azalması ve bitki bünyesindeki su eksikliği gibi fizyolojik tepkiler doğrudan tespit edilebilmektedir (Jones vd., 2009). Bitkideki sıcaklık artışı, genellikle su kaybının önlenmesi için stomaların kapanmasıyla ilişkili olduğundan, bu tür görüntüleme yöntemleri stresin başlamasından önce müdahale şansı sunmaktadır.

Kuraklık stresinin İHA ile izlenmesi, özellikle geniş arazilerde bölgesel farklılıkların haritalanmasını mümkün kılarak, su kaynaklarının hedefe yönelik kullanımına zemin hazırlamaktadır. Bu durumun hem ekonomik hem de çevresel sürdürülebilirlik açısından büyük bir avantaj sağladığı düşünülmüştür.

### 4. Isı Stresinin Takibi ve Haritalanması

Isı stresi, küresel iklim değişikliğinin tarımsal üretim üzerindeki en önemli etkilerinden biri olarak değerlendirilmektedir. Sıcaklık artışı, bitki metabolizmasında geri döndürülemez bozulmalara yol açmakta; özellikle fotosentez kapasitesi, solunum hızı ve transpirasyon gibi fizyolojik süreçleri doğrudan etkilemektedir (Wahid vd., 2007). Arpa gibi serin iklim tahıllarında, 30 °C'yi aşan sıcaklık değerleri, özellikle çiçeklenme ve tane dolum dönemlerinde verim ve kalite üzerinde belirgin kayıplara neden olduğu bildirilmiştir (Al-Khatib & Paulsen, 1990).

Geleneksel yöntemlerle ısı stresinin tespiti, genellikle geç aşamalarda mümkün olmakta ve bitkinin geri dönüşsüz zarar görmesiyle sonuçlanabilmektedir. Bu nedenle, ısı stresinin erken teşhisi ve mekânsal düzeyde haritalanması, etkili yönetim stratejileri açısından kritik öneme sahiptir. Buradan hareketle, insansız hava araçları (İHA) ile yapılan termal görüntüleme çalışmalarının, bitki yüzey sıcaklıklarının yüksek çözünürlükte belirlenmesini sağlayarak, stresin ilk belirtilerinin saptanmasına olanak tanıdığı kaydedilmiştir (Jones vd., 2009).

İHA'lara entegre edilen termal kameralar sayesinde, yaprak ve gövde sıcaklıklarının zamana bağlı değişimi izlenebilmekte, bu sayede stomaların kapanması, transpirasyonun azalması gibi ısıya bağlı fizyolojik tepkiler erken evrede fark edilebilmektedir (Leinonen & Jones, 2004).

Özellikle " Bitki Örtüsü Sıcaklık Düşüklüğü (CTD)" değeri, bitkinin çevresel koşullara verdiği ısı bazı tepkinin ölçülmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır (Amani vd., 1996). Bu değerler, hem bireysel bitki performansının hem de tarla genelinde mikroiklim etkilerinin ayrıntılı olarak haritalanmasına imkân sağlar.

Isı stresinin mekânsal dağılımını gösteren bu haritalar, üreticiye lokal sıcak dalgalarının etkilediği alanları belirleme, sulama önceliklendirmesi yapma ve stres dayanıklılığı yüksek çeşitlerin adaptasyon bölgelerini saptama gibi kararlar açısından yol gösterici olmaktadır (Zia vd., 2013). Böylece, hem üretim kayıplarının önüne geçileceği hem de kaynakların etkin verimli kullanılacağı düşünülmüştür.

## **5. Azot Eksikliğinin Belirlenmesi ve Gübreleme Kararlarının Optimizasyonu**

Azot (N), bitki büyümesi ve gelişimi için temel makro besin elementlerinden biridir. Özellikle yaprak gelişimi, protein sentezi ve klorofil üretimi gibi hayati süreçlerde doğrudan rol oynayan azot, arpa başta olmak üzere birçok tahıl türünün verim ve kalite parametrelerini belirleyen en kritik girdilerden biridir (Lawlor, 2002). Ancak tarımsal üretimde azotun eksik veya dengesiz uygulanması hem verim kayıplarına hem de çevresel zararlara neden olduğu yürütülen araştırmalarda kaydedilmiştir (Raun & Johnson, 1999). Bu nedenle, azot ihtiyacının sahaya özgü koşullarda doğru ve zamanında belirlenmesi, hassas gübreleme stratejileri açısından vazgeçilmezdir.

Geleneksel yöntemlerle azot durumu genellikle görsel semptomlar veya laboratuvar analizleri yoluyla değerlendirilmekte olup, bu yöntemler hem zaman alıcı hem de geniş alanlarda yetersiz kalmaktadır. Bu noktada, İHA tabanlı multispektral görüntüleme sistemleri, bitki örtüsünün spektral özelliklerini analiz ederek yaprak rengi, yoğunluğu ve biyokütle gibi değişkenler üzerinden azot durumunu yüksek hassasiyetle belirlenebildiği rapor edilmiştir (Tremblay vd., 2009).

Multispektral veriler kullanılarak hesaplanan bitki indeksleri – özellikle NDVI (Normalize Edilmiş Bitki Örtüsü İndeksi), GNDVI (Yeşil NDVI) ve RECI (Kırmızı Kenar Klorofil İndeksi) – yaprak azot içeriği ile güçlü ilişkiler göstermektedir (Clevers & Gitelson, 2013). NDVI, genel bitki sağlığı ve fotosentetik aktiviteyi ölçerken; GNDVI, yeşil dalga boyundaki yansımalara odaklanarak azot eksikliğine daha duyarlı sonuçlar sağlamaktadır. RECI ise özellikle klorofil miktarını dolaylı olarak yansıtarak, yaprak içi azot seviyelerinin belirlenmesinde yüksek doğruluk sunmaktadır (Li vd., 2014).

Bu spektral analizlerin çıktıları, değişken oranlı gübreleme (VRA) sistemlerine entegre edilerek sahaya özel azot uygulama haritalarının oluşturulmasını mümkün kılmaktadır. Böylece hem gereksiz azot uygulamaları önlenmekte hem de üretim maliyetleri ve çevresel riskler azaltılmaktadır (Mulla, 2013). Aynı zamanda, VRA ile entegre çalışan İHA sistemleri, büyüme dönemine bağlı olarak tekrarlanan izlemelere olanak sunarak dinamik bir azot yönetimi sağlamaktadır.

Arpa gibi azot duyarlılığı yüksek ürünlerde, söz konusu yaklaşım verim artışıyla birlikte protein kalitesinin de optimize edilmesini sağlayarak hem ekonomik hem de teknolojik sürdürülebilirliğe katkı sunduğu düşünülmüştür.

## **6. Yapay Zekâ Destekli Veri Analizi ve Karar Destek Sistemleri**

### **6.1. Yapay Zekâ Sistemleri**

İnsansız hava araçları (İHA) ile tarım alanlarından elde edilen multispektral, hiperspektral ve termal veriler, çok büyük hacimli ve çok boyutlu veri kümeleri oluşturmaktadır. Bu tür yüksek hacimli verilerin anlamlı bilgiye dönüştürülmesi ve üretim kararlarının bu bilgiler doğrultusunda optimize edilmesi, geleneksel analiz yöntemleriyle oldukça sınırlıdır. Bu nedenle, son yıllarda

makine öğrenmesi (ML) ve yapay zekâ (AI) algoritmaları, tarımsal karar destek sistemlerinin temel bileşenleri hâline gelmiştir (Kamilaris & Prenafeta-Boldú, 2018).

Yapay zekâ destekli sistemler, İHA kaynaklı veri kümelerinde gizli kalmış örüntüleri tanımlayarak çevresel streslerin sınıflandırılması ve şiddetinin değerlendirilmesinde önemli avantajlar sunmaktadır. Özellikle destek vektör makineleri (SVM), rastgele ormanlar (RF) ve yapay sinir ağları (ANN) gibi algoritmalar, bitki stres düzeylerinin yüksek doğrulukla belirlenmesini sağlayarak uzaktan algılama ile elde edilen spektral verilerin tarımsal uygulamalara entegrasyonunu kolaylaştırmaktadır (Cho vd., 2024; Khose vd., 2024).

Türkiye'de yapılan güncel çalışmalar da, yapay zekâ tabanlı analizlerin özellikle stres teşhisinde ve gübreleme kararlarının optimizasyonunda kullanılabilirliğini göstermektedir. Li vd., (2014), buğday tarlalarında NDVI ve NDRE verileriyle desteklenen yapay zekâ algoritmalarının, azot eksikliğini sahaya özgü olarak sınıflandırmada başarılı sonuçlar verdiğini rapor etmiştir.

Bu çerçevede, arpa tarımında da yapay zekâ destekli veri analizi sayesinde kuraklık, ısı stresi ve besin eksikliği gibi çoklu stres faktörlerinin birlikte modellenmesi ve bu modellere dayalı karar destek sistemlerinin oluşturulması mümkün hâle gelmiştir. İHA tabanlı multispektral ve termal verilerin makine öğrenmesi algoritmaları ile analiz edilmesinin, bitki stresinin sınıflandırılmasında ve tarımsal karar destek sistemlerinin geliştirilmesinde yüksek doğruluk sağladığı bildirilmiştir (Kamilaris & Prenafeta-Boldú, 2018; Tsouros vd., 2019). Bu sistemler, üreticiye yalnızca mevcut durumun değerlendirilmesini sunmakla kalmayıp, farklı üretim senaryolarına dayalı öneriler geliştirerek müdahale stratejilerinin zamanlamasını ve uygulama yoğunluğunu optimize edebilmektedir (Wolfert vd., 2017).

Karar destek sistemleri aynı zamanda coğrafi bilgi sistemleri (CBS) ile entegre edilerek mekânsal kararların alınmasında da kullanılır. Bu entegrasyon, tarımsal müdahale kararlarının sadece zamana değil, aynı zamanda arazi içi mekânsal farklılıklara da duyarlı hâle gelmesini sağlar (Zhang & Kovacs, 2012; Mulla, 2013; Wolfert vd., 2017). Bu doğrultuda, yapay zekâ tabanlı analizler, İHA sistemlerinden gelen yüksek çözünürlüklü verilerin anlamlandırılmasında ve arpa üretiminde stres temelli yönetim uygulamalarının geliştirilmesinde vazgeçilmez bir araç hâline gelmektedir.

Son yıllarda gerçekleştirilen çalışmalar, İHA ve uzaktan algılama tabanlı multispektral verilerin makine öğrenmesi algoritmaları ile birlikte kullanılmasının, bitki stres ve hastalıklarının teşhisinde yüksek doğruluk sağladığını ortaya koymuştur. Derin öğrenme tabanlı görüntü analizlerinin kullanıldığı çalışmalarda, bitki hastalıklarının sınıflandırılmasında doğruluk oranlarının %94–99 aralığına kadar ulaştığı rapor edilmiştir (Mohanty vd., 2016).

Uzaktan algılama ve makine öğrenmesi entegrasyonuna dayalı verim tahmin çalışmalarında ise, farklı ürün ve çevresel koşullar altında model performansının genellikle  $R^2 = 0.70-0.85$  aralığında değiştiği ve tek sensörlü yaklaşımlara kıyasla daha tutarlı sonuçlar sunduğu bildirilmiştir (Liakos vd., 2018). Bu eğilim, İHA, uydu ve farklı sensör kaynaklarından elde edilen verilerin birlikte analiz edildiği çalışmalarda doğruluk ve model kararlılığının arttığını ortaya koyan güncel çalışmalarla desteklenmiştir (Xing vd., 2025).

Ayrıca multisensör veri füzyonuna dayalı yaklaşımların, bitki fenotipleme ve stres sınıflandırma çalışmalarında yapısal ve fizyolojik özelliklerin birlikte değerlendirilmesine olanak tanıyarak karar destek sistemlerinin güvenilirliğini artırdığı vurgulanmıştır (Furbank & Tester, 2011).

## 6.2. Sensör ve Fenolojik Dönem İlişkisi

Arpa bitkisinin fenolojik gelişim evreleri, uzaktan algılama sensörlerinin çevresel stres faktörlerini tespit etme doğruluğunu belirleyen temel unsurlardan biri olarak değerlendirilmektedir. Bitkinin vejetatif gelişim döneminde klorofil yoğunluğu, yaprak alan indeksi ve biyokütle birikimi hızlı değişim gösterdiğinden, bu evrede multispektral sensörlerden

elde edilen NDVI ve kırmızı kenar (red-edge) tabanlı indekslerin bitki sağlığının değerlendirilmesinde yüksek duyarlılık sağladığı rapor edilmiştir. Eitel vd., (2014), hiperspektral yansıtım verilerinin bitki azot içeriği ile güçlü ilişkiler ortaya koyduğunu gösterirken, Li vd., (2014) kırmızı kenar bantlarına dayalı indekslerin klorofil yoğunluğundaki değişimleri hassas biçimde yansıtıldığını ortaya koymuştur. Söz konusu bulgular, multispektral ve hiperspektral sensörlerin erken gelişim evrelerinde bitki beslenme durumunun izlenmesi açısından kritik bir araç olduğunu göstermektedir.

Arpa bitkisinin üreme evrelerine geçişle birlikte çevresel streslere karşı duyarlılık artmakta ve özellikle başaklanma ile çiçeklenme dönemlerinde sıcaklık kaynaklı fizyolojik değişimler belirgin hâle gelmektedir. Bu süreçte termal görüntüleme tekniklerinin bitki su dengesi ve stomal aktiviteyi dolaylı olarak yansıtan tepe örtüsü (canopy) sıcaklığı ölçümleri aracılığıyla stres teşhisinde önemli avantajlar sağladığı kaydedilmiştir. Amani vd., (1996), canopy sıcaklığı depresyonunun bitki verimi ile yakından ilişkili olduğunu ortaya koyarken, Jones vd., (2009) termal görüntüleme verilerinin transpirasyon dinamiklerini yansıtarak su stresinin erken belirlenmesinde güvenilir bir fizyolojik gösterge sunduğunu rapor etmiştir. Bu durum, termal sensörlerin özellikle üreme döneminde stres izleme çalışmalarında multispektral sensörlerle tamamlayıcı bir rol üstlendiğini göstermektedir.

Dane dolmuş dönemi ise arpa bitkisinde verim oluşumunun en kritik aşamalarından biri olup su stresine karşı yüksek hassasiyet göstermektedir. Bu dönemde fotosentetik aktivitedeki değişimlerin erken tespit edilmesi, verim kayıplarının önlenmesi açısından büyük önem taşımaktadır. Bendig vd., (2014), İHA tabanlı multispektral görüntüleme sistemlerinin arpa biyokütle ve bitki gelişimini yüksek mekânsal çözünürlükte izleyebildiğini ve bu sayede stres kaynaklı değişimlerin erken dönemde belirlenebildiğini göstermiştir. Bu sonuçlar, multispektral indekslerin dane dolmuş sürecinde bitki performansının izlenmesinde etkili göstergeler sunduğunu ortaya koymuştur.

Arpa yetiştiriciliğinde uzaktan algılama sensörlerinin etkin kullanımının yalnızca sensör teknolojisine seçimine değil, aynı zamanda sensör uygulama zamanlamasının fenolojik gelişim evreleriyle uyumlu planlanmasına bağlı olduğu anlaşılmaktadır. Bu yaklaşım, stres faktörlerinin erken teşhis edilmesini mümkün kılarak hassas tarım uygulamalarının etkinliğini artırmakta ve sürdürülebilir üretim stratejilerinin geliştirilmesine katkı sağlamaktadır.

Fenolojik gelişim evrelerine bağlı olarak sensör tabanlı stres tespit performansında ortaya çıkan değişkenlik, arpa üretimi özelinde Tablo 1’de karşılaştırmalı olarak belirtilmiştir.

**Tablo 1.** Arpa Üretiminde Fenolojik Gelişim Dönemlere Göre Sensör ve Stres Tespit Performansı.

Fenolojik Dönem	Stres Türü	Sensör	Kullanılan İndeks	Kaynak
Kardeşlenme	Biyokütle gelişimi	RGB, Multispektral	NDVI	Bendig vd., 2014
Vejetatif	Azot eksikliği	Multispektral/ Hiperspektral	Red-edge, NDVI	Eitel vd., 2014
Başaklanma	Isı stresi	Termal	CTD	Amani vd., 1996
Çiçeklenme	Isı ve su stresi	Termal	Canopy sıcaklığı	Jones vd., 2009
Dane dolumu	Kuraklık	Multispektral	NDVI	Bendig vd., 2014

Tablo 1’de arpa bitkisinde fenolojik gelişim evresine bağlı olarak çevresel streslerin türü ve bu streslerin en etkili biçimde tespit edildiği sensör–indeks kombinasyonlarının değiştiğini, vejetatif dönemde multispektral/hiperspektral indekslerin beslenme ve biyokütle izleme açısından öne çıktığını, üreme dönemlerinde ise termal sensörlerin ısı ve su stresinin belirlenmesinde daha belirleyici olduğunu ortaya konulmuştur.

## 7. Yapısal Arazi Kullanımı, Kadastro ve Mülkiyet Boyutu

İklim değişikliğinin tarımsal üretim üzerindeki olumsuz etkileri yalnızca biyofiziksel stres faktörleriyle sınırlı olmayıp, aynı zamanda arazi kullanımı, kadastro düzenlemeleri ve mülkiyet yapıları üzerinde de belirgin yansımalar oluşturmaktadır. Özellikle arpa gibi yarı kurak bölgelerde yaygın olarak yetiştirilen stratejik tahılların sürdürülebilirliği, yalnızca teknolojik çözümlerle değil, aynı zamanda arazi yönetimi ve mülkiyet politikaları ile de yakından ilişkilidir. Arazi parçalanmasının küçük ölçekli üreticilerin teknolojik araçlara erişimini sınırlandırdığı ve bu durumun İHA tabanlı tarımsal izleme ve yönetim sistemlerinin etkin biçimde uygulanmasını güçleştirdiği bildirilmiştir (Demetriou, 2013).

Arazi parçalanması, İHA tabanlı uzaktan algılama uygulamalarında operasyonel verimliliği doğrudan etkileyen önemli bir yapısal faktör olduğu düşünülmüştür. Küçük ve düzensiz parseller, uçuş planlamasında rota optimizasyonunu zorlaştırmakta, görüntü örtüşme oranlarının standartlaştırılmasını güçleştirmekte ve veri toplama sürecinde mekânsal sürekliliğin sağlanmasını sınırlamaktadır. Nitekim Zhang & Kovacs (2012), hassas tarım uygulamalarında İHA uçuş performansının büyük ölçüde tarla büyüklüğü, parsel geometrisi ve uçuş rotası planlamasına bağlı olduğunu vurgulamıştır. Aynı yaklaşım kapsamında Tsouros vd., (2019), küçük ve parçalı tarım alanlarında uçuş yüksekliği, görüntü örtüşme oranı ve sensör çözünürlüğü gibi operasyonel parametrelerin veri doğruluğunu doğrudan etkilediğini rapor etmiştir.

Parsel ölçeğinin küçülmesi, İHA görüntülerinin mozaiklenmesi sırasında veri heterojenliğinin artmasına ve spektral analiz sonuçlarının güvenilirliğinin azalmasına yol açabilmektedir. Ayrıca farklı mülkiyet yapılarının veri paylaşımı ve koordinasyon süreçlerini sınırlaması, çoklu sensör verilerinin entegrasyonunu zorlaştırmaktadır. Bu durumun, hassas tarım uygulamalarının ekonomik sürdürülebilirliğini ve geniş alanlarda uygulanabilirliğini doğrudan etkilediği kaydedilmiştir (Mulla, 2013).

Bu bağlamda, arazi toplulaştırma politikalarının geliştirilmesi, kadastro verilerinin dijital ortamlarda erişilebilir hâle getirilmesi ve İHA operasyonlarının planlanmasında mekânsal veri altyapılarının kullanılması, arpa üretiminde akıllı tarım teknolojilerinin etkinliğini artıran temel unsurlar arasında değerlendirilmiştir.

Tarımsal arazilerin mülkiyet yapısındaki dağınıklık, özellikle İHA ile gerçekleştirilen uzaktan algılama çalışmalarında homojen veri toplama süreçlerini zorlaştırmakta ve karar destek sistemlerinde farklı ölçeklerde belirsizliklere yol açabilmektedir (Sklenicka, 2016).

Kadastro altyapısının güncel ve dijital olarak erişilebilir olması, uzaktan algılama ve yapay zekâ tabanlı karar destek mekanizmalarının etkinliği açısından kritik önem taşımaktadır. Güncel kadastro verilerinin İHA tabanlı izleme sistemleri ile entegrasyonu, su stresi, ısı dalgaları ve besin maddesi eksikliklerinin parsel bazında haritalanmasını kolaylaştırarak, sürdürülebilir arazi kullanım planlamasına katkı sağlamaktadır (Enemark, 2001). Ayrıca, iklim değişikliğinin etkileriyle birlikte tarım alanlarının farklı kullanım baskılarına maruz kalması (kentleşme, sanayi alanlarının genişlemesi) tarımsal üretim için ayrılan alanların daralmasına yol açmaktadır (FAO, 2020). Bu noktada mülkiyetin korunması, arazi toplulaştırma politikaları ve akıllı tarım uygulamalarının entegrasyonu, arpa gibi tahılların üretim potansiyelinin korunmasında stratejik bir unsur olarak öne çıkmaktadır.

## 8. Arpa için En İyi Uygulama Stratejileri

Arpa üretiminde İHA tabanlı hassas tarım uygulamalarının etkinliğinin artırılabilmesi için sensör teknolojilerinin bitkinin fenolojik gelişim evreleriyle uyumlu biçimde planlanması gerekmektedir. Vejetatif gelişim döneminde bitkide klorofil yoğunluğu ve biyokütle birikimi hızlı değişim gösterdiğinden, multispektral sensörlerden elde edilen spektral yansıtım verilerinin bitki azot durumunun haritalanmasında önemli avantajlar sunduğu bildirilmiştir. Bu kapsamda hiperspektral ve kırmızı kenar bantlarına dayalı indekslerin yaprak azot içeriğini yüksek

doğrulukla yansıtılabildiği ve beslenme yönetimine yönelik karar destek süreçlerinde güvenilir veri sağlayabildiği belirtilmiştir (Li vd., 2014).

Bitkinin üreme dönemine geçişle birlikte çevresel streslere karşı duyarlılık belirgin biçimde artmakta ve özellikle başaklanma evresi sıcaklık ve su dengesi açısından kritik bir eşik oluşturmaktadır. Bu dönemde termal görüntüleme teknikleri ile elde edilen canopy sıcaklığı verilerinin bitki su durumunu ve stomal aktiviteyi dolaylı olarak yansıtarak sulama yönetiminin optimize edilmesine katkı sağlayabildiği rapor edilmiştir (Jones vd., 2009). Termal sensörlerin sağladığı fizyolojik temelli verilerin, multispektral sistemlerden elde edilen yapısal bitki göstergeleriyle birlikte değerlendirilmesi, stres izleme doğruluğunu artıran tamamlayıcı bir yaklaşım sunmaktadır.

Dane dolum dönemi, arpa bitkisinde verim oluşumunun belirleyici aşamalarından biri olup su stresine karşı yüksek hassasiyet göstermektedir. Bu süreçte multispektral indekslerin fotosentetik aktivitedeki değişimleri erken aşamada belirleyebildiği ve biyokütle gelişimindeki sapmaları yüksek mekânsal çözünürlükte izleyebildiği belirtilmiştir (Bendig vd., 2014). Bu durum, stres kaynaklı verim kayıplarının önlenmesine yönelik erken müdahale stratejilerinin geliştirilmesine olanak sağlamaktadır.

Öte yandan, İHA sistemlerinden elde edilen yüksek hacimli verilerin yapay zekâ ve makine öğrenmesi algoritmaları ile analiz edilmesi, stres faktörlerinin sınıflandırılması ve yönetim kararlarının doğruluğunu önemli ölçüde artırmaktadır. Derin öğrenme ve veri füzyon tekniklerinin uzaktan algılama verileri ile entegrasyonunun, hassas tarım uygulamalarında karar destek sistemlerinin etkinliğini güçlendirdiği kaydedilmiştir (Kamilaris & Prenafeta-Boldú, 2018; Tsouros vd., 2019).

Multisensör yaklaşımlarının fenolojik gelişim evreleri dikkate alınarak entegre biçimde kullanılması, arpa üretiminde hem verim hem kalite stabilitesinin sağlanmasına katkı sunmaktadır. Bu yaklaşım, yalnızca üretim performansını artırmakla kalmayıp su ve gübre gibi girdilerin daha rasyonel kullanımına olanak sağlayarak sürdürülebilir tarım uygulamalarının geliştirilmesine de önemli katkılar sağlamaktadır.

## 9. Sonuçlar ve Öneriler

Bu çalışma, arpa özelinde sensör-fenoloji-stres etkileşimini bütüncül biçimde ele alarak, mevcut literatürde dağınık hâlde bulunan bilgileri uygulamaya dönük bir çerçevede sentezlemesi bakımından özgünlük sunmaktadır.

İklim değişikliğinin etkilerinin tarımsal üretim üzerindeki yoğunluğu her geçen yıl daha belirgin hâle gelmekte; kuraklık, ısı stresi ve besin elementi eksiklikleri gibi abiyotik faktörlerin sıklığı ve şiddeti artmaktadır (IPCC, 2022; Lesk vd., 2016). Bu yaklaşımla, arpa gibi stratejik tahıllarda hem verim hem kalite açısından kayıpları önleyebilmek ve sürdürülebilir üretim sistemlerini destekleyebilmek için dijital tarım teknolojilerinin entegrasyonu kaçınılmazdır. Bu çalışmada, İHA tabanlı izleme ve yönetim sistemlerinin, arpa tarımında çevresel streslerin erken tespiti ve yerinde yönetimi açısından sunduğu potansiyel kapsamlı bir şekilde ele alınmıştır.

İHA'ların sunduğu multispektral, hiperspektral ve termal görüntüleme kapasitesi sayesinde, kuraklık ve ısı stresi gibi tehditlerin bitki gelişiminin erken evrelerinde tespit edilmesi mümkün olmaktadır. Özellikle Normalize edilmiş bitki indeksleri (NDVI, NDRE, GNDVI vb.) ve yaprak sıcaklığı ölçümleri ile elde edilen veriler, bitki sağlığı hakkında detaylı bilgi sağlamaktadır (Bendig vd., 2014; Jones vd., 2009). Buna ek olarak, azot eksikliği gibi besin kaynaklı problemler, spektral veriler aracılığıyla hassas gübreleme uygulamalarına temel oluşturarak verimliliği artırırken çevresel etkiyi azaltmaktadır (Tremblay vd., 2009; Mulla, 2013).

Günümüzde bu yüksek çözünürlüklü verilerin analizinde yapay zekâ tabanlı algoritmaların kullanımı hızla artmaktadır. Makine öğrenmesi destekli sınıflandırma ve tahminleme teknikleri, sahaya özel stres haritalarının oluşturulmasına, gübreleme ve sulama kararlarının optimize edilmesine olanak tanımaktadır (Li vd., 2014; Kamilaris & Prenafeta-Boldú, 2018). Ayrıca, karar

destek sistemlerinin Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) ile entegrasyonu, mekânsal doğruluğu artırarak üretim planlamasında daha bütüncül yaklaşımlar sunmaktadır (Raihan, 2024).

İHA tabanlı izleme teknolojilerinin etkinliği, yalnızca teknik ve biyofiziksel parametrelerle değil, aynı zamanda arazi kullanım planlaması, kadastro altyapısı ve mülkiyet düzenlemelerinin sağladığı kurumsal çerçeve ile doğrudan ilişkilidir. Bu nedenle, gelecekte arpa üretiminde İHA destekli akıllı tarım uygulamalarının başarısı, teknolojik gelişmelerin yanı sıra mülkiyet ve arazi yönetimi politikalarının entegrasyonu ile mümkün olacağı düşünülmüştür. Bununla birlikte, İHA tabanlı tarımsal uygulamaların yaygınlaştırılması, sivil havacılık mevzuatı ve operasyonel güvenlik düzenlemeleri ile de yakından ilişkilidir. Avrupa Birliği'nde yürürlüğe giren insansız hava aracı operasyon yönetmeliği, İHA kullanımını risk temelli operasyon kategorileri kapsamında düzenlemekte ve operatör sertifikasyonu, uçuş yüksekliği ve veri güvenliği gibi kriterleri zorunlu hâle getirmektedir (European Commission, 2019). Benzer şekilde, Amerika Birleşik Devletleri'nde Federal Havacılık İdaresi tarafından uygulanan Part 107 düzenlemeleri, tarımsal İHA operasyonlarının lisanslandırılması ve uçuş güvenliği standartlarının belirlenmesini zorunlu kılmaktadır (FAA, 2021). Bu düzenlemelerin, İHA tabanlı hassas tarım uygulamalarının operasyonel uygulanabilirliğini doğrudan etkilediği bildirilmiştir.

Gelecek perspektifinde, sensör teknolojilerindeki gelişmeler, spektral çözünürlüğün artması ve İHA'ların yapay zekâ ile tam entegrasyonu sayesinde stres teşhisinde gerçek zamanlı analiz sistemleri geliştirilebilecektir. Ayrıca, çiftçi dostu mobil uygulamalar ve bulut tabanlı platformlar ile bu teknolojilerin erişilebilirliği artırılarak küçük ölçekli üreticilerin de bu sistemlerden faydalanması sağlanabilecektir (Trendov vd., 2019). Ayrıca, İHA tabanlı sistemlerin yaygın kullanımını sınırlandıran temel faktörlerden biri ekonomik maliyet kısıtlarıdır. Multispektral ve hiperspektral sensörlerin yüksek satın alma maliyetleri, veri işleme altyapısı gereksinimleri ve teknik uzmanlık ihtiyacı, özellikle küçük ölçekli üreticilerin bu teknolojilere erişimini zorlaştırmaktadır. Literatürde, İHA sistemlerinin ekonomik sürdürülebilirliğinin sensör maliyetleri, veri işleme yazılım giderleri ve operasyonel bakım maliyetleri ile doğrudan ilişkili olduğu belirtilmektedir (Tsouros vd., 2019; Zhang & Kovacs, 2012).

İHA tabanlı izleme ve yönetim sistemleri, arpa üretiminde iklim değişikliğine karşı adaptasyonu güçlendiren, verimliliği artıran ve çevresel sürdürülebilirliği destekleyen stratejik bir araç olarak ön plana çıkmaktadır. Bu teknolojilerin yaygınlaşmasının, yalnızca teknik olarak değil, aynı zamanda eğitimsel, ekonomik ve yönetsel destek mekanizmaları ile mümkün olabileceği düşünülmüştür. Dijital tarım teknolojilerinin etkin kullanımında veri standardizasyonu ve veri paylaşım altyapılarının geliştirilmesi kritik bir gereklilik olarak ortaya çıkmaktadır. İHA tabanlı sensörlerden elde edilen verilerin farklı platformlar ve karar destek sistemleri arasında birlikte çalışabilir olması, hassas tarım uygulamalarının doğruluğunu ve sürdürülebilirliğini artırmaktadır. Tarımsal veri yönetimi konusunda yürütülen çalışmalar, açık veri standartlarının oluşturulmasının çoklu sensör veri füzyonunun güvenilirliğini artırdığını ve karar destek sistemlerinin doğruluğunu güçlendirdiğini göstermektedir.

#### **Araştırmacıların Katkı Oranı**

**Çağdaş Can Toprak:** Kavramsallaştırma, Metodoloji, Yazılım,

**Zeki Erden:** Veri toplama, Veri düzenleme, Yazma-Özgün taslak hazırlama, Yazılım, Doğrulama,

**Fatih Çığ:** Görselleştirme, İnceleme, Yazma-İnceleme ve Düzenleme

Tüm yazarlar makalenin yayımlanmış son halini okumuş ve onaylamıştır.

#### **Çıkar Çatışması Beyanı**

Yazarlar arasında çıkar çatışması yoktur.

### Araştırma ve Yayın Etiği Beyanı

Çalışmada, araştırma ve yayın etiği ilkelerine aykırı herhangi bir husus bulunmadığı beyan edilmiş ve araştırmanın kapsamı itibarıyla etik kurul onayı gerektirmediği onaylanmıştır.

### Veri Erişilebilirliği

Bu çalışmada sunulan veriler, sorumlu yazardan talep üzerine temin edilebilir.

### Finansman

Bu çalışma herhangi bir dış finansman almamıştır

### Kısaltmalar

Bu makalede aşağıdaki kısaltmalar kullanılmaktadır:

AI	Yapay Zekâ
ANN	Yapay Sinir Ağları
Aİ	Arazi İdaresi
AY	Arazi Yönetimi
CBS	Coğrafi Bilgi Sistemi
CTD	Bitki Örtüsü Sıcaklık Düşüklüğü
GNDVI	Yeşil Normalize Edilmiş Fark Bitki Örtüsü İndeksi
İHA	İnsansız Hava Aracı
ML	Makine Öğrenmesi
NDRE	Normalize Edilmiş Kırmızı Kenar İndeksi
NDVI	Normalize Edilmiş Fark Bitki Örtüsü İndeksi
RECI	Kırmızı Kenar Klorofil İndeksi
RF	Rastgele Orman
RGB	Kırmızı-Yeşil-Mavi
SVM	Destek Vektör Makineleri
TAYOD	Türkiye Arazi Yönetimi Dergisi
VRA	Değişken Oranlı Uygulama

### Kaynaklar

- Aasen, H., Honkavaara, E., Lucieer, A., & Zarco-Tejada, P. (2018). Quantitative remote sensing at ultra-high resolution with UAV spectroscopy: A review of sensor technology, measurement procedures, and data correction workflows. *Remote Sensing*, 10(7), 1091. <https://doi.org/10.3390/rs10071091>
- Al-Khatib, K., & Paulsen, G. M. (1990). Photosynthesis and productivity during high temperature stress of wheat genotypes from major world regions. *Crop Science*, 30(5), 1127–1132. <https://doi.org/10.2135/cropsci1990.0011183X003000050034x>
- Amani, I., Fischer, R. A., & Reynolds, M. P. (1996). Canopy temperature depression association with yield of irrigated spring wheat cultivars in a hot climate. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 176(2), 119–129. <https://doi.org/10.1111/j.1439-037X.1996.tb00454.x>
- Baik, B. K., & Ullrich, S. E. (2008). Barley for food: Characteristics, improvement, and renewed interest. *Journal of Cereal Science*, 48(2), 233–242. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2008.02.002>
- Bendig, J., Bolten, A., Bennertz, S., Broscheit, J., Eichfuss, S., & Bareth, G. (2014). Estimating biomass of barley using crop surface models (CSMs) derived from UAV-based RGB imaging. *Remote Sensing*, 6(11), 10395–10412. <https://doi.org/10.3390/rs61110395>
- Blum, A. (2011). *Plant Breeding for Water-Limited Environments*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-1-4419-7491-4>
- Cabrera-Bosquet, L., Crossa, J., von Zitzewitz, J., Serret, M. D., & Luis Araus, J. (2012). High-throughput phenotyping and genomic selection: The frontiers of crop breeding converge. *Journal of integrative plant biology*, 54(5), 312–320. <https://doi.org/10.1111/j.1744-7909.2012.01116.x>

- Clevers, J. G., & Gitelson, A. A. (2013). Remote estimation of crop and grass chlorophyll and nitrogen content using red-edge bands on Sentinel-2 and-3. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 23, 344-351. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2012.10.008>
- Cho, S. B., Soleh, H. M., Choi, J. W., Hwang, W. H., Lee, H., Cho, Y. S., ... & Kim, G. (2024). Recent methods for evaluating crop water stress using ai techniques: A review. *Sensors*, 24(19), 6313. <https://doi.org/10.3390/s24196313>
- Demetriou, D. (2013). *The development of an integrated planning and decision support system (IPDSS) for land consolidation*. Springer Science & Business Media.
- European Commission. (2019). Commission Implementing Regulation (EU) 2019/947 of 24 May 2019 on the rules and procedures for the operation of unmanned aircraft. Official Journal of the European Union, L 152, 45-71. [https://eur-lex.europa.eu/eli/reg\\_impl/2019/947/oj](https://eur-lex.europa.eu/eli/reg_impl/2019/947/oj)
- Eitel, J. U., Magney, T. S., Vierling, L. A., & Dittmar, G. (2014). Assessment of crop foliar nitrogen using a novel dual-wavelength laser system and implications for conducting laser-based plant physiology. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 97, 229-240. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2014.09.009>
- Enemark, S. (2001). Land administration infrastructures for sustainable development. *Property Management*, 19(5), 366-383. <https://www.emerald.com/pm/article-pdf/19/5/366/2114454/02637470110410194.pdf>
- FAA. (2021). Summary of small unmanned aircraft rule (Part 107). Federal Aviation Administration (FAA), U.S. Department of Transportation.
- FAO. (2020). The State of the World's Land and Water Resources for Food and Agriculture. Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Furbank, R. T., & Tester, M. (2011). Phenomics – technologies to relieve the phenotyping bottleneck. *Trends in Plant Science*, 16(12), 635–644. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2011.09.005>
- Hansen, P. M., & Schjoerring, J. K. (2003). Reflectance measurement of canopy biomass and nitrogen status in wheat crops using normalized difference vegetation indices and partial least squares regression. *Remote Sensing of Environment*, 86(4), 542-553. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(03\)00131-7](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(03)00131-7)
- Hunt JR, E. R., Cavigelli, M., Daughtry, C. S. T., McMurtrey III, J., & Walthall, C. L. (2005). Evaluation of digital photography from model aircraft for remote sensing of crop biomass and nitrogen status. *Precision Agriculture*, 6, 359-378. <https://link.springer.com/article/10.1007/s11119-005-2324-5>
- Jones, H. G., Serraj, R., Loveys, B. R., Xiong, L., Wheaton, A., & Price, A. H. (2009). Thermal infrared imaging of crop canopies for the remote diagnosis and quantification of plant responses to water stress in the field. *Functional Plant Biology*, 36(11), 978-989. <https://doi.org/10.1071/FP09123>
- IPCC. (2022). *Climate change 2022: Impacts, adaptation and vulnerability*. Cambridge University Press.
- Gitelson, A. A., Merzlyak, M. N., & Lichtenthaler, H. K. (1996). Detection of red edge position and chlorophyll content by reflectance measurements near 700 nm. *Journal of Plant Physiology*, 148(3-4), 501-508. [https://doi.org/10.1016/S0176-1617\(96\)80285-9](https://doi.org/10.1016/S0176-1617(96)80285-9)
- Kamilaris, A., & Prenafeta-Boldú, F. X. (2018). Deep learning in agriculture: A survey. *Computers and Electronics in Agriculture*, 147, 70–90. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.02.016>
- Khose, S. B., & Mailapalli, D. R. (2024). UAV-based multispectral image analytics and machine learning for predicting crop nitrogen in rice. *Geocarto International*, 39(1). <https://doi.org/10.1080/10106049.2024.2373867>
- Lawlor, D. W. (2002). Limitation to photosynthesis in water-stressed leaves: Stomata vs. metabolism and the role of ATP. *Annals of Botany*, 89(7), 871–885. <https://doi.org/10.1093/aob/mcf110>
- Leinonen, I., & Jones, H. G. (2004). Combining thermal and visible imagery for estimating canopy temperature and identifying plant stress. *Journal of Experimental Botany*, 55(401), 1423–1431. <https://doi.org/10.1093/jxb/erh146>
- Lesk, C., Rowhani, P., & Ramankutty, N. (2016). Influence of extreme weather disasters on global crop production. *Nature*, 529, 84–89. <https://doi.org/10.1038/nature16467>
- Li, F., Mistele, B., Hu, Y., Chen, X., & Schmidhalter, U. (2014). Reflectance estimation of canopy nitrogen content in winter wheat using optimised hyperspectral spectral indices and partial least squares regression. *European Journal of Agronomy*, 52, 198-209. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2013.09.006>
- Liakos, K. G., Busato, P., Moshou, D., Pearson, S., & Bochtis, D. (2018). Machine learning in agriculture: A review. *Sensors*, 18(8), 2674. <https://doi.org/10.3390/s18082674>
- Mohanty, S. P., Hughes, D. P., & Salathé, M. (2016). Using deep learning for image-based plant disease detection. *Frontiers in Plant Science*, 7, 1419. <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.01419>

- Mulla, D. J. (2013). Twenty five years of remote sensing in precision agriculture: Key advances and remaining knowledge gaps. *Biosystems Engineering*, 114(4), 358–371. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2012.08.009>
- Raihan, A. (2024). A systematic review of Geographic Information Systems (GIS) in agriculture for evidence-based decision making and sustainability. *Global Sustainability Research*, 3(1), 1-24. <https://doi.org/10.56556/gssr.v3i1.636>
- Raun, W. R., & Johnson, G. V. (1999). Improving nitrogen use efficiency for cereal production. *Agronomy Journal*, 91(3), 357–363. <https://doi.org/10.2134/agronj1999.00021962009100030001x>
- Rollins, J. A., Habte, E., Templer, S. E., Colby, T., Schmidt, J., & von Korff, M. (2013). Leaf proteome alterations in the context of physiological and morphological responses to drought and heat stress in barley (*Hordeum vulgare* L.). *Journal of Experimental Botany*, 64(11), 3201–3212. <https://doi.org/10.1093/jxb/ert158>
- Samarah, N. H. (2005). Effects of drought stress on growth and yield of barley. *Agronomy for sustainable development*, 25(1), 145-149. <https://doi.org/10.1051/agro:2004064>
- Sankaran, S., Khot, L. R., Espinoza, C. Z., Jarolmasjed, S., Sathuvalli, V. R., Vandemark, G. J., ... & Pavek, M. J. (2015). Low-altitude, high-resolution aerial imaging systems for row and field crop phenotyping: A review. *European Journal of Agronomy*, 70, 112-123. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2015.07.004>
- Simic Milas, A., Cracknell, A. P., & Warner, T. A. (2018). Drones—The third generation source of remote sensing data. *International Journal of Remote Sensing*, 39(21), 7125–7137. <https://doi.org/10.1080/01431161.2018.1523832>
- Sklenicka, P. (2016). Classification of farmland ownership fragmentation as a cause of land degradation: A review on typology, consequences, and remedies. *Land Use Policy*, 57, 694–701. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2016.06.032>
- Tremblay, N., Wang, Z., Ma, B. L., Belec, C., & Vigneault, P. (2009). A comparison of crop data measured by two commercial sensors for variable-rate nitrogen application. *Precision Agriculture*, 10, 145-161. <https://link.springer.com/article/10.1007/s11119-008-9080-2>
- Trendov, N. M., Varas, S., & Zeng, M. (2019). Digital technologies in agriculture and rural areas: Status report. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Tripicchio, P., Satler, M., Dabisias, G., Ruffaldi, E., & Avizzano, C. A. (2015). Towards smart farming and sustainable agriculture with drones. In 2015 International Conference on Intelligent Environments, 140–143. IEEE. <https://doi.org/10.1109/IE.2015.29>
- Tsouros, D. C., Bibi, S., & Sarigiannidis, P. G. (2019). A review on UAV-based applications for precision agriculture. *Information*, 10(11), 349. <https://doi.org/10.3390/info10110349>
- Wahid, A., Gelani, S., Ashraf, M., & Foolad, M. R. (2007). Heat tolerance in plants: An overview. *Environmental and Experimental Botany*, 61(3), 199–223. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2007.05.011>
- Wolfert, S., Ge, L., Verdouw, C., & Bogaardt, M. J. (2017). Big data in smart farming – A review. *Agricultural Systems*, 153, 69–80. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2017.01.023>
- Zhang, C., & Kovacs, J. M. (2012). The application of small unmanned aerial systems for precision agriculture: A review. *Precision Agriculture*, 13, 693–712. <https://doi.org/10.1007/s11119-012-9274-5>
- Zia, S., Romano, G., Spreer, W., Sanchez, C., Cairns, J., Araus, J. L., & Müller, J. (2013). Infrared thermal imaging as a rapid tool for identifying water-stress tolerant maize genotypes of different phenology. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 199(2), 75-84. <https://doi.org/10.1111/j.1439-037X.2012.00537.x>
- Xing, Y., Liu, X., & Wang, X. (2025). Integrating UAVs, satellite remote sensing, and machine learning in precision agriculture: pathways to sustainable food production, resource efficiency, and scalable innovation. *Frontiers in Agronomy*, 7, 1670380. <https://doi.org/10.3389/fagro.2025.1670380>

**Yasal Uyarı:** Yayınlanan çalışmalardaki tüm içerik yalnızca yazar(lar) ve katkıda bulunanların sorumluluğundadır ve TAYOD ve/veya editör(ler)in görüşlerini yansıtmaz. TAYOD ve/veya editör(ler), bu yayınlarda yer alan herhangi bir bilgi veya materyalin kullanımından veya uygulanmasından kaynaklanan kişi veya mülk hasarından sorumlu tutulamaz.