BİYOSİSTEM MÜHENDİSLİĞİNDE GÜNCEL YAKLAŞIMLAR:

DİJİTAL TEKNOLOJİLER VE TARIMSAL UYGULAMALAR

EDİTÖR
HAYRETTİN KARADÖL













BİDG Yayınları

BİDGE Yayınları

Biyosistem Mühendisliğinde Güncel Yaklaşımlar: Dijital Teknolojiler ve Tarımsal Uygulamalar

Editör: Doç. Dr. Hayrettin KARADÖL

ISBN: 978-625-5474-52-0

1. Baskı
Sayfa Düzeni: Gözde YÜCEL
Yayınlama Tarihi: 2026-10-25
BİDGE Yayınları

Bu eserin bütün hakları saklıdır. Kaynak gösterilerek tanıtım için yapılacak kısa alıntılar dışında yayıncının ve editörün yazılı izni olmaksızın hiçbir yolla çoğaltılamaz.

Sertifika No: 71374
Yayın hakları © BİDGE Yayınları
www.bidgeyayinlari.com.tr - bidgeyayinlari@gmail.com
Krc Bilişim Ticaret ve Organizasyon Ltd. Şti.
Güzeltepe Mahallesi Abidin Daver Sokak Sefer Apartmanı No: 7/9 Çankaya / Ankara

ÖNSÖZ

Biyosistem mühendisliği; tarımsal üretim sistemleri, biyolojik süreçler ve mühendislik ilkeleri arasındaki köprüyü inşa eden, disiplinlerarası yapısıyla günümüzün en dinamik araştırma alanlarından birini oluşturmaktadır. Küresel ölçekte artan nüfus baskısı, iklim değişikliğinin tarımsal sistemler üzerindeki olumsuz etkileri ve doğal kaynakların hızla azalması; gıda güvencesini tehdit eden başlıca sorunlar arasında yer almaktadır. Bu zorluklara sürdürülebilir çözümler üretebilmek için biyosistem mühendisliğinin sunduğu bütüncül yaklaşım ve yenilikçi teknolojiler, bugün her zamankinden daha kritik bir önem taşımaktadır.

Biyosistem Mühendisliği Alanında Güncel Çalışmalar, alanın farklı boyutlarını ele alan özgün ve bilimsel açıdan güncel bölümlerden oluşmaktadır. Kitapta; akıllı tarım teknolojileri, biyokütle ve biyoyakıt sistemleri, dikey tarım uygulamaları, toprak ve su yönetimi, biyokömür teknolojileri, tarımsal mekanizasyon ve uzaktan algılama gibi birbiriyle ilişkili konular sistematik bir bütünlük içinde ele alınmaktadır. Her bölüm, kendi alanındaki mevcut bilgi birikimini derleyerek okuyucuya güncel bir bakış açısı sunmayı amaçlamaktadır.

Bölümlerini özeneyle hazırlayan tüm yazarlara emekleri için içtenlikle teşekkür eder; eserin bilim ve uygulama dünyasına katkı sağlamasını dilerim.

Doç.Dr. Hayrettin KARADÖL

İÇİNDEKİLER

TARIMSAL MEKANİZASYONDA NESNELERİN İNTERNETİ (IOT) VE UYGULAMALARI 1
HAMZA KUZU

TARIMSAL SULAMA YÖNETİMİNDE UZAKTAN ALGILAMA VE COĞRAFİ BİLGİ SİSTEMLERİ: YÖNTEMLER, UYGULAMALAR VE SINIRLILIKLAR 33
UMUT MUCAN

TARIMSAL ROBOTLARDA DİJİTAL İKİZ: MODELLEME, SANAL DEVREYE ALMA VE DOĞRULAMA YAKLAŞIMLARI 58
OSMAN ECEOĞLU, İLKER ÜNAL

DİKEY TARIMDA ÜRÜN KALİTESİNİN YÖNETİMİ: IŞIK, MİKROİKLİM VE BİTKİ BESLEMESİNİN ETKİLEŞİMLERİ 79
SEFA ALTIKAT

Biyokömürün Mikroplastik Kirliliğinin Kontrolündeki Potansiyeli: Toprak ve Su Sistemleri Üzerine Bir Değerlendirme 117
ALPERAY ALTIKAT

BÖLÜM 1

TARIMSAL MEKANİZASYONDA NESNELERİN İNTERNETİ (IoT) VE UYGULAMALARI

HAMZA KUZU[1]

Giriş

Tarımsal üretim, artan küresel gıda talebi ve azalan doğal kaynaklar nedeniyle teknolojik bir dönüşüm geçirmektedir. Endüstri 4.0'ın tarım sektörüne uyarlanmasıyla başlayan bu süreç, veri tabanlı donanım ve yazılımların kullanımını sağlamıştır. Üretim zincirinin her aşamasında devreye giren bu bilgi ve iletişim teknolojileri, iklimsel ve çevresel zorlukların aşılmasını doğrudan kolaylaştırmakta ve üretimsel riskleri en aza indirmektedir. Sensörler, otonom araçlar ve bulut tabanlı karar destek sistemlerinin eşgüdümlü olarak çalışması, modern tarım işletmelerinde kaynak optimizasyonunu sağlayarak sürdürülebilir verimlilik hedeflerine ulaşılmasına çok kritik ve yapısal bir zemin hazırlamaktadır. Bu bağlamda giriş bölümünde; öncelikle tarımda dijitalleşme süreci incelenecek, ardından tarımsal nesnelerin interneti kavramı tanımlanarak, söz konusu sistemlerin tarımsal sürdürülebilirlik üzerindeki temel hedefleri ortaya konulacaktır.

[1] Arş. Gör. Dr., Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi, Biyosistem Mühendisliği, Orcid: 0000-0001-8585-4467

1.1.Tarımda Dijitalleşme Süreci ve Tarım 4.0

Tarım sektörü, gıda güvencesi ve ekonomik kalkınma açısından en temel ve köklü üretim alanlarından biridir (Sevli, 2023). Dünya genelinde 2050 yılı itibarıyla yaklaşık 10 milyara ulaşması öngörülen insan nüfusu, küresel iklim değişikliği, daralan tarım arazileri ve tatlı su kaynakları üzerindeki artan baskı; gıda güvenliğinin sağlanması için geleneksel üretim yöntemlerine alternatif yaklaşımları zorunlu kılmaktadır (Kour & Arora, 2020; Pakdemirli & ark., 2021; İren & Yeşilay, 2025). Günümüzde küresel tatlı su kullanımının %70'ini ve arazi kullanımının %34'ünü gerçekleştiren tarım sektörü, doğal ekosistemler üzerinde ciddi bir tüketim baskısı oluşturmaktadır (Göl & Tarhan, 2024). Artan girdi (tohum, gübre, iş gücü) maliyetleri ile erozyon, kuraklık ve bitki hastalıkları gibi büyük ölçekli kısıtlamalar altında küresel gıda üretiminin %60 ila %70 oranında artırılması gerekliliği, bilişim ve iletişim teknolojilerinin tarımsal üretime entegrasyonunu hızlandırmıştır (Tzounis & ark., 2017; Sharma & Shivandu, 2024).

Tarımsal üretim yöntemleri, teknolojik gelişmelere paralel olarak tarihsel süreç içerisinde belirli evrelerden geçerek gelişmiştir. 20. yüzyılın başlarında insan ve hayvan gücünün yerini su ve buhar gücüyle çalışan mekanik ekipmanların alması, Tarım 1.0 (Mekanizasyon Devrimi) olarak adlandırılmıştır. 1950'li yıllardan itibaren elektrifikasyon, traktör kullanımının yaygınlaşması ve gübre ve pestisit gibi sentetik girdi uygulamalarıyla verimlilik odaklı endüstriyel Tarım 2.0 (Yeşil Devrim) dönemine geçilmiştir. 1990'lı yıllarda ise bilgisayar sistemleri, yazılım, otomasyon ve otomatik dümenleme teknolojilerinin sürece dâhil olmasıyla Tarım 3.0 (Hassas Tarım) kavramı ortaya çıkmıştır. Günümüzde Endüstri 4.0 bileşenlerinin tarıma entegre edilmesi sonucunda; kablosuz sensör ağları, büyük veri analitiği, otonom robotlar ve nesnelerin internetini (IoT) kapsayan fiziksel tarım alanlarının dijital ağlarla eşzamanlı yönetildiği siber-fiziksel Tarım 4.0 (Dijital Tarım) çağına

ulaşılmıştır. Bununla birlikte, yapay zekâ odaklı, insan merkezli, tarımsal emisyonların dengelendiği (karbon nötr) ve gelişmiş ıslah çalışmalarını barındıran tam otonom Tarım 5.0 (Bilişsel ve Otonom Tarım) evresine yönelik geçiş süreci de başlamıştır (Şahin, 2022; Thilakarathne & ark., 2025).

1.2.Tarımsal Nesnelerin İnterneti Kavramı

Nesnelerin interneti (Internet of Things-IoT) terimi, ilk olarak 1990'lı yılların başında ağa bağlı cihazlar (makineler arası iletişim-M2M) fikriyle şekillenmiş ve kavramsal olarak 1999 yılında Massachusetts Institute of Technology (MIT) Auto-ID Merkezi direktörü Kevin Ashton tarafından tanımlanmıştır (Kour & Arora, 2020; Erbey, 2024; Hassan & ark., 2024; Thilakarathne & ark., 2025). Ashton tarafından ortaya konan bu yaklaşım; radyo frekansı ile tanımlama (RFID) etiketleri ve çeşitli sensörlerle donatılmış fiziksel nesnelerin, insan müdahalesi olmaksızın veri paylaştığı bir ağı ifade etmektedir (Çaylı & ark., 2017; Tzounis & ark., 2017; Erbey, 2024). Bu kavram, Uluslararası Telekomünikasyon Birliği'nin (ITU) 2005 yılında yayımladığı raporla küresel ölçekte kabul görmüş ve tarımdan sanayiye geniş bir uygulama alanı kazanmıştır (Khanna & Kaur, 2019; Erbey, 2024; Hassan & ark., 2024).

Uluslararası literatürde IoT; benzersiz tanımlayıcılara (UID) sahip fiziksel donanım ve makinelerin, kablolu veya kablosuz ağ protokolleri aracılığıyla bulut platformlarıyla gerçek zamanlı veri alışverişi yapmasını sağlayan bütünleşik bir ağ mimarisidir (Tzounis & ark., 2017; Elijah & ark., 2018). Tarımsal nesnelerin interneti (IoAT/Agri-IoT) ise; toprak, bitki, çevre, mikroklima, tarımsal yapılar (seralar), su kaynakları, insansız hava araçları (İHA) ve tarım makineleri gibi üretim unsurlarının dijital algılayıcılarla ağa bağlanarak birbiriyle haberleşmesini (makineler arası iletişim) ifade etmektedir (Comart & ark., 2018; Elijah & ark., 2018; Çaylı, 2019;

Ayaz & ark., 2019). Tarımsal IoT sistemleri; fiziksel katman (sensörler ve aktüatörler), ağ ve iletişim katmanı (LoRaWAN, ZigBee, 5G, Wi-Fi), veri işleme katmanı (cihazda anlık işlem yapan uç bilişim, yerel ağ tabanlı sis bilişim ve uzak sunuculardaki bulut bilişim) ve uygulama katmanından oluşan modüler bir mimari üzerine kuruludur (Çaylı & ark., 2017; Tzounis & ark., 2017; Duman, 2022; Sharma & Shivandu, 2024; Hassan & ark., 2024). Bu yapı, birbirinden bağımsız çalışan geleneksel üretim yaklaşımından; tarla, bitki ve makine gibi temel fiziksel unsurların sanal ortamda birebir simüle edilerek dijital ikizlerinin (Digital Twins) oluşturulduğu, elde edilen verilerin yapay zekâ (AI) ve makine öğrenmesi (ML) algoritmalarıyla işlenerek otonom aktüatör komutlarına dönüştürüldüğü yazılım merkezli yeni bir üretim modeline geçişi temsil etmektedir (Ayaz & ark., 2019; Duguma & Bai, 2024; Hassan & ark., 2024; Sharma & Shivandu, 2024).

1.3.Tarımsal IoT Sistemlerinin Hedefleri ve Sürdürülebilirlik

Geleneksel tarım yöntemleri genel olarak insan gücüne, kişisel tecrübelere ve insan hatasına açık, zaman alıcı manuel arazi gözlemlerine dayanmaktadır (Aslan & Yavuzer Aslan, 2025). Tarımsal girdilerin (su, gübre, pestisit) arazi içi değişkenlikler dikkate alınmaksızın tekdüze (üniform) uygulanması; aşırı kaynak tüketimine, toprak tuzlanmasına ve yeraltı su kaynaklarının kirlenmesine yol açmaktadır (Thilakarathne & ark., 2025). Tarımsal IoT teknolojilerinin temel hedefi; üretim sürecinde doğru girdiyi, doğru yere, doğru zamanda ve doğru miktarda uygulama prensibiyle girdi israfını önlemek, işletme maliyetlerini düşürmek, ürün verim ve kalitesini artırmaktır (Türker, 2024; Aslan & Yavuzer Aslan, 2025). Literatürde IoT tabanlı bu sistemlerin sürdürülebilirlik vizyonu üç ana boyutta ele alınmaktadır (Tzounis & ark., 2017; Hassan & ark., 2024). Bunlar;

- Ekonomik Sürdürülebilirlik: Sensör tabanlı değişken oranlı sulama (Variable Rate Irrigation-VRI) ile değişken oranlı ilaçlama ve gübreleme (Variable Rate Application-VRA) sistemleri sayesinde su kullanımında %25-30'a varan tasarruf sağlanmakta; enerji ile pestisit ve gübre gibi tarımsal kimyasalların kullanımı en aza indirilmektedir (Duguma & Bai, 2024; Thilakarathne & ark., 2025). Toprak nemi, makro besin elementi (Azot, Fosfor, Potasyum-NPK) düzeyleri ve bitki hastalık etmenlerinin anlık olarak izlenmesi verim kayıplarını önemli ölçüde engellemekte ve ürün verimliliğini %15 ila %20'ye kadar artırırken; insansız sistemlerle yürütülen otonom arazi taramaları iş gücü maliyetlerini düşürmektedir (Tzounis & ark., 2017; Duguma & Bai, 2024; Hassan & ark., 2024; Thilakarathne & ark., 2025).

- Çevresel Sürdürülebilirlik: Tarımsal girdilerin yalnızca ihtiyaç duyulan oranda kullanılması; bitki besin maddelerinin topraktan yıkanarak uzaklaşmasını ve yeraltı suyu kirliliğini büyük ölçüde önlemektedir (Saranya & ark., 2023; Thilakarathne & ark., 2025). Veriye dayalı bu yönetim modeli, kimyasal kullanımını azaltmayı hedefleyen "Tarladan Sofraya" stratejisi ve Birleşmiş Milletler Sürdürülebilir Kalkınma Amaçları'nın (SKA) hedefleriyle doğrudan uyumluluk göstermektedir (Hassan & ark., 2024; Türker, 2024).

- Sosyal Sürdürülebilirlik: Tarımsal üretim aşamasından son tüketiciye kadar tüm tedarik zinciri boyunca şeffaf ve dijital bir izlenebilirlik sağlanarak gıda güvenliği güvence altına alınmakta ve ürün israfı büyük oranda azaltılmaktadır (Çakmakçı & Çakmakçı, 2023; Aslan & Yavuzer Aslan, 2025).

2. Tarımsal IoT Sistemlerinin Mimarisi ve Temel Bileşenleri

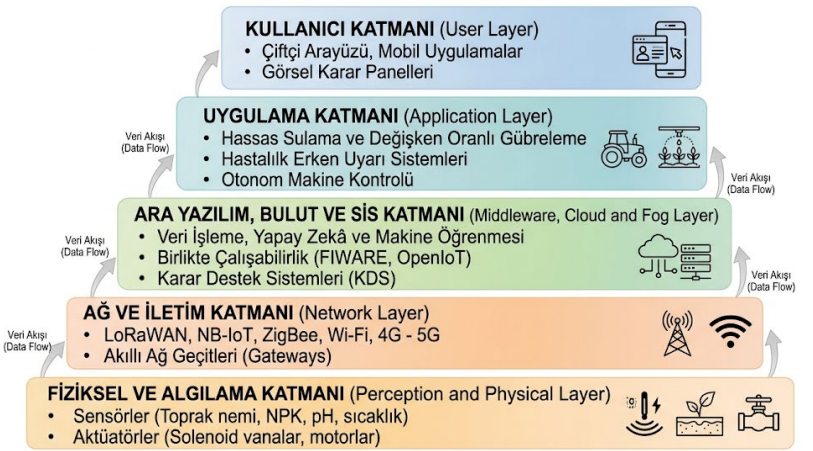
2.1. Katmanlı Sistem Mimarisi

Tarımsal nesnelerin interneti sistemleri; karmaşık arazi, sera veya hayvancılık işletmelerinden elde edilen fiziksel verilerin toplanarak dijital sinyallere dönüştürülmesi, bu verilerin kablosuz ağlar üzerinden veri işleme merkezlerine iletilerek bulut platformlarında analiz edilmesi ve sahadaki aktüatörlerin (eyleyiciler) otonom olarak kontrol edilmesine kadar uzanan modüler bir mimari üzerine kurulmaktadır (Çaylı & ark., 2017; Comart & ark., 2018; Saranya & ark., 2023; Thilakarathne & ark., 2025). Literatürde uluslararası iletişim ve teknoloji standartları (ISO/IEC, ITU-T) doğrultusunda yapılandırılan bu mimari, uygulamanın kapsamına ve kullanılan donanım altyapısına göre 3 ile 6 katman arasında farklılık gösteren yaklaşımlarla tanımlanmaktadır (Comart & ark., 2018; Kour & Arora, 2020; Duman, 2022; Hassan & ark., 2024; Thilakarathne & ark., 2025).

En temel düzeyde bu yapı; sahadaki fiziksel büyüklükleri algılayan algılama ve fiziksel katman, verileri ileten ağ ve iletim katmanı ile verileri işleyip kullanıcıya sunan uygulama katmanı olmak üzere üç katmanlıdır (Çaylı & ark., 2017; Comart & ark., 2018; Kour & Arora, 2020; Thilakarathne & ark., 2025). Daha gelişmiş tarım otomasyonlarında bu yapı; veri toplama, ağ yönetimi, bilgi yönetimi ve entegre uygulama gibi dört veya bulut servislerinin de eklendiği Şekil 1'deki gibi beş katmanlı modellere dönüşmektedir (Comart & ark., 2018; Duman, 2022; Hassan & ark., 2024). Yapay zekâ ve uç bilişim (edge computing) destekli modern sistemlerde ise saha ve algılama, mikrodenetleyici ve uç işleme, ağ ve iletim, veri depolama ve bulut analizi, karar destek ile uygulama ve otomasyon katmanlarından oluşan çok katmanlı bütünleşik bir mimari yapı oluşturulmaktadır (Çaylı & ark., 2017; Duman, 2022; Hassan & ark., 2024; Thilakarathne & ark., 2025). Alt katmanlardan alınan ham

veriler, ara yazılımlar (FIWARE, OpenIoT) vasıtasıyla bütünleştirilip (veri entegrasyonu) standartlaştırılır ve karar destek algoritmalarına aktarılır (Çaylı & ark., 2017; Comart & ark., 2018; Tzounis & ark., 2017; Saranya & ark., 2023).

Şekil 1. Tarımsal IoT Mimarisi ve Katmanlar



2.2. Veri Toplama ve Gömülü Sistemler

Algılama katmanı; sahadaki iklimsel, topraksal ve bitkisel parametreleri anlık ölçen sensörler, RFID etiketleri ve aktüatörler ile bu donanımları yerel düzeyde denetleyen mikrodenetleyicilerden oluşmaktadır (Çaylı, 2019; Erbey, 2024; Thilakarathne & ark., 2025). Tarımsal IoT sistemlerinde alınan kararların ve uygulamanın başarısı, doğrudan kullanılan sensörlerin ölçüm hassasiyetine, kalibrasyonuna ve kararlılığına bağlıdır (Çaylı & ark., 2017; Çaylı, 2019; Thilakarathne & ark., 2025).

- Toprak ve Su Analiz Sensörleri: Toprağın hacimsel su içeriğini analog voltaj (0-3V) üzerinden ölçen korozyona dayanıklı kapasitif nem sensörleri, matrik potansiyeli kPa cinsinden belirleyen tensiyometreler ile zaman alanı reflektometrisi (TDR) ve frekans alanı reflektometrisi

(FDR) probları sulama otomasyonunu yönlendirmektedir (Elijah & ark., 2018; Tzounis & ark., 2017; Çaylı, 2019; Duguma & Bai, 2024). Mikrobiyolojik faaliyetler ve tohum çimlenmesi için kök bölgesi sıcaklığını izlemede; -55°C ile +125°C aralığında ±0.5°C hassasiyetle ölçüm yapan, su geçirmez prob yapısına ve tek bir veri hattı üzerinden çoklu sensör ağı kurulmasına imkân tanıyan 1-Wire haberleşme protokolüne sahip DS18B20 dijital sensörü yaygın olarak kullanılmaktadır (Dayıoğlu & ark., 2016; Çaylı & ark., 2017; Thilakarathne & ark., 2025). Ayrıca toprağın asitlik ve tuzluluk dengesini izleyen pH ve elektriksel iletkenlik (EC) sensörleri ile makro besin ölçümü yapan optik ve elektrokimyasal NPK sensörleri değişken oranlı gübreleme için veri sağlar (Çaylı, 2019; Duguma & Bai, 2024; Güman & Günay, 2024). Bununla birlikte, özellikle kurak ve yarı kurak bölgelerde ikincil toprak tuzluluğunun izlenmesi ve yönetilmesinde; sensörlerden ve uzaktan algılama platformlarından (uydu ve İHA) elde edilen verilerin makine öğrenmesi algoritmalarıyla birleştirilmesi, toprak tuzluluk risk haritalarının yüksek doğrulukla oluşturulmasını sağlamaktadır (Kaplan & ark., 2024).

- İklim, Mikroklima ve Gaz Sensörleri: Ortam mikroklimasını ölçmek ve hastalık risklerini hesaplamak için düşük maliyetli DHT11, DHT22 (-40°C ile +80°C sıcaklık, %0-100 bağıl nem aralığı ve ±%2 bağıl nem hassasiyeti), SHT31, SHT35, LM35 ve atmosferik basıncı da ölçebilen yüksek hassasiyetli BME280 entegreleri hava istasyonlarında kullanılmaktadır (Taştan, 2019; Kour & Arora, 2020; Yaşar & Yurtaslan, 2025). Kapalı sera ve hayvancılık işletmelerinde; hava kalitesi ve amonyak (NH_3) ölçümü yapan MQ-135 ile dağılmasız kızılötesi (NDIR) tabanlı karbondioksit (CO_2) ve etilen (C_2H_4) gaz sensörleri

öne çıkmaktadır (Çaylı & ark., 2017; Duguma & Bai, 2024; Yaşar & Yurtaslan, 2025). Bu sistemler; ultraviyole (UV) ve kızılötesi (IR) ışınları ölçen SI1145, fotosentetik aktif radyasyon (PAR), rüzgâr hızı ve yaprak ıslaklık sensörleriyle biyolojik izlemeyi destekler (Çaylı, 2019; Kour & Arora, 2020; Yaşar & Yurtaslan, 2025).

- Optik, Görüntüleme ve Fenotiplendirme Sensörleri: İnsansız hava araçlarına veya sabit kulelere entegre edilerek normalize edilmiş fark bitki indeksi (NDVI) ve yaprak alan indeksi (LAI) haritalaması yapan RGB, multispektral ve hiperspektral kameralar; bitki gövdesindeki mikron düzeyindeki değişimleri izleyen dendrometreler, klorofil içeriğini belirleyen SPAD-502 ve GreenSeeker gibi aktif optik sensörler ile pasif kızılötesi (PIR) hareket sensörleri tarımsal erken uyarı mekanizmalarında kritik rol oynamaktadır (Ayaz & ark., 2019; Duguma & Bai, 2024; Aslan & Yavuzer Aslan, 2025; İren & Yeşilay, 2025). Bu kapsamda, spektroradyometreler ve İHA'lara entegre edilen çoklu spektral, hiperspektral ve termal uzaktan algılama teknolojileri; bitkilerdeki hastalık, su stresi ve besin noksanlığı gibi fizyolojik bozulmaların henüz insan gözüyle fark edilemeyecek kadar erken aşamalarda tespit edilmesinde kullanılmaktadır (Rufaioğlu & ark., 2024). Benzer şekilde, yer tabanlı sensör ağlarına ek olarak Görülebilir ve Yakın Kızılötesi Yansıma Spektroskopisi (VNIRS) gibi uzaktan algılama yöntemlerinin ekosisteme dâhil edilmesi, toprağın organik madde, nem ve tekstür gibi özelliklerinin herhangi bir fiziksel müdahale gerektirmeden yerinde hızlı ve hassas bir şekilde tespit edilmesine olanak tanımaktadır (Kara & ark., 2024).
- Mikrodenetleyiciler ve Saha İşleme: Sensörlerden gelen analog ve dijital verileri okuyan, kalibrasyon ve eşik

denetimi gibi ön işlemlerden geçiren ve valf veya motor gibi aktüatörleri yerel düzeyde kontrol eden gömülü sistem birimleri arasında ESP32-WROOM-32 ana kontrolcü olarak öne çıkmaktadır. Bu modülün çift çekirdekli mimarisi, tümleşik Wi-Fi ve Bluetooth düşük enerji (BLE) altyapısı ile çok sayıda genel amaçlı giriş ve çıkış (GPIO) kapasitesi sayesinde, tarımsal sensör ağlarında etkin bir donanım entegrasyonu ve haberleşme altyapısı sunmaktadır (Başçiftçi & Gündüz, 2019; Duman, 2022; Mamur & ark., 2022; Thilakarathne & ark., 2025). Basit röle tetiklemelerinde Arduino (Uno, Mega, Nano) geliştirme kartları tercih edilirken; yüksek işlem kapasitesi, Linux işletim sistemi desteği, kamera görüntü analizi ve yerel veritabanı (MySQL, SQLite) çalıştırabilme özellikleriyle Raspberry Pi serisi yerel uç bilişim merkezi olarak konumlandırılmaktadır (Dayıoğlu & ark., 2016; Çaylı & ark., 2017; Özcan & ark., 2020; Sümbül & ark., 2025). Özellikle Raspberry Pi destekli uç bilişim mimarileri; YOLO gibi derin öğrenme ağlarını ve morfolojik görüntü işleme tekniklerini otonom sistemlere entegre ederek, kapalı tarımsal ortamlardaki anlık ölçüm ve veri toplama süreçlerinde yüksek doğruluk ve hassasiyet sağlamaktadır (Kuzu & ark., 2026).

2.3. Veri İletimi ve Kablosuz Haberleşme Protokolleri

Tarımsal IoT sistemlerinin etkinliği, toplanan verilerin zorlu arazi koşullarında (fiziksel engeller, yoğun bitki örtüsünün neden olduğu sinyal zayıflamaları ve uzak mesafeler) ağ geçitlerine (gateway) ve bulut platformlarına minimum paket kaybıyla iletilmesine bağlıdır (Tzounis & ark., 2017; Duman, 2022; Duguma & Bai, 2024; Arman & ark., 2026). Tarımsal sensör ağlarında yaygın olarak kullanılan bu haberleşme protokollerinin teknik karakteristikleri Tablo 1'de (Kour & Arora, 2020; Duman, 2022;

Duguma & Bai, 2024; Thilakarathne & ark., 2025; Arman & ark., 2026) özetlenmektedir.

Tablo 1. Kablosuz haberleşme protokollerinin karşılaştırılması

Teknoloji	İletim Menzili	Güç Tüketimi	Veri Hızı	Kullanım Alanı
Wi-Fi	50-100 m	Yüksek	11-54 Mbps	Seralar, merkez binası, kamera veri akışı
ZigBee	10-100 m	Çok düşük	~250 Kbps	Mesh (örgüsel) sensör ağları
Bluetooth (BLE)	<100 m	Düşük	1-3 Mbps	Yakın mesafe, cihaz konfigürasyonu
LoRa ve LoRaWAN	2-20 km	Ultra düşük	0.3-50 Kbps	Geniş tarım arazileri, sulama otomasyonları
NB-IoT	1-15 km	Çok düşük	~200-250 Kbps	Hücresel kırsal izleme
Sigfox	10-40 km	Ultra düşük	100 Bps	Geniş alan, düşük veri paketi
4G ve 5G Mobil	Hücresel	Orta	Gbps	Otonom araçlar, İHA

Kısa mesafe iletişimde IEEE 802.15.4 standardındaki ZigBee, BLE ve yüksek bant genişliği sunan Wi-Fi ağları kullanılır (Tzounis & ark., 2017; Kour & Arora, 2020). Kırsal alanlarda şebeke elektriği ve internetin bulunmaması ise düşük güçlü geniş alan ağlarını (LPWAN) tarımsal iletişimin omurgası yapmıştır (Duman, 2022; Arman & ark., 2026). Semtech tarafından patentlenen ve Chirp yayılı spektrum (CSS) modülasyon tekniğini kullanan LoRa ve LoRaWAN, lisanssız ISM frekans bantlarında (Türkiye ve Avrupa'da 868 MHz) çalışması ve -134 dBm'ye varan yüksek alıcı hassasiyeti ile öne çıkmaktadır (Duman, 2022; Duguma & Bai, 2024; Arman & ark., 2026). Deneysel saha ölçümlerine göre LoRa; görüş hattının (LoS) sağlandığı açık tarım arazilerinde 15 ila 20 km mesafeye kadar kesintisiz veri iletimi sağlarken, ormanlık alanda 2 km, yapılaşmış alanlarda 1.5 km kapsama sunarak tek pille 5 ila 10

yıl çalışabilmektedir (Duman, 2022; Duguma & Bai, 2024; Arman & ark., 2026). Lisanslı hücresel bantlarda çalışan NB-IoT ve ultra dar bantlı Sigfox (UNB) da LPWAN çözümleri arasında yer alır (Kour & Arora, 2020; Duguma & Bai, 2024; Thilakarathne & ark., 2025). Büyük veri paketlerinin ve canlı video akışlarının işlendiği otonom makineler (tarımsal robotlar ve insansız traktörler) için ise 1 ms altı ultra güvenilir düşük gecikme (URLLC) ve gelişmiş mobil geniş bant (eMBB) özellikleriyle 5G hücresel ağları ile hibrit (ZigBee'den ağ geçidine, oradan 4G ve 5G ağlarına) mimariler tercih edilmektedir (Çakır & ark., 2022; Sharma & Shivandu, 2024; Thilakarathne & ark., 2025).

2.4. Veri İşleme ve Karar Destek Sistemleri

Tarımsal sensör ağlarından elde edilen yüksek hacimli zaman serisi verilerinin işletim komutlarına dönüştürülmesi gelişmiş hesaplama mimarileri ile gerçekleştirilir (Tzounis & ark., 2017; Elijah & ark., 2018; Duman, 2022). Düşük bant genişliğine sahip kısıtlı IoT cihazları için optimize edilen MQTT (Message Queue Telemetry Transport) protokolü yayıncı-abone (publish-subscribe) modeliyle çalışırken, RESTful mimarisine dayanan CoAP ile HTTP ve HTTPS protokolleri uzak veri erişiminde görev almaktadır (Çaylı & ark., 2017; Çaylı, 2019; Kour & Arora, 2020; Duman, 2022). Anlık sensör ölçümleri InfluxDB ve TimescaleDB gibi zaman serisi veri tabanlarında saklanmaktadır; toprak analizleri ve geçmiş döneme ait işletme verileri ise PostgreSQL ve MySQL gibi ilişkisel veya MongoDB gibi NoSQL veri tabanlarında depolanmaktadır (Dayıoğlu & ark., 2016; Çaylı & ark., 2017; Duman, 2022). Benzer şekilde, kapalı tarımsal üretim ortamlarında anlık izlenen parametrelerin (sıcaklık, bağıl nem, karbondioksit, amonyak) uzak sunuculara aktarılması sürecinde; PLC (Programlanabilir Mantık Denetleyicisi) donanımları ile MariaDB gibi ilişkisel veri tabanlarının senkronize çalıştığı web tabanlı uzak izleme mimarileri de tercih edilmektedir (Karadöl & ark., 2023). Arka plan servisleri

Node.js, Express ve Python (Flask ve FastAPI) web çatılarıyla yürütülürken; verilerin işlenip görselleştirilmesi ThingSpeak, FIWARE, KAA, AWS IoT ve CropX gibi platformlarda açık kaynaklı veya ticari bulut bilişim altyapıları üzerinden yürütülmektedir (Tzounis & ark., 2017; Elijah & ark., 2018; Duman, 2022; Hassan & ark., 2024; Thilakarathne & ark., 2025).

Tüm ham verilerin buluta iletilmesinin hücresel veri maliyetlerini artırması, bant genişliğini zorlaması ve iletim gecikmesine (latency) neden olması gibi operasyonel kısıtları gidermek amacıyla; hesaplama gücü, uç (edge) ve sis (fog) bilişim yaklaşımlarıyla veri kaynağına (sahaya) yaklaştırılmaktadır (Duman, 2022; Duguma & Bai, 2024; Yaşar & Yurtaslan, 2025; Thilakarathne & ark., 2025). Uç bilişim sayesinde doğrudan sensör düğümlerinde (ESP32, Raspberry Pi) veri ön işleme, filtreleme ve hafif yapay zekâ (TinyML ve Edge AI) algoritmaları çalıştırılarak, internet bağlantısı kesilse dahi vanaların kapatılması gibi kritik işlemlerin otonom işleyişine devam edilmektedir (Dayıoğlu & ark., 2016; Çaylı & ark., 2017; Duman, 2022; Thilakarathne & ark., 2025). Sonuç olarak; bulut ve uç sistemlerde çalışan karar destek sistemleri (KDS); rassal orman (random forest), XGBoost, evrişimli sinir ağları (CNN), uzun kısa süreli bellek (LSTM), karar ağaçları ve destek vektör makineleri (SVM) algoritmalarıyla sensör verilerini ve meteorolojik tahminleri işleyerek doğrudan ağa bağlı aktüatörlere komut gönderir (Tzounis & ark., 2017; Saranya & ark., 2023; Duguma & Bai, 2024; Yaşar & Yurtaslan, 2025; Thilakarathne & ark., 2025). Bu sayede otomatik sulama (solenoid vanalar), fertigasyon (otomatik dozaj pompaları) ve mikroklima denetimi (havalandırma pencereleri ve gölgeleme sistemleri) insan müdahalesi olmaksızın yürütülmektedir (Dayıoğlu & ark., 2016; Çaylı & ark., 2017; Tzounis & ark., 2017; Thilakarathne & ark., 2025). Veriye dayalı bu otonom yönetim modeli, yeni nesil tarımsal mekanizasyon süreçlerinin de temel altyapısını oluşturmaktadır.

3. Tarımsal Mekanizasyonda IoT ve Otonom Sistemler

Tarımsal mekanizasyon, insan ve hayvan gücüne dayalı geleneksel üretimden motorlu araçlara geçişle başlayan tarihsel sürecinde, günümüzde bilgi ve iletişim teknolojileri, küresel konumlandırma sistemleri (GPS ve GNSS), sensörler, aktüatörler ve kablosuz haberleşme protokolleri ile donatılmış siber-fiziksel sistemlere geçiş yapmaktadır (Ayaz & ark., 2019; Dalkılıç & Özcanhan, 2024; Sharma & Shivandu, 2024; Severoğlu, 2025). Kırsal alanda iş gücü temininde yaşanan zorluklar, artan yakıt ve işletme maliyetleri ile uygulama hassasiyeti zorunlulukları; traktörlerin sadece bir çekici güç ünitesi olmaktan çıkıp, veri toplayan, karar veren ve otonom hareket edebilen akıllı yürür aksamlara dönüşmesini zorunlu kılmıştır (Ayaz & ark., 2019; Şahin, 2022; Dalkılıç & Özcanhan, 2024; Severoğlu, 2025; Sümbül & ark., 2025). Günümüzde bu teknolojik dönüşüm; otomatik dümenleme, uzaktan makine takibi, değişken oranlı girdi uygulama, otonom robotik platformlar ve makineler arası iletişim odağında şekillenmektedir (Şahin, 2022; Dalkılıç & Özcanhan, 2024; Aslan & Yavuzer Aslan, 2025; Severoğlu, 2025).

3.1. Otonom Traktörler, Navigasyon ve Yönlendirme

Akıllı ve otonom traktör teknolojileri; GPS ve GNSS alıcıları, radar, LiDAR, ultrasonik sensörler, kameralar ile mobil cihaz ve tablet kontrol birimleriyle donatılarak sürücü destek sistemlerinden tam otonom insansız sistemlere kadar uzanan bir gelişim evresi sergilemektedir (Ayaz & ark., 2019; Şahin, 2022; Dalkılıç & Özcanhan, 2024; Severoğlu, 2025).

- Otomatik Dümenleme ve Hassas Konumlandırma: Küresel navigasyon uydu sistemleri, diferansiyel GPS (DGPS) ve gerçek zamanlı kinematik (RTK) GPS altyapıları sayesinde traktörler ve bağlı ekipmanlar, tarlada 2.5 cm'nin altında bir konumlandırma hassasiyetiyle ilerleyebilmektedir (Ayaz &

ark., 2019; Pakdemirli & ark., 2021; Dalkılıç & Özcanhan, 2024; Sharma & Shivandu, 2024; Severoğlu, 2025). Bu yüksek hassasiyet; işlem hatlarındaki örtüşmeleri ve atlamaları önleyerek yakıt tüketimini, tohum ve ilaç israfını, sürücü yorgunluğunu ve toprak sıkışmasını belirgin şekilde düşürmekte; gece veya düşük görüş koşullarında dahi kesintisiz çalışma imkânı sunmaktadır (Ayaz & ark., 2019; Pakdemirli & ark., 2021; Şahin, 2022; Dalkılıç & Özcanhan, 2024; Severoğlu, 2025).

- Ticari Otonom Sistemler ve Bulut: John Deere firmasının AutoTrac, Machine Sync ve AutoTrac Vision ekosistemleri traktörlerin sıralı ekim makineleriyle haberleşmesini sağlarken; AGCO şirketi Fuse Technology ile bütünleşik makine ve veri yönetimi altyapıları oluşturmaktadır (Şahin, 2022; Dalkılıç & Özcanhan, 2024). Geliştirilen akıllı traktör prototiplerinde, Tarım ve Orman Bakanlığı veya bulut sunucularından alınan ilaçlama ve gübreleme uygulama haritaları, Bluetooth veya Wi-Fi üzerinden doğrudan traktördeki Android veya iOS tabletlere aktarılmakta ve GPS konumuna göre değişken oranlı girdi uygulaması gerçekleştirilmektedir (Dalkılıç & Özcanhan, 2024). Sürücü kabini tamamen kaldırılmış Case IH Magnum Autonomous, New Holland T8 Raven, AgXeed ve elektrikli Monarch MK-V gibi platformlar ise LiDAR ve çok yönlü kameralarla engellerden kaçınma yeteneği kazanarak günün her saatinde kesintisiz insansız tarımsal işlemleri yerine getirebilmektedir (Ayaz & ark., 2019; Pakdemirli & ark., 2021; Şahin, 2022; Dalkılıç & Özcanhan, 2024).
- Makine Paylaşım Ağları: Gelişmekte olan ülkelerdeki küçük ölçekli üreticiler için tasarlanan Hello Tractor gibi düşük maliyetli uzaktan takip modülleri, hücresel ağlar

üzerinden traktörün konumunu ve motor durumunu izleyerek ekonomik bir makine paylaşım sistemi oluşturmaktadır (Ayaz & ark., 2019).

3.2. Sensör Donanımlı Tarım Makineleri, Uzaktan Takip ve Makine Öğrenmesi Tabanlı Sınıflandırma

Modern tarımsal ekipmanlar (toprak işleme ekipmanları, hassas ekim sistemleri, gübre ve ilaç dağıtıcıları, hasat makineleri), yerleşik izleme modülleri ve uzaktan takip sensörleri vasıtasıyla birer veri toplama merkezine dönüşmüştür (Subeesh & Mehta, 2021; Waleed & ark., 2021; Severoğlu, 2025). Traktör ve ekipman üzerindeki bu sensörler; makinenin enlem ve boylam koordinatlarını, ilerleme hızını, motor torkunu, tekerlek kayma oranını, üç nokta askı sistemi durumunu, kuyruk mili (PTO) dönme hızını ve pompa basıncını DGPS koordinatlarıyla anlık olarak eşleştirmekte ve konuma özgü üretim maliyet haritaları çıkarılmasını sağlamaktadır (Subeesh & Mehta, 2021; Dalkılıç & Özcanhan, 2024; Severoğlu, 2025).

Tarımsal mekanizasyon ve bilgisayar bilimlerinin birlikte yürütüldüğü çalışmalarda, makine öğrenmesi algoritmalarından yararlanılarak tarımsal işlemlerin otonom olarak sınıflandırılması mümkün hale gelmiştir (Subeesh & Mehta, 2021; Waleed & ark., 2021). Geliştirilen mimaride; tarım makinelerine monte edilen mikro-elektro-mekanik sistem (MEMS) tabanlı üç eksenli ivmeölçer ve jiroskoplardan elde edilen titreşim ve eğim verileri, Bluetooth üzerinden mobil cihaza, oradan da 3G, 4G veya LTE ağları ile AWS bulut veri tabanına iletilmektedir (Waleed & ark., 2021). K-en yakın komşu (KNN), destek vektör makineleri (SVM) ve karar ağaçları (DT) gibi algoritmalarla yapılan analizlerde; yalnızca titreşim verisi %82-85, eğim verisi %68-71 doğruluk sağlarken, her iki verinin birleşik kullanımı rassal orman algoritmasıyla %91.74 test doğruluğuna ulaşmıştır (Waleed & ark., 2021). Zirai ilaçlama ve

gübrelemeye yönelik uzaktan takip sistemlerinin arazi denemelerinde ise; pülverizatör üzerindeki basınç ve akış sensörlerinden alınan veriler GNSS/DGPS konum bilgileriyle eşleştirilmiş ve gerçek zamanlı uygulama hızlarının hedeflenen değerlerle tam uyum sağladığı saptanmıştır (Subeesh & Mehta, 2021; Dalkılıç & Özcanhan, 2024; Severoğlu, 2025).

3.3. Değişken Oranlı İlaçlama ve Otonom Pülverizasyon Teknolojileri

Geleneksel bitki koruma uygulamalarında, yabancı ot yoğunluğu dikkate alınmaksızın tüm araziye homojen dozda pestisit uygulanması; hedef dışı sürüklenme kayıplarına, yeraltı suyu kirliliğine ve faydalı böcek popülasyonlarının zarar görmesine neden olmaktadır (Subeesh & Mehta, 2021; Saranya & ark., 2023; Sunar & ark., 2024; Severoğlu, 2025). Değişken oranlı ilaçlama teknolojisine sahip akıllı pülverizatörler, kimyasal kullanımını önemli ölçüde düşüren hedefe yönelik püskürtme olanağı sağlamaktadır (Subeesh & Mehta, 2021; Sunar & ark., 2024; Sharma & Shivandu, 2024; Severoğlu, 2025).

- Hedef Algılama Sensörleri: Otonom pülverizatör püskürtme çubuklarına (boom) veya hava yönlendirme kanallarına yerleştirilen ultrasonik mesafe, kızılötesi ve uçuş süresi (ToF) sensörleri ile LiDAR ve RGB kameralar; hedef bitkinin varlığını, yüksekliğini, taç hacmini ve yaprak yoğunluğunu gerçek zamanlı tespit etmektedir (Subeesh & Mehta, 2021; Sunar & ark., 2024; Severoğlu, 2025).
- Yapay Zekâ ve Dinamik Doz Kontrolü: Jetson veya Raspberry Pi gibi uç işlemcilerde çalışan evrişimli sinir ağları ve YOLO algoritmaları, yabancı otları kültür bitkisinden milisaniye düzeyindeki hızlarla ayırt etmekte; mikrodenetleyiciler aracılığıyla ağaç aralarındaki veya tarladaki bitkisiz boşluklarda darbe genişlik modülasyonu

(PWM) kontrollü solenoid valfleri otonom olarak kapatmaktadır (Subeesh & Mehta, 2021; Sunar & ark., 2024; Severoğlu, 2025). Hedef bitki algılandığında ise taç hacmine ve ilerleme hızına orantılı olarak, elektro-pnömatik memelerden püskürtülecek ilaç debisi ayarlanmaktadır (Subeesh & Mehta, 2021; Sunar & ark., 2024; Severoğlu, 2025). Bununla birlikte, mısır gibi sıraya ekili bitkilerde değişken düzeyli (yama/patch spraying) ilaçlama yapabilmek için görüntü işleme algoritmalarının endüstriyel denetleyicilerle (PLC) eşzamanlı çalışması büyük önem taşımaktadır. Yürütülen güncel çalışmalarda; görüntü işleme yazılımları ile PLC arasında OPC sunucuları üzerinden kurulan gerçek zamanlı haberleşme mimarileri sayesinde, yabancı ot yoğunluğu anlık olarak tespit edilebilmekte ve yalnızca hedef bölgelere otonom ilaçlama yapılarak kimyasal kullanımında %30 ila %32 oranında tasarruf ve %80'in üzerinde uygulama doğruluğu sağlanabilmektedir (Karadöl & Aybek, 2017; Karadöl & ark., 2020).

- Kapalı Çevrim Denetim ve Oransal Valfler: Değişken oranlı uygulamaların uygulama hassasiyeti, karar destek sistemlerinden gelen komutlara milisaniyeler düzeyinde tepki verebilen elektromekanik donanımlara bağlıdır. Tarla pülverizatörlerinde değişen ilerleme hızlarına rağmen hedef uygulama normunun korunabilmesi için kapalı çevrim PID denetleyiciler ve hızlı tepki veren oransal valfler önemli bir görev üstlenmektedir. Programlanabilir lojik kontrolör (PLC) ve PID destekli oransal valfler kullanılarak geliştirilen otonom pülverizasyon mimarilerinde; traktör ilerleme hızındaki ani değişimlere (5-10 km/h) rağmen ortalama uygulama hatasının %2.14 ile %2.81 gibi oldukça düşük seviyelerde tutulabildiği bildirilmiştir (Karadol &

ark., 2024). Bu tür otonom akış denetim mekanizmaları, tarla içi uygulama sapmalarını minimuma indirerek kimyasal israfını ve çevresel sürüklenme (drift) riskini önleyebilmektedir.

- Tasarruf Performansı: Akıllı pülverizatör sistemleri sayesinde, uygulamanın hedef organizma üzerindeki biyolojik etkinliğinde herhangi bir kayıp yaşanmadan herbisit ve pestisit kullanımında %55 ila %90 oranında tasarruf sağlandığı bildirilmiştir (Subeesh & Mehta, 2021; Sunar & ark., 2024; Severoğlu, 2025).

3.4. Otonom Tarım Robotları ve İHA

Tarımsal işgücü yetersizliğini aşmak ve zorlu arazi koşullarında tarımsal faaliyetleri kesintisiz yürütebilmek amacıyla, dron gibi insansız hava araçları ve otonom kara robotları mekanizasyon süreçlerinde eşgüdümlü olarak kullanılmaktadır (Aslan & Yavuzer Aslan, 2025; İren & Yeşilay, 2025; Sümbül & ark., 2025). UGV (Unmanned Ground Vehicle) kısaltmasıyla bilinen bu otonom kara robotları; üzerinde insan operatör barındırmayan, gelişmiş navigasyon algoritmalarıyla bağımsız hareket eden ve doğrudan kültür bitkisi seviyesinde fiziksel müdahale yapabilen motorize platformlardır (Aslan & Yavuzer Aslan, 2025; Sümbül & ark., 2025). Söz konusu eşgüdümlü görev mimarisinde İHA'lar, havadan yüksek çözünürlüklü görüntüler alarak arazide hastalık, zararlı veya yabancı ot haritalarını hızla oluştururken; UGV'ler bu verilere dayalı olarak oluşturulan uygulama haritalarındaki hedef konumlara yönelerek taç altında veya sıra aralarında değişken oranlı ilaçlama işlemlerini noktasal hassasiyetle yerine getirebilmektedir (Sunar & ark., 2024; Aslan & Yavuzer Aslan, 2025; Bereket Barut & ark., 2025).

- Otonom Tarım Robotları: Açık arazilerde yabancı ot mücadelesi ve budama yapan robotlar; GPS/IMU birimleri,

tekerlek enkoderleri, ROS 2 (Robot Operating System) yazılım mimarisi ve gelişmiş konumlandırma algoritmalarıyla hareket etmektedir (Aslan & Yavuzer Aslan, 2025). HSV renk uzayı tabanlı görüntü işleme teknikleriyle yabancı ot yoğunluğunu tespit edip biçici motor devrini dinamik olarak ayarlayan elektrikli robotlar, kimyasal mücadeleye tam mekanik bir alternatif oluşturmaktadır (Pakdemirli & ark., 2021; Sümbül & ark., 2025).

- İHA ve UGV ile Pülverizasyon Uygulamaları: Tek veya çok rotorlu tarımsal insansız hava araçları, 40 litreye kadar taşıma kapasiteli ilaç depoları ve 4G/5G/Wi-Fi haberleşme modülleriyle otonom rota takibi yapabilmektedir (Sunar & ark., 2024). Bu sistemlerde, multispektral kameralı İHA'lar yabancı ot haritasını GNSS/GPS koordinatlarıyla oluşturarak veriyi gerçek zamanlı olarak akıllı pülverizatör donanımına sahip otonom traktörlere veya UGV'lere iletmekte ve noktasal ilaçlama yapılmasına olanak tanımaktadır (Pakdemirli & ark., 2021; Sunar & ark., 2024; Bereket Barut & ark., 2025). Ayrıca İHA'lar, sahadaki toprak nem sensörlerinden Wi-Fi/LoRa haberleşme protokolleriyle aldıkları verilere göre, sulama pompalarını havadan otonom olarak devreye alabilmektedir (Sunar & ark., 2024; İren & Yeşilay, 2025).

3.5. Makineler Arası İletişim, V2V/V2X ve Veri Standartları

Tarımsal mekanizasyonda otonomlaşmanın ve dijitalleşmenin ulaştığı en ileri aşama; farklı üreticilere ait traktörlerin, otonom tarım robotlarının ve sensör donanımlı ekipmanların insan müdahalesine gerek kalmaksızın gerçek zamanlı veri alışverişi yaptığı makineler arası iletişim (M2M) altyapılarıdır (Ayaz & ark., 2019; Pakdemirli & ark., 2021; Duman, 2022; Türker,

2024). Bu dijital ekosistemde; arazide çalışan iki makinenin (biçerdöver ile römorklu traktörün) eşgüdümlü hareket etmesini sağlayan araçlar arası (V2V) haberleşme ile traktörlerin arazideki sensör ağları veya merkezi çiftlik yönetim sistemleriyle veri paylaşmasına olanak tanıyan araçtan altyapıya (V2X) iletişim protokolleri temel alınmaktadır (Ayaz & ark., 2019; Pakdemirli & ark., 2021; Duman, 2022; Türker, 2024).

- Makineler Arası Senkronizasyon: Arazide eş zamanlı çalışan otonom traktörler, biçerdöverler ve İHA'lar; Wi-Fi, 5G, LoRa ve radyo frekansı (RF) bağlantıları üzerinden konum, hız ve depo doluluk verilerini senkronize etmektedir (Pakdemirli & ark., 2021; Duman, 2022; Bereket Barut & ark., 2025). Örneğin; biçerdöverin dane deposu dolduğunda, yanındaki römorklu otonom traktöre V2V sinyali göndererek hız ve dümenleme açısını birebir eşlemesini sağlamakta ve hasat işlemine ara vermeksizin, hareket halinde ürün aktarımını gerçekleştirmektedir (Pakdemirli & ark., 2021; Sharma & Shivandu, 2024; Bereket Barut & ark., 2025).
- ISOBUS ve CAN-bus Standartları: Sistemler arası birlikte çalışabilirlik; kablolu ağlarda traktör ile tarımsal ekipman arasındaki Controller Area Network (CAN-bus) ve ISO 11783 (ISOBUS) standardı üzerinden yürütülmektedir (Pakdemirli & ark., 2021; Bereket Barut & ark., 2025). ISOBUS standardı, farklı üreticilere ait makine ve donanımların tek bir evrensel terminal (UT) üzerinden tak-çalıştır mimarisiyle yönetilmesine olanak tanımaktadır (Pakdemirli & ark., 2021; Bereket Barut & ark., 2025). Türkiye'de TAGEM ve ASELSAN ortaklığıyla yürütülen projelerde; söz konusu ISOBUS verilerinin radyo frekansı bağlantıları üzerinden uzak mesafelere aktarılarak tarımsal

filo düzeyinde eşgüdümlü takip yapılması yerli altyapılarla gerçekleştirilmiştir (Pakdemirli & ark., 2021).

- V2X ve Karayolu Güvenliği: Otonom tarım makinelerinin karayolu trafiğiyle etkileşiminde çarpışma risklerini en aza indirmek amacıyla, Avrupa Telekomünikasyon Standartları Enstitüsü (ETSI) normlarına dayalı V2X protokolleri geliştirilmiştir. Bu sayede, otonom traktörlerin yaklaşan sivil araçlarla veya bağlantılı ulaşım altyapılarıyla gerçek zamanlı hız ve konum verisi paylaşarak trafik güvenliğini sürdürmesi sağlanmıştır (Ayaz & ark., 2019; Pakdemirli & ark., 2021).

3.6. Otonom Mekanizasyon Teknolojilerinin Uygulamaları ve Tarımsal Kazanımları

Tarımda dijitalleşme süreci, geleneksel tarım makinelerinin yerini kendi kararlarını alabilen, çevresel değişkenlere dinamik olarak tepki verebilen ve otonom hareket edebilen sistemlere bırakmasını sağlamıştır. Bu teknolojik dönüşüm; hassas konumlandırma (GNSS/DGPS), ileri düzey sensörler (ultrasonik, LiDAR, akış ve basınç sensörleri), yapay zekâ tabanlı görüntü işleme algoritmaları (CNN, YOLO) ve kablosuz haberleşme protokollerinin (IoT, 4G/5G, LoRa) entegre bir şekilde çalışmasına dayanmaktadır (Subeesh & Mehta, 2021; Dalkılıç & Özcanhan, 2024; Sunar & ark., 2024; Bereket Barut & ark., 2025; Severoğlu, 2025; Sümbül & ark., 2025). Otonom traktörlerden insansız hava araçlarına, yapay zekâ destekli pülverizatörlerden ot biçme robotlarına kadar uzanan bu yenilikçi donanımlar, tarımsal uygulamalarda yüksek bir hassasiyet ve verimlilik artışı sağlamaktadır. Farklı araştırmacılar tarafından yürütülen güncel çalışmalar (Subeesh & Mehta, 2021; Dalkılıç & Özcanhan, 2024; Sunar & ark., 2024; Bereket Barut & ark., 2025; Severoğlu, 2025; Sümbül & ark., 2025) derlenerek, otonom mekanizasyon

teknolojilerinde kullanılan algılama ve kontrol birimleri ile iletişim altyapıları sayesinde elde edilen tarımsal kazanımlar Tablo 2'de özetlenmiştir.

Tablo 2. Otonom tarımsal mekanizasyon uygulamaları

Mekanizasyon Teknolojisi	**Algılama ve Kontrol Birimi**	**Haberleşme Protokolü**	**Tarımsal Kazanım**
Akıllı Traktör Prototipi	DGPS/GNSS, Android Tablet, Ultrasonik Sensör	Bluetooth/4G/Bulut	Otonom rota takibi, otonom değişken oranlı dozaj kontrolü
Uzaktan Takip Sistemli Bağ Pülverizatörü	Akış ve Basınç Sensörleri, PTO/Kaldırma Sensörü	GSM/GPRS/GNSS	Yüksek hassasiyetli sistem basıncı ve hız takibi
Ultrasonik Sensörlü Pülverizatör	Ultrasonik Sensörler (US), Taç Hacim Algoritması, Elektro-Pnömatik Nozullar	GNSS	%55-%90 oranında pestisit tasarrufu
Yapay Zekâ Destekli Pülverizatör	RGB Kameralar, Mikrodenetleyiciler, CNN/YOLO, PWM Solenoid Nozullar	GNSS	%70-%90 oranında herbisit tasarrufu
Otonom Ot Biçme Robotu	HSV Renk Uzayı, Kamera, Çift Denetleyici Yapı	2.4 GHz RF/Mikrodenetleyici	Dinamik hız kontrolü, otonom mekanik yabancı ot kontrolü
Tarımsal İnsansız Hava Aracı	RGB/Multispektral Kameralar, Uçuş Kontrolcüsü, IMU	4G/5G/Wi-Fi/GPS	Alçak irtifada yüksek hassasiyetli ilaçlama ve gübreleme

4. Gelecek Vizyonu ve Sonuç

Tarımsal nesnelerin interneti (Agri-IoT ve IoAT) ekosistemi, günümüzde tek boyutlu bir veri toplama aracı ve temel eşik değer denetleyicisi olmanın ötesine geçmektedir. Yapay zekâ, uç ve sis bilişim, dijital ikizler, blokzincir ile 5G ve 6G haberleşme altyapılarıyla bütünleşen bu yapı; bilişsel, çok katmanlı ve otonom bir ekosisteme evrilmektedir (Özgüven, 2023; Çakmakçı & Çakmakçı, 2023; Duguma & Bai, 2024; Aslan & Yavuzer Aslan, 2025; Ayberkin, 2025; Thilakarathne & ark., 2025). 21. yüzyılın

ortasına doğru ilerlerken, tarımsal üretim süreçlerinin artan karmaşıklığı ve iklim belirsizlikleri, karar alma mekanizmalarının gerçek zamanlı ve öngörüsel olmasını zorunlu kılmaktadır (Çakır & ark., 2022; Duguma & Bai, 2024; Sharma & Shivandu, 2024; Thilakarathne & ark., 2025). Bu yeni nesil teknolojilerin entegrasyonu, Tarım 4.0 sürecini; robotik sürülerin (swarm robotics), yüksek çözünürlüklü uydu ve İHA ağlarının sisteme dahil edildiği, insan odaklı, sürdürülebilir, sıfır emisyon hedefine uyumlu ve tam otonom üretim vizyonu olan Tarım 5.0 sistem mimarisine taşımaktadır (Pakdemirli & ark., 2021; Çakmakçı & Çakmakçı, 2023; Özgüven, 2023; Duguma & Bai, 2024; Sharma & Shivandu, 2024; Severoğlu, 2025).

Gelecek vizyonunda öne çıkan temel teknolojik bileşenler ve entegrasyon dinamikleri şu şekildedir:

- Uç Bilişim ve Uç Yapay Zekâ (Edge AI ve TinyML): Geleneksel sistemlerde büyük verinin merkezi bulut sunucularına iletilmesi yüksek bant genişliği gerektirmekte ve ağ gecikmelerine neden olmaktadır (Duman, 2022; Duguma & Bai, 2024; Bereket Barut & ark., 2025; Thilakarathne & ark., 2025). Sensörlerden gelen ham verilerin doğrudan verinin üretildiği kaynak noktası olan uç düğümlerde, uç ağ geçitlerinde veya İHA ve traktör üzerindeki mikrodenetleyicilerde (Raspberry Pi, ESP32) işlenmesini sağlayan uç bilişim ve TinyML modelleri, ağ üzerindeki veri akış yükünü minimize etmektedir (Duman, 2022; Özgüven, 2023; Yaşar & Yurtaslan, 2025; Thilakarathne & ark., 2025). Söz konusu mimari yaklaşımla veri işleme arazideki donanımlara aktarılarak milisaniyeler seviyesinde anlık yanıt süreleri elde edilmekte; hücresel bağlantının koptuğu uzak kırsal alanlarda dahi otonom pülverizasyon, tetikleyici denetimi ve zararlı tespiti görevleri kesintisiz biçimde yürütülebilmektedir (Özgüven,

2023; Duman, 2022; Bereket Barut & ark., 2025; Thilakarathne & ark., 2025).

- Tarımsal Dijital İkizler: Fiziksel tarım arazisinin, örtü altı yetiştiricilik sisteminin veya canlı hayvan varlığının sanal uzayda davranışsal ve fizyolojik bir replikasının oluşturulmasıdır (Özgüven, 2023; Aslan & Yavuzer Aslan, 2025; Bereket Barut & ark., 2025; Thilakarathne & ark., 2025). Tarım arazilerindeki IoT sensörleri, İHA'lar ve uydu görüntülerinden elde edilen gerçek zamanlı veriler; toprak nem dinamiklerini, bitki fenolojik evreleri ile hastalık ve iklim simülasyonlarını dijital ikiz mimarisine aktararak birleştirir (Çakmakçı & Çakmakçı, 2023; Aslan & Yavuzer Aslan, 2025; Bereket Barut & ark., 2025). Bilişsel karar destek sistemi algoritmalarıyla bütünleşik çalışan dijital ikizler; üreticilerin fiziksel uygulamaya geçmeden önce sulama, gübreleme ve havalandırma gibi uygulamaları sanal ortamda test ederek varsayımsal senaryolar oluşturmasına ve yüksek doğruluklu sistem optimizasyonu sağlamasına imkân tanımaktadır (Çakmakçı & Çakmakçı, 2023; Özgüven, 2023; Aslan & Yavuzer Aslan, 2025; Bereket Barut & ark., 2025; Thilakarathne & ark., 2025).
- Blokzincir ve Akıllı Sözleşmeler: IoT sensörleriyle toplanan verilerin (iklim, toprak, kimyasal uygulama ve sertifikasyon kayıtları) dağıtık, şeffaf, değiştirilemez ve kriptografik olarak korunan blokzincir ağlarına kaydedilmesi; gıda güvenliği ve izlenebilirliğinde ileri düzey standartlar sağlamaktadır (Özgüven, 2023; Duguma & Bai, 2024; Ayberkin, 2025). TarBIoT karar destek sistemi gibi entegre sistemler bu verileri akıllı sözleşmeler aracılığıyla otomatikleştirmekte; veri manipülasyonunu engelleyerek tarım arazisinden son tüketiciye uzanan tüm

tedarik zincirinde bir güven altyapısı oluşturmaktadır (Özgüven, 2023; Ayberkin, 2025).

- Bilişsel Sistemler ve Yeni Nesil Haberleşme Altyapıları: 5G ve geleceğin 6G mobil ağ mimarileri; saniyede terabit seviyesine ulaşan veri aktarım hızları, ultra düşük gecikme süreleri ve yüksek cihaz bağlama kapasiteleri sayesinde çok daha stabil hale gelen tarımsal IoT ekosisteminin iletişim potansiyelini yapısal olarak dönüştürmektedir (Çakır & ark., 2022; Duman, 2022; Thilakarathne & ark., 2025). Üretken çekişmeli ağlar (GANs) ve takviyeli öğrenme (RL) gibi yapay zekâ algoritmalarıyla desteklenen karar destek sistemleri; önceden programlanmış sabit eşik değerlere dayalı komut dizileri olmaktan çıkarak, iklim ve saha koşullarındaki dinamik değişimlere anında adapte olabilen bilişsel mekanizmalara evrilmektedir (Sharma & Shivandu, 2024; Yaşar & Yurtaslan, 2025; Thilakarathne & ark., 2025).

Artan küresel nüfus, kısıtlı doğal kaynaklar, iklim değişikliğinin getirdiği abiyotik şoklar ve yükselen girdi maliyetleri karşısında tarımsal üretim, köklü bir yapısal dönüşüm sürecinden geçmektedir. 2050 yılı itibarıyla yaklaşık 10 milyara ulaşması beklenen nüfusun gıda güvencesini temin etmek; daralan tarım arazileri ve azalan su kaynakları baskısı altında, tarımsal üretkenliği büyük oranda artırmakla mümkündür. Bu bağlamda tarımsal nesnelerin interneti teknolojileri; geleneksel, tecrübeye dayalı ve yüksek girdili üretim modellerini veriye dayalı, öngörüsel ve otonom siber-fiziksel sistemlere dönüştürerek sürdürülebilirliğin temel bileşeni haline gelmiştir.

Algılama katmanındaki gelişmiş NPK ve nem sensörlerinden, LoRaWAN ve 5G haberleşme protokollerine ve uç bilişimde çalışan yapay zekâ algoritmalarına kadar uzanan bu siber-fiziksel altyapı, çevresel kazanımları ölçülebilir çıktılara

dönüştürmektedir. Bitkisel üretimde sensör denetimli sulama otomasyonları su tüketiminde %30-%50 bandında tasarruf ve %15-%45 aralığında verim artışı sağlarken; değişken oranlı uygulama ve teknoloji donanımları, tarımda kimyasal kullanımını %55-%90'a varan oranlarda düşürerek çevresel ayak izini azaltmaktadır. Tarımsal mekanizasyon alanında otonom traktörler, sensör donanımlı pülverizatörler, İHA'lar ve makineler arası haberleşme sistemleri, arazi uygulama sapmalarını minimum düzeye indirmekte; hassas hayvancılık uygulamalarında ise 2D ve 3D görüntü işleme, giyilebilir biyosensörler ve iklimlendirme otomasyonları hayvan refahı ile sürü verimliliğini optimize etmektedir.

Bununla birlikte; kırsal bölgelerdeki geniş bant altyapı yetersizlikleri, ilk yatırım ve işletme maliyetlerinin yüksekliği, saha donanımlarının çevresel dayanıklılığı, veri mülkiyeti ve siber güvenlik riskleri gibi sosyo-teknik kısıtların aşılması gerekmektedir. Söz konusu engellerin giderilmesi amacıyla; üretici kooperatifi tabanlı teknoloji paylaşım modellerinin geliştirilmesi, kırsal dijital okuryazarlık eğitimlerinin yaygınlaştırılması, uluslararası veri standartlarının (ISOBUS ve FIWARE) benimsenmesi ve yerli Ar-Ge kümelenmelerinin (TAGEM ve ASELSAN ortak projeleri, kamu-üniversite-sanayi iş birlikleri) güçlendirilmesi stratejik bir zorunluluktur.

Sonuç olarak, tarımsal nesnelerin interneti ve onunla bütünleşik çalışan yeni nesil teknolojiler (uç bilişim, dijital ikizler, yapay zekâ ve blokzincir) sadece birer verimlilik aracı olmanın ötesine geçerek gelecek nesillere çevresel değişimlere dirençli, birim alan üretkenliğinin artırıldığı, çevresel ayak izinin azaltıldığı ve küresel gıda güvencesinin tesis edildiği sürdürülebilir bir tarım-gıda sistemi bırakmanın temel teknolojik altyapısını oluşturmaktadır.

Kaynakça

Arman, N., Belci, K. K., İkinci, K. G., & Doğan, H. (2026). Kırsal kesimlerde tarımsal amaçlı otomasyon uygulamalarında LoRa kullanımı. 8. Bilsel International Gordion Scientific Research Congress, 48–58, Ankara.

Aslan, B., & Yavuzer Aslan, F. (2025). Bitkisel tarımda kullanılan ürün izleme teknolojilerinin incelenmesi. Manas Journal of Agriculture Veterinary and Life Sciences, 15(1), 132–145.

Ayaz, M., Ammad-Uddin, M., Sharif, Z., Mansour, A., & Aggoune, E.-H. M. (2019). Internet-of-Things (IoT)-based smart agriculture: Toward making the fields talk. IEEE Access, 7, 129551–129583.

Ayberkin, D. (2025). TarBIoT KDS: Akıllı tarım uygulamaları için blokzincir ve IoT teknolojileri ile gerçek zamanlı karar destek sistemi tasarımı. Journal of the Institute of Science and Technology, 15(1), 12–24.

Başçiftçi, F., & Gündüz, K. A. (2019). Nesnelerin İnterneti uyumlu mikrodenetleyiciler üzerine bir araştırma. Selçuk Üniversitesi Sosyal ve Teknik Araştırmalar Dergisi, (18), 62–71.

Bereket Barut, Z., Özgöz, E., Yazgı, A., Çay, A., Karayel, D., & Yılmaz, D. (2025). Bitkisel üretimde sürdürülebilir mekanizasyon uygulamaları. Türkiye Ziraat Mühendisliği X. Teknik Kongresi Bildiriler Kitabı-1, 116–128, Ankara.

Comart, A., Oral, O., & Çağlayan, N. (2018). Nesnelerin İnterneti teknolojisinin tarımsal alandaki uygulamaları. Uluslararası Hakemli Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi, (13), 11–30.

Çakır, D., Odabaş, M. S., Kayhan, G., & Oktaş, R. (2022). 5G teknolojilerinin akıllı tarım sistemlerinde kullanımı ve geleceği üzerine değerlendirme. Black Sea Journal of Engineering and Science, 5(2), 81–86.

Çakmakçı, M. F., & Çakmakçı, R. (2023). Uzaktan algılama, yapay zekâ ve geleceğin akıllı tarım teknolojisi trendleri. Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi, (52), 234–246.

Çaylı, A. (2019). Nesnelerin İnterneti ve tarımsal uygulamaları. SETSCI Conference Proceedings (ISAS), 4(1), 113–120, Ankara.

Çaylı, A., Akyüz, A., Baytorun, A. N., Boyacı, S., Üstün, S., & Kozak, F. B. (2017). Sera çevre koşullarının nesnelerin interneti tabanlı izleme ve analiz sistemi ile denetlenmesi. Türk Tarım-Gıda Bilim ve Teknoloji Dergisi, 5(11), 1279–1289.

Dalkılıç, H., & Özcanhan, M. H. (2024). Hassas tarımda nesnelerin interneti destekli akıllı traktör ile zirai ilaçlama ve gübreleme. Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi, 26(78), 373–378.

Dayıoğlu, M. A., Uğur, F., & Türker, U. (2016). Seralarda nesnelerin interneti teknolojisinin uygulanması: Tasarım ve prototip geliştirme. Journal of Agricultural Faculty of Gaziosmanpaşa University, 33(Ek Sayı), 52-60.

Duguma, A. L., & Bai, X. (2024). How the internet of things technology improves agricultural efficiency. Artificial Intelligence Review, 58(2), Article 63.

Duman, E. (2022). Akıllı tarımda LoRa haberleşmesinin rolü, uygulama alanları, bir mimari önerisi ve performans analizi. Artificial Intelligence Studies, 5(2), 56–70.

Elijah, O., Rahman, T. A., Orikumhi, I., Leow, C. Y., & Hindia, M. N. (2018). An overview of Internet of Things (IoT) and data analytics in agriculture: Benefits and challenges. IEEE Internet of Things Journal, 5(5), 3758–3773.

Erbey, A. (2024). Nesnelerin interneti (IoT). M. F. Karaca (Ed.), Yönetim bilişim sistemlerinde güncel konular (ss. 15–33). Özgür Yayınları.

Göl, B., & Tarhan, Ç. (2024). Tarımda dijitalleşmenin zorlukları ve AB iklim politikasında dijital tarım. Journal of Information Systems and Management Research, 6(2), 12–23.

Güman, Z., & Günay, F. B. (2024). Nesnelerin interneti yardımıyla akıllı tarımda yapay zekâ tabanlı gübre ve mahsul tahmini. Iğdır Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 14(3), 958–973.

Hassan, A. A., Abdullahi, H. O., Ali, A. F., & Ahmed, M. H. (2024). Internet of Things in agriculture: A systematic review of applications, benefits, and challenges. Journal of System and Management Sciences, 14(9), 67–80.

İren, Z., & Yeşilay, R. B. (2025). Tarımda drone kullanımının potansiyel faydaları. Ege Üniversitesi Ulaştırma Yönetimi Araştırmaları Dergisi, 2(1), 50-64.

Kaplan, F., Bilgili, A. V., & Kara, Z. (2024). Estimation of soil salinity: Remote sensing and machine learning approaches. Academic studies in agriculture (ss. 37-58).

Kara, Z., Bilgili, A. V., & İnci, Y. (2024). Toprak karakterizasyonunda uzaktan algılama kullanımı: Toprağın araştırılmasında yeni yöntemler. Tarımda yükselen trendler (ss. 173-220).

Karadol, H., Aybek, A., Ucgul, M., Kuzu, H., & Gunes, M. (2024). Field sprayer with application rate control using fast response proportional valves under variable speed conditions. Agriculture, 14(3), 361.

Karadöl, H., & Aybek, A. (2017). Mısır arazisinde yabancı otların belirlenmesine yönelik Matlab ve PLC arası OPC haberleşme kullanılarak geliştirilen bir kontrol sistemi. Tekirdağ Ziraat Fakültesi Dergisi, 14(2), 129-137.

Karadöl, H., Aybek, A., & Üçgül, M. (2020). Development of an automatic system to detect and spray herbicides in corn fields. Tarım Bilimleri Dergisi, 26, 190-200.

Karadöl, H., Çaylı, A., Akyüz, A., & Üçok, S. (2023). Etlik piliç yetiştiriciliğinde çevre koşullarının izlenmesine yönelik web tabanlı bir uzak izleme sisteminin geliştirilmesi. Black Sea Journal of Engineering and Science, 6(4), 426-433.

Khanna, A., & Kaur, S. (2019). Evolution of Internet of Things (IoT) and its significant impact in the field of Precision Agriculture. Computers and Electronics in Agriculture, 157(2), 218–231.

Kour, V. P., & Arora, S. (2020). Recent developments of the Internet of Things in agriculture: A survey. IEEE Access, 8, 129924–129957.

Kuzu, H., Aybek, A., Karadöl, H., & Tekerek, A. (2026). Broiler live weight estimation through image processing and YOLO-based deep learning. Journal of Agricultural Sciences, 32(2), 317-335.

Mamur, H., Dicle, Z., & Erdener, S. (2022). İç ortam bitkilerinin takibi için IoT tabanlı akıllı gömülü sistem tasarımı.

International Journal of Engineering Research and Development, 14(2), 611-618.
Özcan, Y. A., Sarraj, S., & İstanbullu, A. (2020). Hassas tarım uygulaması tasarımı ve geliştirilmesi. Journal of Science, Technology and Engineering Research, 1(2), 33-39.
Özgüven, M. M. (2023). Bahçe bitkileri yetiştiriciliğinde kullanılan dijital tarım teknolojileri. Tarım Makinaları Bilimi Dergisi, 19(3), 174–193.
Pakdemirli, B., Birişik, N., Aslan, İ., Sönmez, B., & Gezici, M. (2021). Türk tarımında dijital teknolojilerin kullanımı ve tarım-gıda zincirinde Tarım 4.0. Toprak Su Dergisi, 10(1), 78-87.
Rufaioğlu, S. B., Kara, Z., & Bilgili, A. V. (2024). Bitkisel araştırmalarda uzaktan algılama ve spektroradyometre teknolojisinin kullanımı. A. Aybek & Z. Kara (Ed.), Ziraat, orman ve su ürünleri alanında akademik çalışmalar V (ss. 41-68). IKSAD Publishing House.
Saranya, T., Deisy, C., Sridevi, S., & Anbananthen, K. S. M. (2023). A comparative study of deep learning and Internet of Things for precision agriculture. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 122, 106034.
Severoğlu, Z. (2025). Tarla bitkilerinde kullanılan akıllı tarım teknolojileri. Türkiye Tarımsal Araştırmalar Dergisi, 12(3), 348–364.
Sevli, O. (2023). Tarım 4.0 ölçeğinde bir dijital tarım uygulaması: Çiftlik izleme ve yönetim sistemi. Uluslararası Sürdürülebilir Mühendislik ve Teknoloji Dergisi, 7(2), 105–116.
Sharma, K., & Shivandu, S. K. (2024). Integrating artificial intelligence and Internet of Things (IoT) for enhanced crop monitoring and management in precision agriculture. Sensors International, 5(1), 100292.
Subeesh, A., & Mehta, C. R. (2021). Automation and digitization of agriculture using artificial intelligence and internet of things. Artificial Intelligence in Agriculture, 5, 278–291.
Sunar, B., Yalçın, B., Ergene, B., & Önal, A. (2024). Akıllı tarım uygulamalarında kullanılan ilaçlama sistemlerinin araştırılması. Afyon Kocatepe Üniversitesi Uluslararası

Mühendislik Teknolojileri ve Uygulamalı Bilimler Dergisi, 7(1), 58-72.

Sümbül, H., Böğrek, A., Tunçer, A., & Yıldırım, K. (2025). Görüntü işleme tabanlı hassas tarım aracının tasarlanması ve gerçekleştirilmesi. Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 13(4), 1188-1207.

Şahin, H. (2022). Dijital tarım, Tarım 4.0, akıllı tarım, robotik uygulamalar ve otonom sistemler. Tarım Makinaları Bilimi Dergisi, 18(2), 68–83.

Taştan, M. (2019). Nesnelerin interneti tabanlı akıllı sulama ve uzaktan izleme sistemi. Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi, 15, 229-236.

Thilakarathne, N. N., Abu Bakar, M. S., Abas, P. E., & Yassin, H. (2025). Internet of Things enabled smart agriculture: Current status, latest advancements, challenges and countermeasures. Heliyon, 11(3):e42136.

Türker, U. (2024). Akıllı tarım teknolojileri kullanımının gıda ve su tasarrufu üzerine etkileri. T. K. Şahin & İ. Erol (Ed.), Gıda, su kaybı ve israfı (ss. 105–122). Türkiye Bilimler Akademisi Yayınları.

Tzounis, A., Katsoulas, N., Bartzanas, T., & Kittas, C. (2017). Internet of Things in agriculture, recent advances and future challenges. Biosystems Engineering, 164, 31–48.

Waleed, M., Um, T.-W., Kamal, T., & Muhammad Usman, S. (2021). Classification of agriculture farm machinery using machine learning and Internet of Things. Symmetry, 13(3), 403.

Yaşar, M., & Yurtaslan, N. (2025). Tarımda yapay zekâ çağı: çok katmanlı dijital dönüşümün ekosistemsel ve operasyonel boyutları. AgriTR Science, 7(2), 91-100.

BÖLÜM 2

TARIMSAL SULAMA YÖNETİMİNDE UZAKTAN ALGILAMA VE COĞRAFİ BİLGİ SİSTEMLERİ: YÖNTEMLER, UYGULAMALAR VE SINIRLILIKLAR

UMUT MUCAN[1]

Giriş

Tarımsal sulama yönetiminde temel gereksinim, suyun hangi alana, ne zaman ve hangi miktarda uygulanacağını belirlemektir. Bu karar; bitkinin gelişme dönemi, kök bölgesindeki kullanılabilir su, beklenen atmosferik talep ve sulama sisteminin sağlayabileceği hizmet birlikte değerlendirildiğinde anlam kazanır. Meteoroloji istasyonları ve toprak ölçümleri zamansal izleme sağlarken, uzaktan algılama parseller içindeki ve parseller arasındaki farklılıkları görünür kılar. Coğrafi bilgi sistemleri (CBS) ise bu gözlemleri toprak, ürün, topoğrafya ve sulama altyapısı bilgileriyle aynı mekânsal çerçevede birleştirir. Bu nedenle görüntülerin sulama yönetimindeki değeri, yalnızca harita üretme başarısıyla değil, saha koşullarına uygun kararlara katkısıyla değerlendirilmelidir (Ahmad et al., 2009; Allen et al., 1998).

[1] Dr. Öğr. Üyesi, Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Tarımsal Yapılar ve Sulama Bölümü, ORCID: 0000-0002-7126-9774

Uydu ve insansız hava aracı (İHA) görüntülerinden bitki örtüsü gelişimi, yüzey sıcaklığı ve evapotranspirasyon (ET) hakkında bilgi üretilebilir. Bununla birlikte, her görüntü ürünü aynı fiziksel büyüklüğü temsil etmez. Yeşillik indeksi, bitkinin su tüketimi veya kök bölgesindeki su miktarıyla eş anlamlı değildir; yüzey sıcaklığından hesaplanan bir stres göstergesi de uygulanacak sulama derinliğini doğrudan vermez. Görüntüden hesaplanan değişkenin fiziksel anlamı ile yönetim kararının gerektirdiği büyüklük arasındaki ilişkinin açık kurulması gerekir (Allen et al., 1998; Jackson et al., 1981).

Bu bölümde optik, termal ve radar gözlemlerinin sulama yönetimindeki kullanım alanları; CBS ile veri bütünleştirme, ET tahmini, karar desteği ve doğrulama açısından incelenmektedir. Çalışma, temel yöntem yayınları ile seçilmiş uygulamaları bir araya getiren tematik bir literatür değerlendirmesidir. Sistematik derleme, meta-analiz veya yeni bir arazi deneyi olarak tasarlanmamıştır. Amaç, Türkiye'de farklı ürün ve işletme koşullarına uyarlanabilecek bir uygulama çerçevesi geliştirmek; yöntemlerin sağlayabileceği bilgiyi, ölçüm gereksinimlerini ve yorum sınırlarını birlikte ortaya koymaktır.

Sulama kararında gözlem ve tahminin yeri

Uzaktan algılama sistemleri, yüzeyden yansıyan veya yayılan elektromanyetik enerjiyi algılar. Toprak nemi, bitki stresi ve ET gibi yönetim değişkenleri ise bu sinyallerin fiziksel modeller veya istatistiksel ilişkilerle yorumlanması sonucunda tahmin edilir. Örneğin bir termal algılayıcının ürettiği yüzey sıcaklığı; yaprak, toprak ve gölgeli alanların aynı pikseldeki katkılarını içerebilir. Bu değerin doğrudan yaprak sıcaklığı olarak kullanılması, özellikle seyrek örtülü bahçelerde ve gelişmenin erken dönemlerinde yanıltıcı sonuçlar doğurabilir (Berni et al., 2009; Norman et al., 1995).

Sulama kararının ölçeği de gözlem ölçeğiyle uyumlu olmalıdır. Bir havzada mevsimlik su tüketiminin karşılaştırılması için yeterli olan veri, dar bir parselde değişken düzeyli sulama planlamak için yetersiz kalabilir. Benzer biçimde, görüntünün nominal tekrar süresi ile bulutsuz ve kullanılabilir gözlemler arasındaki süre farklıdır. İşletmeci, uydu geçiş takviminden çok, karar anında hangi tarihe ait güvenilir bilgiye ulaşabildiğini bilmek ister. Bu nedenle sistem tasarımında görüntü yaşı, geçerli piksel oranı ve ürünün hazırlanma süresi açıkça tanımlanmalıdır.

CBS içindeki temel birim her zaman tek bir piksel olmamalıdır. Sulama vanasının hizmet alanı, sulama bloğu veya yönetim zonu uygulama açısından daha uygun olabilir. Parsel ortalaması hesaplanırken kenarlardaki karışık pikseller, yollar ve ağaç sıraları değerlendirilmelidir. Ortalama yanında dağılımın verilmesi, aynı ortalamaya sahip iki parselin farklı iç değişkenlik gösterdiğini ortaya koyabilir. Bununla birlikte, görüntüde belirlenen her mekânsal farkın sulama ile giderilebileceği varsayılmamalıdır; toprak derinliği, bitki sıklığı veya hastalık da benzer desenler oluşturabilir (Baluja et al., 2012; Gonzalez-Dugo et al., 2013).

Veri kaynakları ve CBS altyapısı

Uydu ve İHA gözlemlerinin seçimi

Optik uydu görüntüleri bitki örtüsünün gelişimini izlemek için yaygın bir başlangıç noktasıdır. Sentinel-2'nin görünür ve yakın kızılötesi bantlarının bir bölümü 10 m, kırmızı kenar ve kısa dalga kızılötesi bantları ise 20 m örnekleme aralığına sahiptir; atmosferik amaçlı bantlar 60 m'dir. Bu nedenle bütün bantların 10 m olarak sunulduğu bir dosya, bütün değişkenlerin başlangıçta 10 m ayrıntıyla gözlendiği anlamına gelmez. Sentinel-2'de termal bant bulunmadığından, yalnızca bu görüntüler kullanılarak doğrudan termal stres haritası üretilemez (Drusch et al., 2012).

Landsat'ın optik ve termal gözlemleri enerji dengesi yaklaşımları için birlikte kullanılabilir. Landsat 9'da çok bantlı optik gözlemler 30 m, termal gözlemler ise doğal olarak 100 m örnekleme aralığına sahiptir. Termal verinin 30 m grid üzerinde dağıtılması, sıcaklık bilgisinin fiziksel ayrıntısını kendiliğinden 30 m'ye yükseltmez. Küçük veya dar parsellerde bu ayrım özellikle önemlidir. Parsel sınırlarının, komşu ürünlerin ve açık toprak yüzeylerinin sıcaklık ürününe katkısı dikkate alınmalıdır (Masek et al., 2020).

Sentinel-1 gibi aktif radar sistemleri, güneş ışığı gerektirmemesi ve bulutluluğa karşı optik sistemlerden daha az kısıtlanması nedeniyle tamamlayıcı bilgi sunar (Torres et al., 2012). Bununla birlikte geri saçılım; nem dışında yüzey pürüzlülüğü, bitki örtüsü ve bakış geometrisinden etkilenir. C bandındaki sinyalin nem duyarlılığı, kök bölgesindeki toplam kullanılabilir suyun doğrudan ölçüldüğü şeklinde yorumlanmamalıdır. Radar verisiyle nem değişimlerinin araştırılmasında ürün örtüsü ve toprak koşullarına göre düzeltme ve kalibrasyon gereksinimi sürer (Paloscia et al., 2013).

İHA sistemleri, parsel içindeki sıra ve taç yapısını ayrıntılı gözlemleme ve uçuş zamanını yönetim gereksinimine göre belirleme olanağı sağlar. Ancak yüksek mekânsal ayrıntı tek başına yüksek doğruluk anlamına gelmez. Radyometrik kalibrasyon, termal kameranın kararlılığı, uçuş saati, rüzgâr ve görüntü örtüşmesi sonuçları etkiler. Sabit bir santimetre çözünürlüğünü bütün İHA uygulamalarına atfetmek yerine kamera, uçuş yüksekliği ve işleme yöntemine bağlı gerçek yer örnekleme aralığı raporlanmalıdır (Adedeji et al., 2025; Berni et al., 2009). Veri seçiminin temel ölçütleri Tablo 1'de özetlenmiştir.

Tablo 1. Sulama yönetiminde veri kaynakları ve seçim ölçütleri

Veri kaynağı	Gözlem ve mekânsal ayrıntı	Kullanım koşulu
Sentinel-2	Optik gözlem; ilgili bantlarda 10 ve 20 m. Atmosferik bantlar 60 m'dir.	Örtü gelişimi ve spektral indeksler. Termal bant içermez; bulut ve gölge ayıklanmalıdır.
Landsat 9	Çok bantlı optik gözlem 30 m; termal gözlem doğal olarak 100 m.	Sıcaklık ve enerji dengesi. 30 m'ye yeniden örnekleme, termal ayrıntıyı artırmaz.
Sentinel-1	C bandı radar geri saçılımı. Ayrıntı, çekim modu ve ürün türüne bağlıdır.	Bulutlu dönemlerde tamamlayıcı bilgi. Örtü, pürüzlülük ve geometri etkileri ayrılmalıdır.
Çok bantlı veya termal İHA	Taç ve sıra düzeyinde gözlem; örnekleme aralığı uçuşa ve kameraya bağlıdır.	Hedefli tarla gözlemi. Kalibrasyon, uçuş koşulları ve taç–toprak ayrımı gerektirir.
Arazi ölçümleri	Meteoroloji, toprak nemi, fizyolojik ölçüm ve uygulanan su kaydı.	Kalibrasyon ve doğrulama. Noktanın temsil ettiği derinlik, alan ve zaman bilinmelidir.

Kaynak: Yazar tarafından literatüre dayanılarak düzenlenmiştir (Allen et al., 1998; Berni et al., 2009; Drusch et al., 2012; Masek et al., 2020; Paloscia et al., 2013; Torres et al., 2012). Nominal piksel aralığı, her ürün için aynı etkin çözünürlük anlamına gelmez.

Ortak veri modeli ve kalite kontrolü

CBS veri tabanında parsel sınırı ve ürün bilgisi, görüntünün elde edildiği üretim yılıyla eşleştirilmelidir. Eski sınırlar, değişmiş ürün deseni veya ikinci ürünün kaydedilmemesi, görüntü doğru işlenmiş olsa bile yanlış yönetim birimine sonuç atanmasına yol açar. Toprak tekstürü, etkili kök derinliği, tarla kapasitesi ve solma noktası gibi değişkenler su bütçesi için; sulama debisi, uygulama süresi ve hizmet alanı ise hesaplanan gereksinimin uygulanabilirliği için gereklidir. Bu değişkenlerin koordinat sistemi, birimi, tarihi ve belirsizliği aynı veri sözlüğünde tutulmalıdır (Allen et al., 1998).

Görüntü işlemede yüzey yansıtımı ile atmosfer üstü yansıtım ürünleri karıştırılmamalı; bulut, bulut gölgesi, doygun piksel ve eksik veri maskeleri kullanılmalıdır. Farklı tarihler arasında geometrik kayma varsa, parsel kenarlarında gerçekte oluşmayan değişim desenleri ortaya çıkabilir. Bantların ortak gride taşınmasında kullanılan yeniden örnekleme yöntemi de kaydedilmelidir. Kalite kontrolünden çıkarılan piksellerin oranı, özellikle küçük parsellerde, üretilen ortalama kadar önemli bir raporlama bilgisidir.

Bulut tabanlı işleme platformları geniş görüntü arşivlerinin analizini kolaylaştırır. Google Earth Engine bunun bilinen örneklerinden biridir; ancak hesaplamanın büyük ölçekte çalışması, kurulan ilişkinin tarımsal geçerliliğini garanti etmez. Tekrarlanabilirlik için koleksiyon adı, ürün sürümü, tarih aralığı, filtreler, maskeleme yaklaşımı ve hesaplama kodu kaydedilmelidir. Platforma özgü varsayılan ayarlar yerine çalışmanın veri ve karar gereksinimlerine uygun seçimler yapılmalıdır (Gorelick et al., 2017).

Bitki ve toprak göstergelerinin yorumlanması

Optik indeksler

Normalize edilmiş fark bitki örtüsü indeksi (NDVI), kırmızı ve yakın kızılötesi yansıtım arasındaki farktan yararlanır. Bitki örtüsünün gelişimi ve örtülülüğüyle ilişkili bilgi sağlar; yaygın hesaplama aşağıdaki biçimdedir (Tucker, 1979).

$$NDVI = \frac{NIR - Red}{NIR + Red}$$

Burada NIR yakın kızılötesi, Red ise kırmızı banttaki yansıtımı ifade eder. NDVI düşüşü su kısıtından kaynaklanabileceği gibi hasat, fenolojik olgunlaşma, düşük bitki sıklığı, besin noksanlığı veya hastalıkla da ilişkili olabilir. Bu nedenle tek görüntüdeki düşük değer, sulama uygulanması için yeterli gerekçe oluşturmaz. Aynı ürünün benzer gelişme dönemindeki zaman serisi, sulama kayıtları

ve arazi gözlemleriyle birlikte değerlendirme yapılmalıdır. Yoğun bitki örtüsünde indeksin duyarlılığının azalması da değişimlerin yorumlanmasını güçleştirebilir.

Normalize edilmiş fark nem indeksi (NDMI), yakın kızılötesi ve kısa dalga kızılötesi bantlardan hesaplanır. U.S. Geological Survey (USGS) bu indeksi bitki örtüsünün su içeriğini değerlendirmede kullanılan ürünler arasında tanımlamaktadır (USGS, n.d.). Kullanılan SWIR bandı açıkça belirtilmelidir; benzer adlarla sunulan indekslerin farklı dalga boyları içermesi karşılaştırmaları etkileyebilir.

$$NDMI = \frac{NIR - SWIR}{NIR + SWIR}$$

NDMI, bitki örtüsü ve su içeriğine duyarlı bir spektral göstergedir; hacimsel kök bölgesi nemi olarak raporlanmamalıdır. Sahada ölçülen toprak nemiyle ilişki kurulacaksa ölçüm derinliği, ürün örtüsü ve gözlem zamanı belirtilmelidir. İndeksin artması veya azalması, örtü miktarındaki değişimden de etkilenebileceği için fenolojik bilgiyle birlikte yorumlanmalıdır. NDVI ve NDMI'nin birlikte izlenmesi olası sorunlu alanları daraltabilir; kesin nedenin belirlenmesi yine ek gözlem gerektirir.

Termal göstergeler ve su stresi

Bitki su kısıtı altında stomalarını kapattığında terleme yoluyla soğuma azalabilir ve taç sıcaklığı yükselebilir. Ancak sıcaklık farkı aynı zamanda radyasyon, hava sıcaklığı, buhar basıncı açığı ve aerodinamik koşullara bağlıdır. Bitki su stresi indeksi (CWSI), bu ilişkileri referans koşullar yardımıyla değerlendirmeye çalışır. Islak ve kuru referansların seçimi veya atmosferik koşullara göre sınırların kurulması, sonucun anlamını belirleyen temel adımlardır (Jackson et al., 1981; Jones, 1999).

Termal değerlendirmede toprak ile taç sıcaklığının ayrılması gerekir. Özellikle genç bitkilerde sıcak toprak pikselleri, bitkinin

gerçek sıcaklığından bağımsız olarak parsel ortalamasını yükseltebilir. İHA görüntülerinde taç maskesi oluşturmak bu etkiyi azaltabilir; ancak maskenin başarısı ayrıca sınanmalıdır. Bağ ve meyve bahçelerinde termal ve çok bantlı görüntülerin su durumu değişkenliğiyle ilişkilendirilmesi, yöntemin olanaklarını göstermektedir. Bu çalışmaların eşik değerleri, farklı taç mimarisi ve iklim koşullarındaki ürünlere doğrudan aktarılmamalıdır (Baluja et al., 2012; Gonzalez-Dugo et al., 2013).

Sulama planlamasında termal göstergelerin en yararlı işlevlerinden biri, beklenen gelişmeden sapan alanları belirleyip arazi kontrolünü yönlendirmesidir. Aynı gün sulanan iki blok arasında fark bulunması, sulama dağılımı sorunu kadar kök gelişimi veya tuzlulukla da ilişkili olabilir. Bu nedenle CWSI için bütün ürün ve dönemlerde geçerli tek bir müdahale eşiği önermek uygun değildir. Eşiğin, yerel fizyolojik ölçümler ve yönetim hedefiyle ilişkilendirilmesi gerekir (Jones, 1999).

Evapotranspirasyon tahmin yaklaşımları

Referans evapotranspirasyon ve bitki katsayıları

FAO yaklaşımında referans evapotranspirasyon (ET_0), standart bir referans yüzey için atmosferik buharlaştırma talebini temsil eder. Gerçek parselin su tüketimiyle aynı büyüklük değildir. Standart koşullardaki bitki evapotranspirasyonu, bitki katsayısı kullanılarak tahmin edilir. Uzaktan algılama, örtü gelişimiyle ilişkili bazal bitki katsayısının (Kcb) mekânsal değişimini belirlemek için kullanılabilir. Su kısıtı ve toprak yüzeyindeki buharlaşma ise ayrıca ele alınmalıdır (Allen et al., 1998; Campos et al., 2010).

Çift bitki katsayısı yaklaşımında su kısıtı altındaki ET, aşağıdaki çerçevede ifade edilebilir. Bu eşitlik, ilgili katsayıların ve toprak su bütçesinin uygun biçimde belirlenmesini gerektirir (Allen et al., 1998).

$$ET_a = \left(K_s \times K_{cb} + K_e\right) \times ET_0$$

Burada Ks su stresi katsayısı, Kcb bazal bitki katsayısı, Ke toprak buharlaşma katsayısıdır. Bitki örtüsü indeksinden Kcb tahmin edilmesi, Ks ve Ke'nin de doğrudan gözlendiği anlamına gelmez. Sulama veya yağış sonrasında çıplak topraktan buharlaşma artabilir; buna karşın yeşil örtüdeki değişim sınırlı olabilir. Bu nedenle yalnızca indeks–katsayı ilişkisine dayanan tahminler, sulama olayları ve yüzey ıslanma koşulları dikkate alınarak tamamlanmalıdır.

İndeks ile katsayı arasındaki ilişkiler; ürün, sıra aralığı, toprak arka planı ve algılayıcıya göre yeniden sınanmalıdır. Campos ve arkadaşları bağda bazal Kcb'yi günlük su bütçesiyle birleştirmiştir (Campos et al., 2010). Kamble ve arkadaşları ise NDVI ile toplam ET/referans ET oranından hesaplanan Kc'yi ilişkilendirmiştir (Kamble et al., 2013). Bu katsayılar, toprak buharlaşmasını temsil etme biçimleri nedeniyle aynı anlamda kullanılmamalıdır.

Yüzey enerji dengesi yöntemleri

Enerji dengesi yaklaşımları, yüzeye ulaşan kullanılabilir enerjinin duyulur ve gizli ısı akıları arasında paylaşımını değerlendirir. Basitleştirilmiş denge aşağıdaki biçimde yazılabilir (Allen et al., 2007; Bastiaanssen et al., 1998).

$$\lambda E = R_n - G - H$$

Eşitlikte Rn net radyasyon, G toprak ısı akısı, H duyulur ısı akısı ve λE buharlaşmaya ayrılan gizli ısı akısıdır; terimler aynı zaman ölçeğinde ve örneğin W/m² biriminde değerlendirilir. Gizli ısı akısının su derinliğine dönüştürülmesi, suyun buharlaşma gizli ısısını ve ilgili zaman aralığını gerektirir. Uydu geçiş anındaki akıdan günlük veya dönemlik ET'ye geçiş ayrıca bir ölçekleme işlemidir; anlık harita, tek başına mevsimlik tüketim haritası değildir.

SEBAL, yüzey enerji dengesinden ET tahmininin temel yaklaşımlarından biridir. METRIC ise içsel kalibrasyon ve referans ET ile ilişkili işlemler içeren bir model çerçevesidir. Her iki yaklaşımda da yüzey sıcaklığı, aerodinamik özellikler ve enerji bileşenlerinin hesaplanması önem taşır. Kalibrasyon alanlarının seçimi, sıcaklık hataları veya temsil gücü düşük meteorolojik veri sonuçları etkileyebilir. Bu nedenle farklı yazılımların aynı model adını taşıması, aynı girdilerle aynı çıktıyı üreteceği anlamına gelmez (Allen et al., 2007; Bastiaanssen et al., 1998).

İki kaynaklı enerji dengesi yaklaşımı, toprak ve bitki örtüsünü ayrı enerji kaynakları olarak ele alır. Bu ayrım, seyrek örtülü yüzeylerde tek bir radyometrik sıcaklığın yorumlanmasındaki güçlüğe yanıt verir. Bununla birlikte örtü oranı, radyasyonun paylaşımı ve dirençlerin belirlenmesi gibi ek girdiler ve kabuller ortaya çıkar. Model seçimi; yalnızca yaygınlığa göre değil, ürün örtüsü, veri bulunabilirliği, hedef zaman ölçeği ve doğrulama olanağına göre yapılmalıdır (Norman et al., 1995).

Zaman serisi ve veri birleştirme

Bulutluluk ve gözlem aralıkları, özellikle günlük sulama kararları için veri boşlukları oluşturur. Meteorolojik verilerle zaman içi ilerletme, farklı algılayıcılardan yararlanma veya mekânsal ve zamansal veri birleştirme bu boşlukların yönetilmesine yardımcı olabilir. STARFM, Landsat ve MODIS yüzey yansıtımlarını birleştirerek yüksek mekânsal ayrıntıda zamansal tahmin üretmeye yönelik bilinen yöntemlerdendir. Bu yöntem doğrudan bir termal ET modeli değildir; başka değişkenlere uyarlanması ayrıca yöntemsel değerlendirme gerektirir (Gao et al., 2006).

Birleştirilmiş veya arası doldurulmuş bir görüntü, ilgili tarihte gerçekten yapılmış bağımsız bir gözlem gibi sunulmamalıdır. Sulama, hasat veya ani stres olayı gözlemler arasına denk gelirse, zaman içinde düzgün değişim kabulü bu olayı zayıflatabilir. Ürün

üzerinde gerçek gözlem tarihleri, modelle tamamlanan dönemler ve veri boşluğu uzunluğu gösterilmelidir. Yönetim sisteminin belirsizlik arttığında ek arazi ölçümü istemesi, bütün tarihler için aynı kesinlikte öneri üretmesinden daha savunulabilir bir uygulamadır. Başlıca yöntemlerin karar açısından anlamı Tablo 2'de karşılaştırılmıştır.

Tablo 2. Görüntü temelli yöntemlerin sulama kararına katkısı

Yöntem	**Üretilen bilgi**	**Karara geçişte gereken kontrol**
NDVI	Örtü gelişimi ve spektral yeşillik göstergesi	Fenoloji ve diğer stres nedenleri kontrol edilmelidir; doğrudan sulama derinliği vermez.
NDMI	Bitki örtüsünün su içeriğine duyarlı spektral gösterge	Kullanılan bant belirtilmelidir; hacimsel kök bölgesi nemi değildir.
Termal stres göstergeleri	Referans koşullara göre sıcaklık veya stres değerlendirmesi	Taç maskesi, atmosferik koşullar ve yerel eşik doğrulaması gerektirir.
İndeks temelli Kcb	Örtü gelişimiyle ilişkili bazal bitki katsayısı	ET_0, su stresi ve toprak buharlaşması ayrıca ele alınmalıdır.
Enerji dengesi	Gizli ısı akısı ve bundan türetilen ET	Anlık akının dönemlik ET'ye ölçeklenmesi ve bağımsız doğrulama gerekir.
Radar geri saçılımı	Yüzey ve örtü özelliklerine bağlı değişim sinyali	Pürüzlülük ve örtü etkileri ayrılmalı; kök bölgesine ilişkin çıkarım ölçümle sınanmalıdır.

Kaynak: Literatür değerlendirmesine dayanılarak yazar tarafından hazırlanmıştır (Bastiaanssen et al., 1998; Campos et al., 2010; Jackson et al., 1981; Paloscia et al., 2013; Tucker, 1979; USGS, n.d.). Yöntemler farklı fiziksel değişkenler üretir; çıktılar birbirinin yerine kullanılamaz.

Görüntü bilgisinden sulama kararına geçiş

Kök bölgesi su bütçesi

Sulama zamanını ve miktarını belirlemek için ET tahmini, kök bölgesinin su depolama durumuyla birleştirilmelidir. Basitleştirilmiş günlük su bütçesi, su derinliği biriminde aşağıdaki biçimde kurulabilir (Allen et al., 1998).

$$S_{t+1} = S_t + P + I + C - ET_a - R - D$$

Burada S kök bölgesindeki su depolaması; P yağış, I tarla yüzeyine ulaşan sulama suyu, C kapiler yükselme, ETa gerçek evapotranspirasyon, R yüzey akışı ve D kök bölgesi altına derine sızmadır. Bütün bileşenler aynı alan ve zaman aralığı için tanımlanmalıdır. I yerine sayaçtan geçen brüt su kullanılıyorsa iletim ve uygulama süreçleri ayrıca modellenmelidir. Etkili yağış kullanılırken yüzey akışı veya sızma kayıplarının ikinci kez düşülmemesi de gerekir.

Günlük ET haritası, başlangıç depolaması ve kullanılabilir su kapasitesi bilinmeden sulama derinliğini tek başına belirlemez. Kök derinliğinin gelişme boyunca değişmesi, taban suyundan katkı ve yağışın zamansal dağılımı bütçeyi etkiler. Sahada ölçülen nem verisi, model durumunu güncellemek için kullanılabilir. Ölçüm noktalarının yalnızca kolay erişilen alanlara yerleştirilmesi yerine farklı toprak ve gelişme koşullarını temsil etmesi gerekir. Böylece görüntüde saptanan farkların su depolamasıyla ilişkisi daha güvenilir biçimde değerlendirilebilir (Allen et al., 1998).

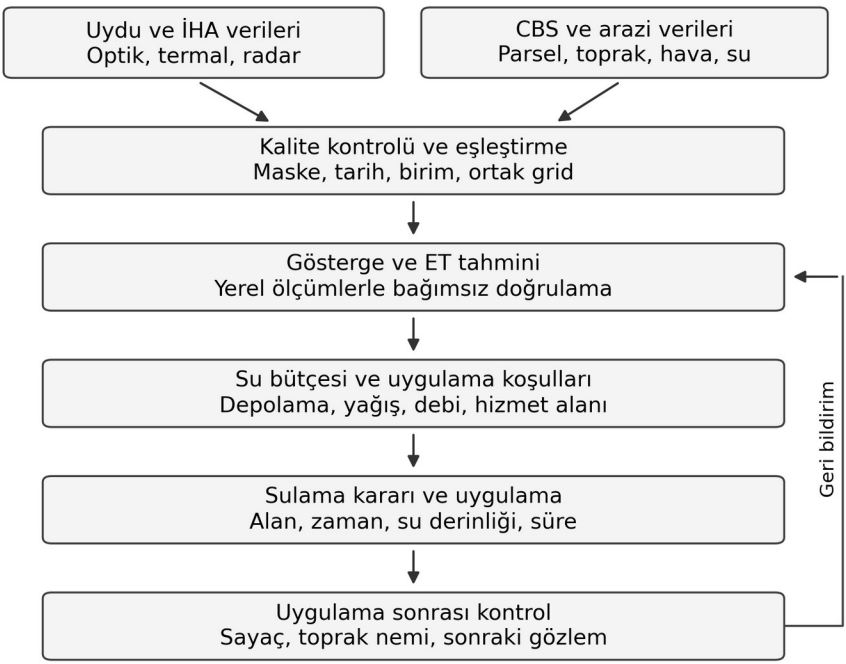
Yönetim zonları ve uygulanabilir öneriler

CBS ortamında yönetim zonları oluşturulurken tek tarihli bir indeks haritasından çok, birden fazla dönemde tekrarlanan desenler araştırılmalıdır. Toprak özellikleri ve topoğrafya ile uyumlu, süreklilik gösteren zonlar uygulama bakımından daha anlamlı olabilir. Buna karşın geçici gölge veya yakın tarihli sulamadan

kaynaklanan farklar, kalıcı zon sınırlarına dönüştürülmemelidir. Bir zonun ayrı yönetilebilmesi için sulama sistemindeki vana, hat veya hareketli sistem kontrolünün de bu ayrımı karşılaması gerekir.

Öneri, yalnızca "stres yüksek" biçiminde verilirse işletmecinin uygulayacağı işlem belirsiz kalır. Karar çıktısında hedef alan, önerilen net su derinliği, bu değerin dayandığı tarih, beklenen yağış ve varsa uygulama kısıtı bulunmalıdır. Net derinliğin brüt hacme çevrilmesinde kabul edilen uygulama etkinliği açıkça belirtilmelidir. Debi ve sulama süresi önerilirken hat kapasitesi, çalışma basıncı ve işletme takvimiyle tutarlılık aranmalıdır. Bu bölümde önerilen gözlemden uygulamaya geçiş döngüsü Şekil 1'de gösterilmektedir.

Şekil 1. Uzaktan algılama ve CBS ile sulama kararının oluşturulması



Kaynak: Yazar tarafından önerilen uygulama çerçevesi. Akış, bağımsız bir saha deneyinin sonucu değildir.

Sistem, görüntüdeki olağandışı bir deseni doğrudan sulama emrine dönüştürmek yerine, güven düzeyine göre arazi kontrolü veya su bütçesi güncellemesi gerektirebilir. Örneğin düşük NDVI ile yüksek sıcaklığın aynı bölgede görülmesi, olası su sorununu araştırmak için gerekçedir; fakat hastalık ve bitki sıklığı bilgisi olmadan neden kesinleştirilemez. Kararın uygulanmasından sonra sayaç, nem ölçümü veya sonraki gözlemle geri bildirim alınması, yanlış varsayımların sezon boyunca sürmesini önler.

Uygulama bulguları ve performans değerlendirmesi

Seçilmiş araştırmaların gösterdikleri

İHA çalışmalarında yüksek ayrıntılı görüntüler, bitki su durumundaki parsel içi değişkenliğin araştırılmasını sağlamıştır. Bağlarda termal ve çok bantlı gözlemlerin birlikte kullanılması ile farklı meyve türlerinde taç sıcaklığının incelenmesi, ürün yapısının ve arazi ölçümlerinin önemini ortaya koyar. Bu tür araştırmalar, görüntüleme yaklaşımının hangi koşullarda yararlı olduğunu gösterir; her işletmede aynı büyüklükte verim artışı veya su tasarrufu gerçekleşeceğini kanıtlamaz (Baluja et al., 2012; Gonzalez-Dugo et al., 2013).

Pamukta 2021–2022 sezonlarını kapsayan bir araştırmada, farklı sulama düzeyleri altında İHA kaynaklı su stresi göstergeleri farklı mekânsal örnekleme aralıklarında değerlendirilmiştir. Çalışmada 0,5 m düzeyi, stres algılama başarısı ve işlem gereksinimi arasında uygun bir denge olarak bildirilmiştir. Sonucun anlamı, en küçük pikselin her durumda en iyi yönetim bilgisini sağlamadığıdır. Bildirilen 0,5 m değeri ise başka ürün, sensör veya tarla düzeni için evrensel bir optimum olarak kullanılmamalıdır (Adedeji et al., 2025).

OpenET, birden fazla ET modelinin sonuçlarını ortak bir erişim çerçevesinde sunan uygulama örneklerindendir (Melton et al., 2022). Volk ve çalışma arkadaşlarının değerlendirmesinde, 152

yer istasyonundan oluşan veri kümesi kullanılmıştır. Tarım alanlarının aylık karşılaştırmasında model topluluğunun ortalama mutlak hatası 15,8 mm/ay, ortalama yanlılığı −5,3 mm/ay olarak bildirilmiştir. Bu değerler ilgili doğrulama alanı ve toplulaştırma düzeyi için geçerlidir; günlük sulama önerisinin veya Türkiye'deki bir parselin doğruluğunu doğrudan temsil etmez (Volk et al., 2024).

Türkiye'den güncel bir örnekte Kaman, Kırşehir'de toplanan mısır görüntülerinden su stresi ve pas hastalığına yönelik veri kümeleri geliştirilmiştir. Araştırmada su stresi veri kümesi için ortalama kesişim/birleşim oranı (Mean IoU) 0,7723 bildirilmiştir. Bununla birlikte, referans maskeler tüm örneklerde doğrudan fizyolojik ölçümle oluşturulmamış; indeks kuralları ve uyarlanan eşiklerden yararlanılmıştır. Dolayısıyla sonuç, öncelikle bu referans etiketlerin görüntüden yeniden üretilme başarısını gösterir. Bağımsız fizyolojik stres doğrulaması ve sulama etkisi ayrıca araştırılmalıdır (Suiçmez et al., 2026). Seçilmiş bulgular ve yorum sınırları Tablo 3'te verilmiştir.

Tablo 3. Seçilmiş uygulama bulguları ve yorum sınırları

Araştırma ve bağlam	**Bildirilen bulgu**	**Yorum sınırı**
(Baluja et al., 2012) Bağ, İHA görüntüleri	Termal ve çok bantlı görüntülerle bağ su durumunun mekânsal değişkenliği değerlendirilmiştir.	Ürüne ve gözlem koşullarına bağlıdır; tek başına su tasarrufu sonucu değildir.
(Adedeji et al., 2025) Teksas, pamuk, 2021–2022	0,5 m örnekleme aralığı, stres algılama ve işlem gereksinimi arasında uygun denge sağlamıştır.	Çalışmanın ürün ve görüntü koşullarına özgüdür; bütün İHA uygulamaları için optimum değildir.
(Volk et al., 2024) OpenET doğrulaması	Tarım alanlarında aylık topluluk ET tahmininin MAE'si 15,8 mm/ay; ortalama yanlılığı −5,3 mm/aydır.	Aylık ET başarısıdır; günlük sulama miktarı veya Türkiye için doğrudan doğruluk değeri değildir.

Araştırma ve bağlam	Bildirilen bulgu	Yorum sınırı
(Suiçmez et al., 2026) Kaman, Kırşehir, mısır	Su stresi veri kümesinde Mean IoU 0,7723 bildirilmiştir.	Referans etiketler indeks temellidir; tüm örneklerde doğrudan fizyolojik doğrulama bulunmamaktadır.

Kaynak: Belirtilen yayınların bulguları yazar tarafından özetlenmiştir. MAE: ortalama mutlak hata; Mean IoU: ortalama kesişim/birleşim oranı. Farklı hedef ve doğrulama düzenleri nedeniyle değerler ortak bir başarı sıralaması oluşturmaz.

Su verimliliği ve hizmet başarısı

Uzaktan algılama tabanlı performans değerlendirmesinde tüketilen su ile sulama sisteminden teslim edilen su ayrılmalıdır. Ürün miktarının ET hacmine oranı, tüketilen suya göre verimlilik göstergesi oluştururken; teslim edilen sulama suyuna oranı farklı bir yönetim göstergesidir. Yağışın katkısı, toprakta depolanan su ve alan sınırından geçen akımlar bu ayrımı etkiler. Aynı ürün miktarıyla iki farklı payda kullanıldığında elde edilen oranlar birbirinin yerine yorumlanamaz (Ahmad et al., 2009).

ET'nin mm olarak hesaplandığı bir alanda hacme dönüşüm için alan bilgisi gereklidir; 1 mm su derinliği, 1 hektarda 10 m³ hacme karşılık gelir. Ancak farklı ürünlerin biyokütlesi ile pazarlanabilir ürün miktarı aynı çıktı değildir. Su verimliliği raporunda ürün tanımı, nem esası, kullanılan alan, değerlendirme dönemi ve su paydası açıklanmalıdır. Sezonluk ET değişimi tek başına sulama hizmetindeki iyileşmenin nedeni olarak da kullanılamaz; ürün deseni ve hava koşullarıyla birlikte değerlendirilmelidir.

FAO'nun WaPOR veri sistemi, ET ve biyokütle gibi katmanların su verimliliği değerlendirmesinde birlikte kullanılmasına örnek oluşturur. Sistemde küresel 300 m verilerin yanında belirli kapsamlar için daha ayrıntılı düzeyler bulunmaktadır. Bir çözünürlük düzeyinin tanımlanmış olması, Türkiye'deki bütün

parseller için aynı ayrıntıda ürün bulunduğu anlamına gelmez. Uygulama öncesinde coğrafi kapsam, değişken tanımı ve tarih aralığı katalogdan kontrol edilmelidir (Food and Agriculture Organization of the United Nations, n.d.).

Doğrulama ve belirsizliğin yönetimi

Referans ölçümün temsil gücü

Doğrulamada ilk koşul, tahmin edilen değişkenle karşılaştırılan ölçümün aynı fiziksel büyüklüğü temsil etmesidir. ET tahmini, yalnızca görüntüden üretilmiş başka bir ET haritasıyla karşılaştırılarak bağımsız biçimde doğrulanmış sayılmaz. Lizimetre, girdap kovaryansı veya iyi tanımlanmış su bütçesi gibi referansların da kendi belirsizlikleri vardır. Ayrıca girdap kovaryansı ölçümünün kaynak alanı rüzgâr ve atmosferik koşullarla değişebildiği için, tek bir piksel veya parsel ortalamasıyla eşleştirme dikkatle yapılmalıdır (Volk et al., 2024).

Termal stres göstergeleri için yaprak su potansiyeli, stomatal iletkenlik ve uygun derinliklerde toprak nemi gibi ölçümler, araştırma sorusuna göre seçilebilir. Ölçümlerin görüntüyle zaman uyumu sağlanmalı; sulamadan hemen önce alınan fizyolojik gözlem, sulama sonrasındaki görüntüyle açıklama yapılmadan eşleştirilmemelidir. Arazi örneklemesi, hem iyi gelişen hem sorunlu alanları kapsamalıdır. Yalnızca belirgin uç durumların seçilmesi, işletmenin olağan koşullarındaki performansı olduğundan yüksek gösterebilir (Baluja et al., 2012; Jones, 1999).

Hata ölçütleri ve bağımsız değerlendirme

ET doğrulamasında ortalama mutlak hata, hata kareleri ortalamasının karekökü ve ortalama yanlılık; mm/gün veya mm/ay gibi açık birimlerle raporlanmalıdır. Yüksek korelasyon, büyüklüklerin doğru tahmin edildiği anlamına gelmez; sistematik olarak yüksek veya düşük tahmin yapan bir model de güçlü

korelasyon gösterebilir. Hataların ürün, örtü oranı, sezon ve veri boşluğu uzunluğuna göre ayrılması, yalnızca bütün gözlemlerin tek bir başarı değeriyle özetlenmesinden daha yararlı olabilir (Volk et al., 2024).

Makine öğrenmesi kullanılan uygulamalarda aynı ortomozaikten alınan komşu görüntü parçalarının rastgele eğitim ve test kümelerine dağıtılması bağımsızlığı zayıflatabilir. Model, yeni bir işletmenin koşullarından çok aynı görüntünün dokusunu öğrenmiş olabilir. Bu nedenle mümkün olduğunda parsel, uçuş tarihi veya üretim sezonu temelinde ayrılmış testler tercih edilmelidir. İndekslerden türetilmiş referans etiketlerle eğitilen modelin değerlendirilmesi de etiket üretim yönteminin doğruluğundan ayrılmalıdır. Sınıflandırma başarısının sulama miktarı doğruluğuna dönüştüğü ayrıca gösterilmelidir (Suiçmez et al., 2026).

Karar belirsizliği yalnızca tek bir model hatası değildir. Bulut maskesi, geometrik eşleştirme, meteorolojik girdi ve toprak parametresi hataları aynı öneriyi etkileyebilir. Uygulamada en azından gözlem kalitesi, modelin geçerlilik alanı ve mevcut ölçümlerin temsil gücü raporlanmalıdır. Güvenilirlik düşük olduğunda ek ölçüm yapılması, önerinin ertelenmesi veya daha geniş bir öneri aralığının uzman değerlendirmesine sunulması düşünülebilir. Bu seçenekler için eşikler, yönetim hedefi ve yanlış kararın maliyeti dikkate alınarak yerel olarak belirlenmelidir.

Türkiye için uygulanabilir bir çerçeve

Türkiye'de uygulama tasarlanırken başlangıç noktası teknoloji seçimi değil, çözülmek istenen yönetim sorunu olmalıdır. Amaç; sulama zamanını belirlemek, dağıtım yetersizliğini saptamak veya sezonluk tüketimi izlemek olabilir. Bu amaçlar aynı veri ayrıntısını ve doğrulama düzenini gerektirmez. Örneğin küçük parsellerde tek tarihli Landsat termal verisiyle ayrı sulama kararları üretmek yerine, uydu zaman serisini temsil edici arazi ölçümleriyle

birleştirmek daha uygun bir başlangıç olabilir. Bu seçim, parsel geometrisi ve mevcut veri kalitesiyle sınanmalıdır.

İlk uygulama alanında ürün deseni, toprak farklılıkları ve sulama sisteminin kontrol birimleri birlikte haritalanmalıdır. Ardından hedef değişken ve kabul edilebilir karar hatası tanımlanarak örnekleme düzeni kurulmalıdır. Bir üretim sezonunda ilişkinin kalibre edilmesi yararlı olsa da farklı hava ve ürün koşullarını değerlendirmek için bağımsız sezon veya alan verisi gerekir. Burada önerilen yaklaşım, gerçekleştirilmiş bir Türkiye pilotunun sonuçları olarak değil, sınanması gereken bir uygulama düzeni olarak sunulmaktadır.

İşletme düzeyinde veri güncelleme sorumluluğu açık olmalıdır. Ürün değişikliğini kimin kaydedeceği, sayaç verisini kimin kontrol edeceği ve önerinin hangi koşullarda gözden geçirileceği belirlenmelidir. Kullanıcıya sunulan çıktı, veri kaynağını ve tarihini göstermeli; önerinin sahada uygulanmasını sağlayacak yeterli açıklama içermelidir. Ayrıntılı model parametrelerinin tamamını çiftçiye aktarmak yerine, önerilen işlem ve varsa arazi kontrolü gereksinimi anlaşılır biçimde belirtilmelidir.

Kararın uygulamaya çevrilmesi, varsayımsal bir hesapla gösterilebilir. Bir hektarlık yönetim biriminde güncellenmiş su bütçesinin 24 mm net sulama gereksinimi verdiği kabul edilsin. Net hacim 240 m^3 olur. Tarla içi uygulama etkinliği 0,80 kabul edildiğinde tarla girişinde gerekli brüt hacim 300 m^3, sağlanabilen sabit debi 30 m^3/saat ise uygulama süresi 10 saattir. Bu değerler bir arazi deneyi sonucu veya ürün için önerilen eşikler değildir. Örnek, ET tahmininin depolama ve işletme bilgileriyle birleştirildikten sonra uygulanabilir hacim ve süreye dönüştürüldüğünü gösterir.

Ekonomik değerlendirme; görüntüye erişim, arazi ölçümü, kalibrasyon, işleme ve uzman zamanı giderlerini kapsamalıdır. Başarı, önerilerin doğruluğu ve uygulanma oranı yanında kullanılan

su, ürün sonucu ve hizmet sürekliliğiyle izlenmelidir. Su tasarrufu iddiası, karşılaştırılabilir koşullarda ve açık bir hesap sınırında ölçülmüş teslim suyu verisi gerektirir.

Sonuç

Uzaktan algılama ve CBS, tarımsal sulama yönetiminde mekânsal değişkenliği izleme, arazi örneklemesini yönlendirme ve ET tahminlerini yönetim birimleriyle ilişkilendirme olanağı sağlar. Optik indeksler örtü gelişimi ve spektral su içeriği hakkında bilgi verirken, termal gözlemler enerji dengesi ve stres değerlendirmesine katkı sunar. Radar gözlemleri de uygun koşullarda tamamlayıcı nem bilgisi sağlayabilir. Bu değişkenlerin her biri farklı bir fiziksel anlam ve gözlem ölçeği taşıdığı için birbirinin yerine kullanılmamalıdır.

Uygulanabilir bir sulama önerisi, görüntü bilgisini kök bölgesi su bütçesi ve sistemin çalışma koşullarıyla birleştirmeyi gerektirir. Gözlem boşlukları ve kalibrasyon sınırları kararın güvenilirliğini etkiler. Türkiye'de sürdürülebilir kullanım; güncel CBS verisi, temsil edici arazi ölçümleri, bağımsız doğrulama ve uygulama sonrası geri bildirim sağlayan bir işletme düzenine dayanmalıdır.

Kaynakça/References

Adedeji, O., Sun, Y., Li, S., & Guo, W. (2025). Effects of spatial resolution on assessing cotton water stress using unmanned aerial system imagery. *Remote Sensing, 17*(24), Article 4018. https://doi.org/10.3390/rs17244018

Ahmad, M. D., Turral, H., & Nazeer, A. (2009). Diagnosing irrigation performance and water productivity through satellite remote sensing and secondary data in a large irrigation system of Pakistan. *Agricultural Water Management, 96*(4), 551–564. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2008.09.017

Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (1998). *Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements* (FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56). FAO. https://www.fao.org/4/x0490e/x0490e00.htm

Allen, R. G., Tasumi, M., & Trezza, R. (2007). Satellite-based energy balance for mapping evapotranspiration with internalized calibration (METRIC)—Model. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 133*(4), 380–394. https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9437(2007)133:4(380)

Baluja, J., Diago, M. P., Balda, P., Zorer, R., Meggio, F., Morales, F., & Tardaguila, J. (2012). Assessment of vineyard water status variability by thermal and multispectral imagery using an unmanned aerial vehicle (UAV). *Irrigation Science, 30*(6), 511–522. https://doi.org/10.1007/s00271-012-0382-9

Bastiaanssen, W. G. M., Menenti, M., Feddes, R. A., & Holtslag, A. A. M. (1998). A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL). 1. Formulation. *Journal of Hydrology, 212–213*, 198–212. https://doi.org/10.1016/s0022-1694(98)00253-4

Berni, J. A. J., Zarco-Tejada, P. J., Suárez, L., & Fereres, E. (2009). Thermal and narrowband multispectral remote sensing for vegetation monitoring from an unmanned aerial vehicle. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 47*(3), 722–738. https://doi.org/10.1109/tgrs.2008.2010457

Campos, I., Neale, C. M. U., Calera, A., Balbontín, C., & González-Piqueras, J. (2010). Assessing satellite-based basal crop coefficients for irrigated grapes (Vitis vinifera L.). *Agricultural Water Management, 98*(1), 45–54. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2010.07.011

Drusch, M., Del Bello, U., Carlier, S., Colin, O., Fernandez, V., Gascon, F., Hoersch, B., Isola, C., Laberinti, P., Martimort, P., Meygret, A., Spoto, F., Sy, O., Marchese, F., & Bargellini, P. (2012). Sentinel-2: ESA's optical high-resolution mission for GMES operational services. *Remote Sensing of Environment, 120*, 25–36. https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.11.026

Food and Agriculture Organization of the United Nations. (n.d.). *WaPOR data*. Retrieved October 22, 2026, from https://www.fao.org/in-action/remote-sensing-for-water-productivity/wapor-data/

Gao, F., Masek, J., Schwaller, M., & Hall, F. (2006). On the blending of the Landsat and MODIS surface reflectance: Predicting daily Landsat surface reflectance. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 44*(8), 2207–2218. https://doi.org/10.1109/tgrs.2006.872081

Gonzalez-Dugo, V., Zarco-Tejada, P., Nicolás, E., Nortes, P. A., Alarcón, J. J., Intrigliolo, D. S., & Fereres, E. (2013). Using high resolution UAV thermal imagery to assess the variability in the water status of five fruit tree species within a commercial orchard. *Precision Agriculture, 14*(6), 660–678. https://doi.org/10.1007/s11119-013-9322-9

Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M., Ilyushchenko, S., Thau, D., & Moore, R. (2017). Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sensing of Environment, 202*, 18–27. https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.031

Jackson, R. D., Idso, S. B., Reginato, R. J., & Pinter, P. J. (1981). Canopy temperature as a crop water stress indicator. *Water Resources Research, 17*(4), 1133–1138. https://doi.org/10.1029/wr017i004p01133

Jones, H. G. (1999). Use of infrared thermometry for estimation of stomatal conductance as a possible aid to irrigation scheduling. *Agricultural and Forest Meteorology, 95*(3), 139–149. https://doi.org/10.1016/s0168-1923(99)00030-1

Kamble, B., Kilic, A., & Hubbard, K. (2013). Estimating crop coefficients using remote sensing-based vegetation index. *Remote Sensing, 5*(4), 1588–1602. https://doi.org/10.3390/rs5041588

Masek, J. G., Wulder, M. A., Markham, B., McCorkel, J., Crawford, C. J., Storey, J., & Jenstrom, D. T. (2020). Landsat 9: Empowering open science and applications through continuity. *Remote Sensing of Environment, 248*, Article 111968. https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.111968

Melton, F. S., Huntington, J., Grimm, R., Herring, J., Hall, M., Rollison, D., Erickson, T., Allen, R., Anderson, M., Fisher, J. B., Kilic, A., Senay, G. B., Volk, J., Hain, C., Johnson, L., Ruhoff, A., Blankenau, P., Bromley, M., Carrara, W., . . . Anderson, R. G. (2022). OpenET: Filling a critical data gap in water management for the western United States. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association, 58*(6), 971–994. https://doi.org/10.1111/1752-1688.12956

Norman, J. M., Kustas, W. P., & Humes, K. S. (1995). A two-source approach for estimating soil and vegetation fluxes from observations of directional radiometric surface temperature. *Agricultural and Forest Meteorology, 77*(3–4), 263–293. https://doi.org/10.1016/0168-1923(95)02265-y

Paloscia, S., Pettinato, S., Santi, E., Notarnicola, C., Pasolli, L., & Reppucci, A. (2013). Soil moisture mapping using Sentinel-1 images: Algorithm and preliminary validation. *Remote Sensing of Environment, 134*, 234–248. https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.02.027

Suiçmez, Ç., Yılmaz, C., Kahraman, H. T., & Erdoğan, M. A. (2026). UAV-derived multispectral datasets and index-guided segmentation for maize water stress and common rust detection under real field conditions. *Applied Sciences, 16*(14), Article 6860. https://doi.org/10.3390/app16146860

Torres, R., Snoeij, P., Geudtner, D., Bibby, D., Davidson, M., Attema, E., Potin, P., Rommen, B., Floury, N., Brown, M., Traver, I. N., Deghaye, P., Duesmann, B., Rosich, B., Miranda, N., Bruno, C., L'Abbate, M., Croci, R., Pietropaolo, A., . . . Rostan, F. (2012). GMES Sentinel-1 mission. *Remote Sensing of Environment, 120*, 9–24. https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.05.028

Tucker, C. J. (1979). Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sensing of Environment, 8*(2), 127–150. https://doi.org/10.1016/0034-4257(79)90013-0

U.S. Geological Survey. (n.d.). *Normalized difference moisture index*. Retrieved October 22, 2026, from https://www.usgs.gov/landsat-missions/normalized-difference-moisture-index

Volk, J. M., Huntington, J. L., Melton, F. S., Allen, R., Anderson, M., Fisher, J. B., Kilic, A., Ruhoff, A., Senay, G. B., Minor, B., Morton, C., Ott, T., Johnson, L., Comini de Andrade, B., Carrara, W., Doherty, C. T., Dunkerly, C., Friedrichs, M., Guzman, A., . . . Yang, Y. (2024). Assessing the accuracy of OpenET satellite-based evapotranspiration data to support water resource and land management applications. *Nature Water, 2*(2), 193–205. https://doi.org/10.1038/s44221-023-00181-7

BÖLÜM 3

TARIMSAL ROBOTLARDA DİJİTAL İKİZ: MODELLEME, SANAL DEVREYE ALMA VE DOĞRULAMA YAKLAŞIMLARI

Osman ECEOĞLU[1]
İlker ÜNAL[2]

Giriş

Tarımsal mobil robotların geliştirilmesi, mekanik ve elektronik bileşenlerin bütünleştirilmesinin yanı sıra kontrol, algılama ve karar verme işlevlerinin farklı çalışma koşullarında sınanmasını gerektiren çok aşamalı bir mühendislik sürecidir. Açık tarla, bağ, bahçe ve sera gibi tarımsal ortamlarda zemin yapısı, bitki özellikleri, arazi geometrisi ve çevresel koşullar zaman ve mekâna bağlı olarak değişebilmektedir. Bu değişkenlik, robotların yalnızca ideal çalışma koşullarında değil, farklı işletme senaryoları altında da değerlendirilmesini gerekli kılmaktadır. Bununla birlikte fiziksel sistem üzerinde yürütülen testler; zaman, maliyet, güvenlik ve deney koşullarının tekrarlanabilirliği açısından çeşitli sınırlılıklar taşımaktadır. Sanal test ortamları, robotun algılama, navigasyon ve

[1] Öğr. Gör. Dr., Akdeniz Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Elektronik ve Otomasyon Bölümü, ORCID: 0000-0001-5778-6655
[2] Doç. Dr., Burdur Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi, Fen Edebiyat Fakültesi, Hassas Tarım ve Tarımsal Robotlar Bölümü, ORCID: 0000-0002-5188-4438

kontrol işlevlerinin fiziksel robota veya ürüne zarar verme riski oluşturmadan değerlendirilmesine ve gerçek ortamda oluşturulması güç, maliyetli veya mevsimsel koşullara bağlı senaryoların kontrollü biçimde tekrarlanmasına olanak sağlamaktadır (Kusper et al., 2026).

Dijital ikiz yaklaşımı, fiziksel sistem ile bu sistemin dijital temsili arasındaki ilişkinin veri, model ve sistem davranışı temelinde kurulmasına yönelik bütünleşik bir yapı sunmaktadır. Ancak tarımsal sistemlerde biyotik ve abiyotik bileşenlerin birlikte bulunması, çevresel koşulların sürekli değişmesi ve fiziksel sistem sınırlarının her zaman açık biçimde tanımlanamaması, dijital ikiz uygulamalarını geleneksel endüstriyel uygulamalara göre daha karmaşık hâle getirmektedir. Tarım ve ormancılık alanındaki uygulamalarda dijital ikizlerin entegrasyon ve olgunluk düzeylerinin önemli ölçüde farklılaştığı, çalışmaların yalnızca sınırlı bir bölümünün tam bütünleşmiş dijital ikiz düzeyine ulaştığı bildirilmektedir. Bu durum, tarımsal sistemlerde kullanılan dijital temsillerin sahip oldukları fiziksel–dijital entegrasyon düzeyine göre değerlendirilmesinin önemini ortaya koymaktadır (Tagarakis et al., 2024).

Tarımsal robotik açısından dijital ikiz, robotun yalnızca geometrik veya görsel bir kopyasının oluşturulmasıyla sınırlı değildir. Dijital temsilin, fiziksel robotun görev açısından önemli davranışlarını uygun bir modelleme düzeyinde yansıtması ve geliştirme sürecinde analiz, simülasyon ve test amacıyla kullanılabilecek bir yapı oluşturması beklenmektedir. Tarımsal robotlara yönelik güncel yaklaşımlar, robotik sistemlerin çevresel modeller ve fiziksel sistemden elde edilen bilgilerle birlikte ele alınmasını önermekte; böylece robot davranışının içinde bulunduğu tarımsal ekosistemden bağımsız değerlendirilmesinin önüne geçilmektedir. Bu yaklaşım, dijital ikizin tarımsal robotlar için yalnızca bir sanal prototip değil, fiziksel sistem ile çevresinin birlikte

temsil edildiği bütünleşik bir geliştirme aracı olarak ele alınabileceğini göstermektedir (Sibona et al., 2025).

Dijital bir temsilin mühendislik kararlarında güvenilir biçimde kullanılabilmesi, modelin fiziksel sistem davranışını kullanım amacı açısından yeterli doğrulukta temsil etmesine bağlıdır. Bu nedenle dijital ikiz geliştirme sürecinde modelin yalnızca hesaplamalı olarak çalışması yeterli görülmemekte; modelin güvenilirliğinin doğrulama ve geçerleme süreçleriyle değerlendirilmesi gerekmektedir. Dijital ikizlerde doğrulama ve geçerleme uygulamalarını inceleyen sistematik çalışmalar, bu iki sürecin model güvenilirliğinin oluşturulmasında temel bir işleve sahip olduğunu, ancak mevcut uygulamalarda yöntemlerin ve değerlendirme yaklaşımlarının henüz tam olarak standartlaşmadığını göstermektedir (Bitencourt et al., 2025).

Sanal modeller, fiziksel sistem tamamen devreye alınmadan önce kontrol ve yazılım bileşenlerinin değerlendirilmesine de imkân vermektedir. Sanal devreye alma yaklaşımında gerçek sistem üzerinde uygulanacak kontrol mantığı ve sistem davranışı dijital ortamda sınanabilmekte, böylece bazı tasarım ve entegrasyon sorunlarının fiziksel uygulamadan önce belirlenmesi mümkün olmaktadır. Dijital ikiz destekli sanal devreye alma çalışmalarında model ile fiziksel sistem arasındaki tutarlılığın korunması ve sanal ortamda elde edilen sonuçların gerçek sistem davranışıyla ilişkilendirilmesi, güvenilir bir geliştirme sürecinin temel gereksinimleri arasında değerlendirilmektedir (Ni et al., 2025).

Bu kitap bölümünde tarımsal mobil robotların geliştirilmesinde dijital ikiz yaklaşımı; sanal modelleme, model sadakati, sanal devreye alma, doğrulama ve simülasyon tabanlı test aşamalarından oluşan bütünleşik bir mühendislik süreci çerçevesinde ele alınmaktadır. Bu doğrultuda öncelikle dijital model, dijital gölge ve dijital ikiz arasındaki kavramsal sınırlar açıklanmakta; ardından tarımsal mobil robotların sanal

modellenmesi ve model sadakati, Model-in-the-Loop (MIL), Software-in-the-Loop (SIL) ve Hardware-in-the-Loop (HIL) temelli sanal devreye alma yaklaşımları ile model doğrulama ve simülasyon tabanlı test süreçleri değerlendirilmektedir. Son aşamada ise bu bileşenler tarımsal mobil robotlara yönelik bütünleşik bir dijital ikiz geliştirme ve doğrulama çerçevesi altında bir araya getirilmektedir.

Dijital Model, Dijital Gölge ve Dijital İkiz

Dijital ikiz kavramının farklı disiplinlerde değişen kapsamlarla kullanılması, fiziksel bir sistemin sayısal ortamda temsil edilmesinin hangi durumda dijital ikiz olarak değerlendirilebileceği konusunda terminolojik belirsizlik oluşturmuştur. Bu nedenle fiziksel varlık ile dijital temsil arasındaki entegrasyon düzeyinin açık biçimde tanımlanması gerekmektedir. Literatürde yaygın olarak kullanılan sınıflandırmada dijital model, dijital gölge ve dijital ikiz arasındaki temel ayrım, fiziksel ve dijital sistemler arasındaki veri akışının yönü ve otomasyon düzeyi üzerinden yapılmaktadır (Kritzinger et al., 2018).

Dijital model, fiziksel bir sistemin geometrik, kinematik, dinamik veya davranışsal özelliklerinden belirli bir bölümünü sayısal ortamda temsil eden ancak fiziksel sistemle otomatik veri alışverişi bulunmayan yapıdır. Model parametreleri ölçüm sonuçları, teknik özellikler veya daha önce toplanmış veriler kullanılarak oluşturulabilir ve gerektiğinde kullanıcı tarafından güncellenebilir. Bununla birlikte fiziksel sistemde meydana gelen bir değişikliğin dijital modele otomatik olarak aktarılmaması, iki varlığın birbirinden bağımsız biçimde çalışabilmesine neden olmaktadır. Bu nedenle çevrim dışı çalışan bir robot simülasyonu, ayrıntılı bir üç boyutlu model veya gerçek robot parametreleri kullanılarak oluşturulmuş bir fizik tabanlı simülasyon, yüksek model doğruluğuna sahip olsa dahi tek başına dijital ikiz olarak değerlendirilmemelidir. Güncel literatürde de dijital model, fiziksel karşılığıyla gerçek zamanlı

bağlantısı bulunmayan ve çoğunlukla tasarım, simülasyon veya optimizasyon amaçlarıyla kullanılan temel dijital temsil düzeyi olarak tanımlanmaktadır (Sajadieh & Noh, 2025).

Dijital gölge, dijital modele kıyasla daha gelişmiş bir entegrasyon seviyesine karşılık gelir. Bu mimaride sahadaki fiziksel sistem verileri dijital ortama otomatik aktarılır ve dijital model, gerçek varlığın anlık durumundaki değişimleri takip eder. Robotun anlık konumu, kinematiği ve görev parametreleri söz konusu akış kanalıyla dijital ortamdan izlenebilir. Ancak dijital gölgede sanaldan fiziksel sisteme otomatik bir komut geri bildirimi bulunmadığı için, izleme ve analiz imkânına rağmen kapalı çevrim bir fiziksel–dijital etkileşim sağlanamaz (Sajadieh & Noh, 2025).

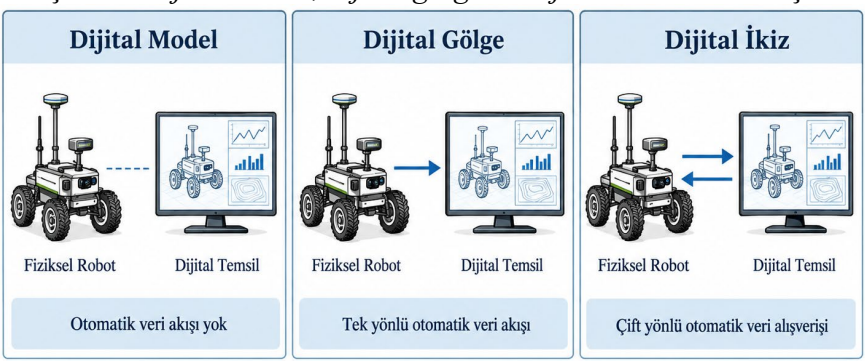
Dijital ikiz mimarisinde ise fiziksel robottan toplanan veriler eş zamanlı ve otomatik olarak dijital modele işlenir. Benzer şekilde, sanal ortamda üretilen görev veya kontrol komutları da fiziksel robota otomatik aktarılır. Platformun bu komutlara gösterdiği fiziksel tepkilerin yeniden sanal modele beslenmesiyle çift yönlü ve dinamik bir etkileşim çevrimi kurulur. Yine de sadece bir haberleşme altyapısının kurulması yeterli değildir. Veri trafiğinin, fiziksel sistemin durumunu dijital modelde sürekli güncellemesi ve hedeflenen mühendislik amacına uygun bir etkileşim sunması şarttır (Sajadieh & Noh, 2025).

Bir yapının dijital ikiz olarak değerlendirilmesinde kullanılan simülasyon yazılımı, üç boyutlu modelin ayrıntı düzeyi veya işlenen veri miktarı belirleyici değildir. Esas ölçüt, fiziksel sistem ile dijital temsil arasındaki otomatik veri alışverişinin yönü ve bu etkileşimin uygulamadaki işlevidir (Kritzinger et al., 2018).

Tarımsal mobil robotlar açısından bu ayrım daha belirgin hâle gelmektedir. Örneğin gerçek robottan herhangi bir çevrim içi veri almadan çalışan Gazebo, Isaac Sim, Webots veya benzeri bir ortamda oluşturulmuş sanal robot, fiziksel sisteme yüksek derecede

benzese dahi dijital model düzeyindedir. Fiziksel robotun konumu, görev durumu veya çevre ölçümlerinin sanal ortama sürekli aktarılması ancak sanal sistemden robota otomatik bir geri dönüşün bulunmaması durumunda yapı dijital gölge özelliği göstermektedir. Sanal modelden üretilen karar, görev veya kontrol bilgisinin fiziksel robota otomatik olarak aktarılması ve robotun yeni durumunun yeniden dijital ortama beslenmesiyle kapalı bir fiziksel–dijital çevrim oluşturulması ise dijital ikiz düzeyine geçiş için temel koşulu oluşturmaktadır. Tarımsal robotlara yönelik güncel dijital ikiz çalışmalarında da robotik algılama, çevresel modelleme, sanal tahmin ve fiziksel müdahalenin aynı çevrim içerisinde bütünleştirilmesi, tam işlevli robot odaklı dijital ikizlerin geliştirilmesinde temel hedeflerden biri olarak ele alınmaktadır (Sibona et al., 2025). Bu nedenle fiziksel robotla gerçek zamanlı ve otomatik çift yönlü veri alışverişi bulunmayan bir simülasyon modeli, dijital ikiz olarak değil, sahip olduğu entegrasyon düzeyine göre dijital model veya dijital gölge olarak değerlendirilmelidir. Dijital model, dijital gölge ve dijital ikiz arasındaki veri akışı ve entegrasyon farkları Şekil 1'de gösterilmiştir.

Şekil 1 Dijital model, dijital gölge ve dijital ikizde veri akışı



Tarımsal Mobil Robotların Sanal Modellenmesi ve Model Sadakati

Tarımsal bir mobil robotun sanal olarak modellenmesinde ilk aşama, modelin hangi mühendislik amacı için kullanılacağının ve hangi fiziksel bileşenleri kapsayacağının belirlenmesidir. Tasarım değerlendirmesi, kontrol yazılımının sınanması, görev planlama veya sanal devreye alma gibi uygulamalar farklı modelleme gereksinimleri ortaya çıkarmaktadır. Model kapsamının, yapılacak analiz üzerinde etkili olan özelliklerle sınırlandırılması; fiziksel sistemin tüm ayrıntılarının aynı düzeyde temsil edilmesinden daha uygun olmaktadır. Robot dijital ikizlerine yönelik güncel çalışmalar da modelleme ve simülasyon bileşenlerinin kullanım amacı ve sistem mimarisiyle birlikte ele alınması gerektiğini göstermektedir (Qin et al., 2026).

Mobil robotun sanal temsili; gövde geometrisi, kinematik yapı, kütle, atalet momentleri, aktüatör özellikleri ve hareketi belirleyen fiziksel kısıtlar gibi bileşenlerden oluşabilmektedir. Bu özelliklerin tamamının aynı ayrıntı düzeyinde modellenmesi zorunlu değildir. Örneğin yalnızca görev güzergâhının incelendiği bir modelde ayrıntılı aktüatör dinamiğinin temsil edilmesi ikincil düzeyde kalabilmektedir. Buna karşılık hızlanma, yön değiştirme veya yük etkilerinin değerlendirildiği uygulamalarda kütle dağılımı ile aktüatör tepkileri model davranışı üzerinde daha belirleyici hâle gelmektedir. Tarımsal robotlara yönelik bir dijital test ortamında robot modeli; kinematik yapı, kütle, atalet momentleri, aktüatörler ve transmisyon özelliklerini içerecek biçimde tanımlanmış ve sanal robotun fiziksel platformla benzer şekilde kontrol edilebilmesi amaçlanmıştır (Sibona et al., 2025).

Robot modelinin yanı sıra çalışma çevresinin temsil edilmesi de tarımsal uygulamalarda ayrı bir modelleme problemidir. Tarla sınırları, bitki sıraları, geçiş alanları, arazi yüzeyi ve görevle ilişkili nesneler robotun sanal ortamla etkileşimini doğrudan

etkileyebilmektedir. Tarımsal ortamların mevsimsel ve mekânsal olarak değişmesi, çevrenin tek ve değişmez bir geometrik modelle temsil edilmesini güçleştirmektedir. Bu nedenle çevresel ayrıntının seçimi, gerçekleştirilecek testin gerektirdiği bilgi düzeyiyle ilişkilendirilmelidir. Tarımsal bir çalışma alanının fotogerçekçi dijital temsili ile simüle edilmiş bir kara aracının birlikte kullanıldığı bir uygulamada, sanal ortamdan yüksek sadakatli Red, Green, Blue (RGB) görüntüler ile Light Detection and Ranging (LiDAR) verileri üretilerek fiziksel saha çalışmalarına geçmeden önce algoritmaların geliştirilmesi ve değerlendirilmesi sağlanmıştır (Mirbod et al., 2025).

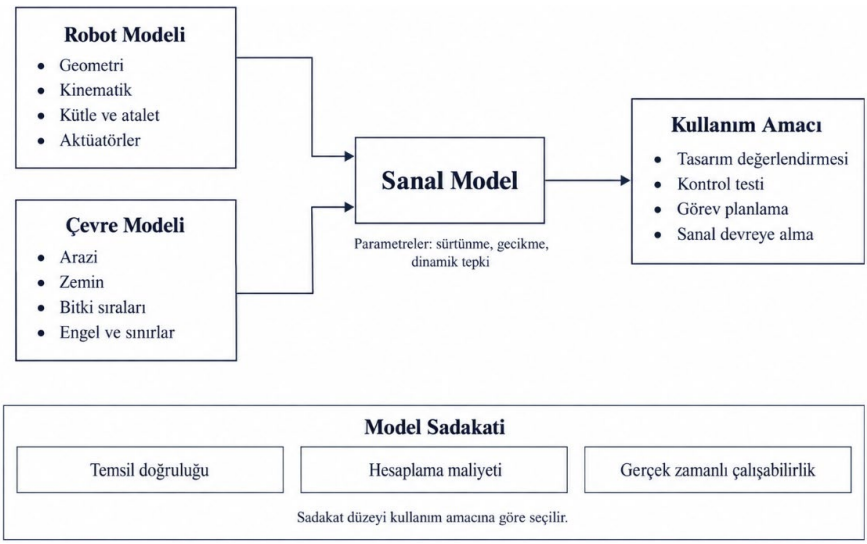
Model sadakati, sanal temsilin fiziksel sistemdeki incelenen özellikleri hedeflenen kullanım amacı doğrultusunda ne derece yansıttığını ifade eder. Söz konusu kavramı yalnızca üç boyutlu modelin görsel gerçekçiliğine indirgemek doğru değildir. Nitekim modelin; robotun hareketini sınırlayan fiziksel kısıtları, çevre etkileşimini ve zamana bağlı dinamik tepkilerini kullanım amacına uygun detayda içermesi gerekir. Görsel açıdan ayrıntılı bir 3B görünüm sunulması, hareket ve kontrol mekaniğinin de aynı doğrulukta modellendiği anlamına gelmez. Yalın geometrik modeller belirli test senaryoları için yeterli kalabilse de doğal saha düzensizlikleri, algılama/sensör belirsizlikleri ve hesaba katılmayan fiziksel etkenler simülasyonun gerçekçi kapsama alanını daraltmaktadır (Antonelli et al., 2024).

Model sadakatinin yükseltilmesi genellikle daha ayrıntılı fiziksel modeller, daha fazla parametre ve daha yüksek hesaplama gereksinimi ortaya çıkarmaktadır. Bu durum özellikle sanal modelin gerçek zamanlı veya gerçek zamana yakın biçimde çalışması gereken uygulamalarda önem kazanmaktadır. Hesaplama süresi fiziksel sistemin çalışma çevrimiyle uyumlu değilse, çok yüksek ayrıntı düzeyine sahip bir model sanal devreye alma veya çevrim içi dijital ikiz uygulamalarında pratikliğini kaybedebilmektedir. Bu

nedenle modelleme sürecinde doğruluk ile hesaplama maliyeti arasında uygun bir denge kurulması gerekmektedir. Çoklu sadakat düzeylerine dayanan güncel robotik dijital ikiz çalışmalarında da yüksek sadakatli fizik tabanlı modellerin hesaplama gecikmesini artırabildiği ve uygulamanın zaman gereksinimine göre farklı sadakat düzeylerinin kullanılmasının gerekli olabileceği gösterilmektedir (Yao et al., 2026).

Tarımsal mobil robotlarda sanal modelin kullanılabilirliği, modelde yer alan ayrıntıların sayısından çok, gerekli robot ve çevre davranışlarının yeterli doğrulukta temsil edilmesine bağlıdır. Sanal modeli oluşturan temel bileşenler ile model sadakatini etkileyen unsurlar Şekil 2'de gösterilmiştir.

Şekil 2 Tarımsal mobil robotlarda sanal model ve model sadakati



Sanal Devreye Alma: MIL, SIL ve HIL Yaklaşımları

Sanal devreye alma, robotik sistemin kontrol yazılımı ile sanal sistem modeli arasındaki etkileşimin fiziksel devreye alma aşamasından önce sınanmasına olanak sağlayan model tabanlı bir geliştirme yaklaşımıdır. Bu süreçte kontrol mantığı, görev akışı ve

sistem bileşenleri arasındaki etkileşim sanal ortamda çalıştırılarak yazılım ve entegrasyon sorunlarının erken aşamada belirlenmesi amaçlanmaktadır. Dijital ikiz destekli sanal devreye alma çalışmalarında sanal model yalnızca görselleştirme amacıyla değil, kontrol davranışının değerlendirilmesi ve fiziksel uygulama öncesinde sistem tepkilerinin incelenmesi için de kullanılmaktadır (Ni et al., 2025).

MIL aşamasında kontrol algoritması ile kontrol edilen sistemin modeli simülasyon ortamında birlikte çalıştırılmaktadır. Bu aşama, fiziksel kontrol donanımına veya gerçek robota ihtiyaç duyulmadan kontrol mantığının ve model tabanlı davranışın erken geliştirme evresinde değerlendirilmesine imkân vermektedir. Parametre değişimleri, referans girişleri ve farklı çalışma koşulları sanal ortamda uygulanarak kontrol yapısının beklenen temel davranışı üretip üretmediği incelenebilmektedir. MIL, SIL ve HIL yaklaşımlarının sistem geliştirme sürecinde birbirini izleyen veya gereksinime göre seçilen doğrulama aşamaları olarak kullanılabildiği bildirilmektedir (Dudek et al., 2025).

SIL aşamasında kontrol algoritmasının model düzeyindeki gösteriminden yazılım düzeyindeki gerçekleştirimine geçilmektedir. Kontrol yazılımı gerçek kontrol donanımı yerine bilgisayar ortamında yürütülürken, robot veya süreç sanal model tarafından temsil edilmektedir. Böylece yazılım kodunun sanal sistemle etkileşimi, veri alışverişi ve kontrol akışı fiziksel donanıma geçilmeden değerlendirilebilmektedir. Sanal devreye alma uygulamalarında SIL yaklaşımının temel özelliği, kontrol sistemi ile kontrol edilen sürecin donanıma ihtiyaç duyulmadan sanal ortamda birlikte çalıştırılmasıdır (Noga et al., 2022).

HIL aşamasında test yapısına gerçek kontrol donanımı veya belirli fiziksel bileşenler dâhil edilirken, kontrol edilen robotun ya da sürecin geri kalan bölümü gerçek zamanlı çalışan sanal model tarafından temsil edilmektedir. Böylece kontrol donanımının giriş–

çıkış davranışı, iletişim gecikmeleri, zamanlama özellikleri ve arayüz etkileşimleri fiziksel robotun tamamı kullanılmadan sınanabilmektedir. Bu özellik HIL yaklaşımını, yalnızca algoritma ve yazılım davranışını inceleyen önceki aşamalardan ayırmakta ve sanal sistem ile gerçek donanım arasındaki entegrasyonun değerlendirilmesine olanak sağlamaktadır (Noga et al., 2022).

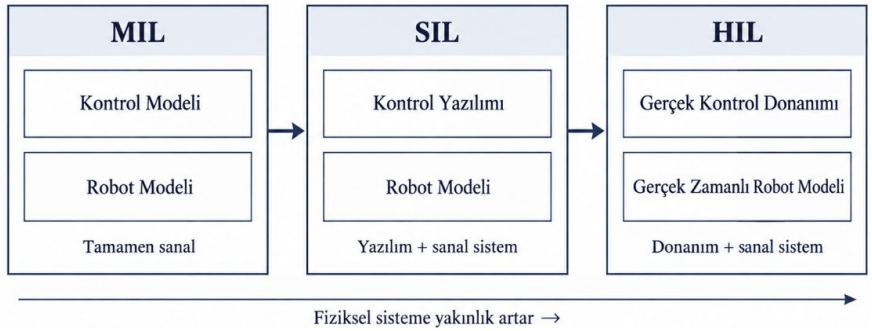
Tarımsal robotlar açısından HIL, sanal ortamda geliştirilen kontrol ve görev yürütme yapılarının gerçek donanımla etkileşimini kontrollü koşullarda incelemek için önemli bir geçiş aşaması oluşturmaktadır. Hidroponik seralarda ekim gerçekleştiren çift kollu otonom bir robot için geliştirilen güncel dijital ikiz uygulamasında fiziksel ve sanal bileşenler gerçek zamanlı olarak bütünleştirilmiş, görev davranışları simülasyon ve HIL testleriyle değerlendirilmiştir.

Bu uygulama, tarımsal robotlarda gerçek donanımın test sürecine kademeli biçimde dâhil edilebildiğini ve sanal ortamdan fiziksel uygulamaya geçişin aşamalı olarak yürütülebileceğini göstermektedir (Rodríguez-Nieto et al., 2026).

MIL, SIL ve HIL arasındaki temel ayrım, gerçek yazılım ve donanım bileşenlerinin test döngüsüne hangi aşamada dâhil edildiğiyle ilgilidir. MIL aşamasında kontrol yaklaşımı ile robot modeli sanal ortamda birlikte değerlendirilmektedir. SIL aşamasında uygulanacak kontrol yazılımı sanal sistem üzerinde çalıştırılmakta, HIL aşamasında ise gerçek kontrol donanımı gerçek zamanlı sanal modelle etkileşime girmektedir. Bu yapı, test ortamının fiziksel sisteme kademeli olarak yaklaştırılmasına olanak sağlamaktadır.

Tarımsal mobil robotlar için MIL–SIL–HIL tabanlı sanal devreye alma akışı Şekil 3’te gösterilmiştir.

Şekil 3 MIL–SIL–HIL tabanlı sanal devreye alma süreci



Model Doğrulama ve Simülasyon Tabanlı Test

Dijital ikizlerin güvenilirliğinin değerlendirilmesinde doğrulama (verification) ve geçerleme (validation) birbirinden farklı ancak tamamlayıcı iki süreçtir. Doğrulama, geliştirilen modelin tanımlanan matematiksel, mantıksal ve hesaplamalı yapıya uygun biçimde gerçekleştirildiğinin kontrol edilmesine odaklanmaktadır. Geçerleme ise model çıktılarının fiziksel sistem davranışını amaçlanan kullanım bakımından yeterli düzeyde temsil edip etmediğini değerlendirmektedir. Dijital ikiz literatüründe her iki sürecin birlikte uygulanması model güvenilirliğinin oluşturulması açısından temel kabul edilmekle birlikte, mevcut uygulamalarda ortak bir doğrulama ve geçerleme prosedürünün henüz tam olarak yerleşmediği bildirilmektedir (Bitencourt et al., 2025).

Geçerleme sürecinde karşılaştırılacak değişkenlerin ve kabul edilebilir hata düzeylerinin modelin kullanım amacına göre belirlenmesi gerekmektedir. Tarımsal mobil robotlarda konum, yönelim, doğrusal veya açısal hız, görev süresi ve izlenen yörünge gibi ölçülebilir çıktılar fiziksel sistem ile sanal model arasında karşılaştırılabilmektedir. Ortalama mutlak hata, kök ortalama kare hata veya göreve özgü başarı ölçütleri bu amaçla kullanılabilir. Modelin geçerliliği tek bir hata değerine dayanılarak genellenmemelidir. Yeterli doğruluğun hangi değişkenlerde ve

çalışma koşullarında sağlandığı açıkça vurgulanmalı, değerlendirme bu sınırlar dahilinde yürütülmelidir (Bitencourt et al., 2025).

Sanal modelin başlangıçta saha verileriyle örtüşmesi, bu uyumun operasyon boyunca devam edeceğini garanti kılmaz. Robot bileşenlerindeki aşınmalar ya da ortam şartlarındaki değişimler, simülasyon çıktıları ile gerçek sistem tepkileri arasında farklılıklara yol açabilir. Dolayısıyla çevrim içi çalışan dijital ikiz yapılarında bu tür sapmaların düzenli periyotlarla veya belirlenen tolerans limitlerine göre takibi gereklidir. İmalat sistemleri üzerine yapılan araştırmalar, fiziksel platform ile dijital temsil arasındaki farkın çalışma esnasında izlenebildiğini ve modelin güncelliğini değerlendirmede kullanılabildiğini göstermektedir (Lugaresi et al., 2023).

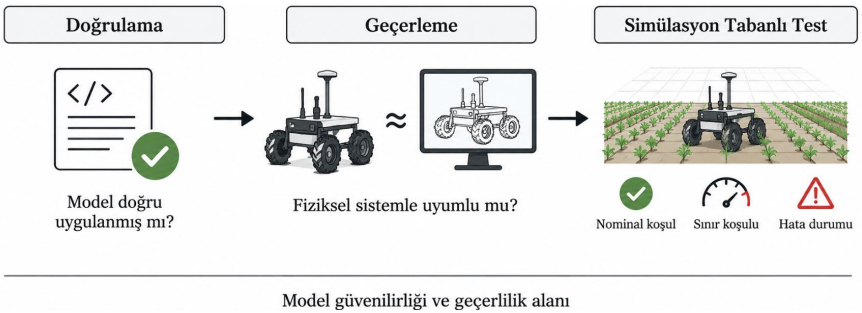
Sanal ortam simülasyonlarında yalnızca robotun tipik işletme şartlarındaki performansını incelemek kâfi gelmez. Çevre koşullarındaki oynamalar, aşırı sınır durumlar ve olası donanım arızaları da test prosedürlerine eklenmelidir. Buna karşın senaryo sayısını artırmak, sistemin tüm kritik fonksiyonlarının test edildiğini kanıtlamaz. Uygulanan her senaryoda incelenecek işlevler, başlangıç değerleri, çevresel etkenler ve başarı ölçütleri baştan tanımlanmalıdır. Mobil robotik alanındaki çalışmalar; test senaryolarının metodik biçimde kurgulanıp karmaşıklığın kademeli olarak yükseltilmesinin, işlevsellik ve güvenlik analizlerini doğrudan beslediğini ortaya koymaktadır (Ortega et al., 2024).

Simülasyon çıktıları, fiziksel platform davranışının doğrudan bir delili şeklinde ele alınmamalıdır. Modellenemeyen çevresel faktörler ile parametre belirsizlikleri, sanal ortam ile saha sonuçları arasında sapmalara neden olabilir. Bu sebeple simülasyon tabanlı testler, saha deneylerinin yerini tutan bir yaklaşım değil; fiziksel doğrulama öncesinde kritik risklerin ve senaryoların netleştirilmesini sağlayan destekleyici bir evre olarak görülmelidir. Simülasyon ile gerçek ortam deneylerinin aşamalı biçimde birlikte

yürütülmesi, robotik sistemlerin daha sağlıklı değerlendirilmesine olanak tanır (Ortega et al., 2024).

Doğrulama, geçerleme ve senaryo tabanlı test arasındaki ilişki Şekil 4'te gösterilmiştir.

Şekil 4 Model doğrulama ve simülasyon tabanlı test süreci



Tarımsal Robotlar İçin Dijital İkiz Geliştirme ve Doğrulama Çerçevesi

Tarımsal bir mobil robot için dijital ikiz geliştirme sürecinin başlangıç noktası, kullanılacak yazılım veya simülasyon platformundan önce sistemin kullanım amacının tanımlanmasıdır. Dijital temsilin tasarım değerlendirmesi, kontrol geliştirme, sanal devreye alma, durum izleme veya karar desteği gibi hangi görev için kullanılacağı; model kapsamını, gerekli ayrıntı düzeyini ve doğrulama ölçütlerini doğrudan belirler. Bu nedenle geliştirme süreci, birbirinden bağımsız modeller ve testler yerine aynı kullanım amacı etrafında ilerleyen bütünleşik bir yapı olarak ele alınmalıdır. Dijital ikizlerin güvenilir karar desteği sağlayabilmesi için doğrulama ve geçerleme faaliyetlerinin geliştirme sürecinin ayrılmaz bir parçası olması gerektiği de vurgulanmaktadır (Bitencourt et al., 2025).

Kullanım amacı belirlendikten sonra fiziksel sistemin sınırları ile sanal modelde temsil edilecek bileşenler tanımlanmalıdır. Robotun hareketi ve görev performansı üzerinde etkili olan

özellikler modele dâhil edilirken, sonuç üzerinde anlamlı etkisi bulunmayan ayrıntıların gereksiz biçimde temsil edilmesinden kaçınılması uygun olacaktır. Simülasyonun oluşturulmasında temel alınan parametre değerleri ile model varsayımları, geçerli sayıldıkları saha ve çalışma şartlarıyla birlikte belgelenmelidir. Zira tutulan bu kayıtlar, daha sonra gerçekleştirilecek testlerden elde edilecek çıktıların hangi sınırlar dâhilinde yorumlanabileceğini belirlemek açısından kritik önem taşır.

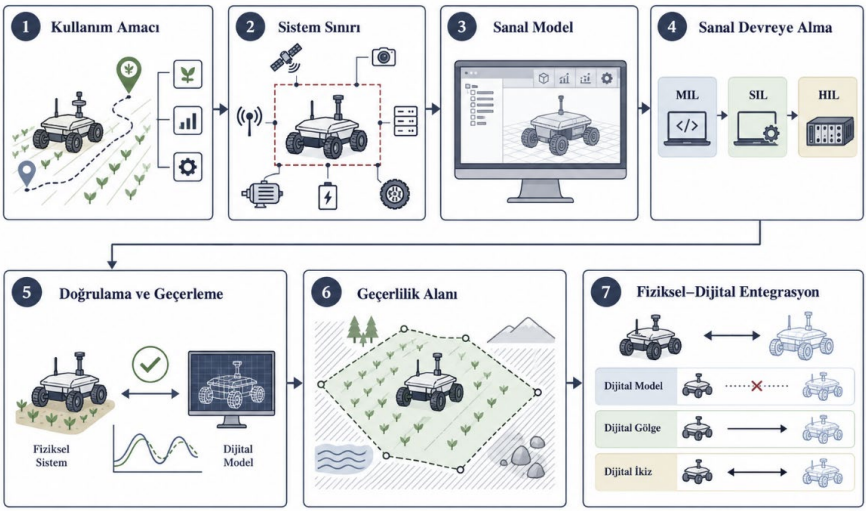
Sanal modelin inşası tamamlandıktan sonra, fiziki robota geçilmeden önce kontrol kodlarının ve sistem bileşenlerinin hangi test evresinden geçirileceği kararlaştırılmalıdır. Bu süreçte MIL, SIL veya HIL tekniklerinden hangisinin tercih edileceği; denenecek işlevsel özelliklere ve gerçek kontrol donanımının test döngüsüne katılması gereksinimine göre belirlenir. Bütün projelerde sabit bir test sırasını izleme zorunluluğu yoktur; tercih edilecek test kademesi, sınanacak sistem davranışı ve muhtemel riskler göz önüne alınarak kurgulanmalıdır (Ni et al., 2025).

Testlere başlamadan önce incelenecek değişkenler, beklenen davranışlar ve kabul sınırları belirlenmelidir. Modelin fiziksel sistemle yeterli uyum göstermesi, bütün çalışma koşullarında geçerli olduğu anlamına gelmez. Bu nedenle geçerliliğin hangi koşullarda sağlandığı açıkça belirtilmelidir. Çevrim içi uygulamalarda ise fiziksel sistem ile sanal model arasındaki sapmalar izlenmeli, modelin geçerliliğini etkileyen değişiklikler ortaya çıktığında yeniden değerlendirme yapılmalıdır (Lugaresi et al., 2023).

Sürecin son aşamasında fiziksel ve dijital sistem arasındaki entegrasyon düzeyi değerlendirilmelidir. Daha önce tanımlanan veri akışı ve otomasyon ölçütleri esas alınarak yapı dijital model, dijital gölge veya dijital ikiz olarak sınıflandırılabilir (Kritzinger et al., 2018).

Tarımsal mobil robotlar için önerilen geliştirme ve doğrulama akışı Şekil 5'te gösterilmiştir.

Şekil 5 Tarımsal robotlar için dijital ikiz geliştirme ve doğrulama çerçevesi



Sınırlılıklar ve Gelecek Araştırma Yönleri

Tarımsal robotlardan dijital modele aktarılan verilerin sahada kesintisiz ve zamanında iletilmesi her koşulda mümkün olmayabilir. Haberleşme gecikmeleri, paket kayıpları ve sensör kesintileri, modelin temsil ettiği durum ile fiziksel robotun güncel durumu arasında farklılık oluşturabilir. Sensör donanımlarının değişken örnekleme frekanslarında veri üretmesi ise ölçümlerin zaman ekseninde senkronize edilmesini zorlaştırır. Dolayısıyla veri akışının takibinde zaman damgaları (timestamp), veri bütünlüğü ve tazelik kriterleri öncelikli olarak göz önüne alınmalıdır. Tarımsal alandaki dijital ikiz literatürü incelendiğinde, veri entegrasyonu ile haberleşme altyapısının getirdiği bu tip kısıtlamaların geniş ölçüde ele alındığı görülmektedir (Tagarakis et al., 2024).

Tarımsal bir robotun üzerindeki sensörler, alt kontrol birimleri ve simülasyon yazılımları sıklıkla birbiriyle örtüşmeyen veri yapıları ve iletişim protokolleri kullanır. Belirli bir platforma özel kurgulanan bağlantı mimarisini farklı bir robota adapte etmek, donanım ve yazılım katmanında ilave düzenlemeler gerektirebilir. Bu aşamada açık mimarili arayüz standartlarından, tanımlı veri formatlarından ve modüler yazılım kütüphanelerinden yararlanmak, heterojen bileşenlerin aynı dijital ikiz altyapısında bütünleştirilmesini belirgin biçimde kolaylaştırır.

Çevrim içi çalışan dijital modellerde hesaplama karmaşıklığı, fiziki sistemin anlık durum güncelleme süreleriyle uyum içinde kalmalıdır. Aksi halde aşırı ayrıntılı robot ve çevre modelleri işlemci üzerine ek yük bindirerek zamanlama hatalarına ve gecikmelere sebep olur. Bu nedenle modelin detay seviyesi kararlaştırılırken donanımın işlem kapasitesi, haberleşme gecikmeleri ve veri yenilenme sıklığı bir bütün halinde değerlendirilmelidir.

Özel bir robotik platform ve belirli bir arazi koşulu için tasarlanan dijital ikiz mimarisinin, farklı bir sistemde aynı başarıyı doğrudan yakalaması beklenemez. Robotun mekanik konfigürasyonu, dikim/ürün sıra düzeni veya saha işletme şartları farklılaştığında modelin yeniden uyarlanması veya kalibre edilmesi gerekebilir. Dolayısıyla gelecekteki çalışmalarda tek bir senaryodaki başarıyı sunmak yetersiz kalacak; geliştirilen yapının hangi sınırlar dahilinde tekrar kullanılabildiği ve ne tür değişimlerin yeniden uyarlama gerektirdiği de detaylandırılmalıdır.

Sonuç

Tarımsal mobil robotlarda dijital ikiz yaklaşımı, fiziksel sistemin yalnızca sanal bir temsilinin oluşturulmasıyla sınırlı bir yapı değildir. Mühendislik açısından kullanılabilir bir dijital ikiz için sistemin hangi amaçla temsil edildiğinin tanımlanması, uygun model kapsamının belirlenmesi ve geliştirilen modelin sistematik biçimde

sınanması gerekmektedir. Bu açıdan dijital ikiz geliştirme süreci; modelleme, sanal devreye alma, doğrulama ve fiziksel–dijital entegrasyon aşamalarının birlikte ele alındığı bütünleşik bir yapı oluşturmaktadır.

MIL, SIL ve HIL yaklaşımları, kontrol ve yazılım bileşenlerinin farklı geliştirme düzeylerinde değerlendirilmesine imkân vermektedir. Doğrulama ve geçerleme süreçleri ise modelin hangi değişkenler ve çalışma koşulları için yeterli güvenilirliğe sahip olduğunun belirlenmesine katkı sağlamaktadır. Simülasyon tabanlı testlerin fiziksel deneylerin yerine geçen bir yöntem olarak değil, sınır ve hata durumlarının önceden incelenmesini ve fiziksel testlerin daha planlı yürütülmesini destekleyen bir aşama olarak değerlendirilmesi gerekmektedir.

Doğrulanmış bir sanal modelin bulunması tek başına dijital ikiz düzeyine ulaşıldığını göstermemekte; bu nitelik fiziksel ve dijital sistem arasındaki otomatik entegrasyon düzeyiyle belirlenmektedir.

Tarımsal robotlarda dijital ikizlerin daha yaygın ve güvenilir biçimde uygulanabilmesi; veri sürekliliği, birlikte çalışabilirlik, gerçek zamanlı hesaplama ve farklı çalışma koşullarına uyarlanabilirlik gibi sorunların birlikte ele alınmasına bağlıdır. Bu gereksinimlerin karşılanması, dijital ikiz yaklaşımının tarımsal robotların tasarımından sanal devreye alınmasına, test edilmesinden fiziksel sistemle bütünleştirilmesine kadar uzanan süreçte daha işlevsel bir mühendislik aracı olarak kullanılmasına katkı sağlayacaktır.

Kaynakça

Antonelli, D., Aliev, K., Soriano, M., Samir, K., Monetti, F. M., & Maffei, A. (2024). Exploring the limitations and potential of digital twins for mobile manipulators in industry. *Procedia Computer Science, 232*, 1121–1130. https://doi.org/10.1016/j.procs.2024.01.110

Bitencourt, J., Wooley, A., & Harris, G. (2025). Verification and validation of digital twins: A systematic literature review for manufacturing applications. *International Journal of Production Research, 63*(1), 342–370. https://doi.org/10.1080/00207543.2024.2357741

Dudek, W., Miguel, N., & Winiarski, T. (2025). A SysML-based language for evaluating the integrity of simulation and physical embodiments of cyber–physical systems. *Robotics and Autonomous Systems, 185*, 104884. https://doi.org/10.1016/j.robot.2024.104884

Kritzinger, W., Karner, M., Traar, G., Henjes, J., & Sihn, W. (2018). Digital twin in manufacturing: A categorical literature review and classification. *IFAC-PapersOnLine, 51*(11), 1016–1022. https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.08.474

Kusper, G., Barócsi, Z., Csóka, P., Vajda, K., & Sütő, J. (2026). Digital-twin-oriented virtual training environment for agricultural robot navigation: A vineyard rover case study. *Sensors, 26*(12), 3766. https://doi.org/10.3390/s26123766

Lugaresi, G., Gangemi, S., Gazzoni, G., & Matta, A. (2023). Online validation of digital twins for manufacturing systems. *Computers in Industry, 150*, 103942. https://doi.org/10.1016/j.compind.2023.103942

Mirbod, O., Choi, D., & Schueller, J. K. (2025). From simulation to field validation: A digital twin-driven sim2real transfer approach for strawberry fruit detection and sizing. *AgriEngineering, 7*(3), 81. https://doi.org/10.3390/agriengineering7030081

Ni, H., Hu, T., Deng, J., Chen, B., Luo, S., & Ji, S. (2025). Digital twin-driven virtual commissioning for robotic machining enhanced by machine learning. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 93*, 102908. https://doi.org/10.1016/j.rcim.2024.102908

Noga, M., Juhás, M., & Gulan, M. (2022). Hybrid virtual commissioning of a robotic manipulator with machine vision using a single controller. *Sensors, 22*(4), 1621. https://doi.org/10.3390/s22041621

Ortega, A., Parra, S., Schneider, S., & Hochgeschwender, N. (2024). Composable and executable scenarios for simulation-based testing of mobile robots. *Frontiers in Robotics and AI, 11*, 1363281. https://doi.org/10.3389/frobt.2024.1363281

Qin, Q., Liu, Z., Zhong, R., Wang, X. V., Wang, L., Wiktorsson, M., & Wang, W. (2026). Robot digital twin systems in manufacturing: Technologies, applications, trends and challenges. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 97*, 103103. https://doi.org/10.1016/j.rcim.2025.103103

Rodríguez-Nieto, D., Navas, E., & Fernández, R. (2026). Digital twin of a dual-arm autonomous seeding robot for hydroponic greenhouses. *Computers and Electronics in Agriculture, 251*, 111967. https://doi.org/10.1016/j.compag.2026.111967

Sajadieh, S. M. M., & Noh, S. D. (2025). From simulation to autonomy: Reviews of the integration of artificial intelligence and digital twins. *International Journal of Precision Engineering and*

Manufacturing-Green Technology, 12, 1597–1628. https://doi.org/10.1007/s40684-025-00750-z

Sibona, F., Harrison, N., Wallace, N., Stevens, C., Sukkarieh, S., Raubenheimer, D., Simpson, S. J., & González, L. A. (2025). A framework to enable eco-cyber-physical systems for robotics-focused digital twins in smart farming. *Journal of Field Robotics, 42*(6), 3016–3037. https://doi.org/10.1002/rob.22562

Tagarakis, A. C., Benos, L., Kyriakarakos, G., Pearson, S., Sørensen, C. G., & Bochtis, D. (2024). Digital twins in agriculture and forestry: A review. *Sensors, 24*(10), 3117. https://doi.org/10.3390/s24103117

Yao, K., Chi, H., Chen, D., & Zhang, J. (2026). Quasi-real-time digital twin for robotic assembly: A physics-based multi-fidelity framework. *Journal of Intelligent Manufacturing*. Advance online publication. https://doi.org/10.1007/s10845-026-02879-3

BÖLÜM 4

DİKEY TARIMDA ÜRÜN KALİTESİNİN YÖNETİMİ: IŞIK, MİKROİKLİM VE BİTKİ BESLEMESİNİN ETKİLEŞİMLERİ

Sefa ALTIKAT[1]

GİRİŞ

Dikey tarım, bitkilerin çoğunlukla yapay ışık altında çok katlı raflarda yetiştirildiği kontrollü üretim sistemlerini kapsar (Kabir et al., 2023; Kozai, 2019). Kentleşme, üretim alanlarının daralması ve taze ürüne talep bu sistemlere ilgiyi artırmaktadır (Al-Kodmany, 2018; Kalantari et al., 2017). Kapalı üretim su geri kazanımı ve alan kullanımı açısından avantajlar sağlayabilse de bu kazanımlar tesis tasarımı ve işletme koşullarına bağlıdır (Kozai, 2013).

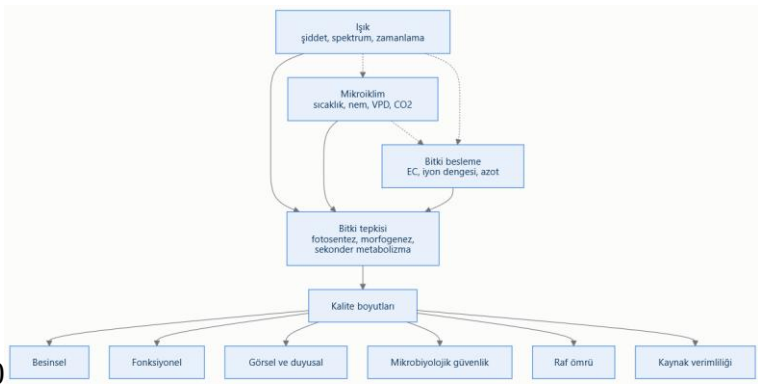
Ne var ki dikey tarım literatürü uzun süre verim odaklı kalmış, hasat öncesi koşulların ürün kalitesi üzerindeki etkisi ikincil bir mesele olarak ele alınmıştır (Gruda et al., 2025). Oysa kapalı sistemin en güçlü yanı, çevresel değişkenlerin neredeyse tamamının kontrol edilebilir olmasıdır; bu kontrol yeteneği yalnızca biyokütle üretimini değil, ürünün besinsel içeriğini, duyusal özelliklerini ve raf ömrünü de doğrudan şekillendirir (Nicole et al., 2019). Bu nedenle dikey tarımda kalite, "iyi koşullar sağlandığında kendiliğinden

1[Prof.Dr/ Iğdır Üniversitesi / Biyosistem Mühendiliği / ORCID: 0000-0002-3472-4424]

oluşan" bir çıktı değil, aktif olarak yönetilmesi gereken bir tasarım değişkenidir.

Bu bölüm, ürün kalitesini ışık, mikroiklim ve bitki beslemesi arasındaki etkileşimlerin bir sonucu olarak ele almaktadır. Bir faktörün uygun düzeyi diğer faktörlere bağlı olduğundan kalite yönetimi, çok değişkenli bir dengeleme problemidir (Gruda et al., 2025). Şekil 1, yönetim eksenlerini bitki tepkileri ve kalite boyutlarıyla ilişkilendiren kavramsal çerçeveyi göstermektedir. İzleyen kısımlarda önce kalitenin boyutları tanımlanmakta; ardından ışık, mikroiklim ve besleme yönetimi ile bunların etkileşimleri incelenmektedir. Son olarak kalite izleme teknolojileri, karar destek sistemleri ve kalite–verim–enerji dengesi değerlendirilmektedir.

Şekil 1. Dikey tarımda kalite yönetiminin kavramsal çerçevesi: yönetim eksenleri, bitki tepkisi ve kalite boyutları arasındaki ilişkiler.



10

Dikey Tarımda Kalite Kavramının Çok Boyutlu Yapısı

Verimden Kaliteye Geçişin Kavramsal Temeli

Tarımsal üretimde "kalite" geleneksel olarak pazar boyutu, renk ve hastalıksız görünüm gibi dışsal ölçütlerle tanımlanmıştır

(Jasper et al., 2021). Dikey tarım bağlamında bu tanım yetersizdir; çünkü üretim maliyetlerinin yüksekliği, sistemin yalnızca standart ürünle rekabet ederek ayakta kalmasını zorlaştırır ve katma değeri yüksek, işlevsel özellikleri öne çıkarılmış ürünlere yönelmeyi zorunlu kılar. Bu nedenle çağdaş literatür kaliteyi çok boyutlu olarak ele alır: besinsel kalite, fonksiyonel (fitokimyasal) kalite, görsel ve duyusal kalite, mikrobiyolojik güvenlik, hasat sonrası dayanıklılık (raf ömrü) ve kaynak verimliliği ile ilişkili kalite (Jasper et al., 2021). Bu boyutların göstergeleri ve her birine karşılık gelen başlıca yönetim yönetim aracı Çizelge 1'de karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

Çizelge 1. Dikey tarımda kalite boyutları, göstergeleri ve başlıca yönetim araçları.

Kalite boyutu	Temel göstergeler	Başlıca yönetim kaldıracı
Besinsel	Askorbik asit, K, Ca, Mg, Fe, Zn, protein, çözünür şeker	Işık şiddeti/DLI, besin çözeltisi kompozisyonu
Fonksiyonel	Fenolikler, flavonoidler, antosiyaninler, karotenoidler, glukozinolatlar	Spektrum (mavi, UV-A/B), ılımlı stres
Görsel/duyusal	Renk, yaprak genişliği, baş sıkılığı, tat, doku	Mavi:kırmızı oranı, hasat öncesi ışık
Güvenlik	*Salmonella*, *Listeria*, STEC, koliformlar	Su arıtımı, hijyen, sistem tasarımı
Raf ömrü	Klorofil kaybı, vitamin C korunumu, görsel skor	Hasat öncesi yüksek PPFD, spektrum
Kaynak verimliliği	kWh kg^{-1}, LUE, EUE	Aydınlatma stratejisi, HVAC tasarımı

Besinsel ve Fonksiyonel Kalite

Besinsel kalite vitamin, mineral, şeker ve protein içeriğini kapsar (Soares et al., 2019). Fonksiyonel kalite ise fenolikler, flavonoidler, antosiyaninler ve karotenoidler gibi özelleşmiş

metabolitlerle ilişkilidir (Appolloni et al., 2021). Bu bileşikler stres ve çevreye uyum süreçlerinde rol oynadığından, biyokütle için uygun koşullar fitokimyasal birikim için her zaman uygun olmayabilir (Toscano et al., 2019). Ilımlı stresin etkisi tür, çeşit ve gelişim dönemine bağlıdır (Gruda et al., 2025).

Görsel, Duyusal ve Mikrobiyolojik Kalite

Görsel ve duyusal kalite; renk, yaprak biçimi, tat, doku ve tüketici kabulünü kapsar (Dhakal et al., 2021). Kapalı üretim mikrobiyolojik güvenliği kendiliğinden sağlamaz: kontamine su, yetiştirme ortamı, çalışan teması ve hijyen aksaklıkları risk oluşturur (Cheruiyot & Mechesso, 2025). Dolaşan besin çözeltisi patojenleri yayabilir; UV-C uygulamasının belirli deney koşullarında E. coli popülasyonunu azaltması tüm sistem için güvenlik garantisi değildir (Moore et al., 2025). Sistem tipine bağlı bulaşma ve iç dokulara geçiş riskleri, izleme ve sanitasyonla yönetilmelidir (Riggio et al., 2019).

Hasat Sonrası Dayanıklılık ve Kaynak Verimliliği

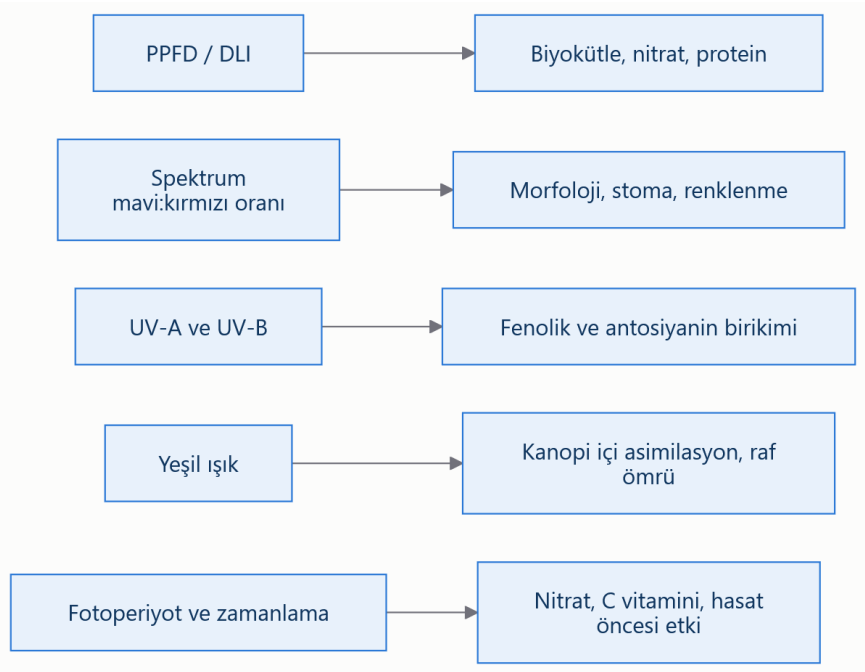
Hasat öncesi ışık reçetesi, hasat sonrası görünüm ve raf ömrünü etkileyebilir (Nicole et al., 2019). Antioksidan kapasitenin korunması, depolamadaki bozulmanın yavaşlatılmasına katkı sağlayabilir (Min et al., 2023). Kalite hedefleri ayrıca aydınlatma ve iklimlendirme enerjisiyle birlikte değerlendirilmelidir (Cai et al., 2024). Bu nedenle raf ömrü ve satılabilir ürün oranı, kaynak verimliliğinin de bileşenleridir.

Işık Yönetimi: Şiddet, Spektrum ve Zamanlama

Işık, dikey tarımda hem üretim maliyetini hem de kaliteyi belirleyen temel faktörlerden biridir (Ferrante et al., 2024). Kapalı sistemlerde gün ışığının yokluğu, fotosentetik foton akısı yoğunluğunun, spektral bileşimin ve fotoperiyodun bağımsız

değişkenler olarak kullanılmasına olanak tanır; bu da ışığın kalite yönetiminde ayarlanabilir bir araç olarak kullanılmasını mümkün kılar (Ferrante et al., 2024). Şekil 2, ışık reçetesinin kalite üzerinde etkili olan beş yönetim aracını ve her birinin öncelikli olarak hedeflediği kalite çıktısını göstermektedir; izleyen alt bölümler bu yönetim araçları sırayla ele alır.

Şekil 2. Işık reçetesinin kalite yönetimindeki beş yönetim aracı ve öncelikli kalite çıktıları.



Işık Şiddeti ve Günlük Işık İntegrali

Işık, fotosentez ve azot asimilasyonu üzerinden biyokütleyi ve nitrat birikimini etkiler (Rouphael et al., 2019). Literatürde sık kullanılan 150–300 µmol m^{-2} s^{-1} PPFD aralığı bir uygulama

dağılımını gösterir; evrensel optimum olarak yorumlanmamalıdır (Nájera et al., 2022).

Günlük ışık integrali (DLI), anlık PPFD'nin zaman boyunca integralidir. Sabit PPFD altında fotoperiyotla birlikte hesaplanır. Çizelge 2, marulda farklı ışık ve DLI uygulamalarını karşılaştırmaktadır. Bir denemede artan DLI, verim ve protein içeriğini artırıp nitratı azaltmış; yanıt gelişim dönemine göre değişmiştir (Sheikhi et al., 2024).

Çizelge 2. Marulda ışık şiddeti ve günlük ışık integrali denemelerinin karşılaştırması.

Uygulanan düzeyler	Temel verim ve kalite bulgusu	Kaynak
8,64 / 11,52 / 12,96 / 17,28 mol m^{-2} $gün^{-1}$ DLI	DLI ile verim, toplam yaş ve kuru ağırlık doğrudan ilişkili; nitrat azalır, protein artar; fidanlık dönemi daha duyarlı; 12,96 ve 17,28 mol m^{-2} $gün^{-1}$ düzeylerinde Fv/Fm düşer, performans indeksi artar	(Sheikhi et al., 2024)
160 ve 240 µmol m^{-2} s^{-1} PPFD × 16 ve 20 saat (9,2–17,3 mol m^{-2} $gün^{-1}$)	'Casual' çeşidinde 17,3, 'Elizium' çeşidinde 11,5–17,3 mol m^{-2} $gün^{-1}$ düzeyinde sırasıyla 350 g ve 240 g yaş ağırlık (30 gün); en düşük DLI en düşük yaş ağırlık, yaprak sayısı ve baş çevresi; nitrat tüm düzeylerde AB sınırının altında	(Matysiak et al., 2022)
250 µmol m^{-2} s^{-1} (DLI = 14,4 mol m^{-2} $gün^{-1}$) ile 300 µmol m^{-2} s^{-1} (DLI = 17,3 mol m^{-2} $gün^{-1}$)	Optimum PPFD 250 µmol m^{-2} s^{-1}; 300 µmol m^{-2} s^{-1}'de ek verim artışı sağlanmadı	(Pennisi et al., 2020)
180 / 210 / 240 µmol m^{-2} s^{-1}	210 µmol m^{-2} s^{-1}: bitki boyu, yaş ve kuru ağırlık ile yaprak alanı belirgin biçimde en	(Dai et al., 2024)

Uygulanan düzeyler	Temel verim ve kalite bulgusu	Kaynak
	yüksek; toplam çözünür şeker, C vitamini, nitrat ve serbest amino asitte en belirgin artış; genel değerlendirmede en yüksek üyelik fonksiyonu değeri	
En sık 150–300 µmol m^{-2} s^{-1}; 16 saat fotoperiyot (bibliyometrik analiz)	Antioksidan, fenol ve toplam şeker konsantrasyonlarında artış; büyüme üzerindeki etki "ılımlı olumlu"	(Nájera et al., 2022)

DLI artışı her koşulda ek yarar sağlamaz. Marul ve fesleğende belirli koşullarda 250 µmol m^{-2} s^{-1} PPFD uygun bulunurken daha yüksek uygulama marul büyümesini azaltmıştır (Pennisi et al., 2020). Başka bir denemede 210 µmol m^{-2} s^{-1} öne çıkmıştır (Dai et al., 2024). Çeşit, sıklık, CO_2 ve spektrum dikkate alınmadan tek bir ışık reçetesi önerilemez.

Spektral Bileşim: Mavi:Kırmızı Oranı

Spektrum, ışık şiddetinden bağımsız bir morfogenetik sinyal sistemidir. Bibliyometrik analiz, dikey tarımda kullanılan LED spektrumlarının en sık 450–495 nm (mavi) ve 620–700 nm (kırmızı) bantlarında tepe yaptığını göstermektedir (Nájera et al., 2022). Mavi:kırmızı (B:R) oranı bitki büyümesi, gelişmesi ve enerji tüketimi üzerinde belirleyicidir; genellikle kırmızı oranı maviden yüksektir.

Kırmızı:mavi oranı yaprak alanı, kuru madde, stoma özellikleri ve su ilişkilerini birlikte değiştirir (Pennisi et al., 2019). Mavi ışığın stoma açılmasını desteklemesi, spektrumun terleme ve besleme yönetiminden bağımsız ele alınamayacağını gösterir (Pennisi et al., 2020).

Mavi ışık oranının artması, bazı koşullarda kloroplast bolluğunu ve yaprak düzeyinde fotosentezi artırırken yaprak alanı ve toplam büyümeyi azaltabilmektedir (Izzo et al., 2021). Bu nedenle

tek yaprağın fotosentetik performansı, kanopinin ışık yakalaması ve pazarlanabilir verimle birlikte değerlendirilmelidir.

Beyaz LED'ler ürünün gözlenmesini ve çalışma konforunu kolaylaştırır; spektral bileşim ise büyüme ve renklenmeyi değiştirir (Meng & Runkle, 2023). Kırmızı yapraklı marulda mavi oranı %7'den %35'e yükseldiğinde kütle ve yaprak boyutu genellikle azalırken renklenme artmıştır (Meng & Runkle, 2023). Renk, verimden ayrı bir kalite hedefi olarak izlenmelidir.

Yeşil Işık ve Spektrumun Tamamlanması

Yeşil ışık kanopi içine nüfuz ederek iç ve alt yaprakların asimilasyonuna katkı sağlar (Kozai, 2019; Smith et al., 2017). Kırmızı–mavi aydınlatmaya yeşil eklenmesiyle marul büyümesinin artabildiği gösterilmiştir (Kim et al., 2004). Spektral reçete raf ömrünü de etkileyebilir; bebek ıspanak ve rokada yüksek mavi içerikli reçete, yüksek uzak kırmızı içeren reçeteden daha iyi sonuç vermiştir (Nicole et al., 2019).

UV-A ve UV-B: Kalite–Verim Dengesinin Sınırı

UV uygulamaları fenolik ve antosiyanin birikimini artırabilir; ancak yanıt tür ve dalga boyuna bağlıdır. Kırmızı marulda dalga boylarına göre farklı antosiyanin yanıtları bildirilirken fesleğende en yüksek içerik UV uygulanmayan kontrolde elde edilmiştir (Thoma et al., 2020). Dolayısıyla UV etkisi ürün bazında doğrulanmalıdır.

Marulda UV-A uygulaması flavonoid ve antosiyanin içeriğini artırabilmiş, toplam fenolik içerik ise aynı yönde yanıt vermemiştir (Chen et al., 2019). Farklı dalga boylarında farklı bileşiklerin değişmesi, toplam antioksidan göstergelerin yanında tek tek bileşiklerin de izlenmesi gerektiğini gösterir (Brazaitytė et al., 2019). Spektral etkiler Çizelge 3'te özetlenmiştir.

Çizelge 3. Spektral bantlar, uygulama koşulları ve raporlanan kalite etkileri.

Spektral bant	Uygulama	Raporlanan kalite etkisi	Kaynak
Mavi (450–495 nm)	Geniş spektrumda mavi oran %7 → %35	Sürgün yaş ve kuru kütlesi, yaprak sayısı, yaprak boyutu ve bitki çapı azalır; kırmızı yaprak renklenmesi yoğunlaşır	(Meng & Runkle, 2023)
Kırmızı (620–700 nm)	B:R oranı manipülasyonu	RB = 0,5'te en yüksek özgül yaprak alanı; RB ≥ 2'de stoma yoğunluğu ve iletkenliği azalır	(Pennisi et al., 2019)
Yeşil (500–600 nm)	Kırmızı-mavi LED'lere %24 yeşil eklenmesi	Büyüme artışı; soğuk beyaz floresan altındakinden daha fazla biyokütle	(Kim et al., 2004)
Yeşil (tepe dalga boyu)	G510 ile G520 arasındaki 10 nm'lik fark	Ayrı hücresel süreçlerin tetiklenmesi; metabolik yeniden programlanma	(Kitazaki et al., 2018)
UV-A	380 nm ve 373 nm uygulamaları	380 nm: toplam fenolik artar, antosiyanin etkilenmez; 373 nm: antosiyanin artar, fenolik etkilenmez	(Brazaitytė et al., 2019)

Spektral bant	Uygulama	Raporlanan kalite etkisi	Kaynak
UV-A (yüksek doz)	UVA-20 ve UVA-30	Toplam flavonoid ve antosiyanin içeriği artar; toplam fenolikte belirgin artış yok	(Chen et al., 2019)
UV-B ve mavi (hasat öncesi 6 gün)	0,5/1,5/2,5 µmol m^{-2} s^{-1} UV-B; 30/60/90 µmol m^{-2} s^{-1} mavi	En yüksek UV-B dozunda (6 gün sonra) antosiyanin +%468 ('Rouxai') ve +%154 ('Red Salad Bowl'); askorbik asit +%27 ve +%21; yaprak genişlemesi ve biyokütle genellikle azalır	(Kang et al., 2026)
Mavi ağırlıklı reçete	%35 mavi ile %25 uzak kırmızının karşılaştırılması	Yüksek mavi reçete bebek ıspanak ve rokada raf ömrünü günler düzeyinde iyileştirir; yüksek uzak kırmızı en kötü sonucu verir	(Nicole et al., 2019)

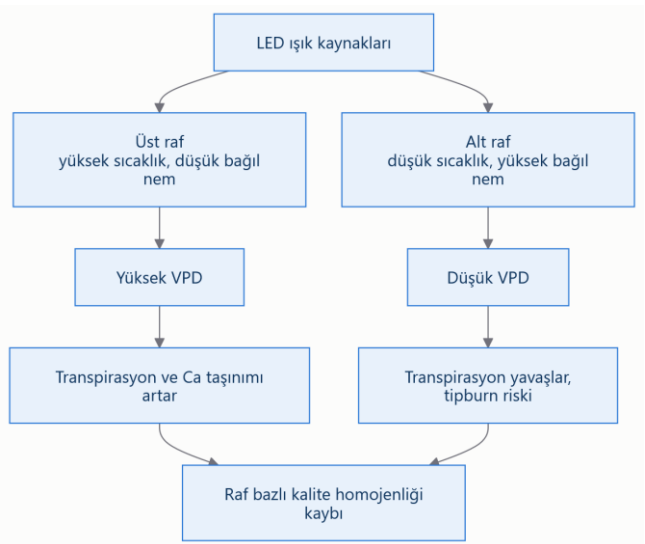
Üretimin son altı günündeki UV-B ve mavi ışık uygulamaları, kırmızı marulda doz bağımlı kalite–verim dengesi oluşturmuştur. En güçlü UV-B uygulamasında antosiyanin artışı çeşitlere göre %468 ve %154'e ulaşmış, ancak yüksek doz ve uzun maruziyet yaprak genişlemesi ile biyokütleyi azaltmıştır (Kang et al., 2026). Bu müdahaleler yalnız bileşik konsantrasyonuna göre değil, pazarlanabilir verim ve kalite kazanımı birlikte değerlendirilerek kullanılmalıdır.

Mikroiklim Yönetimi: Sıcaklık, Nem ve Buhar Basıncı Açığı

Mikroiklimin Ölçek Sorunu

Kontrol sisteminin ölçtüğü nokta, tüm rafların koşullarını temsil etmeyebilir. Ticari sera izlemesinde belirgin mekânsal ve mevsimsel sıcaklık farkları gösterilmiştir (Šalagovič et al., 2024). Dikey üretimde raf geometrisi ve hava dağılımı ayrıca önem taşır. Şekil 3'teki VPD farklılıkları, terleme ve kalsiyum taşınımı üzerinden kalite homojenliğini etkileyebilir (Sago, 2016). Bu nedenle tek ortalama yerine mekânsal dağılım izlenmelidir.

Şekil 3. Dikey bir sistemde raf bazlı mikroiklim gradyanları, VPD farklılaşması ve kalite homojenliği üzerindeki etkileri.



Sıcaklık ve Buhar Basıncı Açığı

Sıcaklık ve bağıl nemin birlikte değerlendirilmesinde buhar basıncı açığı (VPD) kullanılır. VPD, havanın su buharıyla doygunluk durumu üzerinden terlemeyi ve bitki su ilişkilerini

etkiler. Ticari seralarda sabit bağıl nem set değerlerine dayanan kontrol, mevsime ve günün saatine göre uygun aralığın dışında VPD değerleri oluşturabilmektedir (Šalagovič et al., 2024). Domates için hava ve kök bölgesi sıcaklığı, bağıl nem ve VPD aralıklarını derleyen bir çalışmada, üyelik fonksiyonlarıyla koşulların uygunluk derecesinin nicelleştirilebileceği gösterilmiştir (Shamshiri et al., 2018).

Kablosuz sensör ağı kullanılan bir ticari serada sıcaklık, bağıl nem ve VPD'nin uygunluk dereceleri sıcak dönemde belirgin biçimde düşmüştür (Rezvani et al., 2020). Çizelge 4, mevsim ve yapı koşullarının uygunluk göstergelerine etkisini özetlemektedir. Sera verileri, dikey tarım için doğrudan set değeri değil, dağılımı izleme gereğinin kanıtıdır.

Çizelge 4. Ticari koşullarda mikroiklim optimalite dereceleri ve raporlanan VPD değerleri.

Gösterge	Ölçülen değer	Kaynak
Sıcaklık ortalama optimalite derecesi	Ocak 0,67; Haziran 0,45; Temmuz 0,44	(Rezvani et al., 2020)
Bağıl nem ortalama optimalite derecesi	Ocak 0,94; Haziran 0,36; Temmuz 0,0	(Rezvani et al., 2020)
VPD ortalama optimalite derecesi	Ocak 0,94; Haziran 0,42; Temmuz 0,12	(Rezvani et al., 2020)
VPD ortalama / maksimum (polikarbonat panel sera)	1,19 / 5,1 kPa	(Shamshiri et al., 2016)
VPD ortalama / maksimum (file kaplı screenhouse)	0,97 / 3,81 kPa	(Shamshiri et al., 2016)
İki bölge arası günlük maksimum sıcaklık farkı	Yazın 3 °C; soğuk aylarda yaklaşık 1 °C	(Šalagovič et al., 2024)

Farklı örtü ve havalandırma koşulları VPD dağılımını değiştirmektedir (Shamshiri et al., 2016). Bu sonuçlar iklimlendirme tasarımında dış iklim, yapı ve ürün gereksinimlerinin birlikte ele alınmasını destekler; dinamik yönetimin başarısı tesis koşullarında doğrulanmalıdır (Kaiser et al., 2024).

Hava Sıcaklığı Rejimi ve Gün-Gece Farkı

Hava sıcaklığı, sekonder metabolizmayı değiştiren en önemli çevresel unsurlardan biridir ve kök bölgesi sıcaklığı ile birlikte birçok bitkinin büyümesini ve kimyasal bileşimunu etkiler (Al-Rawahy et al., 2018). Gün ve gece sıcaklıkları arasındaki fark (DIF) ise bitkilerin sap uzamasını belirgin biçimde etkiler (Berghage, 1998). Bu, sıcaklığın yalnızca metabolik hızı değil, morfolojiyi de şekillendirdiğini ve dikey tarımda raf yüksekliği ile ürün görsel kalitesinin sıcaklık rejimi üzerinden birbirine bağlandığını göstermektedir.

Kök Bölgesi Sıcaklığı

Kök bölgesi sıcaklığı, besin alımı ve çözünmüş oksijeni birlikte etkiler. Yüksek sıcaklıkta oksijen çözünürlüğünün azalması kök işlevlerini sınırlandırabilir (Nisar et al., 2024). Yaz koşullarında çözeltinin aşırı ısınması su ve besin alımını azaltabilmektedir (Al-Rawahy et al., 2018). Uygun sıcaklık türe ve gelişim dönemine bağlıdır; rizosfer sıcaklığı, üst kısımdaki ışık ve mikroiklimle birlikte yönetilmelidir (Nxawe et al., 2010).

Karbondioksit

Yükseltilmiş CO_2 verimi artırabilse de kalite bileşenlerini farklı yönlerde değiştirir. Sebzelerde 57 makaleden 1.015 gözlemi birleştiren değerlendirmede toplam antioksidan kapasite ve flavonoidler artarken demir ve protein konsantrasyonları azalmıştır

(Dong et al., 2018). Çizelge 5, bu farklı yanıtları göstermektedir. Biyokütle artışı, besinsel yoğunluğun korunduğu anlamına gelmez.

Çizelge 5. Yükseltilmiş CO_2'nin sebzelerin yenilebilir kısmındaki besinsel ve fitokimyasal parametrelere etkisi.

Artan parametreler	Değişim	Azalan parametreler	Değişim
Toplam antioksidan kapasite	+%59,0	Nitrat	–%18,0
Toplam flavonoid	+%45,5	Demir	–%16,0
Toplam çözünür şeker	+%17,5	Protein	–%9,5
Fruktoz	+%14,2	Çinko	–%9,4
Glukoz	+%13,2	Magnezyum	–%9,2
Askorbik asit	+%9,5		
Toplam fenol	+%8,9		
Kalsiyum	+%8,2		

Not: 57 makaleden 1.015 gözlemin birleştirildiği meta-analize dayanmaktadır (Dong et al., 2018). Titrelenebilir asitlik, toplam klorofil, karotenoidler, likopen, antosiyaninler, fosfor, potasyum, kükürt, bakır ve mangan konsantrasyonları eCO_2'den etkilenmemiştir (Dong et al., 2018).

CO_2 zenginleştirmesinin kalite etkisi ürün grubu ve uygulama düzeyine bağlıdır. Mineral konsantrasyonlarındaki azalma farklı yenilebilir organlarda farklı büyüklüklerde bildirilmiştir (Toreti et al., 2020). Yüksek CO_2 bazı şekerleri artırırken belirli amino asit ve mineralleri azaltabilir (Wang et al., 2022). Hedef konsantrasyon, yalnız verime göre değil amaçlanan besinsel profil üzerinden belirlenmelidir.

Bitki Besleme Yönetimi: Konsantrasyon, Kompozisyon ve Rizosfer

Elektriksel İletkenlik ve Besin Çözeltisi Konsantrasyonu

EC, toplam iyon içeriğinin bir göstergesidir; yüksek değerler ozmotik stresle su alımını ve büyümeyi sınırlandırabilir, düşük değerler ise yetersiz beslemeyi gösterebilir (Thakur et al., 2023). Bazı koşullarda ılımlı stres fitokimyasal kaliteyi iyileştirse de bu kazanım verim kaybıyla birlikte değerlendirilmelidir. EC, iyon bileşiminin doğrudan ölçümü değildir.

EC yanıtı genotip ve çevreyle değişir. Derin su kültüründe farklı EC düzeylerinin biyokütle ve besin alımını etkilediği, ancak sezon ve çeşit etkisinin bazı kalite göstergelerinde daha baskın olduğu bildirilmiştir (Sublett et al., 2018). Bu nedenle EC hedefleri türe, döneme ve çözelti bileşimine göre doğrulanmalıdır.

Azot Yönetimi ve Nitrat Birikimi

Nitrat, yapraklı sebzelerde yakından izlenen bir kalite ve gıda güvenliği göstergesidir. Diyetteki rolü tek yönlü değerlendirilmemelidir (Santamaria, 2005). Çizelge 6, atıf yapılan kaynaklarda bildirilen düzenleyici ve sağlık temelli değerleri bir araya getirmektedir. Bu değerler farklı ürün, mevsim ve üretim bağlamlarını temsil ettiğinden birbirinin yerine kullanılmamalıdır (Jakše et al., 2013).

Çizelge 6. Yapraklı sebzelerde nitrat için kaynaklarda bildirilen düzenleyici düzeyler ve sağlık temelli referans değerler.

Ürün / bağlam	Sınır veya referans değer	Kaynak
Marul, yaz salatası	2500–3500 mg kg^{-1}	(Ménard-Moyon et al., 2008)
Marul, kış salatası	4000–4500 mg kg^{-1}	(Ménard-Moyon et al., 2008)

Ürün / bağlam	Sınır veya referans değer	Kaynak
Ispanak, yaz	2500 mg kg^{-1}	(Ménard-Moyon et al., 2008)
Ispanak, kış	3000 mg kg^{-1}	(Ménard-Moyon et al., 2008)
Dondurulmuş ıspanak	2000 mg kg^{-1}	(Ménard-Moyon et al., 2008)
Marul, kış / ilkbahar hasadı (2011 AB düzenlemesi)	500 / 400 mg NO_3^- 100 g^{-1} taze ağırlık	(Rusu et al., 2021)
Buzdağı marulu (2011 AB düzenlemesi)	250 mg NO_3^- 100 g^{-1} taze ağırlık	(Rusu et al., 2021)
Kabul edilebilir günlük alım	Nitrat iyonları: 0–3,7 mg kg^{-1} vücut ağırlığı; nitrit iyonları: 0–0,07 mg kg^{-1} vücut ağırlığı	(Boros et al., 2020)
Referans doz	Nitrat iyonu: 7,0 mg; nitrit iyonu: 0,33 mg	(Boros et al., 2020)

Nitrat yönetimi, azot arzı ile ışık koşullarının birlikte düzenlenmesine dayanır (Bian et al., 2020). Aşırı azot, bitkinin asimilasyon kapasitesini aşabilir; düşük ışık nitrat birikimini artırabilir (Khan et al., 2018). Marulda ışık ve azot için kurulan bir yanıt yüzeyi modelinde verim, C vitamini ve nitrat hedefleri birlikte optimize edilmiştir (Yi et al., 2020). Denemeye özgü optimum, tüm çeşitler için sabit reçete sayılmamalıdır.

İyon Dengesi, pH ve Çözelti Yönetimi

Besleme yönetiminde iyon bileşimi, pH, EC, sıcaklık ve çözünmüş oksijen birlikte izlenmelidir (Ben-Yaakov & Ben-Asher, 1982). Işık spektrumu ve besin formülasyonlarının büyüme, su ve elektrik tüketimi ile besin alımını birlikte değiştirmesi, bu iki yönetim alanının ortak değerlendirilmesini gerektirir (Soufi et al., 2023).

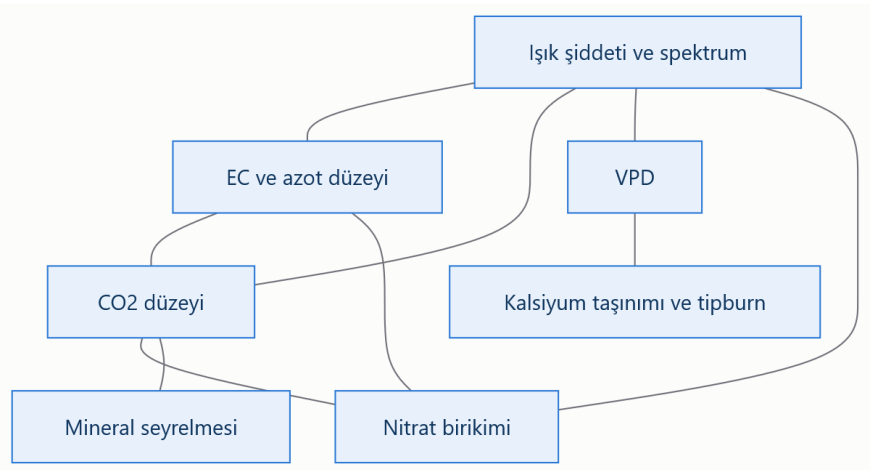
Döngüsel besleme, geri kazanılan besin maddelerinin yeniden kullanımını ve tahliye kayıplarının azaltılmasını hedefler.

Ancak geri kazanılan ürünün bileşimi, kirletici riski ve bitkisel yanıtı doğrulanmalıdır. Struvit ve kapalı devre fosfor geri kazanımı üzerine çalışmalar bu yaklaşımın potansiyelini göstermektedir (Arcas-Pilz et al., 2021; Malkawi et al., 2025).

Etkileşimler: Işık × Mikroiklim × Bitki Beslemesi

Buraya kadarki bölümler faktörleri ayrı ayrı ele aldı; ancak dikey tarımda kalitenin belirleyicisi bu faktörlerin kesişim noktalarıdır. Şekil 4, en iyi belgelenmiş etkileşim çiftlerini ve her birinin kalite üzerindeki hedef değişkenini şematik olarak göstermektedir; izleyen alt bölümler bu etkileşimleri kanıt düzeyinde incelemektedir.

Şekil 4. Işık, mikroiklim ve bitki beslemesi arasındaki başlıca etkileşimler ve kalite üzerindeki hedef değişkenler.



Işık Şiddeti × Besin Çözeltisi Konsantrasyonu

Işık şiddeti ile besin çözeltisi konsantrasyonu arasındaki etkileşim, marulda kalite ve verim yönetiminin önemli bir bileşenidir

(Song et al., 2020). Kapalı devre hidroponik bir dikey yetiştirme sisteminde iki EC aralığı (EC1: 1,5–2,0 dS m^{-1}; EC2: 4,5–6,0 dS m^{-1}) ve üç ışık şiddeti (L1: 145, L2: 185, L3: 240 µmol m^{-2} s^{-1}) birlikte denenmiştir (Akter et al., 2026). Çizelge 7'de görüldüğü gibi en yüksek yaprak alanı (1338,31 cm^2) ve verim (57,97 g $bitki^{-1}$) EC1L3 uygulamasında elde edilmiştir. Aynı ışık düzeyinde EC2L3 uygulamasındaki değerler 330,79 cm^2 ve 13,98 g $bitki^{-1}$ olmuştur. Bu değerler, EC1L3 referans alındığında EC2L3'te yaprak alanının yaklaşık %75,3, verimin ise %75,9 azaldığını göstermektedir.

Çizelge 7. Hidroponik dikey sistemde EC ve ışık şiddeti etkileşiminin marul yaprak alanı ve verimi üzerindeki etkisi.

Uygulama	Yaprak alanı (cm^2)	Verim (g $bitki^{-1}$)	Göreli değişim
EC1L3 (1,5–2,0 dS m^{-1}; 240 µmol m^{-2} s^{-1})	1338,31	57,97	Referans
EC2L3 (4,5–6,0 dS m^{-1}; 240 µmol m^{-2} s^{-1})	330,79	13,98	EC1L3'e göre yaprak alanında %75,3, verimde %75,9 azalma
EC1L1 (1,5–2,0 dS m^{-1}; 145 µmol m^{-2} s^{-1})	Raporlanmamıştır	Raporlanmamıştır	EC1L3 verimi, EC1L1'e göre %47 daha yüksek

Not: Tüm değerler aynı çalışmadan derlenmiştir (Akter et al., 2026).

Aynı düşük EC aralığında ışık şiddetinin artması verimi yükseltmiştir. Yüksek EC ise incelenen besin elementlerinin alımını azaltmış; ışık şiddetinin mineral alımına etkisi sınırlı kalmıştır. Bu nedenle EC–ışık etkileşiminin morfoloji ve verimdeki etkisi, mineral alımındaki etkiden ayrılmalıdır. Denenen koşullarda en yüksek büyüme ve verim EC1L3'te elde edilmiştir (Akter et al., 2026).

Işık–besin etkileşimi şeker ve mineral konsantrasyonlarına da yansır. Orta ışık düzeyleri ile seyreltilmiş besin çözeltilerinin belirli birleşimleri marul kalitesini iyileştirebilmiştir (Song et al.,

2020). Tek yönlü ışık artırımı veya besin azaltımı yerine ortak yanıtın sınanması gerekir.

Işık × CO_2

CO_2'nin kalite etkisi ışık, tür, gelişim dönemi ve besleme koşullarıyla değişmektedir (Dong et al., 2018). Dolayısıyla farklı ışık rejimlerinde aynı CO_2 set değeri aynı kaliteyi sağlamaz. Işık şiddetinin önemini vurgulayan derlemeler de diğer çevresel koşulların uygun olduğu varsayımına dayanır (Gruda et al., 2025).

VPD × Transpirasyon × Kalsiyum Taşınımı

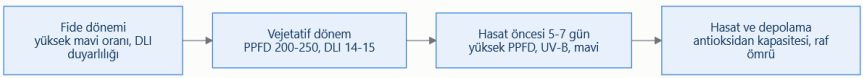
VPD, terleme üzerinden kalsiyum taşınımını ve uç yanıklığı riskini etkiler. Kalsiyumun floemdeki hareketliliği sınırlı olduğundan düşük terleme, hızlı büyüyen dokularda yerel yetersizlik oluşturabilir (Hochmuth et al., 2023). LED kaynaklı yerel ısı yükü de kanopi mikroiklimini bozabilir (Yu et al., 2023). Kontrol, yalnız oda nemine değil kanopi koşulları ve köklerin su sağlama kapasitesine dayanmalıdır.

Spektrum × Hasat Sonrası Kalite: Zaman Boyutunda Etkileşim

Kalite reçetesi gelişim dönemine göre değişmelidir. Fidanlık döneminin DLI yanıtı sonraki dönemlerden farklılaşabilir (Sheikhi et al., 2024). Hasat öncesi UV-B ve mavi ışık antosiyanin birikimini artırabilir (Kang et al., 2026); kısa süreli yüksek ışık ise besinsel kalite ve raf ömrünü iyileştirebilir (Min et al., 2021). Ancak doz, süre, çeşit ve pazarlanabilir verim birlikte değerlendirilmelidir.

Bu bulgular birlikte, dikey tarımda kalite reçetesinin statik bir parametre seti değil, zaman içinde programlanmış bir dizi olarak tasarlanması gerektiğini göstermektedir. Şekil 5, bu programlamanın dört aşamalı tipik yapısını ve her aşamanın baskın kalite hedefini göstermektedir.

Şekil 5. Üretim dönemi boyunca kalite odaklı ışık ve besleme programlamasının aşamaları.



Kalite İzleme, Modelleme ve Karar Destek Sistemleri

Kalite yönetiminin ön koşulu, kalitenin ölçülebilmesidir. Geleneksel laboratuvar analizleri yavaş, maliyetli ve tahribatlıdır; bu nedenle hızlı ve tahribatsız yöntemlere yönelik güçlü bir araştırma ivmesi oluşmuştur (ElMasry et al., 2020; Gámez et al., 2023).

Sensör Tabanlı Mikroiklim İzleme

Kablosuz sensör ağları ve IoT, sıcaklık, bağıl nem ve VPD'nin gerçek zamanlı izlenmesini sağlar (Farooq et al., 2022). Ham ölçümlerin uygunluk göstergelerine dönüştürülmesi karar vermeyi kolaylaştırır (Rezvani et al., 2020). Dikey tarımda bu yaklaşım, raf ve kanopi düzeyindeki ışık–mikroiklim dağılımının temsil edilmesini gerektirir.

Görüntüleme ve Makine Öğrenmesi ile Tahribatsız Kalite Tespiti

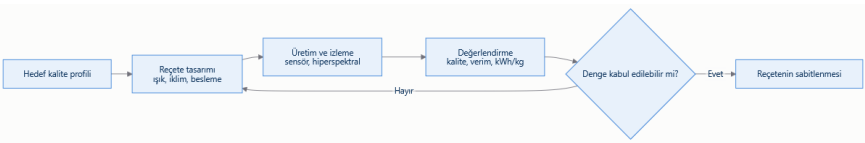
Hiperspektral veriler, referans analizlerle birlikte eğitilen modeller aracılığıyla kalite göstergelerini tahmin edebilir. Bebek yaprak marulda bazı pigment, mineral ve kütle göstergeleri için r = 0,85–0,99 aralığında korelasyon bildirilmiştir (Eshkabilov & Šimko, 2024). Sera marulunda klorofil tahmini için spektral dikkat içeren bir modelde ortalama R^2 = 0,746 bulunmuştur (Ye et al., 2024). Başarı farklı çeşit ve yetiştirme koşullarında bağımsız verilerle doğrulanmalıdır.

Tahribatsız izlemenin yararı, tahminin uygulanabilir bir karara dönüştürülmesidir. Spektral ve termal sinyaller bazı görsel belirtilerden önce değişebilir (Fevgas et al., 2023). Bununla birlikte veri erişimi, kalibrasyon aktarımı ve model çıktılarının ticari kararlarla ilişkilendirilmesi hâlâ sınırlılıktır (Wieme et al., 2022). Yüksek eğitim doğruluğu tek başına saha güvenilirliği göstermez.

Model Tabanlı Değerlendirme

Model tabanlı değerlendirme, ölçülen koşulları ürünün gereksinimleriyle karşılaştırarak 0–1 arasında uygunluk göstergesi oluşturabilir (Shamshiri et al., 2018). Bu gösterge gerçek kalite analizinin yerine geçmez; koşulların tanımlı aralığa yakınlığını ifade eder. Raf bazlı haritalar, referans analizler ve geri beslemeyle birleştirilmesi, Şekil 6'daki karar döngüsünü destekleyebilir.

Şekil 6. Kalite, verim ve enerji göstergelerini birlikte değerlendiren kalite yönetimi karar döngüsü.



Kalite–Verim–Enerji Dengesi ve Sürdürülebilirlik

Aydınlatma ve iklimlendirme, kalite yönetiminin enerji sınırlarını belirler (Miserocchi & Franco, 2024). Kaynak kullanım etkinliği yaklaşımı, pazarlanabilir ürünün girdilere göre değerlendirilmesini gerektirir (Kozai, 2013). Kalite artışı, aynı zamanda enerji tüketimi, üretim çevrimi ve ürün kayıpları üzerinden izlenmelidir.

Marul üretiminde mevcut özgül enerji tüketimi yaklaşık 10–18 kWh kg^{-1}, ekipman ve işletme iyileştirmelerine dayalı teknik

referans ise 3,1–7,4 kWh kg^{-1} olarak derlenmiştir (Miserocchi & Franco, 2024). İkinci aralık gerçekleşmiş ticari performans garantisi değildir. Çizelge 8, enerji ve karbon göstergelerini sistem bağlamlarıyla karşılaştırmaktadır.

Çizelge 8. Dikey tarımda özgül enerji tüketimi ve karbon ayak izine ilişkin raporlanan değerler.

Gösterge	Raporlanan değer	Kaynak
Marul özgül enerji tüketimi (mevcut)	10–18 kWh kg^{-1}	(Miserocchi & Franco, 2024)
Enerji kullanım yoğunluğu	850–1150 kWh m^{-2} $yıl^{-1}$	(Miserocchi & Franco, 2024)
Teknik enerji referansı	3,1–7,4 kWh kg^{-1}	(Miserocchi & Franco, 2024)
Elektrikten fotosentetik ışığa dönüşüm faktörü	Floresan 0,25 → LED ≈ 0,35; beklenti ≥ 0,40	(Kozai, 2019)
Karbon ayak izi, başlangıç senaryosu	Geleneksel yöntemlerden 5,6–16,7 kat yüksek; elektrik payı %85	(Blom et al., 2022)
Karbon ayak izi, alternatif senaryo	2,3–3,3 kat yüksek; elektrik payı %66	(Blom et al., 2022)
Hidroponik kapalı çevre tarımda elektrik tüketimi	Marul kilogramı başına yaklaşık 15 kWh	(Casey et al., 2022)
Emisyon, fosil yakıta bağımlı şebeke karışımı	17,8 kg CO_2 eşdeğeri ve 33 g N eşdeğeri (kg marul başına)	(Casey et al., 2022)
Karşılaştırma: kıtalar arası hava yoluyla taşınan marul	10 kg CO_2 eşdeğeri ve 16 g N eşdeğeri	(Casey et al., 2022)
Emisyon, tamamen yenilenebilir elektrik senaryosu	0,48 kg CO_2 eşdeğeri (kg marul başına)	(Casey et al., 2022)

Enerji verimliliğini artırmaya yönelik stratejiler arasında ileri çevresel kontrol teknolojilerinin entegrasyonu, enerji verimli sistem tasarımları, yerel iklim koşullarına uyarlanmış modüler bitki fabrikası konfigürasyonları ve etkili yönetim uygulamaları öne çıkmaktadır; yalnızca yenilenebilir enerji benimsemek toplam enerji talebini karşılamaya yetmemekte, ancak enerji maliyetlerini ve karbon emisyonlarını önemli ölçüde azaltmaktadır (Mun et al., 2025).

Yaşam döngüsü sonuçları elektrik kaynağına, altyapıya ve tedarik zinciri sınırına bağlıdır. Ticari tesislerde elektrik, ambalaj ve dağıtım önemli katkılar oluşturabilir (Martin et al., 2023). Yenilenebilir elektrik senaryoları iklim etkisini azaltabilse de diğer etki kategorileri aynı yönde değişmeyebilir (Gargaro et al., 2024). Karşılaştırmalı analizlerde yenilenebilir kapasitenin niteliği ve alternatif tedarik zincirleri de belirleyicidir (Casey et al., 2022).

Kalite–verim–enerji dengesi, tek bir bileşik konsantrasyonunun en yüksek değere çıkarılmasıyla çözülemez. Şekil 6'daki gibi ölçüm ve geri beslemeye dayalı yönetimde kalite, pazarlanabilir verim, su ve enerji tüketimi birlikte değerlendirilmelidir (Pennisi et al., 2020).

Sonuç ve Gelecek Perspektifleri

Dikey tarımda ürün kalitesinin yönetimi, tek bir çevresel faktörün optimize edilmesiyle çözülemeyecek kadar karmaşık bir problemdir. Bu bölümde derlenen kanıtlar — ve bunların Şekil 1'deki kavramsal çerçeve ile Şekil 4'teki etkileşim ağı üzerinde konumlandırılması — üç temel sonuca işaret etmektedir.

Işık güçlü bir yönetim aracıdır; ancak uygun düzeyi diğer çevresel koşullara bağlıdır (Gruda et al., 2025). Belirli denemelerde uygun bulunan PPFD ve DLI aralıkları evrensel optimum değildir (Pennisi et al., 2020). Çizelge 3'te özetlenen spektral müdahaleler,

amaçlanan kalite bileşeni ve ürünün büyüme yanıtıyla birlikte ele alınmalıdır.

Etkileşimler tek faktörlü reçetelerle açıklanamaz. Çizelge 7, yüksek EC'nin aynı ışık düzeyinde verimi belirgin biçimde azaltabildiğini; diğer bulgular ışık–azot yönetiminin kalite hedeflerini birlikte etkilediğini göstermektedir (Yi et al., 2020). CO_2 kaynaklı besinsel değişimler de hesaba katılmalıdır (Dong et al., 2018). Şekil 5'teki dönemsel programlama bu ortak yönetimi destekler.

Kalite kazanımları enerji ve çevresel performansla birlikte raporlanmalıdır. Çizelge 8'deki enerji aralıkları iyileştirme potansiyeline işaret eder (Miserocchi & Franco, 2024). Yenilenebilir elektrik avantajı ise ek kapasite, sistem sınırı ve yerel koşullara bağlıdır (Casey et al., 2022).

Öncelikli araştırma alanları; tür ve gelişim dönemine özgü dinamik reçeteler, etkileşimlerin mekanizmaları, bağımsız doğrulanan tahribatsız kalite tahmini ve raf bazlı mikroiklim kontrolüdür. Kalite göstergelerinin kaynak tüketimi ve pazarlanabilir verimle birlikte optimizasyonu, laboratuvar kazanımlarının ticari üretime aktarılmasını sağlayabilir.

Kaynakça

Akter, N., Cammarisano, L., & Ahamed, M. S. (2026). Interactive effects of electrical conductivity and light intensity on growth, yield, and nutrient dynamics of hydroponic lettuce. *Scientific Reports*. https://doi.org/10.1038/s41598-026-44508-2

Al-Kodmany, K. (2018). The Vertical Farm: A Review of Developments and Implications for the Vertical City. *Buildings*, *8*(2), 24. https://doi.org/10.3390/buildings8020024

Al-Rawahy, M. S., Al-Rawahy, S. A., Al-Mulla, Y., & Nadaf, S. K. (2018). Effect of Cooling Root-Zone Temperature on Growth, Yield and Nutrient Uptake in Cucumber Grown in Hydroponic System During Summer Season in Cooled Greenhouse. *Journal of Agricultural Science*, *11*(1), 47. https://doi.org/10.5539/jas.v11n1p47

Appolloni, E., Pennisi, G., Zauli, I., Carotti, L., Paucek, I., Quaini, S., Orsini, F., & Gianquinto, G. (2021). Beyond vegetables: effects of indoor LED light on specialized metabolite biosynthesis in medicinal and aromatic plants, edible flowers, and microgreens. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, *102*(2), 472–487. https://doi.org/10.1002/jsfa.11513

Arcas-Pilz, V., Parada, F., Villalba, G., Rufí-Salís, M., Rosell-Melé, A., & Gabarrell, X. (2021). Improving the Fertigation of Soilless Urban Vertical Agriculture Through the Combination of Struvite and Rhizobia Inoculation in Phaseolus vulgaris. *Frontiers in Plant Science*, *12*, 649304. https://doi.org/10.3389/fpls.2021.649304

Ben-Yaakov, S., & Ben-Asher, J. (1982). System design and analysis of a continuous monitoring of the environment in nutrient solution culture. *Journal of Plant Nutrition*, *5*(1), 45–55. https://doi.org/10.1080/01904168209362935

Berghage, R. (1998). Controlling Height with Temperature. *HortTechnology*, *8*(4), 535–539. https://doi.org/10.21273/horttech.8.4.535

Bian, Z., Wang, Y., Zhang, X., Li, T., Grundy, S., Yang, Q., & Cheng, R. (2020). A Review of Environment Effects on Nitrate Accumulation in Leafy Vegetables Grown in Controlled Environments. *Foods*, *9*(6), 732. https://doi.org/10.3390/foods9060732

Blom, T., Jenkins, A., Pulselli, R. M., & Dobbelsteen, A. A. J. F. van den. (2022). The embodied carbon emissions of lettuce production in vertical farming, greenhouse horticulture, and open-field farming in the Netherlands. *Journal of Cleaner Production*, *377*, 134443. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.134443

Boros, I. F., Sípos, L., Kappel, N., Csambalik, L., & Fodor, M. (2020). Quantification of nitrate content with FT-NIR technique in lettuce (Lactuca sativa L.) variety types: a statistical approach. *Journal of Food Science and Technology*, *57*(11), 4084–4091. https://doi.org/10.1007/s13197-020-04442-1

Brazaitytė, A., Viršilė, A., Samuolienė, G., Vaštakaitė-Kairienė, V., Jankauskienė, J., Miliauskienė, J., Novičkovas, A., & Duchovskis, P. (2019). Response of Mustard Microgreens to Different Wavelengths and Durations of UV-A LEDs. *Frontiers in Plant Science*, *10*, 1153. https://doi.org/10.3389/fpls.2019.01153

Cai, W., Bu, K., Zha, L., Jing-jin, Z., Lai, D., & Bao, H. (2024). Energy Consumption of Plant Factory with Artificial Light: Challenges and Opportunities. In *arXiv (Cornell University)*. Cornell University. https://doi.org/10.48550/arxiv.2405.09643

Casey, L., Freeman, B., Francis, K., Brychkova, G., McKeown, P. C., Spillane, C., Bezrukov, A. A., Zaworotko, M. J., & Styles, D. (2022). Comparative environmental footprints of lettuce supplied by hydroponic controlled-environment agriculture and field-based supply chains. *Journal of Cleaner Production*, *369*, 133214. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.133214

Chen, Y., Li, T., Yang, Q., Zhang, Y., Zou, J., Bian, Z., & Xiang-zhen, W. (2019). UVA Radiation Is Beneficial for Yield and Quality of Indoor Cultivated Lettuce. *Frontiers in Plant Science*, *10*, 1563. https://doi.org/10.3389/fpls.2019.01563

Cheruiyot, R., & Mechesso, A. F. (2025). Microbial Quality of Leafy Greens Grown Under Soilless Production Systems. *Pathogens*, *14*(9), 943. https://doi.org/10.3390/pathogens14090943

Dai, M., Tan, X., Ye, Z., Ren, J. L. W., Chen, X., & Kong, D. (2024). Optimal Light Intensity for Lettuce Growth, Quality, and Photosynthesis in Plant Factories. *Plants*, *13*(18), 2616. https://doi.org/10.3390/plants13182616

Dhakal, K., Ravi, R., & Nandwani, D. (2021). Comparative Study of Sensory Attributes of Leafy Green Vegetables Grown Under Organic and Conventional Management. *International Journal on Food Agriculture and Natural Resources*, *2*(3), 29–45. https://doi.org/10.46676/ij-fanres.v2i3.52

Dong, J., Gruda, N. S., Lam, S. K., Li, X., & Duan, Z. (2018). Effects of Elevated CO2 on Nutritional Quality of Vegetables: A Review. *Minerva Access (University of Melbourne)*, *9*, 924. https://doi.org/10.3389/fpls.2018.00924

ElMasry, G., ElGamal, R., Mandour, N. S., Gou, P., Al-Rejaie, S. S., Belin, É., & Rousseau, D. (2020). Emerging thermal imaging techniques for seed quality evaluation: Principles and applications. *Food Research International*, *131*, 109025. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.109025

Eshkabilov, S., & Šimko, I. (2024). Assessing Contents of Sugars, Vitamins, and Nutrients in Baby Leaf Lettuce from Hyperspectral Data with Machine Learning Models. *Agriculture*, *14*(6), 834. https://doi.org/10.3390/agriculture14060834

Farooq, M. S., Riaz, S., Helou, M. A., Khan, F. S., Abid, A., & Alvi, A. (2022). Internet of Things in Greenhouse Agriculture: A Survey on Enabling Technologies, Applications, and Protocols. *IEEE Access*, *10*, 53374–53397. https://doi.org/10.1109/access.2022.3166634

Ferrante, A., Toscano, S., & Romano, D. (2024). Light quality and intensity modulation on yield and quality on crops grown in vertical farms. *CINECA IRIS Institutional Research Information System (Sant'Anna School of Advanced Studies)*, *89*(5), 1–8. https://doi.org/10.17660/ejhs.2024/024

Fevgas, G., Λάγκας, Θ., Argyriou, V., & Sarigiannidis, P. (2023). Detection of Biotic or Abiotic Stress in Vineyards Using Thermal and RGB Images Captured via IoT Sensors. *IEEE Access*, *11*, 105902–105915. https://doi.org/10.1109/access.2023.3320048

Gámez, A. L., Vatter, T., Santesteban, L. G., Araus, J. L., & Aranjuelo, Í. (2023). Onfield estimation of quality

parameters in alfalfa through hyperspectral spectrometer data. *DIGITAL.CSIC (Spanish National Research Council (CSIC))*, *216*, 108463. https://doi.org/10.1016/j.compag.2023.108463

Gargaro, M., Hastings, A., Murphy, R., & Harris, Z. M. (2024). A cradle-to-customer life cycle assessment case study of UK vertical farming. *Journal of Cleaner Production*, *470*, 143324. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.143324

Gruda, N. S., Samuolienė, G., Dong, J., & Li, X. (2025). Environmental conditions and nutritional quality of vegetables in protected cultivation. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, *24*(2). https://doi.org/10.1111/1541-4337.70139

Hochmuth, G., Hanlon, E., Nagata, R., Snyder, G., Schuenemann, T., McCray, M., & Sandoya, G. V. (2023). Fertilization Recommendations for Crisphead Lettuce Grown on Organic Soils in Florida. *EDIS*, *2023*(1), 8. https://doi.org/10.32473/edis-wq114-2023

Izzo, L. G., Mickens, M. A., Aronne, G., & Gómez, C. (2021). Spectral effects of blue and red light on growth, anatomy, and physiology of lettuce. *Physiologia Plantarum*, *172*(4), 2191–2202. https://doi.org/10.1111/ppl.13395

Jakše, M., Hacin, J., & Maršić, N. K. (2013). Production of rocket (Eruca sativa Mill.) on plug trays and on a floating system in relation to reduced nitrate content. *Acta Agriculturae Slovenica*, *101*(1). https://doi.org/10.14720/aas.2013.101.1.14947

Jasper, J., Elmore, J. S., & Wagstaff, C. (2021). Determining the quality of leafy salads: Past, present and future. *Postharvest Biology and Technology*, *180*, 111630. https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2021.111630

Kabir, M. S. N., Reza, M. N., Chowdhury, M., Ali, M., Samsuzzaman, S., Ali, M. R., Lee, K. Y., & Chung, S. (2023). Technological Trends and Engineering Issues on Vertical Farms: A Review. *Horticulturae*, *9*(11), 1229. https://doi.org/10.3390/horticulturae9111229

Kaiser, E., Kusuma, P., Vialet-Chabrand, S., Folta, K. M., Liu, Y., Poorter, H., Woning, N., Shrestha, S., Ciarreta, A., Brenk, J. van, Karpe, M., Ji, Y., David, S., Zepeda, C., Zhu, X.-G., Huntenburg, K., Verdonk, J. C., Woltering, E. J., Gauthier, P. P. G., … Marcelis, L. F. M. (2024). Vertical farming goes dynamic: optimizing resource use efficiency, product quality, and energy costs. *Frontiers in Science*, *2*. https://doi.org/10.3389/fsci.2024.1411259

Kalantari, F., Tahir, O. M., Joni, R. A., & Fatemi, E. (2017). Opportunities and Challenges in Sustainability of Vertical Farming: A Review. *Journal of Landscape Ecology*, *11*(1), 35–60. https://doi.org/10.1515/jlecol-2017-0016

Kang, S., Zhu, Y., Jha, D. K., Patil, B. S., & Zhen, S. (2026). Dose-dependent effects of supplemental ultraviolet-B and blue light on nutritional quality–yield trade-offs in red lettuce. *Scientia Horticulturae*, *355*, 114583. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2025.114583

Khan, K. A., Yan, Z., & He, D. (2018). Impact of Light Intensity and Nitrogen of Nutrient Solution on Nitrate Content in Three Lettuce Cultivars Prior to Harvest. *Journal of Agricultural Science*, *10*(6), 99. https://doi.org/10.5539/jas.v10n6p99

Kim, H.-H., Goins, G. D., Wheeler, R. M., & Sager, J. C. (2004). Green-light Supplementation for Enhanced Lettuce Growth under Red- and Blue-light-emitting Diodes. *HortScience*,

39(7), 1617–1622. https://doi.org/10.21273/hortsci.39.7.1617

Kitazaki, K., Fukushima, A., Nakabayashi, R., Okazaki, Y., Kobayashi, M., Mori, T., Nishizawa, T., Reyes-Chin-Wo, S., Michelmore, R. W., Saito, K., Shoji, K., & Kusano, M. (2018). Metabolic Reprogramming in Leaf Lettuce Grown Under Different Light Quality and Intensity Conditions Using Narrow-Band LEDs. *Scientific Reports*, *8*(1), 7914. https://doi.org/10.1038/s41598-018-25686-0

Kozai, T. (2013). SUSTAINABLE PLANT FACTORY: CLOSED PLANT PRODUCTION SYSTEMS WITH ARTIFICIAL LIGHT FOR HIGH RESOURCE USE EFFICIENCIES AND QUALITY PRODUCE. *Acta Horticulturae*, *1004*, 27–40. https://doi.org/10.17660/actahortic.2013.1004.2

Kozai, T. (2019). Towards sustainable plant factories with artificial lighting (PFALs) for achieving SDGs. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, *12*(5), 28–37. https://doi.org/10.25165/j.ijabe.20191205.5177

Malkawi, S., Hagare, D., & Maheshwari, B. (2025). Closed Loop Phosphorus Recovery and Recycling for Sustainable Hydroponic Farming. *Journal of Sustainable Agriculture and Environment*, *4*(3). https://doi.org/10.1002/sae2.70094

Martin, M., Elnour, M., & Siñol, A. C. (2023). Environmental life cycle assessment of a large-scale commercial vertical farm. *Sustainable Production and Consumption*, *40*, 182–193. https://doi.org/10.1016/j.spc.2023.06.020

Matysiak, B., Ropelewska, E., Wrzodak, A., Kowalski, A., & Kaniszewski, S. (2022). Yield and Quality of Romaine Lettuce at Different Daily Light Integral in an Indoor Controlled Environment. *Agronomy*, *12*(5), 1026. https://doi.org/10.3390/agronomy12051026

Ménard-Moyon, C., Héraud, F., Volatier, J., & Leblanc, J. (2008). Assessment of dietary exposure of nitrate and nitrite in France. *Food Additives & Contaminants Part A*, *25*(8), 971–988. https://doi.org/10.1080/02652030801946561

Meng, Q., & Runkle, E. S. (2023). Blue Photons from Broad-Spectrum LEDs Control Growth, Morphology, and Coloration of Indoor Hydroponic Red-Leaf Lettuce. *Plants*, *12*(5), 1127. https://doi.org/10.3390/plants12051127

Min, Q., Marcelis, L. F. M., Nicole, C. C. S., & Woltering, E. J. (2021). High Light Intensity Applied Shortly Before Harvest Improves Lettuce Nutritional Quality and Extends the Shelf Life. *Frontiers in Plant Science*, *12*, 615355. https://doi.org/10.3389/fpls.2021.615355

Min, Q., Marcelis, L. F. M., & Woltering, E. J. (2023). Adjusting photosynthetic photon flux density (PPFD) to improve the quality of leafy vegetables in vertical farms. In *Socio-Environmental Systems Modeling* (pp. 293–318). https://doi.org/10.19103/as.2023.0126.17

Miserocchi, L., & Franco, A. (2024). Benchmarking energy efficiency in vertical farming: Status and prospects. *Thermal Science and Engineering Progress*, *58*, 103165. https://doi.org/10.1016/j.tsep.2024.103165

Moore, M. R., Yang, T., Douraki, M. J., Rivard, C. L., Pliakoni, E. D., Nwadike, L., & Bhullar, M. (2025). Effect of Ultraviolet Water Treatment on Survival and Growth of Escherichia coli in Recirculating Hydroponic Systems. *Journal of Food Protection*, *88*(9), 100575. https://doi.org/10.1016/j.jfp.2025.100575

Mun, H., Lagua, E. B., Hong, S. J., Ryu, S.-B., Sharifuzzaman, M., Hasan, M. K., Kim, Y.-H., & Yang, C. (2025). Energy-Efficient Technologies and Strategies for Feasible and

Sustainable Plant Factory Systems. *Sustainability*, *17*(7), 3259. https://doi.org/10.3390/su17073259

Nájera, C., Gallegos-Cedillo, V. M., Ros, M., & Pascual, J. A. (2022). LED Lighting in Vertical Farming Systems Enhances Bioactive Compounds and Productivity of Vegetables Crops. *MDPI (MDPI AG)*, 24. https://doi.org/10.3390/iecho2022-12514

Nicole, C. C. S., Mooren, J., Terra, A. T. P., Larsen, D. H., Woltering, E. J., Marcelis, L. F. M., Verdonk, J. C., Schouten, R. E., & Troost, F. (2019). Effects of LED lighting recipes on postharvest quality of leafy vegetables grown in a vertical farm. *Acta Horticulturae*, *1256*, 481–488. https://doi.org/10.17660/actahortic.2019.1256.68

Nisar, M., Mahmood, R., Tayyab, S., Anees, M., Nadeem, F., Bibi, S., Waseem, F., Ahmed, N., Li, J., & Song, Z. (2024). Comparative efficacy of non-electric cooling techniques to reduce nutrient solution temperature for the sustainable cultivation of summer vegetables in open-air hydroponics. *Frontiers in Plant Science*, *15*, 1340641. https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1340641

Nxawe, S., Ndakidemi, P. A., & Laubscher, C. P. (2010). Possible effects of regulating hydroponic water temperature on plant growth, accumulation of nutrients and other metabolites. *AFRICAN JOURNAL OF BIOTECHNOLOGY*, *9*(54), 9128–9134. https://doi.org/10.5897/ajb2010.000-3336

Pennisi, G., Orsini, F., Blasioli, S., Cellini, A., Crepaldi, A., Braschi, I., Spinelli, F., Nicola, S., Fernández, J. A., Stanghellini, C., Gianquinto, G., & Marcelis, L. F. M. (2019). Resource use efficiency of indoor lettuce (Lactuca sativa L.) cultivation as affected by red:blue ratio provided by LED

lighting. *Scientific Reports*, *9*(1), 14127. https://doi.org/10.1038/s41598-019-50783-z

Pennisi, G., Pistillo, A., Orsini, F., Cellini, A., Spinelli, F., Nicola, S., Fernández, J. A., Crepaldi, A., Gianquinto, G., & Marcelis, L. F. M. (2020). Optimal light intensity for sustainable water and energy use in indoor cultivation of lettuce and basil under red and blue LEDs. *Scientia Horticulturae*, *272*, 109508. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2020.109508

Rezvani, S. M., Abyaneh, H. Z., Shamshiri, R. R., Balasundram, S. K., Dworak, V., Mohsen, G., Sultan, M., & Mahns, B. (2020). IoT-Based Sensor Data Fusion for Determining Optimality Degrees of Microclimate Parameters in Commercial Greenhouse Production of Tomato. *Sensors*, *20*(22), 6474. https://doi.org/10.3390/s20226474

Riggio, G., Jones, S. L., & Gibson, K. E. (2019). Risk of Human Pathogen Internalization in Leafy Vegetables During Lab-Scale Hydroponic Cultivation. *Horticulturae*, *5*(1), 25. https://doi.org/10.3390/horticulturae5010025

Rouphael, Y., Petropoulos, S. A., El-Nakhel, C., Pannico, A., Kyriacou, M. C., Giordano, M., Troise, A. D., Vitaglione, P., & Pascale, S. D. (2019). Reducing Energy Requirements in Future Bioregenerative Life Support Systems (BLSSs): Performance and Bioactive Composition of Diverse Lettuce Genotypes Grown Under Optimal and Suboptimal Light Conditions. *Frontiers in Plant Science*, *10*, 1305. https://doi.org/10.3389/fpls.2019.01305

Rusu, T., Moraru, P. I., & Mintaş, O. (2021). Influence of environmental and nutritional factors on the development of lettuce (Lactuca sativa L.) microgreens grown in a hydroponic system: A review. *Notulae Botanicae Horti*

Agrobotanici Cluj-Napoca, *49*(3), 12427. https://doi.org/10.15835/nbha49312427

Sago, Y. (2016). Effects of Light Intensity and Growth Rate on Tipburn Development and Leaf Calcium Concentration in Butterhead Lettuce. *HortScience*, *51*(9), 1087–1091. https://doi.org/10.21273/hortsci10668-16

Šalagovič, J., Vanhees, D. J., Verboven, P., Holsteens, K., Verlinden, B., Huysmans, M., Poel, B. V. de, & Nicolaï, B. (2024). Microclimate monitoring in commercial tomato (Solanum Lycopersicum L.) greenhouse production and its effect on plant growth, yield and fruit quality. *Frontiers in Horticulture*, *3*. https://doi.org/10.3389/fhort.2024.1425285

Santamaria, P. (2005). Nitrate in vegetables: toxicity, content, intake and EC regulation. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, *86*(1), 10–17. https://doi.org/10.1002/jsfa.2351

Shamshiri, R. R., Ahmad, D., Ismail, W. I. W., Man, H. C., Zakaria, A., Yamin, M., & Beveren, P. van. (2016). *Comparative Evaluation of Naturally ventilated Screenhouse and Evaporative Cooled Greenhouse based on Optimal Vapor Pressure Deficit*. https://doi.org/10.13031/aim.20162454215

Shamshiri, R. R., Jones, J. W., Thorp, K. R., Ahmad, D., Man, H. C., & Taheri, S. (2018). Review of optimum temperature, humidity, and vapour pressure deficit for microclimate evaluation and control in greenhouse cultivation of tomato: a review. *International Agrophysics*, *32*(2), 287–302. https://doi.org/10.1515/intag-2017-0005

Shamshiri, R. R., Kalantari, F., Ting, K. C., Thorp, K. R., Hameed, I. A., Weltzien, C., Ahmad, D., Shad, Z. M., & USA, 7. Adaptive AgroTech Consultancy International, CA 93955,. (2018). Advances in greenhouse automation and controlled environment agriculture: A transition to plant factories and

urban agriculture. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, *11*(1), 1–22. https://doi.org/10.25165/j.ijabe.20181101.3210

Sheikhi, H., Delshad, M., Aliniaeifard, S., Babalar, M., Nasiri, R., Shojaei, S. H., & Haghbeen, K. (2024). Trait component analysis of lettuce in response to daily light integrals at two growth stages. *Agrosystems Geosciences & Environment*, *7*(4). https://doi.org/10.1002/agg2.20579

Smith, H. L., McAusland, L., & Murchie, E. H. (2017). Don't ignore the green light: exploring diverse roles in plant processes. *Journal of Experimental Botany*, *68*(9), 2099–2110. https://doi.org/10.1093/jxb/erx098

Soares, J., Santos, C. S., Carvalho, S. M. P., Pintado, M., & Vasconcelos, M. W. (2019). Preserving the nutritional quality of crop plants under a changing climate: importance and strategies. *Plant and Soil*, *443*, 1–26. https://doi.org/10.1007/s11104-019-04229-0

Song, J., Huang, H., Hao, Y., Song, S., Zhang, Y., Su, W., & Liu, H. (2020). Nutritional quality, mineral and antioxidant content in lettuce affected by interaction of light intensity and nutrient solution concentration. *Scientific Reports*, *10*(1), 2796. https://doi.org/10.1038/s41598-020-59574-3

Soufi, H. R., Roosta, H. R., & Hamidpour, M. (2023). The plant growth, water and electricity consumption, and nutrients uptake are influenced by different light spectra and nutrition of lettuce. *Scientific Reports*, *13*(1), 20766. https://doi.org/10.1038/s41598-023-48284-1

Sublett, W. L., Barickman, T. C., & Sams, C. E. (2018). The Effect of Environment and Nutrients on Hydroponic Lettuce Yield, Quality, and Phytonutrients. *Horticulturae*, *4*(4), 48. https://doi.org/10.3390/horticulturae4040048

Thakur, P., Wadhwa, H., Kaushal, S., & Shubham, S. (2023). Nutrient Dynamics for Hydroponic Production System. *International Journal of Plant & Soil Science*, *35*(21), 982–993. https://doi.org/10.9734/ijpss/2023/v35i214069

Thoma, F., Somborn-Schulz, A., Schlehuber, D., Keuter, V., & Deerberg, G. (2020). Effects of Light on Secondary Metabolites in Selected Leafy Greens: A Review. *Frontiers in Plant Science*, *11*(2), 106–110. https://doi.org/10.3389/fpls.2020.00497

Toreti, A., Deryng, D., Tubiello, F. N., Müller, C., Kimball, B. A., Moser, G. M., Boote, K. J., Asseng, S., Pugh, T. A. M., Vanuytrecht, E., Pleijel, H., Webber, H., Durand, J. L., Dentener, F., Ceglar, A., Wang, X., Badeck, F., Lecerf, R., Wall, G. W., … Rosenzweig, C. (2020). Narrowing uncertainties in the effects of elevated CO2 on crops. *Nature Food*, *1*(12), 775–782. https://doi.org/10.1038/s43016-020-00195-4

Toscano, S., Trivellini, A., Cocetta, G., Bulgari, R., Francini, A., Romano, D., & Ferrante, A. (2019). Effect of Preharvest Abiotic Stresses on the Accumulation of Bioactive Compounds in Horticultural Produce. *Frontiers in Plant Science*, *10*, 1212. https://doi.org/10.3389/fpls.2019.01212

Wang, A., Lv, J., Wang, J., & Shi, K. (2022). CO2 enrichment in greenhouse production: Towards a sustainable approach. *Frontiers in Plant Science*, *13*, 1029901. https://doi.org/10.3389/fpls.2022.1029901

Wieme, J., Mollazade, K., Malounas, I., Zude-Sasse, M., Zhao, M., Gowen, A., Argyropoulos, D., Fountas, S., & Beek, J. V. (2022). Application of hyperspectral imaging systems and artificial intelligence for quality assessment of fruit, vegetables and mushrooms: A review. *Biosystems*

Engineering, *222*, 156–176. https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2022.07.013

Ye, Z., Tan, X., Dai, M., Chen, X., Zhong, Y., Zhang, Y., Ruan, Y., & Kong, D. (2024). A hyperspectral deep learning attention model for predicting lettuce chlorophyll content. *Plant Methods*, *20*(1), 22. https://doi.org/10.1186/s13007-024-01148-9

Yi, Z., Cui, J., Fu, Y., Yu, J., & Liu, H. (2020). Optimization of light intensity and nitrogen concentration in solutions regulating yield, vitamin C, and nitrate content of lettuce. *The Journal of Horticultural Science and Biotechnology*, *96*(1), 62–72. https://doi.org/10.1080/14620316.2020.1804468

Yu, H., Yu, H., Zhang, B., Chen, M., Liu, Y., & Sui, Y. (2023). Quantitative Perturbation Analysis of Plant Factory LED Heat Dissipation on Crop Microclimate. *Horticulturae*, *9*(6), 660. https://doi.org/10.3390/horticulturae9060660

BÖLÜM 5

BİYOKÖMÜRÜN MİKROPLASTİK KİRLİLİĞİNİN KONTROLÜNDEKİ POTANSİYELİ: TOPRAK VE SU SİSTEMLERİ ÜZERİNE BİR DEĞERLENDİRME

Alperay ALTIKAT[1]

Giriş

Mikroplastikler (MP), tarımsal girdiler ve atık akışlarıyla toprak ve su ortamlarına ulaşarak çevresel baskı oluşturmaktadır. Biyokömür, biyokütlenin pirolizinden elde edilen karbonca zengin bir malzemedir; gözenek yapısı ve yüzey kimyası nedeniyle bu partiküllerin tutulmasında değerlendirilmektedir (Anuwa-Amarh et al., 2024). Bununla birlikte, partiküllerin tutulması, parçalanması ve toksik etkilerinin azalması farklı sonuçlardır; giderim verimi tek başına kalıcı çevresel iyileşmeyi göstermez.

Bu bölüm, biyokömürün MP kontrolündeki potansiyelini su arıtımı ve toprak iyileştirme bağlamında incelemektedir. Kaynaklar, etkileşim mekanizmaları, deneysel bulgular ve uygulama sınırlamaları birlikte değerlendirilmiştir. Amaç, laboratuvar sonuçlarını saha koşulları için evrensel başarı ölçütü olarak sunmadan, malzeme ve işletme seçimine temel oluşturmaktır.

1[Arş. Gör/ Iğdır Üniversitesi / Bahçe Bitkileri Bölümü / ORCID: 0009-0005-8270-1728]

Mikroplastikler: Tanım, Sınıflandırma ve Kaynaklar

Tarımsal topraklarda başlıca MP kaynakları biyokatılar, kompost, atık suyla sulama, malç kalıntıları, polimer esaslı tarımsal girdiler ve atmosferik birikimdir (Kumar et al., 2020). Çizelge 1 kaynak–ortam ilişkisini, Şekil 1 ise toprak ve su sistemleri arasındaki taşınım yollarını göstermektedir. Bu bağlantı, kontrol önlemlerinin yalnızca kirleticinin biriktiği son ortamla sınırlanmamasını gerektirir.

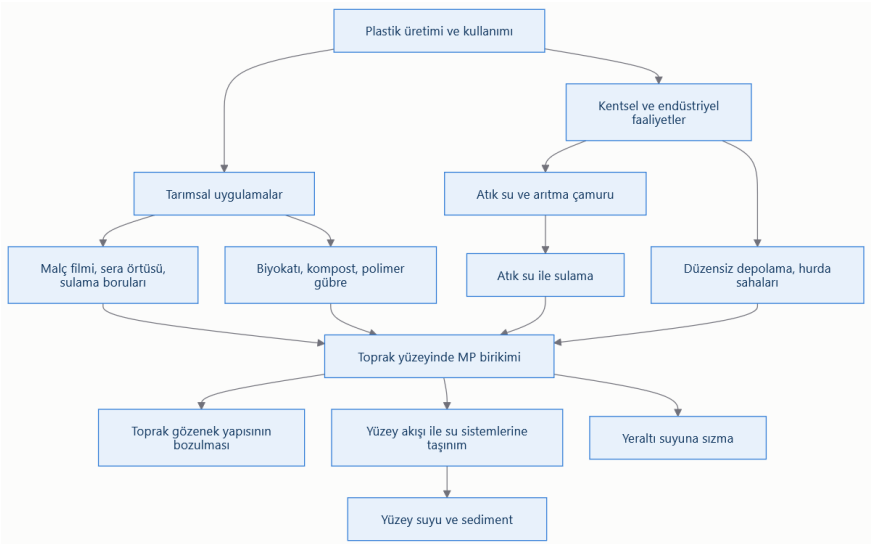
Çizelge 1. Mikroplastik kaynakları ve bu kaynakların toprak–su sistemlerine etkileri

Kaynak	**İlgili ortam**	**Temel katkı / mekanizma**
Biyokatı (arıtma çamuru) ve kompost	Tarımsal toprak	Organik gübre ile birlikte partikül girişi (Kumar et al., 2020)
Atık su ile sulama	Toprak (0–20 cm), sulama suyu	Arıtılmış su ile MP birikimi (Aydın et al., 2025)
Malç filmleri	Tarımsal toprak yüzeyi	Makro/mikroplastik kalıntı oluşumu (Qi et al., 2020)
Sera örtü plastikleri ve sulama boruları	Sera toprağı	Kullanım sonrası partikül kalıntısı
Polimer esaslı gübre ve pestisitler	Tarımsal toprak	Doğrudan polimer girişi (Kumar et al., 2020)
Atmosferik birikim	Toprak ve su yüzeyleri	Uzun mesafeli taşınım (Brahney et al., 2020)

Kaynak	İlgili ortam	Temel katkı / mekanizma
Düzensiz depolama ve hurda sahaları	Çevre toprakları	Yoğunlaşmış MP birikimi (Akça, 2025)

Kaynaklar: (Kumar et al., 2020); (Aydın et al., 2025); (Qi et al., 2020); (Brahney et al., 2020); (Akça, 2025)

Şekil 1. Mikroplastiklerin kaynaklarından toprak ve su sistemlerine taşınım yollarının şematik gösterimi



Mikroplastik Kirliliğinin Toprak ve Su Sistemlerindeki Boyutu

Toprak MP bolluğunun karşılaştırılmasında partikül sayısı, kütle ve örnekleme derinliği birlikte dikkate alınmalıdır. Küresel derlemede tarımsal topraklar için ortalama 1,7 mg/kg kütlesel derişim bildirilmiştir (Büks & Kaupenjohann, 2020). Çizelge 2'de farklı arazi kullanımlarındaki değerler verilmiştir. Birim ve yöntem farklılıkları giderilmeden bu değerlerden doğrudan bir risk sıralaması çıkarılmamalıdır.

Küresel ölçekte toprak plastik kirliliğinin toplam kütlesinin atık su kaynaklı girişler için 1,0–4,3 Mt, malç kaynaklı girişler için ise 0,5–2,3 Mt aralığında olduğu tahmin edilmektedir (Kedzierski et al., 2023). Avrupa tarım arazilerinde yıllık MP yükünün 63.000–430.000 ton arasında olduğu, çalışmalarda 700–4000 partikül/kg aralığında değerler ve kuru toprak ağırlığı üzerinden %7'ye varan MP fragmanı bildirildiği belirtilmektedir (Boots et al., 2019). Tarımsal ve bahçecilik alanlarında, atık çamur ve malç uygulamalarına maruz kalan alanlarda küresel MP miktarları 13.000 partikül/kg ve 4,5 mg/kg'a kadar çıkabilmekte; belediye alanlarına yakın topraklarda bu düzeyler kırsal alanlardan 10 kattan fazla yüksek olabilmektedir (Maqbool et al., 2023). Endüstriyel alan topraklarında ise MP bolluğu ağırlıkça %0,03 ile %6,7 arasında değişebilmektedir (Maqbool et al., 2023).

Çizelge 2. Literatürde bildirilen toprak mikroplastik bolluk değerleri

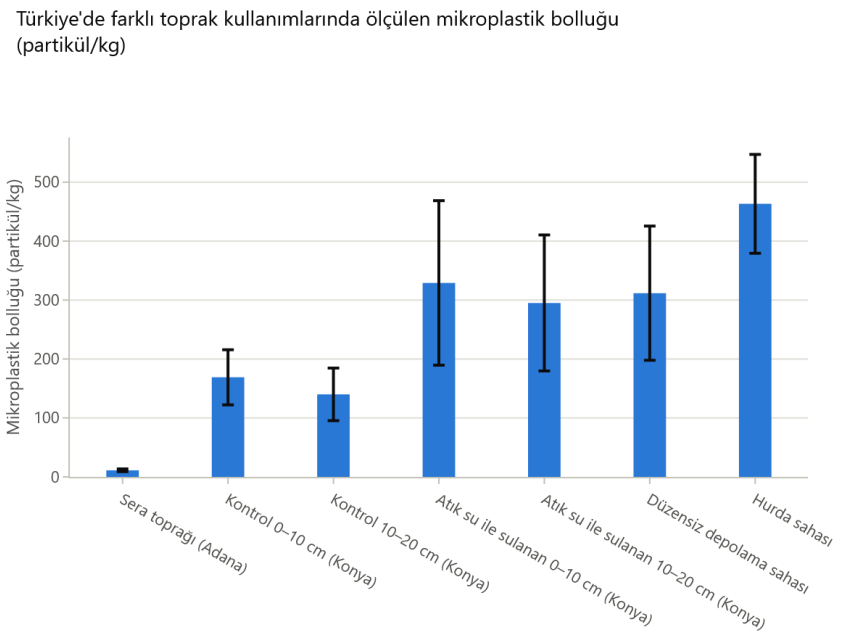
Ortam / kullanım	**Bildirilen değer**	**Kaynak**
Küresel ortalama (partikül sayısı)	~1.200 partikül/kg (88–2.830)	(Büks & Kaupenjohann, 2020)
Küresel ortalama (partikül sayısı)	~1.000 partikül/kg (350–1.604)	(Büks & Kaupenjohann, 2020)
Tarımsal toprak (kütlesel)	1,7 mg/kg (0,3–2,8)	(Büks & Kaupenjohann, 2020)
Belediye alanı yakını	1.275 partikül/kg (316–3.005)	(Büks & Kaupenjohann, 2020)
Kırsal alan	187 partikül/kg (0,3–1.332)	(Büks & Kaupenjohann, 2020)
Avrupa tarım arazisi	700–4.000 partikül/kg; kuru ağırlıkça %7'ye kadar	(Boots et al., 2019)

Ortam / kullanım	Bildirilen değer	Kaynak
Malç/biyokatı uygulanan alanlar	13.000 partikül/kg; 4,5 mg/kg	(Maqbool et al., 2023)
Endüstriyel alan toprağı	%0,03–6,7 (w/w)	(Maqbool et al., 2023)
Almanya, orta Franconia tarım arazisi	0,34 ± 0,36 MP/kg	(Lwanga et al., 2022)

Kaynaklar: (Büks & Kaupenjohann, 2020); (Boots et al., 2019); (Maqbool et al., 2023); (Lwanga et al., 2022)

Türkiye'de atık suyla sulanan Konya topraklarında 0–10 cm derinlikte 329 ± 139,5 MP/kg, kontrol alanlarında 169 ± 46,8 MP/kg ölçülmüştür (Aydın et al., 2025). Sekiz ili kapsayan çalışmada düzensiz depolama alanlarında 311,6 ± 113,9, hurda sahalarında 463,3 ± 83,9 partikül/kg bulunmuştur (Akça, 2025). Şekil 2 bu ölçümleri karşılaştırır; farklı saha koşulları sonuçların yorumlanmasında korunmalıdır.

Şekil 2. Türkiye'de farklı toprak kullanımlarında ölçülen mikroplastik bolluğu (ortalama ± standart sapma)



Biyokömürün Üretimi ve Özellikleri

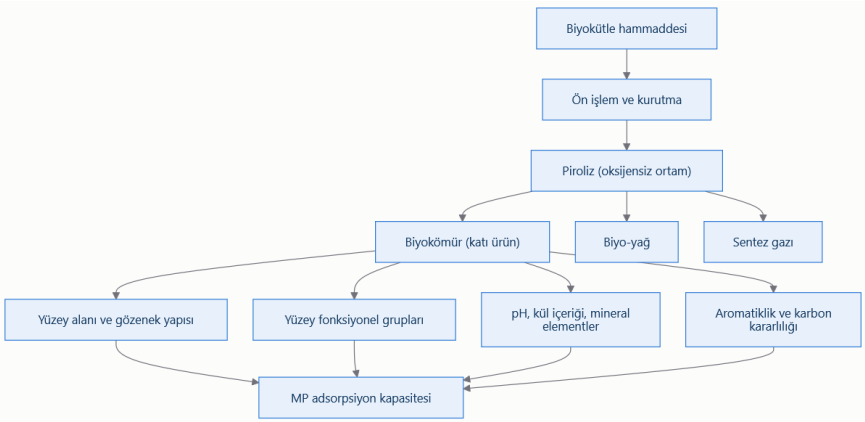
Biyokömürün yüzey alanı, gözenekliliği, aromatikliği ve fonksiyonel grupları hammadde ile piroliz koşullarına bağlıdır. Sıcaklığın artması gözenek gelişimini destekleyebilirken yüzey kimyasını da değiştirir (Tomczyk et al., 2020). Şekil 3 üretim–özellik ilişkisini, Çizelge 3 farklı hammaddelerdeki değerleri özetler. En yüksek yüzey alanı, her MP türü için en uygun malzeme anlamına gelmez.

Piroliz sıcaklığı, biyokömürün gözenek hacmini ve yüzey alanını belirleyen temel işletme parametresidir (Osman et al., 2022). Bunun yanında, yüksek sıcaklık pirolizinde yüzey fonksiyonel gruplarında —özellikle asidik fonksiyonel gruplarda— belirgin bir

azalma görülmekte ve bu durum yüksek sıcaklıkta gerçekleşen termal ayrışma reaksiyonlarına bağlanmaktadır (Zhang et al., 2024). Buna karşılık, piroliz sıcaklığının artmasıyla yapısal aromatikliğin de arttığı ve bunun mikrobiyal ayrışmaya karşı direnci güçlendirdiği belirtilmektedir (Tomczyk et al., 2020).

Piroliz sıcaklığının yüzey alanı üzerindeki etkisi niceliksel olarak da gösterilmiştir: bambu kömürünün yüzey alanı 300 °C'den 450 °C'ye çıkan sıcaklıkla 1,3'ten 10,2 m^2/g'a yükselmiş; sabit sıcaklıkta hammadde değişiminin de benzer bir etki gösterdiği, bagas için 5,2'den 13,6 m^2/g'a bir artış gözlendiği bildirilmiştir. Aynı çalışmada, 550 °C'de üretilen neem esaslı biyokömür 43,9 m^2/g ile en yüksek spesifik yüzey alanına ulaşırken, plastik kömürün yüzey alanı yalnızca 5,29 m^2/g olarak ölçülmüş ve biyokömürün adsorban olarak plastik kömürden yaklaşık sekiz kat daha uygun olduğu vurgulanmıştır (Singh et al., 2020). Düşük yüzey alanlı biyokömürler ise pamuk tohumu kavuzundan 4,7 m^2/g, kanatlı hayvan altlığından 17,7 m^2/g ve süt sığırı gübresinden 13,0 m^2/g değerleriyle raporlanmıştır (Tomczyk et al., 2020). Ayrıca 400 °C'nin üzerinde üretilen biyokömürün, yüksek yüzey alanı ve belirgin mikrogözenek gelişimi sayesinde organik ve inorganik kirletici sorpsiyonunda daha etkili olduğu bildirilmektedir (Tomczyk et al., 2020). Genel olarak spesifik yüzey alanı hem inorganik hem de organik kirleticilerin adsorpsiyonunda kritik rol oynarken, yüksek oksijen/karbon oranı oksijen içeren fonksiyonel grupların ve katyon değişim kapasitesinin artması nedeniyle inorganik adsorpsiyonu; yüksek aromatiklik ve hidrofobiklik ise organik kirleticilerin adsorpsiyonunu desteklemektedir (Osman et al., 2022). Şekil 3, biyokömür üretim sürecini ve ürün özelliklerini etkileyen temel faktörleri göstermektedir.

Şekil 3. Biyokömür üretim süreci ve ürün özelliklerini belirleyen temel faktörler



Çizelge 3. Hammadde ve piroliz sıcaklığının biyokömür spesifik yüzey alanı üzerindeki etkisi

Hammadde	**Piroliz koşulu**	**Spesifik yüzey alanı**	**Kaynak**
Bambu	300 °C	1,3 m^2/g	(Singh et al., 2020)
Bambu	450 °C	10,2 m^2/g	(Singh et al., 2020)
Bagas	Sabit sıcaklık (değişken)	5,2 → 13,6 m^2/g	(Singh et al., 2020)
Neem	550 °C	43,9 m^2/g	(Singh et al., 2020)
Plastik kömür	–	5,29 m^2/g	(Singh et al., 2020)
Pamuk tohumu kavuzu	–	4,7 m^2/g	(Tomczyk et al., 2020)
Kanatlı hayvan altlığı	–	17,7 m^2/g	(Tomczyk et al., 2020)

Hammadde	Piroliz koşulu	Spesifik yüzey alanı	Kaynak
Süt sığırı gübresi	–	13,0 m^2/g	(Tomczyk et al., 2020)

Kaynaklar: (Singh et al., 2020); (Tomczyk et al., 2020)

Biyokömür–Mikroplastik Etkileşim Mekanizmaları

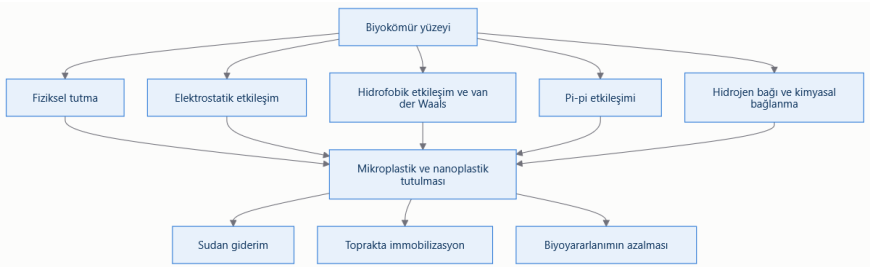
Biyokömür–MP etkileşiminde hidrofobik ve elektrostatik etkileşimler, van der Waals kuvvetleri, π–π etkileşimleri ve hidrojen bağları birlikte rol oynayabilir (Anuwa-Amarh et al., 2024). Modifikasyon, bu mekanizmaların göreli önemini değiştirir (Zheng et al., 2024). Gözeneklerde fiziksel yakalanma da özellikle filtrasyonda önemlidir (Nepal et al., 2023). Şekil 4 temel mekanizmaları, Çizelge 4 adsorban–partikül çiftlerini sunar. Mekanizma yorumu, yalnızca giderim yüzdesine değil, yüzey ve partikül karakterizasyonuna dayanmalıdır.

Piroliz sıcaklığının etkisi, mekanizmalar düzeyinde de belirgindir. Okside edilmiş mısır koçanı biyokömürünün PS'ye karşı adsorpsiyon kapasitesinin piroliz sıcaklığıyla arttığı; bu artışın elektrostatik etkileşimler, hidrofobiklik, spesifik yüzey alanı, gözenek dolgusu ve hidrojen bağı gibi çoklu faktörlere bağlandığı bildirilmiştir (Olubusoye et al., 2024). 750 °C'de üretilen biyokömürün, artan yüzey alanı ve gözenek bolluğu sayesinde nanoplastik gideriminde %99'un üzerinde verim sağladığı; buna karşın 550 °C ve 350 °C'de üretilen biyokömürlerin nispeten daha düşük sorpsiyon gösterdiği raporlanmıştır (Olubusoye et al., 2024).

Fiziksel tutma mekanizması, biyokömürün petek benzeri (honeycomb) gözenek yapısıyla yakından ilişkilidir. Mısır sapı ve sert ağaç kaynaklı biyokömür filtrasyon yöntemi olarak kullanıldığında, 10–22 μm çapındaki MP'leri %95'in üzerinde bir oranla giderdiği ve immobilize ettiği; bunun partiküllerin biyokömürün geniş petek yapılarında yakalanması ve dolanması

(entanglement) yoluyla gerçekleştiği belirtilmektedir (Nepal et al., 2023). Şekil 4, BC–MP etkileşiminde öne çıkan mekanizmaları bir arada göstermektedir.

Şekil 4. Biyokömür–mikroplastik etkileşiminde rol oynayan temel mekanizmalar



Çizelge 4. Karbon esaslı adsorbanlar üzerinde mikroplastik/nanoplastik adsorpsiyonunda tanımlanan mekanizmalar

Adsorban	**Partikül**	**Baskın mekanizma(lar)**	**Kaynak**
Biyokömür	PS nanoplastik	Elektrostatik çekimler	(Zheng et al., 2024)
Zn ile modifiye manyetik biyokömür	PS mikroplastik	π–π etkileşimleri, hidrojen bağı, kooperatif etki	(Zheng et al., 2024)
Mg/Zn ile modifiye manyetik biyokömür	PS mikroplastik	Elektrostatik etkileşim, kimyasal bağlanma	(Zheng et al., 2024)
Aktifleştirilmiş çam/ladin kabuğu biyokömürü	PE mikroboncuk	Fizisorpsiyon	(Zheng et al., 2024)
Mısır koçanı ham ve okside biyokömürü	PS nanoplastik	Hidrofobik etkileşim, hidrojen bağı	(Zheng et al., 2024)

Kaynaklar: (Zheng et al., 2024)

Yöntem

Bölüm, deneysel adsorpsiyon ve kolon çalışmaları, toprak inkübasyonları, saha ölçümleri ve derlemelerin tematik değerlendirmesidir. Bulgular; etkileşim mekanizmaları, su giderimi, toprak etkileri ve uygulama sınırlamaları altında birleştirilmiştir. Nicel sonuçlar, kaynak çalışmanın partikül boyutu, malzeme ve işletme koşullarıyla birlikte yorumlanmış; farklı deneylerden elde edilen değerler doğrudan başarı sıralamasına dönüştürülmemiştir.

Su Sistemlerinde Mikroplastik Giderimi

Literatür değerlendirmesinde sabit kolonlar için %95,31 ± 5,26, kesikli sistemler için %93,36 ± 4,92 giderim bildirilmiştir; ≥10 µm MP'lerde %99'a, manyetik biyokömürle 1 µm partiküllerde %96,2'ye ulaşılabilmiştir (Dang et al., 2025). Bunlar farklı deney koşullarının sonuçlarıdır. Çizelge 5 koşullarıyla birlikte bulguları, Şekil 5 seçilmiş giderim oranlarını göstermektedir.

Makadamia kabuğu biyokömürlü kolonlarda 50–100 ve 100–300 µm polietilen fragmanları incelenmiş; düşük akışta küçük MP'ler için en yüksek giderim %96 olmuştur. Elektrostatik itmeye rağmen tutulma gerçekleşmesi, partikül–biyokömür boyut oranı ve akışın önemini göstermektedir. Erken biyofilm oluşumu da gözenekleri ve yüzeyi değiştirerek giderimi artırabilmiştir (Changlor et al., 2025).

Sürekli kolon deneyinde pH 7, 0,01 g/L partikül derişimi, 7 mL/dk akış ve 10 cm yatak derinliğinde bulanıklık ve gravimetrik yöntemlerle sırasıyla %93,75 ve %93,07 giderim ölçülmüştür. Uzun süreli işletmede bloklama ve kek filtrasyonuna bağlı tıkanma görülmüştür (Hanif et al., 2025). Bu nedenle yüksek başlangıç verimi, işletme ömrü ve bakım gereksinimiyle birlikte değerlendirilmelidir.

Manyetik modifikasyon, özellikle küçük boyutlu partiküllerin gideriminde öne çıkmaktadır (Reddy et al., 2025). Farklı metallerle aktive edilmiş biyokömürün manyetik özelliklerinden yararlanılarak su ortamındaki MP'lerin etkin biçimde adsorbe edilip giderilebildiği belirtilmektedir (Nepal et al., 2023). Demir oksit–biyokömürün yeraltı suyu ve toprakta MP partiküllerini immobilize etmede etkili olduğu, ayrıca oksidasyon sürecini güçlendirerek MP'lerin ağır metaller gibi diğer kirleticilerden ayrılmasını sağladığı raporlanmıştır (Osman et al., 2022). Kuvars kum kolonlarında yapılan bir çalışmada, biyokömür ve Fe_3O_4-biyokömür ilavesinin 0,02 µm, 0,2 µm ve 2 µm boyutlarındaki plastik partiküllerin taşınımını azaltıp tutulmasını artırdığı; Fe_3O_4-biyokömürün taşınımı biyokömürden daha etkili biçimde engellediği bulunmuştur. Bu etki, katkının ortamın yüzey pürüzlülüğünü artırmasına ve zeta potansiyelini değiştirmesine bağlanmıştır. Yoğun yağış koşullarını simüle eden elüsyon sonrasında partikül kopma oranları kuvars kumda %16,5, biyokömür katkılı kumda %14,6 ve Fe_3O_4-biyokömür katkılı kumda %7,5 olarak ölçülmüş; Fe_3O_4-biyokömürün %74'ünden fazlasının mıknatıs kullanılarak geri kazanılabildiği ve plastik partiküllerin %87'sinin 10 mM NaOH çözeltisiyle desorbe edilebildiği gösterilmiştir (Tong et al., 2020).

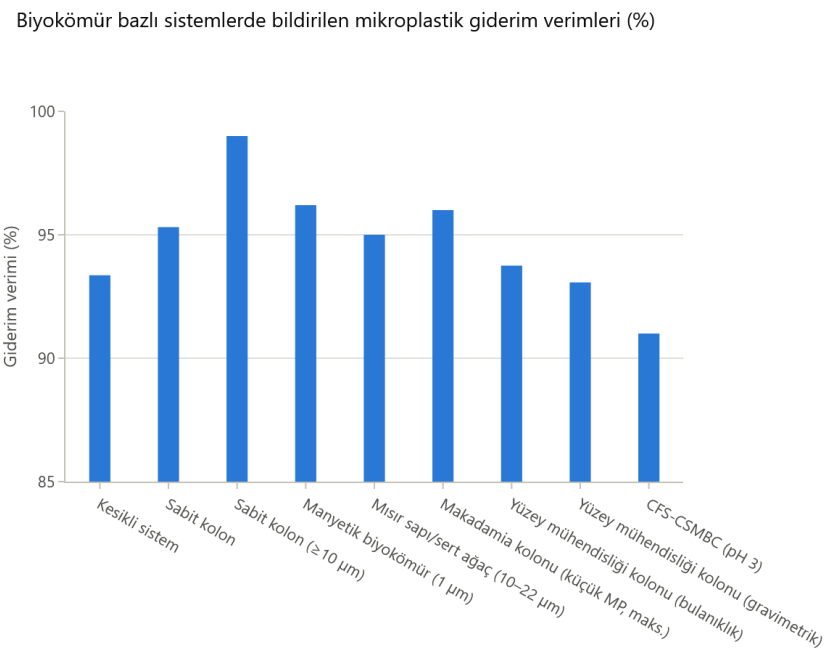
Kitin modifikasyonu manyetik Hindistan cevizi kabuğu biyokömürünün maksimum PS kapasitesini 1,98'den 4,75 mg/g'a yükseltmiştir (Kapoor et al., 2025). Polimer kaplı manyetik biyokömür–zeolit kompozitinde 2 ve 15 µm PS için 736 ve 769 mg/g bildirilmiştir (Babalar et al., 2023). Farklı malzeme ve deney koşulları nedeniyle bu değerler doğrudan karşılaştırılamaz; adsorpsiyon kapasitesi ile giderim yüzdesi ayrı göstergelerdir.

Çizelge 5. Biyokömür bazlı sistemlerde bildirilen mikroplastik/nanoplastik giderim verimleri

Sistem / malzeme	**Hedef partikül**	**Giderim verimi / kapasitesi**	**Kaynak**
Kesikli sistem	MP (genel)	%93,36 ± 4,92	(Dang et al., 2025)
Sabit kolon	MP (genel)	%95,31 ± 5,26	(Dang et al., 2025)
Sabit kolon	≥10 µm MP	%99	(Dang et al., 2025)
Manyetik olarak modifiye edilmiş biyokömür	1 µm'ye kadar MP	%96,2	(Dang et al., 2025)
Mısır sapı / sert ağaç biyokömürü (filtrasyon)	10–22 µm MP	>%95	(Nepal et al., 2023)
Makadamia kabuğu biyokömürü (kolon)	50–100 ve 100–300 µm PE	>%78; küçük MP'de maks. %96	(Changlor et al., 2025)
Yüzey mühendisliği uygulanmış biyokömür (kolon)	MP ve NP	%93,75 (bulanıklık) / %93,07 (gravimetrik)	(Hanif et al., 2025)
Kitosan modifiyeli manyetik biyokömür	PS MP (80 mg/L)	%91	(Kapoor et al., 2025)
PMACZ (polimer kaplı manyetik kompozit)	2 µm / 15 µm PS	736 / 769 mg/g kapasite	(Babalar et al., 2023)

Kaynaklar: (Dang et al., 2025); (Nepal et al., 2023); (Changlor et al., 2025); (Hanif et al., 2025); (Kapoor et al., 2025); (Babalar et al., 2023)

Şekil 5. Farklı biyokömür bazlı sistemlerde bildirilen mikroplastik giderim verimlerinin karşılaştırması



Kaynak: (Dang et al., 2025)

Yeniden kullanımda yapısal değişimler ve fonksiyonel grup kayıpları performansı sınırlayabilir (Shrivastava et al., 2024). Rejenerasyonun değerlendirilmesi; her döngüde giderim, malzeme kaybı ve kimyasal tüketimini kapsamalıdır. Partiküllerin sudan adsorbana aktarılması, kullanılmış malzemenin güvenli yönetimiyle tamamlanmalıdır.

Toprak Sistemlerinde Etkilerin Azaltılması

Toprakta biyokömürün etkisi, MP tutulmasının yanında agregat stabilitesi, gözeneklilik, nem, pH ve besin koşullarının değişmesiyle ilişkilidir. Yanıt, biyokömür özellikleri kadar tekstür ve organik maddeye de bağlıdır (Ji et al., 2025). Derlenen

çalışmalarda verim artışı %30–81 aralığında bildirilmiştir (Dang et al., 2025); bu aralık her toprak için beklenen artış olarak yorumlanmamalıdır.

Deneysel kanıtlar, BC'nin verim üzerindeki olumlu etkisini de göstermektedir. Yapılan bir bibliyometrik analizde, yüksek MP kirlilik düzeylerinde dahi biyokömürün ürün verimini %30–81 oranında artırdığı; ayrıca Olsen-P yarayışlılığını %46,6, mikroagregatlardaki toprak organik karbonunu %35,7 oranında artırdığı raporlanmıştır (Dang et al., 2025). Aynı çalışmada, biyokömürün Subgroup 10, Bacillus ve Pseudomonas gibi faydalı mikroorganizmaları destekleyerek antibiyotik direnç genlerini azalttığı bildirilmiştir (Dang et al., 2025).

Toprak faunasının MP maruziyetinde oksidatif strese duyarlı hâle gelebildiği, yer fıstığı kabuğu biyokömürünün ise MP hareketliliğini azaltabildiği bildirilmiştir. Derlemede, biyokömür ilavesiyle solucan bağırsağındaki baskın bakteri gruplarının göreli bolluğunun ve bakteri kopya sayısının (%21,59) arttığı aktarılmıştır (Cui et al., 2023). Bu göstergeler, organizma düzeyindeki etkilerin yalnızca topraktaki partikül sayısıyla açıklanamayacağını göstermektedir.

Toprak Özellikleri ve Biyolojik Etkiler

Biyokömürün sağladığı faydayı doğru değerlendirmek için, MP'lerin toprakta yol açtığı bozulmaların ayrıntılı biçimde anlaşılması gerekmektedir. MP'lerin toprak fiziksel özellikleri üzerindeki etkileri, beş haftalık bir saksı denemesinde dört farklı MP türü (poliakrilik lifler, poliamid boncuklar, polyester lifler ve polietilen fragmanlar) ile çevresel açıdan ilgili konsantrasyonlarda (%2'ye kadar) test edilmiş; MP'lerin hacim ağırlığı, su tutma kapasitesi ve mikrobiyal aktivite ile suya dayanıklı agregalar

arasındaki işlevsel ilişkiyi etkilediği gösterilmiştir (Machado et al., 2018).

MP etkileri polimer, boyut, doz ve tekstüre göre değişir. Polipropilenin %6'ya kadar uygulandığı deneylerde doygun hidrolik iletkenlik tın, kil ve kumda sırasıyla %69,79, %77,11 ve %95,79 azalmıştır (Guo et al., 2022). Buna karşılık bazı deneylerde belirgin fiziksel değişim yalnızca yüksek derişimlerde görülmüştür (Yu et al., 2023). Çizelge 6, bu koşul farklılıklarını koruyarak fiziksel ve hidrolojik bulguları karşılaştırır. Yüksek deneysel dozlardan olağan tarla koşullarına doğrudan genelleme yapılmamalıdır.

Biyobozunur ve geleneksel MP'lerin etkileri de farklılaşmaktadır. Sekiz aylık bir sera denemesinde, ağırlıkça %1 oranında nişasta esaslı MP veya PBAT ilavesinin kumlu-tın topraklarda su tutmayı anlamlı biçimde artırarak yarayışlı su içeriğini yaklaşık %5 oranında yükselttiği; buna karşın %1 LDPE'nin siltli-killi-tın toprakta yarayışlı su içeriğini bir miktar azalttığı bildirilmiştir (Špela et al., 2025). Malç filmi kaynaklı makroplastik ve mikroplastik kalıntıların ise hacim ağırlığı, gözeneklilik, doygun hidrolik iletkenlik, tarla kapasitesi ve su iticiliği anlamlı biçimde değiştirdiği; pH, elektriksel iletkenlik ve agregat stabilitesinin ise belirgin biçimde etkilenmediği tespit edilmiştir (Qi et al., 2020).

Çizelge 6. Mikroplastiklerin toprak fiziksel ve hidrolojik özellikleri üzerindeki etkileri

Özellik	**Gözlenen etki**	**Koşul**	**Kaynak**
Hacim ağırlığı, su tutma kapasitesi, agregalar	MP'ler bu özellikleri ve mikrobiyal aktivite–agregat ilişkisini etkiledi	%2'ye kadar, dört MP türü	(Machado et al., 2018)

Özellik	Gözlenen etki	Koşul	Kaynak
Doygun hidrolik iletkenlik	Sırasıyla %69,79 / %77,11 / %95,79 azalma	Tın / kil / kum; 20–500 µm PP; %6'ya kadar	(Guo et al., 2022)
Hacim ağırlığı ve su tutma kapasitesi	Eşik konsantrasyonlarda anlamlı değişiklik	%0,5 poliester lifi; %2 PP granülü	(Yu et al., 2023)
Yarayışlı su içeriği	%1 nişasta esaslı MP/PBAT ile ~%5 artış; %1 LDPE ile hafif azalma	Kumlu-tın / siltli-killi-tın	(Špela et al., 2025)
Hacim ağırlığı, gözeneklilik, Ks, tarla kapasitesi, su iticiliği	Anlamlı değişim; pH ve agregat stabilitesi etkilenmedi	Malç filmi kalıntısı; %0–2 (w/w)	(Qi et al., 2020)

Kaynaklar: (Machado et al., 2018); (Guo et al., 2022); (Yu et al., 2023); (Špela et al., 2025); (Qi et al., 2020)

%1 LDPE ile kirletilmiş toprakta %5 biyokömürün iki nem rejiminde 100 gün incelendiği çalışmada, bazı ürünler pH ve elektriksel iletkenliği artırmış; enzim ve mikrobiyal yanıt ise tutarlı olmamıştır. Düşük nem, biyokömüre rağmen enzim aktivitesi ve bakteriyel zenginliği azaltabilmiştir (Dissanayake et al., 2022). Bu sonuç, biyokömürün uygun nem koşullarının yerini tutmadığını göstermektedir.

Akçaağaç biyokömürüyle ön koşullandırma, nanoplastiklerin etkin derişimini ve bakteri yüzeylerini kaplamasını azaltmış; Pseudomonas defensor'un planktonik ve biyofilm büyümesini 100 µg/mL'ye kadar nanoplastik derişimlerinde iyileştirmiştir (Pérez-Soto et al., 2025). Çizelge 7 toprak ve biyolojik

sistemlerdeki kanıtları birleştirir. Bu tür kontrollü sonuçların bitki–toprak sistemi ve saha ölçeğinde ayrıca doğrulanması gerekir.

Çizelge 7. Toprak sistemlerinde biyokömür uygulamalarının mikroplastik bağlamındaki etkileri

Uygulama / malzeme	**Gözlenen etki**	**Kaynak**
Biyokömür (genel)	Toprak kimyasının düzenlenmesi, mikrobiyal çeşitliliğin ve verimin artması	(Dang et al., 2025)
Biyokömür (genel)	Agregaların stabilizasyonu, gözeneklilik ve nem tutmanın iyileştirilmesi, pH ve besin düzenlenmesi	(Ji et al., 2025)
OSR 550/700 biyokömürü (%5)	pH 8,53–8,81 ve EC 0,51–0,58 dS/m artışı (her iki nem rejiminde)	(Dissanayake et al., 2022)
SWP 700 biyokömürü	Enzim aktivitesi ile bakteriyel çeşitlilik ve eşitlik artışı	(Dissanayake et al., 2022)
Yer fıstığı kabuğu biyokömürü	MP'lerin toprak matrisi içindeki hareket kabiliyetinin azalması	(Cui et al., 2023)
Biyokömür (genel)	Solucan bağırsağında bakteri kopya sayısında %21,59 artış	(Cui et al., 2023)
Biyokömür (genel)	LDPE kaynaklı mikrobiyal ve fonksiyonel gen baskılanmasının hafifletilmesi	(Jin et al., 2022)
Akçaağaç biyokömürü	Nanoplastik toksisitesinin azalması; *P. defensor* büyümesinin iyileşmesi (100 µg/mL'ye kadar)	(Pérez-Soto et al., 2025)

Kaynaklar: (Dang et al., 2025); (Ji et al., 2025); (Dissanayake et al., 2022); (Cui et al., 2023); (Jin et al., 2022); (Pérez-Soto et al., 2025)

Birlikte Bulunan Kirleticiler

MP'ler ağır metaller ve organik kirleticilerle birlikte bulunabilir. Biyokömürün sorpsiyon ve mikrobiyal yüzey sağlama işlevleri bu ortak kirlenmedeki etkileşimleri de değiştirebilir (Osman et al., 2022). Dolayısıyla tek kirleticili deneylerdeki başarı, karışımlardaki davranışı açıklamak için yeterli değildir; kirletici taşınımı ve biyoyararlanımı birlikte izlenmelidir.

MP ve biyokömürün bir arada bulunduğu sistemlerde, topraktaki çözünmüş organik madde dinamiği ve kirletici giderimi üzerinde karmaşık etkileşimler ortaya çıkmaktadır. PAH ile kirlenmiş toprakta MP fragmanları ile biyokömürün birlikte etkisinin incelendiği bir çalışmada, toprak DOM'unun ve bileşenlerinin plastik fragmanları ile biyokömür kombinasyonuna tepkisi, PAH ve fitalat esterlerinin giderimi ve olası mikrobiyal ekolojik mekanizmalar araştırılmıştır (Ren et al., 2021). MP'lerin toprağa girmesiyle düşük aromatiklikteki labil DOM bileşenlerinin parçalanıp dönüştürüldüğü; bunun sonucunda aromatiklik ve oksidasyon derecesinin arttığı, moleküler çeşitliliğin azaldığı ve DOM'un azot ile kükürt içeriğinin değiştiği bildirilmiştir. Polilaktik asit MP'lerinden salınan DOM'da tereftalat, asetat, oksalat ve L-laktat; polietilen MP'lerinden salınan DOM'da ise 4-nitrofenol, propanoat ve nitrat, toprak mikrobiyomları için başlıca kullanılabilir moleküller olarak tanımlanmıştır (Qiu et al., 2024).

Tartışma

Su sistemlerinde hedef, partikülleri akıştan ayırmak; toprakta ise hareketlilik ve biyolojik etkileri azaltmaktır. Bu iki amaç aynı göstergeyle değerlendirilmemelidir. Kolon verimi partikül boyutu ve akışa, toprak yanıtı ise malzeme–tekstür–nem ilişkisine bağlıdır (Changlor et al., 2025) (Ji et al., 2025). Bu nedenle uygulama seçimi, hedeflenen çevresel sonucun açık tanımıyla başlamalıdır.

Sınırlayıcı Faktörler ve Riskler

Yaşlanma, biyokömürün iklim ve toprak işlevlerini değiştirebilir. On yıllık biyokömürün incelendiği 91 günlük inkübasyonda polietilenin birlikte bulunması, biyokömürün CO_2 azaltım etkisini zayıflatmış ve mikrobiyal nekromas karbonunun stabilizasyonunu azaltmıştır (Chen et al., 2025). MP tutulmasının bütün çevresel işlevlerde iyileşme sağlayacağı varsayılmamalıdır. Çizelge 8 temel sınırlamalarla önerileri özetler.

Çizelge 8. Biyokömür temelli mikroplastik kontrolünde sınırlayıcı faktörler ve öneriler

Sınırlayıcı faktör	**Kanıt**	**Öneri**
Mikroskobik BC–MP etkileşimlerinin yetersiz anlaşılması	Bilgi boşluğu (Ji et al., 2025)	Mekanizma odaklı, moleküler düzeyde karakterizasyon
Saha ölçeğinde uygulama eksikliği	Bilgi boşluğu (Ji et al., 2025)	Uzun süreli saha denemeleri ve izleme programları
Yaşlanma ve MP kaynaklı performans kaybı	CO_2 azaltım etkinliğinde %44–82 zayıflama (Chen et al., 2025)	Yaşlanma süreçlerinin modellenmesi; MP'nin iklim faktörü olarak dâhil edilmesi
Nem/koşul bağımlılığı	Düşük nemde enzim aktivitesi ve bakteriyel zenginlikte azalma (Dissanayake et al., 2022)	Koşula özgü doz ve biyokömür tipi seçimi
Performans değişkenliği ve standart yöntem eksikliği	Değişkenlik ve yöntem boşluğu (Anuwa-Amarh et al., 2024)	Standart test protokollerinin geliştirilmesi
Rejenerasyon sırasında yapısal bozulma	Fonksiyonel grup kaybı (Shrivastava et al., 2024)	Dayanıklı, yeniden kullanılabilir malzeme tasarımı

Sınırlayıcı faktör	Kanıt	Öneri
Maliyet ve ölçeklenebilirlik	Ekonomik ve sosyoekonomik engeller (Osman et al., 2022)	Tedarik zinciri optimizasyonu ve politika desteği

Kaynaklar: (Ji et al., 2025); (Chen et al., 2025); (Dissanayake et al., 2022); (Anuwa-Amarh et al., 2024); (Shrivastava et al., 2024); (Osman et al., 2022)

Ölçek Büyütme ve Ekonomi

Ölçek büyütmede üretim, taşıma, uygulama, rejenerasyon ve kullanılmış malzeme yönetimi birlikte maliyetlendirilmelidir. Teknik ve sosyoekonomik engeller, laboratuvar başarısının yaygın uygulamaya dönüşmesini sınırlamaktadır (Osman et al., 2022). Yerel hammaddeye erişim, ürün kalitesi ve işletme gereksinimleri tanımlanmadan biyokömürün ekonomik üstünlüğü kabul edilmemelidir. Karar, birim malzeme fiyatından ziyade hedeflenen çevresel kazanımın toplam maliyetine dayanmalıdır.

Ekonomik uygulanabilirlik açısından, biyokömür üretim sistemlerinin genellikle saatte 9 ton besleme hızının üzerinde (yaklaşık 45 MW kapasite veya daha büyük) 450 °C'nin üzerindeki piroliz sıcaklıklarında ya da saatte 6 tonun üzerinde (yaklaşık 30 MW kapasite veya daha büyük) 550 °C'nin üzerindeki sıcaklıklarda pozitif net bugünkü değere ulaştığı belirtilmektedir (Tisserant et al., 2021). Biyokömür ve biyoenerjiyi birlikte üreten entegre stratejilerin, biyokömürün verim üzerindeki olumlu etkisi olduğunda basit biyoenerji sistemlerinden daha yüksek net bugünkü değer sağladığı da raporlanmaktadır (Tisserant et al., 2021).

Biyokömürün ticari tarla ve yem bitkisi üretiminde çekici bir seçenek olabilmesi için, toprak kalitesini iyileştirerek diğer tarımsal girdilerin maliyetini düşürmek ve/veya verimi artırmak gibi somut ekonomik faydalar sunması gerekmektedir; bununla birlikte biyokömürün çiftliklerde uygulanması hektar başına binlerce dolara mal olabilmektedir (Ejack et al., 2021). Çiftlik ölçeğinde uygulama,

çiftçilerin tarım ekipmanlarında değişiklik yapmasını gerektirebilmektedir (Ejack et al., 2021).

Bilgi Boşlukları ve Gelecek Araştırma Yönelimleri

Öncelikler; uzun süreli saha doğrulaması, yaşlanma ve yeniden salımın izlenmesi, standart ölçüm yöntemleri ve rejenerasyonun değerlendirilmesidir (Ji et al., 2025) (Shrivastava et al., 2024). Çalışmalar partikül sayısıyla kütleyi, tutulmayla bozunmayı ve laboratuvar verimiyle saha etkinliğini ayrı raporlamalıdır. Kontrol grupları, gerçekçi dozlar ve ortak performans ölçütleri, sonuçların karşılaştırılabilirliğini güçlendirecektir.

Sonuç

Biyokömür, su sistemlerinde adsorpsiyon ve filtrasyon; toprakta ise partikül hareketliliğinin olumsuz etkilerinin hafifletilmesi açısından umut vericidir. Ancak etkinlik, malzeme özellikleri ve çevresel koşullara bağlıdır. Sürdürülebilir uygulama için yüksek tekil giderim oranları kadar uzun dönemli kararlılık, yeniden kullanım, ikincil riskler ve ekonomik uygulanabilirlik de gösterilmelidir. Laboratuvar bulgularını standartlaştırılmış saha denemeleriyle birleştirmek, güvenilir bir uygulama kararı için temeldir.

Üretken Yapay Zekâ Kullanım Beyanı: Bu çalışmanın hazırlanması sürecinde, TÜBİTAK'ın Destek Süreçlerinde Üretken Yapay Zekânın (ÜYZ) Sorumlu ve Güvenilir Kullanımı Rehberinde belirtilen ilkeler doğrultusunda, yalnızca dil bilgisi, akademik anlatım ve metin akışının iyileştirilmesi amacıyla büyük dil modellerinden (Large Language Models, LLM) yararlanılmıştır. Çalışmanın bilimsel içeriği, yorumları, kaynakların doğrulanması ve nihai metnin kontrolü yazar tarafından yapılmıştır.

Kaynakça

Akça, M. O. (2025). Microplastic accumulation in soils around open dumping and scrapyard sites in Türkiye. *Soil Use and Management, 41*(1). https://doi.org/10.1111/sum.70021

Anuwa-Amarh, N. A., Dizbay-Onat, M., Venkiteshwaran, K., & Wu, S. (2024). Carbon-Based Adsorbents for Microplastic Removal from Wastewater. *Materials, 17*(22), 5428. https://doi.org/10.3390/ma17225428

Aydın, S., Mucevher, O., Ulvi, A., Bedük, F., Aydın, M. E., Merken, Ö., & Uzun, C. (2025). Effects of long-term wastewater irrigation on microplastics pollution in agricultural soil. *Environmental Science and Pollution Research*, *32*(20), 12340–12359. https://doi.org/10.1007/s11356-025-36452-x

Babalar, M., Siddiqua, S., & Sakr, M. A. S. (2023). A novel polymer coated magnetic activated biochar-zeolite composite for adsorption of polystyrene microplastics: Synthesis, characterization, adsorption and regeneration performance. *Separation and Purification Technology, 331*, 125582. https://doi.org/10.1016/j.seppur.2023.125582

Boots, B., Russell, C. W., & Green, D. S. (2019). Effects of Microplastics in Soil Ecosystems: Above and Below Ground. *Environmental Science & Technology, 53*(19), 11496–11506. https://doi.org/10.1021/acs.est.9b03304

Brahney, J., Hallerud, M., Heim, E., Hahnenberger, M., & Sukumaran, S. (2020). Plastic rain in protected areas of the United States. *Science*, *368*(6496), 1257–1260. https://doi.org/10.1126/science.aaz5819

Büks, F., & Kaupenjohann, M. (2020). Global concentrations of microplastics in soils – a review. *SOIL*, *6*(2), 649–662. https://doi.org/10.5194/soil-6-649-2020

Changlor, N., Inchana, C., Sabar, M. A., Suyamud, B., & Lohwacharin, J. (2025). Effects of relative microplastic–biochar sizes and biofilm formation on fragmental microplastic retention in biochar filters. *Environmental Research*, *268*, 120834. https://doi.org/10.1016/j.envres.2025.120834

Chen, Y., Wang, Z., Zhang, A., Li, Y., Sun, K., Jiang, C., Gunina, A., Aloufi, A. S., Liang, X., Han, Z., Xiao, Y., Zhang, Y., Du, Z., Zhu, S., & Kuzyakov, Y. (2025). Polyethylene microplastics hamper aged biochar's potential in mitigating greenhouse gas emissions. *Carbon Research*, *4*(1). https://doi.org/10.1007/s44246-024-00170-9

Cui, J., Jiang, J., Chang, E., Zhang, F., Guo, L., Fang, D., Xu, R., & Wang, Y. (2023). Underlying reasons and factors associated with changes in earthworm activities in response to biochar amendment: a review. *Biochar*, *5*(1). https://doi.org/10.1007/s42773-023-00287-x

Dang, T. M. T., Huynh, T. T., Chang-Chien, G., & Bui, H. M. (2025). The role of biochar in combating microplastic pollution: a bibliometric analysis in environmental contexts. *Beilstein Journal of Nanotechnology*, *16*, 1401–1416. https://doi.org/10.3762/bjnano.16.102

Dissanayake, P. D., Palansooriya, K. N., Sang, M. K., Oh, D. X., Park, J., Hwang, S. Y., Igalavithana, A. D., Gu, C., & Ok, Y. S. (2022). Combined effect of biochar and soil moisture on soil chemical properties and microbial community composition in microplastic-contaminated agricultural soil. *Soil Use and Management*, *38*(3), 1446–1458. https://doi.org/10.1111/sum.12804

Ejack, L., Whalen, J. K., Major, J., & Husk, B. (2021). Biochar application on commercial field crops using farm-scale equipmen. *Canadian Biosystems Engineering*, *63*(1). https://doi.org/10.7451/cbe.2021.63.6.1

Guo, Z., Li, P., Yang, X., Wang, Z., Lu, B., Chen, W., Wu, Y., Li, G., Zhao, Z., Liu, G., Ritsema, C. J., Geissen, V., & Xue, S. (2022). Soil texture is an important factor determining how microplastics affect soil hydraulic characteristics. *Environment International*, *165*, 107293. https://doi.org/10.1016/j.envint.2022.107293

Hanif, M. A., Ibrahim, N., Dahalan, F. A., Ali, U. F. M., Azhari, A. W., Hasan, M., Lutpi, N. A., & Isa, M. H. (2025). Control of Microplastics and Nanoplastics Discharge via Biochar-Based Filtration: Optimization Using Central Composite Design (CCD) and Identification of Column Fouling Mechanism. *Environmental Quality Management*, *34*(4). https://doi.org/10.1002/tqem.70098

Ji, H., Zhou, C. Y., & Pan, L. (2025). Applications of biochar in the remediation of soil microplastic pollution: A review. *Soil Science Society of America Journal*, *89*(3). https://doi.org/10.1002/saj2.70078

Jin, B., Liu, X., Roux, X. L., Bi, Q.-F., Li, K., Wu, C., Sun, C., Zhu, Y., & Lin, X. (2022). Biochar addition regulates soil and earthworm gut microbiome and multifunctionality. *Soil Biology and Biochemistry*, *173*, 108810. https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2022.108810

Kapoor, R. T., Rafatullah, M., Vashisht, A., Alam, M., & Siddiqui, M. R. (2025). Chitosan-assisted magnetic coconut shell biochar for polystyrene microplastic removal: Mechanism and reusability. *Environmental Progress & Sustainable Energy*. https://doi.org/10.1002/ep.70202

Kedzierski, M., Cirederf-Boulant, D., Palazot, M., Yvin, M., & Bruzaud, S. (2023). Continents of plastics: An estimate of the stock of microplastics in agricultural soils. *The Science of The Total Environment*, *880*, 163294. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.163294

Kumar, M., Xiong, X., He, M., Tsang, D. C. W., Gupta, J., Khan, E., Harrad, S., Hou, D., Ok, Y. S., & Bolan, N. (2020). Microplastics as pollutants in agricultural soils. *Environmental Pollution*, *265*, 114980. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114980

Lwanga, E. H., Bériot, N., Corradini, F., Silva, V., Yang, X., Baartman, J., Rezaei, M., Schaik, L. van, Riksen, M., & Geissen, V. (2022). Review of microplastic sources, transport pathways and correlations with other soil stressors: a journey from agricultural sites into the environment. *Chemical and Biological Technologies in Agriculture*, *9*(1). https://doi.org/10.1186/s40538-021-00278-9

Machado, A. A. de S., Lau, C. W., Till, J., Kloas, W., Lehmann, A., Becker, R., & Rillig, M. C. (2018). Impacts of Microplastics on the Soil Biophysical Environment. *Environmental Science & Technology*, *52*(17), 9656–9665. https://doi.org/10.1021/acs.est.8b02212

Maqbool, A., Soriano, M., & Gómez, J. A. (2023). Macro- and micro-plastics change soil physical properties: a systematic review. *Environmental Research Letters*, *18*(12), 123002. https://doi.org/10.1088/1748-9326/ad0a1a

Nepal, J., Ahmad, W., Munsif, F., Khan, A., & Zou, Z. (2023). Advances and prospects of biochar in improving soil fertility, biochemical quality, and environmental applications. *Frontiers in Environmental Science, 11*. https://doi.org/10.3389/fenvs.2023.1114752

Olubusoye, B. S., Cizdziel, J. V., Wontor, K., Heinen, E., Grandberry, T., Bennett, E. R., & Moore, M. T. (2024). Removal of microplastics from agricultural runoff using biochar: a column feasibility study. *Frontiers in Environmental Science, 12*. https://doi.org/10.3389/fenvs.2024.1388606

Osman, A. I., Fawzy, S., Farghali, M., El-Azazy, M., Elgarahy, A. M., Fahim, R. A., Maksoud, M. I. A. A., Ajlan, A. A., Yousry, M., Saleem, Y., & Rooney, D. W. (2022). Biochar for agronomy, animal farming, anaerobic digestion, composting, water treatment, soil remediation, construction, energy storage, and carbon sequestration: a review. *Environmental Chemistry Letters*, *20*(4), 2385–2485. https://doi.org/10.1007/s10311-022-01424-x

Pérez-Soto, F., Cho, Y. H., Setio, T. S., Yu, D., Jia, C. Q., Howe, J. Y., & Sullan, R. M. A. (2025). Biochar pre-conditioning reduces nanoplastic toxicity to plant growth-promoting bacteria. *RSC Advances*, *15*(35), 29003–29012. https://doi.org/10.1039/d5ra02482j

Qi, Y., Bériot, N., Gort, G., Lwanga, E. H., Gooren, H., Yang, X., & Geissen, V. (2020). Impact of plastic mulch film debris on soil physicochemical and hydrological properties. *Environmental Pollution*, *266*, 115097. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.115097

Qiu, X., Ma, S., Pan, J., Cui, Q., Zheng, W., Ding, L., Liang, X., Xu, B., Guo, X., & Rillig, M. C. (2024). Microbial metabolism influences microplastic perturbation of dissolved organic matter in agricultural soils. *The ISME Journal*, *18*(1). https://doi.org/10.1093/ismejo/wrad017

Reddy, C. S. S., S, B. G., & Jeyachandran, S. (2025). From Pollution to Solution: Scalable Approaches to Microplastic Degradation and Sustainability: A Review. *Asian Journal of Chemistry*, *37*(10), 2355–2365. https://doi.org/10.14233/ajchem.2025.34421

Ren, X., Tang, J., Wang, L., & Sun, H. (2021). Combined Effects of Microplastics and Biochar on the Removal of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Phthalate Esters and Its Potential Microbial Ecological Mechanism. *Frontiers in Microbiology*, *12*, 647766. https://doi.org/10.3389/fmicb.2021.647766

Shrivastava, A., Singh, A. K., Gupta, A. K., Jain, H., Kumari, M., Patel, M., & Sharma, P. (2024). Removal of micro- and nano-plastics from aqueous matrices using modified biochar – A review of synthesis, applications, interaction, and regeneration. *Journal of Hazardous Materials Advances*, *16*, 100518. https://doi.org/10.1016/j.hazadv.2024.100518

Singh, E., Kumar, A., Mishra, R., You, S., Singh, L., Kumar, S., & Kumar, R. (2020). Pyrolysis of waste biomass and plastics for production of biochar and its use for removal of heavy metals from aqueous solution. *Bioresource Technology*, *320*, 124278. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.124278

Špela, Ž., Noč, M., Zupanc, V., Lwanga, E. H., Drobne, D., & Pintar, M. (2025). Impact of conventional and biobased microplastics from mulch films on soil bulk density, hydraulic conductivity and water retention in two different soil types under wetting−drying cycles. *Results in Engineering*, *25*, 104455. https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.104455

Tisserant, A., Morales, M., Cavalett, O., O'Toole, A., Weldon, S., Rasse, D. P., & Cherubini, F. (2021). Life-cycle assessment to unravel co-benefits and trade-offs of large-scale biochar deployment in Norwegian agriculture. *Resources Conservation and Recycling*, *179*, 106030. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.106030

Tomczyk, A., Sokołowska, Z., & Boguta, P. (2020). Biochar physicochemical properties: pyrolysis temperature and feedstock kind effects. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, *19*(1), 191–215. https://doi.org/10.1007/s11157-020-09523-3

Tong, M., He, L., & Rong, H. (2020). *Transport Behaviors of Plastic Particles in Saturated Quartz Sand without and with Biochar/Fe3O4-Biochar Amendment*. https://doi.org/10.5194/egusphere-egu2020-21117

Yu, Y., Battu, A. K., Varga, T., Denny, A., Zahid, T. Md., Chowdhury, I., & Flury, M. (2023). Minimal Impacts of Microplastics on Soil Physical Properties under Environmentally Relevant Concentrations. *OSTI OAI (U.S. Department of Energy Office of Scientific and Technical Information)*, *57*(13), 5296–5304. https://doi.org/10.1021/acs.est.2c09822

Zhang, X., Hou, J., Zhang, S., Cai, T., Liu, S., Hu, W., & Zhang, Q. (2024). Standardization and micromechanistic study of tetracycline adsorption by biochar. *Biochar*, *6*(1). https://doi.org/10.1007/s42773-023-00299-7

Zheng, H., Chen, Q., & Chen, Z. (2024). Carbon-based adsorbents for micro/nano-plastics removal: current advances and perspectives. *Water Emerging Contaminants & Nanoplastics*, *3*(2). https://doi.org/10.20517/wecn.2023.74


BİDGE