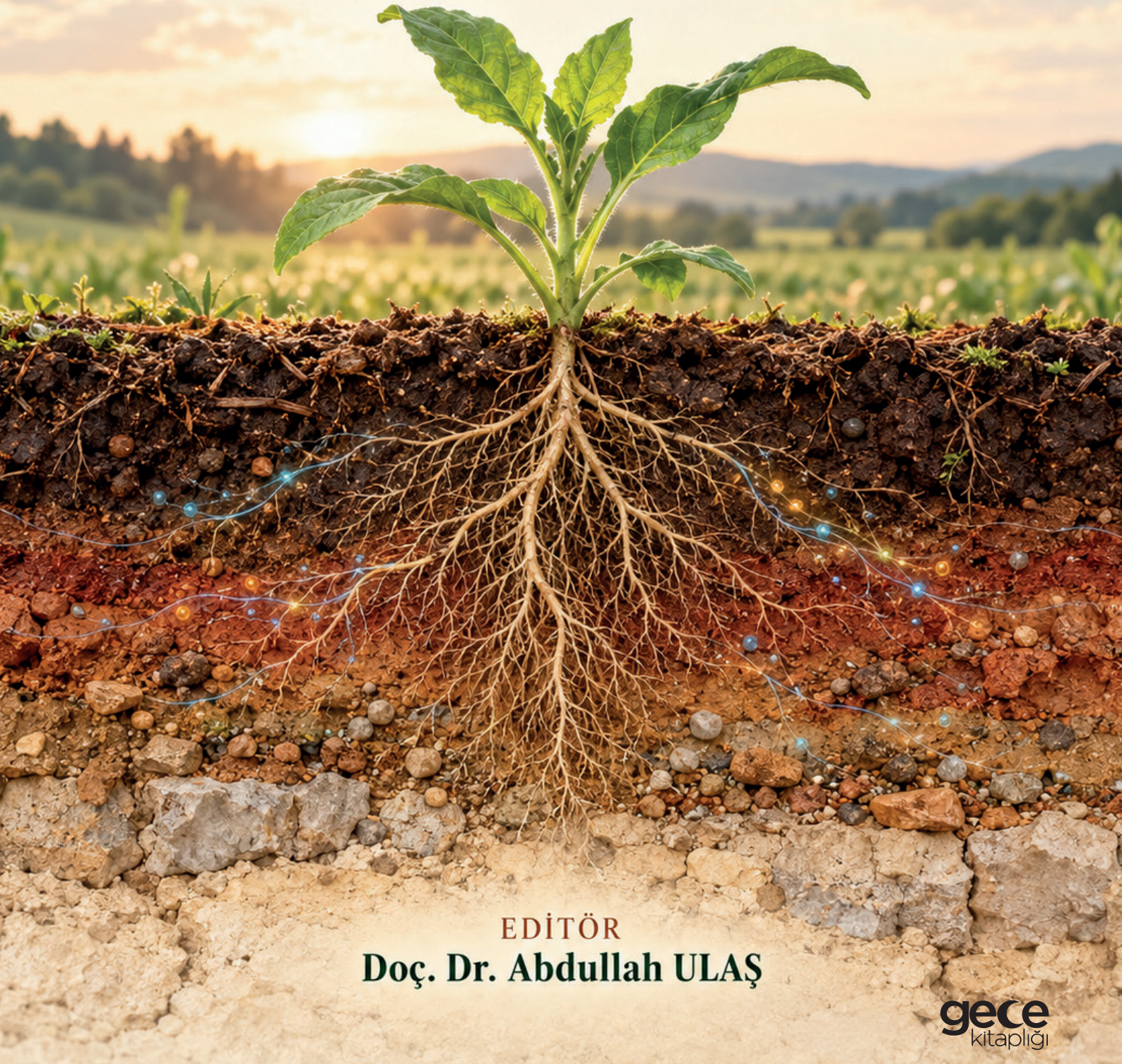


TOPRAK BİLİMİ VE BİTKİ BESLEME

ALANINDA ARAŞTIRMALAR
VE DEĞERLENDİRMELER

— EKİM 2026 —



EDİTÖR

Doç. Dr. Abdullah ULAŞ

gece
kitaplığı

İmtiyaz Sahibi / Yaşar Hız
Yayına Hazırlayan / Gece Kitaplığı

Birinci Basım / Ekim 2026 - Ankara
ISBN / 978-625-321-317-6

© copyright

Bu kitabın tüm yayın hakları Gece Kitaplığı'na aittir.
Kaynak gösterilmeden alıntı yapılamaz, izin almadan hiçbir yolla çoğaltılamaz.

Gece Kitaplığı

Kızılay Mah. Fevzi Çakmak 1. Sokak
Ümit Apt No: 22/A Çankaya/ANKARA
0312 384 80 40
www.gecekitapligi.com / gecekitapligi@gmail.com

Baskı & Cilt

Bizim Büro
Sertifika No: 42488

TOPRAK BİLİMİ VE BİTKİ BESLEME ALANINDA ARAŞTIRMALAR VE DEĞERLENDİRMELER

EKİM 2026

EDİTÖR

Doç. Dr. Abdullah ULAŞ

gece
kitaplığı

İÇİNDEKİLER

BÖLÜM 1

SÜRDÜRÜLEBİLİR TARIMDA BİYOKÖMÜR: HAMMADDE KAYNAKLARI, ÜRETİM TEKNOLOJİLERİ, KARAKTERİZASYONU VE TOPRAK ÖZELLİKLERİ ÜZERİNE ETKİLERİ

Güney AKINOĞLU, Mustafa SAĞLAM, Songül RAKICIOĞLU 7

BÖLÜM 2

AKILLI SERALAR TEKNOLOJİLERİ: DİJİTALLEŞME, OTOMASYON VE SÜRDÜRÜLEBİLİR ÜRETİM TEKNOLOJİLERİ

Veysel GÖKMEN 38

BÖLÜM 3

SULAMA SUYU KALİTESİ: DEĞERLENDİRME, ETKİLER VE SÜRDÜRÜLEBİLİR YÖNETİM

Güney AKINOĞLU, Songül RAKICIOĞLU, Mustafa SAĞLAM 61

BÖLÜM 1

SÜRDÜRÜLEBİLİR TARIMDA BİYOKÖMÜR: HAMMADDE KAYNAKLARI, ÜRETİM TEKNOLOJİLERİ, KARAKTERİZASYONU VE TOPRAK ÖZELLİKLERİ ÜZERİNE ETKİLERİ

Güney AKINOĞLU¹, Mustafa SAĞLAM², Songül RAKICIOĞLU³

¹ Doç. Dr., Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Toprak Bilimi ve Bitki Besleme Bölümü, guney.akinoglu@omu.edu.tr, ORCID iD: 0000-0003-4624-2876

² Prof. Dr., Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Toprak Bilimi ve Bitki Besleme Bölümü, mustafa.saglam@omu.edu.tr, ORCID iD: 0000-0002-7564-5079

³ Dr., Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Toprak Bilimi ve Bitki Besleme Bölümü, rakicioglusongul@gmail.com, ORCID iD: 0000-0002-8013-6439

1. Giriş

Modern tarımın temel hedeflerinden biri, artan nüfusun gıda gereksinimini karşılamak için tarımsal üretkenliği artırırken çevresel sürdürülebilirliği korumaktır (Azad ve ark., 2020). Ancak iklim değişikliğinin toprak sağlığı ve tarımsal üretim üzerindeki olumsuz etkileri, mevcut üretim sistemlerinin sürdürülebilirliğini giderek zorlaştırmaktadır. Bu süreçte yüksek verimli çeşitlerin kullanımı, gübreleme, sulama ve zararlı yönetimi gibi tarımsal uygulamalar önemini korumaktadır. Özellikle sentetik gübreler, bitkilerin besin elementi gereksinimlerinin karşılanmasında önemli bir rol oynamakla birlikte, aşırı ve dengesiz kullanımları toprak özelliklerinin bozulmasına, besin elementi kayıplarına ve çevresel sorunlara yol açabilmektedir. Bu durum, toprak verimliliğinin korunması ve gübre kullanım etkinliğinin artırılması amacıyla sentetik gübrelerin organik kökenli toprak düzenleyicileriyle birlikte kullanımını gündeme getirmiştir (Bai ve ark., 2023; Banik ve ark., 2023). Bu kapsamda biyokömür, toprakların fiziksel ve kimyasal özelliklerini iyileştirme ve besin elementlerinin tutulmasını destekleme potansiyeli nedeniyle son yıllarda üzerinde yoğun araştırmalar yürütülen toprak düzenleyicilerinden biri hâline gelmiştir (Pandian ve ark., 2024).

Biyokömür, biyokütlenin ısıl işleminden elde edilen karbon bakımından zengin bir materyaldir. Toprak verimliliğini artırması, kirleticileri immobilize etmesi ve su tutma kapasitesini geliştirmesi nedeniyle toprak sağlığı açısından faydalıdır (Afshar ve Mofatteh, 2024). Biyokömür, karbonu toprakta onlarca yıl, hatta binlerce yıl depolayabilmekte olup, uzun dönemli karbon tutulumu için oldukça etkili bir çözüm olarak değerlendirilmektedir. Ekonomik, erişilebilir ve kârlı olmasının yanı sıra, çevre dostu bir materyaldir. Biyokömürün uygulanmasını destekleyen bir diğer özellik ise yüzey yapısında bulunan hidroksil, karboksil ve alkol grupları sayesinde ağır metalleri adsorbe edebilme kapasitesidir (Ahmad ve ark., 2012). Bazı biyokömürler, yüksek adsorpsiyon kapasiteleri sayesinde ticari aktif karbon kadar, hatta ondan daha etkili bir şekilde ağır metalleri adsorbe edebilmektedir (Viotti ve ark., 2024).

Bununla birlikte, biyokömürün bazı dezavantajları da vardır. Bunlar arasında topraktaki kalıcılığı ile uygulamaya ilişkin bazı sınırlılıklar yer almaktadır. Wang ve ark. (2016) tarafından yapılan çalışmada, uçucu olmayan bileşenlerin toprakta ortalama 500 yıldan fazla kalabildiği, buna karşılık kolay ayrışabilen bileşenlerin yaklaşık 3-4 ay içerisinde parçalandığı bildirilmiştir. Bir diğer sınırlılık ise aromatik yapıların neden olduğu kimyasal dirençtir. Farklı toprak tipleri, biyokömür çeşitleri ve jeoekolojik koşullardaki değişkenlik nedeniyle biyokömür-toprak etkileşimleri ve biyokömürün farklı karbon düzeylerindeki davranışı hâlen tam olarak anlaşılamamıştır. Chagas ve ark. (2022) tarafından gerçekleştirilen bir meta-analiz çalışmasında biyokömür uygulamalarının mikrobiyal karbonu %200, organik karbonu %84 ve toplam karbonu %64 oranında artırdığı ifade edilmiştir.

Biyokömürün diğer maddelerle birleştirilmesiyle ileri düzey materyaller elde edilebilmektedir. Bu entegrasyon, biyokömürün yüzey alanını, gözenekliliğini ve reaktivitesini artırarak onu tarımsal ve çevresel uygulamalar açısından daha kullanışlı hâle getirmektedir (Vaz ve ark., 2024; dos Reis ve ark., 2025). Toprak kalitesinin iyileştirilmesi, karbon tutulmasının desteklenmesi, sürdürülebilir tarım uygulamalarının geliştirilmesi ve iklim değişikliğine uyumun artırılması amacıyla araştırmacılar, biyokömürün sinerjik özelliklere sahip diğer materyallerle birlikte kullanılmasını önermektedir (Tan ve ark., 2015; Ghaedi ve ark., 2025). Bu tür kombinasyonlar ağır metal adsorpsiyonunu, besin elementlerinin kontrollü salımını ve karbondioksit (CO₂) ile metan (CH₄) gibi gazların tutulmasını artırabilmekte; böylece toprak bozunumu riski oluşturmadan bitki gelişimini destekleyebilmektedir. Ayrıca bu materyaller, toprağa gerekli besin elementlerini sağlayarak kimyasal gübre kullanım ihtiyacını azaltmakta ve çevre üzerinde daha düşük olumsuz etki oluşturarak çevre dostu tarım uygulamalarıyla uyum göstermektedir (Rasheed ve ark., 2020; Ghaedi ve ark., 2025). Tarımda kullanılan biyokömür esaslı materyaller, toprak özelliklerini

iyileştirebilmekte ve iklim değişikliğinin etkilerinin azaltılmasına katkı sağlayabilmektedir. Bu nedenle söz konusu materyaller, sürdürülebilir ve dayanıklı tarımsal sistemlerin geliştirilmesine dünya genelinde önemli katkılar sunma potansiyeline sahiptir (Ayaz ve ark., 2021; Al-Shammari ve ark., 2024).

Bu bölümde, biyokömür ve biyokömür türevlerinin toprak düzenleyicisi olarak kullanımına ilişkin güncel bilgiler derlenmiştir. Bölümde biyokömürün hammadde kaynakları, üretim teknolojileri ve karakterizasyonu ayrıntılı olarak ele alınmakta; toprağın fiziksel, kimyasal ve biyolojik özellikleri üzerindeki etkileri bilimsel bulgular ışığında değerlendirilmektedir. Son olarak, biyokömür uygulamalarına ilişkin mevcut sınırlılıklar ve gelecekte üzerinde odaklanılması gereken araştırma konuları ele alınmaktadır.

2. Biyokömürün Tarihçesi

Biyokömürün geçmişi binlerce yıl öncesine uzanmakta olup, dünyanın farklı uygarlıklarında kullanımına ilişkin kanıtlar bulunmaktadır (Hunt ve ark., 2010). Günümüzde biyokömüre yönelik ilgi daha çok çevresel faydaları ve sürdürülebilir tarımdaki rolü üzerine yoğunlaşsa da, bu uygulamanın kökeni eski dönemlerde kullanılan toprak iyileştirme ve atık yönetimi tekniklerine dayanmaktadır. Biyokömürün bilinen en eski kullanım örneklerinden biri, Amazon Havzası'nda yaşayan yerli toplulukların uyguladığı "Terra Preta" (kara toprak) tarım sistemidir (Lehmann, 2009). Bu yöntemde topraklar odun kömürü ve organik maddeler ile zenginleştirilmiştir. Sonuç olarak, normalde besin elementleri bakımından fakir olan tropikal topraklarda yüksek verimliliğe sahip tarım alanları oluşturulmuştur. Yoğun ayrışma ve erozyona rağmen bu zenginleştirilmiş toprakların yüzyıllar boyunca verimliliğini koruması, biyokömürün etkili bir toprak düzenleyici olduğunu göstermektedir. Benzer şekilde Eski Mısır, Yunan ve Roma uygarlıkları da odun kömürü ve yakılmış organik materyallerin toprak verimliliğini ve tarımsal üretkenliği artırmadaki faydalarının farkındaydı. Tarihsel kayıtlar, biyokömürün çeşitli kültürlerde ve farklı dönemlerde yalnızca toprak iyileştirme amacıyla değil, aynı zamanda tıbbi uygulamalarda ve filtrasyon işlemlerinde de kullanıldığını göstermektedir. 18. ve 19. yüzyıllarda tarım ve toprak bilimi alanındaki gelişmeler, organik maddenin toprak verimliliğindeki rolüne ilişkin bilimsel yaklaşımların şekillenmesine katkı sağlamıştır. Thaer'in humus teorisi organik maddenin önemini vurgularken, Liebig'in mineral beslenme teorisi bitki beslenmesi ve gübreleme anlayışının gelişiminde önemli bir rol oynamıştır (Manlay ve ark., 2007). 21. yüzyılın başlarından itibaren ise biyokömür, toprak verimliliğini iyileştirme ve uzun süreli karbon tutulumunu destekleme potansiyeli nedeniyle giderek artan bilimsel ilgi görmüştür (Lehmann ve ark., 2006). Biyokömürün tarımsal ve çevresel uygulamadaki potansiyeline ilişkin araştırmalar, sürdürülebilir toprak yönetimi ve iklim değişikliğinin etkilerinin azaltılması açısından önemini daha da artırmıştır (Varkolu ve ark., 2025).

Günümüzde biyokömür; sürdürülebilir tarım, karbon tutulması ve çevresel iyileştirme açısından umut vadeden bir materyal olarak kabul edilmektedir. Güncel araştırmalar; atık yönetimi, yenilenebilir enerji üretimi ve su arıtımı gibi farklı alanlarda biyokömürün potansiyel kullanım olanaklarını araştırmaya devam etmektedir. Biyokömürün tarihsel gelişimi, yakılmış organik materyallerin toprak iyileştirme ve doğal kaynak yönetiminde yararlı özelliklerinden yararlanılmasına dayanan uzun bir bilgi birikimini yansıtmaktadır. Antik tarım uygulamalarından günümüzün sürdürülebilir çözümlerine kadar biyokömür, insanlığın doğanın sunduğu olanakları, ekosistemlerin ve toplumların yararına kullanma becerisinin önemli bir göstergesi olmayı sürdürmektedir.

3. Biyokömürün Özellikleri

Biyokömür temel olarak karbon bileşiklerinden oluşmaktadır. Bununla birlikte, eser miktarda hidrojen (H), oksijen (O), kül, azot (N) ve kükürt (S) de içermektedir (Ahmad ve ark., 2016). Biyokömürün bileşimi ve özellikleri; kullanılan biyokütlenin türü, reaktörün tasarımı ve üretim koşullarından etkilenmektedir (Ahmad ve ark., 2014). Kimyasal yapı, gözeneklilik, hammaddede doğal olarak bulunan inorganik metallerin miktarı (Kong ve ark., 2014) ve proses koşulları (Ahmad ve ark., 2020), biyokömürün adsorpsiyon özelliklerini etkileyen başlıca parametrelerdir.

Biyokömürün yüzey heterojenliği aktif karbona benzemektedir (Ahmad ve ark., 2020). Bununla birlikte, geniş yüzey alanı, yüksek karbon içeriği, yüksek katyon ve anyon değişim kapasitesi ile kararlı yapısı sayesinde biyokömürün patojen mikroorganizmalar, organik maddeler, yüzey aktif maddeler, azot (Berger, 2012; Dalahmeh, 2016), mikrokirleticiler (Nguyen ve ark., 2019; Zhou ve ark., 2019), ağır metaller (Enaime ve ark., 2020) ve diğer kirleticilerin gideriminde aktif karbondan daha üstün performans gösterdiği bildirilmiştir (Rizwan ve ark., 2016; Kaetzl ve ark., 2018). Biyokömür, 2 nm'den küçük mikrogözenekler, 2–50 nm arasında değişen mezogözenekler ve 50 nm'den büyük makrogözeneklerden oluşan düzenli bir gözenek ağına ve geniş bir yüzey alanına sahiptir (Mukherjee ve ark., 2011). Geniş özgül yüzey alanı sayesinde suda bulunan ağır metallerin ve amonyak azotunun adsorpsiyonunda belirgin bir etki göstermektedir (Han ve ark., 2020). Bazı durumlarda biyokömürün yüzey alanının aktif karbondan daha düşük olmasına rağmen adsorpsiyon kapasitesinin daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Bunun nedeni, suyun adsorpsiyonu sırasında biyokömürde meydana gelen şişmenin iç yüzey alanını genişletmesi ve buna bağlı olarak adsorpsiyon kapasitesini artırmasıdır (Ahmad ve ark., 2020).

Modifiye biyokömürün adsorpsiyon özelliklerini ve fonksiyonel grupların adsorpsiyon süreci üzerindeki etkisini değerlendirmek amacıyla birçok çalışma yapılmıştır. Birçok fonksiyonel grup birbirleriyle reaksiyona girebilmekte; bazıları ise hidrojen bağı oluşturabilmektedir (Vijay ve ark., 2008). Hidrojen bağları bu gruplara yüksek bağ enerjisi kazandırmakta ve bu nedenle birbirlerinden ayrılma eğilimlerini güçleştirmektedir. Yaygın olarak kullanılan modifikasyon teknikleri arasında mikrodalga uygulamaları, oksidasyon, indirgeme ve metal iyonu yükleme yer almaktadır (Yang ve ark., 2019). Modifiye biyokömür genellikle aldehit (-CHO), karboksil grubu (-COOH) ve hidroksil grubu (-OH) gibi çok sayıda fonksiyonel grup içermektedir. Bu yapı, çevrede bulunan toksik metallerin ve organik kirleticilerin uzaklaştırılmasında dikkat çekici sonuçlar vermektedir (Wu ve ark., 2019). Adsorpsiyon süreci boyunca modifiye biyokömür hem fiziksel hem de kimyasal adsorpsiyon mekanizmalarıyla etki göstermektedir (Cheng ve ark., 2021). Bununla birlikte, baskın adsorpsiyon mekanizması adsorplanan kirleticinin türüne ve özelliklerine bağlı olarak değişebilmektedir. Demir oksitlerin ilavesiyle biyokömürün gözenek hacmi ve özgül yüzey alanı artırılarak yapısal avantajlar sağlanabilmektedir (Ren ve ark., 2015).

4. Biyokömürün Kaynakları ve Üretim Teknikleri

4.1. Biyokömür kaynakları

Biyokömür, çeşitli organik materyallerin pirolizi yoluyla üretilmektedir. Biyokömür üretiminde kullanılan başlıca hammaddelerden biri tarımsal artıklardır. Bu kapsamda çeltik kavuzu, buğday, mısır ve pamuk sapları gibi birçok bitkisel artık biyokömür üretiminde değerlendirilebilmektedir. Bu materyaller, oksijenin sınırlı olduğu ortamlarda düşük sıcaklıklarda ısı işleme tabi tutularak biyokömüre dönüştürülmektedir. Biyokömürün özelliklerinin belirlenmesinde kullanılan hammadde büyük önem taşımaktadır; çünkü her hammaddenin kimyasal bileşimi farklıdır. Tarımsal artıklardan elde edilen biyokömürler;

karbon ile selüloz (%36–42), hemiselüloz (%11–14) ve lignin (%18–27) gibi bitkisel yapısal bileşenlerden oluşan hammaddelerden üretilmektedir. Bu tür biyokömürler toprak sağlığını iyileştirmekte, karbon tutulmasını desteklemekte, toprak asitliğini azaltmakta ve besin elementi tutma kapasitesini artırmaktadır (Hoque ve ark., 2025). Ayrıca, ürün veriminde (%8–15,8), besin elementi kullanım etkinliğinde (%13,97), azot kullanım etkinliğinde (%14,28) ve su kullanım etkinliğinde (%14,28) artış sağlayabilmektedir (Tian ve ark., 2018; Martínez-Gómez ve ark., 2022; Han ve ark., 2023). Sert ağaçlar, talaş ve bambu gibi orman kalıntıları da biyokömür üretiminde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu kaynaklardan elde edilen biyokömürler yüksek karbon içeriğine ve geniş yüzey alanına sahiptir. Bu özellikler sayesinde toprağın su ve hava tutma kapasitesini artırmakta, hacim ağırlığını azaltmakta ve bitki köklerinin hava ile suya erişimini kolaylaştırmaktadır. Odun kökenli biyokömürler, toprak pH'sını iyileştirmekte, organik karbon miktarını artırmakta, besin elementlerini tutmakta ve yararlı mikroorganizmaların gelişimini desteklemektedir. Bambu biyokömürü ise yüksek su tutma kapasitesi, karbon depolama potansiyeli ve uzun vadede toprak sağlığını geliştirme özellikleri ile dikkat çekmektedir (Ayaz ve ark., 2021; Yadav ve Bag, 2023).

Tavuk gübresi, sığır gübresi ve domuz gübresi gibi hayvansal atıklar da biyokömür üretiminde kullanılabilir. Bu kaynaklardan elde edilen biyokömürler fosfor (P), potasyum (K) ve azot gibi temel bitki besin elementlerini içermektedir. Hayvansal atık kökenli biyokömürler, toprak sağlığını ve kation değişim kapasitesini iyileştirmekte, mikrobiyal faaliyetleri teşvik etmekte ve sentetik gübrelelere olan bağımlılığı azaltmaktadır. Ayrıca toprağın su tutma kapasitesini artırmakta, bitkiler için besin elementi yararı sağlanmasını desteklemekte, ürün verimini yükseltmekte ve çevresel açıdan olumlu etkiler sağlamaktadır (Azeem ve ark., 2016; Ighalo ve ark., 2025). Gıda atıkları ve bahçe atıkları gibi kentsel kökenli organik atıklar da ısıtma işlemleri yoluyla biyokömüre dönüştürülebilmekte ve sürdürülebilir toprak yönetimine katkı sağlayabilmektedir. Gıda atıklarından elde edilen biyokömürler, toprak verimliliğini önemli ölçüde artırmakta, mikrobiyal gelişimi teşvik etmekte ve toprağın su tutma kapasitesini artırmaktadır (Pradhan ve ark., 2024). Endüstriyel kaynaklı kâğıt çamurları, biyokatırlar ve biyo-yağ üretim kalıntıları da biyokömür hammaddesi olarak kullanılabilir. Bu materyallerden elde edilen biyokömürler ağır metallerin immobilizasyonunu sağlayarak, toprak pH'sını yükselterek ve toprak yapısını iyileştirerek kirlenmiş toprakların rehabilitasyonuna katkıda bulunmaktadır (Zhou ve ark., 2017; Kara ve ark., 2024). Kabuklu yemiş kabukları, palmiye kökenli artıklar ve hindistan cevizi kabukları gibi tarımsal ormancılık atıkları da biyokömür üretiminde değerlendirilmektedir. Bu materyallerden elde edilen biyokömürler karbon sekestrasyonunu desteklemekte, geçirgen karbon matrisleri oluşturarak toprak havalanmasını artırmakta ve böylece toprak sağlığı ile ekosistem sürdürülebilirliğine katkı sağlamaktadır (Beesley ve ark., 2011).

4.2. Üretim teknikleri

Biyokömürün farklı uygulama alanlarında kullanımına yönelik ilginin artması, biyokütlenin biyokömüre dönüştürülmesini de hızlandırmıştır. Termokimyasal dönüşüm, biyokömür üretiminde yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. Termokimyasal dönüşüm yöntemleri arasında piroliz, hidrotermal karbonizasyon, gazifikasyon ve torrefaksiyon yer almaktadır (Lin ve ark., 2016; Pang, 2019). Yüksek biyokömür verimi elde edebilmek için, üretimde seçilecek yöntemin biyokütle türüne uygun olması ve ısıtma hızı, sıcaklık, bekleme süresi gibi proses koşullarının optimum düzeyde belirlenmesi gerekmektedir. Bu koşullar kritik öneme sahiptir; çünkü bunlar, üretim süreci boyunca biyokömürün fiziksel ve kimyasal özelliklerini etkileyebilmektedir. Bitkisel biyokütleden elde edilen biyokömürün morfolojisi, üretim süreci sırasında biyokütleden meydana gelen kütle kaybına bağlı olarak proses koşullarına göre değişmektedir. İlk olarak, yaklaşık 100 °C'de suyun uzaklaşması nedeniyle kütle kaybı meydana gelir. Bunu, 220 °C'nin üzerindeki sıcaklıklarda selüloz, hemiselüloz ve

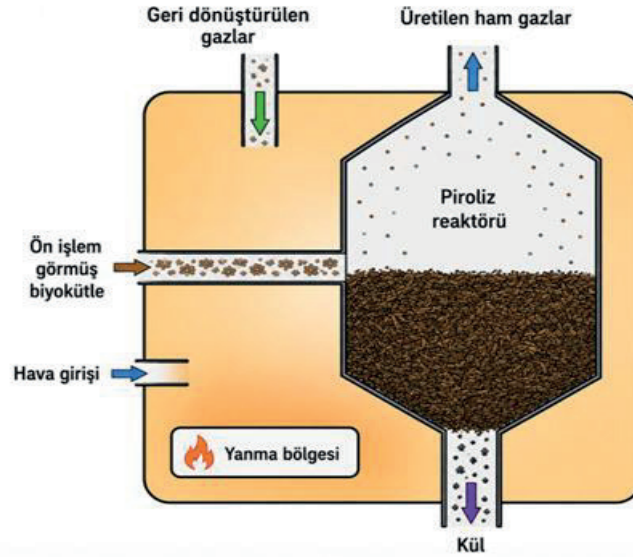
ligninin bozunması izlemektedir. Son aşamada ise karbonlu kalıntıların ayrışması sonucunda ilave kütle kaybı meydana gelmektedir. Termokimyasal dönüşüm teknikleri ve bu tekniklere ait proses koşulları Çizelge 1’de verilmiştir.

Çizelge 1. Termokimyasal dönüşüm teknikleri ve bunlara ait proses koşulları

Termokimyasal dönüşüm tekniği	Sıcaklık (°C)	Bekleme süresi	Biyokömür verimi (%)	Biyo-yağ verimi (%)	Sentez gazı (Syngas) üretimi (%)	Kaynak
Piroliz	300–700 (yavaş)	Saat–gün (yavaş)	35 (yavaş)	30 (yavaş)	35 (yavaş)	(Cantrell ve ark., 2012)
	500–1000 (hızlı)	< 2 s (hızlı)	12 (hızlı)	75 (hızlı)	13 (hızlı)	
Hidrotermal karbonizasyon	180–300	1–16 saat	50–80	5–20	2–5	(Funke ve Ziegler, 2010)
Gazifikasyon	750–900	10–20 s	10	5	85	(Klinghoffer ve ark., 2015)
Torrefaksiyon	290	10–60 dk	80	0	20	(Bergman ve ark., 2005)
Ani karbonizasyon	300–600	< 30 dk	37	–	–	(Nunoura ve ark., 2006)

4.2.1. Piroliz

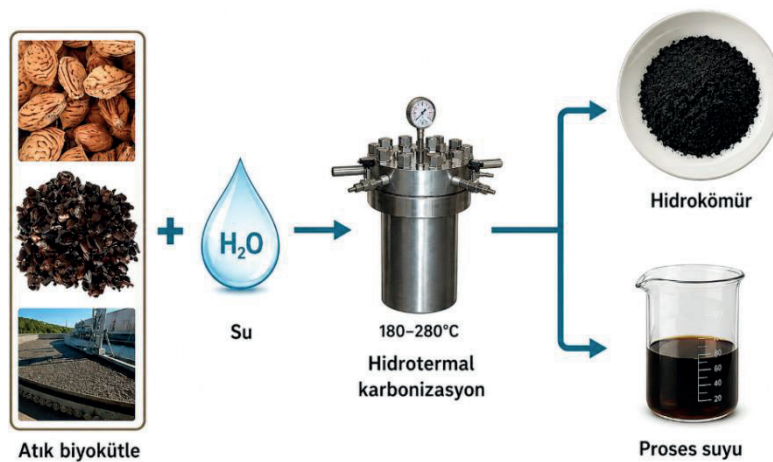
Piroliz, organik materyallerin oksijensiz veya oksijenin sınırlandırıldığı koşullarda ısı olarak ayrışmasını sağlayan termokimyasal bir dönüşüm yöntemidir. Bu işlemde uygulanan sıcaklık aralığı, biyokütlenin özelliklerine ve kullanılan piroliz tekniğine bağlı olarak değişmektedir. Yavaş piroliz genellikle 300–700 °C, hızlı piroliz ise 500–1000 °C sıcaklık aralığında gerçekleştirilebilmektedir (Yaashikaa ve ark., 2020). Bu proses, atık biyokütlenin biyokömür, sentez gazı ve biyo-yağ gibi katma değeri yüksek ürünlere dönüştürülmesinde alternatif bir yöntemdir. Proses sırasında selüloz, hemiselüloz ve lignin gibi lignoselülozik bileşenler, belirli sıcaklıklarda depolimerizasyon, parçalanma ve çapraz bağlanma reaksiyonlarına uğrayarak katı, sıvı ve gaz fazlarında farklı ürünlerin oluşmasına neden olmaktadır. Katı ve sıvı ürünler sırasıyla biyokömür ve biyo-yağı oluştururken, gaz ürünleri ise başlıca karbonmonoksit (CO), karbondioksit, hidrojen ve C₁–C₂ hidrokarbonlarından oluşan sentez gazıdır. Biyokömür üretiminde paletli fırın (paddle kiln), kabarcıklı akışkan yataklı reaktör, vagon tipi reaktör ve karıştırılmalı döner kum fırını gibi çeşitli reaktör tipleri kullanılmaktadır. Piroliz sırasında elde edilen biyokömür verimi, kullanılan biyokütlenin türüne ve özelliklerine bağlıdır. Sıcaklık, ürün verimini belirleyen temel proses parametresidir (Wei ve ark., 2019). Genel olarak, piroliz sıcaklığı arttıkça biyokömür verimi azalırken, sentez gazı üretimi artmaktadır. Piroliz prosesinin mekanizması Şekil 1’de gösterilmiştir. Piroliz; ısıtma hızı, sıcaklık, bekleme süresi (residence time) ve basınca bağlı olarak hızlı piroliz ve yavaş piroliz olmak üzere iki gruba ayrılmaktadır.



Şekil 1. Piroliz mekanizması (Yaashikaa ve ark., 2020'den uyarlanmıştır)

4.2.2. Hidrotermal karbonizasyon

Hidrotermal karbonizasyon, yaklaşık 180–250 °C gibi düşük sıcaklıklarda gerçekleştirilebilmesi nedeniyle biyokömür üretiminde maliyet etkin bir yöntem olarak kabul edilmektedir (Lee ve ark., 2018). Hidrotermal proses sonucunda elde edilen ürün, piroliz ve gazifikasyon gibi kuru proseslerle üretilen biyokömürden ayırt edilebilmesi amacıyla **hidrokömür (hydrochar)** olarak adlandırılmaktadır (Fang ve ark., 2018). Bu proses sırasında biyokütle su ile karıştırılarak kapalı bir reaktöre yerleştirilir. Kararlılığın sağlanabilmesi için sıcaklık kademeli olarak artırılır. Uygulanan sıcaklığa bağlı olarak farklı ürünler elde edilmektedir. Buna göre, 250 °C'nin altındaki sıcaklıklarda hidrotermal karbonizasyon sonucunda hidrokömür oluşmaktadır (Zhang ve ark., 2017). 250–400 °C sıcaklık aralığında hidrotermal sıvılaştırma ile biyo-yag elde edilirken, 400 °C'nin üzerindeki sıcaklıklarda ise hidrotermal gazifikasyon sonucunda karbonmonoksit, karbondioksit, hidrojen ve metan gibi gaz ürünleri (sentez gazı, syngas) oluşmaktadır (Khorram ve ark., 2016). Hidrotermal karbonizasyon prosesi Şekil 2'de gösterilmiştir.



Şekil 2. Hidrotermal karbonizasyon sürecinin şematik gösterimi (Petrović ve ark., 2024'ten uyarlanmıştır)

Hidrolize olmuş ürün, 5-hidroksimetilfurfural ve türevleri gibi ara ürünlerin oluşumunu sağlayan dehidrasyon, parçalanma ve izomerizasyon reaksiyonlarından geçmektedir. Daha sonra reaksiyonlar; kondenzasyon, polimerizasyon ve molekül içi dehidrasyon süreçleriyle

devam ederek hidrokömürün oluşumunu sağlamaktadır (Bakraoui ve ark., 2020). Ligninin yüksek molekül ağırlığına sahip olması ve karmaşık yapısı, reaksiyon mekanizmasını daha karmaşık hâle getirmektedir. Ligninin bozunması, dealkilasyon ve hidroliz reaksiyonlarıyla başlamakta; bu süreçte fenoller, katekoller, siringoller ve benzeri fenolik bileşikler oluşmaktadır (Jain ve ark., 2016). Son aşamada ise ara ürünlerin yeniden polimerizasyonu ve çapraz bağlanması sonucunda kömürleşmiş bir ürün oluşmaktadır. Sıvı fazda çözünmeyen lignin bileşenleri ise piroliz reaksiyonuna benzer şekilde hidrokömüre dönüşmektedir.

4.2.3. Gazifikasyon

Gazifikasyon, karbon içeren materyallerin yüksek sıcaklıkta ve oksijen, hava, su buharı gibi gazifikasyon ajanlarının varlığında karbonmonoksit, karbondioksit, metan, hidrojen ve eser miktarda hidrokarbonlardan oluşan gaz ürünlerine, yani sentez gazına, dönüştürüldüğü termokimyasal bir ayrışma yöntemidir. Reaksiyon sıcaklığının sentez gazı üretimini belirleyen en önemli faktör olduğu belirtilmektedir. Sıcaklığın artmasıyla birlikte karbonmonoksit ve hidrojen üretiminin arttığı, buna karşılık metan, karbondioksit ve hidrokarbonların miktarının azaldığı belirlenmiştir (Prabakar ve ark., 2018). Bu prosesin temel ürünü sentez gazı olup, biyokömür ise daha düşük verimde oluşan bir yan ürün olarak değerlendirilmektedir.

4.2.4. Torrefaksiyon

Torrefaksiyon, biyokömür üretiminde kullanılan ve düşük ısıtma hızı nedeniyle hafif piroliz (mild pyrolysis) olarak da adlandırılan yeni gelişmekte olan bir termokimyasal dönüşüm yöntemidir. Bu proseste biyokütle, oksijensiz ve inert atmosfer koşullarında yaklaşık 200–300 °C sıcaklık aralığında işlenerek nem, oksijen ve uçucu bileşenlerin önemli bir kısmı uzaklaştırılmaktadır. Böylece biyokütlenin parçacık boyutu, nem içeriği, yüzey alanı ve enerji yoğunluğu gibi özellikleri değişmektedir (Yu ve ark., 2017). Torrefaksiyon; buharlı, yaş (hidrotermal karbonizasyon) ve oksidatif torrefaksiyon olmak üzere üç farklı şekilde gerçekleştirilebilmektedir.

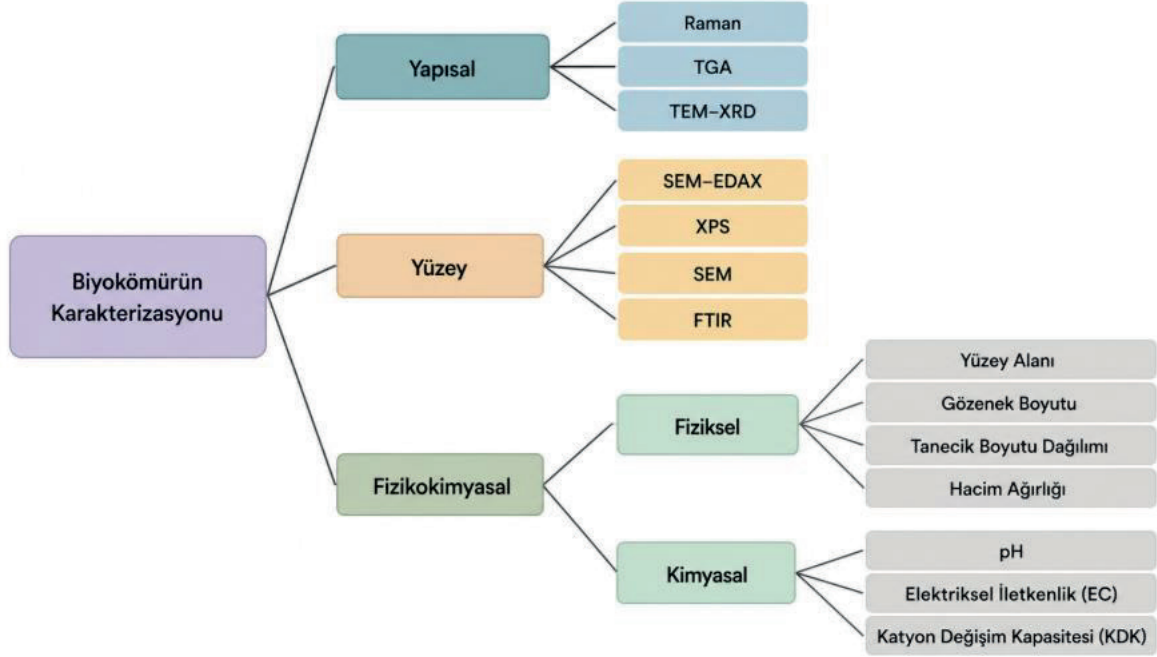
4.2.5. Ani karbonizasyon

Ani (Flash) karbonizasyon, yüksek basınç altında paketlenmiş biyokütle yatağında ani yanmanın başlatılmasına dayanır. Bu proses, 300–600 °C sıcaklık aralığında ve 30 dakikadan kısa bir reaksiyon süresinde gerçekleştirilmekte olup biyokütlenin yaklaşık %40'ı katı ürüne dönüştürülmektedir. Ancak katı ürün verimi basıncın artmasıyla azalmaktadır. Ani karbonizasyon yöntemi ile ilgili literatürde sınırlı sayıda çalışmada yer almakta olup yaygın olarak kullanılmamaktadır (Yaashikaa ve ark., 2020).

5. Biyokömürün Karakterizasyonu

Biyokömür karakterizasyonu, biyokömürün fiziksel ve kimyasal özelliklerinin belirlenmesini kapsamaktadır. Bu karakterizasyon, biyokömürün toprak düzenleyici olarak kullanımı, karbon sekestrasyonu ve çevresel iyileştirme gibi çeşitli uygulamalarda uygunluğunu ve etkinliğini öngörmek açısından büyük önem taşımaktadır (Anyebe ve ark., 2025). Ayrıca, kirletici giderimi başta olmak üzere çeşitli çevresel uygulamalardaki potansiyelinin değerlendirilmesinde de kritik bir rol oynamaktadır. Bu sayede biyokömürün toprak ekosistem hizmetlerinin sağlanmasındaki performansı ile çevresel etkileri daha doğru bir şekilde tahmin edilebilmektedir (Xie ve ark., 2015). Biyokömürün karakteristik özelliklerini belirlemek amacıyla yapısı, yüzey fonksiyonel grupları ile elementel bileşimi,

çeşitli analiz teknikleri kullanılarak değerlendirilmektedir (Şekil 3). Bu amaçla yaygın olarak kullanılan yöntemler arasında Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM), Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopisi (FTIR), X-Işını Kırınımı (XRD), Nükleer Manyetik Rezonans Spektroskopisi (NMR), Brunauer-Emmett-Teller (BET) özgül yüzey alanı analizi ve Termogravimetrik Analiz (TGA) yer almaktadır (İgalavithana ve ark., 2017). Bunlara ek olarak, yaklaşık analiz (proximate analysis), elementel analiz (ultimate analysis) ve Raman spektroskopisi de biyokömürün ayrıntılı karakterizasyonunda yaygın olarak kullanılan yöntemler arasındadır (Chaturvedi ve ark., 2023).



Şekil 3. Biyokömürün yapısal, yüzey ve fizikokimyasal özelliklerinin karakterizasyonunda kullanılan analiz yöntemleri (Varkolu ve ark., 2025'ten uyarlanmıştır)

6. Biyokömürün Toprak Özellikleri Üzerine Etkisi

6.1. Toprağın fiziksel özellikleri

Toprak özelliklerinde meydana gelen değişimlerin düzeyi, hem biyokömürün hem de uygulanacağı toprağın özelliklerine bağlıdır (Joseph ve ark., 2021). Biyokömürün toprağa uygulanması; toprağın ıslanabilirliği, su infiltrasyonu, su tutma kapasitesi, agregasyon ve agregat stabilitesi üzerinde etkili olmakta; böylece erozyonun önlenmesine, kuraklığın ve besin elementi kayıplarının azaltılmasına ve yeraltı suyu kalitesinin iyileştirilmesine katkı sağlamaktadır.

6.1.1. Toprak yapısı ve tekstürü

Biyokömür uygulaması, levhamsı toprak yapısını tarımsal üretim için daha uygun olan granüler/kırıntılı yapıya dönüştürmektedir. Biyokömür uygulamasının toprak tekstürü üzerinde anlamlı bir etkisi olduğu ve bu etkinin kısa süreli olduğu belirlenmiştir (Brodowski ve ark., 2007). Biyokömür uygulamasıyla toprağın fiziksel özelliklerinde görülen iyileşmeyi açıklayan olası mekanizmalar: Biyokömürün yüksek gözenekliliği, adsorpsiyon özelliği, mikroorganizmalar için yaşam alanı sağlaması ve toplam organik karbon içeriğidir (Aslam ve ark., 2014).

6.1.2. Gözeneklilik ve hacim ağırlığı

Biyokömür uygulamaları, toprağın gözenekliliğini artırarak hacim ağırlığını azaltır (McElligott, 2011). Toprağın toplam gözenekliliği, biyokömür uygulama dozundaki artışa paralel olarak artmaktadır (Liu ve ark., 2020). Masulili ve ark. (2010) tarafından yürütülen çalışmada, çeltik kavuzu biyokömürü uygulamasının toplam gözenek miktarını ve bitkiye yarayışlı suyu artırdığı, penetrasyon direncini ise azalttığı rapor edilmiştir. Biyokömür uygulaması, toprağın toplam gözenekliliğini artırmakta; bunun sonucunda toprak hacim ağırlığı azalırken infiltrasyon hızı artmaktadır (Herath ve ark., 2013). Toprak hacim ağırlığındaki bu azalma, su tutma kapasitesi, agregasyon, tekstür ve strüktür gibi diğer fiziksel özelliklerin yanı sıra toprağın kimyasal ve biyolojik özellikleri üzerinde de olumlu etkilere sahiptir.

6.1.3. Toprak agregasyonu

Toprak agregasyonu, biyokömürün toprağa uygulanmasından önemli ölçüde etkilenmektedir. İnorganik gübrelerle birlikte 7,8 t ha⁻¹ dozunda mısır sapı ve yer fıstığı kabuğundan üretilen biyokömürün uygulanması, makroagregat oranını ve agregatların ağırlıklı ortalama çapını artırmıştır (Ma ve ark., 2016). Biyokömürün agregat stabilitesi üzerindeki etkisi ise toprağın tekstürüne bağlıdır. Biyokömür uygulamalarına karşı kaba tekstürlü (kumlu) topraklardaki agregasyon, ince tekstürlü topraklara göre daha duyarlıdır (Ouyang ve ark., 2013). Liu ve ark. (2012), Çin'in Löss Platosu'na ait dört farklı toprak tipinde yürüttükleri çalışmada, siltli tın topraklarda suya dayanıklı agregatlarda iyileşme olduğunu, buna karşın kumlu tın topraklarda anlamlı bir etki gözlenmediğini bildirmiştir. Buna karşılık, Hardie ve ark. (2014), biyokömür uygulamasının agregat stabilitesini azalttığını rapor etmiştir. Biyokömür ilavesinin toprak agregasyonu ve agregat stabilitesi üzerindeki etkisi, biyokömürün toprak organik maddesi, mikroorganizmalar ve minerallerle olan etkileşimine bağlıdır (Domingo-Olive ve ark., 2016). Biyokömür, mikroorganizmalar için yaşam alanı sağlayarak mikroorganizmaların kurumadan ve predatörlerden korunmasına yardımcı olmaktadır. Mikroorganizmalar tarafından salgılanan polisakkaritler ise toprak agregasyonunu artırmaktadır (Aslam ve ark., 2014).

6.1.4. Bitkiye yarayışlı su içeriği ve hidrolik iletkenlik

Toprak düzenleyici olarak uygulanan biyokömür, toprağın su tutma kapasitesini, bitkiye yarayışlı su miktarını ve su kalitesini artırmaktadır (Steiner ve ark., 2007). Ancak biyokömürün bitkiye yarayışlı su üzerindeki etkisi, toprağın tekstürüne bağlıdır. Biyokömür uygulaması kumlu topraklarda bitkiye yarayışlı su içeriğini artırırken, killi topraklarda azaltmıştır (Glaser ve ark., 2002). Biyokömür ilavesi, kumlu toprakların hidrolik iletkenliğini azaltırken (Uzoma ve ark., 2011), kumlu tın topraklarda toprak nem içeriği üzerinde anlamlı bir etki göstermemiştir (Hardie ve ark., 2014). Major ve ark. (2010), biyokömür uygulamasının doymun hidrolik iletkenliği 2,70 cm sa⁻¹'den 13,4 cm sa⁻¹'e yükselttiğini bildirmiştir.

6.1.5. Su infiltrasyonu, yüzey akışı ve toprak erozyonu

Biyokömür uygulaması, su infiltrasyonunu artırmış, yüzey akışı azaltmış ve buna bağlı olarak toprak parçacıklarının erozyonunu düşürmüştür (Doan ve ark., 2015; Sun ve ark., 2018). Toprak kaybındaki bu azalma, toprak agregatlarının ağırlıklı ortalama çapındaki artıştan kaynaklanmış olabilir. Kumlu topraklarda biyokömür uygulaması, yatay ıslanma cephesinin yayılma mesafesini azaltırken, dikey ıslanma cephesinin yayılma mesafesi başlangıçta azalmış, daha sonra ise artmıştır (Pu ve ark., 2019). Karışık odun

hammaddesinden 620 °C’de üretilen ve %2 oranında uygulanan biyokömür, kireçsiz kumlu tın topraklarda infiltrasyon hızını 1,7 kat artırırken, kireçli kumlu tın topraklarda anlamlı bir etki göstermemiştir (Abrol ve ark., 2016). Buna karşılık, bazı çalışmalar biyokömürün hidrofobik özelliği nedeniyle su infiltrasyonunun azaldığını bildirmiştir (Jeffery ve ark., 2015). Diğer taraftan, Jien ve Wang (2013) Typic Paleudults topraklarında ağırlık esasına göre %2,5 ve %5 biyokömür uygulamalarının toprak kaybını sırasıyla %50 ve %60 oranında azalttığını rapor etmişlerdir. Biyokömürün toprak erozyonu üzerindeki etkisine ilişkin çelişkili sonuçlar da bildirilmiştir (Peng ve ark., 2016). Siltli tınlı topraklarda, yüksek biyokömür uygulama oranları erozyonu artırırken, daha büyük partikül boyutuna sahip biyokömür uygulamaları erozyonu azaltmıştır (Li ve ark., 2019). Bu bulgular, yüzey akışını ve erozyonu azaltmak amacıyla farklı toprak tekstürleri için farklı partikül boyutlarına sahip biyokömürlerin gerekli olduğunu göstermektedir. Mangrov ağacından (*Rhizophora apiculata*) yavaş piroliz yöntemiyle üretilen biyokömürün, tarlada dönüşümlü ıslatma ve kurutma uygulamalarıyla birlikte kullanılması, çeltik yetiştiriciliğinde sulama suyu kullanımını %12.7 oranında azaltmıştır (Sriphirom ve ark., 2020).

6.2. Toprağın Kimyasal Özellikleri

6.2.1. Toprak pH’sı

Toprak reaksiyonu, toprak dinamiklerinin en temel göstergelerinden biridir. Toprak pH’sı, biyokömür uygulamalarından büyük ölçüde etkilenmektedir (Xu ve ark., 2006). Alkali karakterli biyokömürler (sızıntı suyunun pH’sı > 7,0) daha yüksek piroliz sıcaklığı, daha düşük ısıtma hızı ve daha uzun bekleme süresi sonucunda oluşurken, asidik biyokömürler ise daha düşük sıcaklık, daha yüksek ısıtma hızı ve daha kısa bekleme süresiyle üretilmektedir (Uroic Štefanko ve Leszczynska, 2020). Biyokömür asidik topraklarda kireçleme etkisi göstermektedir (Yuan ve ark., 2013). Biyokömürde bulunan alkali metal oksitleri, hidroksitleri ve karbonatları toprak pH’sının artmasına neden olmaktadır (Dai ve ark., 2017). Karboksil, hidroksil ve fenolik gruplar gibi negatif yüklü fonksiyonel gruplar, toprak çözeltisindeki hidrojen iyonlarını bağlamakta; bunun sonucunda hidrojen iyonlarının aktivitesi azalmakta ve toprak pH’sı yükselmektedir (Chintala ve ark., 2014). Buna karşılık, Zhang ve ark. (2019), alkali topraklarda pH’nın azaldığını belirlemiş ve bunun biyokömürün oksidasyonu sırasında oluşan asitlerden kaynaklanabileceğini ifade etmiştir. Alkali topraklarda bulunan sodyum bikarbonat (NaHCO_3) ve sodyum karbonat (Na_2CO_3), kalsiyum bikarbonat [$\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$] ve kalsiyum karbonata (CaCO_3) dönüşerek toprak pH’sının azalmasına neden olmaktadır. (Liu ve ark., 2020). Ayrıca, bazı araştırmacılar (Senesi ve Plaza, 2007; Dias ve ark., 2010), toprak organik maddesinin ayrışması sonucu oluşan asidik bileşiklerin alkali toprakların pH değerini düşürdüğünü bildirmiştir. Kireçli topraklarda biyokömür uygulamaları da toprak pH’sını artırmıştır (Alazzaz ve ark., 2020). Bununla birlikte, yavaş piroliz ve buhar aktivasyonu ile üretilen asidik biyokömürlerin uygulanması, kireçli topraklarda pH’yı 0,2–0,4 birim azaltmıştır (Ippolito ve ark., 2016). Biyokömür yüksek dozlarda uygulansa bile, toprağın tamponlama kapasitesi toprak reaksiyonunda önemli değişikliklerin meydana gelmesini engellemiştir (Ippolito ve ark., 2014). Alkali karakterli kanatlı gübresi biyokömürünün uygulanması, toprak pH’sını 8,0’ın üzerine çıkarmış ve bu koşullarda bitkiler için besin elementlerinin yararlılığı azalmıştır (Novak ve ark., 2014). Tuz stresi koşullarında ise su sümbülünden elde edilen biyokömür uygulaması toprak pH değerini artırmış ve bu artışın biyokömür dozu ile doğru orantılı olduğu belirlenmiştir (Premalatha ve ark., 2023).

6.2.2. Elektriksel iletkenlik

Biyokömürün elektriksel iletkenliği (EC), 0,04 ile 54,2 dS m⁻¹ arasında değişmektedir (Rajkovich ve ark., 2012; Smider ve Singh, 2014). Toprağa 120 t ha⁻¹ dozunda biyokömür uygulanması, toprağın elektriksel iletkenliğini 14 kat artırmıştır (Mia ve ark., 2014). Biyokömürün su ile etkileşimi sonucunda açığa çıkan çözünür organik ve mineral bileşikler, toprak EC'sinin artmasına neden olmaktadır (Joseph ve ark., 2021). Pandian ve ark. (2016), biyokömür uygulamasının asidik kırmızı toprakların elektriksel iletkenliğini artırdığını bildirmiştir. Tuzların biyokömür gözeneklerinde fiziksel olarak tutulması, tuzluluktan etkilenen topraklarda elektriksel iletkenliğinin azalmasına neden olmuştur (Thomas ve ark., 2013). Tuz stresi koşullarında, biyokömür uygulama dozu arttıkça elektriksel iletkenlik azalmıştır (Premalatha ve ark., 2023).

6.2.3. Toprak organik karbonu

Biyokömür uygulamaları, yüksek miktarda ayrışmaya dirençli karbon içeriği sayesinde toprağın organik karbon miktarını artırmıştır (Zhang ve ark., 2012). Bu bulguyu destekleyen Shenbagavalli ve Mahimairaja (2012), farklı dozlarda biyokömür uygulamasının ardından toprak organik karbon (TOK) içeriğinde %33–35 oranında artış gözlemlemiştir. Biyokömür uygulamasıyla toprak organik karbonundaki artış yalnızca biyokömürün doğrudan sağladığı karbondan kaynaklanmamaktadır. Aynı zamanda biyokömürün toprak mikrobiyal aktivitesini, rizosferdeki organik madde dönüşüm süreçlerini ve kök eksudatlarının birikimini etkilemesi de bu artışa katkıda bulunmaktadır (Pandian ve ark., 2016). Yüksek kül içeriğine ve düşük uçucu madde miktarına sahip mısır sapı kökenli biyokömürün uygulanması, mollisol topraklarda karbon mineralizasyonunu azaltmıştır (Purakayastha ve ark., 2016).

6.2.4. Katyon değişim kapasitesi

Biyokömürün yüksek özgül yüzey alanı, hidroksil ve karboksil fonksiyonel grupları ile değişken yüzey yükleri toprağın katyon değişim kapasitesini (KDK) artırmaktadır (Van Zwieten ve ark., 2010). Van Zwieten ve ark. (2009), biyokömür uygulama dozu ile katyon değişim kapasitesi arasında pozitif doğrusal bir ilişki olduğunu göstermiştir. Taze biyokömürler başlangıçta topraktaki katyonları tutma kapasitesi bakımından sınırlı olmakla birlikte, zamanla yüzey oksidasyonuna uğramaları sonucunda karboksil gruplarının miktarı artmakta, buna bağlı olarak negatif yüzey yükleri çoğalmakta ve nihayetinde katyon adsorpsiyonu artmaktadır. Buna karşılık, 4 ay süreyle yaşlandırılmış odun kökenli biyokömürün uygulanması, 70 günlük inkübasyon sonunda taze biyokömüre kıyasla katyon değişim kapasitesini %10 oranında azaltmıştır (Zhao ve ark., 2015). Laboratuvar koşullarında gerçekleştirilen bir inkübasyon çalışmasında, kumlu topraklara ağırlıkça %3 ve %6 oranlarında sert ağaç kökenli biyokömür uygulamasının katyon değişim kapasitesi üzerinde herhangi bir değişikliğe neden olmadığı belirlenmiştir (Basso ve ark., 2013). Bu bulgular, biyokömür uygulamalarının toprak özellikleri üzerindeki etkilerinin dinamik bir yapıya sahip olduğunu doğrulamaktadır.

6.2.5. Besin elementi dinamikleri

Biyokömür, temel bitki besin elementleri için bir kaynak, bir tutucu (sink) veya bir düzenleyici (conditioner) olarak işlev görerek topraktaki besin elementi dinamiklerini etkilemektedir (Pan ve ark., 2021). Kullanılan hammadde ve piroliz koşullarına bağlı olarak bitkilere azot, fosfor ve potasyum gibi besin elementlerini sağlayabilmektedir (Zhang ve ark., 2016). Toprağın gözenekliliğini, özgül yüzey alanını ve yüzey yükünü artırarak besin elementlerinin tutulmasını güçlendirmekte, aynı zamanda yıkanma ve uçucu kayıpları

azaltmaktadır (Alkharabsheh ve ark., 2021). Ayrıca, biyokömür, toprak pH'sını, redoks potansiyelini ve mikrobiyal faaliyetleri artırarak besin elementlerinin yayılabilirliğini ve döngüsünü geliştirmektedir (Pan ve ark., 2021). Her ne kadar biyokömür katyon değişim kapasitesini ve toprak organik karbonunu artırsa da, azot, fosfor ve potasyum üzerindeki etkileri değişkenlik gösterebilmektedir (Murtaza ve ark., 2021).

Besin elementlerinin tutulması: Biyokömür, besin elementlerinin emisyon ve yıkanma yoluyla çevreye kaybını azaltarak bir besin elementi deposu görevi görmektedir (Das ve ark., 2023). Biyokömür uygulaması; katyon değişim kapasitesi, pH, su tutma kapasitesi, hacim ağırlığı ve biyolojik aktivite gibi çeşitli toprak özelliklerini etkileyerek besin elementlerinin yayılabilirliğini değiştirmektedir (Bolan ve ark., 2023; Yao ve ark., 2022). Azotun yıkanma ve gaz hâlinde kayıplarını azaltması ve fosforun yararlılığını artırması sayesinde biyokömür, toprakta azotun tutulmasını iyileştirmektedir (Zhang ve ark., 2016). Buna karşın, potasyum üzerindeki etkileri tutarlı değildir (Hussain ve ark., 2017). Biyokömürün besin elementlerini tutma kapasitesi; yüksek özgül yüzey alanı, gözenekli yapısı ve yüzeyinde bulunan polar ve apolar bölgelerden kaynaklanmaktadır (Alkharabsheh ve ark., 2021). Polar yüzey bölgeleri katyon değişim kapasitesini artırarak daha fazla besin elementinin tutulmasına ve yıkanma kayıplarının azalmasına katkı sağlamaktadır (He ve ark., 2024). Ayrıca biyokömür, organik madde miktarını ve toprak pH'sını artırarak besin elementi tutulmasını iyileştirmektedir (Fatima ve ark., 2021; Ullah ve ark., 2024). Besin elementlerini yavaş salma özelliği sayesinde azotun toprakta tutulmasını artırırken yıkanma kayıplarını da azaltır (Das ve ark., 2023; Marcinićzyk ve Oleszczuk, 2022). Böylece biyokömür, hem biyolojik hem de kimyasal mekanizmalar aracılığıyla azotun yayılabilirliğini düzenlemekte ve daha sağlıklı, güçlü bitki gelişimini desteklemektedir (Marcinićzyk ve Oleszczuk, 2022). Bununla birlikte, biyokömürün etkinliği; kullanılan hammadde, piroliz süreci ve toprağın özelliklerine bağlı olarak değişmektedir (Rodrigues ve ark., 2023).

Besin elementlerinin yıkanması: Biyokömürün besin elementlerinin yıkanmasını azaltma kapasitesi; fizikokimyasal özellikleri, piroliz sıcaklığı ve toprağın özellikleri arasındaki etkileşime bağlıdır (Cheng ve ark., 2018). Örneğin, daha yüksek piroliz sıcaklıkları bazı durumlarda besin elementinin yıkanmasını artırabilmektedir (Cheng ve ark., 2018). Bunun yanında, biyokömürün gözenek boyutu, özgül yüzey alanı ve kimyasal bileşimi besin elementlerinin depolanması ve salınmasında önemli rol oynamaktadır. Biyokömürün besin elementi kayıpları üzerindeki etkilerinin tam olarak ortaya konulabilmesi için uzun süreli arazi çalışmalarına ihtiyaç vardır.

Azot: Azot yönetimi, bitki gelişimi ve verimi açısından kritik öneme sahiptir. Azotun amonyak (NH_3), diazot monoksit (N_2O) emisyonları ve yıkanma yoluyla kaybedilmesi önemli çevresel sorunlara yol açmaktadır (Viancelli ve Michelson, 2024). Biyokömürün NH_3 uçuculuğunu azaltmada (Feng ve ark., 2022), denitrifikasyonu baskılamada (Tang ve ark., 2022) ve toplam diazot monoksit emisyonlarını düşürmede etkili olduğu gösterilmiştir (Kaur ve ark., 2023). Ayrıca biyokömür inorganik azot iyonlarını adsorbe ederek yüzey akışını ve azot yıkanmasını azaltmaktadır (Das ve ark., 2023). Yüzey özellikleri iyon adsorpsiyonunu artırdığı için besin elementi kayıpları azalmakta (Qi ve ark., 2017), diazot monoksit emisyonları düşmekte (Cayuela ve ark., 2014; Kaur ve ark., 2023) ve nitrat (NO_3^-) yıkanması sınırlandırılmaktadır (Yao ve ark., 2019; Chen ve ark., 2021).

Fosfor: Yang ve ark. (2021) ile Ghodszad ve ark. (2022) tarafından yürütülen çalışmalar, biyokömürün adsorpsiyon süreçleri yoluyla fosforun toprakta tutulmasını artırırken fosforun yıkanmasını azalttığını göstermiştir. Doğal koşullarda fosfor, toprakta demir (III) oksitlerine güçlü şekilde bağlanarak hareketliliğini kaybetmektedir (Shi ve ark., 2023). Özellikle

manyetik biyokömürler, manyetik olmayan biyokömürlere göre daha yüksek fosfat adsorpsiyon kapasitesine sahiptir (Ajmal ve ark., 2020). Bu yüksek adsorpsiyon, elektrostatik çekim, yüzey çökmesi ve ligand değişimi gibi çeşitli mekanizmalarla gerçekleşmektedir (Ajmal ve ark., 2020). Biyokömürün geniş özgül yüzey alanı ve iyonlaşmış fosfor formlarını güçlü şekilde adsorbe edebilmesi, besin elementi bakımından zengin topraklarda ortofosfat (ortho-P) yıkanmasını azaltmakta ve fosforun yayılsılığını artırabilmektedir (Hussain ve ark., 2017).

Potasyum: Biyokömürün potasyum yıkanması üzerindeki etkisi, üretim koşulları ve toprak özellikleri başta olmak üzere birçok faktöre bağlı olarak değişmektedir. 500 ve 587 °C’de üretilen biyokömürlerin Typic Plinthudult topraklarında potasyum yıkanmasını azalttığı bildirilmiştir (Anyebe ve ark., 2025). Buna karşılık, Han ve ark. (2023), üç yıllık bir tarla çalışmasında biyokömür uygulamasının ilk yıl potasyum yıkanmasını %30,42–32,40 oranında artırdığını, ancak sonraki iki yılda %11,60–14,01 oranında azalttığını bildirmiştir. Düşük verimliliğe sahip asidik topraklara odun biyokömürünün uygulanması, potasyum, kalsiyum ve magnezyumun 60 cm derinliğe kadar yıkanmasına neden olmuştur, ancak bu elementlerin konsantrasyonları derinlikle birlikte azalmıştır (Major ve ark., 2012). Hardie ve ark. (2015), biyokömürde bulunan yüksek çözünürlü potasyum nedeniyle A₁ horizonu altına geçen potasyum miktarında %65 artış olduğunu bildirmiştir. Ayrıca, üretim sıcaklığının artmasıyla biyokömür kaynaklı kalsiyum yıkanma kayıplarının azaldığı rapor edilmiştir (Cheng ve ark., 2018).

Besin elementi kullanım etkinliği: Besin elementi kullanım etkinliği (NUE), uygulanan birim besin elementi başına elde edilen ürün veya biyokütle miktarını ifade eder ve tarımsal üretimde önemli bir göstergedir (Sarkar ve ark., 2016). Besin elementi kullanım etkinliği, bitki özellikleri, toprak koşulları ve çevresel faktörlerden etkilenmektedir (Gavrilescu, 2021). Biyokömür, besin elementi alımını artırarak ve emisyon ile yıkanma kaynaklı kayıpları azaltarak doğrudan ve dolaylı yollarla besin elementi kullanım etkinliğini artırmaktadır (Li ve ark., 2022). Arif ve ark. (2017), odun biyokömürünün alkali topraklarda fosfor kullanım etkinliğini artırdığını bildirmiştir. Benzer şekilde, Prapagdee ve ark. (2017), yeşil fasulyede besin elementi kullanım etkinliğinin arttığını göstermiştir. Benzer şekilde, çeltik–buğday ekim sistemlerinde biyokömür uygulaması azot kullanım etkinliğini %20–53, fosfor kullanım etkinliğini ise %38–230 oranında artırmıştır (Zhang ve ark., 2020). Biyokömür, gaz emisyonlarını azaltması (Zhang ve ark., 2023), toprak organik karbonunu artırması (Arif ve ark., 2017) ve besin elementlerinin yıkanmasını azaltması (Cheng ve ark., 2018) sayesinde azot kullanım etkinliğini dolaylı olarak iyileştirmektedir. Bununla birlikte, biyokömürün genel olarak besin elementi kullanım etkinliğini artırdığı kabul edilse de, Haider ve ark. (2017), polisiklik aromatik hidrokarbonlar (PAH’lar) içeren karışık biyokömürlerin azotu bitkiler için daha az yararlı hâle getirerek besin elementi kullanım etkinliğini azaltabileceğini bildirmiştir.

6.3. Toprağın Biyolojik Özellikleri

6.3.1. Mikrobiyal popülasyon

Toprağa biyokömür ilavesi, toprağın fiziksel ve kimyasal özelliklerini değiştirerek mikroorganizmalar için uygun bir yaşam ortamı sağlamaktadır (Xu ve ark., 2014). Mikroorganizmaların biyokömüre yönelimi, biyokömür yüzeyinin hidrofobiklik derecesine bağlıdır. Uygun miktarda biyokömürün gübrelerle birlikte uygulanması, mikrobiyal popülasyonun artmasına ve buna bağlı olarak besin elementlerinin serbest kalmasına, dolayısıyla toprağın kimyasal özelliklerinin iyileşmesine katkı sağlamaktadır. Bu durumu destekleyen Warnock ve ark. (2007), biyokömür uygulamasının toprağın fiziksel ve kimyasal

özelliklerini değiştirmesi, allelokimyasal bileşikler detoksifiye etmesi ve küçük organizmalar için sığınak oluşturması nedeniyle mikrobiyal aktiviteyi artırdığını göstermiştir. Steiner ve ark. (2008) ise biyokömür uygulamasıyla gözlenen mikrobiyal aktivite artışını biyokömürün yüksek su tutma kapasitesine bağlamıştır. Biyokömürde bulunan gözenekler, toprak mikroorganizmaları için yaşam alanı oluşturmakta ve onları toprakta bulunan yırtıcı mikroeklembacıklılardan korumaktadır (Jaafar ve ark., 2014). Quilliam ve ark. (2013), çapı 200 nm'den büyük makrogözeneklerin toprak bakterileri için ideal bir yaşam alanı oluşturduğunu bildirmiştir. Biyokömürün mikro ve mezogözenekleri mikrobiyal metabolizma için gerekli suyu ve çözünmüş maddeleri depolamaktadır (Brewer ve Brown, 2012). Ayrıca biyokömürün yüksek özgül yüzey alanı mikroorganizmaların yüzeye kolonizasyonunu artırmaktadır. Siyah rengi nedeniyle daha fazla ısıyı absorbe eden biyokömür, mikrobiyal gelişim hızını ve enzimatik aktiviteyi de artırmaktadır (Gul ve ark., 2015). Biyokömürün alkali karakteri, Gram-negatif bakterilere kıyasla Gram-pozitif toprak bakterilerinin gelişimini daha fazla desteklemektedir (Farrell ve ark., 2013). Zimmermann ve ark. (2012), biyokömür yaşlandıkça pH'sının düştüğünü ve bunun mantar gelişimini desteklediğini bildirmiştir. Kumlu tınlı topraklara çam odunu biyokömürü ile bakteri karışımının (*Enterobacter cloacae* UW5 suşu) uygulanması, dört haftalık inkübasyon sonunda bakteri popülasyon yoğunluğunu %16 artırmıştır (Hale ve ark., 2015). Buna karşılık Quilliam ve ark. (2013), biyokömür uygulanan topraklarda mikrobiyal kolonizasyonun zayıf olduğunu bildirmiş; bunun nedenini biyokömürün, hacim toprağına göre daha düşük besin elementi içeriğine sahip olması ve düşük molekül ağırlıklı bileşiklerin daha fazla adsorplanması olarak açıklamıştır.

Biyokömür uygulamaları, mikroorganizmaların aktivitesini ve bolluğunu artırarak besin elementi döngüsünü etkilemektedir (Grossman ve ark., 2010). Schmidt ve ark. (2021) tarafından gerçekleştirilen bir meta-analiz çalışmasında, biyokömür uygulamasının asidik ve nötr topraklarda mikrobiyal biyokütleyi artırdığı, ancak alkali topraklarda benzer bir etki göstermediği belirtilmiştir. 100 mL besin ortamına 0,6 g mısır sapı biyokömürünün ilave edilmesi, *Bacillus mucilaginosus* (potasyum çözücü bakteri) gelişiminde 5 kat artış ve potasyum çözme aktivitesinde %80 oranında artış sağlamıştır (Liu ve ark., 2017). Benzer şekilde, Wang ve ark. (2018), biyokömür uygulamasının potasyum çözücü bakterilerin gelişimini teşvik ettiğini bildirmiştir. Biyokömür, allelokimyasal bileşikler adsorbe ederek arbusküler mikorizal mantarların kolonizasyonunu artırmıştır (Elmer ve Pignatello, 2011). Buna karşılık, biyokömürün toksik uçucu organik bileşikler adsorplanması bazı durumlarda mikrobiyal gelişimi olumsuz etkilemiştir (Gurtler ve ark., 2014). Ishii ve Kadoya (1994), biyokömür uygulamasının arbusküler mikorizal mantar popülasyonunu %40 oranında artırdığını ve bunun sürdürülebilir bitkisel üretim, ekosistem restorasyonu, karbon sekestrasyonu ve iklim değişikliğinin azaltılması açısından yararlı olabileceğini bildirmiştir. Ancak Warnock ve ark. (2010), ağırlıkça %2 ve %4 oranlarında uygulanan çam biyokömürünün hem köklerde hem de toprakta arbusküler mikorizal mantarların yoğunluğunu azalttığını rapor etmiştir.

6.3.2. Mikrobiyal biyokütle karbonu

Biyokömür uygulamaları, mikrobiyal biyokütle karbonunu (MBC) önemli ölçüde etkileyebilmektedir. Rutigliano ve ark. (2014), biyokömür uygulanan topraklarda mikrobiyal biyoküttele herhangi bir değişiklik gözlemlenmemiştir. Benzer şekilde Mitchell ve ark. (2015), kısa dönemde (20–30 gün) biyokömür uygulamasının mikrobiyal biyokütle karbonunu üzerinde herhangi bir etkisinin olmadığını, ancak 1 yıllık uygulamanın ardından mikrobiyal biyokütle karbonunun arttığını bildirmiştir. Okaliptüs odunundan elde edilen ve yüksek sıcaklıkta (≥ 600 °C) üretilen biyokömürün kumlu topraklara uygulanması, mikrobiyal biyokütle karbonunu %28 oranında azaltmıştır (Dempster ve ark., 2012). Buna karşılık, Ameloot ve ark. (2013), 700 °C'de söğüt odunundan üretilen biyokömürün kumlu tınlı

topraklara uygulanmasıyla mikrobiyal biyokütle karbonunun %29 oranında arttığını bildirmiştir. Benzer şekilde Luo ve ark. (2013), 700 °C'de üretilen biyokömür uygulanan killi tınlı topraklarda daha yüksek mikrobiyal biyokütle karbonu değerleri elde etmiştir.

6.3.3. Toprak enzimleri

Enzimler, bitki kökleri veya toprak mikroorganizmaları tarafından salgılanan ve besin elementlerinin biyoyararlanımını etkileyen maddelerdir (Gianfreda, 2015). Biyokömür uygulamaları mikrobiyal aktiviteyi, mikroorganizma bolluğunu ve mikrobiyal topluluk yapısını etkilediğinden, enzim aktiviteleri de bu uygulamalardan etkilenmektedir. Biyokömür ile substrat ve enzim arasındaki etkileşim, toprak enzim aktivitesini önemli ölçüde belirlemektedir (Lammirato ve ark., 2011). Biyokömürde bulunan fonksiyonel gruplara substrat ve enzimlerin adsorbe olması durumunda, enzim aktivitesi artabileceği gibi baskılanabilmektedir (Czimczik ve Masiello, 2007). Biyokömürün toprak enzimleri üzerindeki olumlu etkisi çeşitli çalışmalarda bildirilmiş (Park ve ark., 2011; Kumar ve ark., 2013); buna karşın Lehmann ve ark. (2011) farklı sonuçlar elde etmiştir. Biyokömür uygulamasıyla enzim aktivitelerinde görülen artışın, toprak organik karbonu, mikrobiyal biyokütle karbonu ve azot havuzlarının artmasına bağlı olduğu, bu bileşenlerin söz konusu enzimler için organik substrat görevi gördüğü belirtilmiştir (Wang ve ark., 2015). Çeltik kavuzu biyokömürünün 12 t ha⁻¹ dozunda uygulanması, toprak üreazı, katalaz, alkalen fosfataz ve invertaz aktivitelerini önemli ölçüde artırmıştır (Oladele, 2019). Toprak invertaz aktivitesinin toprak organik karbonu, yarıyışlı azot ve yarıyışlı fosfor ile pozitif korelasyon gösterdiği bildirilmiştir (Zhang ve ark., 2005). Shahzad ve ark. (2014), biyokömür uygulamasının fosfataz aktivitesini artırdığını ve bunun biyoyarayışlı fosfor oranının yükselmesine yol açtığını belirtmiştir. Sakin ve ark. (2021) ise badem kabuğundan üretilen biyokömürün dehidrogenaz ve üreaz aktiviteleri üzerinde anlamlı ve olumlu bir etki oluşturduğunu bildirmiştir. Buna karşılık Jing ve ark. (2020), enzim aktivitesi ile toprak organik karbonu arasında anlamlı bir ilişki belirlememiştir. Aynı çalışmada invertaz aktivitesinin NH₄⁺-N ve NO₃⁻-N ile ilişkili olduğu, üreaz aktivitesinin ise yarıyışlı azot ve fosfor ile pozitif korelasyon gösterdiği rapor edilmiştir. Biyokömür uygulamasıyla enzim aktivitelerindeki artışın bitki kök gelişiminin teşvik edilmesiyle bu enzimlerin salgılanmasının artırılmasından kaynaklandığı ifade edilmiştir (Kotroczko ve ark., 2014). 700 °C'de üretilen yüksek sıcaklık biyokömürleri ile inkübe edilen topraklarda dehidrogenaz aktivitesi %47 oranında azalırken, 350 °C'de üretilen düşük sıcaklık biyokömürü uygulaması dehidrogenaz aktivitesini %73 oranında artırmıştır (Ameloot ve ark., 2013). Toprak tipinden bağımsız olarak biyokömür uygulaması alkalen fosfomonoesteraz aktivitesini artırırken, asit fosfomonoesteraz aktivitesini baskılamıştır (Neble ve ark., 2007; Jin ve ark., 2016). Buna karşılık Masto ve ark. (2013), kırmızı topraklarda biyokömür uygulamasının hem asit hem de alkalen fosfomonoesteraz aktivitelerini artırdığını göstermiştir. Kompost ile karıştırılarak uygulanan biyokömür, tuzlu topraklarda dehidrogenaz ve fosfataz gibi enzim aktivitelerini artırmış ve besin elementi yarıyışlılığını iyileştirmiştir (Liu ve ark., 2021). Ayrıca biyokömürün, atık su arıtma çamurunun vermikompostlaştırılması sırasında uygulanması, ağır metallerin toksisitesini ve biyoyarayışlılığını azaltmış; bunun sonucunda toprak solucanlarının büyümesi ve çoğalması iyileşmiştir (Khan ve ark., 2020). Bununla birlikte, bazı çalışmalarda biyokömür uygulamasının toprak solucanlarının biyokütlesini azalttığı da bildirilmiştir (Malinska ve ark., 2016).

7. Biyokömür Uygulamalarında Sınırlılıklar ve Gelecek Perspektifleri

Biyokömür, toprak verimliliğini artırma, besin elementi tutma kapasitesini geliştirme ve çevresel açıdan önemli avantajlar sunma potansiyeline sahip olmasına rağmen bazı sınırlılıklara da sahiptir. Bu sınırlılıkların başında piroliz koşullarının kontrolünün karmaşık olması, kullanılan biyokütle kaynaklarının homojen özellik göstermemesi ve tarla koşullarındaki performansının her zaman tutarlı olmaması gelmektedir. Biyokömür uygulaması sırasında ince biyokömür partikülleri rüzgârla taşınabilmekte, bu durum uygulama etkinliğini azaltabilmekte ve çevresel kayıplara neden olabilmektedir. Ayrıca, ağır metal bakımından zengin biyokütle kaynaklarından üretilen biyokömürlerde, 700 °C'nin altındaki sıcaklıklarda ağır metaller uçucu olmadığından kadmiyum (Cd), kurşun (Pb), çinko (Zn), krom (Cr) ve bakır (Cu) gibi elementler biyokömürde yoğunlaşabilmektedir (Hoque ve ark., 2025). Örneğin, kanalizasyon çamurundan elde edilen biyokömür yaklaşık 10–20 mg kg⁻¹ kadmiyum, 200–500 mg kg⁻¹ çinko ve 100–300 mg kg⁻¹ bakır içerebilmekte olup, bu durum dikkatli bir yönetim gerektirmektedir (Méndez ve ark., 2012). Bunun yanı sıra, biyokömürde biriken ağır metaller zaman içinde çevreye salınabileceğinden önemli bir risk oluşturmaktadır. Tekrarlanan biyokömür uygulamaları toprakta yararlı solucanların yaşam oranlarını da azaltabilmektedir. Uygulanacak uygun biyokömür miktarı ise toprağın tipi, tekstürü ve verimlilik düzeyine bağlı olarak değişmektedir. Ayrıca, yüksek düzeyde ağır metal içeren biyokütle kaynaklarının biyokömür üretiminde kullanılması yalnızca ekonomik açıdan uygun olmamakta, aynı zamanda toprak sağlığı ve verimliliğinin bozulmasına da neden olabilmektedir (Tripathi ve ark., 2016). Biyokömürün geliştirilmesine yönelik kapsamlı bir yaklaşım, malzeme bilimi alanındaki farklı materyallerin biyokömüre entegre edilmesiyle özelliklerinin iyileştirilmesi yoluyla gerçekleştirilebilmektedir (Woolf ve ark., 2010; Shackley ve ark., 2011). Son yıllarda geliştirilen metal-organik çerçeve (Metal–Organic Framework, MOF) tabanlı biyokömür kompozitleri tarım alanında başarıyla kullanılmaktadır. Bu kompozit materyaller yüksek gözeneklilik özellikleri sayesinde kontrollü besin elementi salınımı sağlayan akıllı gübreler için uygun taşıyıcı materyaller olarak kullanılabilen ve besin elementi kullanım etkinliğini artırabilmektedir (Hoque ve ark., 2025). MOF–biyokömür kompozitleri, kadmiyum, kurşun ve arsenik (As) gibi ağır metallerin tutulmasında yüksek etkinlik göstererek bunların çevrede yayılmasını sınırlandırmaktadır. Ayrıca, yararlı toprak mikroorganizmalarını destekleyerek besin elementi döngüsünü kolaylaştırmakta, toprak sağlığını geliştirmekte ve bitki gelişimini teşvik etmektedir. Bu sistemlerin birlikte kullanımı, karbonun daha uzun süre depolanmasını sağlaması, sera gazı emisyonlarını azaltması ve diğer ekosistem hizmetlerini desteklemesi nedeniyle iklim değişikliğinin azaltılmasına da katkı sunmaktadır. Bununla birlikte, MOF tabanlı biyokömür kompozitleri üzerine yapılan çalışmalar henüz yeterli düzeyde değildir. Özellikle bu materyallerin bitkilere ve hayvanlara olası sızıntı risklerinin değerlendirilmesi ve çevresel güvenilirliklerinin doğrulanabilmesi için kapsamlı ve uzun süreli tarla araştırmalarına ihtiyaç vardır (Hoque ve ark., 2025).

8. Sonuçlar

Biyokömür, farklı biyokütle kaynaklarının termokimyasal dönüşümüyle elde edilen, karbon bakımından zengin ve özellikleri üretim koşullarına bağlı olarak değişen önemli bir toprak düzenleyicisidir. Kullanılan hammadde, üretim yöntemi ve proses parametreleri biyokömürün fiziksel, kimyasal ve yüzey özelliklerini doğrudan belirlediğinden, tarımsal uygulamalardaki başarısı büyük ölçüde bu özelliklere bağlıdır. Bu nedenle, biyokömürün uygulama amacına uygun şekilde seçilmesi ve kapsamlı karakterizasyonunun yapılması, beklenen etkinliğin sağlanabilmesi açısından temel bir gerekliliktir.

Mevcut bilimsel bulgular, biyokömür uygulamalarının uygun koşullarda toprağın fiziksel, kimyasal ve biyolojik özelliklerini iyileştirebildiğini göstermektedir. Toprak organik

karbonunun artırılması, katyon değişim kapasitesinin geliştirilmesi, su tutma kapasitesinin yükseltilmesi, besin elementi kayıplarının azaltılması ve mikrobiyal faaliyetlerin desteklenmesi, literatürde en sık bildirilen olumlu etkiler arasında yer almaktadır. Bununla birlikte, biyokömür uygulamalarından elde edilen sonuçlar her zaman aynı doğrultuda değildir. Kullanılan biyokömürün hammaddesi, piroliz sıcaklığı, uygulama dozu, toprağın fiziksel ve kimyasal özellikleri ile çevresel koşullar, uygulamanın etkinliğini belirleyen başlıca faktörlerdir. Bu durum, biyokömürün tek tip bir ürün olarak değil, özellikleri üretim sürecine bağlı olarak değişen fonksiyonel bir materyal olarak değerlendirilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır.

Diğer taraftan, biyokömürün tarımsal kullanımı sırasında hammadde kalitesi, ağır metal içeriği, yüksek kül oranı, aşırı alkalilik ve bazı organik kirleticilerin varlığı gibi potansiyel riskler de göz önünde bulundurulmalıdır. Bu nedenle üretim sürecinin standardizasyonu ve kalite kontrolünün sağlanması, güvenli kullanım açısından büyük önem taşımaktadır. Son yıllarda geliştirilen modifiye biyokömürler ve biyokömür esaslı kompozit materyaller ise kontrollü besin elementi salımı, kirleticilerin immobilizasyonu ve toprak iyileştirme uygulamalarında yeni olanaklar sunmaktadır. Bununla birlikte, bu materyallerin farklı toprak tiplerindeki uzun dönem performanslarının ve çevresel etkilerinin ortaya konulabilmesi için daha kapsamlı arazi çalışmalarına ihtiyaç bulunmaktadır.

Sonuç olarak, biyokömür sürdürülebilir toprak yönetimi açısından önemli bir potansiyele sahip olmakla birlikte, uygulama başarısı doğru hammadde seçimi, uygun üretim teknolojisi, ayrıntılı karakterizasyon ve uygulama koşullarının birlikte değerlendirilmesine bağlıdır.

Gelecekte yürütülecek çalışmaların, standart üretim ve karakterizasyon yöntemlerinin geliştirilmesine, uzun süreli arazi denemelerinin artırılmasına ve farklı toprak-bitki sistemlerinde biyokömürün uzun dönem etkilerinin ortaya konulmasına odaklanması, bu materyalin tarımsal uygulamalardaki kullanımının bilimsel temellerini daha da güçlendirecektir.

Kaynaklar

- Abrol, V., Ben-Hur, M., Verheijen, F. G. A., Keizer, J. J., Martins, M. A. S., Tenaw, H., ... Graber, E. R. (2016). Biochar effects on soil water infiltration and erosion under seal formation conditions: Rainfall simulation experiment. *Journal of Soils and Sediments*, 16(12), 2709–2719.
- Afshar, M., & Mofatteh, S. (2024). Biochar for a sustainable future: Environmentally friendly production and diverse applications. *Results in Engineering*, 23, 102433.
- Ahmad, J., Cordioli, E., Patuzzi, F., Prando, D., Castaldi, M. J., & Baratieri, M. (2016). Possible utilization pathways of char from biomass thermochemical conversion: Char as a catalytic filtering medium for tar cracking. In *Proceedings of the 24th European Biomass Conference and Exhibition* (pp. 475–479). Florence, Italy: ETA-Florence Renewable Energies.
- Ahmad, J., Patuzzi, F., Rashid, U., Shahabz, M., Ngamcharussrivichai, C., & Baratieri, M. (2021). Exploring untapped effect of process conditions on biochar characteristics and applications. *Environmental Technology & Innovation*, 21, 101310.
- Ahmad, M., Lee, S. S., Dou, X., Mohan, D., Sung, J. K., Yang, J. E., & Ok, Y. S. (2012). Effects of pyrolysis temperature on soybean stover- and peanut shell-derived biochar properties and TCE adsorption in water. *Bioresource Technology*, 118, 536–544.
- Ahmad, M., Rajapaksha, A. U., Lim, J. E., Zhang, M., Bolan, N., Mohan, D., ... Ok, Y. S. (2014). Biochar as a sorbent for contaminant management in soil and water: A review. *Chemosphere*, 99, 19–33.
- Ajmal, Z., Muhmood, A., Dong, R., & Wu, S. (2020). Probing the efficiency of magnetically modified biomass-derived biochar for effective phosphate removal. *Journal of Environmental Management*, 253, 109730.
- Alazzaz, A., Usman, A. R. A., Ahmad, M., Ibrahim, H. M., Elfaki, J., Sallam, A. S., ... Al-Wabel, M. I. (2020). Potential short-term negative versus positive effects of olive mill-derived biochar on nutrient availability in a calcareous loamy sand soil. *PLOS ONE*, 15(7), e0232811.
- Alkharabsheh, H. M., Seleiman, M. F., Battaglia, M. L., Shami, A., Jalal, R. S., Alhammad, B. A., ... Al-Saif, A. M. (2021). Biochar and its broad impacts in soil quality and fertility, nutrient leaching and crop productivity: A review. *Agronomy*, 11(5), 993.
- Al-Shammery, A. A. G., Al-Shihmani, L. S. S., Fernández-Gálvez, J., & Caballero-Calvo, A. (2024). Optimizing sustainable agriculture: A comprehensive review of agronomic practices and their impacts on soil attributes. *Journal of Environmental Management*, 364, 121487.
- Ameloot, N., De Neve, S., Jegajeevagan, K., Yildiz, G., Buchan, D., Funkuin, N. Y., ... Sleutel, S. (2013). Short-term CO₂ and N₂O emissions and microbial properties of biochar amended sandy loam soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 57, 401–410.
- Anyebe, O., Sadiq, F. K., Manono, B. O., & Matsika, T. A. (2025). Biochar characteristics and application: Effects on soil ecosystem services and nutrient dynamics for enhanced crop yields. *Nitrogen*, 6(2), 31.
- Arif, M., Ashraf, M., Shahid, M., Zubair, M., Riaz, M., & Saif, M. (2017). Wood biochar improves phosphorus use efficiency in alkaline soil. *Journal of Environmental Quality*, 46, 631–644.
- Aslam, Z., Khalid, M., & Aon, M. (2014). Impact of biochar on soil physical properties. *Scholars Journal of Agriculture and Veterinary Sciences*, 4(5), 280–284.
- Ayaz, M., Feizienė, D., Tilvikienė, V., Akhtar, K., Stulpinaitė, U., & Iqbal, R. (2021). Biochar role in the sustainability of agriculture and environment. *Sustainability*, 13, 1330.

- Azad, N., Behmanesh, J., Rezaverdinejad, V., Abbasi, F., & Navabian, M. (2020). An analysis of optimal fertigation implications in different soils on reducing environmental impacts of agricultural nitrate leaching. *Scientific Reports*, 10, 7797.
- Azeem, M., Hayat, R., Hussain, Q., Ahmed, M., Imran, M., & Crowley, D. E. (2016). Effect of biochar amendment on soil microbial biomass, abundance and enzyme activity in the mash bean field. *Journal of Biodiversity and Environmental Sciences*, 8, 1–13.
- Bai, J., Song, J., Chen, D., Zhang, Z., Yu, Q., Ren, G., ... Yang, G. (2023). Biochar combined with N fertilization and straw return in wheat-maize agroecosystem: Key practices to enhance crop yields and minimize carbon and nitrogen footprints. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 347, 108366.
- Bakraoui, M., Karouach, F., Ouhammou, B., Aggour, M., Essamri, A., & El Bari, H. (2020). Biogas production from recycled paper mill wastewater by UASB digester: Optimal and mesophilic conditions. *Biotechnology Reports*, 25, e00402.
- Banik, C., Bakshi, S., Laird, D. A., Smith, R. G., & Brown, R. C. (2023). Impact of biochar-based slow-release N-fertilizers on maize growth and nitrogen recovery efficiency. *Journal of Environmental Quality*, 52, 630–640.
- Basso, A. S., Miguez, F. E., Laird, D. A., Horton, R., & Westgate, M. (2013). Assessing potential of biochar for increasing water-holding capacity of sandy soils. *GCB Bioenergy*, 5, 132–143.
- Beesley, L., Moreno-Jiménez, E., Gomez-Eyles, J. L., Harris, E., Robinson, B., & Sizmur, T. (2011). A review of biochars' potential role in the remediation, revegetation and restoration of contaminated soils. *Environmental Pollution*, 159, 3269–3282.
- Berger, C. (2012). *Biochar and activated carbon filters for greywater treatment: Comparison of organic matter and nutrient removal*. Uppsala, Sweden: Swedish University of Agricultural Sciences.
- Bergman, P. C. A., Boersma, A. R., Zwart, R. W. R., & Kiel, J. H. A. (2005). *Torrefaction for biomass co-firing in existing coal-fired power stations* (Report No. ECN-C--05-013). Petten, The Netherlands: Energy Research Centre of the Netherlands.
- Bolan, N., Sarmah, A. K., Bordoloi, S., Bolan, S., Padhye, L. P., Van Zwieten, L., ... Siddique, K. H. M. (2023). Soil acidification and the liming potential of biochar. *Environmental Pollution*, 317, 120632.
- Brewer, C. E., & Brown, R. C. (2012). Biochar. In A. Sayigh (Ed.), *Comprehensive renewable energy* (pp. 357–384). Oxford, UK: Elsevier.
- Brodowski, S., Amelung, W., Haumaier, L., & Zech, W. (2007). Black carbon contribution to stable humus in German arable soils. *Geoderma*, 139, 220–228.
- Cantrell, K. B., Hunt, P. G., Uchimiya, M., Novak, J. M., & Ro, K. S. (2012). Impact of pyrolysis temperature and manure source on physicochemical characteristics of biochar. *Bioresource Technology*, 107, 419–428.
- Cayuela, M. L., Van Zwieten, L., Singh, B. P., Jeffery, S., Roig, A., & Sánchez-Monedero, M. A. (2014). Biochar's role in mitigating soil nitrous oxide emissions: A review and meta-analysis. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 191, 5–16.
- Chagas, J. K. M., de Figueiredo, C. C., & Ramos, M. L. G. (2022). Biochar increases soil carbon pools: Evidence from a global meta-analysis. *Journal of Environmental Management*, 305, 114403.
- Chaturvedi, S., Singh, S. V., Dhyani, V. C., Govindaraju, K., Vinu, R., & Mandal, S. (2023). Characterization, bioenergy value, and thermal stability of biochars derived from diverse agriculture and forestry lignocellulosic wastes. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 13, 879–892.

- Chen, X., Yang, S. H., Jiang, Z. W., Ding, J., & Sun, X. (2021). Biochar as a tool to reduce environmental impacts of nitrogen loss in water-saving irrigation paddy field. *Journal of Cleaner Production*, 290, 125811.
- Cheng, N., Wang, B., Wu, P., Lee, X., Xing, Y., Chen, M., & Gao, B. (2021). Adsorption of emerging contaminants from water and wastewater by modified biochar: A review. *Environmental Pollution*, 273, 116448.
- Cheng, Y., Li, Y., Cao, X., Ma, Y., & Li, X. (2018). Biochar effects on nutrient leaching in soil. *Journal of Environmental Quality*, 47, 657–674.
- Chintala, R., Mollinedo, J., Schumacher, T. E., Malo, D. D., & Julson, J. L. (2014). Effect of biochar on chemical properties of acidic soil. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 60, 393–404.
- Czimczik, C. I., & Masiello, C. A. (2007). Controls on black carbon storage in soils. *Global Biogeochemical Cycles*, 21, 1–11.
- Dai, Z., Zhang, X., Tang, C., Muhammad, N., Wu, J., Brookes, P. C., ... Xu, J. (2017). Potential role of biochars in decreasing soil acidification: A critical review. *Science of the Total Environment*, 581–582, 601–611.
- Dalahmeh, S. S. (2016). *Capacity of biochar filters for wastewater treatment in onsite systems: Technical report* (Report No. 2016:90, pp. 1–43). Uppsala, Sweden: Swedish University of Agricultural Sciences.
- Das, S. K., Ghosh, G. K., & Avasthe, R. (2023). Biochar application for environmental management and toxic pollutant remediation. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 13, 555–566.
- Dempster, D. N., Gleeson, D. B., Solaiman, Z. M., Jones, D. L., & Murphy, D. V. (2012). Decreased soil microbial biomass and nitrogen mineralisation with Eucalyptus biochar addition to a coarse textured soil. *Plant and Soil*, 354, 311–324.
- Dias, B. O., Silva, C. A., Higashikawa, F. S., Roig, A., & Sánchez-Monedero, M. A. (2010). Use of biochar as bulking agent for the composting of poultry manure: Effect on organic matter degradation and humification. *Bioresource Technology*, 101, 1239–1246.
- Doan, T. T., Henry-des-Tureaux, T., Rumpel, C., Janeau, J. L., & Jouquet, P. (2015). Impact of compost, vermicompost and biochar on soil fertility, maize yield and soil erosion in northern Vietnam: A three year mesocosm experiment. *Science of the Total Environment*, 514, 147–154.
- Domingo-Olivé, F., Bosch-Serra, A. D., Yagüe, M. R., Poch, R. M., & Boixadera, J. (2016). Long term application of dairy cattle manure and pig slurry to winter cereals improves soil quality. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 104, 39–51.
- dos Reis, R. A., Fernández-Baldo, M. A., Nunes, R. S., & Seabra, A. B. (2025). Metal-organic frameworks: An overview of a possible solution for modern agriculture. *Microporous and Mesoporous Materials*, 391, 113609.
- Elmer, W. H., & Pignatello, J. J. (2011). Effect of biochar amendments on mycorrhizal associations and Fusarium crown and root rot of asparagus in replant soils. *Plant Disease*, 95, 960–966.
- Enaïme, G., Baçaoui, A., Yaacoubi, A., & Lübken, M. (2020). Biochar for wastewater treatment—Conversion technologies and applications. *Applied Sciences*, 10(10), 3492.
- Fang, J., Zhan, L., Ok, Y. S., & Gao, B. (2018). Mini review of potential applications of hydrochar derived from hydrothermal carbonization of biomass. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 57, 15–21.

- Farrell, M., Kuhn, T. K., Macdonald, L. M., Maddern, T. M., Murphy, D. V., Hall, P. A., ... Baldock, J. A. (2013). Microbial utilisation of biochar-derived carbon. *Science of the Total Environment*, 465, 288–297.
- Fatima, S., Riaz, M., Al-Wabel, M. I., Arif, M. S., Yasmeen, T., Hussain, Q., ... Arif, M. (2021). Higher biochar rate strongly reduced decomposition of soil organic matter to enhance C and N sequestration in nutrient-poor alkaline calcareous soil. *Journal of Soils and Sediments*, 21, 148–162.
- Feng, Y., Feng, Y., Liu, Q., Chen, S., Hou, P., Poinern, G., ... Xia, C. (2022). How does biochar aging affect NH₃ volatilization and GHGs emissions from agricultural soils? *Environmental Pollution*, 294, 118598.
- Funke, A., & Ziegler, F. (2010). Hydrothermal carbonization of biomass: A summary and discussion of chemical mechanisms for process engineering. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 4(2), 160–177.
- Gavrilescu, M. (2021). Water, soil, and plants interactions in a threatened environment. *Water*, 13(19), 2746.
- Ghaedi, S., Rajabi, H., Hadi Mosleh, M., & Sedighi, M. (2025). MOF biochar composites for environmental protection and pollution control. *Bioresource Technology*, 418, 131982.
- Ghodsad, L., Reyhanitabar, A., Oustan, S., & Alidokht, L. (2022). Phosphorus sorption and desorption characteristics of soils as affected by biochar. *Soil and Tillage Research*, 216, 105251.
- Gianfreda, L. (2015). Enzymes of importance to rhizosphere processes. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 15(2), 283–306.
- Glaser, B., Lehmann, J., & Zech, W. (2002). Ameliorating physical and chemical properties of highly weathered soils in the tropics with charcoal—A review. *Biology and Fertility of Soils*, 35, 219–230.
- Grossman, J. M., O'Neill, B. E., Tsai, S. M., Liang, B. Q., Neves, E., Lehmann, J., ... Thies, J. E. (2010). Amazonian anthrosols support similar microbial communities that differ distinctly from those extant in adjacent, unmodified soils of the same mineralogy. *Microbial Ecology*, 60, 192–205.
- Gul, S., Whalen, J. K., Thomas, B. W., Sachdeva, V., & Deng, H. (2015). Physicochemical properties and microbial responses in biochar-amended soils: Mechanisms and future directions. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 206, 46–59.
- Gurtler, J. B., Boateng, A. A., Han, Y., & Douds, D. D., Jr. (2014). Inactivation of *E. coli* O157 in cultivable soil by fast and slow pyrolysis-generated biochar. *Foodborne Pathogens and Disease*, 11, 215–223.
- Haider, G., Murtaza, G., Usman, M., Khan, M. R., & Shah, M. S. (2017). Mixed biochar reduces nitrogen use efficiency due to polyaromatic hydrocarbons. *Journal of Environmental Quality*, 46, 645–656.
- Hale, L., Luth, M., & Crowley, D. (2015). Biochar characteristics relate to its utility as an alternative soil inoculum carrier to peat and vermiculite. *Soil Biology and Biochemistry*, 81, 228–235.
- Han, H., Chen, T., Liu, C., Zhang, F., Sun, Y., Bai, Y., ... Chen, W. (2023). Effects of acid modified biochar on potassium uptake, leaching and balance in an alternate wetting and drying paddy ecosystem. *Science of the Total Environment*, 900, 166344.
- Han, C., Chen, F., Lian, C., Liang, R., Liang, W., Chen, M., Luo, A., & Gao, T. (2020). Development of preparation method and application of biochar. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, 10, 6–13.

- Han, M., Zhang, J., Zhang, L., & Wang, Z. (2023). Effect of biochar addition on crop yield, water and nitrogen use efficiency: A meta-analysis. *Journal of Cleaner Production*, 420, 138425.
- Hardie, M., Clothier, B., Bound, S., Oliver, G., & Close, D. (2014). Does biochar influence soil physical properties and soil water availability? *Plant and Soil*, 376, 347–361.
- Hardie, M., Haynes, P. M., Quirk, R. J., Dalal, R. C., & Menzies, N. W. (2015). Biochar effects on potassium leaching in soil. *Journal of Environmental Quality*, 44, 657–674.
- He, D., Luo, Y., & Zhu, B. (2024). Feedstock and pyrolysis temperature influence biochar properties and its interactions with soil substances: Insights from a DFT calculation. *Science of the Total Environment*, 922, 171259.
- Herath, H. M. S. K., Camps-Arbestain, M., & Hedley, M. (2013). Effect of biochar on soil physical properties in two contrasting soils: An Alfisol and an Andisol. *Geoderma*, 209–210, 188–197.
- Hoque, M. M., Saha, B. K., Scopa, A., & Drosos, M. (2025). Biochar in agriculture: A review on sources, production, and composites related to soil fertility, crop productivity, and environmental sustainability. *C*, 11(2), 50.
- Hunt, J., DuPont, M., Sato, D., & Kawabata, A. (2010). *The basics of biochar: A natural soil amendment*. Soil and Crop Management, SCM-30, 1–6.
- Hussain, M., Farooq, M., & Wakeel, A. (2017). Biochar effects on soil nutrient availability and crop yield: A review. *Journal of Environmental Quality*, 46, 687–696.
- Igalavithana, A. D., Mandal, S., Niazi, N. K., Vithanage, M., Parikh, S. J., Mukome, F. N., ... Ok, Y. S. (2017). Advances and future directions of biochar characterization methods and applications. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 47, 2275–2330.
- Ighalo, J. O., Ohoro, C. R., Ojukwu, V. E., Oniye, M., Shaikh, W. A., Biswas, J. K., ... Rangabhashiyam, S. (2025). Biochar for ameliorating soil fertility and microbial diversity: From production to action of the black gold. *iScience*, 28, 111524.
- Ippolito, J. A., Ducey, T. F., Cantrell, K. B., Novak, J. M., & Lentz, R. D. (2016). Designer, acidic biochar influences calcareous soil characteristics. *Chemosphere*, 142, 184–191.
- Ippolito, J. A., Stromberger, M. E., Lentz, R. D., & Dungan, R. S. (2014). Hardwood biochar influences calcareous soil physicochemical and microbiological status. *Journal of Environmental Quality*, 43, 681–689.
- Ishii, T., & Kadoya, K. (1994). Effects of charcoal as a soil conditioner on citrus growth and vesicular-arbuscular mycorrhizal development. *Journal of the Japanese Society for Horticultural Science*, 63, 529–535.
- Jaafar, N. M., Clode, P. L., & Abbott, L. K. (2014). Microscopy observations of habitable space in biochar for colonization by fungal hyphae from soil. *Journal of Integrative Agriculture*, 13, 483–490.
- Jain, A., Balasubramanian, R., & Srinivasan, M. P. (2016). Hydrothermal conversion of biomass waste to activated carbon with high porosity: A review. *Chemical Engineering Journal*, 283, 789–805.
- Jeffery, S., Meinders, M. B. J., Stoof, C. R., Bezemer, T. M., van de Voorde, T. F. J., Mommer, L., ... van Groenigen, J. W. (2015). Biochar application does not improve the soil hydrological function of a sandy soil. *Geoderma*, 251–252, 47–54.
- Jien, S. H., & Wang, C. S. (2013). Effects of biochar on soil properties and erosion potential in a highly weathered soil. *Catena*, 110, 225–233.
- Jin, Y., Liang, X., He, M., Liu, Y., Tian, G., & Shi, J. (2016). Manure biochar influence upon soil properties, phosphorus distribution and phosphatase activities: A microcosm incubation study. *Chemosphere*, 142, 128–135.

- Jing, Y., Zhang, Y., Han, I., Wang, P., Mei, Q., & Huang, Y. (2020). Effects of different straw biochars on soil organic carbon, nitrogen, available phosphorus, and enzyme activity in paddy soil. *Scientific Reports*, 10, 8837.
- Joseph, S., Cowie, A. L., Van Zwieten, L., Bolan, N., Budai, A., Buss, W., ... Lehmann, J. (2021). How biochar works, and when it doesn't: A review of mechanisms controlling soil and plant responses to biochar. *GCB Bioenergy*, 13, 1731–1764.
- Kaetzl, K., Lübken, M., Gehring, T., & Wichern, M. (2018). Efficient low-cost anaerobic treatment of wastewater using biochar and woodchip filters. *Water*, 10(7), 818.
- Kara, R. S., Pazarlar, S., Okur, B., Almaz, C., Okur, N., Matula, S., & Miháliková, M. (2024). Texture and contamination-level dependent effects of calcium-rich deinking paper sludge biochar on soil Cd availability, enzymatic activity, and plant stress mitigation. *Water, Air, & Soil Pollution*, 235, 454.
- Kaur, N., Kieffer, C., Ren, W., & Hui, D. (2023). How much is soil nitrous oxide emission reduced with biochar application? An evaluation of meta-analyses. *GCB Bioenergy*, 15, 24–37.
- Khan, M. B., Cui, X., Jilani, G., Tang, L., Lu, M., Cao, X., ... He, Z. (2020). New insight into the impact of biochar during vermi-stabilization of divergent biowastes: Literature synthesis and research pursuits. *Chemosphere*, 238, 124679.
- Khorram, M. S., Zhang, Q., Lin, D., Zheng, Y., Fang, H., & Yu, Y. (2016). Biochar: A review of its impact on pesticide behavior in soil environments and its potential applications. *Journal of Environmental Sciences*, 44, 269–279.
- Klinghoffer, N. B., Castaldi, M. J., & Nzihou, A. (2015). Influence of char composition and inorganics on catalytic activity of char from biomass gasification. *Fuel*, 157, 37–47.
- Kong, L., Xiong, Y., Sun, L., Tian, S., Xu, X., Zhao, C., ... Liu, H. (2014). Sorption performance and mechanism of a sludge-derived char as porous carbon-based hybrid adsorbent for benzene derivatives in aqueous solution. *Journal of Hazardous Materials*, 274, 205–211.
- Kotroczó, Z., Veres, Z., Biró, B., Tóth, J. A., & Fekete, I. (2014). Influence of temperature and organic matter content on soil respiration in a deciduous oak forest. *Eurasian Journal of Soil Science*, 3, 303–310.
- Kumar, S., Masto, R. E., Ram, L. C., Sarkar, P., George, J., & Selvi, V. A. (2013). Biochar preparation from *Parthenium hysterophorus* and its potential use in soil application. *Ecological Engineering*, 55, 67–72.
- Lammirato, C., Miltner, A., & Kästner, M. (2011). Effects of wood char and activated carbon on the hydrolysis of cellobiose by β -glucosidase from *Aspergillus niger*. *Soil Biology and Biochemistry*, 43, 1936–1942.
- Lee, J., Lee, K., Sohn, D., Kim, Y. M., & Park, K. Y. (2018). Hydrothermal carbonization of lipid extracted algae for hydrochar production and feasibility of using hydrochar as a solid fuel. *Energy*, 153, 913–920.
- Lehmann, J. (2009). Terra preta nova—Where to from here? In W. I. Woods, W. G. Teixeira, J. Lehmann, C. Steiner, A. WinklerPrins, & L. Rebellato (Eds.), *Amazonian dark earths: Wim Sombroek's vision* (pp. 473–486). Dordrecht, The Netherlands: Springer Netherlands.
- Lehmann, J., Gaunt, J., & Rondon, M. (2006). Bio-char sequestration in terrestrial ecosystems—A review. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 11, 403–427.
- Lehmann, J., Rillig, M. C., Thies, J., Masiello, C. A., Hockaday, W. C., & Crowley, D. (2011). Biochar effects on soil biota—A review. *Soil Biology and Biochemistry*, 43, 1812–1836.

- Li, Q., Jia, Z., Fu, J., Yang, X., Shi, X., & Chen, R. (2022). Biochar enhances partial denitrification/anammox by sustaining high rates of nitrate to nitrite reduction. *Bioresource Technology*, 349, 126869.
- Li, Y. Y., Zhang, F. B., Yang, M. Y., Zhang, J. Q., & Xie, Y. G. (2019). Impacts of biochar application rates and particle sizes on runoff and soil loss in small cultivated loess plots under simulated rainfall. *Science of the Total Environment*, 649, 1403–1413.
- Lin, Y., Ma, X., Peng, X., Yu, Z., Fang, S., Lin, Y., & Fan, Y. (2016). Combustion, pyrolysis and char CO₂-gasification characteristics of hydrothermal carbonization solid fuel from municipal solid wastes. *Fuel*, 181, 905–915.
- Liu, D., Ding, Z., Ali, E. F., Kheir, A. M. S., Eissa, M. A., & Ibrahim, O. H. M. (2021). Biochar and compost enhance soil quality and growth of roselle (*Hibiscus sabdariffa* L.) under saline conditions. *Scientific Reports*, 11, 8739.
- Liu, D., Feng, Z., Zhu, H., Yu, L., Yang, K., Yu, S., ... Guo, W. (2020). Effects of corn straw biochar application on soybean growth and alkaline soil properties. *BioResources*, 15(1), 1463–1481.
- Liu, S., Tang, W., Yang, F., Meng, J., Chen, W., & Li, X. (2017). Influence of biochar application on potassium-solubilizing *Bacillus mucilaginosus* as potential biofertilizer. *Preparative Biochemistry & Biotechnology*, 47, 32–37.
- Liu, X. H., Han, F. P., & Zhang, X. C. (2012). Effect of biochar on soil aggregates in the Loess Plateau: Results from incubation experiments. *International Journal of Agriculture & Biology*, 14, 975–979.
- Luo, Y., Durenkamp, M., De Nobili, M., Lin, Q., Devonshire, B. J., & Brookes, P. C. (2013). Microbial biomass growth following incorporation of biochars produced at 350 °C or 700 °C, in a silty-clay loam soil of high and low pH. *Soil Biology and Biochemistry*, 57, 513–523.
- Ma, N., Zhang, L., Zhang, Y., Yang, L., Yu, C., Yin, G., ... Ma, X. (2016). Biochar improves soil aggregate stability and water availability in a Mollisol after three years of field application. *PLOS ONE*, 11(5), e0154091.
- Major, J., Angst, T. E., Dalal, R. C., & Menzies, N. W. (2012). Wood biochar effects on nutrient leaching in an acidic and low-fertile soil. *Journal of Environmental Quality*, 41, 657–674.
- Major, J., Rondon, M., Molina, D., Riha, S. J., & Lehmann, J. (2010). Maize yield and nutrition during 4 years after biochar application to a Colombian savanna Oxisol. *Plant and Soil*, 333, 117–128.
- Malińska, K., Zabochnicka-Świątek, M., Cáceres, R., & Marfà, O. (2016). The effect of precomposted sewage sludge mixture amended with biochar on the growth and reproduction of *Eisenia fetida* during laboratory vermicomposting. *Ecological Engineering*, 90, 35–41.
- Manlay, R. J., Feller, C., & Swift, M. J. (2007). Historical evolution of soil organic matter concepts and their relationships with the fertility and sustainability of cropping systems. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 119(3–4), 217–233.
- Marcińczyk, M., & Oleszczuk, P. (2022). Biochar and engineered biochar as slow- and controlled-release fertilizers. *Journal of Cleaner Production*, 339, 130685.
- Martínez-Gómez, Á., Poveda, J., & Escobar, C. (2022). Overview of the use of biochar from main cereals to stimulate plant growth. *Frontiers in Plant Science*, 13, 912264.
- Masto, R. E., Kumar, S., Rout, T. K., Sarkar, P., George, J., & Ram, L. C. (2013). Biochar from water hyacinth (*Eichhornia crassipes*) and its impact on soil biological activity. *Catena*, 111, 64–71.
- Masulili, A., Utomo, W. H., & Syechfani, M. S. (2010). Rice husk biochar for rice based cropping system in acid soil 1. The characteristics of rice husk biochar and its

- influence on the properties of acid sulfate soils and rice growth in West Kalimantan, Indonesia. *Journal of Agricultural Science*, 2(1), 39–47.
- McElligott, K. M. (2011). *Biochar amendments to forest soils: Effects on soil properties and tree growth* (Master's thesis). University of Idaho, Moscow, ID.
- Méndez, A., Gómez, A., Paz-Ferreiro, J., & Gascó, G. (2012). Effects of sewage sludge biochar on plant metal availability after application to a Mediterranean soil. *Chemosphere*, 89, 1354–1359.
- Mia, S., van Groenigen, J. W., van de Voorde, T. F. J., Oram, N. J., Bezemer, T. M., Mommer, L., ... Jeffery, S. (2014). Biochar application rate affects biological nitrogen fixation in red clover conditional on potassium availability. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 191, 83–91.
- Mitchell, P. J., Simpson, A. J., Soong, R., & Simpson, M. J. (2015). Shifts in microbial community and water-extractable organic matter composition with biochar amendment in a temperate forest soil. *Soil Biology and Biochemistry*, 81, 244–254.
- Mukherjee, A., Zimmerman, A. R., & Harris, W. (2011). Surface chemistry variations among a series of laboratory-produced biochars. *Geoderma*, 163, 247–255.
- Murtaza, G., Ahmed, Z., Usman, M., Tariq, W., Ullah, Z., Shareef, M., ... Ditta, A. (2021). Biochar induced modifications in soil properties and its impacts on crop growth and production. *Journal of Plant Nutrition*, 44, 1677–1691.
- Nèble, S., Calvert, V., Le Petit, J., & Criquet, S. (2007). Dynamics of phosphatase activities in a cork oak litter (*Quercus suber* L.) following sewage sludge application. *Soil Biology and Biochemistry*, 39, 2735–2742.
- Nguyen, V.-T., Hung, C.-M., Nguyen, T.-B., Chang, J.-H., Wang, T.-H., Wu, C.-H., ... Dong, C.-D. (2019). Efficient heterogeneous activation of persulfate by iron-modified biochar for removal of antibiotic from aqueous solution: A case study of tetracycline removal. *Catalysts*, 9(1), 49.
- Novak, J. M., Cantrell, K. B., Watts, D. W., Busscher, W. J., & Johnson, M. G. (2014). Designing relevant biochars as soil amendments using lignocellulosic-based and manure-based feedstocks. *Journal of Soils and Sediments*, 14, 330–343.
- Nunoura, T., Wade, S. R., Bourke, J. P., & Antal, M. J. (2006). Studies of the flash carbonization process. 1. Propagation of the flaming pyrolysis reaction and performance of a catalytic afterburner. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 45, 585–599.
- Oladele, S. O. (2019). Effect of biochar amendment on soil enzymatic activities, carboxylate secretions and upland rice performance in a sandy clay loam Alfisol of Southwest Nigeria. *Scientific African*, 4, e00107.
- Ouyang, L., Wang, F., Tang, J., Yu, L., & Zhang, R. (2013). Effects of biochar amendment on soil aggregates and hydraulic properties. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 13(4), 991–1002.
- Pan, S.-Y., Dong, C.-D., Su, J.-F., Wang, P.-Y., Chen, C.-W., Chang, J.-S., ... Hung, C.-M. (2021). The role of biochar in regulating the carbon, phosphorus, and nitrogen cycles exemplified by soil systems. *Sustainability*, 13(10), 5612.
- Pandian, K., Subramaniyan, P., Gnasekaran, P., & Chitraputhirapillai, S. (2016). Effect of biochar amendment on soil physical, chemical and biological properties and groundnut yield in rainfed Alfisol of semi-arid tropics. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 62, 1293–1310.
- Pandian, K., Vijayakumar, S., Mustaffa, M. R. A. F., Subramanian, P., & Chitraputhirapillai, S. (2024). Biochar—A sustainable soil conditioner for improving soil health, crop production and environment under changing climate: A review. *Frontiers in Soil Science*, 4, 1376159.

- Pang, S. (2019). Advances in thermochemical conversion of woody biomass to energy, fuels and chemicals. *Biotechnology Advances*, 37, 589–597.
- Park, J. H., Choppala, G. K., Bolan, N. S., Chung, J. W., & Chuasavathi, T. (2011). Biochar reduces the bioavailability and phytotoxicity of heavy metals. *Plant and Soil*, 348, 439–451.
- Peng, X., Zhu, Q. H., Xie, Z. B., Darboux, F., & Holden, N. M. (2016). The impact of manure, straw and biochar amendments on aggregation and erosion in a hillslope Ultisol. *Catena*, 138, 30–37.
- Petrović, J., Ercegović, M., Simić, M., Koprivica, M., Dimitrijević, J., Jovanović, A., & Janković Pantić, J. (2024). Hydrothermal carbonization of waste biomass: A review of hydrochar preparation and environmental application. *Processes*, 12(1), 207.
- Prabakar, D., Manimudi, V. T., Suvetha, S., Sampath, S., Mahapatra, D. M., Rajendran, K., & Pugazhendhi, A. (2018). Advanced biohydrogen production using pretreated industrial waste: Outlook and prospects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 96, 306–324.
- Pradhan, S., Parthasarathy, P., Mackey, H. R., Al-Ansari, T., & McKay, G. (2024). Food waste biochar: A sustainable solution for agriculture application and soil–water remediation. *Carbon Research*, 3, 41.
- Prapagdee, S., Sittibut, C., & Kovaejarat, C. (2017). Biochar reduced nitrogen leaching in a sandy soil. *Journal of Environmental Quality*, 46, 645–656.
- Premalatha, R. P., Malarvizhi, P., & Parameswari, E. (2023). Effect of biochar doses under various levels of salt stress on soil nutrient availability, soil enzyme activities and plant growth in a marigold crop. *Crop & Pasture Science*, 74, 66–78.
- Pu, S., Li, G., Tang, G., Zhang, Y., Xu, W., Li, P., ... Ding, F. (2019). Effects of biochar on water movement characteristics in sandy soil under drip irrigation. *Journal of Arid Land*, 11, 740–753.
- Purakayastha, T. J., Das, K. C., Gaskin, J., Harris, K., Smith, J. L., & Kumari, S. (2016). Effect of pyrolysis temperatures on stability and priming effects of C3 and C4 biochars applied to two different soils. *Soil and Tillage Research*, 155, 107–115.
- Qi, F., Zhang, Y., Shen, X., & Hou, Y. (2017). Effects of feedstock type on biochar's pH and nutrient content. *Journal of Environmental Management*, 203, 135–142.
- Quilliam, R. S., Glanville, H. C., Wade, S. C., & Jones, D. L. (2013). Life in the 'charosphere'—Does biochar in agricultural soil provide a significant habitat for microorganisms? *Soil Biology and Biochemistry*, 65, 287–293.
- Rajkovich, S., Enders, A., Hanley, K., Hyland, C., Zimmerman, A. R., & Lehmann, J. (2012). Corn growth and nitrogen nutrition after additions of biochars with varying properties to a temperate soil. *Biology and Fertility of Soils*, 48, 271–284.
- Rasheed, T., Hassan, A. A., Bilal, M., Hussain, T., & Rizwan, K. (2020). Metal-organic frameworks-based adsorbents: A review from removal perspective of various environmental contaminants from wastewater. *Chemosphere*, 259, 127369.
- Ren, J., Li, N., Li, L., An, J. K., Zhao, L., & Ren, N. Q. (2015). Granulation and ferric oxides loading enable biochar derived from cotton stalk to remove phosphate from water. *Bioresource Technology*, 178, 119–125.
- Rizwan, M., Ali, S., Qayyum, M. F., Ibrahim, M., Zia-ur-Rehman, M., Abbas, T., & Ok, Y. S. (2016). Mechanisms of biochar-mediated alleviation of toxicity of trace elements in plants: A critical review. *Environmental Science and Pollution Research*, 23, 2230–2248.
- Rodrigues, L., Budai, A., Elsgaard, L., Hardy, B., Keel, S. G., Mondini, C., ... Leifeld, J. (2023). The importance of biochar quality and pyrolysis yield for soil carbon sequestration in practice. *European Journal of Soil Science*, 74, e13396.

- Rutigliano, F. A., Romano, M., Marzaioli, R., Baglivo, I., Baronti, S., Miglietta, F., ... Castaldi, S. (2014). Effect of biochar addition on soil microbial community in a wheat crop. *European Journal of Soil Biology*, 60, 9–15.
- Sakin, E., Ramazanoglu, E., & Seyrek, A. (2021). Effects of different biochar amendments on soil enzyme activities and carbon dioxide emission. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 52, 2933–2944.
- Sarkar, B., Mandal, S., & Singh, R. K. (2016). Biochar's potential in reducing nitrogen loss from soils. *Journal of Environmental Quality*, 45, 657–674.
- Schmidt, H. P., Kammann, C., Hagemann, N., Leifeld, J., Bucheli, T. D., Sánchez Monedero, M. A., ... Cayuela, M. L. (2021). Biochar in agriculture—A systematic review of 26 global meta-analyses. *GCB Bioenergy*, 13, 1708–1730.
- Senesi, N., & Plaza, C. (2007). Role of humification processes in recycling organic wastes of various nature and sources as soil amendments. *Clean—Soil, Air, Water*, 35, 26–41.
- Shackley, S., Hammond, J., Gaunt, J., & Ibarrola, R. (2011). The feasibility and costs of biochar deployment in the UK. *Carbon Management*, 2, 335–356.
- Shahzad, S. M., Khalid, A., Arif, M. S., Riaz, M., Ashraf, M., Iqbal, Z., ... Yasmeen, T. (2014). Co-inoculation integrated with P-enriched compost improved nodulation and growth of chickpea (*Cicer arietinum* L.) under irrigated and rainfed farming systems. *Biology and Fertility of Soils*, 50, 1–12.
- Shenbagavalli, S., & Mahimairaja, S. (2012). Characterization and effect of biochar on nitrogen and carbon dynamics in soil. *International Journal of Advanced Biological Research*, 2, 249–255.
- Shi, Y., Yu, Y., Chang, E., Wang, R., Hong, Z., Cui, J., ... Xu, R. (2023). Effect of biochar incorporation on phosphorus supplementation and availability in soil: A review. *Journal of Soils and Sediments*, 23, 672–686.
- Smider, B., & Singh, B. (2014). Agronomic performance of a high ash biochar in two contrasting soils. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 191, 99–107.
- Sriphiom, P., Chidthaisong, A., Yagi, K., Tripetchkul, S., & Towprayoon, S. (2020). Evaluation of biochar applications combined with alternate wetting and drying (AWD) water management in rice field as a methane mitigation option for farmers' adoption. *Soil Science and Plant Nutrition*, 66, 235–246.
- Steiner, C., Glaser, B., Geredes Teixeira, W., Lehmann, J., Blum, W. E. H., & Zech, W. (2008). Nitrogen retention and plant uptake on a highly weathered Central Amazonian Ferralsol amended with compost and charcoal. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 171, 893–899.
- Steiner, C., Teixeira, W. G., Lehmann, J., Nehls, T., de Macêdo, J. L. V., Blum, W. E. H., ... Zech, W. (2007). Long term effects of manure, charcoal and mineral fertilization on crop production and fertility on a highly weathered Central Amazonian upland soil. *Plant and Soil*, 291, 275–290.
- Sun, J., Yang, R., Li, W., Pan, Y., Zheng, M., & Zhang, Z. (2018). Effect of biochar amendment on water infiltration in a coastal saline soil. *Journal of Soils and Sediments*, 18, 3271–3279.
- Tan, X., Liu, Y., Zeng, G., Wang, X., Hu, X., Gu, Y., & Yang, Z. (2015). Application of biochar for the removal of pollutants from aqueous solutions. *Chemosphere*, 125, 70–85.
- Tang, Z., Liu, X., Li, G., & Liu, X. (2022). Mechanism of biochar on nitrification and denitrification to N₂O emissions based on isotope characteristic values. *Environmental Research*, 212, 113219.

- Thomas, S. C., Frye, S., Gale, N., Garmon, M., Launchbury, R., Machado, N., ... Winsborough, C. (2013). Biochar mitigates negative effects of salt additions on two herbaceous plant species. *Journal of Environmental Management*, 129, 62–68.
- Tian, X., Li, C., Zhang, M., Wan, Y., Xie, Z., Chen, B., & Li, W. (2018). Biochar derived from corn straw affected availability and distribution of soil nutrients and cotton yield. *PLOS ONE*, 13(1), e0189924.
- Tripathi, M., Sahu, J. N., & Ganesan, P. (2016). Effect of process parameters on production of biochar from biomass waste through pyrolysis: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 55, 467–481.
- Ullah, M. S., Malekian, R., Randhawa, G. S., Gill, Y. S., Singh, S., Esau, T. J., ... Farooque, A. A. (2024). The potential of biochar incorporation into agricultural soils to promote sustainable agriculture: Insights from soil health, crop productivity, greenhouse gas emission mitigation and feasibility perspectives—A critical review. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 23, 1105–1130.
- Uroić Štefanko, A., & Leszczynska, D. (2020). Impact of biomass source and pyrolysis parameters on physicochemical properties of biochar manufactured for innovative applications. *Frontiers in Energy Research*, 8, 138.
- Uzoma, K. C., Inoue, M., Andry, H., Zahoor, A., & Nishihara, E. (2011). Influence of biochar application on sandy soil hydraulic properties and nutrient retention. *Journal of Food, Agriculture & Environment*, 9, 1137–1143.
- Van Zwieten, L., Kimber, S., Morris, S., Chan, K. Y., Downie, A., Rust, J., ... Cowie, A. (2010). Effects of biochar from slow pyrolysis of paper mill waste on agronomic performance and soil fertility. *Plant and Soil*, 327, 235–246.
- Van Zwieten, L., Singh, B., Joseph, S., Kimber, S., Cowie, A., & Chan, K. Y. (2009). Biochar and emissions of non-CO₂ greenhouse gases from soil. In J. Lehmann & S. Joseph (Eds.), *Biochar for environmental management: Science and technology* (pp. 227–249). London, UK: Earthscan.
- Varkolu, M., Gundekari, S., Omvesh, Palla, V. C. S., Kumar, P., Bhattacharjee, S., & Vinodkumar, T. (2025). Recent advances in biochar production, characterization, and environmental applications. *Catalysts*, 15(3), 243.
- Vaz, R. C. A., Lopez, M. A. R., & Ferreira, G. M. D. (2024). Unlocking the potential of MOF-biochar composites: Advanced functional materials for adsorption, catalysis, and energy storage. *Materials Today Chemistry*, 42, 102383.
- Viancelli, A., & Michelin, W. (2024). Climate change and nitrogen dynamics: Challenges and strategies for a sustainable future. *Nitrogen*, 5, 688–701.
- Vijay, D., Zipse, H., & Sastry, G. N. (2008). On the cooperativity of cation–pi and hydrogen bonding interactions. *The Journal of Physical Chemistry B*, 112, 8863–8867.
- Viotti, P., Marzeddu, S., Antonucci, A., Décima, M. A., Lovascio, P., Tatti, F., & Boni, M. R. (2024). Biochar as alternative material for heavy metal adsorption from groundwaters: Lab-scale (column) experiment review. *Materials*, 17(4), 809.
- Wang, B., Lehmann, J., Hanley, K., Hestrin, R., & Enders, A. (2015). Adsorption and desorption of ammonium by maple wood biochar as a function of oxidation and pH. *Chemosphere*, 138, 120–126.
- Wang, J., Xiong, Z., & Kuzyakov, Y. (2016). Biochar stability in soil: Meta-analysis of decomposition and priming effects. *GCB Bioenergy*, 8, 512–523.
- Wang, L., Xue, C., Nie, X., Liu, Y., & Chen, F. (2018). Effects of biochar application on soil potassium dynamics and crop uptake. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 181(5), 635–643.
- Warnock, D. D., Lehmann, J., Kuyper, T. W., & Rillig, M. C. (2007). Mycorrhizal responses to biochar in soil—Concepts and mechanisms. *Plant and Soil*, 300, 9–20.

- Warnock, D. D., Mummey, D. L., McBride, B., Major, J., Lehmann, J., & Rillig, M. C. (2010). Influences of non-herbaceous biochar on arbuscular mycorrhizal fungal abundances in roots and soils: Results from growth-chamber and field experiments. *Applied Soil Ecology*, 46, 450–456.
- Wei, J., Tu, C., Yuan, G., Liu, Y., Bi, D., Xiao, L., ... Zhang, X. (2019). Assessing the effect of pyrolysis temperature on the molecular properties and copper sorption capacity of a halophyte biochar. *Environmental Pollution*, 251, 56–65.
- Woolf, D., Amonette, J. E., Street-Perrott, F. A., Lehmann, J., & Joseph, S. (2010). Sustainable biochar to mitigate global climate change. *Nature Communications*, 1, 56.
- Wu, J., Lu, J., Zhang, C., Zhang, Z. H., & Min, X. Y. (2019). Adsorptive removal of tetracyclines and fluoroquinolones using yak dung biochar. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 102, 407–412.
- Xie, T., Reddy, K. R., Wang, C., Yargicoglu, E., & Spokas, K. (2015). Characteristics and applications of biochar for environmental remediation: A review. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 45, 939–969.
- Xu, H. J., Wang, X. H., Li, H., Yao, H. Y., Su, J. Q., & Zhu, Y. G. (2014). Biochar impacts soil microbial community composition and nitrogen cycling in an acidic soil planted with rape. *Environmental Science & Technology*, 48, 9391–9399.
- Xu, J. M., Tang, C., & Chen, Z. L. (2006). The role of plant residues in pH change of acid soils differing in initial pH. *Soil Biology and Biochemistry*, 38, 709–719.
- Yaashikaa, P. R., Senthil Kumar, P., Varjani, S., & Saravanan, A. (2020). A critical review on the biochar production techniques, characterization, stability and applications for circular bioeconomy. *Biotechnology Reports*, 28, e00570.
- Yadav, S. K., & Bag, R. (2023). Effect of bamboo biochar on strength and water retention properties of low plastic clay and silty sand. *Scientific Reports*, 13, 6201.
- Yang, L., Wu, Y., Wang, Y., An, W., Jin, J., Sun, K., & Wang, X. (2021). Effects of biochar addition on the abundance, speciation, availability, and leaching loss of soil phosphorus. *Science of the Total Environment*, 758, 143657.
- Yang, X., Zhang, S., Ju, M., & Liu, L. (2019). Preparation and modification of biochar materials and their application in soil remediation. *Applied Sciences*, 9(7), 1365.
- Yao, Y., Panahi, A., Schiemann, M., & Levendis, Y. A. (2022). Determination of size and porosity of chars during combustion of biomass particles. *Combustion and Flame*, 242, 112182.
- Yao, Y., Yang, W., & Ma, Y. (2019). Biochar increases nitrogen use efficiency in rice. *Journal of Environmental Quality*, 48, 675–686.
- Yu, K. L., Lau, B. F., Show, P. L., Ong, H. C., Ling, T. C., Chen, W.-H., ... Chang, J.-S. (2017). Recent developments on algal biochar production and characterization. *Bioresource Technology*, 246, 2–11.
- Yuan, H., Lu, T., Zhao, D., Huang, H., Noriyuki, K., & Chen, Y. (2013). Influence of temperature on product distribution and biochar properties by municipal sludge pyrolysis. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 15, 357–361.
- Zhang, A., Liu, Y., Pan, G., Hussain, Q., Li, L., Zheng, J., ... Zhang, X. (2012). Effect of biochar amendment on maize yield and greenhouse gas emissions from a soil organic carbon poor calcareous loamy soil from Central China Plain. *Plant and Soil*, 351, 263–275.
- Zhang, M., Riaz, M., Zhang, L., El-Desouki, Z., & Jiang, C. (2019). Biochar induces changes to basic soil properties and bacterial communities of different soils to varying degrees at 25 mm rainfall: More effective on acidic soils. *Frontiers in Microbiology*, 10, 1321.

- Zhang, Q., Li, Q., Zhang, L., Yu, Z., Jing, X., Wang, Z., ... Huang, W. (2017). Experimental study on co-pyrolysis and gasification of biomass with deoiled asphalt. *Energy*, 134, 301–310.
- Zhang, Q., Song, Y., Wu, Z., Yan, X., Gunina, A., Kuzyakov, Y., & Xiong, Z. (2020). Effects of six-year biochar amendment on soil aggregation, crop growth, and nitrogen and phosphorus use efficiencies in a rice-wheat rotation. *Journal of Cleaner Production*, 242, 118435.
- Zhang, T., Tang, Y., Gao, W., Lee, X., Li, H., Hu, W., & Cheng, J. (2023). Combined effects of biochar and inhibitors on greenhouse gas emissions, global warming potential, and nitrogen use efficiency in the tobacco field. *Sustainability*, 15, 6100.
- Zhang, Y. M., Wu, N., Zhou, G. Y., & Bao, W. K. (2005). Changes in enzyme activities of spruce (*Picea balfouriana*) forest soil as related to burning in the eastern Qinghai-Tibetan Plateau. *Applied Soil Ecology*, 30, 215–225.
- Zhang, Y., Wang, Y., & Chen, Y. (2016). Biochar's potential for carbon sequestration in different climate zones. *Environmental Science & Technology*, 50, 10356–10364.
- Zhao, R., Coles, N., Kong, Z., & Wu, J. (2015). Effects of aged and fresh biochars on soil acidity under different incubation conditions. *Soil and Tillage Research*, 146, 133–138.
- Zhou, D., Liu, D., Gao, F., Li, M., & Luo, X. (2017). Effects of biochar-derived sewage sludge on heavy metal adsorption and immobilization in soils. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 14, 681.
- Zhou, Y., He, Y., He, Y., Liu, X., Xu, B., Yu, J., ... Luo, L. (2019). Analyses of tetracycline adsorption on alkali-acid modified magnetic biochar: Site energy distribution consideration. *Science of the Total Environment*, 650, 2260–2266.
- Zimmermann, M., Bird, M. I., Wurster, C., Saiz, G., Goodrick, I., Barta, J., ... Smernik, R. (2012). Rapid degradation of pyrogenic carbon. *Global Change Biology*, 18, 3306–3316.

BÖLÜM 2

AKILLI SERALAR TEKNOLOJİLERİ: DİJİTALLEŞME, OTOMASYON VE SÜRDÜRÜLEBİLİR ÜRETİM TEKNOLOJİLERİ

Veysel GÖKMEN¹

¹ Dr. Öğr. Üyesi 1 Hatay Mustafa Kemal Üniversitesi Altınözü Tarım Bilimleri Meslek Yüksekokulu Hatay, TÜRKİYE veysel.gokmen@mku.edu.tr, Orcid ID: 0000-0002-6054-1963

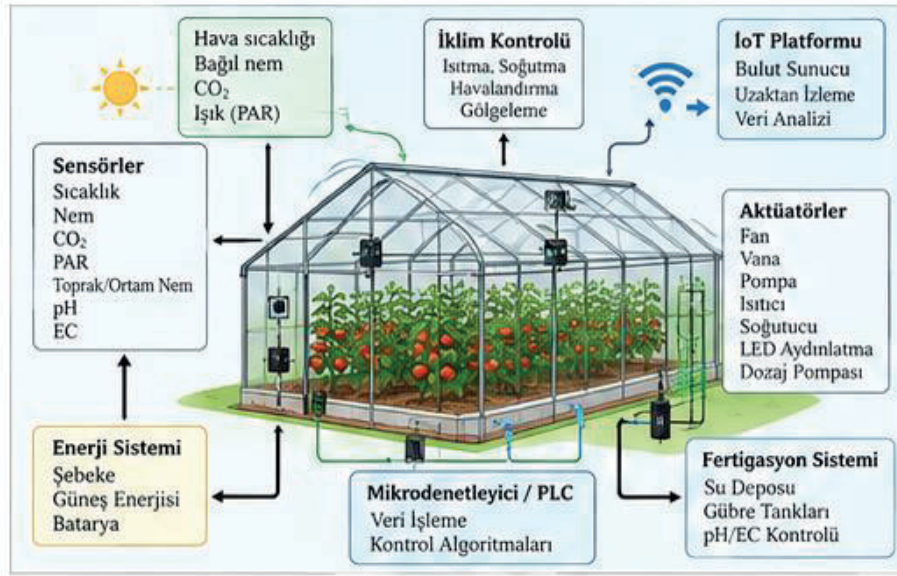
GİRİŞ

Tarımda üretim miktarını artırmak kadar, üretim sürecinde kullanılan doğal kaynakları korumak ve girdilerin verimliliğini artırmak da önemlidir. Büyüyen bir nüfustan kaynaklanan gıda talebindeki artış, üretimi etkileyen iklim dalgalanmaları, sulama suyu teminindeki sıkıntılar ve enerji fiyatlarındaki yükselişler, geleneksel tarım yöntemlerine teknolojik müdahalelerle ek iyileştirmeler yapılması yönündeki arayışları beraberinde getirmiştir. Özellikle sebze ve süs bitkilerinin yetiştirildiği sera sistemlerinde, çevresel koşullar üretim açısından sistematik biçimde kritik öneme sahip olduğundan, bitki gelişimi daha sürekli bir şekilde düzenlenebilmektedir (Shamshiri ve ark., 2018). Geleneksel seralarda havalandırma pencerelerinin, gölgeleme yapılarının ve sulama sistemlerinin yönetimi; ağırlıklı olarak yetiştiricilerin gözlemlerine, uygulamalarına ya da önceden belirlenmiş takvime göre kontrol edilir. Bu yöntem belirli koşullarda yeterli olsada seranın içindeki çevresel değişimler hızlı olduğunda müdahalelerin gecikmesine ve girdilerin aşırı kullanılmasına yol açabilir. Ayrıca serada sıcaklık, nem ve ışığın doğrusal olmayan dağılımı, aynı yetiştirme alanındaki bitkilerin farklı büyüme koşullarına maruz kalmasına neden olabilir. Tarımsal üretimde dijital teknolojilerin uygulanmasıyla sera yönetimi, yalnızca çevresel koşulları ölçmekten; veriyi yorumlamaya, gelecekteki koşulları tahmin etmeye ve hatta olası biçimde kontrol işlemlerini otomatik olarak gerçekleştirmeye doğru bir dönüşüm yaşamaktadır (Shamshiri ve ark. (2018)). Akıllı ve kontrollü ortam senaryolarında otomatik ürün verimi tahmini üzerinden son teknoloji makine öğrenimi algoritmalarına yönelik ilerlemeler ve çevresel sensörleme otomasyonunu iklim modellemesi ve kaynak kullanımına (CEA'dan) bağlayan çalışmalar ele alınmış; yazarlar, yapay zekâ uygulamalarının verimi artırabileceğini ya da optimize edebileceğini, su/gübre kullanımının büyük ölçüde optimize edilebileceğini ve zararlı/hastalık yönetiminin de sürdürülebilir üretimi yönetebilecek kapasitede olduğunu ileri sürmüştür. Bu teknolojik dönüşümün merkezinde akıllı sera yer almaktadır. Bu sistemlerde, sensörler tarafından toplanan veriler biçimlendirilir ve iletişim mimarisi üzerinden kontrol birimlerine iletilir; burada üreticilerin standartlaştırılmış bir kurallar veya modeller setiyle, her seferinde ilgili müdahaleleri denemeye çalıştığı bir yapı söz konusudur. Üretim kararları bir sapma değildir ve sera yönetimi bitkilerin isteklerine uyum sağlayabilir. Ancak her zaman, daha fazla kâr ve daha düşük maliyetlerle akıllı sera uygulamalarına ulaşmanın mümkün olduğu sonucuna varılamaz. Mevcut teknolojiyle iklim kontrollü seraları düşündüğümüzde, çoğu zaman bu sistemin çıktılarının bir fonksiyona bağlı olduğu ifade edilir: bitki çeşidi/türü, yerel iklime uygun sera yerleşimi uyumu; ya da ortamın zorluk şartları ve enerji temini gibi birçok sorun maliyet açısından sorun oluşturabilir. Bu nedenle akıllı sera değerlendirme göstergeleri yalnızca

teknolojik açıdan değil, aynı zamanda agronomik ve ekonomik kriterler açısından da oluşturulmalıdır. Geleneksel seralar, işletme içinde kullanım için ayarlanmış görsel kontroller ve zamanlayıcılara dayanırken, veriye dayalı seralar ise tedaviyi koşullara dinamik olarak uyarlamak için birden fazla değişkeni inceleyebilir. (Shamshiri ve ark. (2018); van Straten ve ark. (2010)).

Uygulanacak sensör veya kontrol yönteminin seçimi; yetiştirilen ürün türü, sera hacmi, çevresel koşullar, sulama suyu kalitesi ve tesisin bakım durumu ile birlikte dikkatle değerlendirilmelidir. Tasarım aşamasında ölçüm sıklığının belirlenmesi, bir arıza tespit planının ve doğrulama planının oluşturulması, farklı üretim dönemlerinde güvenilir sonuçlar elde etmemizi sağlar.

Akıllı sera sistem mimarisi



Şekil 1. Akıllı sera sistemlerinin genel mimarisi.

Seralar içinde iklim gibi çevresel koşulları izlemek, analiz etmek ve otomatikleştirmek için teknolojilerin dijital olarak entegre edilmesi; entegre akıllı serada bitki üretimi için tanımlanabilir. Bu sistem, biyolojik açıdan bitkinin ihtiyaçlarını bulunduğu fiziksel çevre koşullarıyla dengelemek üzere; seraların içindeki çevresi dikkate alınarak tasarlanan bilgi tabanlı bir çevresel kontrol mekanizması olarak adlandırılmıştır.

Kontrollü Ortam Tarımı (CEA), bitki büyümesini etkileyebilecek potansiyel çevresel faktörleri belirlenen sınırlar içinde kontrol ederek azaltan üretim sistemleri için daha genel bir

terimdir. Akıllı seralar; sensör teknolojileri, bağlantılı cihazlar, veri analitiği ve otomasyon yardımıyla bu yaklaşımı mümkün kılan bir uygulama biçimidir. Kontrollü ortam tarımı yalnızca akıllı seraları değil; dikey tarım tesisleri ve sözde bitki fabrikaları gibi diğer yapıları da (Shamshiri ve ark., 2018) kapsar.

Sera teknolojisi genel olarak üç bölümde açıklanır:

1. Üretim, Doğal Havalandırma ve manuel müdahalelerle kontrol edilir.
2. Sınırlı görevleri tamamlayan kontrol sistemleri kullanır (termostatlar, zamanlayıcılar ve otomatik sulama düzenekleri gibi düşünün).
3. Karar destek sistemlerinde, sensörlerden gelen veriler birleştirilir, çevresel değişkenlerin birbiriyle ilişkileri modellenir ve bütüncül yönetim stratejileri formüle edilir (Aiello et al., 2018)

Bu aşamaların her biri arasında belirlenmiş sınırlar yoktur. Sadece seranın kendisinin akıllı olduğu otomatik havalandırma da mümkündür; çünkü akıllı olamayacak şekilde entegre edilmiş insan yapımı sistemler vardır. Akıllı sistemleri birbirinden ayıran şey, bileşenler arasında veri akışının oluşturulması ve ölçüm sonuçlarının üretim kararlarıyla ilişkilendirilmesidir. Yaygın bir otomasyon uygulaması; sıcaklık sensöründen gelen verinin havalandırmayı başlatmak için kullanılmasıdır. Daha gelişmiş bir kontrol yaklaşımı ise havalandırmanın ne zaman çalışması gerektiğini ve hangi seviyede olması gerektiğini belirlemek için sıcaklık ölçümlerini, dış koşulları, radyasyon tahminlerini ve bitki büyüme aşamasını birlikte değerlendirir (Körner,2019).

3. Akıllı sera sistemleri tipik olarak üç ana bileşenden oluşur

3.1 Sensörler ve çevresel izleme

Bir seranın temel donanımı, sera ortamındaki fiziksel ve kimyasal değişkenleri veriye dönüştüren sensörlerdir. Akıllı sera uygulamaları için sensör seçimi; yetiştirilen bitki türünün gerektirdiği ihtiyaçlar ve kontrol edilmesi gereken süreç temel alınarak yapılmalıdır. Sensörlerden toplanan bilgiler; sera mikroiklimini izlemek, otomatik kontrol sistemlerini yönetmek ve üretim süreçlerini otomatikleştirmek için önem arz etmektedir (Shamshiri ve ark., 2018a; Li ve ark., 2021). seradaki hava sıcaklığını kaydetmek için sıcaklık sensörleri ve gerektiğinde kök bölgesi sıcaklık değerlerini ölçmek içindir. Hava sıcaklığı ; fotosentezi,

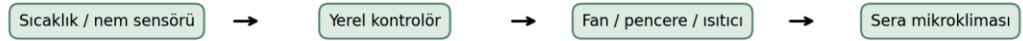
solunumu, transpirasyonu ve büyüme hızını etkilediğinden; ideal bir sıcaklık aralığını korumak, ürün yetiştiriciliği için temel koşullardan biridir. Ancak optimum sıcaklık değerleri türlere, olgunluk aşamasına ve diğer çevresel etmenlere bağlı olabilir. Bu nedenle; çok kapsamlı sıcaklık ölçümleri ve bu verilerin ısıtma, soğutma ve havalandırma sistemleriyle bağlantısı kritik önemdedir (Shamshiri ve ark., 2018b).



Şekil 2. Akıllı serada sensörler

Serada kontrol altına alınması gereken parametrelerden biride bağıl nemdir. Seralarda bağıl nemin % 60-90 arasında değişimi bitkiler üzerinde çok büyük etkiye sahiptir eğer serada ki nemi oranı % 60 ın altına düşerse genç bitkilerde taze yapraklarında su stresine sebep olabilir veya nemi oranı % 90 ın üzerine çıkması ile fungal hastalıkların çok hızlı şekilde yayılmasına sebep olabilir bu nedenle serada kin nem oranını sürekli aktif olarak ölçmek gerekir burada da teknolojiye faydalanarak sensörler devreye girmektedir .Bağıl nem sensörleriyle havanın su buharı ile ne kadar doymuş olduğunu ölçebiliriz ve duruma anında müdahale edip oluşabilecek sorunların önüne geçebiliriz.Öte yandan, düşük bağıl nem; atmosferdeki yüksek buhar basıncı açığını (buhar basıncı farkı, VPD) gidererek bitkiden atmosfere daha hızlı su kaybına izin verir ve bu durum su stresini tamamen daha da artırır. Sonuç olarak, nem yönetimi yalnızca

tek bir eşik değeriyle sınırlı olmayıp; sıcaklık, buhar basıncı açığı (VPD) ve bitki büyümesiyle de ilişkilendirilmelidir (Shamshiri ve ark., 2018b). Sensörlerin kullanımı çok faydalı iken herhangi bir arıza da dikkate alınmalıdır gerekli kalibrasyonların yapılması ve sensörlerin doğru çalıştığını sık sık kontrol edilmelidir.



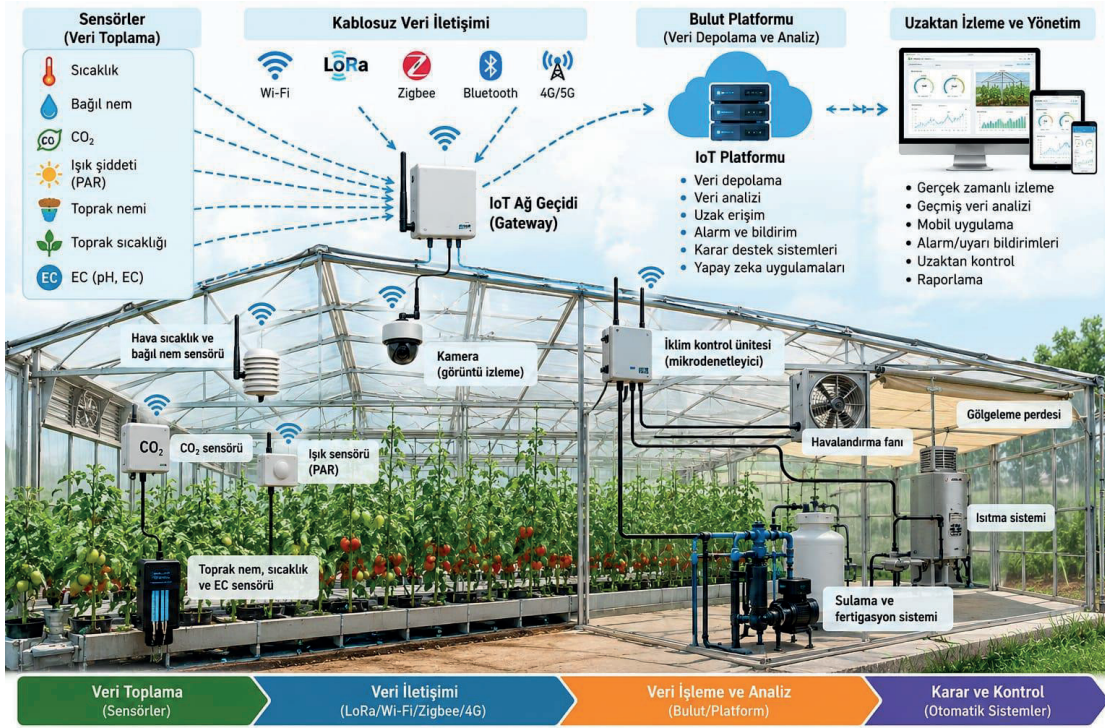
Işınım sensörleri, bitkilere ulaşan ışık miktarının belirlenmesinde kullanılmaktadır. Fotosentetik olarak aktif ışınının (PAR) ölçülmesi, bitkilerin fotosentez için yararlanabildiği ışık düzeyinin değerlendirilmesine yardımcı olmaktadır. Günlük ışık integrali (Daily Light Integral, DLI), bir gün boyunca birim alana ulaşan fotosentetik fotonların toplamını ifade etmekte ve özellikle kontrollü üretim ortamlarında aydınlatma yönetimi açısından önem taşımaktadır. Bu veriler yapay aydınlatma ve gölgelendirme sistemlerinin kontrolünde faydalıdır; ancak potansiyel olarak büyüme ve enerji optimizasyonunu da destekleyebilir (Seginer ve ark., 2006).Serada sera atmosferindeki CO₂ konsantrasyonu, karbondioksit sensörleriyle izlenir. Karbondioksit (CO₂), fotosentez için temel bir girdidir ve sera ortamındaki CO₂ konsantrasyonu, karbon asimilasyonu ile ürünlerin büyümesini önemli ölçüde etkiler. Ancak CO₂ zenginleştirmenin ve bunun sağladığı faydaların etkisi; ışık şiddetine, sıcaklığa, bitkinin gelişme evresine, havalandırmaya vb. bağlıdır. Bu nedenle CO₂ uygulamaları, diğer iklim kontrol sistemlerinden bağımsız olarak değerlendirilemez. CO₂ ölçümleri, modern sera otomasyon sistemlerinde çoğu zaman havalandırma ve iklim kontrol stratejileriyle birlikte ele alınmaktadır (Shamshiri ve ark., 2018a). Toprakta veya yetiştirme ortamında nemi ölçen sensörler, kök bölgesinin su durumunu izlemenizi sağlar. Özellikle bu ölçümler için sulama, bitkinin gerçek ihtiyacına göre planlanabilir; yani damla sulama ve topraksız tarım sistemlerinde. EC sensörleri besin çözeltisindeki iyonik tuzların derecesini ölçmek için, pH sensörleri ise bir çözeltide asit-baz durumunu belirlemek için kullanılır. EC değeri tek başına, çözeltideki her bir besin elementinin miktarını göstermez; gerektiğinde kimyasal analizlerle desteklenmelidir.

Bu parametrelerin birlikte izlenmesi, sulama ve besin yönetiminin kontrolüne yardımcı olur (Shamshiri ve ark., 2018a; Li ve ark., 2021).

Sensörlerin ölçüm kalitesi, akıllı sera sistemlerinin başarısını doğrudan etkiler. Kötü konumlandırılmış, kalibrasyonu yapılmamış veya kirlenmiş bir sensör, bir kontrol ünitesinin yanlış kararlar almasına yol açabilir. Bu nedenle sensörler uygun şekilde yerleştirilmeli, periyodik olarak kalibre edilmeli, verilerin tutarlılığı kontrol edilmeli ve herhangi bir arıza erken aşamada teşhis edilmelidir. Ayrıca kablosuz sensör ağları sayesinde çeşitli noktalardan gelen veriler merkezi bir sistemde toplanabilir ve çevresel parametreler gerçek zamanlı olarak izlenebilir. Bu durum, seralarda veri temelli politika oluşturma süreci için de geçerlidir (Ruiz-Garcia ve ark., 2009; Li ve ark., 2021).

4 .Veri iletişimi ve nesnelerin interneti

Nesnelerin İnterneti (IoT), fiziksel cihazların bir iletişim ağı üzerinden veri alışverişi yapmasına ve uzaktan belirli işlemleri gerçekleştirmesine olanak tanıyan bir dizi teknolojidir. Sensör türünü kullanarak akıllı seraları kontrol etmek için IoT altyapısını; etkileşimli yazılım platformlarını farklı mimari gradyanlı aktüatör üniteleri ve diğer veri toplama aygıtlarıyla bağlantı kurarak çalışmaktadır. Bu mimarinin temel amacı, ölçüm verilerini üretim alanından kontrol ve analiz birimlerine güvenilir biçimde aktarmaktır. Böylece veriler, seranın içindeki bir kontrol cihazında doğrudan değerlendirilebildiği gibi yerel ya da bulut tabanlı bir sunucuya da gönderilebilir (Li ve ark., 2021)

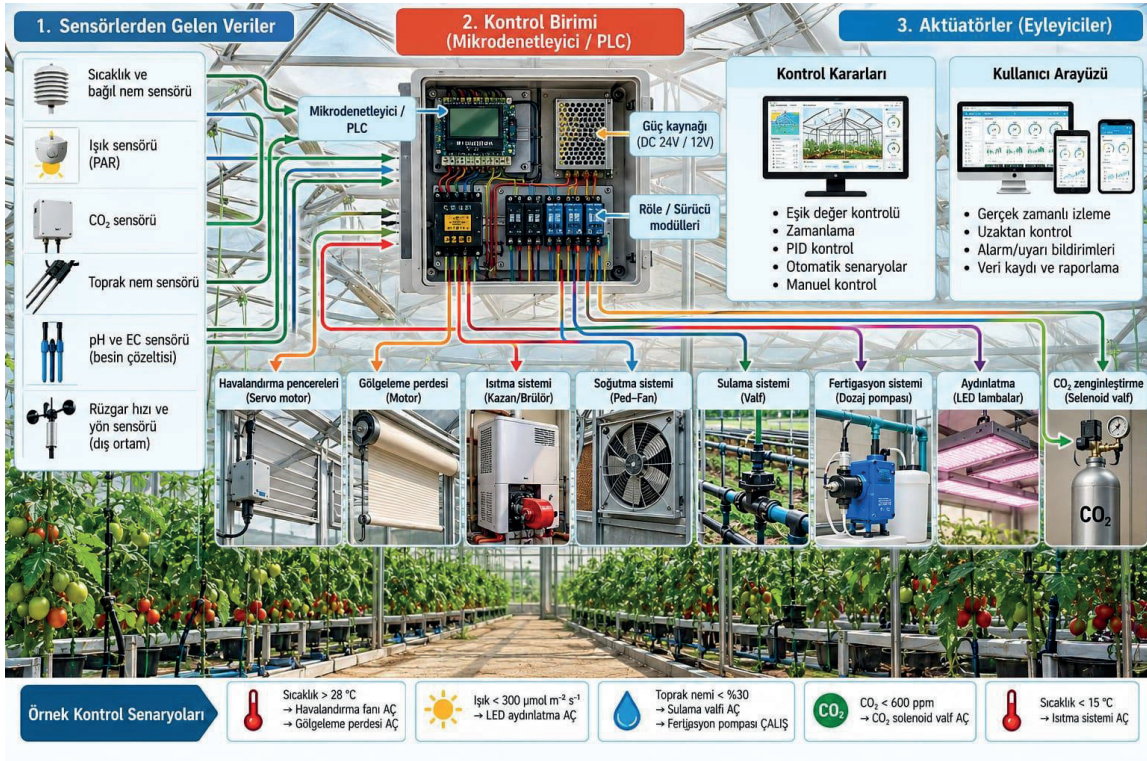


Şekil 3. Veri iletişimi ve nesnelerin interneti

Bulut sistemiyle birlikte devasa veri setleri üzerinde depolama oluşturan kapsamlı analitikler alma fırsatına sahip olmak işlerin yürütülmesi açısından önem arz etmektedir; internet bağlantısındaki kesinti meydana gelmiş olsa bile yerel işleme birimleri, gerekli kontrol işlevlerinin sürdürülmesine yardımcı olabilir. Wi-Fi, Bluetooth Düşük Enerji (BLE), ZigBee, LoRaWAN veya hücreli iletişim gibi birden fazla iletişim türü sağlayabilmektedir. Bununla birlikte, bu teknolojilerin tümü kapsama aralığı, güç verimliliği, veri aktarım hızı, maliyet ve çevresel koşullara dayanıklılık bakımından farklılık gösterir. Bu nedenle, iletişim altyapısının seçimi seranın büyüklüğüne ve örnekleme hızına göre yapılmalıdır (Hossain ve ark. (2025)), IoT tabanlı sera sistemlerinin izleme, kontrol, kayıt tutma, tahmin ve insan karar verme süreçlerine yardımcı olmak amacıyla kullanılmaktadır. Burada akıllı sera uygulamaları açısından, IoT'nin ayrı bir teknoloji etkileşimi olarak değerlendirilmemesi gerektiği; daha ziyade sensör verileri ve üretim kararları için zemini oluşturan bir altyapı rolü üstlenmesi gerektiği açıkça görülür.

4.1 Kontrol birimleri ve aktüatör (eyleyiciler)

Kontrol üniteleri ve aktüatörler, sensör verilerini üretim ortamlarında gerçek ve fiziksel değişikliklere dönüştürür. Bu işlem, PLC, mikrodeneleyici ve endüstriyel bilgisayar gibi donanımlar kullanılarak gerçekleştirilebilir. Aktüatörler örneğin, havalandırma pencerelerini açıp kapatmak için motorlar, fanlar, ısıtıcılar ve/veya soğutma sistemleri olabilir; bu da tarımsal seralarda donanımın ilmek içinde (Hardware In The Loop) kullanımını engelleyebilir. Kontrol ünitesi, ölçülen değerler ile hedef değerleri (set noktaları) karşılaştırarak aktüatörün etkinleştirilip etkinleştirilmeyeceğini kontrol eder. Bu yolculuk sırasında kontrolün güvenilirliği kadar, güvenli işletim de ikinci planda değildir. Bir başka örnek olarak, havalandırma sistemi aşırı ısındığında etkinleştirilmesi gerekir; ancak sensör arızası veya bu şekilde önemli ürünlerin kaybolmasına yol açan bir güç kaybı nedeniyle bu işlem çalışmazsa, kritik ekipmanlarda alarm sistemleri, manuel devreye alma olasılıkları ve güvenli çalışmaya ilişkin açık sınırlar bulunmalıdır (Shamshiri ve ark.,2018,2021)



Şekil 4.Akıllı Serada Kontrol birimleri

4.2 Yazılım ve karar destek altyapısı

Akıllı sera yazılımının kullanımları arasında çevresel bilgilerin depolanması, bunun grafikler halinde gösterilmesi, sınırların belirlenmesi, alarmların tetiklenmesi ve kontrol stratejilerinin otomatik olarak uygulanması yer alır. Daha gelişmiş yöntemler, kısa vadeli sıcaklık tahminleri, sulama önerileri (Ara et al., 2021 ;Körner,2019) veya hastalık riski göstergeleri üretmek için geçmiş veriler ile mevcut ölçümleri bir arada kullanabilir. Karar destek altyapısı, karar veren bir yetiştiricinin yerini tamamen almak üzere tasarlanmamış; bunun yerine onlara yardımcı olması amaçlanmıştır. Sonuç olarak, yetiştiricilerin daha doğru ve hızlı kararlar vermesini istiyoruz. Bitki çeşidi, büyüme evresi, yetiştirme ortamı ve yerel iklim gibi etkenleri birlikte değerlendirerek yazılımın yapıldığı zamanlarda alınan verilerden yola çıkarak önerilerde bulunabilinir (Körner,2019)

5.SERA MİKROİKLİMİNİN AKILLI YÖNETİMİ

Sera mikroikliminiz, bitkilerinizin yetiştiği alanda (sıcaklık, nem, ışık, hava hareketi ve gaz bileşimi tarafından) oluşturulan çevresel koşulların birleşimidir. Akıllı sera sistemlerinin en temel uygulama alanlarından biri mikroiklim yönetimidir (van straten et al .,2010)

5.1 Sıcaklık Kontrolü

Sıcaklık, bitkilerde metabolik faaliyetleri ve büyüme hızını düzenleyen temel çevresel faktörlerden biridir. Ancak doğru sıcaklık dengesi, bitkinizin türüne, çeşidine, büyüme evresine ve ışık koşullarına büyük ölçüde bağlıdır. Bu nedenle seradaki tüm bitkiler için sıcaklığı genel bir optimum olarak ele alamayız. Sıcaklık kontrolü; doğal havalandırma, mekanik havalandırma, ısıtma, gölgeleme ve buharlaşmalı soğutma gibi yöntemlerden oluşur. Doğal havalandırma, dış koşullar elverişliyse enerji ihtiyacını azaltmaya yönelik bir çözümdür. Çok sıcak günlerde bu tek başına yeterli olmayabilir. Fan-pad sistemleri, sisleme ve buharlaşmalı soğutma uygulamaları daha faydalı olabilir; ancak yüksek nemli bir ortamda soğutma yönünden yardımcı olmayabilir (Shamshiri ve ark. (2018)). Sıcaklık, nem, ışık ve enerji kullanımı birbiriyle ilişkilidir ve sera otomasyonunun kontrollü çevre tarımı değerlendirmesinden ayrılmaz olduğunu

doğrulamaktadır. Bu nedenle sıcaklık yönetimi; sadece bir termostat aracılığıyla değil, enerji tüketimi ve diğer mikroiklim değişkenleriyle birlikte ele alınmalıdır.

5.2 Bağıl Nem ve Su Buharı Basıncı Açığı

Bağıl nem, havadaki gerçek su buharı basıncının, o sıcaklığa karşılık gelen doymuş su buharı basıncına oranı olarak tanımlanır. Bağıl nemin yanı sıra yaprak yüzeyindeki sıcaklık ve hava hareketi de bitkinin kaybettiği su miktarını etkiler. Buhar basıncı açığı (VPD) su buharı açısından havanın doymuluktan uzaklığı (VPD) değişkeni, diğer her şey aynı kalmak koşuluyla, atmosferin su talebini artırır ve dolayısıyla bitkinin su kaybı hızını yükseltir. Çok düşük VPD koşullarında transpirasyon ve bazı bitki besin elementlerinin taşınması etkilenebilir. (Shamshiri ve ark. (2018)) domates bağlamında sıcaklık, bağıl nem ve VPD'nin birlikte kullanılmasının önemini tartışmıştır. Bu yöntem, akıllı seralarda nem kontrolünün yalnızca her zaman için bağıl neme yönelik sabit bir hedefle değil; aynı zamanda bitkinin fizyolojik ihtiyacı ile karşılaştırılarak değerlendirilmesi gerektiğini göstermektedir. Nem yönetiminde, sulama zamanlamasıyla birlikte havalandırma artı ısıtma ve gerekirse nemlendirme sistemleri uygulanır. Öte yandan, kontrol stratejisinde dış çevre de dikkate alınmalıdır; çünkü havalandırmanın artırılması, dışarıdaki sıcak veya nemli havanın seraya girmesine izin verebilir.

5.3 Işık ve Karbondioksit Yönetimi

Fotosentez ışığa gereksinim duyar ve bitki büyümesini sürdürmekten sorumludur. Serada ışık yönetimi, örtü malzemelerinin ışık geçirgenliği, gölgeleme perdeleri, ışık girişleri ve doğal ışık ile yapay aydınlatma sistemlerinin (isteğe bağlı) dağıtımı üzerinden yapılır. Akıllı ışık kontrolünde, sensörlerden toplanan radyasyon verileri, bitkilerin günlük ışık ihtiyaçları ve bunlarla ilgili enerji maliyetleri ile birlikte analiz edilir (Seginer ve ark 2005). Örneğin yapay aydınlatma bulunan sistemlerde, sadece anlık ışık şiddeti değil; aynı zamanda gün boyunca toplanan toplam ışık miktarı da hesaba katılmalıdır. Bununla birlikte, yapay aydınlatmanın ekonomik avantajı; ürünün piyasa değeri, elektrik fiyatları, yetiştirme mevsimi ve üretim hedeflerine dayanır. Bir

diğer uygulama, önceki deneylerde hedeflenmemiş olsa da, karbondioksit zenginleştirmesi yoluyla fotosentezi artırmaktı. Ancak sera havalandırmasıyla birlikte açık havada CO₂ verilmesini (Mortensen (1987); Wang et al., (2022)) gerektiren uygulamalar da vardır ve bu durum uygulama maliyetlerine yol açabilir. Bu nedenle CO₂, ışık seviyesi, havalandırma, sıcaklık ve bitkinin büyüme evresiyle birlikte koordine edilerek kontrol edilmelidir (Wang et al., 2022)

6. AKILLI SULAMA VE GÜBRELEME YÖNETİMİ

Su temininin sınırlı olduğu alanlarda, sürdürülebilir sera üretimi hedefi doğrultusunda sulama verimliliğini artırmak kritik öneme sahiptir. Geleneksel zamanlayıcı tabanlı sulama sistemleri önceden belirlenmiş zaman aralıklarında çalışırken, sensör tabanlı sistemler (Jones, 2004) büyüme ortamındaki nem seviyelerine ve bitkinin ile çevreleyen ortamın ihtiyaçlarına göre sulama yapabilir (Ara et al., 2021; Körner,2019). Toprak veya substrat nemini (Jones, 2004; Savvas ve Gruda, 2018) değerlendirmek için, büyüme ortamının su tutma özellikleri, uygun gelişim evresi ve akıllı sulama sistemlerinde kullanılan iklim verileri dikkate alınır. Daha teknik açıdan gelişmiş uygulamalar ayrıca evapotranspirasyon tahminleri sunar, bitki su kullanım modellerini sağlar ve karar destek sürecinde geçmiş sulama kayıtlarının kullanılmasını kolaylaştırır. Ek olarak, yüksek ışınım ve sıcaklık bitkinin daha fazla su tüketmesine neden olabilir. Alternatif olarak, önceden tanımlanmiş zaman aralıklarına dayalı sabit bir sulama programı kullanıldığında bitkinin su ihtiyacı karşılanamaz. Sensör verisi destekli bir system. kök bölgesindeki su durumunu (nemi) ölçerek sulamanın zamanlamasını ayarlayabilir ve ne kadar su uygulanması gerektiğine karar verebilir.

Topraksız tarım (Savvas ve Gruda, 2018) uygulamalarında, besin çözeltisinin pH ve EC değerleri optimal besin yönetimi için kritik yol göstericiler sağlayabilir. pH, çözeltideki besin elementlerinin kimyasal davranışını etkiler ve ayrıca bunların bitki tarafından emilme uygunluklarını belirler. EC ise çözeltideki toplam iyonik içeriğe (elektrik akımı iletkenliği açısından) ilişkin bir gösterge sunar. Ancak bu optimum pH ve EC değerleri; ürüne, büyüme aşamasına ve sisteme bağlı olarak değişecektir. Akıllı gübreleme sistemleri için besin çözeltisini hazırlayıp otomatik olarak bitkiye uygulayabilir. Bununla birlikte, otomatik dozaj sistemlerinin doğru çalışması; sensör kalibrasyonu, su kalitesi ve gübre bileşiminin test performansı sırasında çalışır durumda olması da dahil olmak üzere genel kontroller gerektirir. Ayrıca, her bir

enjeksiyon ekipmanının performansını düzenli olarak test ederken bu kontrollerin yapılması gerekir (Savvas ve Gruda, 2018).

Kapalı devre sistemlerin benimsenmesiyle su kullanımı azaltılabilir; bu sistemlerde su kaybedilmez, uygun şekilde tasarlandıkları ve uygun hijyen koşullarında kullanıldıkları sürece dönüş hattındaki ortamda tuz birikimi, besin bileşenlerinde çözeltinin dengesizleşmesi ve hassas bitki hastalıkları gibi riskler ortaya çıkabilir. Bu nedenle suyun yeniden kullanımı; bu kaynaktan sağlanan tasarruf açısından olduğu kadar kimyasal ve biyolojik çözeltinin kalitesi açısından da değerlendirilmelidir.

7.AKILLI SERALARDA YAPAY ZEKÂ VE MAKİNE ÖĞRENMESİ

Yapay zekâ, sera ortamından elde edilen büyük ve çok boyutlu veri kümelerinin değerlendirilmesinde kullanılan yöntemleri kapsamaktadır. Makine öğrenmesi algoritmaları, geçmiş gözlemlerden yararlanarak değişkenler arasındaki ilişkileri öğrenebilir ve yeni veriler üzerinden tahminler oluşturabilir. Derin öğrenme yöntemleri ise özellikle görüntü analizi ve karmaşık veri örüntülerinin belirlenmesi gibi alanlarda kullanılmaktadır (Maraveas (2023))akıllı seralarda yapay zekâ uygulamalarını ürün verimi, sulama ve gübreleme, hastalık ve zararlı yönetimi ile sürdürülebilirlik başlıkları altında incelemiştir (Al-Qudah ve ark. (2025)) ise sensör verileri ve yapay zekâ yöntemlerinin akıllı sera sistemlerindeki uygulamalarını değerlendirirken akademik araştırmalarla ticari uygulamalar arasında veri, uygulama ölçeği ve teknolojiye uyum bakımından farklılıklar bulunduğunu vurgulamıştır.

7.1 Mikroiklim Tahmini

Sıcaklık ve nem gibi değişkenlerin gelecekteki değerlerinin tahmin edilmesi, sera kontrolünün daha önceden planlanmasına yardımcı olabilir. Bu amaçla doğrusal regresyon, karar ağaçları, rastgele orman, destek vektör regresyonu ve farklı zaman serisi modelleri kullanılabilir (Liu et al ., 2024; Cebolla- Alemany et al .,2026) .Daha karmaşık veri yapılarında tekrarlayan sinir ağları veya uzun-kısa süreli bellek ağları (LSTM) gibi yöntemler de değerlendirilebilir. Tahmin modellerinin başarısı, yalnızca eğitim verisindeki uyum düzeyiyle ölçülmemelidir (Guo ve Feng ,2024). Modelin farklı mevsimlerde, farklı sera bölümlerinde ve değişen dış ortam koşullarında ne

ölçüde doğru sonuç verdiği de değerlendirilmelidir. Bu nedenle bağımsız test verileri, zamana dayalı doğrulama ve uygun hata ölçütleri kullanılmalıdır. Tahmin sistemlerinin kontrol süreçlerine entegre edilmesi, olası aşırı sıcaklık veya yüksek nem durumlarına karşı önceden önlem alınmasını sağlayabilir. Bununla birlikte tahmin hataları ve veri eksiklikleri dikkate alınmalı; kritik kontrol işlemleri yalnızca tek bir yapay zekâ modelinin çıktısına bağımlı bırakılmamalıdır (Liu et al ., 2024) .

7.2. Bitki Sağlığının İzlenmesi

Bitki hastalıkları ve zararlıları, üretim kayıplarına neden olabilen önemli biyotik stres faktörleridir. Geleneksel izleme yöntemleri çoğunlukla görsel gözlem ve uzman değerlendirmesine dayanırken görüntü işleme teknolojileri, bitki belirtilerinin daha hızlı ve sistematik biçimde incelenmesine olanak sağlamaktadır. RGB kameralar bitki yapraklarının görünür özelliklerini kaydederken multispektral ve hiperspektral görüntüleme sistemleri, insan gözünün doğrudan algılayamadığı spektral farklılıkları da ortaya çıkarabilir. Termal kameralar ise bitki yüzey sıcaklığındaki değişimleri incelemek için kullanılabilir (Mahlein ,2016). Bu farklı veri türleri, bitki sağlığı ve su stresi hakkında tamamlayıcı bilgiler sunabilir. Derin öğrenme tabanlı görüntü sınıflandırma ve nesne tespiti yöntemleri, yaprak lekelerinin, renk değişimlerinin, zararlıların veya belirli hastalık belirtilerinin belirlenmesinde kullanılabilmektedir (Mohanty et al ., 2016;Singh ve Misra,2017). Ancak görüntülerden elde edilen sınıflandırmaların doğruluğu; görüntü kalitesi, ışık koşulları, bitki çeşidi, hastalık evresi ve eğitim veri kümesinin temsil gücüne bağlıdır. Buna göre, yapay zeka aracılığıyla elde edilen hastalık olasılığı tahminleri, gerektiğinde uzman incelemesi veya doğrulayıcı tanısal yaklaşımlarla teyit edilmelidir (Mohanty et al ., 2016) Erken uyarı sistemleri, hastalık seyrini kesin olarak öngören araçlar olarak değil; üreticinin gözlem ve müdahale süreçlerini güçlendirmeye yardımcı olan, karar destek araçları olarak düşünölmelidir.

7.3. Büyüme ve Verim Tahmini

Üretim planlaması ile hasat zamanını yönetmek için bitki gelişimini izlemek önemlidir. Kamera görüntülerinden ürün kanopi alanı, yaprak yoğunluğu, bitki boyu ve meyve sayısı gibi şeyleri belirlenebilir. Bu göstergeleri; biyolojik çeşitlilik verileri,

meteorolojik değişkenler ve geçmiş üretime ilişkin sonuç temelli verilerle birleştirerek büyüme hızına ve verim potansiyeline ilişkin tahminler oluşturulur. Pazarla ürünün ne zaman sunulacağı ve ne kadar emek birimine ihtiyaç duyulacağı konusunda planlamaya yardımcı olabilecek verim tahmini modellerinden ilki üretim sonuçları; büyüme sırasında meyve tutumu, hastalıklar ve çevresel stresin yanı sıra hasat sonrası kayıplar dahil olmak üzere çok sayıda faktör tarafından belirlendiğinden, model tahminleri belirsizliklerle birlikte sunulmalıdır (Chlingaryan ve ark. 2018; Liakos et al.,2018).

7.4. Birden Fazla Veri Kaynağının Entegrasyonu

Sıcaklık ve nem ölçümleri, radyasyon verileri, kök bölgesi sensörleri, kamera görüntüleri ve üretim kayıtları, akıllı sera sistemleri bağlamında farklı bilgi kaynakları olarak değerlendirilir. Bu verilerin birlikte değerlendirilmesi, yalnızca tek bir sensör türünü kullanarak elde edebileceğinizden daha sağlam bir değerlendirme yapılmasına olanak tanır. Çok modlu veri füzyonu, farklı kaynaklardan gelen bilgilerin ortak bir analitik çerçevede birleştirilmesi yöntemidir (Wolfert at al., 2017; Liakos et al.,2018) Örneğin, hava sıcaklığı ve nem ölçümleri termal fotoğraflarla birlikte alındığında, bitkilerin su stresi yaşama olasılığı hakkında daha güçlü sinyaller elde etme eğilimindeyiz. Bu durum, farklı sensörlerden gelen verilerin zaman ve konum açısından senkronize edilmesi gerektiğini; ölçümlerdeki aykırı değerlerin tespit edilmesi gerektiğini ve eksik verilerin hesaba katılması gerektiğini belirtir (El Ouaham ve diğerleri. (2026)), IoT'nin, yapay zekânın, spektroskopinin ve çok platformlu veri entegrasyonunun akıllı seralarda kullanımıyla ilgili güncel çalışmaların, veri setlerindeki sınırlamalar veya bunların diğer senaryolara ve uygulamalara aktarılabilirliğiyle ilişkili konulara odaklanılarak ele alındığı belirtilmiştir.

8.AKILLI SERA TEKNOLOJILERİNİN SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK AÇISINDAN DEĞERLENDİRİLMESİ

Akıllı sera uygulamaları, doğal kaynakların kullanımını optimize etmeye ve üretim süreçlerini daha doğru şekilde yönetebilme imkânı sağlar. Ancak yalnızca daha fazla sensör veya otomasyon ekipmanına sahip olmak sürdürülebilirliğe ulaşmanın yolu değildir. Kaynak tüketimleri, üretim çıktıları ve çevresel etkilerin bütüncül olarak gözden geçirilmesi gerekir (Iddio et al., 2020; Devi ve Manjunatha,2026)

8.1. Su Kaynaklarının Korunumu

Sulama için sensörlerin kullanılması, gerekli olandan fazla su uygulanmasını önleyebilir. Sulama kararları, özellikle damla sulama ve kapalı yetiştirme sistemleri ile birlikte kullanıldığında, bitkilerin gerçek su ihtiyacına daha yakın şekilde verilebilir. Ancak sulama tasarruf miktarı, önceki su yönetimi geçmişi ve benzeri unsurlara; orta bitki türü kontrol Metodu gibi faktörlere bağlıdır. Bu nedenle akıllı sulama sistemlerinin verimliliği, kontrolsüz veya geleneksel uygulamalarla karşılaştırılarak değerlendirilmelidir (Devi ve Manjunatha,2026)

8.2. Enerji Verimliliği

Seranın ısıtma, soğutma, havalandırma ve yapay aydınlatması; enerji tüketiminin en olası ana kalemleri veya önemli kalemlerinden biri olmakla birlikte, enerji tüketimini büyük ölçüde oluşturan unsurlardır. Akıllı kontrol sistemleri (Zhang et al.,2020), gereksiz alıştırma faktörlerini dahi önleyebilir ve uygun çalışma saatlerine karar verebilir. İyi pasif stratejiler; doğal havalandırma ve gölgeleme sağlanması içerir; bu da mekanik soğutma ihtiyacını azaltır. Ancak bu yöntemlerin çoğu, dış koşullara ve seranın tasarımına bağlıdır. Isıtma talebinin daha yüksek olduğu bölgelerde; kaplama malzemeleri ve yalıtım, ısı depolama ve enerji kaynağını kapsayacak şekilde ayrıca dikkat edilmelidir. Enerji verimliliği değerlendirildiğinde toplam enerji tüketimi, birim ürün başına enerji kullanımı, ısıtma ve soğutma yükleri ve kullanılan enerjinin maliyeti gibi ölçütler vardır. Enerji tüketiminin, çıktı büyümesiyle birlikte artma ihtimali olduğundan; toplam tüketimin yanı sıra, çıktı birimi başına tüketimi de hesaplamamız gerekir (Cuce at al., 2016; Iddio et al., 2020)

8.3. Kimyasal Girdilerin Yönetimi

Bitki sağlığını izlemek, hastalığın ve zararlı belirtilerin erken tespit edilmesine olanak sağlayabilir. Bu, kontrol operasyonlarıyla ilgili zamanında kararlar almayı destekler ve gereksiz uygulamalardan kaçınmaya yardımcı olur. Benzer şekilde, ölçümlere dayalı

doğru yönetilen bir besin çözeltisi, gübre kullanımını bitkinin ihtiyaçlarına daha yakın hale getirmeye yardımcı olabilir. Ancak bu, örn. yapay zekâ ile hastalık tespiti veya otomatik gübreleme gibi durumlarda kimyasal girdilerin azaltıldığı anlamına gelmez. Sonuçlara; hassas tanı, gerçek eşik değerler, mekanikler ve verimlilik seyri, sonuç üretim uygulamaları temel alınmalıdır (Padilla et al., 2018; Chlingaryan et al., 2018; Shi et al., 2019).

8.4. Kaynak Verimliliğinin Ölçülmesi

Birden fazla göstergenin eş zamanlı değerlendirilmesi, akıllı sera sistemlerinin sürdürülebilirlik performansını göstermede umut verici bir yöntemdir. TOE'ler şunları içerir: birim ürün başına su kullanımı, enerji yoğunluğu, gübre kullanım verimliliği, pazarlanabilir ürünler için güncel ve orantılı verim bilgisi, üretim maliyeti kıyas değerleri. Ancak üretim miktarındaki bir artış, ekolojik sürdürülebilirliğin bir göstergesi değildir. Örneğin verim artışı yüksek enerji tüketimiyle birlikteyse, o zaman tüm sistemin TCAC'ı da dikkate alınmalıdır. Bu nedenle, mümkün olduğunda yaşam döngüsü değerlendirmesi veya enerji analizi ve ekonomik performans ölçümlerinin kullanılması önerilir (Al-Qudah et al., 2025; Li et al., 2021).

9. AKILLI SERA UYGULAMALARINDA KARŞILAŞILAN SORUNLAR

Akıllı sera teknolojilerinin yaygın benimsenmesini hâlâ, teknik altyapıdan insan kaynaklarına kadar uzanan çeşitli zorluklar engellemektedir. Şimdi, ilk sorun; 500 milyon doları aşan düzeyde oldukça yüksek maliyetli yatırımlar gerektirmesi ya da kimi zaman çok ağır sermaye maliyetine sahip ekipmanın, kısmen de olsa artık daha az kullanılabilir (gemi taşımacılığı yapılan) varlık tabanlarına aktarılması ve pek çok durumda bu yatırımların rafa kaldırılmış olmasıdır. Başlangıçta sensörler, kontrol birimleri, iletişim ekipmanları, yazılım ve otomasyon sistemleri üzerinden yapılacak yatırım yüksektir. Yatırımın geri dönüşü; üretim ölçeğine, ürünün ekonomik değerine, enerji maliyetlerine ve verimlilik artışlarına göre değişir. Dolayısıyla bir teknoloji seçilirken yalnızca satın alma fiyatı değil; bakım, kalibrasyon, enerji ve yedek parça/yenileme maliyetleri de dikkate alınmalıdır (Hosny et al., 2025; Shi et al., 2019).

İkinci sorun, sensörlerin güvenilirliği ve dolaylı olarak verinin kalitesiyle ilgilidir. Güvenilmez ölçümler, veri kayıpları ve iletişim kesintileri, zamanla kontrol sisteminin verimliliğini düşürebilir. Ayrıca, aynı platformda birden fazla üreticiden gelen cihazların birlikte çalışması durumunda ortaya çıkabilecek teknik uyumsuzluklar da vardır. Bu tür durumlarda standartlaştırılmış veri formatları, açık iletişim protokolleri ve bu sistemlerin düzenli olarak test edilmesi esastır. Üçüncü olarak, yapay zekâ modellerinin yeni koşullara aktarılabilirliği gelir. Genellikle, bir sera ve/veya bir yetiştirme sezonu için hazırlanmış modelin aynı doğrulukla alternatif bir sera geometrisine, başka bir ürün sırasına ya da farklı bir iklime aktarılması mümkün değildir. Bir model, yalnızca eğitim verilerinin kapsam genişliği kadar iyidir. Bu da hem modellerin farklı üretim koşullarında doğrulanması gerektiği hem de performanslarının sürekli olarak izlenmesi gerektiği anlamına gelir. Dördüncü zorluk siber güvenlik ve veri yönetimiyle ilgilidir; ayrıca işten çıkarmalar, küçülme ve birleşmeler de buna dahildir. Ayrıca en güncel erişilebilir verilere bakınız (Ekim 2023 İnternet kontrollü sistemler) hack saldırısı veya iletişim kilitlenmesi gibi sorunlara karşı hassas olabilir. Erişim yetkilendirmesi, yazılım güncellemeleri ve veri yedekleme veya güvenli işletim modları gibi güvenlikle ilgili hususlar, örn. sulama ya da havalandırma/ısıtma süreçlerini uzaktan kontrol eden sistemlerde özellikle önem taşır. Son olarak, teknolojiyi kullanmak için becerilerin ve bilginin geliştirilmesi gerekir. Bu yalnızca üreticilerin ekipmanı çalıştırması için değil, aynı zamanda ölçüm verilerini yorumlamak ve sistem arızalarını teşhis etmek için de elzemdir. Bu nedenle, akıllı sera uygulamaları için üretici desteğiyle birleşen teknik eğitim ve üniversite–sanayi düzeyindeki iş birlikleri; Türkiye genelinde akıllı sera vakalarının sürdürülebilir şekilde yaygınlaştırılmasını teşvik edecek temel faktörlerdir. Türkiye’de akıllı sera teknolojisinin kullanımı korumalı yetiştiriciliği, üretim ortamını ve verimli kaynak kullanımını geliştirmeye yönelik akıllı sera teknolojisi potansiyelinin tahmini. Ancak Türkiye, iklim, su kaynakları, enerji talebi ve altyapı açısından daha geniş bölgeler içinde oldukça farklılık gösterebilir; ayrıca seralar söz konusu olduğunda üretim elbette değişkenlik göstermektedir. Bu nedenle, küresel ölçekte önerilen aynı teknoloji paketinin Türkiye için de aynı şekilde anlamlı olmasını beklemek makul olmayacaktır (Hosny et al., 2025).

10. GELECEKTEKİ GELİŞMELER VE ARAŞTIRMA GEREKSİNİMLERİ

Akıllı seralar açısından araştırmalar, entegre sensör sistemleri ve geliştirilmiş tahmin modelleri ile birlikte otonom kontrol metodolojilerine odaklanmaktadır. Ancak diğer yandan, yeni teknolojilerin üretim koşullarında güvenilir ve uygulanabilir bir şekilde kullanılabilmesi için bazı sorunların da çözülmesi gerekir (Al-Qudah et al., 2025).

1. Heterojen sensör ve görüntüleme sistemlerini tek bir birleşik veri mimarisinde bir araya getirip entegre etmektir. Farklı veri kaynaklarının birleştirilmesi, bitki büyümesini ve stres göstergelerini izlemeye yönelik daha kapsamlı bir yaklaşım sunmaya yardımcı olur. Bununla birlikte başarı, veri kalitesinin ve cihaz uyumluluğunun iyileştirilmesini gerektirir.
2. Tahmin etme ve kontrol süreçlerinizi aynı görev kapsamında birleştirmeniz gerektiği anlamına gelir. Model Tahminli Kontrolü (MPC) örnek olarak ele alırsak, bu; yaklaşan sistem davranışının tahminleri üzerinden geleceğe doğru zamanında planlama yapmayı sağlayan bir yaklaşımdır. Bu nedenle, aynı modelleme kapsamına dayanan ve geri bildirim sistemleriyle doğrulanan pekiştirmeli öğrenme, dinamik durumlara uyum sağlayan kontrol stratejileri oluşturabilir (nasıl modellendiğine bağlı olarak). Ancak, bu yaklaşımların doğruluğu eğitim verisinin sınırları, model tutarlılığı (fidelity) ve kontrol kısıtlarının ne ölçüde hassas belirtildiği gibi etkenlerle belirlenebilir. (Cebolla-Aleman et al., 2026).
3. Yapay zekânın sahadaki uygulamalarının güçlendirilmesi (Edge computing) esastır. Sensörlerden elde edilen verileri seranın içindeki cihazların üzerinde doğrudan işleme yetenekleriyle çalıştırmak, bazı kontrol eylemleri için daha hızlı kararlar alınmasına yardımcı olurken aynı zamanda internet bağlantısı ve bulut altyapısına olan bağımlılığı azaltabilir. Bu teknik, zaman içinde daha standart kontrol gerektiren uygulamalarda özellikle faydalı olabilir (Hosny et al., 2025).
4. Seralarda üretime yönelik robotik sistemler giderek daha fazla çalışılmaktadır. Özerk robotlar (Bac et al., 2014), ürün takibi, meyve sayımı, olgunluk seviyesi kontrolü ve hasat operasyonları için kullanılabilir. Bununla birlikte, robotik uygulamaların daha büyük ölçekte ticarileştirilmesinin önündeki engeller; düzensiz bitki yapılarıyla ilişkili zorluklar, sınırlı çalışma alanları, meyveleri

zarar vermeden kavrayacak yumuşak u efektörler ve sistem maliyeti özölmedike aşılmalarına mümkün değildir (van Henten et al., 2002).

5. Enerji ve iklim yönetimi birlikte ele alınmalıdır. Böylece, akıllı seraların enerji performansındaki artış; yenilenebilir enerji kaynaklarına ilişkin kontrol stratejileri, enerji depolama sistemleri, ısı geri kazanımı ve iklim tahminleriyle gerçekleştirilebilir (Cuce et al., 2016).

Bu uygulamaların sağladığı avantajlar, yerel enerji altyapısı ve bunun gerektirdiğı üretim zaman izelgesi açısından değerlendirilmek zorundadır. Son olarak, ticari üretim koşullarında ve seralar arasında sonuçları doğrulama ihtiyacı da ele alınmıştır. Bir yöntem kontrollü deneylerde çalışıyor olması, gerçek üretim ortamlarında aynı şekilde davranacağı anlamına gelmez. Sonuç olarak, uzun vadeli denemeler, bölgesel veriler, ekonomik değerlendirmeler ve ortak değerlendirme yöntemleri, gelecekteki çalışmalar için öncelik verilmesi gereken diğer konulardır.

SONUÇ

Akıllı seralar; bitki yetiştiriciliğinde çevresel koşulları ölçme potansiyeline sahip, verilerin birleştirilmesi ve üretim süreçlerinin gereksinime dayalı yönetimiyle birlikte çalışan teknoloji üretim sistemleridir. Sensörler, Nesnelerin İnterneti (IoT) ve veri analitiğı ile yapay zekâ dâhil otomasyon teknolojilerinin uygulamaları; mikroiklim kontrolü, sulama ve gübreleme zamanlaması, bitki sağlığı izleme ve verim tahmini için yüksek bir potansiyel sunar. Bu teknolojilerin temel zorluğu, üretim kararlarının yalnızca deneyime dayanarak verilmesi yerine; bu veri destekli ölçüm ve analizlerin karar alma süreçlerine yedirilmesi gerektiğidir. Bununla birlikte, akıllı sera sistemlerinin sağladığı avantajlar, uygulanacak teknoloji türüne ve daha verimli ve sürdürülebilir tarımı sürdürecektir üretim koşullarına bağlıdır. Yatırım kararlarında; hatalı sensörleri, güvenilirmez bir veri hattını, yerel koşul uyarlamalarının eksikliğini, enerji tüketimini ve ekonomik fizibiliteyi dikkate almamak, beklenen sonuçları doğurmayacaktır. Etkili olabilmek için geleceğin akıllı sera uygulamalarının, dikkatli geliştirme çalışmalarının yanı sıra ileri teknolojiler ile agronomik bilgi arasında entegrasyonu teşvik etmesi gerekecektir. Üreticilerin teknik kapasitesinin geliştirilmesi, ticari koşullar altında nitelikli araştırmaların yürütölmesi ve kaynak kullanımının ölçölabilir göstergelerle değerlendirilmesi; sürdürülebilir tarımsal üretimi desteklemede akıllı sera teknolojisinin rolünü güçlendirecektir.

KAYNAKÇA

- Aiello, G., Giovino, I., Vallone, M., Catania, P., & Argento, A. (2018). A decision support system based on multisensor data fusion for sustainable greenhouse management. *Journal of Cleaner Production*, 172, 4057–4065. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.02.197>
- Körner, O. (2019). Models, sensors and decision support systems in greenhouse cultivation. In L. F. M. Marcelis & E. Heuvelink (Eds.), *Achieving sustainable greenhouse cultivation* (pp. 379–412). Burleigh Dodds Science Publishing. <https://doi.org/10.19103/AS.2019.0052.15>
- Shamshiri, R. R., Kalantari, F., Ting, K. C., Thorp, K. R., Hameed, I. A., Weltzien, C., Ahmad, D., & Shad, Z. M. (2018). Advances in greenhouse automation and controlled environment agriculture: A transition to plant factories and urban agriculture. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 11(1), 1–22. <https://doi.org/10.25165/j.ijabe.20181101.3210>
- Seginer, I., Albright, L. D., & Ioslovich, I. (2006). Improved strategy for a constant daily light integral in greenhouses. *Biosystems Engineering*, 93(1), 69–80. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2005.09.007>
- Li, H., Guo, Y., Zhao, H., Wang, Y., & Chow, D. (2021). Towards automated greenhouse: A state of the art review on greenhouse monitoring methods and technologies based on internet of things. *Computers and Electronics in Agriculture*, 191, 106558. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2021.106558>
- Körner, O. (2019). Models, sensors and decision support systems in greenhouse cultivation. In L. F. M. Marcelis & E. Heuvelink (Eds.), *Achieving sustainable greenhouse cultivation* (pp. 379–412). Burleigh Dodds Science Publishing. <https://doi.org/10.19103/AS.2019.0052.15>
- van Straten, G., van Willigenburg, L. G., van Henten, E. J., & van Ooteghem, R. J. C. (2010). *Optimal control of greenhouse cultivation*. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/b10321>
- Ara, I., Turner, L., Harrison, M. T., Monjardino, M., deVoil, P., & Rodriguez, D. (2021). Application, adoption and opportunities for improving decision support systems in irrigated agriculture: A review. *Agricultural Water Management*, 257, 107161. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.107161>
- Seginer, I., Ioslovich, I., & Albright, L. D. (2005). Strategies for a constant daily light integral in greenhouses. *Acta Horticulturae*, 691, 75–82. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2005.691.12>
- Wang, A., Lv, J., Wang, J., & Shi, K. (2022). CO₂ enrichment in greenhouse production: Towards a sustainable approach. *Frontiers in Plant Science*, 13, 1029901. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.1029901>
- Mortensen, L. M. (1987). Review: CO₂ enrichment in greenhouses. Crop responses. *Scientia Horticulturae*, 33(1–2), 1–25. [https://doi.org/10.1016/0304-4238\(87\)90028-8](https://doi.org/10.1016/0304-4238(87)90028-8)

- Jones, H. G. (2004). Irrigation scheduling: Advantages and pitfalls of plant-based methods. *Journal of Experimental Botany*, 55(407), 2427–2436. <https://doi.org/10.1093/jxb/erh213>
- Savvas, D., & Gruda, N. (2018). Application of soilless culture technologies in the modern greenhouse industry—A review. *European Journal of Horticultural Science*, 83(5), 280–293. <https://doi.org/10.17660/eJHS.2018/83.5.2>
- Maraveas, C. (2023). Incorporating artificial intelligence technology in smart greenhouses: Current state of the art. *Applied Sciences*, 13(1), Article 14. <https://doi.org/10.3390/app13010014>
- Al-Qudah, R., Almuhajri, M., & Suen, C. Y. (2025). Unveiling the potential of sustainable agriculture: A comprehensive survey on the advancement of AI and sensory data for smart greenhouses. *Computers and Electronics in Agriculture*, 229, Article 109721. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2024.109721>
- Liu, G., Zhong, K., Li, H., Chen, T., & Wang, Y. (2024). A state of art review on time series forecasting with machine learning for environmental parameters in agricultural greenhouses. *Information Processing in Agriculture*, 11(2), 143–162. <https://doi.org/10.1016/j.inpa.2022.10.005>
- Guo, Z., & Feng, L. (2024). Multi-step prediction of greenhouse temperature and humidity based on temporal position attention LSTM. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 38, 4907–4934. <https://doi.org/10.1007/s00477-024-02840-x>
- Cebolla-Aleman, J., Cheng, Y., Pintó-Espín, L., Albano, M., Macarulla, M., & Gassó-Domingo, S. (2026). Short-term forecasting and predictive control of rooftop greenhouse microclimate using multi-horizon machine learning models. *Smart Agricultural Technology*, 13, Article 101733. <https://doi.org/10.1016/j.atech.2025.101733>
- Mahlein, A.-K. (2016). Plant disease detection by imaging sensors – Parallels and specific demands for precision agriculture and plant phenotyping. *Plant Disease*, 100(2), 241–251. <https://doi.org/10.1094/PDIS-03-15-0340-FE>
- Mohanty, S. P., Hughes, D. P., & Salathé, M. (2016). Using deep learning for image-based plant disease detection. *Frontiers in Plant Science*, 7, Article 1419. <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.01419>
- Singh, V., & Misra, A. K. (2017). Detection of plant leaf diseases using image segmentation and soft computing techniques. *Information Processing in Agriculture*, 4(1), 41–49. <https://doi.org/10.1016/j.inpa.2016.10.005>
- Chlingaryan, A., Sukkarieh, S., & Whelan, B. (2018). Machine learning approaches for crop yield prediction and nitrogen status estimation in precision agriculture: A review. *Computers and Electronics in Agriculture*, 151, 61–69. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.05.012>
- Liakos, K. G., Busato, P., Moshou, D., Pearson, S., & Bochtis, D. (2018). Machine learning in agriculture: A review. *Sensors*, 18(8), Article 2674. <https://doi.org/10.3390/s18082674>
- Wolfert, S., Ge, L., Verdouw, C., & Bogaardt, M. J. (2017). Big data in smart farming – A review. *Agricultural Systems*, 153, 69–80. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2017.01.023>
- Devi, B. S., & Manjunatha, E. (2026). Precision irrigation and smart greenhouse technologies for sustainable agriculture: An integrated review. *Journal of Scientific Research and Reports*, 32(3), 539–555. <https://doi.org/10.9734/jsrr/2026/v32i34068>

- Iddio, E., Wang, L., Thomas, Y., McMorrow, G., & Denzer, A. (2020). Energy efficient operation and modeling for greenhouses: A literature review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 117, Article 109480. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109480>
- Cuce, E., Harjunowibowo, D., & Cuce, P. M. (2016). Renewable and sustainable energy saving strategies for greenhouse systems: A comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 64, 34–59. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.05.077>
- Zhang, S., Guo, Y., Zhao, H., Wang, Y., Chow, D., & Fang, Y. (2020). Methodologies of control strategies for improving energy efficiency in agricultural greenhouses. *Journal of Cleaner Production*, 274, Article 122695. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122695>
- Padilla, F. M., Gallardo, M., Peña-Fleitas, M. T., De Souza, R., & Thompson, R. B. (2018). Proximal optical sensors for nitrogen management of vegetable crops: A review. *Sensors*, 18(7), Article 2083. <https://doi.org/10.3390/s18072083>
- Chlingaryan, A., Sukkarieh, S., & Whelan, B. (2018). Machine learning approaches for crop yield prediction and nitrogen status estimation in precision agriculture: A review. *Computers and Electronics in Agriculture*, 151, 61–69. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.05.012>
- Shi, X., An, X., Zhao, Q., Liu, H., Xia, L., Sun, X., & Guo, Y. (2019). State-of-the-art internet of things in protected agriculture. *Sensors*, 19(8), Article 1833. <https://doi.org/10.3390/s19081833>
- Al-Qudah, R., Almuhajri, M., & Suen, C. Y. (2025). Unveiling the potential of sustainable agriculture: A comprehensive survey on the advancement of AI and sensory data for smart greenhouses. *Computers and Electronics in Agriculture*, 229, Article 109721. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2024.109721>
- Li, H., Guo, Y., Zhao, H., Wang, Y., & Chow, D. (2021). Towards automated greenhouse: A state of the art review on greenhouse monitoring methods and technologies based on internet of things. *Computers and Electronics in Agriculture*, 191, Article 106558. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2021.106558>
- Hosny, K. M., El-Hady, W. M., & Samy, F. M. (2025). Technologies, protocols, and applications of Internet of Things in greenhouse farming: A survey of recent advances. *Information Processing in Agriculture*, 12(1), 91–111. <https://doi.org/10.1016/j.inpa.2024.04.002>
- Shi, X., An, X., Zhao, Q., Liu, H., Xia, L., Sun, X., & Guo, Y. (2019). State-of-the-art internet of things in protected agriculture. *Sensors*, 19(8), Article 1833. <https://doi.org/10.3390/s19081833>
- Bac, C. W., van Henten, E. J., Hemming, J., & Edan, Y. (2014). Harvesting robots for high-value crops: State-of-the-art review and challenges ahead. *Journal of Field Robotics*, 31(6), 888–911. <https://doi.org/10.1002/rob.21525>
- van Henten, E. J., Hemming, J., van Tuijl, B. A. J., Kornet, J. G., Meuleman, J., Bontsema, J., & van Os, E. A. (2002). An autonomous robot for harvesting cucumbers in greenhouses. *Autonomous Robots*, 13(3), 241–258. <https://doi.org/10.1023/A:1020568125418>

BÖLÜM 3

SULAMA SUYU KALİTESİ: DEĞERLENDİRME, ETKİLER VE SÜRDÜRÜLEBİLİR YÖNETİM

Güney AKINOĞLU¹, Songül RAKICIOĞLU², Mustafa SAĞLAM³

¹ Doç. Dr., Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Toprak Bilimi ve Bitki Besleme Bölümü, guney.akinoglu@omu.edu.tr, ORCID iD: 0000-0003-4624-2876

² Dr., Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Toprak Bilimi ve Bitki Besleme Bölümü, rakicioglusongul@gmail.com, ORCID iD: 0000-0002-8013-6439

³ Prof. Dr., Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Toprak Bilimi ve Bitki Besleme Bölümü, mustafa.saglam@omu.edu.tr, ORCID iD: 0000-0002-7564-5079

1. Giriş

Sulama, dünya genelinde gıda üretiminin ve geçim kaynaklarının güvence altına alınmasında temel bir role sahiptir. Bu önem, dünyadaki sulanan alanların yaklaşık dörtte üçünün bulunduğu gelişmekte olan ülkelerde daha belirgindir. Küresel ölçekte ekilebilir alanların yaklaşık beşte biri sulanmakta; buna karşılık bu alanlardan toplam tarımsal üretimin yaklaşık %47'si ve tahıl üretiminin yaklaşık beşte üçü elde edilmektedir (FAO, 2021). Bununla birlikte, değişen iklim koşulları altında dünya nüfusunun %40'tan fazlası su kıtlığı sorunuyla karşı karşıyadır (Shemer ve ark., 2023). Sınırlı su kaynakları nedeniyle düşük kaliteli sular, sulamada yaşanan su açığının karşılanmasında alternatif bir kaynak olarak kullanılmakta; orta ve yüksek düzeyde kirlenmiş, sediment ve tuzluluk yükü içerebilen geri kazanılmış sular da farklı sulama sistemlerinde tatlı su kaynaklarının yerine veya bu kaynakları destekleyici nitelikte kullanılabilmektedir (Mahjoub ve ark., 2022; Saffan ve ark., 2022).

Sulamada kullanılan su büyük ölçüde nehirler, göller ve yeraltı suyu kaynaklarından sağlanmakta, ancak son yıllarda özellikle yeraltı suyu kullanımı önemli ölçüde artmaktadır. Özellikle su kıtlığının yaşandığı birçok bölgede acı ve tuzlu yeraltı sularının yaygın olması, sulamada kullanılabilecek suyun miktarı kadar kalitesini de önemli hale getirmektedir. Küresel ölçekte yapılan bir değerlendirmede, acı ve tuzlu yeraltı sularının 550 m derinliğe kadar yaklaşık 23,94 milyon km²'lik bir alanda bulunduğu ve bunun toplam kara alanının yaklaşık %16'sına karşılık geldiği bildirilmiştir (van Weert ve van der Gun, 2012). Yeraltı suyunun doğal beslenme miktarını aşan düzeylerde kullanılması, yeraltı su seviyelerinin hızla düşmesine ve çevredeki düşük kaliteli akiferlerden kaynaklanabilecek kirlenme riskinin artmasına neden olmaktadır. Kanal sulama alanlarındaki düşük sulama etkinliği de ikincil tuzluluğun geniş alanlarda ortaya çıkmasına yol açmaktadır. Bunun yanında, drenaj sistemlerinden önemli miktarda düşük kaliteli drenaj suyu açığa çıkmaktadır. İklim değişikliğindeki son eğilimler ve deniz suyu girişi nedeniyle özellikle kıyı bölgelerinde tuzlu su miktarının daha da artacağı öngörülmektedir. Tuzlu yeraltı suları daha çok su kıtlığının yaşandığı kurak ve yarı kurak bölgelerde bulunmakla birlikte, bu suların tarımsal sulamada kullanımı birçok ülkede yaygındır. Tuzlu veya alkali sular, Bangladeş, Çin, Hindistan, Pakistan, ABD, Avustralya ve Mısır'ın yanı sıra Yakın Doğu ve Kuzey Afrika'nın çeşitli bölgelerinde gıda, lif ve yem bitkilerinin sulanmasında kullanılmaktadır. Ancak bu suların önerilen toprak-su-bitki yönetimi dikkate alınmadan kullanılması, toprak sağlığı ve çevre açısından önemli sorunlara yol açabilmektedir (Rhoades ve ark., 1992; Grattan ve ark.,

2012; Minhas ve ark., 2019). Bu koşullarda ortaya çıkan toprak tuzluluğu, sodiklik (sodyumluluk) ve iyon toksisitesi sorunları, tarımsal üretkenliği ve ürün kalitesini olumsuz etkilemekte, aynı zamanda yetiştirilebilecek ürün çeşitliliğini sınırlandırmaktadır. Bununla birlikte, bilimsel çalışmalar, geçmişte sulamaya uygun olmadığı değerlendirilen bazı su kaynaklarının uygun yönetim uygulamalarıyla tarımsal üretimde kullanılabileceğini göstermektedir (Minhas ve Gupta, 1992; Plaut ve ark., 2013; Oster ve ark., 2022). Bu bağlamda, tuzlu yeraltı suları ve drenaj suları gibi geleneksel olmayan su kaynaklarının tarımsal sulamada değerlendirilmesi, giderek artan tatlı su kıtlığı karşısında alternatif bir su yönetimi yaklaşımı olarak önem kazanmaktadır. Ancak bu kaynakların sürdürülebilir kullanımı, sulama suyu kalitesinin ve toprak–bitki sistemi üzerindeki olası etkilerinin doğru biçimde değerlendirilmesine bağlıdır (Minhas ve Qadir, 2024).

Sulama suyunun bitkisel üretime uygunluğunun belirlenmesinde tuzluluk, alkalilik ve toksisite tehlikelerinin yanı sıra suyun kullanılacağı koşulların da dikkate alınması gerekmektedir. Toprak, bitki, sulama ve diğer yönetim uygulamalarının etkilerinin birbiriyle ilişkili olması, her koşulda geçerli katı su kalitesi standartlarının oluşturulmasını ve uygulanmasını güçleştirmektedir. Bu nedenle sulama suyunun değerlendirilmesinde, su kaynaklarının geliştirilmesine ve etkin kullanımına yön verecek kalite kriterleri ve değerlendirme kılavuzlarından yararlanılmaktadır. Tuzlu suların sulamada yaygın olarak kullanıldığı çeşitli ülkelerde de bu amaçla farklı su kalitesi kriterleri geliştirilmiştir. Bu kılavuzların temel amacı, farklı kalitedeki suların uygun koşullarda kullanılmasını sağlayarak su yönetiminde etkinliği ve ekonomik kullanımı artırmaktır (Minhas ve Qadir, 2024).

Bu çerçevede, sulama suyu kalitesinin doğru değerlendirilmesi ve uygun yönetim uygulamalarının belirlenmesi, su kaynaklarının etkin kullanımı ve tarımsal üretimin sürdürülebilirliği açısından önem taşımaktadır. Bu bölümde, sulama suyu kalitesinin değerlendirilmesinde kullanılan temel parametreler ve sınıflandırma sistemleri ele alınmış; düşük kaliteli sulama sularının toprak özellikleri, bitkisel üretim, sulama sistemleri, evre ve ekonomi üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Ayrıca, bu etkilerin azaltılmasına yönelik sulama, drenaj ve toprak yönetimi uygulamaları ile sulama suyu kalitesinin izlenmesi ve yönetiminde kullanılan yaklaşımlar incelenmiştir.

2. Sulama Suyu Kalitesinin Değerlendirilmesi ve Sınıflandırılması

2.1. Sulama suyu kalite parametreleri ve indeksleri

Sulama suyu kalitesinin değerlendirilmesi, sulamada kullanılan suyun kimyasal, fiziksel ve biyolojik özelliklerinin sistematik olarak incelenmesini ifade eder. Bu değerlendirme kapsamında pH, tuzluluk, elektriksel iletkenlik (EC), kation ve anyon konsantrasyonları [örneğin sodyum (Na^+), kalsiyum (Ca^{+2}), magnezyum (Mg^{+2}), potasyum (K^+), klorür (Cl^-), sülfat (SO_4^{-2}), karbonat (CO_3^{-2}) ve bikarbonat (HCO_3^-)], ağır metal varlığı, organik kirleticiler ve mikrobiyal yük gibi parametreler analiz edilir (Park ve ark., 2016). Temel amaç, suyun sulama açısından uygunluğunu belirlemek ve toprak sağlığı, bitkisel üretim, sulama ekipmanları ile insan ve çevre sağlığı açısından oluşturabileceği olası riskleri ortaya koymaktır (Khan ve ark., 2006).

Sulama suyunun pH değeri, sudaki hidrojen (H^+) ve hidroksil (OH^-) iyonlarının konsantrasyonu ile ilişkilidir. pH, flokülasyon ve koagülasyon süreçlerini etkileyerek damlatıcıların tıkanmasında rol oynayabilmektedir (Wang ve ark., 2024). Özellikle pH değerinin 7,2'nin üzerinde olduğu ve sıcaklığın arttığı koşullarda, kalsiyum ve magnezyum karbonatlar lateral borular ve damlatıcılarda çökelebilmektedir. Karbonatların çözünürlüğünün sıcaklıkla ters orantılı olması nedeniyle yüksek sıcaklık, çökelmeyi artırarak bu bileşiklerin damlatıcılarda birikmesine neden olabilmektedir (Muniz ve ark., 2023).

Toplam askıda katı maddeler (TSS) başlıca toprak erozyonu ve sedimentasyondan kaynaklanmaktadır (Guan ve ark., 2022; Adjovu ve ark., 2023). Damla sulama sistemlerinde, sulama suyundaki toplam askıda katı madde konsantrasyonunun 50 mg L^{-1} değerinin üzerine çıkması damlatıcıların tıkanmasına neden olabilmektedir (Liu ve ark., 2022).

Toplam çözünmüş katı madde (TDS), suda çözünmüş maddelerin miktarını ifade eder. Çözünmüş maddeler arasında sülfat, bikarbonat, sodyum, karbonat, kalsiyum ve magnezyum gibi bileşenler bulunmaktadır. Yüksek toplam çözünmüş katı madde konsantrasyonları suyun berraklığını azaltmakta, rengini etkileyebilmekte ve suyun tuzluluk özelliğini belirlemektedir (Anyango ve ark., 2024). Elektriksel iletkenlik (EC) ise suda çözünmüş iyonların toplam konsantrasyonu ile ilişkili bir su kalitesi göstergesidir (Mishra ve ark., 2023). Suyun yüksek EC değeri, yüksek iyon konsantrasyonuna ve dolayısıyla yüksek toplam çözünmüş katı madde düzeyine işaret etmektedir (Anyango ve ark., 2024).

Sulama suyunun toprak ve bitki sistemi üzerindeki özgül risklerini değerlendirmek amacıyla bu parametrelerden türetilen çeşitli indekslerden de yararlanılmaktadır. Bunlar arasında sodyum adsorpsiyon oranı (SAR), çözünür sodyum yüzdesi (SSP), kalıntı sodyum

karbonat (RSC) ve diğer bazı indeksler yer almakta olup, bu indeksler aşağıda kısaca açıklanmıştır.

Sodyum adsorpsiyon oranı (SAR): Sudaki sodyum iyonlarının kalsiyum ve magnezyum iyonlarına göre görelili durumunu ifade eder. SAR değeri, sodyum içeriği yüksek suların uzun süre kullanılması sonucunda toprakta sodyum birikme potansiyelini gösterir (Ayers ve Westcot, 1985).

znr sodyum yüzdesi (SSP): Sodyum ve potasyum konsantrasyonlarının toplam katyon konsantrasyonuna oranını ifade eden pratik bir indekstir. Sulama suyunun uygunluğunu değerlendirmede güvenilir bir gösterge olarak kabul edilir. znr sodyum yüzdesi değerinin %50'nin altında olması suyun sulama açısından uygun olduğunu, %50'nin üzerinde olması ise uygun olmadığını ifade eder (Guerra-Rodrguez ve ark., 2020).

Kalıntı sodyum karbonat (RSC): Sulama suyundaki karbonat ve bikarbonat iyonlarının kalsiyum ve magnezyuma göre fazlalığını ifade eden bir indekstir (Eaton, 1950). Yüksek kalıntı sodyum karbonat değerine ve buna bağlı olarak yüksek pH değerine sahip sularla sulanan topraklarda Na_2CO_3 birikimi meydana gelerek toprak verimliliği azalabilir. Karbonat (CO_3^{2-}) ve bikarbonat (HCO_3^-) iyonlarının fazlalığı, kalsiyum ve magnezyumun çökelmesine neden olur. Bu durum toprak yapısını bozarken, topraktaki sodyumun etkinliğini artırabilir (Vraneřević ve ark., 2025).

Toprak geçirgenliği, sulama suyunun uzun süreli kullanımından etkilenmekte olup, bu durum büyük ölçüde çözünmüş toplam tuz miktarı, sodyum içeriği ve bikarbonat konsantrasyonuna bağlıdır. Bu üç faktörü birlikte değerlendirmek amacıyla Doneen (1964) tarafından *geçirgenlik indeksi (PI)* geliştirilmiştir. Geçirgenlik indeksi, sulama suyunun toprak geçirgenliği üzerindeki olası etkisini değerlendiren bir indekstir (Vraneřević ve ark., 2025).

Kelly oranı (KR): Sodyum adsorpsiyon oranına benzer şekilde, sulama suyunun alkalileştirme riskini değerlendiren bir göstergedir ve sodyum (Na^+) konsantrasyonunun kalsiyum (Ca^{2+}) ile magnezyum (Mg^{2+}) konsantrasyonlarına oranına dayanır. Kelly oranı değerinin 1'den büyük olması, sulama suyunda sodyum miktarının yüksek olduğunu ve alkalileşme riski taşıdığını gösterir. Bu özellikteki sular, sulama için uygun kabul edilmez. Buna karşılık Kelly oranı değeri 1'den küçük olan suların sulama açısından uygun olduğu değerlendirilir (Kelley, 1963).

Magnezyum adsorpsiyon oranı (MAR): Sulama suyunun magnezyum tehlikesi açısından kalitesini değerlendiren bir indekstir (Szabolcs ve Darab, 1964). Magnezyum konsantrasyonunun yüksek olması, toprakta katyon dengesini olumsuz etkileyerek sodyumun etkinliğinin artmasına neden olabilir ve bu durum tarımsal verim üzerinde olumsuz etkilere

yol açabilir. Magnezyum içeriği yüksek suların uzun süre kullanılması, toprağın kimyasal yapısını bozmakta ve ürün verimini azaltmaktadır (Qadir ve ark., 2018).

Toplam sertlik (TH): Suda bulunan iki değerlikli metal katyonları olan kalsiyum ve magnezyum iyonlarının varlığından kaynaklanır. Toplam sertlik, kalsiyum ve magnezyum konsantrasyonlarının toplamı olarak veya kalsiyum karbonat (CaCO_3) eşdeğeri cinsinden ifade edilir. Bu gösterge, sulama suyunun özellikle sulama sistemi bileşenleri üzerindeki etkisini değerlendirmek amacıyla kullanılmaktadır. Yaklaşık 100 mg L^{-1} düzeyindeki toplam sertlik değerleri, korozyonun kontrolü açısından uygun ve kabul edilebilir sınırlar içerisinde yer almaktadır (Rawat ve ark., 2018).

Bu indekslerin hesaplanmasında kullanılan standart eşitlikler Tablo 1’de sunulmuştur.

Tablo 1. Sulama suyu kalite indekslerinin hesaplanmasında kullanılan formüller

No.	Kriterler	Formüller
Sodyumluluk tehlikeleri		
(1)	Sodyum adsorpsiyon oranı (SAR)	$SAR = Na^+ / \sqrt{[(Ca^{2+} + Mg^{2+}) / 2]}$
(2)	Çözünür sodyum yüzdesi (SSP)	$SSP = [(Na^+ + K^+) / (Ca^{2+} + Mg^{2+} + Na^+ + K^+)] \times 100$
(3)	Kalıcı sodyum karbonat (RSC)	$RSC = (HCO_3^- + CO_3^{2-}) - (Ca^{2+} + Mg^{2+})$
(4)	Geçirgenlik indeksi (PI)	$PI = [(Na^+ + \sqrt{HCO_3^-}) / (Ca^{2+} + Mg^{2+} + Na^+)] \times 100$
(5)	Kelly oranı (KR)	$KR = Na^+ / (Ca^{2+} + Mg^{2+})$
Magnezyum tehlikeleri		
(6)	Magnezyum adsorpsiyon oranı (MAR)	$MAR = [Mg^{2+} / (Ca^{2+} + Mg^{2+})] \times 100$
(7)	Toplam sertlik (TH)	$TH = 2,5 \times Ca^{2+} + 4,1 \times Mg^{2+}$

Sulama suyunun uygunluğunun değerlendirilmesinde kullanılan başlıca kalite indekslerine ait sınıflandırma aralıkları ise Tablo 2’de verilmiştir.

Tablo 2. Sulama suyu kalite indekslerine ilişkin sınıflandırma aralıkları

Parametre	Sınıf	Aralık	Kaynak(lar)
Sodyum yüzdesi (%Na)	Mükemmel	<20%	Wilcox, 1955
	İyi	20–40%	
	İzin verilebilir	40–60%	
	Şüpheli	60–80%	
	Uygun değil	>80%	
Sodyum adsorpsiyon oranı (SAR)	Mükemmel	<10	Richards, 1954
	İyi	10–18	
	Şüpheli	18–26	
	Uygun değil	>26	
Kalıntı sodyum karbonat (RSC)	İyi	<1.25	Eaton, 1950
	Şüpheli	1.25–2.50	
	Uygun değil	>2.50	
Geçirgenlik indeksi (PI)	Mükemmel	>75%	Doneen, 1964
	İyi	25–75%	
	Uygun değil	<25%	
Kelly oranı (KR)	Uygun	<1	Kelley, 1941
	Uygun değil	>1	
Magnezyum adsorpsiyon oranı (MAR)	Uygun	<50%	Paliwal, 1972
	Uygun değil	>50%	

2.2. Sulama suyu kalitesinin sınıflandırılması

Sulama suyu kalite sınıflandırmaları ve değerlendirme yöntemlerinin temel amacı, suyun bitkisel üretime uygunluğunu belirlemek, sulama uygulamalarında karşılaşılabilecek olası riskleri ortaya koymak ve bu risklerin olumsuz etkilerini en aza indirmeye yönelik yönetim kararlarını desteklemektir (Malakar ve ark., 2019; Masoud ve ark., 2022). Dünya genelinde en yaygın kullanılan sınıflandırma sistemleri, Birleşmiş Milletler Gıda ve Tarım Örgütü (FAO) ve ABD Tuzluluk Laboratuvarı (USSL) sınıflandırmalarıdır.

Birleşmiş Milletler Gıda ve Tarım Örgütü (FAO) sınıflandırması, sulama suyu kalitesini tuzluluk, infiltrasyon ve iyon toksisitesi gibi temel unsurlar açısından değerlendirmektedir. Bu sistemde özellikle tuzluluğun bitkilerin su alımı üzerindeki etkisi ile sulama suyunun infiltrasyon üzerindeki etkisi dikkate alınmaktadır. Ayrıca, başta sodyum ve klorür olmak üzere belirli iyonların toksisite düzeyleri de incelenmektedir. Birleşmiş Milletler Gıda ve

Tarım Örgütü (FAO) sınıflandırmasının önemli avantajlarından biri, bitkileri bu iyonlara karşı duyarlılıklarına göre duyarlı, orta derecede duyarlı ve toleranslı olmak üzere gruplandırmasıdır (Ayers ve Westcot, 1985). Ayers ve Westcot (1985) tarafından geliştirilen bu sınıflandırma günümüzde hâlen yaygın olarak kullanılmakla birlikte, son yıllarda gerçekleştirilen çalışmalar, güncel sulama uygulamalarını, çevresel sorunları ve politika gereksinimlerini daha iyi yansıtacak değerlendirme ölçütlerine ihtiyaç duyulduğunu ortaya koymuştur (Guerra-Rodríguez ve ark., 2020; Schomberg ve ark., 2023).

ABD Tuzluluk Laboratuvarı (USSL) sınıflandırması ise sulama suyunu tuzluluk ve sodyumluluk (alkalilik) riskleri açısından birlikte değerlendirmektedir. Bu yaklaşım, söz konusu iki faktörün sulama suyu kalitesi üzerindeki birleşik etkilerinin değerlendirilmesine olanak sağlamaktadır. ABD Tuzluluk Laboratuvarı sınıflandırması, sulama suyunun tuzluluk (C sınıfı) ve sodyumluluk (S sınıfı) tehlikelerine göre sınıflandırılmasına ve buna bağlı olarak uygun su yönetimi uygulamalarının belirlenmesine olanak sağlayan önemli bir araçtır (Richards, 1954). Bununla birlikte, geleneksel FAO ve USSL sınıflandırmaları sulama suyu kalitesinin değerlendirilmesinde temel bir çerçeve sunmasına rağmen, güncel araştırmalar değişen çevresel koşullar ve yeni politika yaklaşımları doğrultusunda bu sınıflandırmaların geliştirilmesi gerektiğini vurgulamaktadır (Guerra-Rodríguez ve ark., 2020). Sulama suyunun kullanılabilirliğinin değerlendirilmesinde esas alınan tuzluluk (C) ve sodyumluluk (S) sınıflarına göre oluşturulan sınıflandırma Tablo 3'te verilmiştir.

Tablo 3. ABD Tuzluluk Laboratuvarı sınıflandırmasına göre tuzluluk (C) ve sodyumluluk (S) düzeylerine göre sulama suyunun sınıflandırılması

C-S sınıfı	S1	S2	S3	S4
C1	Uygun / iyi kaliteli su	Orta-iyi kaliteli su	Orta kaliteli su	Orta-düşük kaliteli su
C2	Orta-iyi kaliteli su	Orta kaliteli su	Orta-düşük kaliteli su	Düşük kaliteli su
C3	Orta kaliteli su	Orta-düşük kaliteli su	Düşük kaliteli su	Çok düşük kaliteli su
C4	Orta-düşük kaliteli su	Düşük kaliteli su	Çok düşük kaliteli su	Sulamaya uygun olmayan su

3. Düşük Kaliteli Sulama Suyunun Toprak, Bitki ve Çevre Üzerindeki Etkileri

3.1. Toprak özellikleri ve bitkisel üretim üzerindeki etkileri

Sulama suyu kalitesi, sürdürülebilir tarımsal üretimin temel unsurları olan toprak sağlığı ve verimliliği üzerinde belirleyici bir etkiye sahiptir. Sağlıklı ve verimli topraklar, bitkilerin gereksinim duyduğu besin elementlerini sağlayarak güçlü bitki gelişimini destekler; aynı zamanda uygun su tutma ve drenaj koşullarının sürdürülmesine katkı sağlar. Bu özellikler, su kullanım etkinliğinin yükseltilmesi, ürün veriminin sürdürülebilir şekilde korunması ve çevresel etkilerin azaltılması açısından büyük önem taşımaktadır (Suvendran ve ark., 2024). Toprak sağlığının başlıca göstergeleri; organik madde içeriği, toprak yapısı, mikrobiyal aktivite ve besin elementi kullanılabilirliğidir. Sulama koşullarında toprak sağlığı; suyun tutulması ve drenajı, besin elementi döngüsü ile stabil agregat yapısının korunması gibi süreçler açısından belirleyici bir role sahiptir. Toprak verimliliği ise toprağın bitkilere gerekli besin elementlerini yeterli miktarda ve uygun oranlarda sağlayabilme kapasitesini ifade eder. Bu kavram; besin elementi kullanılabilirliği, pH ve tuzluluğun yönetimi ile gübre kullanım etkinliği gibi temel bileşenleri kapsamaktadır. Toprak sağlığı ve verimliliğinin korunması, su ve besin elementlerinin daha etkin kullanılmasını sağlayarak özellikle kritik gelişme dönemlerinde daha yüksek ürün verimi ve kalitesini desteklemekte ve bitkilerin çevresel stres koşullarına karşı dayanıklılığını artırmaktadır (Nikolaou ve ark., 2020; Zhang ve ark., 2021). Organik madde içeriği yüksek ve mikrobiyal çeşitlilik bakımından zengin topraklar, hastalık ve zararlıların baskılanmasına katkı sağlayabilmektedir. Bununla birlikte, sulama koşullarında aşırı toprak nemi, patojen mikroorganizmaların gelişimini teşvik ederek bitki sağlığı üzerinde olumsuz etkilere yol açabilmektedir (Vranešević ve ark., 2025).

Yüksek düzeyde çözünmüş tuz ve sodyum içeren düşük kaliteli sulama suları, toprakta tuzlulaşma, sodyumlulaşma, taban suyu yükselmesi ve su birikmesi (waterlogging) gibi sorunlara yol açarak bitkisel üretimde önemli verim kayıplarına neden olmaktadır. Bu olumsuzluklar, uzun vadede toprak ve su kaynaklarının bozulmasına ve tarımsal üretimin sürdürülebilirliğinin olumsuz etkilenmesine yol açmaktadır (Vranešević ve ark., 2025).

Tuzlulaşma, düşük kaliteli sulama sularının tarım toprakları üzerindeki en yaygın etkilerinden biridir. Tuz içeriği yüksek sularla yapılan sulama, özellikle kök bölgesinde çözünmüş tuzların birikmesine neden olur. Bu durum, toprak çözeltisinin ozmotik potansiyelini düşürerek bitkinin su alımını sınırlar ve fizyolojik kuraklık koşullarının oluşmasına yol açar. Tuz birikimi, evapotranspirasyonun yağıştan fazla olduğu kurak ve yarı kurak bölgelerde daha belirgin hale gelmektedir (Rengasamy, 2010).

Toprak bozulmasına neden olan bir diğer önemli süreç sodyumlulaşma olup bu sorun, genellikle sodyum adsorpsiyon oranı (SAR) yüksek sulama sularının kullanılması sonucunda ortaya çıkmaktadır. Bu durumda sodyum iyonları, toprak kolloidleri üzerinde kalsiyum ve magnezyum iyonlarının yerini alarak toprak agregatlarının dağılmasına neden olmaktadır (İbrahim ve ark., 2023). Toprak yapısındaki bu bozulma; geçirgenlik ve havalanmayı azaltmakta, kök gelişimini olumsuz etkilemekte ve bitkilerin su ile besin elementi alımını sınırlandırmaktadır (Qadir ve Oster, 2004).

Yetersiz kaliteli sulama suları ve uygun olmayan sulama uygulamalarıyla ilişkili bir diğer önemli sorun ise su birikimidir (waterlogging). Toprağın uzun süre suya doymun kalması, toprak gözeneklerindeki oksijen miktarını azaltarak bitki köklerinin solunumunu ve gelişimini sınırlandırmaktadır. Uzun süreli su birikimi, kök çürüklüklerinin ve anaerobik patojenlerin gelişimini teşvik etmekte; bunun yanında besin elementlerinin yıkanmasına ve toprak redoks potansiyelinin değişmesine neden olmaktadır. Sonuç olarak bitki gelişimi zayıflamakta ve ürün verimi önemli ölçüde azalmaktadır (Barrett-Lennard, 2003).

3.2. Sulama sistemleri üzerindeki etkileri

Sulama ekipmanları, uygun olmayan su kalitesinden olumsuz etkilenebilmektedir. Askıda katı madde içeriği yüksek veya belirli kimyasal bileşenleri fazla olan düşük kaliteli sular; damlatıcıların tıkanmasına, boru ve diğer sulama sistemi bileşenlerinde korozyona neden olarak bakım maliyetlerini artırmakta ve sistem performansını düşürmektedir. İleri düzeydeki tıkanma ve korozyon sorunları ise sulama sisteminin işlevini kısmen veya tamamen yitirmesine yol açabilmektedir. Damlatıcı tıkanması; partikül birikimi, kimyasal çökelme ve biyolojik kirlenmenin ayrı ayrı veya birlikte etkisiyle gelişebilmekte ve damlatıcı debisi ile su dağılım uniformitesini olumsuz etkileyebilmektedir (Xing ve ark., 2025). Bakterilerin büyük bir bölümü biyofilm oluşturabilmektedir. Biyofilmler, yüzeylere tutunan veya bir araya kümelenen ve hücre dışı polimerik maddeler (EPS) içeren bir matriks içerisinde bulunan mikrobiyal topluluklardır (Zhao ve ark., 2023). Hücre dışı polimerik maddelerin yapışkan özelliği, sulama suyunda bulunan sediment ve diğer askıda katı maddelerin yüzeylere tutunmasını kolaylaştırarak birikime neden olabilmektedir (Shen ve ark., 2022). *Escherichia coli*, biyofilm oluşumu ve tıkanmada rol oynayan başlıca bakteri türlerinden biridir (Moxley, 2022). Mikrobiyolojik etmenlerin yanı sıra pH, elektriksel iletkenlik ve bulanıklık da tıkanma riskiyle ilişkili önemli su kalitesi parametreleri arasında yer almaktadır (Singh ve ark., 2021).

3.3. Çevresel etkiler

Tarımsal üretim üzerindeki etkilerinin yanı sıra, uygun olmayan sulama sularının kullanımı ekosistemler için de önemli tehditler oluşturmaktadır. Bu durum; habitatların bozulması, biyolojik çeşitliliğin azalması ve doğal ekosistem işlevlerinin olumsuz etkilenmesi gibi sonuçlara yol açabilmektedir. Tuzlar ile sentetik gübreler, pestisitler, hormonlar ve bitki büyüme düzenleyicileri gibi tarımsal kimyasalların yüksek konsantrasyonları, ya toprak profili boyunca taşınarak ya da yüzey akışı yoluyla çevredeki su kaynaklarına ulaşabilmektedir. Bunun sonucunda hem karasal hem de sucul habitatlarda bozulmalar meydana gelebilmektedir (Begović ve ark., 2023).

Toprak tuzluluğu, mikrobiyal toplulukların çeşitliliğini ve yapısını değiştirerek topraktaki mikrobiyal süreçleri etkileyebilmektedir (Zhang ve ark., 2024). Bu değişimler, karbon ve azot döngülerinde görev alan mikrobiyal fonksiyonları da etkileyerek temel biyojeokimyasal süreçlerde değişikliklere yol açabilmektedir (Zhou ve ark., 2024). Ayrıca, sulama suyunda kurşun, kadmiyum ve arsenik gibi ağır metallerin bulunması, bitkilerde fitotoksositeye, bitki gelişiminin baskılanmasına ve toprak mikroorganizmaları ile toprak faunasının zarar görmesine yol açabilmektedir (Eid ve ark., 2023). Bu olumsuz etkiler besin zinciri boyunca yayılarak yaban hayatı popülasyonlarını da olumsuz etkileyebilmektedir (Chaudhry ve ark., 1998).

Sulama suyunda sodyumun kalsiyum ve magnezyuma oranla yüksek olması, özellikle düşük elektrolit konsantrasyonlarında, kil parçacıklarının dispersiyonunu ve toprak agregatlarının parçalanmasını teşvik ederek toprak yapısının bozulmasına ve infiltrasyon hızının azalmasına neden olabilmektedir. Bu durum, uygun arazi ve yağış koşullarında yüzey akışını ve toprak erozyonunu artırarak sediment ve sedimentlere bağlı kirleticilerin yüzey sularına taşınmasını kolaylaştırabilmektedir. Su ortamlarına ulaşan sedimentlerin birikmesi ise sucul canlıların yaşam alanlarının fiziksel özelliklerini değiştirerek ekosistemlerin olumsuz etkilenmesine yol açabilmektedir (Smith ve ark., 1999; Damseth ve ark., 2024).

Özellikle atık suların tarımsal amaçlı yeniden kullanılması, mikroplastik ve nanoplastiklerin tarımsal topraklara taşınmasına katkıda bulunabilmektedir. Bu parçacıkların toprakta birikmesi; toprağın hidrolik özelliklerini ve verimliliğini, organik maddenin kullanılabilirliğini, toprak faunasını ve mikrobiyal toplulukları etkileyebilmektedir (Carpanez ve ark., 2025).

Uygun olmayan sulama uygulamalarının çevresel etkilerinden biri de tarım alanlarında su birikmesi (waterlogging) riskini artırmasıdır. Toprağın uzun süre suya doygun kalması,

birçok kara bitkisi ve toprak organizması için elverişsiz olan anaerobik koşulların gelişmesine neden olmaktadır. Bu durum, bitkisel üretimin olumsuz etkilenmesine, tür kompozisyonunun suya dayanıklı bitki ve mikroorganizmalar lehine değişmesine ve sonuç olarak ekosistemlerdeki biyolojik çeşitliliğin azalmasına yol açmaktadır (Manik ve ark., 2019). Bu çevresel etkiler, özellikle tarımın temel geçim kaynağı olduğu bölgelerde önemli ekonomik kayıplarla da yakından ilişkilidir.

3.4. Ekonomik etkiler

Düşük kaliteli sulama sularının kullanımı önemli ekonomik sonuçlar doğurmaktadır. Ürün veriminde ve kalitesinde meydana gelen azalmalar, ürünlerin pazarlanabilirliğini düşürmekte ve üreticilerin gelirlerini doğrudan olumsuz etkilemektedir. Düşük kaliteli sulama suyu, bitkilerde bodur gelişim, renk bozuklukları ve besin değerinin azalması gibi sorunlara neden olabilmektedir. Bu durum, özellikle rekabetin yüksek olduğu pazarlarda ürünlerin tüketici beklentilerini veya belirlenen kalite standartlarını karşılayamamasına yol açabilmektedir (Linderhof ve ark., 2021).

Düşük kaliteli sulama suyunun olumsuz etkilerini azaltabilmek için üreticilerin çoğu zaman jips, organik madde veya biyokömür gibi toprak düzenleyicilerine ve çeşitli iyileştirme uygulamalarına yatırım yapmaları gerekmektedir. Bu kapsamda, toprağın iyileştirilmesi amacıyla farklı düzenleyicilerin uygulanması, tuzların uzaklaştırılması için ilave yıkama sulamalarının yapılması ve besin elementi dengesizliklerinin giderilmesi amacıyla organik veya mineral gübrelerin kullanılması ilave maliyetler oluşturabilmektedir. Bu uygulamalar üretim maliyetlerini artırmakta ve işletmelerin kârlılığını azaltmaktadır (Srivastava, 2020). Daha geniş ölçekte değerlendirildiğinde, tarımsal ihracata bağımlı ülkeler, ürünlerin kalite ve güvenilirlik açısından uluslararası standartları karşılayamadığı durumlarda ticari kısıtlamalarla karşılaşabilmektedir. Bu tür kısıtlamalar yalnızca ülke ekonomisini değil, aynı zamanda tarımla geçimini sağlayan toplulukların ekonomik sürdürülebilirliğini de olumsuz etkileyebilmektedir (Hoekstra ve Hung, 2005; Chapagain ve ark., 2006).

Düşük kaliteli sulama suyunun neden olduğu tarımsal, çevresel ve ekonomik sorunların azaltılabilmesi için, bu etkileri birlikte ele alan bütüncül ve hedefe yönelik yönetim stratejilerinin geliştirilmesi ve uygulanması gerekmektedir.

4. Sulama Suyu Kalitesinin Yönetimi

4.1. Sulama, drenaj ve toprak yönetimi

Düşük kaliteli sulama suyunun neden olduğu çok yönlü sorunların etkili bir şekilde yönetilebilmesi için yerel toprak, bitki ve sulama koşullarını dikkate alan bütünlük bir yönetim yaklaşımının benimsenmesi gerekmektedir.

Uygun kalitedeki sulama sularının kullanılması, sulama miktarı ve zamanlamasının bitki gereksinimlerine göre düzenlenmesi ve yeterli drenaj koşullarının sağlanması, kök bölgesinde tuz birikiminin sınırlandırılması açısından önem taşımaktadır (Gad ve ark., 2025). Kök bölgesinde biriken tuzların uzaklaştırılması amacıyla belirli aralıklarla yıkama sulaması yapılması da tuzluluk yönetiminde önemli bir uygulamadır. Ayrıca organik madde, jips ve biyokömür gibi toprak düzenleyiciler, toprak yapısını iyileştirerek tuzların yıkanmasını kolaylaştırmaktadır. Bununla birlikte, tuzluluğun tamamen önlenemediği koşullarda tuza dayanıklı bitki çeşitlerinin seçilmesi ve uygun münavebe sistemlerinin uygulanması, tarımsal üretimin sürdürülebilirliğine katkı sağlamaktadır. Bitkilerin tuzluluğa dayanıklılığı genellikle toprak doygunluk ekstraktının elektriksel iletkenliği (EC_e) ile ifade edilmektedir (Vranešević ve ark., 2025). Yaygın olarak yetiştirilen bazı kültür bitkilerinin tuzluluk tolerans düzeyleri Tablo 4'te verilmiştir.

Tablo 4. Seçilmiş kültür bitkilerinin tuzluluk tolerans düzeyleri (Khan ve ark., 2006; de Vos ve ark., 2016)

Bitki	Tuzluluk toleransı (EC_e , dS m ⁻¹)	Tolerans sınıfı
Arpa	> 8,0	Toleranslı
Pamuk	7,0–9,0	Orta derecede toleranslı
Buğday	6,0–8,0	Orta derecede toleranslı
Mısır	~1,7	Orta derecede hassas
Fasulye	~1,0	Hassas
Çilek	< 1,0	Çok hassas

Düzenli toprak analizleri ve izleme çalışmaları, uygun yönetim uygulamalarının zamanında belirlenmesine ve uygulanmasına olanak tanımaktadır (Singh, 2017). Bunun yanında, malç uygulamaları toprak yüzeyinden buharlaşmayı azaltarak nemin korunmasına ve yüzeye doğru tuz taşınımının sınırlandırılmasına yardımcı olmaktadır (Vranešević ve ark., 2025).

Sulama koşullarında çevresel sürdürülebilirlik, örtü bitkilerinin kullanılmasıyla erozyonun kontrol altına alınması ve yüzey akışının azaltılması gibi uygulamalarla desteklenebilmektedir. Ayrıca, organik madde içeriğinin korunması ve koruyucu toprak yönetimi uygulamalarının benimsenmesi, toprak sağlığının sürdürülmesine ve toprakta karbon depolanmasının artırılmasına katkı sağlamaktadır (Kochsiek ve ark., 2009; Tahat ve ark., 2020). Bu uygulamalar, tarımsal alanlardan kaynaklanan sera gazı emisyonlarının azaltılmasına katkıda bulunarak iklim değişikliğinin etkilerinin hafifletilmesini de destekleyebilmektedir.

4.2. Sulama sistemlerinde su kalitesi yönetimi

Damla sulama sistemlerinde tıkanmanın önlenmesi ve kontrolünde uygulanacak bakım işlemleri, tıkanmanın fiziksel, kimyasal veya biyolojik niteliğine göre değişmektedir. Fiziksel tıkanmanın kontrolünde filtrasyon ve hidrolik yıkama (flushing), kimyasal çökeltilerin kontrolünde asit uygulamaları, biyolojik tıkanmanın kontrolünde ise klorlama veya hidrojen peroksit uygulamaları kullanılmaktadır (Petit ve ark., 2022).

Sulama suyu kalitesinin etkin yönetimi, su kalitesinin düzenli olarak izlenmesini, olası kirletici kaynakların belirlenmesini ve gerekli iyileştirme uygulamalarının zamanında gerçekleştirilmesini gerektirmektedir. Su kalitesinin izlenmesine yönelik geliştirilen yöntemlerden biri de iyon değiştirici reçine esaslı zaman kapsüllerinin (time-lapse capsules) kullanılmasıdır. Bu kapsüller su ortamına yerleştirildiğinde ağır metal iyonlarını belirli bir süre boyunca tutmakta; reçine üzerinde biriken metaller ise X-ışını floresans çekirdek tarama (XRF-CS) tekniğiyle belirlenebilmektedir. Bu yaklaşım, su ortamlarında ağır metal kirliliğinin zamana bağlı olarak izlenmesine ve potansiyel kirletici kaynakların belirlenmesine olanak sağlamaktadır (Pan ve ark., 2020).

4.3. İzleme ve akıllı sulama teknolojileri

Hassas tarım teknolojileri, sulama yönetiminin daha etkin ve hassas biçimde yürütülmesinde önemli araçlar sunmaktadır. Gerçek zamanlı veri sağlayan sensörler ve yapay zekâ destekli sistemler, sulama yönetiminde karar verme süreçlerini desteklemektedir. Kablosuz sensör ağları aracılığıyla toprak nemi ve çevresel koşullar izlenebilmekte, sulama zamanı ve uygulanacak su miktarı bitkinin gereksinimine göre düzenlenebilmektedir. Meteorolojik verilerin sulama yönetimine entegre edilmesi de sulama planlamasının daha hassas biçimde yapılmasına olanak sağlamaktadır (Moustafa ve ark., 2026).

Akıllı sulama yönetiminde yalnızca bitki su gereksiniminin değil, sulama suyu kalitesini etkileyebilecek çevresel faktörlerin de izlenmesi önem taşımaktadır. Arazi kullanımı ve arazi örtüsündeki değişimler, su kalitesi üzerinde önemli etkilere sahip olabilmekte ve bu ilişkilerin değerlendirilmesinde istatistiksel modelleme yaklaşımlarından yararlanılmaktadır (Locke, 2024). Tarımsal sistemlerde sediment, pestisitler ve bitki patojenleri su yoluyla taşınabilen başlıca kirleticiler arasında yer almakta; havza özellikleri ve hidroklimatik koşullar bu kirleticilerin taşınımını etkileyebilmektedir (Gomes ve ark., 2025). Bu kirleticilerin izlenmesi, sulama suyu kalitesindeki değişimlerin belirlenmesi ve sulama sistemlerinde ortaya çıkabilecek sorunların önceden değerlendirilmesi açısından önemlidir.

5. Sonuçlar

Sulama suyu kalitesi, sürdürülebilir tarımsal üretim, toprak sağlığının korunması ve su kaynaklarının etkin yönetimi açısından kritik öneme sahiptir. Düşük kaliteli sulama sularının uzun süreli kullanımı; tuzlulaşma, sodyumlulaşma ve su birikimi gibi toprak bozulum süreçlerini hızlandırarak toprak yapısını, bitki gelişimini ve ürün verimini olumsuz etkilemekte; ayrıca sulama sistemlerinin performansında düşüşe, çevresel bozulmalara ve ekonomik kayıplara neden olabilmektedir.

Sulama suyunun güvenilir biçimde değerlendirilebilmesi için temel su kalitesi parametreleri ile sodyum adsorpsiyon oranı (SAR), kalıntı sodyum karbonat (RSC), çözünür sodyum yüzdesi (SSP), geçirgenlik indeksi (PI), Kelly oranı (KR) ve magnezyum adsorpsiyon oranı (MAR) gibi kalite indekslerinin birlikte değerlendirilmesi ve uygun sınıflandırma sistemlerinden yararlanılması gerekmektedir. Bu değerlendirmelerin düzenli izleme programlarıyla desteklenmesi ve yerel toprak, iklim, bitki ve yönetim koşulları dikkate alınarak yorumlanması önem taşımaktadır.

Düşük kaliteli sulama sularının olumsuz etkilerinin azaltılması; uygun sulama ve drenaj uygulamalarının, su kalitesi yönetiminin, bitki seçiminin ve toprak iyileştirme yöntemlerinin birlikte ele alındığı bütünleşik bir yaklaşımı gerektirmektedir. Bunun yanında, üreticilere yönelik eğitim ve yayım faaliyetlerinin güçlendirilmesi, bu uygulamaların etkinliği ve sürdürülebilirliği açısından önem taşımaktadır.

Gelecekteki çalışmaların, sulama suyu kalitesini toprak sağlığı, besin elementi dinamikleri ve iklim değişikliğinin etkileriyle birlikte ele alan bütüncül yaklaşımlara odaklanması gerekmektedir. Ayrıca yapay zekâ, uzaktan algılama ve gerçek zamanlı izleme sistemlerinin sulama suyu yönetimine entegrasyonu, veriye dayalı karar süreçlerini

güçlendirerek su kaynaklarının daha etkin ve sürdürülebilir biçimde yönetilmesine katkı sağlayabilir.

Kaynaklar

- Adjovu, G. E., Stephen, H., James, D., & Ahmad, S. (2023). Measurement of total dissolved solids and total suspended solids in water systems: A review of the issues, conventional, and remote sensing techniques. *Remote Sensing*, 15(14), 3534.
- Anyango, G. W., Bhowmick, G. D., & Bhattacharya, N. S. (2024). A critical review of irrigation water quality index and water quality management practices in micro-irrigation for efficient policy making. *Desalination and Water Treatment*, 318, 100304.
- Ayers, R. S., & Westcot, D. W. (1985). *Water quality for agriculture* (FAO Irrigation and Drainage Paper No. 29, Rev. 1). Rome, Italy: Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Barrett-Lennard, E. G. (2003). The interaction between waterlogging and salinity in higher plants: Causes, consequences and implications. *Plant and Soil*, 253, 35–54.
- Begović, R., Dudić, M., Meseldžija, M., Vranešević, M., & Jurišić, A. (2023). Rationalizing herbicide use in maize within the framework of climatic change and extreme hydrometeorological phenomena. *Sustainability*, 15(19), 14444.
- Carpanez, T. G., Castro, L. M. C., Amaral, M. C. S., & Moreira, V. R. (2025). Occurrence and environmental consequences of microplastics and nanoplastics from agricultural reuse of wastewater and biosolids in the soil ecosystem: A review. *Science of the Total Environment*, 980, 179538.
- Chapagain, A. K., Hoekstra, A. Y., & Savenije, H. H. G. (2006). Water saving through international trade of agricultural products. *Hydrology and Earth System Sciences*, 10, 455–468.
- Chaudhry, T. M., Hayes, W. J., Khan, A. G., & Khoo, C. S. (1998). Phytoremediation—Focusing on accumulator plants that remediate metal-contaminated soils. *Australasian Journal of Ecotoxicology*, 4, 37–51.
- Damseth, S., Thakur, K., Kumar, R., Kumar, S., Mahajan, D., Kumari, H., ... Kumar, V. (2024). Assessing the impacts of river bed mining on aquatic ecosystems: A critical review of effects on water quality and biodiversity. *HydroResearch*, 7, 122–130.
- de Vos, A., Bruning, B., van Straten, G., Oosterbaan, R., Rozema, J., & van Bodegom, P. (2016). *Crop salt tolerance under controlled field conditions in The Netherlands, based on trials conducted at Salt Farm Texel*. Den Burg, The Netherlands: Salt Farm Texel.

- Doneen, L. D. (1964). *Water quality for agriculture*. Davis, CA: Department of Irrigation, University of California.
- Eaton, F. M. (1950). Significance of carbonates in irrigation waters. *Soil Science*, 69, 123–134.
- Eid, M. H., Elbagory, M., Tamma, A. A., Gad, M., Elsayed, S., Hussein, H., ... Péter, S. (2023). Evaluation of groundwater quality for irrigation in deep aquifers using multiple graphical and indexing approaches supported with machine learning models and GIS techniques, Souf Valley, Algeria. *Water*, 15(1), 182.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2021). *The state of the world's land and water resources for food and agriculture—Systems at breaking point: Synthesis report 2021*. Rome, Italy.
- Gad, M., El Hamed, R. A., El Fadaly, E. A., Mousa, I. E., Gaagai, A., Aouissi, H. A., ... Elsayed, S. (2025). New approach to predict wastewater quality for irrigation utilizing integrated indexical approaches and hyperspectral reflectance measurements supported with multivariate analysis. *Scientific Reports*, 15, 18868.
- Gomes, M., Ralph, T. J., Humphries, M. S., Graves, B. P., Kobayashi, T., & Gore, D. B. (2025). Waterborne contaminants in high intensity agriculture and plant production: A review of on-site and downstream impacts. *Science of the Total Environment*, 958, 178084.
- Grattan, S. R., Oster, J. D., Benes, S. E., & Kaffka, S. R. (2012). Use of saline drainage waters for irrigation. In W. W. Wallender & K. K. Tanji (Eds.), *Agricultural salinity assessment and management* (2nd ed., ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice No. 71, pp. 687–719). New York, NY: American Society of Civil Engineers.
- Guan, Q., Feng, L., Tang, J., Park, E., Ali, T. A., & Zheng, Y. (2022). Trends in river total suspended sediments driven by dams and soil erosion: A comparison between the Yangtze and Mekong Rivers. *Water Resources Research*, 58(10), e2022WR031979.
- Guerra-Rodríguez, S., Oulego, P., Rodríguez, E., Singh, D. N., & Rodríguez-Chueca, J. (2020). Towards the implementation of circular economy in the wastewater sector: Challenges and opportunities. *Water*, 12(5), 1431.
- Hoekstra, A. Y., & Hung, P. Q. (2005). Globalisation of water resources: International virtual water flows in relation to crop trade. *Global Environmental Change*, 15, 45–56.
- Ibrahim, H., Yaseen, Z. M., Scholz, M., Ali, M., Gad, M., Elsayed, S., . . . Khalifa, M. M. (2023). Evaluation and prediction of groundwater quality for irrigation using an

- integrated water quality indices, machine learning models and GIS approaches: A representative case study. *Water*, 15(4), 694.
- Kelley, W. P. (1941). Permissible composition and concentration of irrigation water. *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, 106(1), 849–855.
- Kelley, W. P. (1963). Use of saline irrigation water. *Soil Science*, 95, 385–391.
- Khan, S., Tariq, R., Yuanlai, C., & Blackwell, J. (2006). Can irrigation be sustainable? *Agricultural Water Management*, 80, 87–99.
- Kochsiek, A. E., Knops, J. M. H., Walters, D. T., & Arkebauer, T. J. (2009). Impacts of management on decomposition and the litter-carbon balance in irrigated and rainfed no-till agricultural systems. *Agricultural and Forest Meteorology*, 149, 1983–1993.
- Linderhof, V., De Lange, T., & Reinhard, S. (2021). The dilemmas of water quality and food security interactions in low- and middle-income countries. *Frontiers in Water*, 3, 736760.
- Liu, X., Zhang, L., & He, X. (2022). Emitter clogging characteristics under reclaimed wastewater drip irrigation: A meta-analysis. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 102(10), 4171–4181.
- Locke, K. A. (2024). Modelling relationships between land use and water quality using statistical methods: A critical and applied review. *Journal of Environmental Management*, 362, 121290.
- Mahjoub, O., Mauffret, A., Michel, C., & Chmingui, W. (2022). Use of groundwater and reclaimed water for agricultural irrigation: Farmers' practices and attitudes and related environmental and health risks. *Chemosphere*, 295, 133945.
- Malakar, A., Snow, D. D., & Ray, C. (2019). Irrigation water quality—A contemporary perspective. *Water*, 11(7), 1482.
- Manik, S. N., Pengilley, G., Dean, G., Field, B., Shabala, S., & Zhou, M. (2019). Soil and crop management practices to minimize the impact of waterlogging on crop productivity. *Frontiers in Plant Science*, 10, 140.
- Masoud, M., El Osta, M., Alqarawy, A., Elsayed, S., & Gad, M. (2022). Evaluation of groundwater quality for agricultural under different conditions using water quality indices, partial least squares regression models, and GIS approaches. *Applied Water Science*, 12, 244.
- Minhas, P. S., & Gupta, R. K. (1992). *Quality of irrigation water: Assessment and management*. New Delhi, India: Indian Council of Agricultural Research.

- Minhas, P. S., & Qadir, M. (2024). Agroclimate-centric irrigation water quality guidelines. *Irrigation and Drainage*, 73, 1592–1605.
- Minhas, P. S., Qadir, M., & Yadav, R. K. (2019). Groundwater irrigation induced soil sodification and response options. *Agricultural Water Management*, 215, 74–85.
- Mishra, A. P., Khali, H., Singh, S., Pande, C. B., Singh, R., & Chaurasia, S. K. (2023). An assessment of in-situ water quality parameters and its variation with Landsat 8 Level 1 surface reflectance datasets. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*, 103(18), 6344–6366.
- Moustafa, A., Abdelwahab, O. M. M., Ricci, G. F., & Gentile, F. (2026). Internet of Things-enabled smart irrigation systems for precision water management: A systematic review. *Agricultural Water Management*, 333, 110615.
- Moxley, R. A. (2022). Enterobacteriaceae: *Escherichia*. In D. S. McVey, M. Kennedy, M. M. Chengappa, & R. Wilkes (Eds.), *Veterinary microbiology* (1st ed., pp. 56–74). Hoboken, NJ: Wiley.
- Muniz, G. L., Oliveira, A. L. G., Benedito, M. G., Cano, N. D., Camargo, A. P. D., & Silva, A. J. D. (2023). Risk evaluation of chemical clogging of irrigation emitters via geostatistics and multivariate analysis in the northern region of Minas Gerais, Brazil. *Water*, 15(4), 790.
- Nikolaou, G., Neocleous, D., Christou, A., Kitta, E., & Katsoulas, N. (2020). Implementing sustainable irrigation in water-scarce regions under the impact of climate change. *Agronomy*, 10(8), 1120.
- Oster, J. D., Quinn, N. W. T., Daigh, A. L. M., & Scudiero, E. (2022). Agricultural subsurface drainage water. In M. Qadir, V. Smakhtin, S. Koo-Oshima, & E. Guenther (Eds.), *Unconventional water resources* (pp. 157–198). Cham, Switzerland: Springer International Publishing.
- Paliwal, K. V. (1972). *Irrigation with saline water*. New Delhi, India: Water Technology Centre, Indian Agricultural Research Institute.
- Pan, S. Y., Syu, W. J., Chang, T. K., & Lee, C. H. (2020). A multiple model approach for evaluating the performance of time-lapse capsules in trapping heavy metals from water bodies. *RSC Advances*, 10(28), 16490–16501.
- Park, D. M., McCarty, L. B., & White, S. A. (2016). *Interpreting irrigation water quality reports*. Clemson, SC: Clemson University.

- Petit, J., García, S. M., Molle, B., Bendoula, R., & Ait-Mouheb, N. (2022). Methods for drip irrigation clogging detection, analysis and understanding: State of the art and perspectives. *Agricultural Water Management*, 272, 107873.
- Plaut, Z., Edelstein, M., & Ben-Hur, M. (2013). Overcoming salinity barriers to crop production using traditional methods. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 32(4), 250–291.
- Qadir, M., & Oster, J. D. (2004). Crop and irrigation management strategies for saline-sodic soils and waters aimed at environmentally sustainable agriculture. *Science of the Total Environment*, 323, 1–19.
- Qadir, M., Schubert, S., Oster, J. D., Sposito, G., Minhas, P. S., Cheraghi, S. A. M., ... Saqib, M. (2018). High-magnesium waters and soils: Emerging environmental and food security constraints. *Science of the Total Environment*, 642, 1108–1117.
- Rawat, K. S., Singh, S. K., & Gautam, S. K. (2018). Assessment of groundwater quality for irrigation use: A peninsular case study. *Applied Water Science*, 8, 233.
- Rengasamy, P. (2010). Soil processes affecting crop production in salt-affected soils. *Functional Plant Biology*, 37, 613–620.
- Rhoades, J. D., Kandiah, A., & Mashali, A. M. (1992). *The use of saline waters for crop production* (FAO Irrigation and Drainage Paper No. 48). Rome, Italy: Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Richards, L. A. (Ed.). (1954). *Diagnosis and improvement of saline and alkali soils* (USDA Agriculture Handbook No. 60). Washington, DC: United States Department of Agriculture.
- Saffan, M. M., Koriem, M. A., El-Henawy, A., El-Mahdy, S., El-Ramady, H., Elbehiry, F., ... Prokisch, J. (2022). Sustainable production of tomato plants (*Solanum lycopersicum* L.) under low-quality irrigation water as affected by bio-nanofertilizers of selenium and copper. *Sustainability*, 14(6), 3236.
- Schomberg, A. C., Bringezu, S., & Beusen, A. W. H. (2023). Water quality footprint of agricultural emissions of nitrogen, phosphorus and glyphosate associated with German bioeconomy. *Communications Earth & Environment*, 4, 404.
- Shemer, H., Wald, S., & Semiat, R. (2023). Challenges and solutions for global water scarcity. *Membranes*, 13(6), 612.
- Shen, Y., Puig-Bargués, J., Li, M., Xiao, Y., Li, Q., & Li, Y. (2022). Physical, chemical and biological emitter clogging behaviors in drip irrigation systems using high-sediment loaded water. *Agricultural Water Management*, 270, 107738.

- Singh, A. (2017). Waterlogging and salinity management for sustainable irrigated agriculture. II: Engineering measures and biodrainage. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 143, 04017036.
- Singh, D., Patel, N., Singh, N., Rosin, K., Yadav, D., Singh, S., ... Kumar, M. (2021). Emitter clogging and hydraulic performance of drip system under different water qualities and placement techniques. *Food Science and Engineering*, 2(2), 98–111.
- Smith, V. H., Tilman, G. D., & Nekola, J. C. (1999). Eutrophication: Impacts of excess nutrient inputs on freshwater, marine, and terrestrial ecosystems. *Environmental Pollution*, 100, 179–196.
- Srivastava, N. (2020). Reclamation of saline and sodic soil through phytoremediation. In V. Shukla & N. Kumar (Eds.), *Environmental concerns and sustainable development: Volume 2. Biodiversity, soil and waste management* (pp. 279–306). Singapore: Springer.
- Suvendran, S., Johnson, D., Acevedo, M., Smithers, B., & Xu, P. (2024). Effect of irrigation water quality and soil compost treatment on salinity management to improve soil health and plant yield. *Water*, 16(10), 1391.
- Szabolcs, I., & Darab, C. (1964). The influence of irrigation water of high sodium carbonate content on soils. In *Proceedings of the 8th International Congress of Soil Science* (Vol. 2, pp. 802–812). Bucharest, Romania: International Society of Soil Science.
- Tahat, M. M., Alananbeh, K., Othman, Y., & Leskovar, D. I. (2020). Soil health and sustainable agriculture. *Sustainability*, 12(12), 4859.
- van Weert, F., & van der Gun, J. (2012). *Saline and brackish groundwater at shallow and intermediate depths: Genesis and worldwide occurrence*. Paper presented at the 39th IAH Congress, Niagara Falls, Canada.
- Vranešević, M., Meseldžija, M., Grabić, J., Zemunac, R., & Boukalova, Z. (2025). Irrigation water quality in a framework of Sustainable Development Goal 6: A review of challenges, impacts, policy alignments. *Frontiers in Agronomy*, 7, 1580338.
- Wang, Y.-B., Junaid, M., Deng, J.-Y., Tang, Q.-P., Luo, L., Xie, Z.-Y., & Pei, D.-S. (2024). Effects of land use patterns on seasonal water quality at multiple spatial scales in the Jialing River, Chongqing, China. *Catena*, 234, 107646.
- Wilcox, L. V. (1955). *Classification and use of irrigation waters* (USDA Circular No. 969). Washington, DC: U.S. Department of Agriculture.

- Xing, S., Du, K., Liu, N., Li, M., Wen, Y., Juana, L., ... Wang, Z. (2025). Effect of dynamic pressure on emitter clogging in drip irrigation system: The perspective of multiple fouling. *Agricultural Water Management*, 320, 109837.
- Zhang, H., Chang, D., Zhu, Z., Meng, C., & Wang, K. (2024). Soil priming effects and involved microbial community along salt gradients. *Biogeosciences*, 21, 1–11.
- Zhang, J., Guan, K., Peng, B., Pan, M., Zhou, W., Jiang, C., ... Miner, G. L. (2021). Sustainable irrigation based on co-regulation of soil water supply and atmospheric evaporative demand. *Nature Communications*, 12, 5549.
- Zhao, A., Sun, J., & Liu, Y. (2023). Understanding bacterial biofilms: From definition to treatment strategies. *Frontiers in Cellular and Infection Microbiology*, 13, 1137947.
- Zhou, S., Wang, G., Han, Q., Zhang, J., Dang, H., Ning, H., ... Sun, J. (2024). Long-term saline water irrigation affected soil carbon and nitrogen cycling functional profiles in the cotton field. *Frontiers in Microbiology*, 15, 1310387.