**GEÇİCİ KAPAK**

*Kapak tasarımı*
*devam ediyor.*

**BİDGE Yayınları**

**Biyosistem Mühendisliği Alanında Güncel Çalışmalar**

**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

# İÇİNDEKİLER

TARIMSAL ROBOTLARDA DİJİTAL İKİZ: MODELLEME, SANAL DEVREYE ALMA VE DOĞRULAMA YAKLAŞIMLARI ..... 1
*OSMAN ECEOĞLU, İLKER ÜNAL*

TARIMSAL MEKANİZASYONDA NESNELERİN İNTERNETİ (IOT) VE UYGULAMALARI ..... 22
*HAMZA KUZU*

BOYA DEGRADASYONU VE ATIK SULARDA TOHUM ÇİMLENMESİ ..... 54
*BEYHAN TAHTA, FERUDUN KOÇER*

EFFECTS OF COMPOST APPLICATIONS ON SOIL NITROGEN MINERALIZATION AND NUTRIENT CYCLING ..... 90
*ZEMZEM FIRAT*

BIOFUEL PRODUCTION FROM INDUSTRIAL CROPS: POTENTIAL, TECHNOLOGIES, AND SUSTAINABILITY .. 106
*SUAT CUN*

TARIMSAL SULAMA YÖNETİMİNDE UZAKTAN ALGILAMA VE COĞRAFİ BİLGİ SİSTEMLERİ: YÖNTEMLER, UYGULAMALAR VE SINIRLILIKLAR ..... 123
*UMUT MUCAN*

Biyokömürün Mikroplastik Kirliliğinin Kontrolündeki Potansiyeli: Toprak ve Su Sistemleri Üzerine Bir Değerlendirme ..... 148
*ALPERAY ALTIKAT*

ANAEROBİK ÇÜRÜTME SİSTEMLERİNDE BİYOKÖMÜRÜN BİYOGAZ ÜRETİMİNE ETKİLERİ ..... 178
*ALPERAY ALTIKAT*

# BÖLÜM 1

# 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).

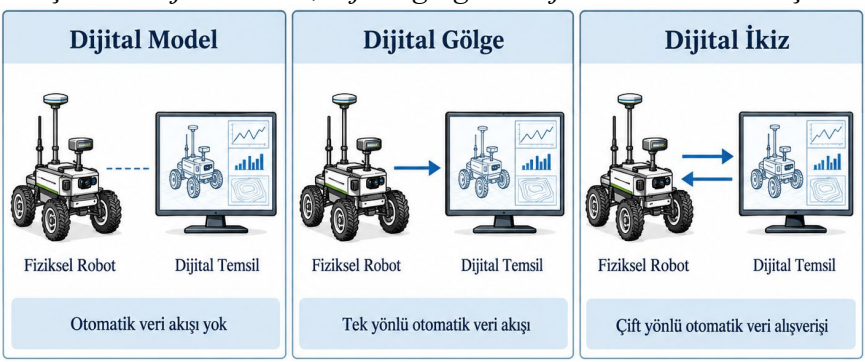
Dijital ikiz mimarisinde ise fiziksel robottan toplanan veriler eş zamanlı ve otomatik olarak dijital modele işlenir. Benzer şekilde, sanal ortamda üretilen görev veya kontrol komutları da fiziksel robota otomatik aktarılır. Platformun bu komutlara gösterdiği fiziksel tepkilerin yeniden sanal modele 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).

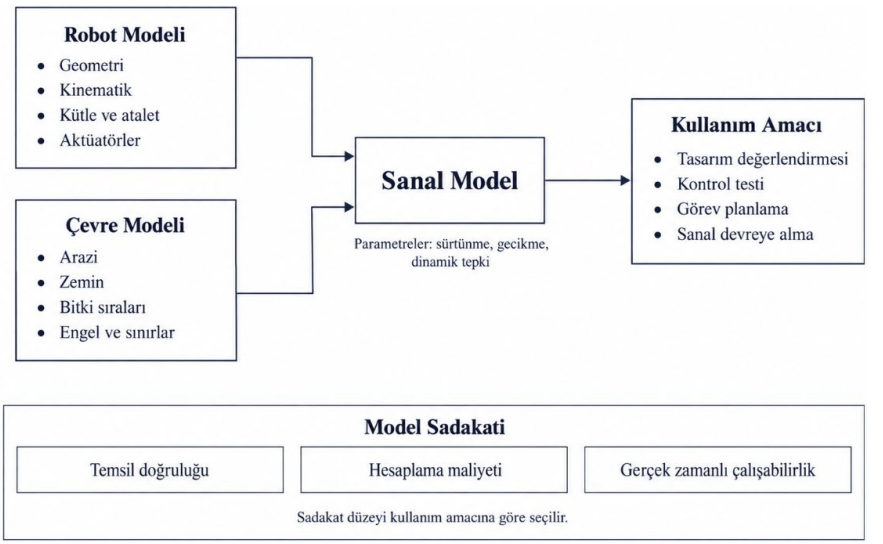
Model sadakati, sanal temsilin fiziksel sistemdeki incelenen özellikleri hedeflenen kullanım amacı doğrultusunda ne derece yansıttığını ifade eder. Söz konusu kavramı yalnızca üç boyutlu modelin görsel gerçekçiliğine indirgemek doğru değildir. Nitekim modelin; robotun hareketini sınırlayan fiziksel kısıtları, 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).

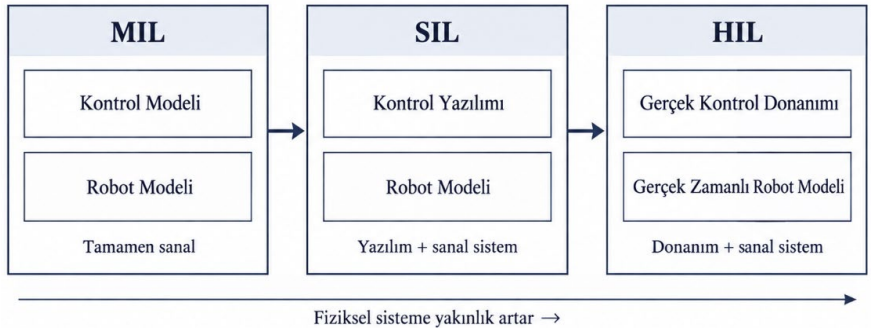
Tarımsal robotlar açısından HIL, sanal ortamda geliştirilen kontrol ve görev yürütme yapılarının gerçek donanımla etkileşimini kontrollü koşullarda incelemek için önemli bir geçiş aşaması oluşturmaktadır. Hidroponik seralarda ekim gerçekleştiren çift kollu otonom bir robot için geliştirilen güncel dijital 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).

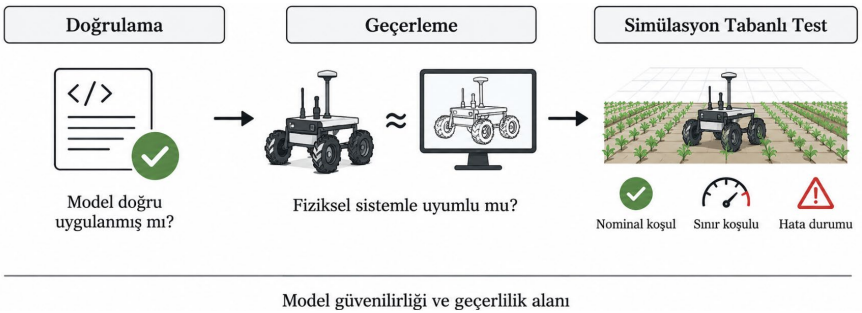
Sanal ortam simülasyonlarında yalnızca robotun tipik işletme şartlarındaki performansını incelemek kâfi gelmez. Çevre koşullarındaki oynamalar, aşırı sınır durumlar ve olası donanım arızaları da test prosedürlerine eklenmelidir. Buna karşın senaryo sayısını artırmak, sistemin tüm kritik fonksiyonlarının 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.

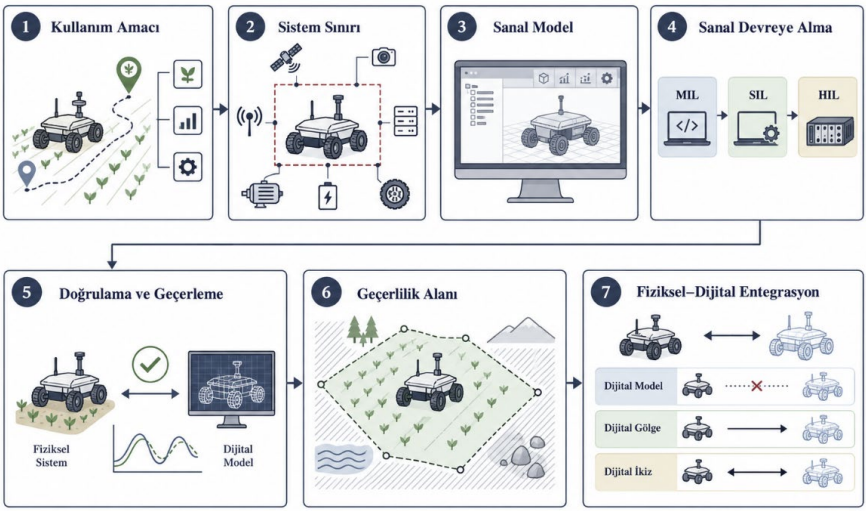
Sanal modelin inşası tamamlandıktan sonra, fiziki robota geçilmeden önce kontrol kodlarının ve sistem bileşenlerinin hangi test evresinden geçirileceği kararlaştırılmalıdır. Bu süreçte MIL, SIL veya HIL tekniklerinden hangisinin tercih edileceği; denenecek işlevsel özelliklere ve gerçek kontrol donanımının 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 2

# 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

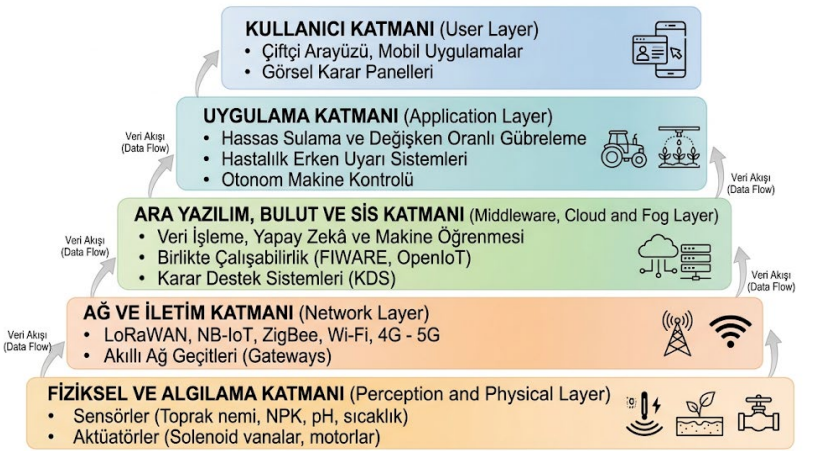
### 2.1. Katmanlı Sistem Mimarisi

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 3

# BOYA DEGRADASYONU ve ATIK SULARDA TOHUM ÇİMLENMESİ

**BEYHAN TAHTA[1]**
**FERUDUN KOÇER[2,3]**

## Giriş

Günümüz dünyasında artan su ihtiyacını karşılamak için alternatif yollar aranmaktadır. Bu sorunun giderilmesi için çevreye herhangi bir zarar vermeden fotokatalitik mekanizma yoluyla su arıtımında etkili bir katalizörlerin geliştirilmesi için çeşitli araştırmalar yapılmaktadır.

$CeO_2$-NPs/GO/PAM hidrojeli geri kazanımı ve yeniden kullanılabilirliği dokuzuncu döngüde, metilen mavisi fotokatalitik bozunmasını %75'i azalttı (Kalaycıoğlu et al., 2023).

[1] Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Kimya Bölümü, Orcid: 0000-0001-9767-5394
[2] Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Biyomühendislik ve Bilimleri ABD, Orcid: 0000-0002-8749-7106
[3] Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, ÜSKİM

AgNPs nanopartiküller tekstil atık suyundan temiz su elde etmek için Asit Kırmızı 37' nin fotokatalitik aktivitesinin yüzde giderimi Beer-Lambert yasasına göre hesaplandı (Elbadawy et al., 2023).

Fotokatalizde geri dönüştürülebilirlik çalışmaları, fotokatalizörün katalitik aktivitesini önemli ölçüde kaybetmeden birden fazla yeniden kullanılabilme yeteneğini belirlemeyi amaçlar. Reaktif sarı-145' in bozunması TiFEBC1' in geri kazanım ve yeniden kullanımı optimum koşullar altında gerçekleştirildi ve on ardışık bozunma deneyi döngüsünden sonra katalitik aktivitedeki azalma yaklaşık %5' tir. Bu durum TiFEBC1' in, iyi bir kararlılık ve geri kazanım için yüksek performans sergiledi (Kenda et al., 2024). Luan ve Liu 2026 yılında yaptıkları çalışmada; Parlak yeşil (BLG) boyasının bozunmasında Z-şemalı $Ho_2BiNbO_7/ZnBiTmO_4$ heteroeklem (HZ) fotokatalizörü kullanılarak BLG'nin bozunma oranda %99,47 oranında yüksek verim elde ettiler (Luan and Liu, 2026).

CuO NPs (Shkir et al., 2025); MgO NPs (Kumar et al., 2022); $\alpha$-$Fe_2O_3$ NPs (Goudjil et al., 2024); $TiO_2$ NPs (Verma et al., 2023); $ZnS/rGO/g\text{-}C_3N_4$ (Shyagathur et al., 2025); $ZnO/Co_3O_4$ (Asim et al., 2026); $g\text{-}C_3N_4/CoFe_2O_4$ (Weldekirstos et al., 2024); ZnO/rGO (Bekele et al., 2025); $Mn\text{-}ZnO/g\text{-}C_3N_4$ (Saqib et al., 2026); $Ag_3PO_4/g\text{-}C_3N_4$ (Alsulmi et al., 2026); $CNF/rGO/WO_3$ (Yifira et al., 2025); $CuMnFe_2O_4$@AC (Akbar et al., 2026); CuO@NiO@$Fe_2O_3$ (Boonserm et al., 2026); $Co_{0.5}Mg_{0.5}Fe_{1.92}Gd_{0.08}O_4$ (Meena et al., 2026); $MgFe_2O_4$ (Cabrera et al., 2026); Z-şemalı $Cu/CuBi_2O_4/Bi/Bi_2O_3$ (Fang et al., 2025); $Nd^{3+}$-doped $CeO_2$ NPs (Madaan et al., 2025); $PTh/Fe_3O_4/RGO$ (Husain et al., 2025) vb. gibi diğer birçok malzeme de araştırmacılar tarafından fotokatalizör olarak kullanılmıştır.

Yapılan çalışmada, yaygın olarak rastlanan boya kirleticileri olan metilen mavisi (MB), Rodamin-B (RhB), malakit yeşili (MG),

metil turuncusu (MO), alizarin kırmızısı (AR) ve kongo kırmızısının (CR) adsorpsiyon verimliliği için kobalt (Co) tabanlı bir MOF (Co-PTC) kullanıldı. Yukarıda sayılan organic kirleticelerin arasında en iyi %79,3 oranınla MG'de adsorpsiyon elde edildi (Anand & Sunajadevi, 2024). Sol-jel yöntemiyle sentezlenen BaFeO katalizörü Parlak yeşilin (BG) degratasyonunda kullanıldı ve olası bozunma aşaması GC/MS) ve LC/MS yöntemleriyle ana ve ara ürünler belirlendi (Oi et al., 2020).

Heterojen Fenton katalizörü olarak karbonize mısır koçanı ile desteklenmiş manyetik $Fe_3O_4$/RCC nanopartikülleri MO bozunmasında 10 döngünün ardından, bozunma verimliliği %93'ün üzerindedir. Bu durum, katalizörün kararlı bir yapıya ve iyi bir tekrarlanabilirliğe sahip olduğunu göstermektedir (Chen et al., 2025). Sentezlenen ZnO-Zeolit kompoziti MB boyasının maksimum bozunmanın pH 8 değerinde olduğu ve saf zeolite kıyasla ZnO-Zeolit kompoziti %96,70 gibi kayda değer bir fotokatalitik aktivite verimi sağlamaktadır (Kabadayi et al., 2024).

Bu derleme çalışmasında, toksik boya içeren atık suların arıtım işlemlerinden sonra özellikle tohum çimlenmesindeki etkileri, sürdürülebilir tarım için kullanılmasına değinildi. Fotokataliz basamakları, boyaların bozunma ürünlerinin LC-MS, ESI/MS, HR-MS, MS yapısı ve m/z değerlerinden bahsedildi. Fotokatalizörlerin yeniden kullanılabilirliğinin önemi ve pHPzc değerinin fotokatalitik bozunmadaki etkin rolü açıklanmıştır.

**Boyar Maddelerin Karekterizasyonu ve Tohum Çimlenmesi**

**Katalizör Geri Dönüşümü ve Kararlılık Testi**

Fotokatalizörler pratik uygulama için, atık sudaki organikboyaların bozunmasında başarılı bir strateji haline gelmiştir ve katalitik kararlılık ve katalizörün aktivite kaybı olmadan yeniden kullanılabilirliği bir katalizör seçimi için temel parametrelerdir (Alzahrani et al., 2025; Ahmad et al., 2025).

Nassar ve ark. yaptıkları çalışmada, fotokatalizörlerin yeniden kullanımını UV ışığı ve $H_2O_2$ varlığında incelendi ve dört döngüden sonra MB uzaklaştırma yüzdesi MCC/S-$VO_2$ için %92,5' ten %85,5' e ve S-$VO_2$ için %100'den %87' ye düşmüştür. Fotokatalizörün tekrar kullanım öncesi ve sonrasında kristal fazda herhangi bir değişiklik olmadığı MCC/S-$VO_2$'nin XRD ve FT-IR karakterizasyonlarıyla da doğrulandı (Nassar et al., 2023).

Liang ve ark. öğütme ve kalsinasyon yoluyla ZnO nanopartiküllerini sentezledi, ZnO'nun fotokatalitik performansının yanısıra yapısal ve kimyasal kararlılık beş döngüden sonra ZnO'nun yüksek fotokatalitik aktiviteyi koruduğunu %98,47' lik orandan %91,28' e çok az bir değişim olduğu görülmektedir (Liang et al., 2024).

Genel olarak, bu hafif azalmaların nedenleri arasında;

1. Geri kazanım aşamasında santrifüjleme ve kurutma işlemlerinden kaynaklı malzeme kayıbından dolayı sonraki döngüye daha düşük bir doza başlanması yüzey katalitik aktivitesini azaltır ve performansı düşürür.
2. Manyetik nanopartiküllerin agregasyon.
3. Fotokatalizörün uzun süreli kullanımı, adsorptif katalitik yüzey aktif bölgelerinin tıkaması gibi sebebler sıralanabilir (Moosavi et al., 2020). Fotokatalizörlerin toksik boyalarındaki fotobozunum giderimi ve defalarca kullanımı büyük önem arzetmektedir (Tablo 1).

*Tablo 1 Farklı kompozitlerin,farklı boyalardaki bozunum yüzdesi ve geri dönüşüm durumları*

| No | Katalizör Kompozitler | Boya | Bozunma yüzdesi (n =1) | Döngü sayısı (n) | Döngüdeki en son bozunma yüzdesi | Referans |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **1** | Z-şemalı $Bi_2WO_6$ /NiO | Rodamin B | 97.52 | 4 | 86.72 | Qu et al., 2026 |
| **2** | $Fe_3O_4$/AC/$TiO_2$ | Metilen mavisi | 98 | 7 | 93 | Moosavi et al., 2020 |
| **3** | %6 Co katkılı CdS | Metilen mavisi | 98.8 | 7 | 55.1 | Shaban et al., 2020 |
| **4** | 3ZF5-BSCH | Metilen mavisi | 97,4 | 8 | 79,7 | Zhang et al., 2024 |
| **5** | MMT@$Fe_3O_4$@Ag | Metilen yeşili | 100 | 3 | 92 | Altun et al., 2025 |
| **6** | $Fe_2O_3$-zeolit | Metilen mavisi | ~100 | 10 | ~97 | Mohamed et al., 2022 |
| **7** | AMOF | Metilen mavisi | 90.7 | 4 | 87.0 | Kitchamsetti et al., 2023 |
| **8** | Ag/UiO-66 | Metilen mavisi | ~99 | 5 | ~90 | Ibrahem et al., 2026 |
| **9** | $Ag_2O$@CRA | Metilen mavisi | 100 | 5 | 91.4 | Adday et al., 2024 |
| **10** | ZQ5 | Metilen mavisi | 97.7 | 6 | 85.2 | Bansal et al,. 2025 |
| **11** | rGO/CdSe/Fe3O4 | Metilen mavisi | 100 | 4 | 83 | Moghanlou et al., 2025 |
| **12** | S1100 | Metil oranj | 93 | 5 | 74 | Wang et al., 2019 |
| **13** | wool/$Fe_3O_4$@$TiO_2$/UiO-66 | Metilen mavisi | 99 | 5 | 73.2 | Tian et al., 2022 |
| **14** | rGO-$Bi_2S_3$ | Metilen mavisi | 99 | 5 | 98.5 | Chufa et al., 2021 |
| **15** | ZnO/NCQD-2 | Rodamin B | 99 | 5 | 95 | Mandal et al., 2021 |
| **16** | aACF/ZnO/CuO@$Al_2O_3$ | Metilen mavisi | 95 | 4 | 95 | Foroushani et al., 2025 |
| **17** | G-$TiO_2$ | Metilen mavisi | 96 | 5 | 91 | Shimi et al., 2022 |
| **18** | 2D $Ti_3C_2Tx$ MXene | Kango kırmızısı | 100 | 5 | 94 | El-Mas et al., 2025 |
| **19** | CdS-4 | Rodamin B | 99.60 | 7 | 99.60 | Lin et al., 2024 |
| **20** | MgO@BC-ZM NC | Kango kırmızısı | 98 | 7 | 51 | Shah et al., 2026 |
| **21** | 30B/ZnO/$Ag_2O$ | Kristal viyole | 99,21 | 6 | 90,37 | Foroutan et al., 2022 |
| **22** | $NSO_{-4}$ | Kango kırmızısı | 94 | 5 | 92,3 | Khatun et al., 2023 |
| **23** | ZnO/CuO/$Fe_2O_3$ | Toluidin mavisi | 99 | 5 | 97.12 | Serouti et al., 2024 |

| | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **24** | $NiFe_2O_4$ | Kristal viyole | 75.50 | 3 | 73 | Divakara et al., 2025 |
| **25** | NiS–ZnS NC | Kristal viyole | 100 | 7 | 87.8 | Afzal et al., 2026 |
| **26** | CeNiSCS | Kongo kırmızısı | 85 | 4 | 44 | Langa et al., 2026 |
| **27** | $NiFe_2O_4$ | Metilen mavisi | 98.99 | 5 | 95.68 | Khalaji, 2024 |
| **28** | $MgFe_2O_4$ | Rodamin B | 91 | 6 | 88 | Busharat et al., 2024 |

## Radikal Yakalama

Yapılan bir çalışmada; $Ti_3C_2$-$TiO_2$ foto katalizörünün fotokatalitik mekanizmasını belirlemek için MO çözeltisinde radikal yakalama testi çeşitli kimyasallar kullanılmıştır. Kısaca bunlardan bahsetmek gerekirse, sırasıyla $h^+$, COH, $CO_2$ yakalayıcısı olarak trietanolamin (EDTA), tert-butanol (t-BuOH) ve p-benzokinon (p-BQ) kullanıldı. EDTA, metil turuncusu bozulma verimliliğinde kayda değer bir etki göstermedi; bu da deliklerin ($h^+$) reaksiyondaki rolünün çokta etkili olmadığını gösterdi. Öte yandan, p-BQ ve t-BuOH tutucuları radikallerin MO fotokatalitik verimliliğinde etkin rol oynadığını gösterir (Hieu et al., 2021).

Işık altında S1100 numunesi elektronlar ve boşluklar oluşturur ve MO' nun bozunmasında etkin rol oynar. Bu durumun değelendirilmesi amacıyla; hidroksil (·OH) radikalleri için tert-butanol, süperoksit ($\cdot O2^-$) radikalleri için L-askorbik asit kullanıldı ve boşluklar ($h^+$) için disodyum etilendiamintetraasetat (EDTA-2Na) eklendi. MO'nun bozunmasında $\cdot O2^-$ radikalleri ve $h^+$ boşlukları belirgin şekilde düşmektedir. Buna karşılık, tert-butanol (·OH) radikalleri MO' nun bozunması üzerinde dikkate değer etkisi olmamıştır (Wang et al., 2019).

BS4'ün MO çözeltisini karanlık ortamdaki katalizde rol oynayan ROS türlerini belirlemek amacıyla süperoksit radikallerini ($\bullet O_2^-$) yakalamak için p-benzokinon (p-BQ), hidroksil radikalleri (•OH) için izopropil alkol (IPA), elektronları ve hidrojen peroksit için gümüş nitrat ($AgNO_3$) ve sodyum pirüvat (SP) kullanıldı.

Fotobozunmada, $AgNO_3$ kullanılması metil turuncusunun fotokatalitik aktivitesinde elektronlar dominant olduğu yapılan deney ile belirlendi (Rajendran et al., 2026).

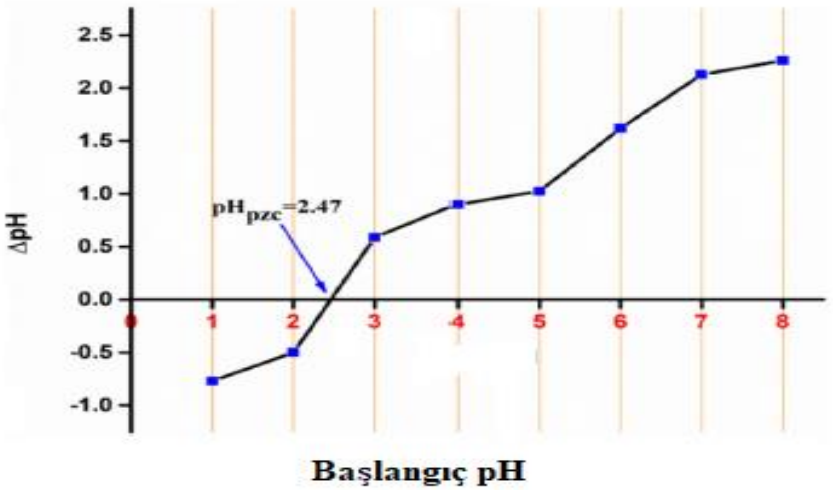
Yapılan bir çalışmada; Kongo kırmızısının (CR) fotokatalitik bozunma sürecinde etkili olan ajanları belirlemede boşluk ($h^+$) için İzopropil alkol, hidroksil radikali (OH.) tesbitinde etilendiamin tetraasetik asit (EDTA) ve gümüş nitrat ($AgNO_3$) ise elektron ($e^-$) yakalayıcıları olarak kullanıldı. CR boyasının bozunmasında IPA ve EDTA' nın varlığı hem boşlukların hem de hidroksil gruplarının eşit derecede önemli olduğunu gösterdi (Beegun et al., 2024).

**pH ve Sıfır Yük Noktasının Etkisi (pHpzc)**

Belirli bir katalizör yüzeyinin toplam yükünün sıfır olduğu pH değerine pHpzc denir. Fotokatalizde pH seviyesi, sulu sistemlerden kirletici maddelerin uzaklaştırılmasında kritik bir faktördür; adsorban malzemenin yüzey yükünü etkilediği için çok önemlidir ve reaktif oksijen türlerinin üretimini etkiler. Genel olarak $pH_{PZC}$ değerinin hesaplanmasında kullanılan yöntemi tanımlamak gerekirse; 0,1 $mol \cdot L^{-1}$ HCl ve 0,1 $mol \cdot L^{-1}$ NaOH çözeltileri kullanılarak farklı pH' larda hazırlanır. Hazırlanan süspansiyonlar ağızları kapalı bir şekilde, 25°C sıcaklıkta çalkalamalı inkübatörde, 24 saat boyunca bekletildi. Daha sonra, çözeltiler kalitatif filtre kağıdından süzülerek nihai pH (pHf) değerleri iki tekrarlı olacak şekilde ölçüm yapıldı (Alvez-Tavar et al., 2025).

Yapılan çalışmada, N-C-dots/SgCN/gCN yapısının pHpzc 2,47 olarak hesaplandı. N-C-dots/SgCN/gCN katalistinin pHpzc değerinin altında yüzeyinin pozitif yük kazanacağı anlamına gelir. Böyle bir durumda, pozitif yüklü N-C-dots/SgCN/gCN ile katyonik RhB boya molekülleri arasında oluşan elektrostatik itmelerin artmasından dolayı, fotokatalitik boya bozunum yüzdesinin azalmasına yol açar (Şekil 1) (Singh et al., 2025).

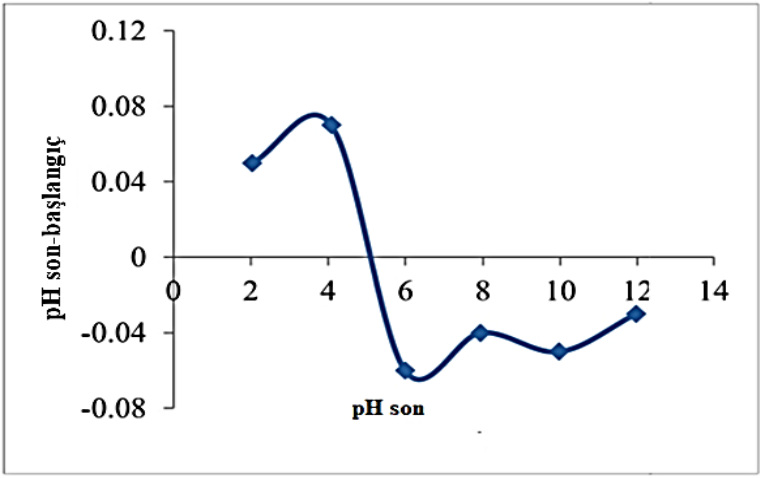
*Şekil 1 N-C-dots/SgCN/gCN yapısının pHpzc değerinin gösterimi*




Metil oranj (MO) boyar maddesinin CCNH-P kompoziti üzerine adsorpsiyonunda yüksek giderim değerinin pH 4'te gözlendi. Bu pH değerinde CCNH-P yüzeyi pozitif yük taşımaktadır ve MO yapısındaki negatif yüklü sülfonat grupları ($–SO_3^-$) ile elektrostatik çekimi artırmaktadır. Fakat, daha düşük pH değerlerinde, kompozit yüzeyindeki aktif fonksiyonel grupların aşırı protonlanması, katyonik gruplar ile yüzey arasında elektrostatik itmelerden dolayı boyanın giderimi azalmaktadır. Çözelti pH'ının 4'ün üzerinde anyonik boyar madde molekülleri ile hidroksit iyonları ($OH^-$) arasında aktif bağlanma bölgeleri için yaşanan rekabet nedeniyle adsorpsiyonda azalmayla birlikte giderim verimliliği düşmüştür. CCNH-P için sıfır yük noktası (pzc) değeri yaklaşık 6,2 olarak belirlendi. Bunun anlamı tam olarak pH 6,2' nin altında sorban yüzeyinin pozitif yük taşır ve anyonik boyar maddelerde elektrostatik çekim yoluyla tutulmasını teşvik eder (Fadhil et al., 2026).

ZST pcz değeri 5.23 olarak belirlendi, bu durum parçacıkları pozitif yüklü hale getirdi, anyonik MO molekülleriyle daha güçlü bir etkileşime girmesinin kanıtı pH 4 seviyesinde en verimli fotokataliz olayının gerçekleşmesidir (Şekil 2) (Alamaw et al., 2025).

*Şekil 2 ZST ait pcz grafiği*

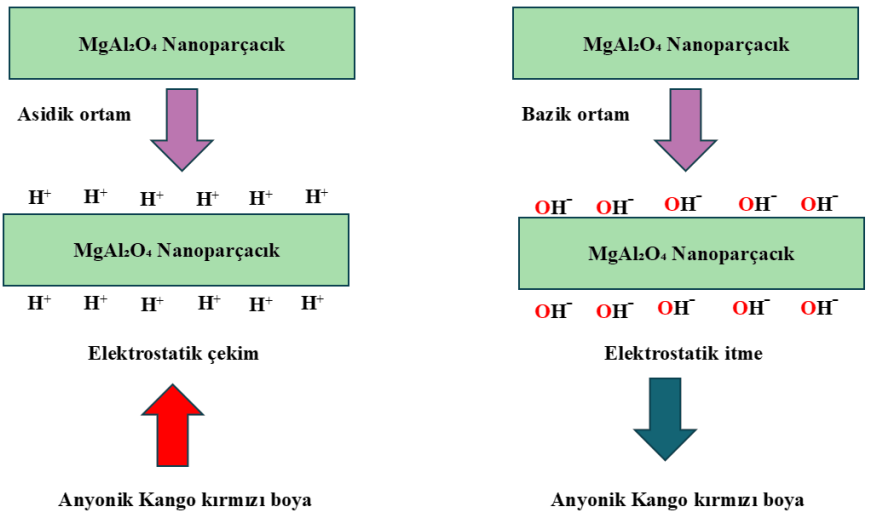



Metilen mavisinin bozunma verimi pH 8–12 aralığında %95' in üzerinde iyi giderim değerine ulaştığını göstermektedir. pH değerinin pzc'nin (7,8) üzerinde olduğu durumlarda, ZQ5 yüzeyi net bir negatif yük kazanır; bu durum pozitif yüklü MB boya moleküllerine karşı elektrostatik etkileşimler boya adsorpsiyonunda daha verimli bir yük transferini kolaylaştırır ve bazik ortamdaki $OH^-$ iyonlarıyla etkileşimin artması sayesinde reaktif oksijen türünün (ROS) oluşumuna yol açtığını, özellikle de hidroksil radikallerinin (•OH) oluşumunu yüksek fotokatalitik bozunma verimini artırır (Bansal et al., 2025).

Ultraviyole ışık koşulları altında $MgAl_2O_4$ nanopartikülleri pH 3' te yüzde 99,22' lik bozunma sergilerken pH 9' da tam tersi yönde yüzde 2.09' a düşmektedir. Bu durum, anyonik Kongo kırmızısı boyası pozitif yüklü hidrojen iyonlarıyla tarafından

çekilmektedir ve bozunma yüzdesinde artışa neden olmaktadır. Karşıt olarak, alkali ortamda, negatif yüklü hidroksit iyonları Kongo kırmızısı boyasının itilmesine neden olur ve fotokatalitik bozunma yüzdesinde azalmaya yol açar. Yukarıda anlatılanlar şematik olarak aşağıda (Şekil 3) gösterildi (Al-Farraj & Abdelrahman, 2024).

*Şekil 3 Kongo kırmızısı boyasının $MgAl_2O_4$ nanoparçacıklarıyla etkileşimleri*




## Boya Bozunmasındaki Muhtemel Tepkimeler

Fotokatalizör olarak sentezlenen ($Sr_2FeMoO_6$) numunesi ışık altında uyarıldı yüzeyde elektronlar ve deliklerin oluşmasıyla metil mavisi (MB) çözeltisinde fotokatalitik aktivitesi incelendi. Fotobozunma için muhtemelen $Fe^{2+}$ iyonları, $Sr_2FeMoO_6$ yüzeyinde soğurulmuş olan $O^2$ molekülüne bir elektron vererek $Fe^{3+}$ iyonuna dönüşebileceği gibi bu süreçte $O^{2-}$ süperoksit radikalleride oluşabilir. Öte yandan, $Mo^{6+}$ iyonları, Sr2$FeMoO_6$'nın iletim bandındaki elektronları yakalayarak $Mo^{5+}$ iyonlarını oluşturabilir. Dahası; fotonlar vasıtasıyla değerlik bandında oluşan boşluklar ise $H_2O$ ve $OH^-$ iyonlarıyla doğrudan tepkimeye girer oluşması

muhtemel $\bullet O_2^-$ ve •OH türleri, metilen mavisinde boyanın renginin gideriminde aktif olarak rol oynar. MB'nin bozunmasında önerilen tepkimeler aşağıda verilmiştir (Li et al., 2019).

$Sr_2FeMoO_6 + hv \rightarrow Sr_2FeMoO_6$ ($h^+ + e^-$çifti)

$Fe^{2+} + O_2 \rightarrow Fe^{3+} + {}^{\cdot}O_2$

$Sr_2FeMoO_6$ (e) + $O_2 \rightarrow Sr_2FeMoO_6 + {}^{\cdot}O_2$

$Mo_6 + OH^- \rightarrow Mo_5^+ {}^{\cdot}OH$

$Sr_2FeMoO_6$ ($h^+$) $OH^- \rightarrow Sr_2FeMoO_6$ ${}^{\cdot}OH$

Metil mavisi ${}^{\cdot}OH$ (veya ${}^{\cdot}O^2$) → nihai ürün

Işık varlığında elektronlar elektronlar ($e^-$), ortamdaki oksijeni ($O_2$) yakalayarak süperoksit radikallerini ($O_2^-$) oluştururken ($h^+$) soğuran su molekülü ise •OH radikalleri oluştururlar. Sentezlenen BGFSO/GNP'nın Kongo kırmızısı (CR) çözeltisindeki fotolatalitik reaksiyonun temel adımları aşağıdaki denklemlerle gösterildi: (Fatima et al., 2020)

BGFSO/GNP + Görünür Işık → Elektron Üretimi ($e^-$)

$e^-$ (BGFSO) + $O_2 \rightarrow O_2^-$

e- (GNPs) + $O_2 \rightarrow O_2^-$

$h^+ + H_2O \rightarrow$ •OH

CR + $O_2^- \rightarrow H_2O + CO_2$

CR + •OH → $H_2O + CO_2$

Görünür ışığa maruz kaldığında, MoS2 yüzeyi ışık etkisiyle fotokatalizörün iletim bandındaki (CB) elektronlar, yüklü taşıyıcılar sayesinde CuO' nun iletim bandına aktarılır ve gCN ise bu enerji depolayan bu elektronları bünyesine alır. Kısacası, MoS2'nin değerlik bandında (VB) çok sayıda boşluk ($h^+$) meydana gelirken öte yandan elektronlar ($e^-$), oksijen molekülleriyle tepkimeye girerek

$O_2^{\bullet-}$ radikallerini oluşturur. Fotokatalizörlerin aktif yüzeyinde sayısız oluşan boşluklar (h+) ve elektronlar ($e^-$), bir dizi tepkime sonucunda hidroksil radikallerini ($OH^\bullet$) meydana getirir. Oluşan $O_2^{\bullet-}$ ve $OH^\bullet$ radikalleri, MO' yu oksitleyerek toksik olmayan çevre dostu ürünlere dönüştürebilir. Radikallerin oluşumuna dair muhtemel denklemler aşağıda ifade edildi (Alomayrah et al., 2024).

$$CuO/MoS_2 + hv \rightarrow CuO\ (\ e^-_{CB} + h^+_{VB}\ ) + MoS_2(\ e^-_{CB} + h^+_{VB}\ )$$

$$CuO\ (e^-_{CB}) + gCN \rightarrow CuO + gCN\ (e^-)$$

$$gCN\ (e^-) + O_2 \rightarrow \cdot O_2^- + gCN$$

$$MoS2\ (h^+_{VB}) + H_2O \rightarrow H^+ + OH^- + MoS_2$$

$$MoS2\ (\ h^+_{VB}) + OH^- \rightarrow MoS_2 + \cdot OH$$

$$\cdot O^-_2 + OH\cdot + MO \rightarrow \text{Nihai ürün}$$

Foto ışınlamadan sonra delikler ve elektronların oluşması kuvvetle muhtemeldir. Rodamin B boyasının atık sudan uzaklaştırılmasında baskın olacak yeni reaktif türler oluşturabilir. Manyetik $Fe_3O_4$/BiOCl katalizör olarak kullanılır ve Rodamin B boyasının fotokatalitik bozunma mekanizması aşağıda gösterildi (Nonthing et al., 2025).

$$Fe_3O_4/BiOCl + \text{ışık} \rightarrow Fe_3O_4/BiOCl + e^- + h^+$$

$$e^- + O_2 \rightarrow \bullet O_2^-$$

$$\bullet O_2^- + 2H_2O + e^- \rightarrow 2\bullet OH + 2OH^-$$

$$h^+ + \text{RhB boyası} \rightarrow \text{bozunmuş bileşikler}$$

$$\bullet OH + \text{RhB boyası} \rightarrow \text{bozunmuş bileşikler}$$

ZnO/NCQD kompoziti kullanılarak katyonik bir boya olan Rrodamin B boyasınında artan fotokatalitik aktivitenin temel nedeni, elektron-delik çiftlerinin birbirinden ayrılmasıdır. Fotonla uyarılan elektronlar, çözünmüş oksijeni süperoksit radikallerine ($\cdot O_2^-$) indirgeyebilir.

Bu radikal, hidrojen peroksit ($H_2O_2$), hidroperoksil radikali ($HO^{\cdot}{}_2$) ve hidroksil radikaline ($OH\cdot$) dönüştürülebilirken delikler ($h^+$), hidroksil iyonlarıyla reaksiyona girerek hidroksil radikalleri oluşturur. Fotokatalitik ilerlemenin sonlarında RhB mineral asitlere, $CO_2$' ye ve $H_2O$ gibi nihai ürünler oluşur. Muhtemel fotokatalitik reaksiyon sıralaması aşağıda gösterildi (Mandal et al., 2021).

$ZnO/NCQD + h\nu \rightarrow ZnO\ (e^-) + NCQDs\ (h+)$

$e^- + O_2 \rightarrow {}^{\cdot}O_2^-$

$2H+ + {}^{\cdot}O_2^- + {}^{\cdot}O_2^- \rightarrow H_2O_2 + O_2$

${}^{\cdot}O_2^- + H_2O \rightarrow H^{\cdot}O_2 + OH^-$

$H^{\cdot}O_2 + H^{\cdot}O_2 \rightarrow OH\cdot + O_2$

$H^{\cdot}O_2 + H_2O_2 \rightarrow H_2O + O_2 + \cdot OH$

$h+ + H_2O/OH^- \rightarrow \cdot OH$

$OH\cdot/\ {}^{\cdot}O_2/h+ + RhB\ boya \rightarrow CO_2 + H_2O$

Görünür ışık ışınımı altında ZnO/CuO kompozitlerinin geniş yüzey alanları ve elektron-delik çifti taşıyıcılarının yeniden birleşmesinin engellenmesi sayesinde %91' lik iyi bir fotokatalitik performans göstedi. Aşağıda ZnO/CuO kompozitinin muhtemel fotokatalitik reaksiyon serisi belirtildi (Hitkari et al., 2022).

$ZnO\ (e^- + h^+)/CuO\ (e^- + h^+) \rightarrow .\ ZnO\ (e^- + e^-)/CuO\ (h^+ + h^+)$

$h^+ + OH^- \rightarrow \bullet OH$

$e^- + O_2{}^- \rightarrow \bullet O_2^-$

$H_2O + \bullet O_2^- \rightarrow \bullet OOH + OH^-$

$2OOH\bullet \rightarrow O_2 + H_2O_2$

$H_2O_2 + \bullet O_2^- \rightarrow \bullet OH + OH^- + O_2$

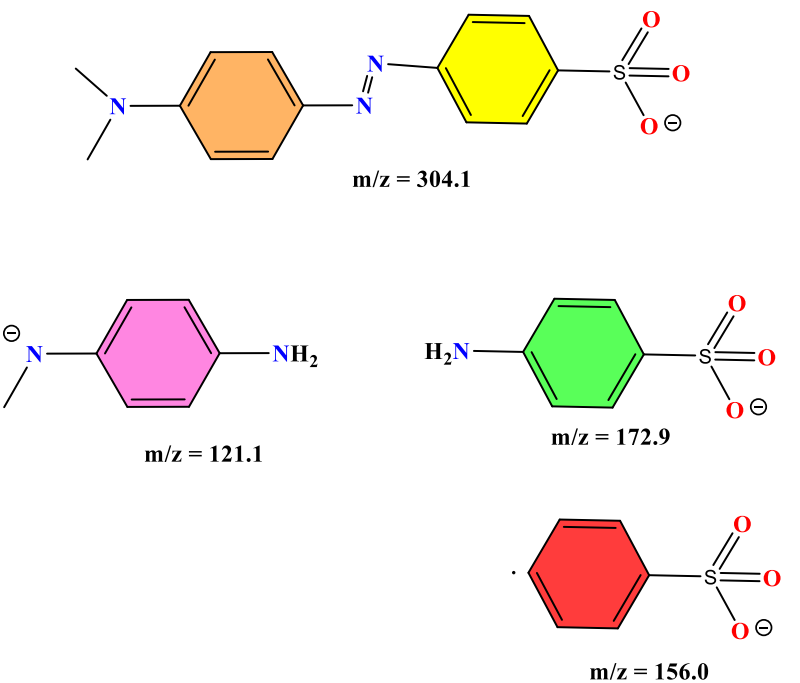
•OH + •$O_2$ + $h^+_{VB}$ + kirletici maddeler → kirletici maddeyi bozunuma uğratma

•OH + •$O_2$ + $h^+_{VB}$ + kirletici maddeyi bozunuma uğratma → $CO_2$ + $H_2O$

**Boyaların Muhtemel Bozunma Sonrasındaki Oluşan Nihai Ürünler**

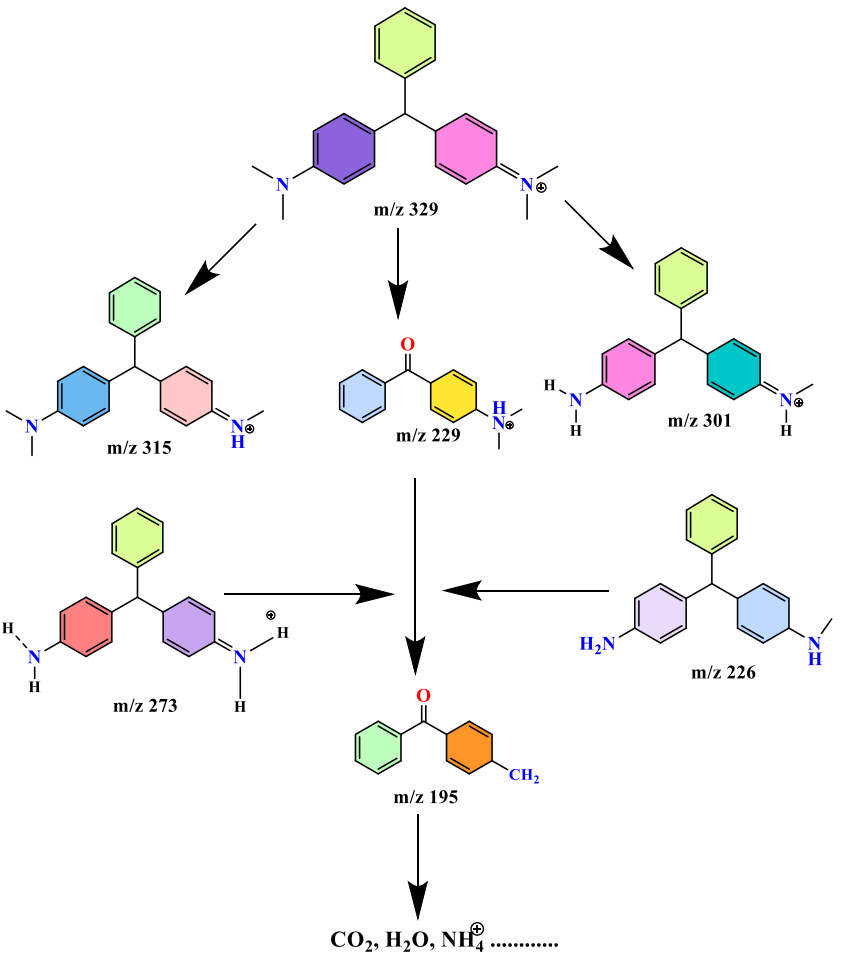
Saf MO çözeltilerinin negatif mod ESI/MS spektrumunda, m/z=304,1 değerindeki pik, MO anyonuna ($[M-H]^-$) karşılık gelir. Sülfanilik asit anyonunu m/z=172,9 değerindeki pik, sülfanilik asitin radikal anyonunu m/z=156,0 değerindeki pik, (Şekil 4) demetilasyonu ise m/z=121,1 değerlerinde belirlendi (Zhong et al., 2018).

*Şekil 4 ESI/MS temelinde MO boyar maddesine ait ana ara ürünlerin önerilen yapıları*



Mahajan v ear. tarafından 2025 yılında biyojenik olarak sentezlenen ZnO nanopartikülleri tarafından UV ışığına maruz bırakılarak katalize edilen malakit yeşili (MG) boyasının fotokatalitik bozunması, yüksek çözünürlüklü kütle spektrometresi (HR-MS) kullanılarak (Şekil 5) ana ve ara ürünler tesbit edildi (Mahajan et al., 2025).

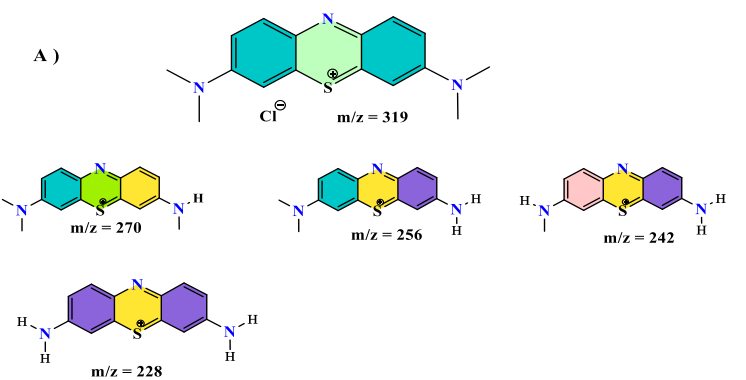
*Şekil 5 MG boyasının ZnO NP leri varlığında fotobozunumu sırasında oluşan ara ürünler*

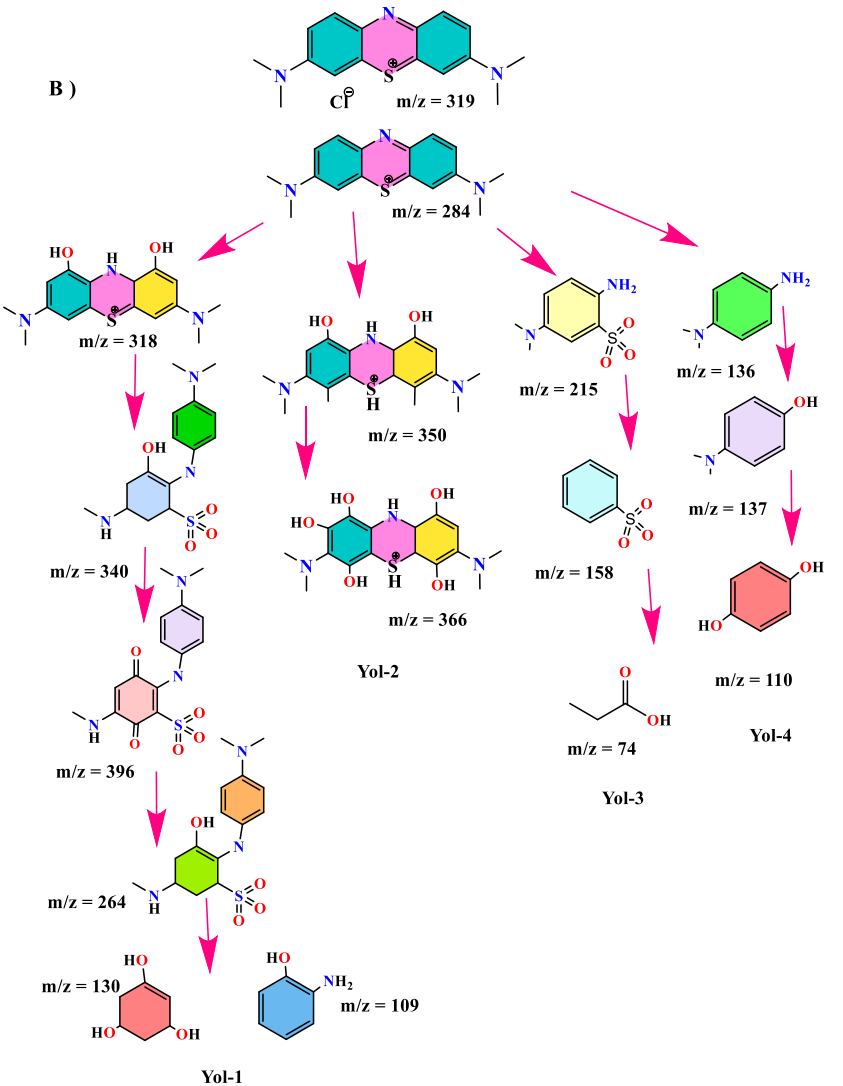


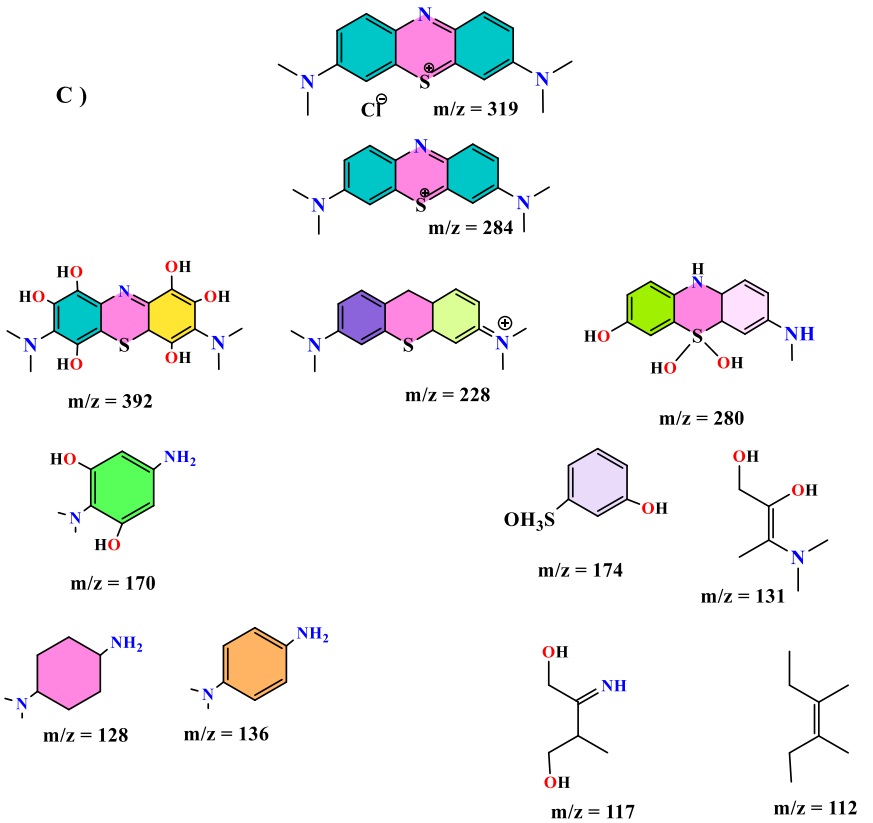
Dulta ve ark. güneş ışığı altında, CuO nanopartiküllerinin fotokatalitik bozunması sonucunda metilen masisinin yapısal formülleri kütle spektrumlarındaki kütle/yük (MS) (Şekil 6 a) oranlarına dayanarak yorumlandı (Dulta et al., 2022). Bansal ve ark. (2025) LC-MS çalışmasıyla ZnO/CQD heteroyapılı nanokompozitlerin kullanımıyla MB' nin bazunma ürünlerini doğruladı ve m/z = 284' te minerelizasyon gerçekleşmeden önceki yapısına görülmektedir. 1. yolda hidroksilasyon ve demetilasyon, 2. yol, hidrodinamik kavitasyon, 3. ve 4. yollarda reaksiyoların devam ederek daha (Şekil 6 b) küçük parçalara ayrıldığı bildirildi (Bansal et al., 2025).

Sahu ve ark. (2026) yılında ZnO/$Ag_2O$/rGO ZnO/$Ag_2O$/rGO heteroyapılı katalizör kullanarak karanlık artamda metilen mavisinin bozunması HR-MS analizi ile ara ve nihai ürünler tamınlandı. Bu çalışmanı en önemli özelliği karanlıkta (güneş veya ışık olmadan) MB' nin (Şekil 6 c) bozunmasıdır. Reaksiyonun ilerlemesiyle, ara ürünlerin bir kısmı hidroliz ve oksidasyon süreçleri sonucunda $CO_2$ ve $H_2O$'ya dönüşürken, amino ve sülfonik gruplar ise $NO3^-$, $NH4^+$ ve $SO4^{2-}$ iyonlarına yükseltgenir.

*Şekil 6 a) CuO nanopartikülü ile MB b) ZnO/CQD nanopartikülü MB'leri ışık ile c) ZnO/Ag2O/rGO ZnO/Ag2O/rGO heteroyapılı katalizör ile karanlıkta bozunumu*




B )
m/z = 319
m/z = 284
m/z = 318
m/z = 350
m/z = 215
m/z = 136
m/z = 340
m/z = 366
Yol-2
m/z = 158
m/z = 137
m/z = 396
m/z = 110
Yol-4
m/z = 74
Yol-3
m/z = 264
m/z = 130
m/z = 109
Yol-1

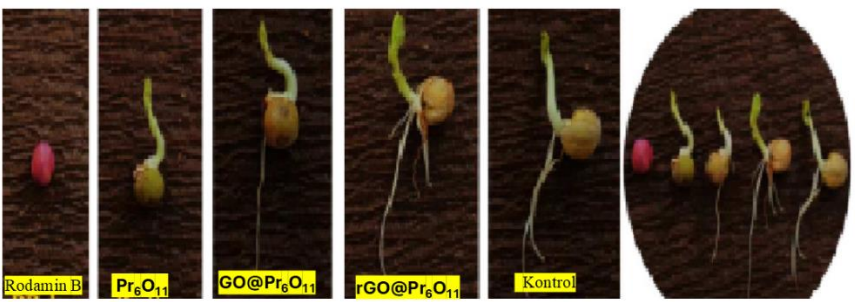



## Boyar Maddeler ve İşlem Görmüş Atık Sularda Tohum Çimlenme Testi

Lan ve ark. yaptıkları çalışmada; atık sulardaki toksisitenin belirlenmesi için zehirli maddelere karşı hassasiyetinden dolayı buğday kullanılarak değerlendirdi. Arıtılmamış MB atık suyuna maruz kalan buğdaylarda gelişim ciddi oranda baskılandı; Sonraki aşamalarda; süreye bağlı olarak arıtılmış atık suyun buğdayin çimlenme potansiyeli, kök-gövde gelişimi üzerindeki etkisi baskılanma otradan kalkmasıyla minimum düzeyde kalmış ve kontrol grubundaki buğdaylara benzer sonuçlar vermiştir (Lan et al., 2025).

Rodamin B boyası hem kendi hem de $Pr_6O_{11}$ NP'ler, GO@$Pr_6O_{11}$ NC'ler ve rGO@$Pr_6O_{11}$ NC' ler ile işlem gören atık su bezelye tohumlarının çimlenmesi için kullanıldı. Nanokompozitlerle işlem görmüş boya çözeltilerinden elde edilen su bezelye tohumları 24 saat içinde biyoaktiviteyi koruyarak, güvenli ve verimli tohum çimlenmesini desteklerken saf su ile muamele edilen tohumlar ise yaklaşık 19 saatte çimlendi. İnanılmaz derecede şaşırtıcı olan durum güneş ışığı altında 100 %99,93' lük bozunmaya öncülük eden rGO@$Pr_6O_{11}$ ile işlem görmüş atık su, 10,2 saatte %100' lük çimlenmeyi sağladı. Bu durumun aksi yönde, herhangi bir işlem görmemiş RB boya çözeltisinde bezelye tohumlarında çimlenmenin olmaması, RB çözeltinin toksisitesini ortaya koymaktadır. rGO@$Pr_6O_{11}$ nanokompoziti tohumlarda reaktif oksijen türleri (ROS) oluşturarak çimlenme verimliliğinin artırılmasında önemli rol oynadığı (Şekil 7) varsayılmaktadır (Chakradhar et al., 2025).

*Şekil 7 $Pr_6O_{11}$ NP' leri, GO@$Pr_6O_{11}$ NC' leri ve rGO@$Pr_6O_{11}$ NC' leri içeren, RB boyası ve su kullanarak işlem gören RB boyasının bezelye tohumları üzerinde gerçekleştirilen tohum çimlenme testi*

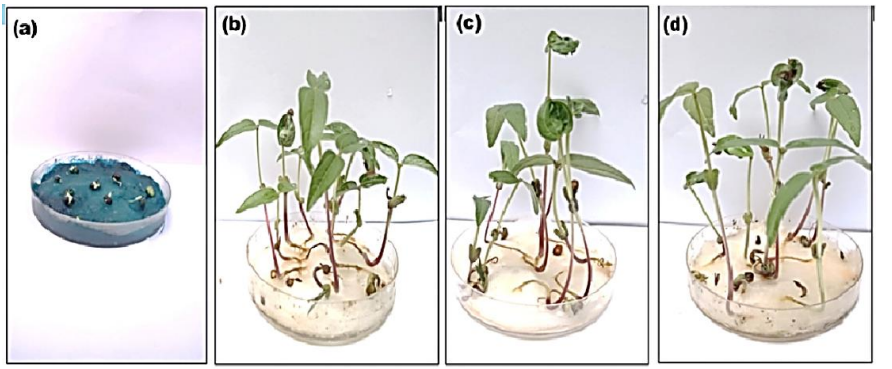


Tatlı mısır tohumları, tohum çimlenme sürecini incelemek amacıyla metilen mavisi çözeltisinde fotokatalizör olarak $TiO_2$ kullanılmıştır. Her bir çalışma için 20 adet tohum kullanıldı. Deney-1 çimlendirme kağıdı kullanılarak yapıldı ve çimlenen tohum sayısı = 11 ve Deney-2 tohumlar bir elek üzerine yerleştirilerek yapıldı ve çimlenen tohum sayısı = 9 toplam tohum sayısında görüldü (Sawant et al., 2013).

Bizmut katkılı SnS kuantum noktaları (Bi-doped SnS QDs) kontrol çözeltisi, boya içeren çözelti ve işlem görmüş kristal viyole (CV) ve metilen mavisi (MB) çözeltileri maş fasulyesinin çimlenmesini araştırnak için kullanıldı, Sonuç olarak; fotokataliz süreci ilerledikçe çimlenme hızınd bir artış gözlendi. Nihai sonuçlardan; fotokatalitik işleme maruz kalmış CV ve MB çözeltilerindeki maş fasulyesi kontrol grubuna kıyasla hücre içi ROS seviyelerinde önemli bir değişiklik olmadığını göstermiştir. Fakat fotokataliz işlemine yapılmayan CV ve MB boyalarına maruz kalan maş fasulyesininde oksidatif stresi tetikleyerek ROS seviyelerinde belirgin bir artışa neden olmaktadır (Murugadoss et al., 2025).

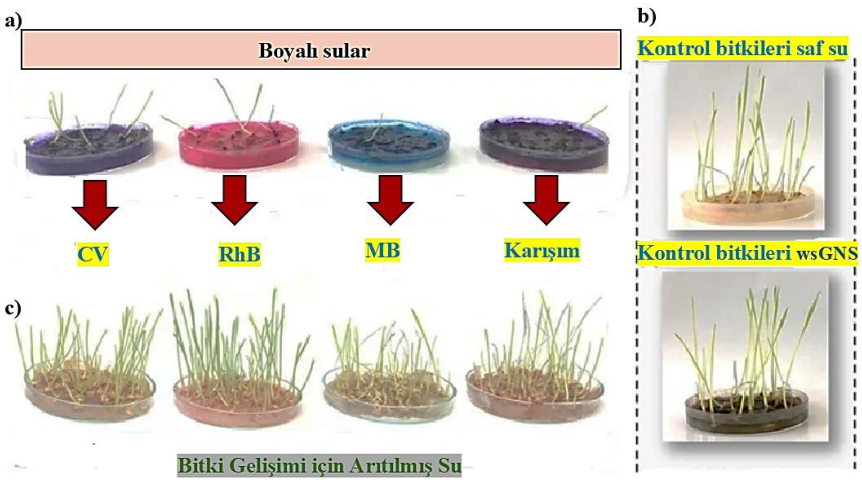
Maş fasulyesi tohumlarının çimlendirilmesi için yapılan analizlerde, MG boya çözeltisinin bitki gelişimini baskıladığı, karşı durumda boya çözeltisinin işlemden geçirilmiş haliyle yetiştirilen maş fasulyesi bitkilerinin, kontrol grubundaki bitkilere oldukça neredeyse aynı düzeyde bir gelişim sergilediği tespit edildi. Şaşırtan bir durum, Czno-noktaları tıpkı saf suda olduğu gibi bitki gelişimini (Şekil 8) destekledi (Sekar & Yadav, 2021).

*Şekil 8 MG boyasının maş fasulyesi bitkisinin büyümesi üzerindeki etkisi, 15 günlük çimlenme süresi testi (a) MG boyaları, (b) işlem görmüş boya numunesi, (c) saf su (DDW) ve (d) CZnO-noktaları uygulanmıştır*




Toksisiteye çok hassas ve hızlı büyüyen buğdayın gelişimi üzerinde; CV, RhB, MB boyaları ve bunların karışımlarının, wsGNS varlığında fotobozunmaya uğramadan önceki ve sonraki etkileri karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Bozunma öncesindeki CV, RhB, MB boyaları ve bunların karışımlarından oluşan çözeltilerinin, buğday bitkilerinin gelişimini yüksek oranda baskıladığı görüldü. Bunun tam tersi durumunda, fotobozunma işleminden geçmiş atık suyla yetiştirilen buğdayların, kontrol grubundaki bitkilerle benzer şekilde (Şekil 9) gelişim gösterdiği tespit edildi (Gunture et al., 2019).

*Şekil 9 Boya maddelerinin, bunların karışımlarının ve arıtılmış atık suyun buğday bitkileri üzerindeki etkisi, 15 günlük çimlenme süresi boyunca test edildi; (a) boya içeren su ve boya karışımları (CV + RhB + MB); (b) kontrol grubu (saf su ve wsGNS çözeltisi ile); ve (c) boya maddeleri ile bunların karışımlarını içeren arıtılmış atık su uygulandı*




## Sonuçlar

Kirlenmiş sular, ekosistem üzerinde olumsuz etkilere yol açmaktadır; bu durum, suyun kalitesi halk sağlığını ve doğal sistemleri etkileyen son derece kritik bir meseledir, tehlikeli boya atıklarının yol açtığı zararı gidermek için sürdürülebilir ve uygun bir atık su arıtma yöntemlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu nedenle, boyaların su ortamından uzaklaştırılması için etkili bir yöntemin uygulanması gerekmektedir. Günümüzde, katalizörlerin geri dönüştürülebilirliği ve yeniden kullanılabilirliği kataliz alanında önemli bir konudur çünkü çok sayıda katalizör ilk veya ikinci döngüden sonra etkisini kaybeder ve kullanılmadan atılması firmalarda mali zarara neden olur.

Fotokatalitik boya bozunumu için sulu ortamın en etkili pH değeri, fotokatalistin sıfır yük noktası (pHpzc) üzerinden belirlenebilir. Sulu boya ortamının pH değeri, fotokatalistin yüzeyi pozitif yük kazanır; bunun tersi durumda ise yüzey negatif yüklenir. PZC'den daha yüksek pH değerlerinde, anyonik boya ile aynı yüke sahip fotokatalizör arasındaki iyon-iyon itme kuvveti nedeniyle, boyanın adsorpsiyonu azalır; karşı bir durum olarak pczden daha düşük bir Ph değerinde ise katyonik bir boya molekülünde katyonların birbirini itmelerinden dolayı daha az fotodegradasyona uğramasına yol açar. Bu durum bize fotokatalitin yükünün ve uygun boyanın seçilmesindeki rölünün önemini vurgulamaktadır. Su ortamlarında bulunan farklı boya kirleticilerinin uzaklaştırılması için etkili fotokatalizörler kullanılabileceği sonucuna varılabilir.

Bu derleme çalışmasında, sürdürülebilir su güvenliği ve atık su arıtma için gelecekteki araştırmalara odak noktaları sunmaktadır. Son yıllarda sürdürülebilir tarımda işlem görmüş atık suların kullanımına dair çalışmalar hız kazanmaktadır ve bu derlemenin yapılaçak çalışmalara ışık tutması öngörülmektedir.

**Kaynakça**

Adday, A. S., & Al-Jubouri, S. M. (2024). Photocatalytic oxidative removal of the organic pollutant from wastewater using recyclable Ag2O@ CRA heterojunction photocatalyst. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 10, 100852.

Afzal, M. Y., Bilal, M., Asif, M., Rehman, S., Hussain, J., Liu, Q., ... & Shaikh, A. J. (2026). Dynamic light scattering-assisted design of an optimized NiS–ZnS nanocomposite for efficient photocatalytic dye degradation: experimental and theoretical insights. *RSC advances,* 16(26), 23500-23527.

Ahmad, N., Khan, M. R., Velu, K. S., & Mohandoss, S. (2025). Development of FeMnO3@ Ag perovskite via sol-gel combustion for superior photocatalytic degradation of methyl orange under visible light irradiation. *Materials Chemistry and Physics*, 340, 130819.

Akbar, R., Shahzad, R., Munir, M. A., Saleem, S., Timoumi, A., Khalid, A., ... & Almukhlifi, H. A. (2026). Investigating the sintering effects on the photo-degradation efficiency of CuMnFe2O4@ AC heterostructure against malachite green dye for wastewater treatments. *Optical Materials*, 118077.

Alamaw, W., Taddesse, A. M., Adgo, A., Bezu, Z., & Teju, E. (2025). Synthesis and characterization of zeolite-supported CdS/TiO2/Ag2CO3 ternary composite for Photodegradation of methyl Orange. *Results in Chemistry*, 14, 102063.

Al-Farraj, E. S., & Abdelrahman, E. A. (2024). Efficient photocatalytic degradation of congo red dye using facilely synthesized and characterized MgAl2O4 nanoparticles. *ACS omega*, 9(4), 4870.

Alomayrah, N., Ikram, M., Alomairy, S., Al-Buriahi, M. S., Khan, M. N., Warsi, M. F., & Irshad, A. (2024). Fabrication of CuO/MoS2@ gCN nanocomposite for effective degradation of methyl orange and phenol photocatalytically. *Results in Physics,* 64, 107902.

Alsulmi, A., Afifi, S. A., Gad, A. A., Abdel-Messih, M. F., Sultan, A., & Ahmed, M. A. (2026). Fine Tuning of Ag3PO4/g-C3N4 Hybrid Nanostructure Catalyst for Natural Sunlight-Assisted Cationic Dye Neutralization. *Catalysts*, 16(8), 731.

Altun, T., Acar, M. K., & Gubbuk, I. H. (2025). Preparation and Characterization of the MMT@ Fe3O4@ Ag Nanocomposite for Catalytic Degradation of Methyl Yellow: Reaction Parameters and Mechanism Based on the Artificial Neuron Network. *ACS omega*, 10(1), 134-146.

Alvez-Tovar, B., Scalize, P. S., Angiolillo-Rodríguez, G., Albuquerque, A., Ebang, M. N., & de Oliveira, T. F. (2025). Agro-industrial waste upcycling into activated carbons: A sustainable approach for dye removal and wastewater treatment. *Sustainability,* 17(5), 2036.

Alzahrani, S. O., Alqarni, S. A., Alessa, H., Ashour, G. R., Jawhari, A. H., Hameed, A., ... & El-Metwaly, N. M. (2025). Electrospun nanofibers membrane of carbon quantum dots loaded onto chitosan-polyvinyl alcohol for removal of rhodamine B dye from aqueous solutions: Adsorption isotherm, kinetics, thermodynamics and optimization via Box-Behnken design. *International Journal of Biological Macromolecules*, 304, 140951.

Anand, S., & Sunajadevi, K. R. (2024). Optimizing malachite green adsorption with Co-PTC metal organic framework: Insights into mechanisms and performance. *Journal of Molecular Structure*, 1318, 139256.

Asim, J., Afzal, M. Y., Rehman, S., Shaikh, A. J., Ahmad, F., Amin, M. T., ... & Bilal, M. (2026). Fish-scale-derived carbon quantum dots coupled with ZnO/Co3O4 for adsorption-assisted visible-light decolorization of reactive black 5. *RSC advances,* 16(41), 48850-48868.

Bansal, H., Sethi, P., & Basu, S. (2025). Nanoflower-like ZnO–carbon quantum dot heterostructures for solar-driven degradation of methylene blue: a high-performance and recyclable photocatalyst for sustainable wastewater treatment. *Materials Advances*, 6(20), 7585-7598.

Bansal, H., Sethi, P., & Basu, S. (2025). Nanoflower-like ZnO–carbon quantum dot heterostructures for solar-driven degradation of methylene blue: a high-performance and recyclable photocatalyst for sustainable wastewater treatment. *Materials Advances,* 6(20), 7585-7598.

Beegum, K. B., Ganesh, S., Sabu, C., Varghese, A. S., AS, A., Thomas, C., ... & Raman, R. (2024). Purification of textile wastewater by collective degradation using nanorods of cesium titanium bromide (CsTiBr3) perovskite. *Surfaces and Interfaces*, 55, 105358.

Bekele, E. A., Korsa, H. A., Desalegn, Y. M., & Bekele, G. G. (2025). Optimization of binary ZnO/rGO nanocomposite for enhanced photocatalytic degradation of rhodamine B dye using response surface methodology. *Journal of Alloys and Compounds*, 183779.

Boonserm, K., Charoenchit, P., Sutcha, A., Jutimoosik, J., & Phinjaroenphan, R. (2026). Synergistic effect of CuO@ NiO@ Fe2O3 heterostructure on photocatalytic efficiency and cyclic stability in wastewater treatment. *Journal of Nanoparticle Research*, 28(9), 220.

Busharat, M. A., Shukrullah, S., Ibrahim, A. A., Naz, M. Y., Iqbal, M., Khan, Y., & Shoaib, M. (2024). Effect of Nonthermal plasma on cation distribution and photocatalytic activity of MgFe2O4 nanoparticles for Dye Degradation Application. *International Journal of Chemical Engineering*, 2024(1), 8059559.

Cabrera, A. F., Torres, C. E. R., de la Presa, P., & Stewart, S. J. (2026). Magnetically recoverable $MgFe_2O_4$ nanoparticles as efficient catalysts for rapid dye degradation in water. *Environmental Science and Pollution Research,* 1-14.

Chakradhar, S. P., Krushna, B. R., Manjunatha, K., Yu, S. L., Yu, Y. T., Wu, S. Y., & Nagabhushana, H. (2025). Green synthesized rGO@ $Pr_6O_{11}$ nanocomposites: Efficient photocatalytic degradation of rhodamine B and enhanced energy storage performance. *Journal of Energy Storage*, 128, 117205.

Chen, C., Yan, Z., Ma, Z., Ma, D., Xing, S., Li, W., ... & Han, Q. (2025). Magnetic Fe3O4 nanoparticles supported on carbonized corncob as heterogeneous Fenton catalyst for efficient degradation of methyl orange. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 77, 144-155.

Chufa, B. M., Gonfa, B. A., & Anshebo, T. Y. (2021). Enhanced photocatalytic activity of reduced graphene oxide/bismuth sulfide nanostructure composites for the degradation of methylene blue. *Journal of Nanomaterials,* 2021(1), 1309961.

Divakara, S. G., Mahesh, B., Jayanna, B. K., & Anil Kumar, H. G. (2025). Photocatalytic degradation of crystal violet dye using honey mediated synthesis of NiFe2O4 nanoparticles. *Green Chemistry Letters and Reviews*, 18(1), 2543931.

Dulta, K., Koşarsoy Ağçeli, G., Chauhan, P., Jasrotia, R., Chauhan, P. K., & Ighalo, J. O. (2022). Multifunctional CuO nanoparticles

with enhanced photocatalytic dye degradation and antibacterial activity. *Sustainable Environment Research*, 32(1), 2.

Elbadawy, H. A., Elhusseiny, A. F., Hussein, S. M., & Sadik, W. A. (2023). Sustainable and energy-efficient photocatalytic degradation of textile dye assisted by ecofriendly synthesized silver nanoparticles. *Scientific Reports,* 13(1), 2302.

El-Mas, S. M., Hassaan, M. A., El-Subruiti, G. M., Eltaweil, A. S., & El Nemr, A. (2025). Microwave-induced degradation of Congo red dye in the presence of 2D Ti3C2Tx MXene as a catalyst. *Scientific Reports,* 15(1), 634.

Fadhil, D. H., Al-Mashhadani, M. H., Mortada, W. I., Alsayed, R., & Khalifa, M. E. (2026). Eco-derived chitosan–cellulose hybrid from pomegranate Peel for enhanced uptake of methyl Orange dye. *Results in Chemistry*, 103371.

Fang, D., Li, X., Chi, S., Dang, J., An, X., Jin, T., & Wang, J. (2025). Construction of a novel surface plasmon resonance enhanced Z-scheme Cu| CuBi2O4/Bi/Bi2O3 photocatalyst film for effective organic pollutant degradation and simultaneous hydrogen evolution. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 191, 109374.

Fatima, S., Ali, S. I., Iqbal, M. Z., & Rizwan, S. (2020). Congo red dye degradation by graphene nanoplatelets/doped bismuth ferrite nanoparticle hybrid catalysts under dark and light conditions. *Catalysts*, 10(4), 367.

Foroushani, M. M. Z., Dinari, M., Farahmand, S., & Ghiaci, M. (2025). Impregnation-synthesized ZnO/CuO hybrid for high-efficiency methylene blue degradation in wastewater treatment application. *Results in Engineering,* 106884.

Foroutan, R., Peighambardoust, S. J., Boffito, D. C., & Ramavandi, B. (2022). Sono-photocatalytic activity of cloisite 30B/ZnO/Ag2O

nanocomposite for the simultaneous degradation of crystal violet and methylene blue dyes in aqueous media. *Nanomaterials,* 12(18), 3103.

Goudjil, M. B., Dali, H., Zighmi, S., Mahcene, Z., & Bencheikh, S. E. (2024). Photocatalytic degradation of methylene blue dye with biosynthesized Hematite α-Fe2O3 nanoparticles under UV-Irradiation. *Desalination and water treatment*, 317, 100079.

Gunture, Singh, A., Bhati, A., Khare, P., Tripathi, K. M., & Sonkar, S. K. (2019). Soluble graphene nanosheets for the sunlight-induced photodegradation of the mixture of dyes and its environmental assessment. *Scientific reports,* 9(1), 2522.

Hieu, V. Q., Phung, T. K., Nguyen, T. Q., Khan, A., Doan, V. D., Tran, V. A., & Le, V. T. (2021). Photocatalytic degradation of methyl orange dye by Ti3C2–TiO2 heterojunction under solar light. *Chemosphere*, 276, 130154.

Hitkari, G., Chowdhary, P., Kumar, V., Singh, S., & Motghare, A. (2022). Potential of Copper-Zinc Oxide nanocomposite for photocatalytic degradation of congo red dye. *Cleaner Chemical Engineering,* 1, 100003.

Husain, A., Ali, A., Alqarni, S. A., Ansari, K., Danish, M., Gunnasegaran, P., ... & Kang, K. T. (2025). Recycling waste for energy: Reusing methyl orange dye-adsorbed polythiophene/Fe3O4 nanorods/reduced graphene oxide nanocomposite as a supercapacitor electrode. *Journal of Science: Advanced Materials and Devices,* 10(2), 100865.

Ibrahem, H., Gomaa, H., Gahlan, A. A., & Nagiub, A. M. (2026). Sustainable synthesis of Ag/UiO-66 composites using recycled silver for efficient adsorption of methylene blue and crystal violet. *Scientific Reports*, 16(1), 24904.

Kabadayi, O., Altintig, E., & Ballai, G. (2024). Zeolite supported zinc oxide nanoparticles composite: Synthesis, characterization, and photocatalytic activity for methylene blue dye degradation. *Desalination and Water Treatment*, 319, 100433.

Kalaycıoğlu, Z., Özuğur Uysal, B., Pekcan, O., & Erim, F. B. (2023). Efficient photocatalytic degradation of methylene blue dye from aqueous solution with cerium oxide nanoparticles and graphene oxide-doped polyacrylamide. *ACS omega*, 8(14), 13004-13015.

Kenda, G. T., Fotsop, C. G., Tchuifon, D. R. T., Kouteu, P. A. N., Fanle, T. F., & Anagho, S. G. (2024). Building TiO2-doped magnetic biochars from Citrus sinensis peels as low-cost materials for improved dye degradation using a mathematical approach. *Applied Surface Science Advances, 19*, 100554.

Khalaji, A. D. (2024). NiFe2O4 prepared by the chitosan-assisted route for the photodegradation of methylene blue under simulated sun light irradiation. *Chemical Physics Impact*, 8, 100652.

Khatun, M., Mitra, P., & Mukherjee, S. (2023). Effect of band gap and particle size on photocatalytic degradation of NiSnO3 nanopowder for some conventional organic dyes. *Hybrid Advances,* 4, 100079.

Kitchamsetti, N., Chakra, C. S., De Barros, A. L. F., & Kim, D. (2023). Development of MOF based recyclable photocatalyst for the removal of different organic dye pollutants. *Nanomaterials,* 13(2), 336.

Kumar, S. A., Jarvin, M., Inbanathan, S. S. R., Umar, A., Lalla, N. P., Dzade, N. Y., ... & Baskoutas, S. (2022). Facile green synthesis of magnesium oxide nanoparticles using tea (Camellia sinensis) extract for efficient photocatalytic degradation of methylene blue dye. *Environmental Technology & Innovation,* 28, 102746.

Lan, X., Chu, Z., Zhou, J., Wang, G., & Zhu, M. (2025). Electrochemical efficient degradation of methylene blue (MB) by two-step electrodeposited Ti/TiO2-NTs/β-PbO2 electrode: Performance, degradation mechanism, and toxicity study of intermediate products. *Ecotoxicology and Environmental Safety,* 307, 119419.

Langa, C., Mabuba, N., Ndlovu, S., Motaung, D. E., & Hintsho-Mbita, N. C. (2026). Green-synthesised Ce-doped NiS/carbon sphere nanocomposites for enhanced photocatalytic degradation of Congo red dye: Structural, surface, and mechanistic insights. *Next Nanotechnology,* 10, 100672.

Li, X. Y., Yao, Z. F., Zhang, L. Y., Zheng, G. H., Dai, Z. X., & Chen, K. Y. (2019). Generation of oxygen vacancies on Sr2FeMoO6 to improve its photocatalytic performance through a novel preparation method involving pH adjustment and use of surfactant. *Applied Surface Science,* 480, 262-275.

Liang, P., Yang, W., Peng, H., & Zhao, S. (2024). Efficient degradation of methylene blue in industrial wastewater and high cycling stability of nano ZnO. *Molecules,* 29(23), 5584.

Lin, X., Chen, Y., Zhou, D., Chen, M., Liang, W., & Guo, H. (2024). Aminated graphene quantum dots/CdS nanobelts for enhanced photocatalytic degradation of RhB dye under visible light. *RSC advances,* 14(1), 255-265.

Luan, J., & Liu, B. (2026). Synthesis and Property Detection of the Ho2BiNbO7/ZnBiTmO4 Composite Catalyst for Photocatalytic Degradation of Brilliant Green. *Nanomaterials*, 16(15), 951.

Madaan, V., Kumar, A., Bhankar, V., Singh, P., Kumari, P., & Kumar, K. (2025). Room temperature ferromagnetism and photocatalytic

performance of Neodymium (III)-doped Ceria NPs for rose bengal dye degradation. *Materials Today Communications,* 45, 112259.

Mahajan, M., Kumar, S., Gaur, J., Kaushal, S., Dalal, J., Singh, G., ... & Ahlawat, D. S. (2025). Green synthesis of ZnO nanoparticles using Justicia adhatoda for photocatalytic degradation of malachite green and reduction of 4-nitrophenol. *RSC advances,* 15(4), 2958-2980.

Mandal, S. K., Paul, S., Datta, S., & Jana, D. (2021). Nitrogenated CQD decorated ZnO nanorods towards rapid photodegradation of rhodamine B: A combined experimental and theoretical approach. *Applied Surface Science,* 563, 150315.

Mandal, S. K., Paul, S., Datta, S., & Jana, D. (2021). Nitrogenated CQD decorated ZnO nanorods towards rapid photodegradation of rhodamine B: A combined experimental and theoretical approach. *Applied Surface Science*, 563, 150315.

Meena, P., Banshiwal, P. J., Chandra, S., Kumar, S., Gora, M. K., Meena, P. L., & Kumar, A. (2026). Study of the Structural, Photocatalytic, and Magnetic Properties of Gd3+-Engineered Co0. 5Mg0. 5Fe2-xGdxO4 Ferrite Nanoparticles. *Catalysis Surveys from Asia,* 1-19.

Moghanlou, A. S., Molaei, M., & Fang, T. (2025). A new powerful magnetic dark catalyst based on rGO/Fe3O4/CdSe nanocomposite for ultrafast degradation of methylene blue dye. *Journal of Fluorescence,* 35(7), 5847-5859.

Mohamed, F., Hassaballa, S., Shaban, M., & Ahmed, A. M. (2022). Highly efficient photocatalyst fabricated from the chemical recycling of iron waste and natural zeolite for super dye degradation. *Nanomaterials,* 12(2), 235.

Moosavi, S., Li, R. Y. M., Lai, C. W., Yusof, Y., Gan, S., Akbarzadeh, O., ... & Johan, M. R. (2020). Methylene blue dye photocatalytic degradation over synthesised Fe3O4/AC/TiO2 nano-catalyst: degradation and reusability studies. *Nanomaterials,* 10(12), 2360.

Moosavi, S., Li, R. Y. M., Lai, C. W., Yusof, Y., Gan, S., Akbarzadeh, O., ... & Johan, M. R. (2020). Methylene blue dye photocatalytic degradation over synthesised Fe3O4/AC/TiO2 nano-catalyst: degradation and reusability studies. *Nanomaterials,* 10(12), 2360.

Murugadoss, G., Venkatesh, N., Pandurengan, S., Thiruppathi, G., Sundararaj, P., & Gnanasekaran, L. (2025). Photocatalytic degradation using Bi-doped SnS Quantum dots and phytotoxicity evaluation of treated effluents through seed germination. *Chemical Physics Impact,* 100944.

Nassar, M. Y., NourEldien, M. S., Ibrahim, I. M., & Aly, H. M. (2023). A facile hydrothermal synthesis of S-VO2-cellulose nanocomposite for photocatalytic degradation of methylene blue dye. *Processes,* 11(5), 1322.

Nonthing, S., Panchakeaw, A., Dulyasucharit, R., Nakajima, H., & Nanan, S. (2025). Fe3O4/BiOCl photocatalyst with magnetic recovery property for solar-light-responsive removal of Rhodamine B dye. *OpenNano,* 100260.

Qi, C., Chen, H., Xu, C., Xu, Z., Chen, H., Yang, S., ... & Sun, C. (2020). Synthesis and application of magnetic materials-barium ferrite nanomaterial as an effective microwave catalyst for degradation of brilliant green. *Chemosphere,* 260, 127681.

Qu, J., Liu, X., Zhao, Y., & Ren, Y. (2026). Synthesis of flower-like Bi2WO6/NiO composites by hydrothermal method for highly efficient photocatalytic degradation of RhB. *Inorganic Chemistry Communications*, 117515.

Rajendran, S., Harikaran, D., & R, V. (2026). A 24/7 perovskite catalyst through oxygen vacancy engineering for the rapid catalytic degradation of azo dyes under dark and ambient light conditions. *Materials Advances,* 7(4), 2012-2016.

Sahu, P., & Das, D. (2026). Dark degradation of methylene blue dye by ZnO/Ag2O/rGO heterostructure reactant catalyst. *Next Materials,* 13, 103435.

Saqib, M., Shafiq, F., Qiao, W., Shah, F., & Khan, A. M. (2026). Interfacial engineering of Mn-ZnO/g-C3N4 heterostructure for selective mixed dye degradation under visible light. *Journal of Alloys and Compounds,* 187156.

Sawant, S. A., Nene, A., Somani, S. P., Omanwar, S. K., & Somani, P. R. (2013). Simultaneous waste water purification via photocatalysis and seed germination. *Green and Sustainable Chemistry,* 3(3), 129-133.

Sekar, A., & Yadav, R. (2021). Green fabrication of zinc oxide supported carbon dots for visible light-responsive photocatalytic decolourization of Malachite Green dye: Optimization and kinetic studies. *Optik,* 242, 167311.

Serouti, A., Eddine, L. S., Meneceur, S., Hasan, G. G., Mohammed, H. A., Salmi, C., ... & Abdullah, J. A. A. (2024). Biogenic ZnO/CuO/Fe2O3 nanocomposite: a groundbreaking approach for enhanced degradation capabilities and reusability in dye removal applications. *Arabian Journal for Science and Engineering,* 49(1), 753-764.

Shaban, M., Elwahab, F. A., Ghitas, A. E., & El Zayat, M. Y. (2020). Efficient and recyclable photocatalytic degradation of methylene blue dye in aqueous solutions using nanostructured Cd1− x Co x S

films of different doping levels. *Journal of Sol-Gel Science and Technology*, 95(2), 276-288.

Shah, K., Sahito, O. M., Ali, S., Buledi, J. A., & Tuzen, M. (2026). Sustainable MgO-biochar nanointerface derived from ziziphus mauritiana for enhanced Congo red photodegradation. *RSC advances,* 16(39), 44883-44897.

Shimi, A. K., Ahmed, H. M., Wahab, M., Katheria, S., Wabaidur, S. M., Eldesoky, G. E., ... & Rane, K. P. (2022). Synthesis and applications of green synthesized TiO2 nanoparticles for photocatalytic dye degradation and antibacterial activity. *Journal of Nanomaterials,* 2022(1), 7060388.

Shkir, M., Khan, F. S., & Alshahrani, T. (2025). Biosynthesis of CuO nanoparticles using Caralluma adscendens leaf extract for developed antibacterial and photocatalytic dye degradation properties. *Materials Chemistry and Physics,* 344, 131118.

Shyagathur, S. C., Hiremath, A., Pattar, J., & Rao, H. A. (2025). Visible light harvesting using ZnS/rGO/g-C3N4 heterojunction for crystal violet dye degradation: kinetic and mechanistic insights. *Ceramics International.*

Singh, P., Rani, N., Madaan, V., Kumar, S., Bhankar, V., Kumar, P., & Kumar, K. (2025). Assessment of biomass derived NC-dots decoration on photocatalytic efficiency of Sg-C3N4/g-C3N4 homojunction. *Materials Chemistry and Physics*, 339, 130707.

Tian, C., Zhang, H., Chen, P., Song, Y., & Zhang, J. (2022). Magnetically recyclable wool/Fe3O4@ TiO2/UiO-66 core-shell structured composite for photocatalytic removal of methylene blue, congo red, tetracycline hydrochloride and Cr (VI) ions. *Fibers and Polymers,* 23(10), 2780-2797.

Verma, N., Chundawat, T. S., Chandra, H., & Vaya, D. (2023). An efficient time reductive photocatalytic degradation of carcinogenic dyes by TiO2-GO nanocomposite. *Materials Research Bulletin,* 158, 112043.

Wang, X., Ge, X., Liu, X., Song, X., & Xu, X. (2019). Enhanced degradation performance of organic dye over the reduced double perovskite compound Sr2CaWO6 under visible light irradiation. *Materials Research Express*, 6(8), 085529.

Weldekirstos, H. D., Mengist, T., Belachew, N., & Mekonnen, M. L. (2024). Enhanced photocatalytic degradation of methylene blue dye using fascily synthesized g-C3N4/CoFe2O4 composite under sun light irradiation. *Results in Chemistry,* 7, 101306.

Yifira, M. T., Gebreslassie, G., Mersha, A. K., & Mekonnen, K. N. (2025). Cellulose nanofiber-scaffolded rGO/WO3 membrane for photocatalytic degradation of methylene blue under visible light irradiation. *RSC advances,* 15(28), 22649-22660.

Zhang, X., Chen, W., & Li, X. (2024). Efficiently recyclable Fe-doped ZnO/bacterial cellulose-based composite aerogel for photocatalytic degradation of methylene blue under visible light. *Journal of Polymers and the Environment*, 32(9), 4315-4329.

Zhong, W., Jiang, T., Dang, Y., He, J., Chen, S. Y., Kuo, C. H., ... & Suib, S. L. (2018). Mechanism studies on methyl orange dye degradation by perovskite-type LaNiO3-δ under dark ambient conditions. *Applied Catalysis A: General,* 549, 302-309.

# BÖLÜM 4

# EFFECTS OF COMPOST APPLİCATİONS ON SOİL NİTROGEN MİNERALİZATİON AND NUTRİENT CYCLİNG

**Zemzem FIRAT**[1]

## 1. Introduction

Soils play an important role in the functioning of terrestrial ecosystems, the maintenance of biogeochemical cycles, and the provision of ecosystem services (Zheng et al., 2022). Soil fertility depends not only on meeting the nutrient requirements of plants but also on maintaining suitable physical, chemical, and biological conditions (Wang, 2022; Tudi et al., 2022). Intensive agriculture, imbalanced fertilizer use, and inappropriate tillage practices can lead to a decline in soil biodiversity, loss of organic matter, and increased erosion risk (Vergara et al., 2020). Therefore, maintaining soil organic matter is essential for sustainable agricultural production.

Soil organic matter influences the physical, chemical, and biological properties of soil. It stores nutrients such as nitrogen (N), phosphorus (P), and sulfur (S), and supports their transformation into plant-available forms through microbial decomposition and mineralization (Bashir et al., 2021; Rao et al., 2017). In addition, soil organic matter can contribute to carbon sequestration in soils (Lal, 2020).

Compost is an organic amendment obtained through the decomposition and stabilization of organic materials by

[1] PhD, Harran University, Department of Soil Science and Plant Nutrition, Orcid: 0000-0003-4549-9389

microorganisms under controlled conditions (Cooperband, 2000). Appropriate composting can improve biological stability, reduce phytotoxic compounds, and support pathogen control (Day and Shaw, 2001). Compost application can also contribute to the maintenance of soil organic carbon and influence microbial biomass and enzyme activities (Bellino et al., 2015).

Nevertheless, the use of compost as a fertilizer source has certain limitations. Applying large amounts of compost to meet plant nitrogen requirements may lead to excessive accumulation of phosphorus and potassium in the soil (Möller, 2018). Furthermore, because a substantial proportion of total nitrogen is present in organic forms, the amount of nitrogen available to plants may be limited during the initial growing period. In some composts, the amount of nitrogen that becomes available during the initial period has been reported to account for approximately 5–15% of total nitrogen; however, this proportion varies depending on material characteristics and application conditions (Möller and Schultheiß, 2014). Mineralization over time, in turn, supports the long-term nitrogen-supplying potential of compost (Amlinger et al., 2003).

Nitrogen mineralization is the process by which organic nitrogen is converted into inorganic forms, such as ammonium, through microbial activity. This process is influenced by temperature, moisture, soil properties, microbial activity, and the composition of organic materials (Robertson and Groffman, 2007). The carbon-to-nitrogen (C/N) ratio is an important indicator of the balance between mineralization and microbial nitrogen immobilization. High C/N ratios may promote immobilization, whereas lower ratios may favor net mineralization. However, the decomposability of carbon and the chemical composition of organic nitrogen must also be taken into account (Lazicki et al., 2020). The C/N ratio range of 14:1–19:1 reported for certain organic

amendments should not, however, be regarded as a universal threshold applicable to all materials (Gale et al., 2006).

This book chapter examines the effects of compost application on soil nitrogen mineralization and immobilization in the context of the compost properties and environmental factors that regulate these processes. Furthermore, the effects of compost on soil organic matter, microbial activity, and the cycling of other nutrients are evaluated, and the limitations associated with its agricultural use and approaches to sustainable management are discussed.

## 2. Compost Characteristics and Soil Nutrient Dynamics

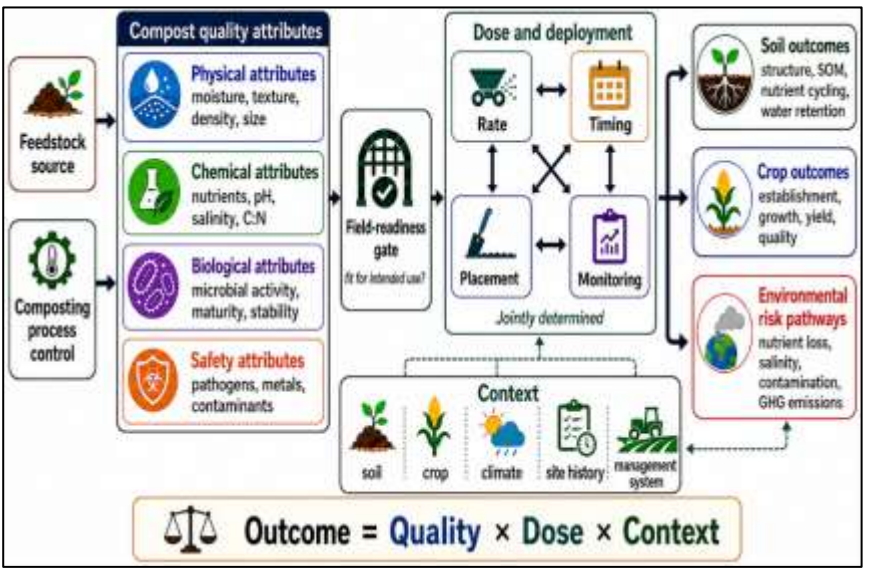
Fertilizers derived from recycled organic waste can contribute to soil fertility by improving the physical, chemical, and biological properties of soils. Organic mulch applications have been reported to influence soil physical properties, while organic amendments can alter soil structure and erodibility (Kara et al., 2021; Kara et al., 2024). Furthermore, the appropriate use of these materials can help reduce the need for phosphorus fertilizers produced from limited natural resources, such as phosphate rock, and ammonia-based nitrogen fertilizers synthesized through the Haber–Bosch process (Diacono and Montemurro, 2010).

Composting is the process of decomposing and biologically stabilizing organic materials by microorganisms under controlled conditions. When carried out under appropriate conditions, this process produces an organic soil amendment with a reduced pathogen load and properties suitable for agricultural use (Cesaro et al., 2019). During composting, the decomposition of a substantial proportion of readily degradable organic compounds can increase the relative proportion of more stable organic components in the resulting material. This may enable compost to contribute to the preservation of soil organic carbon and, under suitable conditions, to organic matter accumulation (Fabrizio et al., 2009). Consequently,

compost may have a greater potential for humus formation than many other organic fertilizers.

The effectiveness of the composting process depends on interactions among physical, chemical, and biological factors. Parameters such as bulk density, porosity, particle size, nutrient content, the carbon-to-nitrogen (C/N) ratio, temperature, pH, moisture, and oxygen supply play important roles in regulating microbial activity and organic matter decomposition (Richard et al., 2002; Agnew and Leonard, 2003). Karadağ et al. (2022) reported that the application of gidya, an organic material of geological origin, and gidya compost affected soil physical properties and plant dry matter production.

*Figure 1. Effects of compost quality and application on soil, plants, and the environment*




*Source: Manono, 2026*

## 3. Chemical Composition, C/N Ratio, and Degree of Compost Maturity

The chemical composition of compost varies according to the amounts and forms of organic carbon, total nitrogen, and nutrients

such as phosphorus, potassium, calcium, magnesium, and sulfur. This variability arises from the characteristics of the raw materials used and the conditions under which composting takes place. During composting, ammonia ($NH_3$) volatilization and gaseous nitrogen emissions can lead to nitrogen losses (Bernal et al., 2017). Minimizing these losses is important for preserving the nitrogen content and fertilization potential of compost (Sommer, 2001). During maturation, nitrification can convert a proportion of ammonium nitrogen ($NH_4^+$-N) into nitrate nitrogen ($NO_3^-$-N). Although nitrate can be taken up by plants, its high mobility makes it susceptible to leaching under suitable conditions. This risk depends on compost characteristics, application rate, and soil and water conditions. Some studies have reported that the use of certain composts at recommended application rates may pose a limited risk of nitrate leaching (Santos et al., 2018). Following compost application to soil, the rate and extent of organic nitrogen mineralization also vary depending on compost maturity, the decomposability of organic nitrogen, and environmental conditions (Lazicki et al., 2020; Reimer et al., 2023).

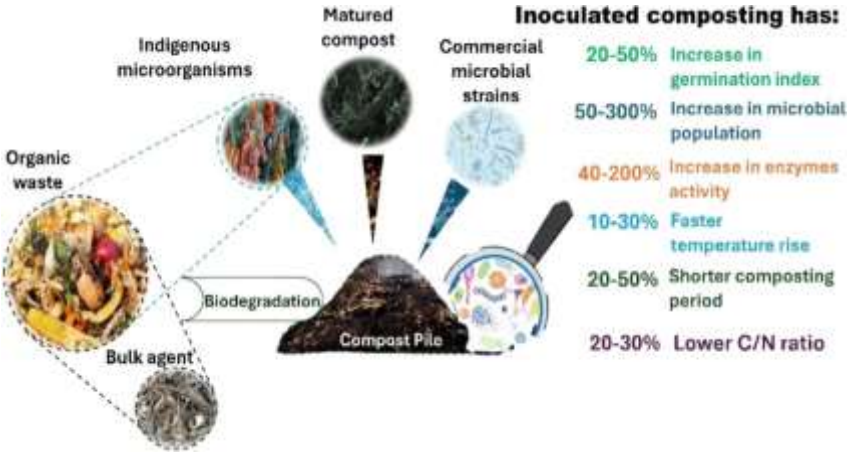
During composting, the carbon-to-nitrogen (C/N) ratio is an important indicator influencing organic matter decomposition and nitrogen transformations. A high initial C/N ratio may limit the availability of nitrogen for microorganisms and slow decomposition, whereas low ratios may increase ammonia volatilization, particularly under conditions of high pH and temperature (Li and Peng, 2011). The effects of the initial C/N ratio on compost maturation and nitrogen losses have also been demonstrated in studies involving different agricultural residues (Zhan et al., 2021). Although a C/N ratio of 25:1–30:1 is generally recommended, the appropriate ratio varies depending on the raw materials used and the biological degradability of carbon (Kumar et al., 2010).

Biological stability and maturity are fundamental indicators for evaluating compost quality for agricultural use (Moral et al., 2009). Biological stability refers to the relative resistance of organic compounds to microbial decomposition and can be assessed using indicators such as respiration activity (Gao et al., 2010). Maturity, in contrast, involves evaluating compost characteristics that may adversely affect plant growth and can be determined using biological tests such as the germination index (Said-Pullicino et al., 2007; Gao et al., 2010). Adequately stabilized and matured composts can contribute to the preservation of soil organic matter and support nutrient cycling (Piccolo et al., 2004). In contrast, immature composts may increase microbial nitrogen immobilization and oxygen consumption and may adversely affect plant growth through the presence of phytotoxic compounds (Bernal et al., 2009).

## 4. Effects of Compost on Soil Organic Matter and Microbial Activity

Compost application can contribute to improving soil fertility and enhancing the physical, chemical, and biological properties of soils by supplying organic carbon and plant nutrients (Gerke, 2022). A proportion of the organic carbon derived from compost is decomposed by microorganisms and incorporated into carbon and nutrient cycling processes, while another proportion may remain in the soil for longer periods. The balance between these processes depends on the chemical composition of the compost, application rate, soil properties, and environmental conditions. Materials rich in organic carbon and nitrogen can support sustainable crop production by influencing microbial activity and nutrient availability (Hiranmai and Vats, 2023; Fiorentino et al., 2025).

*Figure 2. Effects of compost on microbial activity and the composting process*




*Source: Salih et al., 2025*

Soil microorganisms play an important role in organic matter decomposition and in the mineralization and immobilization of nutrients. Compost application can influence microbial biomass and metabolic activity by supplying carbon and energy sources for microorganisms (Guo et al., 2024). These effects vary depending on the content of readily decomposable organic matter in the compost, its degree of maturity, and the initial properties of the soil. Changes in microbial biomass and activity affect the mineralization of organic nitrogen and the immobilization of mineral nitrogen into microbial biomass, thereby contributing to the regulation of nitrogen availability for plants.

The effects of compost application on soil enzyme activities are important for assessing organic matter decomposition and nutrient cycling. Protease and N-acetyl-β-D-glucosaminidase contribute to the decomposition of nitrogen-containing organic compounds; urease catalyzes the hydrolysis of urea; β-glucosidase is involved in the carbon cycle; and phosphatases contribute to the mineralization of organic phosphorus. Dehydrogenase activity is another important indicator used to assess the metabolic activity of

soil microorganisms. Although compost application can increase the activities of certain enzymes by supplying organic substrates, these responses vary depending on compost characteristics, application rate, soil conditions, and the function of the enzyme (Lucchetta et al., 2023).

## 5. Effects of Compost Application on Soil Nitrogen Mineralization

Compost application can influence the biochemical transformations of nitrogen and its availability to plants by supplying organic nitrogen and carbon to the soil. Because a substantial proportion of compost-derived nitrogen is present in organic compounds, its conversion into mineral forms available for plant uptake depends largely on microbial decomposition and mineralization processes. However, the effects of compost on nitrogen mineralization vary depending on the chemical composition of the organic material, its carbon-to-nitrogen (C/N) ratio and degree of maturity, the application rate, and soil conditions. Therefore, evaluating the nitrogen-supplying potential of compost requires consideration not only of its total nitrogen content but also of the distribution of organic and inorganic nitrogen forms, the rate of mineralization, and microbial immobilization processes (Eghball, 2000).

## 6. Microbial Mechanisms of Nitrogen Mineralization and Immobilization

Nitrogen mineralization is a biochemical process through which soil organic nitrogen is converted into inorganic forms by microorganisms, thereby contributing to the pool of nitrogen available to plants (Keuper et al., 2017). During the microbial decomposition of organic nitrogen compounds, ammonium ($NH_4^+$) is released through ammonification (Robertson and Groffman, 2007). The resulting ammonium can be taken up by plants and

microorganisms or, under suitable conditions, converted into nitrite ($NO_2^-$) and subsequently nitrate ($NO_3^-$) through nitrification. The utilization of ammonium and nitrate by microorganisms is influenced by carbon availability, substrate characteristics, and the composition of the microbial community (Recous et al., 1990; Schlesinger, 2005).

The availability of mineral nitrogen in soil is regulated not only by mineralization but also by microbial immobilization. Immobilization is the uptake of mineral nitrogen forms, such as ammonium and nitrate, by microorganisms and their incorporation into cellular organic compounds (Myrold and Bottomley, 2008). Organic materials rich in readily decomposable carbon can stimulate microbial growth and increase microbial nitrogen demand, resulting in the retention of mineral nitrogen in microbial biomass and a reduction in the amount of nitrogen available for plant uptake in the short term. Conversely, nitrogen immobilization may decrease under conditions where readily decomposable carbon is limited (Chen and Stark, 2000).

Nitrogen retained in microbial biomass can subsequently be remineralized and re-enter the soil nitrogen cycle following microbial death and the decomposition of cellular compounds. Therefore, the dynamic balance between mineralization and immobilization plays an important role in determining the amount of plant-available mineral nitrogen following compost application.

## 7. Compost C/N Ratio and the Decomposability of Organic Nitrogen

The carbon-to-nitrogen (C/N) ratio of compost is an important indicator used to assess the balance between organic nitrogen mineralization and microbial immobilization of mineral nitrogen following soil application. In general, the application of materials containing high amounts of readily decomposable carbon

relative to nitrogen can increase microbial nitrogen demand and promote net nitrogen immobilization. Conversely, net nitrogen mineralization may occur when materials have a relatively high nitrogen content and suitable levels of biologically degradable carbon. However, applying a single C/N threshold to all types of compost is inappropriate because nitrogen mineralization dynamics are influenced not only by the total C/N ratio but also by the chemical composition of carbon and the decomposability of organic nitrogen (Myrold and Bottomley, 2008).

During composting, the decomposition of a proportion of readily degradable organic compounds can increase the relative abundance of more stable organic components in mature compost. Therefore, a high total nitrogen content in compost does not necessarily mean that a proportionally equivalent amount of mineral nitrogen will be released after application. The rate of organic nitrogen mineralization can vary depending on compost maturity, biological stability, and the resistance of its organic compounds to microbial decomposition. In addition, environmental factors such as temperature, soil moisture, aeration, and pH regulate mineralization and immobilization processes by influencing microbial activity (Robertson and Groffman, 2007).

## 8. Limitations of Compost Application and Sustainable Management

The physical, chemical, and biological properties of compost can vary considerably depending on the raw materials used and the production conditions. Variations in maturity, biological stability, nutrient content, salinity, and potential contaminant loads determine the effects of compost on soil properties and plant growth (Qureshi et al., 2021; Głąb et al., 2025). Therefore, because compost characteristics vary according to the raw materials used, the quality and suitability of the material should be assessed before application.

## 9. Conclusion

Compost application can contribute to organic waste recycling, the preservation of soil organic matter, and the maintenance of nutrient cycling. However, the effects of compost on soil fertility and plant nutrition vary depending on the characteristics of the material, its degree of maturity and stability, and the conditions of the soil to which it is applied.

The availability of compost-derived nitrogen to plants is determined by the balance between mineralization and microbial immobilization. Therefore, evaluating the fertilizer value of compost requires consideration not only of its total nitrogen content but also of its mineralization potential and changes in nitrogen release over time. Furthermore, determining appropriate application rates based on soil and compost analyses, crop requirements, and nutrient balance is important for improving agronomic effectiveness and reducing environmental risks.

Future research should prioritize comparisons of the nitrogen mineralization potential of composts derived from different raw materials, investigations of mineralization–immobilization processes under long-term field conditions, and the development of management strategies that improve the synchronization of nitrogen release with plant uptake. The integrated assessment of microbial biomass, soil enzyme activities, and organic carbon dynamics would also contribute to a more comprehensive understanding of the effects of compost application on soil health and nutrient cycling. Ultimately, the effective use of compost in sustainable agriculture requires a science-based management approach that considers soil and crop requirements while accounting for potential environmental risks.

**References**

Agnew, J. M., & Leonard, J. J. (2003). The physical properties of compost. Compost Science & Utilization, 11(3), 238-264.

Amlinger, F., Götz, B., Dreher, P., Geszti, J., & Weissteiner, C. (2003). Nitrogen in biowaste and yard waste compost: dynamics of mobilisation and availability—a review. European Journal of Soil Biology, 39(3), 107-116.

Bashir, O., Ali, T., Baba, Z. A., Rather, G. H., Bangroo, S. A., Mukhtar, S. D., ... & Bhat, R. A. (2021). Soil organic matter and its impact on soil properties and nutrient status. In Microbiota and biofertilizers, Vol 2: Ecofriendly tools for reclamation of degraded soil environs (pp. 129-159). Cham: Springer International Publishing.

Bellino, A., Baldantoni, D., De Nicola, F., Iovieno, P., Zaccardelli, M., & Alfani, A. (2015). Compost amendments in agricultural ecosystems: confirmatory path analysis to clarify the effects on soil chemical and biological properties. The Journal of Agricultural Science, 153(2), 282-295.

Bernal, M. P., Alburquerque, J. A., & Moral, R. (2009). Composting of animal manures and chemical criteria for compost maturity assessment. A review. Bioresource technology, 100(22), 5444-5453.

Bernal, M. P., Sommer, S. G., Chadwick, D., Qing, C., Guoxue, L., & Michel Jr, F. C. (2017). Current approaches and future trends in compost quality criteria for agronomic, environmental, and human health benefits. Advances in agronomy, 144, 143-233.

Cesaro, A., Conte, A., Belgiorno, V., Siciliano, A., & Guida, M. (2019). The evolution of compost stability and maturity during the full-scale treatment of the organic fraction of municipal solid waste. Journal of environmental management, 232, 264-270.

Chen, J., & Stark, J. M. (2000). Plant species effects and carbon and nitrogen cycling in a sagebrush–crested wheatgrass soil. Soil biology and biochemistry, 32(1), 47-57.

Cooperband, L. R. (2000). Composting: art and science of organic waste conversion to a valuable soil resource. Laboratory medicine, 31(5), 283-290.

Day, M., & Shaw, K. (2001). Biological, chemical and physical processes of composting. Compost utilization in horticultural cropping systems, 17-50.

Diacono, M., & Montemurro, F. (2010). Long-term effects of organic amendments on soil fertility. A review. Agronomy for sustainable development, 30(2), 401-422.

Eghball, B. (2000). Nitrogen mineralization from field-applied beef cattle feedlot manure or compost. Soil Science Society of America Journal, 64(6), 2024-2030.

Fabrizio, A., Tambone, F., & Genevini, P. (2009). Effect of compost application rate on carbon degradation and retention in soils. Waste Management, 29(1), 174-179.

Fiorentino, A., Rajput, F. Z., Di Serio, A., Baldi, V., Guarino, F., Baldantoni, D., ... & Castiglione, S. (2025). Role of plants and urban soils in carbon stock: Status, modulators, and sustainable management practices. Plants, 14(4), 546.

Gale, E. S., Sullivan, D. M., Cogger, C. G., Bary, A. I., Hemphill, D. D., & Myhre, E. A. (2006). Estimating plant-available nitrogen release from manures, composts, and specialty products. Journal of Environmental Quality, 35(6), 2321-2332.

Gao, M., Li, B., Yu, A., Liang, F., Yang, L., & Sun, Y. (2010). The effect of aeration rate on forced-aeration composting of chicken manure and sawdust. Bioresource Technology, 101(6), 1899-1903.

Gerke, J. (2022). The central role of soil organic matter in soil fertility and carbon storage. Soil Systems, 6(2), 33.

Głąb, T., Gondek, K., & Mierzwa-Hersztek, M. (2025). Enhancing soil physical quality with compost amendments: Effects of particle size and additives. Agronomy, 15(2), 458.

Guo, K., Li, G., Wu, P., Yue, Y., Liu, X., Lv, Z., & Zhang, J. (2024). Compost-induced changes in microbial community reinforce the ecosystem functioning of sandy loam soil in China. Soil Use and Management, 40(4), e13145.

Hiranmai Yadav, A. N., & Vats, P. (2023). Improvement of soil health and crop production through utilization of organic wastes: A sustainable approach.

Kara, Z., Koçer, F., Çaylar, M., & Çokkızgın, A. (2024). Effect of different organic regulator application to problematic areas on soil erodibility parameters (Serpentine Soil Sample). *Black Sea Journal of Agriculture*, *7*(2), 184-189.

Kara, Z., Sesveren, S., Köylü, A., & Gönen, E. (2021). Organik malç uygulamalarının toprağın bazı fiziksel özellikleri üzerine etkileri. *Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, *4*(1), 91-95.

Karadağ, Y., Kara, Z., Reis, M., & Yakupoğlu, T. (2022). Gidya uygulamalarının vertisol toprağın bazı fiziksel özellikleri ve mürdümük veriminde meydana getirdiği değişimler. *Bozok Tarım ve Doğa Bilimleri Dergisi*, *1*(1), 1-10.

Keuper, F., Dorrepaal, E., van Bodegom, P. M., van Logtestijn, R., Venhuizen, G., van Hal, J., & Aerts, R. (2017). Experimentally increased nutrient availability at the permafrost thaw front selectively enhances biomass production of deep-rooting subarctic peatland species. Global change biology, 23(10), 4257-4266.

Kumar, M., Ou, Y. L., & Lin, J. G. (2010). Co-composting of green waste and food waste at low C/N ratio. Waste management, 30(4), 602-609.

Lal, R. (2020). Carbon sequestration in agricultural ecosystems. J. Soil Water Conserv, 75, 38A-40A.

Lazicki, P., Geisseler, D., & Lloyd, M. (2020). Nitrogen mineralization from organic amendments is variable but predictable (Vol. 49, No. 2, pp. 483-495).

Li, J., & Peng, S. (2011). Practical manual for composting engineering.

Lucchetta, M., Romano, A., Alzate Zuluaga, M. Y., Fornasier, F., Monterisi, S., Pii, Y., ... & Gaiotti, F. (2023). Compost application boosts soil restoration in highly disturbed hillslope vineyard. Frontiers in Plant Science, 14, 1289288.

Manono, B. O. (2026). Compost Quality and Application Rate as Drivers of Soil Health, Nutrient Cycling, and Crop Performance: A Critical Review and Practical Rate-Design Framework. *Nitrogen*, *7*(2), 58.

Moral, R., Paredes, C., Bustamante, M. A., Marhuenda-Egea, F., & Bernal, M. P. (2009). Utilisation of manure composts by

high-value crops: safety and environmental challenges. Bioresource Technology, 100(22), 5454-5460.

Möller, K. (2018). Soil fertility status and nutrient input–output flows of specialised organic cropping systems: a review. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 112(2), 147-164.

Möller, K., & Schultheiß, U. (2014). Organische Handelsdüngemittel im ökologischen Landbau. Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft eV (KTBL), Darmstadt, Germany.

Myrold, D. D., & Bottomley, P. J. (2008). Nitrogen mineralization and immobilization. Nitrogen in agricultural systems, 49, 157-172.

Piccolo, A., Spaccini, R., Nieder, R., & Richter, J. (2004). Sequestration of a biologically labile organic carbon in soils by humified organic matter. Climatic Change, 67(2), 329-343.

Qureshi, T., Shoaib, H. M., Ali, U., Siddiqi, M. H., Hussain, M. A., & Lateef, H. U. (2021). Comparison of physio-chemical characteristics of different compost samples. Int. J. of Thermal & Environmental Engineering, 18(1), 09-17.

Rao, C. S., Indoria, A. K., & Sharma, K. L. (2017). Effective management practices for improving soil organic matter for increasing crop productivity in rainfed agroecology of India. Current science, 1497-1504.

REcous, S. Y. L. V. I. E., Mary, B., & Faurie, G. (1990). Microbial immobilization of ammonium and nitrate in cultivated soils. Soil Biology and Biochemistry, 22(7), 913-922.

Reimer, M., Kopp, C., Hartmann, T., Zimmermann, H., Ruser, R., Schulz, R., ... & Möller, K. (2023). Assessing long term effects of compost fertilization on soil fertility and nitrogen mineralization rate. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 186(2), 217-233.

Richard, T. L., Hamelers, H. V. M., Veeken, A., & Silva, T. (2002). Moisture relationships in composting processes. Compost science & utilization, 10(4), 286-302.

Robertson, G. P., & Groffman, P. M. (2007). Nitrogen transformations. Soil microbiology, ecology and biochemistry. doi, 10, 341-364.

Said-Pullicino, D., Erriquens, F. G., & Gigliotti, G. (2007). Changes in the chemical characteristics of water-extractable organic matter during composting and their influence on compost stability and maturity. Bioresource technology, 98(9), 1822-1831.

Salih, H. G., Saady, N. M. C., Zhang, B., & Albayati, T. M. (2025). The role of microbial inoculum in improving composting performance and promoting compost maturation: A review. *Green Technologies and Sustainability*, 100316.

Santos, A., Fangueiro, D., Moral, R., & Bernal, M. P. (2018). Composts produced from pig slurry solids: nutrient efficiency and N-leaching risks in amended soils. Frontiers in Sustainable Food Systems, 2, 8.

Schlesinger, W. H. (Ed.). (2005). Biogeochemistry (Vol. 8). Elsevier.

Sommer, S. G. (2001). Effect of composting on nutrient loss and nitrogen availability of cattle deep litter. European Journal of Agronomy, 14(2), 123-133.

Tudi, M., Li, H., Li, H., Wang, L., Yang, L., Tong, S., ... & Ruan, H. D. (2022). Evaluation of soil nutrient characteristics in Tianshan Mountains, North-western China. Ecological Indicators, 143, 109431.

Vergara Cid, C., Ferreyroa, G. V., Pignata, M. L., & Rodriguez, J. H. (2020). Biosolid compost amendment increases soil fertility and soybean growth. Journal of Plant Nutrition, 44(8), 1131-1140.

Wang, X. (2022). Managing land carrying capacity: Key to achieving sustainable production systems for food security. Land, 11(4), 484.

Zhan, Y., Wei, Y., Zhang, Z., Zhang, A. K., Li, Y., & Li, J. (2021). Effects of different C/N ratios on the maturity and microbial quantity of composting with sesame meal and rice straw biochar. Biochar, 3(4), 557-564.

Zheng, W., Rao, C., Wu, Q., Wang, E., Jiang, X., Xu, Y., ... & Yan, W. (2022). Changes in the soil labile organic carbon fractions following bedrock exposure rate in a karst context. Forests, 13(4), 516

BÖLÜM 5

# BIOFUEL PRODUCTION FROM INDUSTRIAL CROPS: POTENTIAL, TECHNOLOGIES, AND SUSTAINABILITY

**Saut CUN**[1]

## 1. Introduction

The continuous increase in global energy demand, the limited availability of fossil fuel reserves, and the adverse effects of greenhouse gas emissions on climate change have made the transition toward renewable energy sources imperative (Cherubini and Strømman, 2011). The transportation sector accounts for a substantial proportion of total greenhouse gas emissions, and biofuels play a strategic role in heavy-duty transport, maritime shipping, and aviation, where electrification remains challenging. Biofuels, particularly in the forms of biodiesel, renewable diesel (hydrotreated vegetable oil-HVO), and sustainable aviation fuel (SAF), are considered important alternatives because their "drop-in" characteristics allow them to be used with existing engines and fuel distribution infrastructure (Energy, 2023; Stillwater Publications, 2025). Lipid- and carbohydrate-based feedstocks play a critical role in the production of these fuels. Industrial crops-including oilseed crops (sunflower, soybean, rapeseed/canola, safflower, castor bean, flax, and hemp), starch- and sugar-producing species, and crops with high lignocellulosic biomass potential-serve as key feedstocks in both first- and second-generation biofuel production chains (Demirbas, 2008; Naik et al., 2010; Nikolić et al., 2025).

[1] Dr, Harran University, Department of Field Crops, Orcid: 0000-0001-6607-8263

Biofuels are traditionally classified according to their generation. First-generation biofuels include ethanol and biodiesel produced from food crops such as soybean, rapeseed, sunflower, maize, and sugarcane, whereas second-generation biofuels rely on non-food lignocellulosic biomass, waste oils, and energy crops that can be cultivated on marginal lands (Sims et al., 2010; Russo et al., 2025). Third- and fourth-generation biofuels involve microalgae, metabolic engineering, and synthetic biology applications (Brennan and Owende, 2010; Luo et al., 2022; Maitra et al., 2024). Criticism of first-generation approaches due to the "food-versus-fuel" dilemma and the risks of indirect land-use change (ILUC) has accelerated the shift toward second-generation biofuels and intermediate cropping systems (Change, 2008; Fargione et al., 2008; Russo et al., 2025). Recent life cycle assessment (LCA) studies have demonstrated the decisive influence of feedstock selection on carbon intensity, indicating that waste oils and crops cultivated on marginal lands generally offer lower-emission profiles (Cherubini and Strømman, 2011; Russo et al., 2025).

This chapter provides a comprehensive examination of the role of industrial crops in biofuel production, focusing on their production and consumption status worldwide and in Türkiye, agronomic characteristics, production technologies, biotechnological improvements, life cycle assessments (LCA), policy dimensions, and future prospects.

## 2. General status of biofuels worldwide and in Türkiye

### 2.1. Global Biofuel Production and Consumption

Global liquid biofuel production increased by approximately 8% in 2024 compared with the previous year. The United States (37%) and Brazil (22%) were the largest producers (Energy, 2023). In the United States, soybean oil is the most widely consumed vegetable oil in the biofuel sector (Stillwater Publications, 2025). In

Türkiye, although sunflower is the dominant oilseed crop, the biofuel potential of industrial crops such as safflower, hemp, and cotton is increasingly being investigated (Karabaş, 2013; Koç and Hamzaoğlu, 2025; KTAE, 2024).

Globally, a substantial proportion of biodiesel production is derived from palm oil (36%), soybean oil (23%), and rapeseed oil (14%), while waste cooking oils also account for a significant share (Nikolić et al., 2025). Sugarcane and maize are the dominant feedstocks for bioethanol production. Europe, particularly Germany, is a leading producer of biogas, whereas pyrolysis technologies remain largely at the pilot and demonstration stages.

*Table 1. Major Feedstock Shares in Global Biodiesel Production*

| **Feedstock** | **Share (%)** | **Major countries** |
|---|---|---|
| Palm oil | 36 | Indonesia, Malaysia |
| Soybean oil | 23 | USA, Brazil |
| Rapeseed/canola oil | 14 | EU, Canada |
| Waste cooking oil | 14 | EU, USA |
| Other | 13 | Russia, Türkiye, Ukraine, Argentina |

*Source: Nikolić vd. (2025); Stillwater Publications (2025); Energy, 2023).*

*Table 2. Use of industrial crops as biofuel feedstocks in major countries*

| **Country/Region** | **Main crop** | **Annual use (million tonnes)** | **Main fuel type** | **Source** |
|---|---|---|---|---|
| USA | Soybean and maize | 6–8 (soybean) | Biodiesel and ethanol | Stillwater, 2025 |
| EU | Rapeseed | 6–7 | Biodiesel | Energy, 2023 |
| Indonesia | Palm oil | 10+ | Biodiesel | Nikolić et al., 2025 |
| Brazil | Sugarcane and soybean | 3–4 (soybean) | Ethanol and biodiesel | Energy Institute, 2025 |
| Türkiye | Sunflower and safflower | Limited | Biodiesel (waste-based and imported feedstocks) | Karabaş, 2013 |

## 2.2. Situation in Türkiye

Türkiye has a biodiesel blending obligation of 0.5‰ (five per thousand), and production relies largely on waste and imported oils. Studies on safflower (Remzibey-05) and hemp (Vezir) have demonstrated the production of biodiesel that meets applicable standards (Karabaş, 2013; KTAE, 2024). The potential of sugar beet and maize as feedstocks for bioethanol production is also being evaluated. Biogas plants operate using agricultural residues and energy crops.

*Table 3. Potential industrial crops in Türkiye*

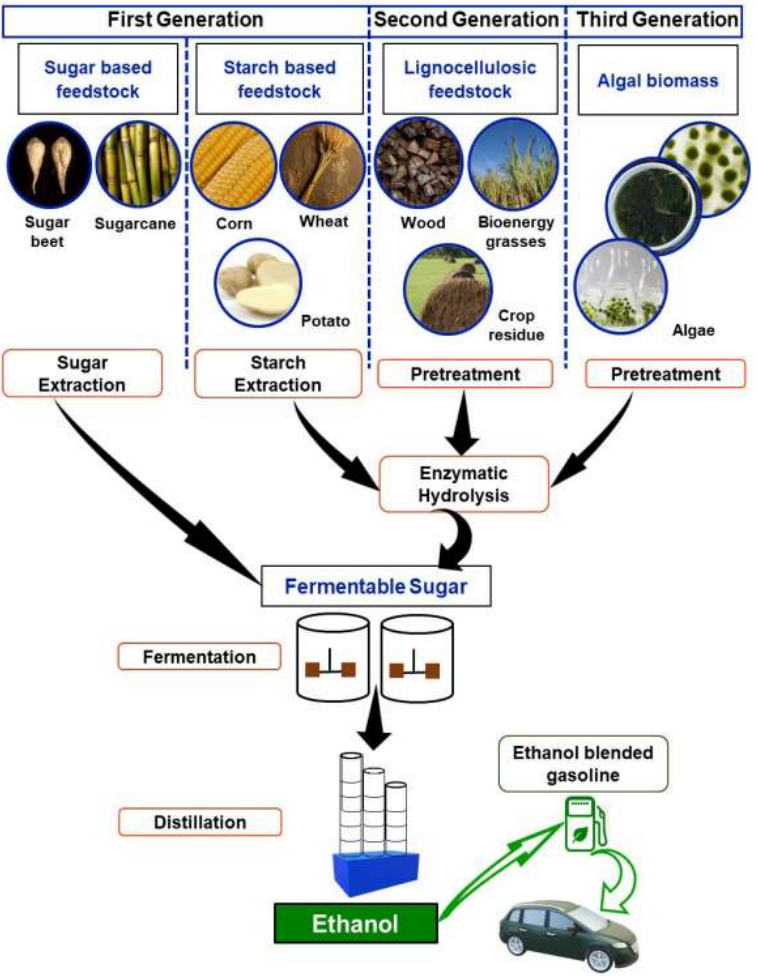
| Crop | Oil/Starch content | Key study | Potential fuel | Source |
|---|---|---|---|---|
| Sunflower | 40–50% oil | Commercial production | Biodiesel | El Marji et al., 2026 |
| Safflower | 30–40% oil | Remzibey-05; biodiesel compliant with EN 14214 | Biodiesel | Karabaş, 2013 |
| Hemp | >30% oil | Biodiesel production from the Vezir cultivar | Biodiesel and biogas | KTAE, 2024 |
| Sugar beet | High sugar content | Domestic production | Bioethanol | - |

## 3. Bioethanol production and its relationship with industrial crops

Bioethanol is produced from sugar- or starch-containing crops through fermentation or from lignocellulosic biomass through pretreatment, hydrolysis, and fermentation (Naik et al., 2010; Sims et al., 2010). First-generation bioethanol feedstocks include sugarcane, which accounts for a substantial share of global production in Brazil, maize in the United States, sugar beet, and sorghum. Sugarcane ethanol in Brazil exhibits a high energy return

on energy invested (ERoEI). In the United States, maize ethanol is supported under the Renewable Fuel Standard.

*Figure 1. Schematic pathways of first-second and third-generation ethanol production*




*Sources: Bera et al., 2020.*

Second-generation bioethanol production relies on lignocellulosic biomass derived from agricultural residues, such as maize stalks and sugarcane bagasse, energy crops such as

switchgrass and miscanthus, and industrial crop residues. Pretreatment methods, including steam explosion and acid or alkaline treatment, make cellulose and hemicellulose more accessible. Enzymatic hydrolysis then releases fermentable sugars, which are converted into ethanol by yeast. Residues such as castor bean meal have also been investigated as feedstocks for bioethanol production in integrated processes (Oliva-Rodríguez et al., 2025). In Türkiye, sugar beet and maize have considerable potential; however, lignocellulosic ethanol production remains limited at the commercial scale. From an agronomic perspective, selecting high-biomass-yielding cultivars and cultivating energy crops on marginal lands can reduce competition with food production (Russo et al., 2025).

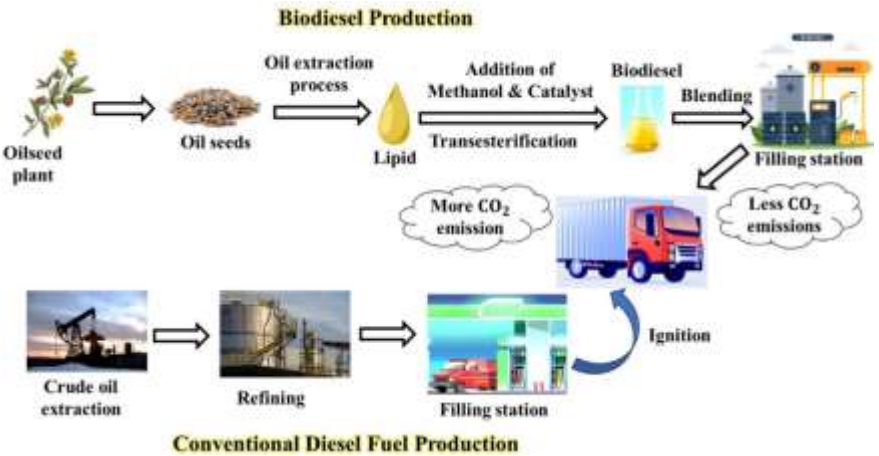
## 4. Biodiesel production and its relationship with industrial crops

Biodiesel is produced through the transesterification of triglycerides obtained from oilseed crops such as soybean, rapeseed, sunflower, safflower, castor bean, and camelina (Nikolić et al., 2025; Khan et al., 2023). Methanol and a catalyst are used in this process, with options including homogeneous catalysts such as NaOH and KOH, heterogeneous catalysts such as CaO, and enzymes. The unsaturated fatty acid profiles of sunflower and safflower oils improve cold-flow properties but may reduce oxidative stability (El Marji et al., 2026). Owing to its high viscosity, castor oil requires specialized processing; yields exceeding 90% have been achieved using ultrasound-assisted methods (Oliva-Rodríguez et al., 2025).

Globally, palm oil from Indonesia and Malaysia, soybean oil from the United States and Brazil, and rapeseed oil from the European Union are the dominant feedstocks. In Türkiye, sunflower and safflower have considerable potential. Biodiesel meeting the EN 14214 standard has been produced from the Remzibey-05 safflower cultivar (Karabaş, 2013). Camelina and Brassica carinata have been cultivated as winter intermediate crops in double-cropping systems, achieving greenhouse gas (GHG) emission reductions of 75–81%

(Ceriani et al., 2024). Metabolic engineering has increased vegetative triacylglycerol (TAG) accumulation in energycane and oilcane, with pilot-scale production achieving a lipid yield of 0.38 t $ha^{-1}$ and a recovery rate of 88.7% (Maitra et al., 2024; Parajuli et al., 2020; Luo et al., 2022; Cao et al., 2023; Kannan et al., 2022).

*Figure 2. Main stages of biodiesel production*




*Sources: Mondal et al., 2025.*

## 5. Biogas and biomethane production and their relationship with industrial crops

Biogas is produced through the anaerobic digestion of organic matter, yielding a mixture primarily composed of methane ($CH_4$) and carbon dioxide ($CO_2$). Industrial crop residues, such as stalks, oilseed cakes, and straw, as well as energy crops such as maize silage, sorghum, and hemp, can be used as feedstocks (Sims et al., 2010). In Germany, maize silage is widely used in biogas plants, whereas in Türkiye, co-digestion systems combining agricultural residues and animal manure are common. In addition to their use in pellets and briquettes, hemp stalks also offer potential as feedstocks for biogas production (KTAE, 2024).

Biomethane is produced by upgrading biogas through the removal of $CO_2$, $H_2S$, and other impurities. It can be injected into natural gas grids or used as a vehicle fuel. In double-cropping systems, the use of camelina and castor bean meal for biogas production has contributed to total greenhouse gas (GHG) emission reductions of up to 81% (Ceriani et al., 2024). Energy crops cultivated on marginal lands can increase soil organic matter while providing sustainable feedstocks for biogas production (Russo et al., 2025). Process optimization, including the adjustment of temperature, carbon-to-nitrogen (C/N) ratio, and pretreatment conditions, can improve methane yields.

## 6. Pyrolysis oil (bio-oil) production and its relationship with industrial crops

Pyrolysis oil (bio-oil) is a liquid product obtained by rapidly heating lignocellulosic biomass in the absence of oxygen through fast pyrolysis, typically at temperatures of 400–600 °C. Industrial crop residues, including sunflower stalks, safflower stalks, hemp stalks, sugarcane bagasse, and maize stalks, as well as energy crops, can serve as feedstocks (Naik et al., 2010; Sims et al., 2010). Bio-oil can be upgraded in refinery processes as an alternative to crude oil or used directly as a fuel. However, its high oxygen content and acidity necessitate stabilization before many applications.

Lignocellulosic residues such as safflower and hemp stalks are suitable for pyrolysis. Studies on safflower stalk yields in Türkiye support the potential of this feedstock (Koç and Hamzaoğlu, 2025). In integrated biorefineries, pyrolysis can be combined with gasification and fermentation to improve resource utilization. Globally, pyrolysis technologies remain at the pilot and demonstration stages, and efforts are underway to reduce scale-up and bio-oil upgrading costs, particularly those associated with hydrotreatment. Lignocellulosic industrial crop residues can

contribute to these processes without creating direct competition with food production.

## 7. First-generation oilseed industrial crops

### 7.1. Soybean and rapeseed/canola

Soybean and rapeseed are among the major feedstocks for global biodiesel production. During transesterification, the methanol-to-oil molar ratio, catalyst type, and reaction time determine the conversion efficiency. Khan et al. (2023) achieved high ester conversion rates and compliance with the EN 14214 standard for rapeseed and sunflower oils under optimized conditions, using molar ratios of 15:1 for rapeseed oil and 18:1 for sunflower oil at 50 °C. Soybean oil accounts for a substantial share of the biofuel sector in the United States, whereas rapeseed oil is widely used in the European Union (Stillwater Publications, 2025; Nikolić et al., 2025). The main advantages of these crops include their integration into existing agricultural systems and the added value of oilseed meal as a by-product. However, life cycle assessment (LCA) studies indicate that emissions from the agricultural production stage contribute substantially to the overall carbon intensity of first-generation oilseed-based biofuels (Cherubini and Strømman, 2011).

### 7.2. Sunflower

Sunflower oil is an important feedstock, particularly in Europe and Türkiye. The unsaturated fatty acid profile of sunflower oil can improve cold-flow properties while reducing oxidative stability (El Marji et al., 2026; Nikolić et al., 2025). In Türkiye, sunflower is considered both a food crop and a potential biofuel feedstock. Its high oil yield, ranging from 1 to 3 tonnes per hectare, offers an agronomic advantage; however, its use for biofuel production may create competition with food demand.

### 7.3. Safflower and other oilseed crops

Safflower has considerable potential in both global and Turkish agriculture because of its adaptability to dry conditions. Karabaş (2013) demonstrated that biodiesel produced from the Remzibey-05 cultivar met the relevant standards and achieved an ester conversion rate of 98%. Castor bean has also been investigated for use in integrated production systems because of its high oil content. Oliva-Rodríguez et al. (2025) achieved biodiesel yields exceeding 90% through ultrasound-assisted extraction and optimized transesterification. They also produced bioethanol from the residual castor bean meal through enzymatic hydrolysis and fermentation.

## 8. Second-generation crops and crops for marginal lands

### 8.1. Camelina sativa and Brassica carinata

These species can be cultivated as winter intermediate crops. Ceriani et al. (2024) achieved a 75% reduction in greenhouse gas emissions using camelina and castor bean in a double-cropping system in northern Italy. The reduction increased to 81% when biogas produced from the residual oilseed meal was incorporated into the system. Disruption of the TT8 gene using CRISPR technology increased oil content in camelina by more than 20% (Cai et al., 2024). Stamenković et al. (2023) highlighted the suitability of camelina oil for biodiesel production because of its high net energy ratio and low production costs. Russo et al. (2025) and Zanetti et al. (2021) reported that these crops can be cultivated on marginal lands with low input requirements while providing ecological benefits.

### 8.2. Safflower and castor bean on marginal lands

Russo et al. (2025) reported that these crops are suitable for marginal lands because of their low input requirements and tolerance to environmental stresses. They also have the potential to achieve

greenhouse gas emission reductions that satisfy the thresholds established under the Renewable Energy Directive II (RED II). Research on safflower in Türkiye further supports its potential as a source of both stalk biomass and oil (Koç and Hamzaoğlu, 2025).

### 8.3. Hemp and other potential crops

Hemp seed oil has yielded biodiesel that complies with the relevant standards (KTAE, 2024). Lignocellulosic residues from hemp can also be utilized for second-generation bioethanol and biogas production. Energy crops such as switchgrass and miscanthus, together with agricultural residues, are important sources of lignocellulosic biomass for biofuel production (Sims et al., 2010).

## 9. Production technologies and process optimization

### 9.1. Transesterification and catalysts

Transesterification is the most widely used method for biodiesel production. Homogeneous catalysts, such as NaOH and KOH, provide high yields but can create challenges related to wastewater generation and catalyst recovery. Heterogeneous catalysts, including CaO and metal oxides, offer advantages in catalyst recovery, whereas enzymes enable processing at lower temperatures and produce high-purity products (Afolabi et al., 2026). Ultrasound-assisted processes and supercritical methanol applications can shorten reaction times and improve yields (Oliva-Rodríguez et al., 2025). Process optimization is particularly important when using oils with high viscosity, such as castor bean and safflower oils.

### 9.2. Integrated biorefinery approaches

Utilizing oilseed meal and other residues for biogas or bioethanol production improves both economic and environmental performance. Ceriani et al. (2024) increased greenhouse gas

emission reductions to 81% by incorporating biogas production from oilseed meal into a double-cropping system. Oliva-Rodríguez et al. (2025) produced bioethanol from castor bean meal through enzymatic hydrolysis and fermentation. These approaches strengthen the biorefinery concept by improving feedstock utilization efficiency.

## 10. Sustainability, life cycle assessment (LCA), and challenges

### 10.1. Life cycle assessments

LCA studies demonstrate that feedstock selection is a key determinant of carbon intensity. Crops cultivated on marginal lands and waste oils generally offer lower-emission profiles (Russo et al., 2025; Cherubini and Strømman, 2011). First-generation biofuel crops are often associated with relatively high emissions during the agricultural production stage. The rapid growth in advanced biofuel consumption in the European Union highlights the influence of policy support (Energy, 2023).

### 10.2. The food-versus-fuel dilemma and land use

Indirect land-use change (ILUC) risks can be reduced through second-generation biofuel production and intermediate cropping systems (Change, 2008; Fargione et al., 2008). Crops cultivated on marginal lands can also provide ecological benefits, including increased soil organic matter and erosion control (Russo et al., 2025).

### 10.3. Policy dimensions and future prospects

Policies such as the European Union's Renewable Energy Directive II and III (RED II/III) and the United States' Renewable Fuel Standard (RFS) promote advanced biofuels. In Türkiye, incentives for domestic feedstocks and programs supporting the use of marginal lands could help realize the sector's potential. In the future, metabolic engineering, intermediate cropping systems, and

the integration of waste oils are expected to contribute to a more sustainable lipid supply.

## 11. Conclusion

Biofuel production from industrial crops initially developed on a global scale through first-generation systems based on soybean, rapeseed, and palm oils. Today, the sector is shifting toward second-generation and advanced approaches that incorporate waste oils, crops cultivated on marginal lands (Camelina sativa, Brassica carinata, safflower, and castor bean), and metabolic engineering strategies involving oilcane and energycane. While the consumption of advanced biofuels and the use of soybean oil are increasing in the European Union and the United States, sunflower remains the dominant oilseed crop in Türkiye, and research on safflower and hemp highlights the country's domestic biofuel potential.

Achieving a balance between food security, carbon emissions, and economic feasibility requires an integrated assessment of crop selection, cultivation systems, processing technologies, and life cycle assessment (LCA). Under Türkiye's agricultural conditions, developing the use of marginal lands and intermediate cropping systems offers significant opportunities to strengthen both energy security and agricultural diversification. Future research should focus on developing cultivars adapted to local ecological conditions, integrating biorefinery systems, and strengthening policy support. These efforts will enhance the role of industrial crops throughout the biofuel production chain.

## References


Afolabi, O. A., Ndou, N., & Afolabi, F. O. (2026). Perspective Chapter: Technological Innovations in Biodiesel Production for Economic Viability and Market Integration.

Bera, T., Inglett, K. S., & Wilkie, A. C. (2020). Biofuel: Concepts and Considerations: SL475/SS688, 9/2020. *EDIS*, *2020*(5).

Brennan, L., & Owende, P. (2010). Biofuels from microalgae—a review of technologies for production, processing, and extractions of biofuels and co-products. *Renewable and sustainable energy reviews*, *14*(2), 557-577.

Cai, Y., Liang, Y., Shi, H., Cui, J., Prakash, S., Zhang, J., ... & Shanklin, J. (2024). Creating yellow seed Camelina sativa with enhanced oil accumulation by CRISPR-mediated disruption of Transparent Testa 8. *Plant biotechnology journal*, *22*(10), 2773-2784.

Cao, V. D., Kannan, B., Luo, G., Liu, H., Shanklin, J., & Altpeter, F. (2023). Triacylglycerol, total fatty acid, and biomass accumulation of metabolically engineered energycane grown under field conditions confirms its potential as feedstock for drop-in fuel production. *GCB Bioenergy*, *15*(12), 1450-1464.

Ceriani, M., D'Imporzano, G., De Nisi, P., Ghidoli, M., Rapone, I., Pilu, S., & Adani, F. (2024). Improving biodiesel sustainability by double-cropping oilseed and oil-less seed cake recovery: A field approach in northern Italy. *Energy Conversion and Management: X*, *24*, 100821.

Change, L. U. (2008). Use of US croplands for biofuels increases. *science*, *1151861*(1238), 319.

Cherubini, F., & Strømman, A. H. (2011). Life cycle assessment of bioenergy systems: state of the art and future challenges. *Bioresource technology*, *102*(2), 437-451.

Demirbas, A. (2008). Importance of biomass energy sources for Turkey. *Energy policy*, *36*(2), 834-842.

El Marji, L., Sharara, M., El Chakik, D., Nakad, M., Assaf, J. C., & Estephane, J. (2026). A Comparative Review of Biomass Conversion to Biodiesel with a Focus on Sunflower Oil: Production Pathways, Sustainability, and Challenges. *Processes*, *14*(3), 441.

Energy Institute. (2025). *Big in biofuels: a Brazil success story*. New Energy World. https://knowledge.energyinst.org/new-energy-world/article?id=138477

Energy, C. (2023). Advanced Biofuels in the European Union.

Fargione, J., Hill, J., Tilman, D., Polasky, S., & Hawthorne, P. (2008). Land clearing and the biofuel carbon debt. *Science*, *319*(5867), 1235-1238.

Kannan, B., Liu, H., Shanklin, J., & Altpeter, F. (2022). Towards oilcane: preliminary field evaluation of metabolically engineered sugarcane with hyper-accumulation of triacylglycerol in vegetative tissues. *Molecular Breeding*, *42*(10), 64.

Karabaş, H. (2013). Ülkemiz Islahçı Çeşitlerinden Remzibey-05 Aspir (Carthamus tinctorius L.) Tohumlarından Üretilen Biyodizelin Yakıt Özelliklerinin İncelenmesi. *Uludağ Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, *27*(1), 9-17.

Khan, E., Ozaltin, K., Spagnuolo, D., Bernal-Ballen, A., Piskunov, M. V., & Di Martino, A. (2023). Biodiesel from rapeseed and sunflower oil: effect of the transesterification conditions and oxidation stability. *Energies*, *16*(2), 657.

Koç, H., & Hamzaoğlu, S. (2025). Aspir Genotiplerinin Sap Verimi ve Samanlarının Bazı Yem Değerlerinin Belirlenmesi. *Tarim ve Doga Dergisi*, *28*(1), 256.

KTAE, (2024). *Kenevir tarımı ve kenevirden biyodizel üretimi çalışmaları*. Karadeniz Tarımsal Araştırma Enstitüsü, T.C. Tarım ve Orman Bakanlığı, Tarımsal Araştırmalar ve Politikalar Genel Müdürlüğü (TAGEM). www.tarimorman.gov.tr

Luo, G., Cao, V. D., Kannan, B., Liu, H., Shanklin, J., & Altpeter, F. (2022). Metabolic engineering of energycane to hyperaccumulate lipids in vegetative biomass. *BMC biotechnology*, *22*(1), 24.

Maitra, S., Cheng, M. H., Liu, H., Cao, V. D., Kannan, B., Long, S. P., ... & Singh, V. (2024). Sustainable co-production of plant lipids and cellulosic sugars from transgenic energycane at an industrially relevant scale: A proof of concept for alternative feedstocks. *Chemical Engineering Journal*, *487*, 150450.

Mondal, S., Gurumoorthy, A. V., & Moorthy, I. G. (2025). Sustainable production of biodiesel from non-edible kernel-derived feedstocks: A comprehensive review of production processes, properties, and optimization. *Results in Chemistry*, 102967.

Naik, S. N., Goud, V. V., Rout, P. K., & Dalai, A. K. (2010). Production of first and second generation biofuels: a comprehensive review. *Renewable and sustainable energy reviews*, *14*(2), 578-597.

Nikolić, B. D., Marković, S. D., Petrović, N. S., Marinković, D. Z., & Jovanović, V. D. (2025). BIODIESEL AND FEEDSTOCKS POSSIBILITIES AND CHARACTERISTICS: A Review. *Thermal Science*, *29*(5A), 3477.

Oliva-Rodríguez, A. G., Salinas De León, F., Morales-Martínez, T. K., Rodríguez-De la Garza, J. A., Medina-Morales, M. A., Cruz-Requena, M., ... & Ríos-González, L. J. (2025). Coproduction of Biodiesel and Bioethanol from Ricinus communis Seed Through an Integrated Process. *Processes*, *13*(9), 2877.

Parajuli, S., Kannan, B., Karan, R., Sanahuja, G., Liu, H., Garcia-Ruiz, E., ... & Altpeter, F. (2020). Towards oilcane: Engineering hyperaccumulation of triacylglycerol into sugarcane stems. *Gcb Bioenergy*, *12*(7), 476-490.

Russo, C., Cirillo, V., Pollaro, N., Terribile, F., Chiodini, A., & Maggio, A. (2025). The global energy challenge: second-generation feedstocks on marginal lands for a sustainable biofuel production. *Chemical and Biological Technologies in Agriculture*, *12*(1), 10.

Sims, R. E., Mabee, W., Saddler, J. N., & Taylor, M. (2010). An overview of second generation biofuel technologies. *Bioresource technology*, *101*(6), 1570-1580.

Stamenković, O. S., Gautam, K., Singla-Pareek, S. L., Dhankher, O. P., Djalović, I. G., Kostić, M. D., ... & Veljković, V. B. (2023). Biodiesel production from camelina oil: Present status and future perspectives. *Food and Energy Security*, *12*(1), e340.

Stillwater Publications, (2025). *Lipid Feedstock Availability for Renewable Fuels: Current Supply, Emerging Sources &*

*Market Outlook*. Stillwater Publications. https://stillwaterpublications.com/lipid-feedstocks-101/

Zanetti, F., Alberghini, B., Marjanović Jeromela, A., Grahovac, N., Rajković, D., Kiprovski, B., & Monti, A. (2021). Camelina, an ancient oilseed crop actively contributing to the rural renaissance in Europe. A review: camelina, an ancient oilseed crop actively contributing to the rural renaissance in Europe. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, *41*(1), 2.

# BÖLÜM 6

# 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).

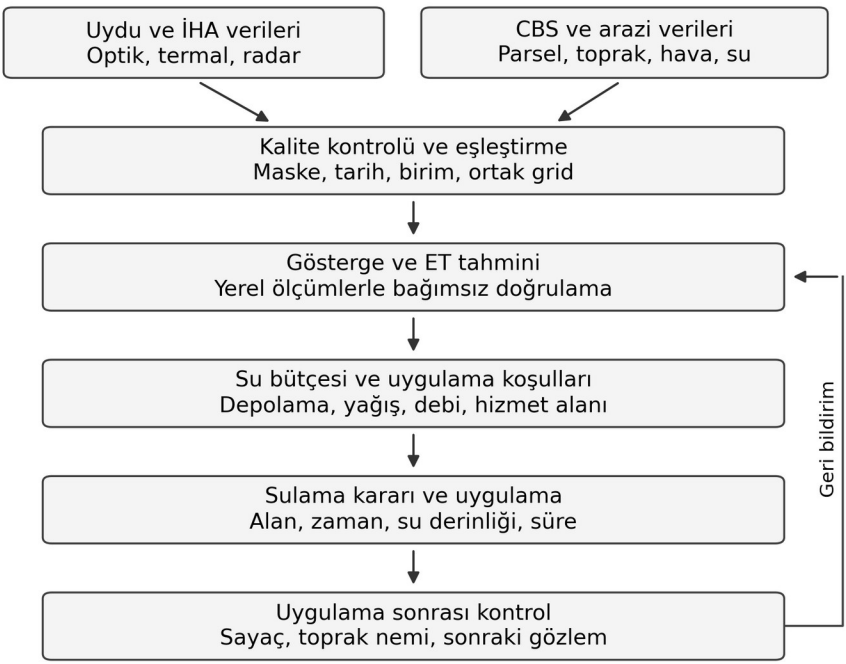
### Yönetim zonları ve uygulanabilir öneriler

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)<br>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)<br>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)<br>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 7
# 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.

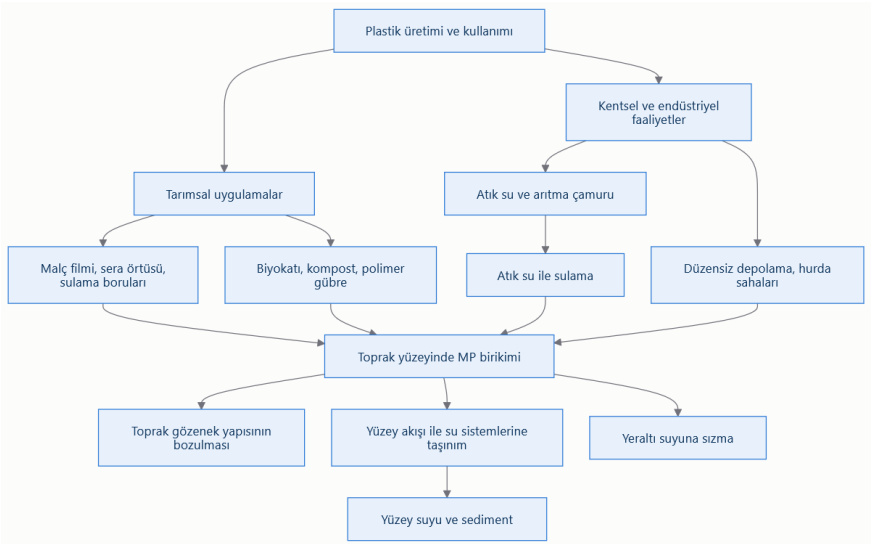
*Çizelge 1. Mikroplastik kaynakları ve bu kaynakların toprak–su sistemlerine etkileri*

| **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*

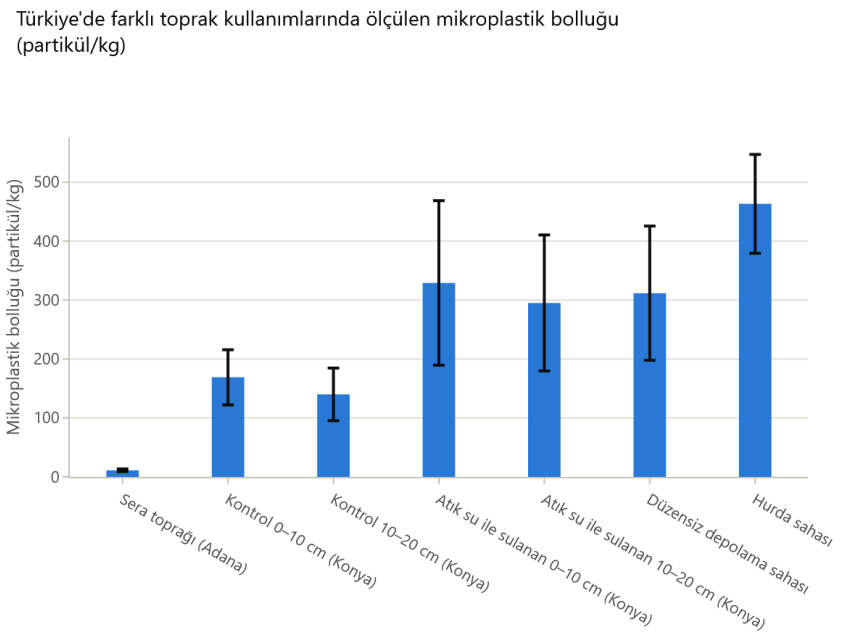
| **Ortam / kullanım** | **Bildirilen değer** | **Kaynak** |
|---|---|---|
| Küresel ortalama (partikül sayısı) | ~1.200 partikül/kg (88–2.830) | (Büks & Kaupenjohann, 2020) |
| Küresel ortalama (partikül sayısı) | ~1.000 partikül/kg (350–1.604) | (Büks & Kaupenjohann, 2020) |
| Tarımsal toprak (kütlesel) | 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**

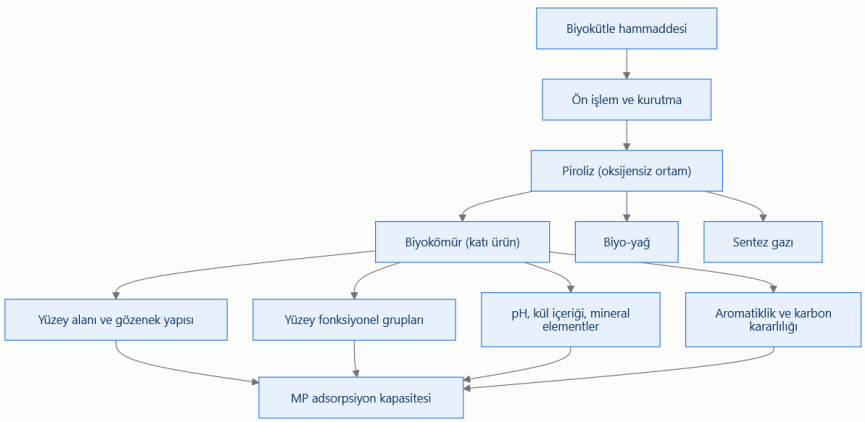
Biyokömürün yüzey alanı, gözenekliliği, aromatikliği ve fonksiyonel grupları hammadde ile piroliz koşullarına bağlıdır. Sıcaklığın artması gözenek gelişimini destekleyebilirken yüzey kimyasını da değiştirir (Tomczyk et al., 2020). Şekil 3 üretim–özellik ilişkisini, Çizelge 3 farklı hammaddelerdeki değerleri 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 m²/g | (Tomczyk et al., 2020) |

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

## Biyokömür–Mikroplastik Etkileşim Mekanizmaları

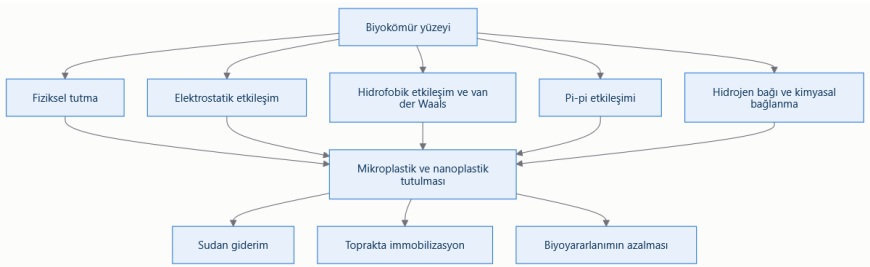
Biyokömür–MP etkileşiminde hidrofobik ve elektrostatik etkileşimler, van der Waals kuvvetleri, π–π etkileşimleri ve hidrojen bağları birlikte rol oynayabilir (Anuwa-Amarh et al., 2024). Modifikasyon, bu mekanizmaların göreli önemini değiştirir (Zheng et al., 2024). Gözeneklerde fiziksel yakalanma da 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).

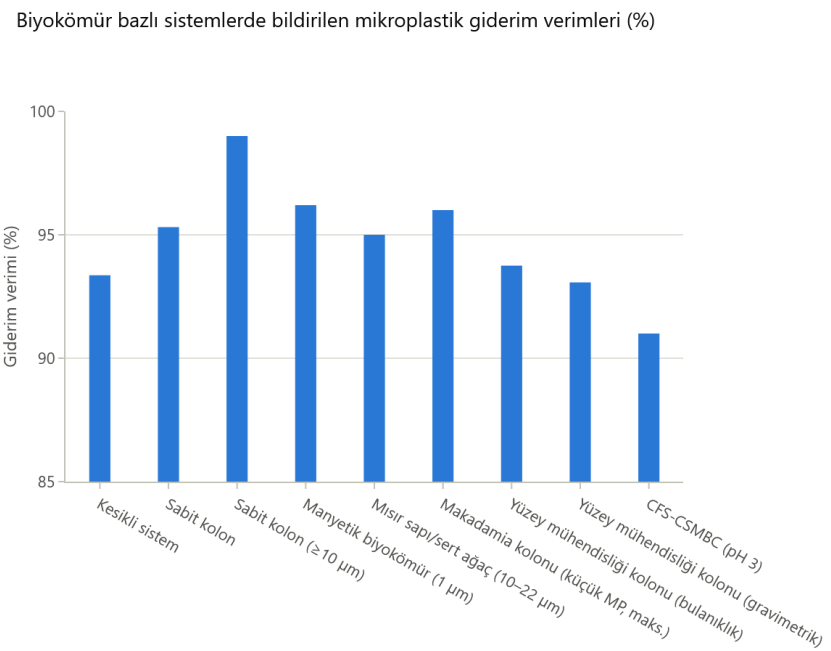
Kitin modifikasyonu manyetik Hindistan cevizi kabuğu biyokömürünün maksimum PS kapasitesini 1,98'den 4,75 mg/g'a yükseltmiştir (Kapoor et al., 2025). Polimer kaplı manyetik biyokömür–zeolit kompozitinde 2 ve 15 µm PS için 736 ve 769 mg/g bildirilmiştir (Babalar et al., 2023). Farklı malzeme ve deney 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

# BÖLÜM 8
# ANAEROBİK ÇÜRÜTME SİSTEMLERİNDE BİYOKÖMÜRÜN BİYOGAZ ÜRETİMİNE ETKİLERİ

**Alperay ALTIKAT**[1]

## Giriş

Anaerobik çürütme (AD), organik atıkları oksijensiz koşullarda biyogaza dönüştürerek atık yönetimi ve yenilenebilir enerji üretimini birleştirir. Hayvan gübresi, tarımsal artıklar, gıda atıkları ve arıtma çamurları başlıca substratlardır. Sürecin uygulanabilirliğini ise substratın ayrışabilirliği, organik yük, amonyak ve uçucu yağ asidi birikimi sınırlar. Biyokömür, bu kısıtları hafifletmek amacıyla kullanılan karbonca zengin bir piroliz ürünüdür; adsorpsiyon, mikrobiyal tutunma ve elektron transferi üzerinden reaktör performansını etkileyebilir (Kumar et al., 2021).

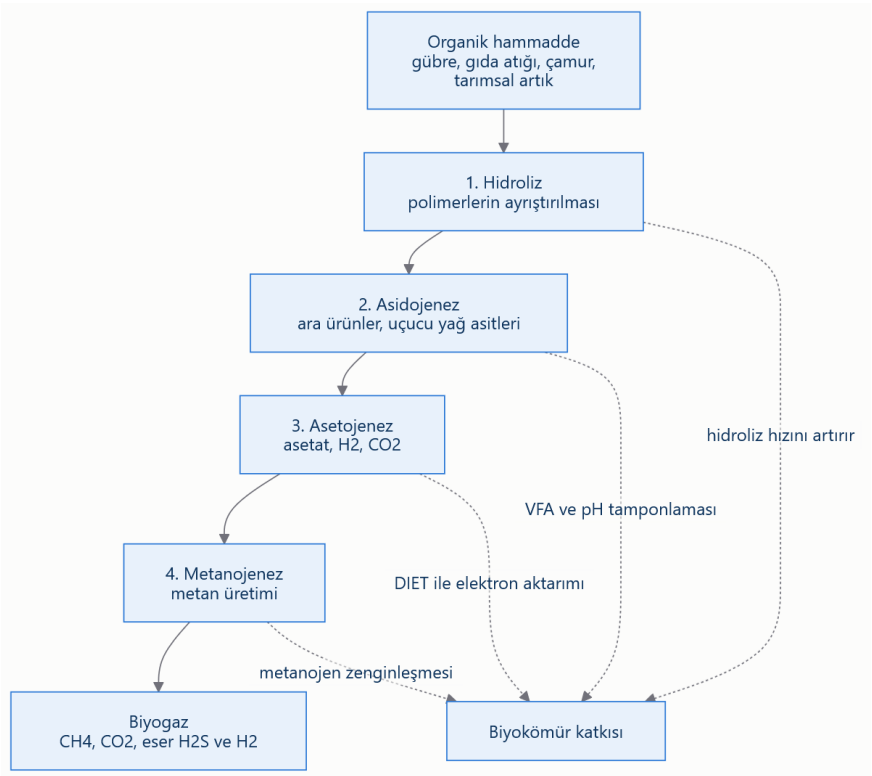
Biyokömürün katkısı her koşulda aynı değildir. Yirmi yedi yayın ve 156 eşleştirilmiş ölçümü kapsayan meta-analizde biyometan üretimi için 5,7 ± 1,04 Hedges d etki büyüklüğü bildirilmiş, ancak bazı çalışmalarda üretim azalmıştır. Hammadde, piroliz sıcaklığı ve doz, yanıtın belirleyicileri arasındadır (Xiao et al., 2021). Bu bölüm; temel süreçleri, performans bulgularını, etki mekanizmalarını ve ekonomik sınırlamaları altı şekil ve beş çizelgeyle birlikte değerlendirir. Amaç, laboratuvar sonuçlarını genel bir verim garantisine dönüştürmeden uygulama koşullarını tartışmaktır.

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

**Anaerobik Çürütmenin Temelleri ve Biyogaz Oluşumu**

AD; hidroliz, asidojenez, asetojenez ve metanojenez aşamalarından oluşur. Karmaşık organik maddeler önce daha küçük bileşiklere, ardından metan oluşumunda kullanılan ara ürünlere dönüşür. Asetoklastik ve hidrojenotrofik metanojenler farklı dönüşüm yollarında görev alır. İki fazlı tasarımlarda bu mikrobiyal süreçlerin işletme koşulları ayrı ayrı düzenlenebilir (Masoud et al., 2025). Şekil 1, biyokömürün yalnızca metanojenezde değil, hidroliz ve ara ürün dönüşümlerinde de etkili olabilecek müdahale noktalarını gösterir.

*Şekil 1. Anaerobik çürütmenin dört aşamalı biyokimyasal dönüşümü ve biyokömürün müdahale ettiği süreç noktaları*



Kaynak: Masoud et al. (2025) temel alınarak düzenlenmiştir.

Biyogazın enerji değeri esas olarak metan içeriğine bağlıdır; bu nedenle performans değerlendirmesinde toplam biyogaz hacmi, metan oranı ve özgül metan verimi birbirinden ayrılmalıdır. Uçucu katı veya substrat kütlesi başına verilen sonuçlar aynı hesaplama temeline dönüştürülmeden karşılaştırılmamalıdır. $H_2S$ gibi safsızlıklar gazın kullanımını ve arıtma gereksinimini etkiler. Biyokömür, reaktör içinde süreç desteği sağlarken reaktör dışında gaz temizleme malzemesi olarak da kullanılabilir (Osman et al., 2022).

Amonyak toksisitesi ve uçucu yağ asidi (VFA) birikimi önemli işletme kısıtlarıdır. VFA birikimi pH düşüşüne, amonyak ise metanojenik etkinliğin baskılanmasına yol açabilir. Etki, yalnızca inhibitör derişimine değil, substrata ve mikrobiyal uyuma da bağlıdır. Bu nedenle biyokömür uygulaması, organik yük ve reaktör kararlılığıyla birlikte değerlendirilmelidir; katkı maddesi kullanımı uygun işletmenin yerini alamaz (Kumar et al., 2021).

**Biyokömür: Üretimi ve Fizikokimyasal Özellikleri**

Biyokömürün özellikleri hammadde ve piroliz koşullarıyla şekillenir. Sıcaklık, bekleme süresi ve ısıtma koşulları; gözeneklilik, elektriksel iletkenlik, yüzey kimyası ve mineral içeriğini birlikte değiştirir. Yüksek sıcaklık bazı biyokömürlerde yüzey alanını ve karbonlaşmayı artırırken oksijenli fonksiyonel grupları azaltabilir. Bu nedenle en yüksek yüzey alanına sahip ürünün her substratta en yüksek metan verimini sağlayacağı varsayılamaz (Bardi et al., 2023).

Yüzey alanı ve gözenekler adsorpsiyon ile mikrobiyal tutunmayı; iletkenlik elektron aktarımını; mineral bileşimi ve yüzey grupları ise tamponlama ve iyon etkileşimlerini etkiler. Gübre kaynaklı biyokömürde yüzey alanının 350 °C'de 0,92 $m^2/g$ iken 700 °C'de 187 $m^2/g$'a çıkması, üretim koşullarının etkisine örnektir

(Osman et al., 2022). Ancak bu özellikler bağımsız değildir ve birinin iyileşmesi diğer işlevlerin aynı ölçüde geliştiği anlamına gelmez.

Katyon değişim kapasitesi, hammadde seçiminin işlevsel sonuçlarından biridir. Pirinç kavuzu, Hindistan cevizi ve odun biyokömürlerinde sırasıyla 43,28 ± 1,49; 31,17 ± 0,35 ve 21,47 ± 0,65 meq/100 g değerleri bildirilmiştir (Kumar et al., 2021). Bu özellik amonyum ve diğer katyonların tutulması açısından anlamlıdır; ancak yüksek kapasite, reaktörde mutlaka aynı oranda inhibisyon azalması sağlayacağı biçiminde yorumlanmamalıdır. Gerçek atıktaki diğer çözünmüş bileşenler ve işletme koşullarıyla birlikte değerlendirilmelidir.

Hammadde seçimi, ürünün karbon ve kül içeriğini, besin elementi katkısını ve üretim maliyetini belirler. Odunsu biyokütle, gübre ve çamur kaynaklı ürünler aynı katkı maddesi gibi değerlendirilmemelidir. Çizelge 1, piroliz sıcaklığının özellikler üzerindeki eğilimlerini ve AD bakımından olası anlamlarını bir araya getirir. Bu ilişkiler, biyokömür seçiminin yalnızca üretim sıcaklığına indirgenemeyeceğini gösterir (Chiappero et al., 2020).

*Çizelge 1. Piroliz sıcaklığının biyokömürün fizikokimyasal özellikleri üzerindeki etkisi ve AD performansı ile ilişkisi.*

| **Özellik** | **Piroliz sıcaklığı arttıkça eğilim** | **AD açısından anlamı** |
|---|---|---|
| Özgül yüzey alanı | Artar (gübre biyokömüründe 350 °C'de 0,92 $m^2/g$ → 700 °C'de 187 $m^2/g$) (Osman et al., 2022) | Adsorpsiyon ve mikrobiyal immobilizasyon kapasitesi yükselir |
| Porozite, gözenek yapısı, elektriksel iletkenlik | Artar (Bardi et al., 2023) | Elektron transferi ve DIET potansiyeli güçlenir |

| Özellik | Piroliz sıcaklığı arttıkça eğilim | AD açısından anlamı |
|---|---|---|
| Karbon kütle fraksiyonu, mikrogözenek hacmi, kül, sabit karbon, karbon stabilitesi | Artar (Chiappero et al., 2020) | Malzeme kararlılığı ve karbon tutma süresi uzar |
| Oksijenli fonksiyonel gruplar, alifatik karbon, N, O, H derişimi | Azalır (Chiappero et al., 2020) | Yüzey kimyası ve iyon değişimi kapasitesi değişir |
| Fonksiyonel grup zenginliği ile metan artışı arasındaki korelasyon | Anlamlı ilişki yok ($R^2 <$ 0,1) (Bardi et al., 2023) | Metan artışı tek başına yüzey kimyasıyla açıklanamaz |
| Mikrobiyal topluluk gelişimi | Piroliz sıcaklığı ile pozitif ilişkili (metan artışıyla $R^2$ = 0,33) (Bardi et al., 2023) | Biochar etkisinin önemli bir bölümünün mikrobiyal topluluk ve DIET üzerinden gerçekleştiği bildirilmektedir (Valentin et al., 2023) |

Kaynaklar: (Osman et al., 2022); (Bardi et al., 2023); (Chiappero et al., 2020); (Valentin et al., 2023)

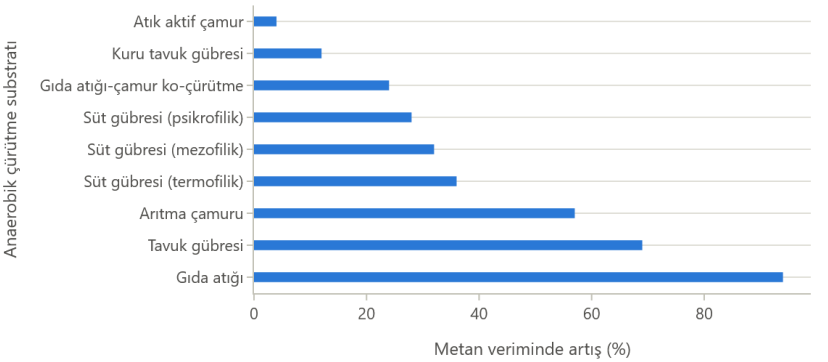
Çizelge 1'deki ilişkiler doğrudan nedensellik kanıtı olarak yorumlanmamalıdır. Fonksiyonel grup zenginliğiyle metan artışı arasında zayıf ilişki ($R^2 < 0,1$), mikrobiyal topluluk gelişimiyle ise orta düzeyde ilişki ($R^2 = 0,33$) bildirilmiştir (Bardi et al., 2023). Dolayısıyla karakterizasyon verileri, reaktör deneyleri ve mikrobiyal bulgular birlikte ele alınmalıdır.

## Biyokömürün Biyogaz Üretimine Kantitatif Etkileri

Derlemelerde metan verimi artışları %4–94 arasında değişmektedir (Osman et al., 2023). Şekil 2'deki karşılaştırma, substrat ve işletme koşullarının önemini ortaya koyar: fosfat yüklü

biyokömürle gıda atığında %94'e varan artış bildirilirken atık aktif çamurda çamur biyokömürünün katkısı %4 düzeyinde kalmıştır. Farklı koşullarda elde edilmiş bu oranlar, biyokömür türlerinin doğrudan başarı sıralaması olarak değerlendirilmemelidir.

*Şekil 2. Farklı anaerobik çürütme substratlarında biyokömür ilavesinin metan veriminde sağladığı artış oranları*




Kaynak: Osman et al. (2023) kaynağından derlenmiştir.

Substrat bileşimi katkının yönünü değiştirebilir. Karbonhidratça, proteince ve lipidçe zengin substratların karşılaştırıldığı çalışmada, arıtma çamuru biyokömürü karbonhidratlı substratın gecikme fazını %48,6 kısaltmış ve kümülatif metan verimini 4,74 kat artırmıştır. Lipidli substratta üretim hızı yükselirken proteinli substratta etki önemsiz kalmıştır (Xu et al., 2020). Bu ayrım, yalnızca toplam organik madde miktarının değil, bileşimin de deney tasarımında kontrol edilmesi gerektiğini gösterir. Sonuçlar, bir substratta başarılı olan biyokömürün diğerinde aynı yanıtı vermeyebileceğine ilişkin doğrudan örnektir.

## Üretim Kinetiği

Nihai metan verimi kadar üretim hızı ve gecikme fazı da önemlidir. Biyokömür ilavesiyle $CH_4$ ve $H_2$ üretimindeki gecikme fazlarının sırasıyla %41–45 ve %21,4–35,7 kısaldığı; manyetik biyokömürle metanojenez gecikmesinin 0,9–1,83 gün azaldığı bildirilmiştir (Kumar et al., 2021). Bu sonuçlar işletmeye alma süresinin kısalabileceğini düşündürür; ancak farklı başlangıç koşullarının karşılaştırılabilirliği gözetilmelidir.

## Doz Optimizasyonu

Doz–yanıt ilişkisi doğrusal değildir; yetersiz doz etkisiz kalabilirken aşırı ilave inhibisyona yol açabilir (Zhang et al., 2019). Çizelge 2, substrat, biyokömür ve doz farklılıklarını koruyarak performans sonuçlarını sunar. Derlemelerde sık kullanılan 10 g/L değeri evrensel optimum değildir (Osman et al., 2022). Bu nedenle ön denemeler, biyokömürsüz kontrol ve substrata uygun doz aralığıyla yürütülmelidir; metan verimi yanında VFA, pH ve amonyak da izlenmelidir.

Arıtma çamuru ve gıda atığının birlikte çürütülmesinde, 30 g/L biyokömür metan konsantrasyonunu yalnızca %1,6–2,8 artırırken 40 ve 70 g/L düzeylerinde %10,6–37,9 artış bildirilmiştir (Lăcureanu & Cocârță, 2025). Bu çalışmada ölçülen metan konsantrasyonu, özgül metan verimiyle aynı gösterge değildir; sonuç yalnızca yüksek dozun daha fazla gaz ürettiği biçiminde okunmamalıdır. Doz artırımı, kazanımın büyüklüğü kadar ilave katı yükü ve malzeme maliyeti açısından da değerlendirilmelidir.

Üretim sıcaklığı ile dozun etkisi de birlikte incelenmelidir. Meyve atığı deneylerinde 350 °C biyokömürüyle 285,7 mL $CH_4$/g maksimum metan verimi bildirilmiş ve bu sonuç 550 °C ürününden yüksek bulunmuştur (Ambaye et al., 2020). Bu bulgu, yüksek piroliz sıcaklığının gözenek ve iletkenlik avantajlarının her durumda daha

yüksek reaktör verimine dönüşmediğini gösterir. Aynı deneysel karşılaştırmada inokulum/substrat oranının değişmesi de yanıtı etkilemiştir. Dolayısıyla doz optimizasyonunda yalnızca biyokömür miktarını değiştiren tek değişkenli denemeler, diğer işletme parametreleri kontrol edildiğinde yorumlanabilir.

*Çizelge 2. Farklı substratlar için biyokömür hammaddesi, dozu ve metan verimi üzerindeki etkiler.*

| **Substrat** | **Biyokömür hammaddesi / üretim koşulu** | **Uygulanan doz** | **Metan verimi üzerindeki etki** |
|---|---|---|---|
| Tavuk gübresi | Meyve odunu, toplam katının %5'i | %5 | +%69 (Osman et al., 2023) |
| Kuru tavuk gübresi | Odun, toplam katının %5'i | %5 | +%12 (Osman et al., 2023) |
| Arıtma çamuru | Mısır sapı | 28 g/L | +%57 (Osman et al., 2023) |
| Gıda atığı | Fosfat yüklü biyokömür | 10 g/L | +%94 (Osman et al., 2023) |
| Atık aktif çamur | Çamur biyokömürü | 10 g/L | +%4 (Osman et al., 2023) |
| Gıda atığı–çamur ko-çürütme | Buğday sapı | 10 g/L | +%24 (Osman et al., 2023) |
| Süt sığırı gübresi | Gübre biyokömürü | 10 g/L | +%28 / +%32 / +%36 (psikrofilik / mezofilik / termofilik) (Osman et al., 2023) |
| Süt sığırı gübresi | Gübre biyokömürü | 10 g/L | Gecikme fazının kısalması, +%35,71 (Osman et al., 2022) |

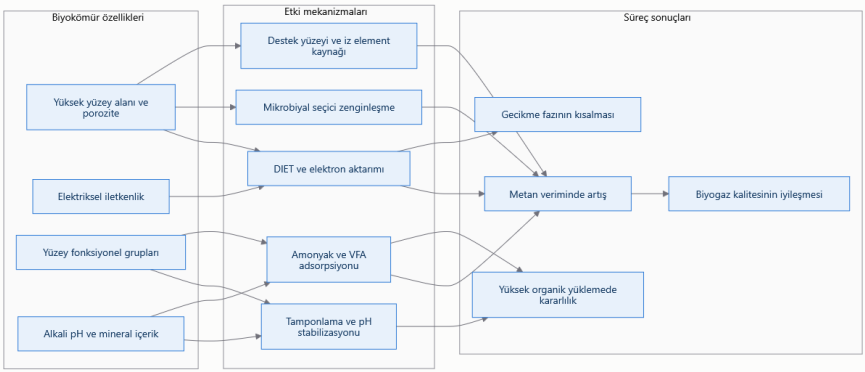
| Substrat | Biyokömür hammaddesi / üretim koşulu | Uygulanan doz | Metan verimi üzerindeki etki |
|---|---|---|---|
| Meyve atığı | Arıtma çamuru biyokömürü, 350 °C | ISR 2 / 1,5 / 1 | +%13 / +%20 / +%27 (Ambaye et al., 2020) |
| Meyve atığı | Arıtma çamuru biyokömürü, 550 °C | ISR 2 / 1,5 / 1 | +%12 / +%18 / +%22 (Ambaye et al., 2020) |
| Karma atık su çamuru | Biyokömür | 10 g/L | Biyogaz 188 → 244 NmL/gün; metan %68 → %69 (Chiappero et al., 2021) |
| Gıda atığı fermentatı | Buğday kepeği peleti, 800 °C | 25 g/L | VFA parçalanma hızında artış, gecikme fazında azalma (Chiappero et al., 2020) |

Kaynaklar: (Osman et al., 2023); (Osman et al., 2022); (Ambaye et al., 2020); (Chiappero et al., 2021); (Chiappero et al., 2020)

## Biyokömürün Etki Mekanizmaları

Biyokömürün etkisi; iletken bir bağlantı yüzeyi oluşturması, mikroorganizmaları tutması, tamponlamaya katkı sağlaması ve inhibitörleri adsorplaması üzerinden açıklanır. Bu süreçler aynı reaktörde birlikte gerçekleşebilir. Şekil 3, malzeme özelliklerinden süreç performansına uzanan ilişkileri özetler. Bir mekanizmanın varlığını yalnızca metan artışından çıkarmak yeterli değildir; kimyasal ve mikrobiyal ölçümlerle desteklenmesi gerekir (Hoang et al., 2022).

*Şekil 3. Biyokömürün fizikokimyasal özellikleri, etki mekanizmaları ve anaerobik çürütme performansı arasındaki ilişki ağı*




Kaynak: Hoang et al. (2022) ve Osman et al. (2022) temel alınarak oluşturulmuştur.

## Doğrudan Türler Arası Elektron Transferi

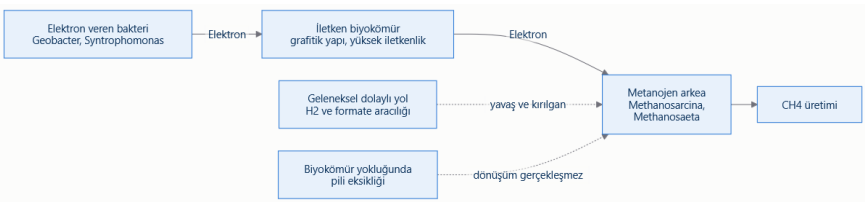
Doğrudan türler arası elektron transferinde (DIET), elektron veren ve alan mikroorganizmalar arasındaki alışveriş iletken malzemelerle desteklenebilir. Biyokömüre tutunan Geobacter metallireducens ve Methanosarcina barkeri hücrelerinin doğrudan agregat oluşturmaması, elektronların biyokömür üzerinden aktarılabileceğine ilişkin deneysel kanıt sağlamıştır (Chen et al., 2014). Şekil 4, bu yaklaşımı geleneksel dolaylı elektron transferiyle karşılaştırır. Bununla birlikte biyokömürün iletkenliği ve mikrobiyal eşleşme, mekanizmanın işlerliğini sınırlar.

İletken malzemenin işlevini değerlendiren ko-kültür deneylerinde, pilA-eksik Geobacter metallireducens suşları ile Methanosarcina barkeri'nin iletken malzeme yokluğunda etanolü metana dönüştüremediği; granüler aktif karbon, karbon bezi veya biyokömür varlığında ise dönüşümün gerçekleştiği bildirilmiştir (Martins et al., 2018). Bu kanıt, bazı hücresel bağlantı eksikliklerinin iletken bir yüzeyle telafi edilebildiğini destekler. Bununla birlikte

kontrollü ko-kültür sonucu, karmaşık atıkla çalışan bütün reaktörlerde aynı mekanizmanın baskın olduğunu göstermez.

Daha yeni bir çalışmada, 550 °C'de üretilen fındık kabuğu biyokömürü kontrol grubuna göre metan üretimini %59 artırmıştır. Grafitizasyon ve metagenomik bulgular, iletkenlik ile DIET'le ilişkili takson ve genlerin zenginleşmesini birlikte göstermiştir (Yang et al., 2025). Bu bulgu, biyokömürün yalnızca pasif adsorban olmadığını destekler; ancak farklı hammaddeler için aynı performansın beklenmesini haklı çıkarmaz.

*Şekil 4. Biyokömür aracılı doğrudan türler arası elektron transferi mekanizması ve geleneksel dolaylı elektron transferinden farkı*




Kaynak: Chen et al. (2014) ve Martins et al. (2018).

## Tamponlama ve İnhibitör Kontrolü

Biyokömürün tamponlama etkisi, mineral bileşenler ve yüzey fonksiyonel gruplarıyla ilişkilidir. VFA oluşumuna bağlı asitlenmenin hafifletilmesi metanojenler için uygun koşulların sürdürülmesine katkı sağlayabilir (Osman et al., 2022). Buna karşın biyokömürlü bir reaktörde pH'ın 5,0'dan 3,0'a düştüğü de bildirilmiştir (Kumar et al., 2021). Bu nedenle başlangıç pH'ı veya biyokömürün alkali karakteri, uzun süreli kararlılığın tek başına göstergesi değildir.

Amonyumun adsorpsiyonu ve mikrobiyal tutunma, amonyak inhibisyonunun hafiflemesine katkı sağlayabilir. Arıtma çamuru deneylerinde toplam amonyak azotu biyokömürlü reaktörlerde 3,43–3,76 g/L, kontrolde 4,28 g/L bulunmuştur (Zhang et al., 2019).

Sürekli işletilen sistemlerde VFA kontrolü de önemlidir: biyokömür takviyeli reaktörlerde dalgalanmaların 1500 mg HAc/L altında tutulabildiği, buna rağmen yüksek amonyak koşullarında ciddi metan kaybı oluşabildiği bildirilmiştir (Yan et al., 2022). Ara ürün kararlılığı ile enerji üretimi birlikte değerlendirilmelidir.

Sürekli işletmeye yakın kanıtlar, kısa kesikli testlerin tamamlayıcısıdır. Yarı sürekli bir çalışmada 3 L hacimli çürütücü, 37 °C'de 100 gün süreyle 10 g/L biyokömür ilavesiyle işletilmiştir. Biyogaz üretimi 188'den 244 NmL/gün'e çıkarken metan oranı %68'den %69'a yükselmiştir (Chiappero et al., 2021). Gaz hacmindeki artışın metan yüzdesindeki artıştan farklı büyüklükte olması, bu iki göstergenin ayrı raporlanması gerektiğini açıkça gösterir. İşletme süresi ve reaktör ölçeği de sonuçla birlikte belirtilmelidir.

**Mikrobiyal Topluluk**

Biyokömür, mikroorganizmaların tutunabildiği bir yüzey sağlayarak topluluk bileşimini seçici biçimde etkiler. Metanobacterium, Methanosaeta ve Methanosarcina'nın zenginleşmesi bazı sistemlerde gösterilmiştir (Valentin et al., 2023). Bununla birlikte takson bolluğundaki artış tek başına DIET'in kanıtı değildir; elektron aktarımı, enzim etkinliği ve reaktör çıktılarıyla birlikte yorumlanmalıdır. Seçici zenginleşmenin substrata ve biyokömürün yüzey özelliklerine bağlı olması, farklı çalışmalardaki sonuçların değişmesini açıklayabilir.

**Kirleticilerin Tutulması**

İnhibitör giderimi, antibiyotik baskısı altındaki sistemlerde de önem taşır. Sefazolin maruziyetinde metan veriminin %28,14'e kadar düştüğü; biyokömür ilavesinin belirli organik yüklerde dirençli bakteri bolluğunu %1'in altına indirerek inhibisyonu hafiflettiği bildirilmiştir (You et al., 2025). Fonksiyonel

biyokömürlerin adsorpsiyon ve mikrobiyal yönlendirme katkıları umut vericidir; ancak kirleticinin tutulması ile kalıcı giderimi aynı kabul edilmemeli, çürütme artığının sonraki kullanımı da değerlendirilmelidir (Chen et al., 2024). Kuru AD üzerine bir çalışmada 1,25 g/L biyokömürün antibiyotik direnç genleriyle ilişkili riskin azaltılmasında uygun sonuç verdiği bildirilmiştir (Wang et al., 2026). Bu doz, metan üretimini en çok artıran dozla aynı olmak zorunda değildir. Enerji kazanımı ve mikrobiyolojik risk azaltımının farklı hedefler olduğu, çok ölçütlü optimizasyon gerektirdiği dikkate alınmalıdır.

**Proses Konfigürasyonları ve Uygulama Stratejileri**

İki fazlı AD, asit oluşturan ve metan üreten mikroorganizmaların koşullarını ayrı düzenlemeyi amaçlar. Böylece hidroliz ve metanojenez arasındaki işletme uyuşmazlıkları azaltılabilir (Masoud et al., 2025). Çizelge 3'teki karşılaştırmalar, faz ayırmanın etkisiyle biyokömür katkısının etkisini ayırt etmek için önemlidir. Çiftlik hammaddelerinde biyokömürlü iki fazlı sistemde 237 L $CH_4$/kg uçucu katı verimi ve biyokömürsüz ikinci faza göre %7 artış bildirilmiştir (Xue et al., 2023). Bu sonuç belirli yükleme ve doz koşullarına aittir.

*Çizelge 3. İki fazlı (iki kademeli) anaerobik çürütmede bildirilen performans sonuçları.*

| **Sistem / substrat** | **Temel bulgu** | **Kaynak** |
|---|---|---|
| Gıda atığı ve aktif çamur ko-çürütme (tek faz vs iki faz) | Biyogaz üretiminde %22 ve uçucu katı bozunmasında %9 artış; ortalama metan içeriği %61,2'den %70,1'e yükselmiştir | (Baldi et al., 2019) |

| Sistem / substrat | Temel bulgu | Kaynak |
|---|---|---|
| Çiftlik hammaddeleri (çim silajı, sığır sulu gübresi) | Kesikli: 230 → 275 L $CH_4$/kg UK; sürekli (4,0 g UK/L/gün): 212 L/kg UK (tek faz) ve 237 L/kg UK (iki faz, 10 g/L biyokömür); en yüksek enerji verimi 8,5 MJ/kg UK | (Xue et al., 2023) |
| İki kademeli süreç (genel değerlendirme) | Eşit KOİ dönüşümünde %10'a kadar yüksek enerji verimi; $H_2$ için 17,7 MJ/kg KOİ, $CH_4$ için 12,5 MJ/kg KOİ; 34 çalışmaya dayalı ortalama veriler: toplam KOİ'nin %72,5 ± 19,1'i $H_2$ ve $CH_4$ olarak geri kazanılmıştır | (Moscoviz et al., 2018) |
| İki fazlı sistemlerde faz ayrımı | Hidroliz/asidojenez ve asetojenez/metanojenez adımlarının ayrılması, yüksek organik yükleme hızlarında daha kararlı işletme ve daha yüksek metan üretkenliği sağlar | (Moscoviz et al., 2018) |

Kaynaklar: (Baldi et al., 2019); (Xue et al., 2023); (Moscoviz et al., 2018)

## Sıcaklık ve İşletme Koşulları

Sıcaklık rejimi, mikrobiyal etkinlik ve katkı maddesine yanıtı birlikte değiştirir. Süt sığırı gübresinde aynı biyokömürle psikrofilik, mezofilik ve termofilik işletmede sırasıyla %28, %32 ve %36 artış bildirilmiştir (Osman et al., 2023). Sonuçlar, sıcaklık yükseldikçe her substratta verimin artacağı biçiminde genellenmemelidir. Sıcaklık değişiminin enerji gereksinimi ve inhibitör dengesi üzerindeki etkileri de dikkate alınmalıdır.

## Biyokömür Modifikasyonu

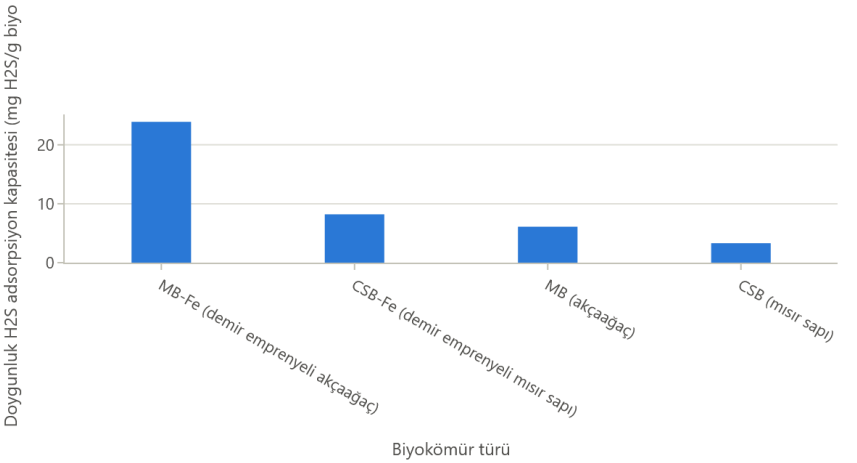
Metal veya mineral modifikasyonu, biyokömürün iletkenlik ve adsorpsiyon özelliklerini değiştirebilir. Ancak ek kimyasal kullanımının maliyeti, geri kazanım olanağı ve çürütme artığının güvenliği birlikte değerlendirilmelidir. Fonksiyonel biyokömürler için laboratuvar başarısının pilot ve sürekli sistemlere aktarılmasına ilişkin kanıtlar hâlen sınırlıdır (Chen et al., 2024). Bu nedenle modifikasyon, yalnızca en yüksek giderim veya metan artışı üzerinden seçilmemelidir.

Metal yükleme; pirolizden önce hammaddeye veya pirolizden sonra biyokömüre uygulanabilir. Fe, Mg, Al, Ca ve Mn katkıları yüzey yükünü, aktif bölgeleri ve elektron aktarımını değiştirebilir (Chen et al., 2024). Modifikasyon yöntemlerinin karşılaştırılmasında yalnızca kullanılan metalin adı yeterli değildir; yükleme miktarı, üretim koşulları ve elde edilen malzemenin özellikleri belirtilmelidir. Manyetik davranış, geri kazanım bakımından yararlı olabilse de yeniden kullanım sırasında etkinliğin korunması deneysel olarak gösterilmelidir (Kumar et al., 2021).

## Biyogaz Temizleme ve $H_2S$ Giderimi

Biyokömür gaz temizlemede reaktör dışı adsorban olarak da kullanılabilir. Demir emprenyeli akçaağaç biyokömüründe 23,9 mg $H_2S$/g, modifiye edilmemiş üründe 6,1 mg $H_2S$/g doygunluk kapasitesi bildirilmiştir; mısır sapı biyokömüründe karşılık gelen değerler 8,2 ve 3,3 mg $H_2S$/g'dır (Choudhury & Lansing, 2020). Şekil 5, bu farkı görselleştirir. Performansın gaz bileşimi, nem ve temas koşullarına bağlı olması nedeniyle kapasite değerleri doğrudan reaktör içi metan artışına eşitlenmemelidir.

*Şekil 5. Demir emprenyeli ve modifiye edilmemiş biyokömürlerin doygunluk $H_2S$ adsorpsiyon kapasitelerinin karşılaştırılması*




Kaynak: Choudhury ve Lansing (2020) kaynağından alınmıştır.

Biyokömür ve hidrokömür aynı adsorban olarak ele alınmamalıdır. Biyokömürde yapısal özellikler, alkali karakter ve metal içeriği fiziksel ve kimyasal tutulmayı desteklerken, hidrokömürde korunmuş yüzey fonksiyonel gruplarına bağlı kimyasal etkileşimler öne çıkabilir (Vuppaladadiyam et al., 2024). Ticari uygulamaya geçişte hammadde, aktivasyon, sıcaklık ve nemin etkileri birlikte sınanmalıdır. Kullanılmış adsorbanın yönetimi ve olası yeniden kullanım gereksinimleri de toplam süreç tasarımının parçasıdır; yalnızca başlangıç adsorpsiyon kapasitesine dayalı seçim yeterli değildir.

**Sınırlamalar ve Ölçek Büyütme**

Olumlu sonuçlara karşın biyokömür etkisi tutarlı değildir. Meta-analizde hammadde, piroliz sıcaklığı ve doz önemli bulunurken bazı diğer özellikler için aynı ilişki gösterilememiştir (Xiao et al., 2021). Yüzey alanı, iletkenlik ve mikrobiyal topluluk eşzamanlı değiştiğinden gözlenen verim artışını tek özelliğe

bağlamak güçtür. Uzun süreli sürekli işletme, biyokömürün yaşlanması ve substrat heterojenliği, laboratuvar bulgularının ölçek büyütülmesinde ayrıca sınanmalıdır (Chen et al., 2024).

Ölçek büyütmede temel sorun, heterojen atık bileşimi ile kesikli testlerin kısa süreli yapısıdır. Sürekli işletmede besleme dalgalanmaları, biyokömür kaybı veya birikimi ve mikroorganizmaların uyumu birlikte etkili olabilir. Bu nedenle kontrol reaktörüyle karşılaştırılan uzun süreli kayıtlar, yalnızca son gaz hacminden daha açıklayıcıdır. Fonksiyonel biyokömürle işlenen çamurdan elde edilen çürütme artığının tarımsal kullanımı da ayrıca risk değerlendirmesi gerektirir (Chen et al., 2024). Reaktör performansındaki iyileşme, son ürünün çevresel açıdan güvenli olduğunu tek başına göstermez.

Mekanizma kanıtlarında bir diğer sınır, elektron aktarımının dolaylı göstergelerle değerlendirilmesidir. İletkenlik veya belirli mikroorganizmaların bolluğundaki artış, sistem düzeyindeki metan artışıyla ilişkili olabilir; ancak ilişkinin hangi hücresel yol üzerinden kurulduğunu kesinleştirmez. İletken malzemelerle yapılan ko-kültür deneyleri ile karma topluluklu gerçek atık reaktörleri farklı kanıt düzeyleri sunar (Martins et al., 2018). Bu ayrım, DIET açıklamasının hangi gözlemlere dayandığının açıkça belirtilmesini gerektirir.

**Ekonomik Değerlendirme**

Üretim maliyeti katkı maddesi seçiminde önemlidir. Derlenen çalışmalarda biyokömür için 0,2–0,5 USD/kg, granüler aktif karbon için 0,6–20 USD/kg aralıkları verilmiştir (Kumar et al., 2021). Çizelge 4'teki değerler farklı hammadde ve üretim koşullarına aittir; güncel piyasa fiyatı veya eşdeğer performans maliyeti olarak yorumlanmamalıdır. Ekonomik değerlendirme; üretim, taşıma, doz, enerji kazancı, yeniden kullanım ve artık yönetimini kapsamalıdır.

Birim malzeme fiyatının düşük olması tek başına yatırımın kârlı olduğunu göstermez.

*Çizelge 4. Granüler aktif karbon ve biyokömür üretim maliyetlerinin karşılaştırması.*

| **Katkı maddesi** | **Hammadde** | **Üretim süreci / aktivasyon ajanı** | **Ülke** | **Üretim maliyeti (USD/kg) (Chiappero et al., 2020)** |
|---|---|---|---|---|
| GAC | Kanatlı altlığı kaynaklı karbon | Buhar | ABD | 1,44 |
| GAC | Pirinç kepeği | NaOH | Çin | 3,58–3,77 |
| GAC | Kırmızı meşe odunu | Buhar | ABD | 0,62–1,27 |
| GAC | Ticari | — | ABD | 1,19–16,34 |
| GAC | Meyve işleme atığı | Buhar | Malezya | 1,67 |
| GAC | Pirinç kepeği | $CO_2$ | Brezilya | 3,54 |
| GAC | Asitle işlenmiş pirinç kepeği | $CO_2$ | Brezilya | 20,45 |
| GAC | Odun | KOH | — | 2,49 |
| GAC | Odun kömürü | KOH | — | 1,25 |
| GAC | Linyit | KOH | — | 2,18 |
| GAC | Ticari | — | — | 1,93 |
| BC | Boş meyve salkımları | Yavaş piroliz | Malezya | 0,533 |
| BC | Saman | Yavaş piroliz (büyük ölçek) | Birleşik Krallık | 0,203 |

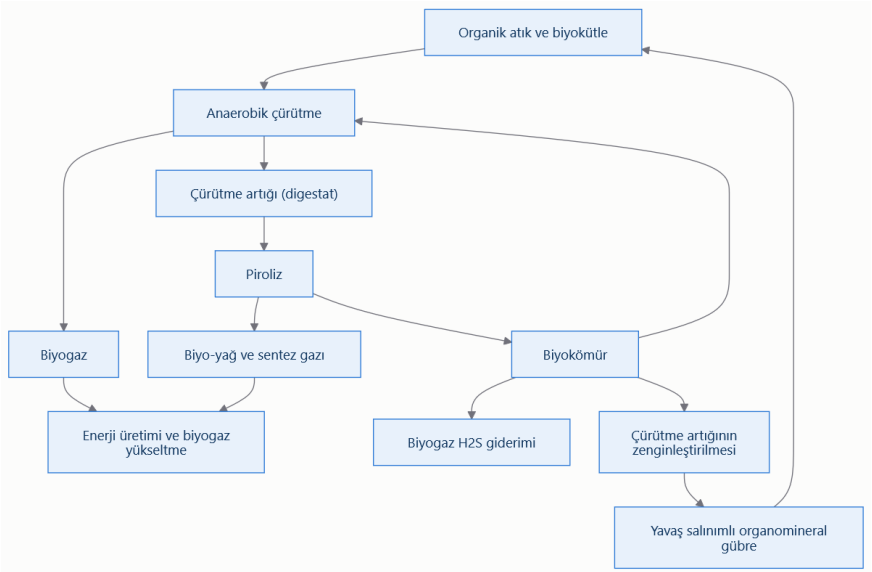
Kaynak: (Chiappero et al., 2020); genel aralıklar (Kumar et al., 2021).

Malzeme fiyatı karşılaştırması performans farklarını da hesaba katmalıdır. Granüler aktif karbonla yürütülen çalışmada, 25 g/L ilave maksimum metan üretim hızını %26 artırmış ve kümülatif üretimi yaklaşık iki katına çıkarmıştır (Kalantzis et al., 2023). Bu bulgu biyokömürün daha ucuz olmasının her koşulda daha iyi maliyet–fayda dengesi sağlayacağı anlamına gelmediğini gösterir. Farklı malzemeler, aynı substrat ve işletme koşullarında, ek metan üretimi başına toplam maliyet üzerinden karşılaştırılmalıdır.

**Döngüsel Ekonomi ve Entegre Sistemler**

AD ile pirolizin entegrasyonu, kolay ayrışan fraksiyonların biyogaza; ayrışması güç katıların biyokömür ve diğer piroliz ürünlerine dönüştürülmesini sağlayabilir. Biyokömür yeniden çürütücüye verilebilir veya gaz temizleme ve besin geri kazanımında kullanılabilir. Şekil 6, bu döngüsel akışı gösterir (Tayibi et al., 2021). Bununla birlikte kurutma ve piroliz enerjisi ile lojistik gereksinimler toplam kazancı etkiler. Entegrasyonun çevresel üstünlüğü, sistem sınırları açık bir madde–enerji dengesi ve yaşam döngüsü değerlendirmesiyle sınanmalıdır.

*Şekil 6. Piroliz ve anaerobik çürütme süreçlerinin biyokömür aracılığıyla entegrasyonu ve döngüsel ekonomi akışı*




Kaynak: Osman et al. (2023) ve Tayibi et al. (2021) temel alınarak oluşturulmuştur.

Çürütme artığının pirolizi ek ürün akışları yaratabilir. Derlemede, 700 °C'de pirolizle enerjinin %54–69'unun biyokömür ve biyo-yağa yöneldiği; yanıcı bileşen içeriği %65,5 olan sentez gazı elde edildiği bildirilmiştir (Dutta et al., 2021). Bu tür veriler sistem entegrasyonunu desteklese de enerji dağılımı ile net enerji kazancı aynı değildir. Islak çürütme artığının hazırlanması ve kurutulması için gereken enerji de hesaba katılmalıdır. Biyokömürün sıvı çürütme artığındaki amonyum, potasyum ve fosforu tutarak besince zenginleştirilmiş ürün oluşturması da değerlendirilebilir (Tayibi et al., 2021).

## Sonuç ve Uygulama Önerileri

Biyokömürün başlıca katkıları DIET desteği, pH tamponlama, inhibitörlerin tutulması ve mikrobiyal yüzey

sağlamadır. Çizelge 5, bu mekanizmaları deneysel kanıtlarla özetler. Kanıtlar, biyokömürün uygun koşullarda metan üretimini ve kararlılığı geliştirebildiğini; katkının ise malzeme–substrat–işletme etkileşimine bağlı olduğunu göstermektedir. Bu nedenle uygulama kararında en yüksek tekil artış yerine, tekrarlanabilir performans ve işletme kararlılığı esas alınmalıdır.

*Çizelge 5. Biyokömürün anaerobik çürütme üzerindeki başlıca etki mekanizmaları ve deneysel kanıtların özeti.*

| **Mekanizma** | **Etki yolu** | **Temsili nicel kanıt** |
|---|---|---|
| DIET ve elektron transferi | İletken biyokömür üzerinden elektron göçü; pilus eksikliğinin telafisi | Fındık kabuğu biyokömürü (550 °C) kontrole kıyasla metan üretimini %59 artırmıştır (Yang et al., 2025); biyokömür yokluğunda pilA-eksik ko-kültürler etanolü metana dönüştürememiştir (Martins et al., 2018) |
| Tamponlama ve pH stabilizasyonu | Amin, karboksilik ve fenolik grupların hidronyum iyonu adsorpsiyonu; K, Na, Ca, Mg katkısı (Osman et al., 2022) | 10 g/L biyokömür termofilik AD'de pH'ı 7,7'den 8,2'ye yükseltmiştir (Osman et al., 2022) |
| Amonyak inhibisyonunun hafifletilmesi | Fiziksel adsorpsiyon, gözenek dolgusu, iyon değişimi, amin/amid oluşumu | Biyokömürlü çürütücülerde TAN 3,43–3,76 g/L, kontrolde 4,28 g/L (Zhang et al., 2019) |
| VFA kontrolü ve asitlenme yönetimi | Asitlenmiş reaktörlerin hızlı toparlanması; VFA oksitleyici bakterilerin yüzeye tutunması (Yan et al., 2022) | VFA dalgalanması 1500 mg HAc/L'nin altında kalmış, kontrolde pH ~6,5'e gerilemiştir (Yan et al., 2022) |

| Mekanizma | Etki yolu | Temsili nicel kanıt |
|---|---|---|
| Mikrobiyal seçici zenginleşme | Metanojen ve elektrotrofik mikroorganizma bolluğunun artışı; DIET ile ilişkili taksonların zenginleşmesi | Metanojen ve elektrotrofik mikroorganizmalar %24,6–43,8 artmıştır (Osman et al., 2022); *Methanobacterium*, *Methanosaeta* ve *Methanosarcina* topluluğun %90'ını oluşturmuştur (Valentin et al., 2023) |
| Adsorpsiyon ve inhibitör giderimi | Amonyak, sülfit, antibiyotik ve ARG adsorpsiyonu | Sefazolin kaynaklı metan düşüşü (%28,14'e kadar) biyokömürle hafifletilmiş; dirençli bakteri bolluğu %1,00'ın altına inmiştir (You et al., 2025) |
| $H_2S$ giderimi ve biyogaz iyileştirme | Fizisorpsiyon ve kemisorpsiyon; Fe emprenyesiyle güçlendirme | Demir emprenyeli akçaağaç biyokömüründe 23,9 mg $H_2S$/g (modifiye edilmemişin 3,9 katı) (Choudhury & Lansing, 2020); yaprak biyokömürüyle %84,2 $H_2S$ giderimi (Chiappero et al., 2020) |

Kaynaklar: (Yang et al., 2025); (Martins et al., 2018); (Osman et al., 2022); (Zhang et al., 2019); (Yan et al., 2022); (Valentin et al., 2023); (You et al., 2025); (Choudhury & Lansing, 2020); (Chiappero et al., 2020)

## Uygulama Önerileri

Uygulamada biyokömür önce hammadde, piroliz koşulları, iletkenlik ve yüzey özellikleri bakımından tanımlanmalı; ardından kontrol gruplu doz denemeleriyle değerlendirilmelidir. Metan verimiyle birlikte üretim hızı, VFA, pH ve amonyak izlenmelidir. Ekonomik karar, ilave gazın enerji değeriyle katkının toplam maliyetini karşılaştırmalıdır. Modifiye ürünlerde ve arıtma çamuru uygulamalarında çürütme artığının tarımsal kullanımına ilişkin güvenlik değerlendirmesi ihmal edilmemelidir (Chen et al., 2024).

## Gelecek Araştırmalar

Gelecek araştırmaların önceliği, laboratuvar bulgularını pilot ve endüstriyel ölçekli sürekli sistemlerde doğrulamaktır. Uzun süreli kararlılık, biyokömürün yeniden kullanımı, metal ve kirleticilerin akıbeti ile tedarik zinciri etkileri birlikte incelenmelidir. Mekanizma çalışmalarında mikrobiyal bolluk verileri, doğrudan elektron transferi kanıtlarından ayrılmalı; ekonomik ve çevresel değerlendirmeler de aynı performans temeline dayanmalıdır. Biyokömür–AD entegrasyonu böylece atık, enerji ve besin geri kazanımını birleştirebilir; ancak teknik ve ekonomik uygulanabilirlik her sistem için ayrıca gösterilmelidir (Chen et al., 2024).

Araştırmaların karşılaştırılabilirliği için hammadde, piroliz koşulları, dozun hesaplama temeli ve reaktörün işletim biçimi birlikte raporlanmalıdır. Metan konsantrasyonu, toplam gaz hacmi ve uçucu katı başına verim ayrı ayrı sunulmalı; kontrol grubuna göre hesaplanan artışın hangi göstergeye ait olduğu açıklanmalıdır. Özellikle yüksek yüzdeli artışlarda başlangıç performansı ve deney süresi göz ardı edilmemelidir. Bu yaklaşım, farklı çalışmalardaki sayısal sonuçların evrensel bir verim katsayısına dönüştürülmesini önler ve ölçek büyütme kararlarına daha sağlam bir temel sağlar.

**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**

Ambaye, T. G., Rene, E. R., Dupont, C., Wongrod, S., & Hullebusch, E. D. van. (2020). Anaerobic Digestion of Fruit Waste Mixed With Sewage Sludge Digestate Biochar: Influence on Biomethane Production. *Frontiers in Energy Research*, *8*. https://doi.org/10.3389/fenrg.2020.00031

Baldi, F., Pecorini, I., & Iannelli, R. (2019). Comparison of single-stage and two-stage anaerobic co-digestion of food waste and activated sludge for hydrogen and methane production. *Renewable Energy*, *143*, 1755–1765. https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.05.122

Bardi, M. J., Mutunga, J. M., Ndiritu, H., & Koch, K. (2023). Effect of pyrolysis temperature on the physiochemical properties of biochar and its potential use in anaerobic digestion: A critical review. *Environmental Technology & Innovation*, *32*, 103349. https://doi.org/10.1016/j.eti.2023.103349

Chen, B. Y., Zeng, H., Yang, F., Yang, Y., Qiao, Z., Zhao, X., Li, W., & Wu, F. (2024). Functional biochar as sustainable precursors to boost the anaerobic digestion of waste activated sludge from a circular economy perspective: a review. *Biochar*, *6*(1). https://doi.org/10.1007/s42773-024-00345-y

Chen, S., Rotaru, A., Shrestha, P. M., Malvankar, N. S., Liu, F., Fan, W., Nevin, K. P., & Lovley, D. R. (2014). Promoting Interspecies Electron Transfer with Biochar. *Scientific Reports*, *4*(1), 5019. https://doi.org/10.1038/srep05019

Chiappero, M., Berruti, F., Mašek, O., & Fiore, S. (2021). Semi-continuous anaerobic digestion of mixed wastewater sludge with biochar addition. *Bioresource Technology*, *340*, 125664. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.125664

Chiappero, M., Norouzi, O., Hu, M., Demichelis, F., Berruti, F., Maria, F. D., Mašek, O., & Fiore, S. (2020). Review of biochar role as additive in anaerobic digestion processes. *Edinburgh Research Explorer (University of Edinburgh)*, *131*, 110037. https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110037

Choudhury, A., & Lansing, S. (2020). Adsorption of hydrogen sulfide in biogas using a novel iron-impregnated biochar scrubbing system. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, *9*(1), 104837. https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.104837

Dutta, S., He, M., Xiong, X., & Tsang, D. C. W. (2021). Sustainable management and recycling of food waste anaerobic digestate: A review. *Bioresource Technology*, *341*, 125915. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.125915

Hoang, A. T., Goldfarb, J. L., Foley, A., Lichtfouse, É., Kumar, M., Xiao, L., Ahmed, S. F., Said, Z., Luque, R., Bui, V. G., & Nguyễn, X. P. (2022). Production of biochar from crop residues and its application for anaerobic digestion. *Bioresource Technology*, *363*, 127970. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.127970

Kalantzis, D., Daskaloudis, I., Lacoere, T., Stasinakis, A. S., Lekkas, D., Vrieze, J. D., & Fountoulakis, M. S. (2023). Granular activated carbon stimulates biogas production in pilot-scale anaerobic digester treating agro-industrial wastewater. *Bioresource Technology*, *376*, 128908. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2023.128908

Kumar, M., Dutta, S., You, S., Luo, G., Zhang, S., Show, P. L., Sawarkar, A. D., Singh, L., & Tsang, D. C. W. (2021). A critical review on biochar for enhancing biogas production from anaerobic digestion of food waste and sludge. *Journal of Cleaner Production*, *305*, 127143. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127143

Lăcureanu, A.-M., & Cocârță, D. M. (2025). *Experimental Anaerobic Digestion of Sewage Sludge and Food Waste for Biogas Production: Influence of biochar addition on methane yield*. 1–4. https://doi.org/10.1109/ciem67454.2025.11283648

Martins, G., Salvador, A. F., Pereira, L., & Alves, M. M. (2018). Methane Production and Conductive Materials: A Critical Review. *Environmental Science & Technology*, *52*(18), 10241–10253. https://doi.org/10.1021/acs.est.8b01913

Masoud, A., Samy, M., Allam, N. E., Dhar, B. R., Meshref, M. N. A., & Elagroudy, S. (2025). Improving the biogas production in two-phase anaerobic digester of food waste using sugarcane bagasse-derived biochar. *Biomass Conversion and Biorefinery*, *15*(16), 22959–22970. https://doi.org/10.1007/s13399-025-06724-0

Moscoviz, R., Trably, É., Bernet, N., & Carrère, H. (2018). The environmental biorefinery: state-of-the-art on the production of hydrogen and value-added biomolecules in mixed-culture fermentation. *Green Chemistry*, *20*(14), 3159–3179. https://doi.org/10.1039/c8gc00572a

Osman, A. I., Farghali, M., Ihara, I., Elgarahy, A. M., Ayyad, A., Mehta, N., Ng, K. H., El-Monaem, E. M. A., Eltaweil, A. S., Hosny, M., Hamed, S. M., Fawzy, S., Yap, P., & Rooney, D. W. (2023). Materials, fuels, upgrading, economy, and life cycle assessment of the pyrolysis of algal and lignocellulosic biomass: a review. *Environmental Chemistry Letters*, *21*(3), 1419–1476. https://doi.org/10.1007/s10311-023-01573-7

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

Tayibi, S., Monlau, F., Bargaz, A., Jiménez, R., & Barakat, A. (2021). Synergy of anaerobic digestion and pyrolysis processes for sustainable waste management: A critical review and future perspectives. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *152*, 111603. https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111603

Valentin, M. T., Luo, G., Zhang, S., & Białowiec, A. (2023). Direct interspecies electron transfer mechanisms of a biochar-amended anaerobic digestion: a review. *Biotechnology for Biofuels and Bioproducts*, *16*(1), 146. https://doi.org/10.1186/s13068-023-02391-3

Vuppaladadiyam, A. K., Jena, M. K., Hakeem, I. G., Patel, S., Veluswamy, G., Thulasiraman, A. V., Surapaneni, A., & Shah, K. (2024). A critical review of biochar versus hydrochar and their application for H2S removal from biogas. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, *23*(3), 699–737. https://doi.org/10.1007/s11157-024-09700-8

Wang, Z., Zhang, M., Qian, X., Ni, Y., Zhou, X., & Yang, J. (2026). Mechanistic insights into promoted biogas production and reduced antibiotic resistance genes' risks of dry anaerobic digestion of organic wastes with biochar addition. *Bioresources and Bioprocessing*, *13*(1), 7. https://doi.org/10.1186/s40643-025-01003-2

Xiao, L., Lichtfouse, É., Kumar, P. S., Wang, Q., & Liu, F. (2021). Biochar promotes methane production during anaerobic digestion of organic waste. *Environmental Chemistry Letters*, *19*(5), 3557–3564. https://doi.org/10.1007/s10311-021-01251-6

Xu, Q., Liao, Y., Cho, E., & Ko, J. H. (2020). Effects of biochar addition on the anaerobic digestion of carbohydrate-rich, protein-rich, and lipid-rich substrates. *Journal of the Air & Waste Management Association*, *70*(4), 455–467. https://doi.org/10.1080/10962247.2020.1733133

Xue, N., Deng, C., Hickey, D. T., Hackula, A., O'Shea, R., Wall, D., Lin, R., & Murphy, J. D. (2023). Improving biomethane production from biochar-supplemented two-stage anaerobic digestion of on-farm feedstocks. *Journal of Cleaner Production*, *423*, 138723. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.138723

Yan, Y., Yan, M., Ravenni, G., Angelidaki, İ., Fu, D., & Fotidis, I. A. (2022). Biochar enhanced bioaugmentation provides long-term tolerance under increasing ammonia toxicity in continuous biogas reactors. *Renewable Energy*, *195*, 590–597. https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.06.071

Yang, C., Liu, Z., Liu, W., Qiu, Y., Zhang, S., Zhang, X., Wang, M., Wu, H., Lyu, H., Huang, J., Liu, J., Wang, Y., He, S., Gu, D., Guo, X., Yang, X., Xie, T., Chen, H., & Yao, Y. (2025). Graphitized Biochar Derived from Agricultural Wastes Enhances Methanogenesis via Conductivity-Driven Direct Interspecies Electron Transfer. *Advanced Science*, *12*(41). https://doi.org/10.1002/advs.202508739

You, J., Farghali, M., Yoshida, G., Yamamoto, H., Iwasaki, M., Shimizu, K., Maseda, H., Andriamanohiarisoamanana, F. J., & Ihara, I. (2025). Biochar-assisted control of antibiotic-resistant bacteria and methane yield optimization in two-stage anaerobic digestion under organic load and antibiotic stress. *Environmental Research*, *279*, 121679. https://doi.org/10.1016/j.envres.2025.121679

Zhang, M., Li, J., Wang, Y., & Yang, C. (2019). Impacts of different biochar types on the anaerobic digestion of sewage sludge. *RSC Advances*, *9*(72), 42375–42386. https://doi.org/10.1039/c9ra08700a


BİDGE