

İKLİM DEĞİŞİKLİĞİNE UYUMLU SÜRDÜRÜLEBİLİR VE DİRENÇLİ TARIMSAL ÜRETİM SENARYOLARI

EDİTÖRLER

Prof. Dr. Vedat BEYYAVAŞ

Prof. Dr. Erdal SAKİN

Prof. Dr. Ahmet ÇELİK



İKSAD
Publishing House

İKLİM DEĞİŞİKLİĞİNE UYUMLU SÜRDÜRÜLEBİLİR VE DİRENÇLİ TARIMSAL ÜRETİM SENARYOLARI

EDİTÖRLER

Prof. Dr. Vedat BEYYAVAŞ

Prof. Dr. Erdal SAKİN

Prof. Dr. Ahmet ÇELİK

YAZARLAR:

Prof. Dr. Ahmet YILMAZ

Prof. Dr. Ali Fuat TARI

Prof. Dr. Ali Rıza ÖZTÜRKMEN

Prof. Dr. Erdal SAKİN

Doç. Dr. Cevher İlhan CEVHERİ

Doç. Dr. Hüseyin ARSLAN

Dr.Öğr.Üyesi Asuman BÜYÜKKILIÇ YANARDAĞ

Dr. Öğr. Üyesi Hülya SAYGI

Dr. Öğr. Üyesi İbrahim Halil YANARDAĞ

Dr. Öğr. Üyesi Muzaffer KIRPIK

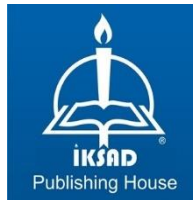
Dr. Öğr. Üyesi Sabri AKIN

Öğrt. Gör. Dr. Mustafa Cemil BÜYÜKKILIÇ

Arş. Gör. Dr. Ferhat UĞURLAR

Arş. Gör. Abdullah ATUM

Doktora Öğrencisi Mehmet AKYOL



Copyright © 2025 by iksad publishing house
All rights reserved. No part of this publication may be reproduced, distributed or
transmitted in any form or by
any means, including photocopying, recording or other electronic or mechanical
methods, without the prior written permission of the publisher, except in the case of
brief quotations embodied in critical reviews and certain other noncommercial uses
permitted by copyright law. Institution of Economic Development and Social
Researches Publications®

(The Licence Number of Publicator: 2014/31220)

TÜRKİYE TR: +90 342 606 06 75

USA: +1 631 685 0 853

E mail: iksadyayinevi@gmail.com

www.iksadyayinevi.com

It is responsibility of the author to abide by the publishing ethics rules.

Iksad Publications – 2025©

ISBN: 978-625-378-458-4

Cover Design: İbrahim KAYA

December / 2025

Ankara / Türkiye

Size: 16x24cm

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ

Prof. Dr. Vedat BEYYAVAŞ

Prof. Dr. Erdal SAKİN

Prof. Dr. Ahmet ÇELİK.....1

TÜRKÇE BÖLÜMLER

BÖLÜM 1

BİYOKÖMÜR UYGULAMALARININ TOPRAĞIN FİZİKSEL, KİMYASAL VE BİYOLOJİK ÖZELLİKLERİ ÜZERİNE ETKİLERİ

Dr. Öğrt. Üyesi Asuman BÜYÜKKILIÇ YANARDAĞ

Dr. Öğrt. Üyesi İbrahim Halil YANARDAĞ

Prof. Dr. Erdal SAKİN

Öğrt. Gör. Dr. Mustafa Cemil BÜYÜKKILIÇ

Arş.Gör. Abdullah ATUM.....3

BÖLÜM 2

İKLİM DEĞİŞİKLİĞİNE UYUMDA YÜZEY ALTI DAMLA SULAMA SİSTEMLERİNİN ROLÜ

Prof. Dr. Ali Fuat TARI

Dr. Öğr. Üyesi Sabri AKIN.....35

BÖLÜM 3

YENİ STRATEJİ; İKLİM DİRENÇLİ PAMUK TARIMI

Doç. Dr. Cevher İlhan CEVHERİ.....61

BÖLÜM 4

İKLİM DEĞİŞİKLİĞİ VE TARIMIN GELECEĞİ

Prof. Dr. Ali Rıza ÖZTÜRKMEN.....59

BÖLÜM 5

AGRİVOLTAİK SİSTEMLER VE TARIMSAL ÜRETİM

Arş. Gör. Dr. Ferhat UĞURLAR.....83

BÖLÜM 6

AZALAN YAĞIŞ KOŞULLARINDA BAKLAGİL ÜRETİMİNDE SÜRDÜRÜLEBİLİR SULAMA STRATEJİLERİ

Dr. Öğr. Üyesi Sabri AKIN

Prof. Dr. Ali Fuat TARI.....103

BÖLÜM 7

İKLİM DEĞİŞİKLİĞİ VE AKDENİZ BÖLGESİ TARIMSAL ÜRETİMDE YENİ BİTKİSEL ÜRETİM DESENİ

Dr. Öğr. Üyesi Hülya SAYĞI121

BÖLÜM 8

ARTAN SICAKLIKLARIN *Chrysoperla Carnea*'nın YAŞAM DÖNGÜSÜ VE BİYOLOJİK MÜCADELE POTANSİYELİ ÜZERİNE ETKİLERİ

Doktora Öğrencisi Mehmet AKYOL.....137

BÖLÜM 9

BİBERİYENİN (*Rosmarinus officinalis* L.) KURAKLIK STRESİ KOŞULLARINA UYUMU VE SÜRDÜRÜLEBİLİRLİĞİ

Dr. Öğrt. Üyesi Muzaffer KIRPIK.....155

BÖLÜM 10

İKLİM-TARIMSAL ÜRETİM VE KURAKLIK STRESİ

Doç. Dr. Hüseyin ARSLAN.....173

BÖLÜM 11

KURAKLIKLA MÜCADELEDE SU KAYNAKLARININ KORUNMASI VE AKILLI SULAMA SİSTEMLERİ

Prof. Dr. Ali Rıza ÖZTÜRKMEN.....187

BÖLÜM 12

İKLİM DEĞİŞİKLİĞİNE KARŞI KARBON TARIMI

Dr. Öğr. Üyesi. Hülya SAYĞI.....209

BÖLÜM 13

**DİJİTAL TEKNOLOJİLERLE KURAKLIK STRESİ İZLEME
YAKLAŞIMLARI**

Arş. Gör. Dr. Ferhat UĞURLAR.....225

ENGLISH CHAPTERS

CHAPTER 1

POTENTIAL EFFECTS OF CLIMATE CHANGE ON COTTON

Prof. Dr. Ahmet YILMAZ.....245

ÖNSÖZ

İklim değışikliğı ile ilgili söylemler yada iklim değışikliğinin nedenleri ve bu konuyla ilgili ilk araştırmaların yapıldığı süreçten günümüze ne değışti? Neler yapıldı? Bu soruların cevabı uzun yıllar boyunca hak ettiğı yanıtları bulamadı. Bu ilgisizliğın ve gecikmenin ardında ise insanlığın bitmek bilmeyen tüketim hırısı, doğal kaynakların hoyratça kullanımı ve ekosistemler üzerindeki artan baskılar yer alıyor. Dünyanın karşı karşıya kaldığı kaynak israfı, doğal varlıklar üzerindeki yoğun baskılar ve çevresel tahribat, yalnızca iklim krizinin itici gücü değil, aynı zamanda bu sorulara geç kalınmasının da en açık göstergesidir. Birçok iklim değışikliğı senaryoları bağlamında, tarımsal üretim sistemlerinin hem öngörülemeyen iklim değışikliğı hem de hayati derecede doğal varlıkların kıtlığı nedeniyle ciddi tehdit altındadır. Artan küresel nüfusa karşı gıda taleplerini karşılamak için üretim verimliliğini artırmak ve olumsuz iklim etkilerini hafifletmek acil bir zorunluluk haline gelmiştir. Yapılan tarımsal faaliyetlerde önümüze çıkan en belirgin zorluklar, düşük düzeyde toprak organik maddesi, artan yabancı ot, hastalıklar ve zararlıların istilası, suyun düşük su kullanım verimliliğı, bazı bölgelerde toprakların tuzluluk tolerans düzeyinin artması, ısı ve kuraklık stresleri, pestisit ve herbisit direncinin yaygınlaşmasıdır. Bu zorluklar ve problemler iklim değışikliğı koşulları altında toprak, su ve çevrenin bozunuma uğramasına yol açmadan mevcut tarım sistemlerinin üretimini sürdürülebilir bir şekilde yönetmek büyük bir zorluktur. Bu nedenle, iklim değışikliğıne dayanıklı teknolojilerin ve sürdürülebilir yönetim stratejilerinin benimsenmesi kritik öneme sahiptir. Dirençli tarımsal üretim senaryolarını gerçekleştirmek için ağırlıklı olarak verimi artırırken çevresel bozulmayı minimize etme potansiyeli taşımak durumundadır. Bu bağlamda, koruyucu toprak işleme, ürün rotasyonu, örtü bitkileri, organik gübre kullanımı, entegre zararlı yönetimi, genetik ıslah, su tasarrufu teknikleri ve hassas tarım teknolojileri (GPS, GIS, uzaktan algılama, modelleme) tarımsal üretimi artırırken çevresel etkileri azaltabilecek önemli alternatifler arasında yer almaktadır.

İklim değışikliğı sürecinde tarım, gezegenin geleceğini belirleyen en stratejik alanlardan biridir. Artan riskler karşısında sürdürülebilir tarım uygulamalarını benimsemek artık bir tercih değil, hem gıda güvenliği hem de ekosistemlerin devamı için zorunluluktur. Toprağı, suyu ve biyolojik çeşitliliğı

koruyan her adım, yalnızca bugünün değil, yarının dünyasını da güvence altına alan kritik bir sorumluluktur. Tarımın dönüşümü, iklim krizine karşı insanlığın en güçlü savunma hattıdır.

Bu anlamda yazarlarımızın değerli katkılarıyla hazırlamış oldukları bölümlerde, iklim değişikliği koşullarında tarım sistemlerini güçlendirecek ve bu koşullara adaptasyon sağlamış yeni stratejilerin kapsamlı bir değerlendirmesi sunulmuştur.

Aralık-2025

Prof. Dr. Vedat BEYYAVAŞ

Prof. Dr. Erdal SAKİN

Prof. Dr. Ahmet ÇELİK

BÖLÜM 1

BİYOKÖMÜR UYGULAMALARININ TOPRAĞIN FİZİKSEL, KİMYASAL VE BİYOLOJİK ÖZELLİKLERİ ÜZERİNE ETKİLERİ

Dr. Öğrt. Üyesi Asuman Büyükkılıç YANARDAĞ^{1*}

Dr. Öğrt. Üyesi İbrahim Halil YANARDAĞ¹

Prof. Dr. Erdal SAKİN²

Öğrt. Gör. Dr. Mustafa Cemil BÜYÜKKILIÇ³

Arş.Gör. Abdullah ATUM¹

DOI: <https://www.doi.org/10.5281/zenodo.17966495>

¹Malatya Turgut Özal Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Toprak Bilimi ve Bitki Besleme Bölümü, Malatya, Türkiye, Orcid Asuman Büyükkılıç Yanardağ: 0000-0003-3236-2022, Orcid İbrahim Halil Yanardağ: 0000-0003-3258-9600, Orcid Abdullah Atun: 0009-0007-4747-4501, asuman.yanardag@ozal.edu.tr

²Harran Üniversitesi, Ziraat Fakültesi Toprak Bilim ve Bitki Besleme Bölümü, Şanlıurfa, Türkiye, esakin@harran.edu.tr, <https://orcid.org/0000-0001-5403-4247>

³Harran Üniversitesi, Teknik Bilimler MYO, Şanlıurfa, Türkiye. Orcid:0000-0002-5508-0672

*Sorumlu Yazar: asuman.yanardag@ozal.edu.tr

1. Giriş

Toprak, yalnızca bitkilerin köklerini tutan pasif bir ortam değil; su, hava, mineral madde, organik madde ve canlı organizmaların etkileşim halinde bulunduğu dinamik bir sistemdir. Bu sistem; besin döngülerinin yürütülmesi, karbon depolanması, su filtrasyonu, biyolojik çeşitliliğin barındırılması ve gıda güvenliğinin sağlanması gibi çok sayıda ekosistem hizmetini yerine getirmektedir (Smith vd., 2015). Ancak son yüzyılda hızlanan nüfus artışı, tarım alanlarının genişlemesi, yanlış gübreleme ve sulama uygulamaları, yoğun toprak işleme, monokültür üretim ve iklim değişikliğine bağlı ekstrem olaylar, toprakların fiziksel, kimyasal ve biyolojik dengesini ciddi biçimde bozmuştur (Jahangir vd., 2019).

Toprak organik maddesindeki azalma, agregat stabilitesinin zayıflaması, erozyonun hızlanması, toprak sıkışması, asitleşme veya tuzluluk, besin elementlerinin dengesizliği ve toksik element birikimi, birçok tarım alanında verim düşüşünün temel nedenleri arasında yer almaktadır. Bu sorunlar yalnızca verim kaybı ile sınırlı kalmamakta; su kaynaklarının kirlenmesi, sera gazı emisyonlarının artması ve biyolojik çeşitliliğin azalması gibi daha geniş ölçekli çevresel etkiler de ortaya çıkarmaktadır. Dolayısıyla toprak yönetiminde klasik yaklaşımların ötesine geçilerek, hem toprak kalitesini artıran hem de çevresel sürdürülebilirliği destekleyen yeni stratejilerin geliştirilmesi zorunlu hâle gelmiştir.

Bu bağlamda biyokömür, son yıllarda hem bilimsel literatürde hem de uygulamalı tarım pratiklerinde dikkat çeken önemli bir toprak düzenleyicisi olarak öne çıkmaktadır (Xiao vd., 2018). Biyokömür; odunsu materyaller, tarımsal atıklar, hayvansal gübreler veya organik artıklar gibi çeşitli biyokütlelerin oksijensiz ortamda yüksek sıcaklıkta piroliz edilmesi ile elde edilmektedir (Mukherjee vd., 2022). Piroliz süreci sonucunda, uçucu bileşenlerin önemli bir kısmı uzaklaştırılmakta, karbonun büyük bölümü ise aromatik yapıda ve oldukça stabil bir formda biyokömür içerisinde tutulmaktadır. Bu özellik, biyokömürü hem uzun süreli karbon depolama aracı hem de toprağın fiziksel ve kimyasal özelliklerini kalıcı olarak iyileştirebilen bir materyal hâline getirmektedir (Zornoza vd., 2016).

Biyokömürün topraklara uygulanması ile su tutma kapasitesinin artması, kütle yoğunluğunun azalması, agregat stabilitesinin iyileşmesi ve erozyon riskinin düşmesi gibi fiziksel iyileşmeler sağlanabilmektedir (Nepal vd., 2023).

Kimyasal açıdan bakıldığında, biyokömür toprağın pH'ını düzenleyebilmekte, kation değişim kapasitesini artırabilmekte, makro ve mikro besin elementlerinin tutulmasını desteklemekte ve bazı toksik metallerin biyoyararlanabilirliğini azaltabilmektedir .(Hafeez vd., 2022). Biyolojik boyutta ise biyokömür, mikrobiyal habitat koşullarını iyileştirerek mikroorganizma çeşitliliğini ve aktivitesini artırmakta; enzimatik süreçleri canlandırmakta ve bitki–mikroorganizma etkileşimlerini olumlu yönde etkileyebilmektedir (Bolan vd., 2023).

Ne var ki biyokömürün toprak üzerindeki etkileri her zaman tek yönlü ve her koşulda olumlu değildir. Kullanılan hammadde türü, piroliz sıcaklığı ve süresi, biyokömürün uygulama dozu, toprak tipi ve iklim koşulları gibi faktörler, elde edilen sonuçlar üzerinde belirleyici olmaktadır (Zornoza vd., 2016). Yanlış doz veya uygunsuz biyokömür tipi, özellikle bazı hafif tekstürlü topraklarda hidrofobiklik, besin dengesizlikleri ya da istenmeyen pH değişimleri gibi olumsuzluklara da yol açabilmektedir (Lin vd., 2024). Bu nedenle biyokömürün “her derde deva” bir materyal olarak değil, belirli sınırlar ve bilimsel temeller çerçevesinde değerlendirilmesi gerekmektedir.

Bu kitap bölümünün amacı, biyokömürün tanımı ve üretim süreçlerini özetledikten sonra, toprağın fiziksel, kimyasal ve biyolojik özellikleri üzerine etkilerini bütüncül bir bakış açısıyla irdelemektir. Ayrıca biyokömür uygulamalarının sınırlılıkları, pratikte karşılaşılan zorluklar ve geleceğe yönelik araştırma alanları da tartışılarak, bu teknolojinin sürdürülebilir toprak yönetimindeki potansiyeli değerlendirilmiştir.

2. Biyokömürün Tanımı ve Üretimi

Biyokömür (biochar), organik kökenli biyokütlenin oksijensiz veya çok düşük oksijenli bir atmosferde yüksek sıcaklıkta piroliz edilmesiyle elde edilen, karbon açısından zengin ve kimyasal olarak oldukça stabil bir materyaldir (Li ve Tasnady, 2023). Piroliz sürecinde biyoküttele bulunan uçucu bileşiklerin büyük bölümü uzaklaşırken, geride aromatik karbon yapıları baskın olan ve bozunmaya karşı dirençli bir katı ürün kalır (Khadem ve Raiesi, 2017). Bu özellik, biyokömürü hem uzun süreli karbon sekestrasyonu hem de toprak iyileştirme uygulamaları için uygun hâle getirir (Kocsis vd., 2022).

2.1. Biyokömürün Tanımı ve Temel Özellikleri

Biyokömür, yüksek yüzey alanı, gelişmiş mikro–makro gözenekli yapısı, yüzey fonksiyonel gruplarındaki çeşitlilik, yüksek karbon içeriği ve çoğu durumda alkalın karakteri nedeniyle toprak fiziksel, kimyasal ve biyolojik süreçleri çok yönlü olarak etkiler (Bolan vd., 2023). Toprağa uygulandığında su tutma kapasitesinin artmasından pH düzenlenmesine, besin elementlerinin tutulmasından mikrobiyal habitat genişlemesine kadar pek çok işlev üstlenir.

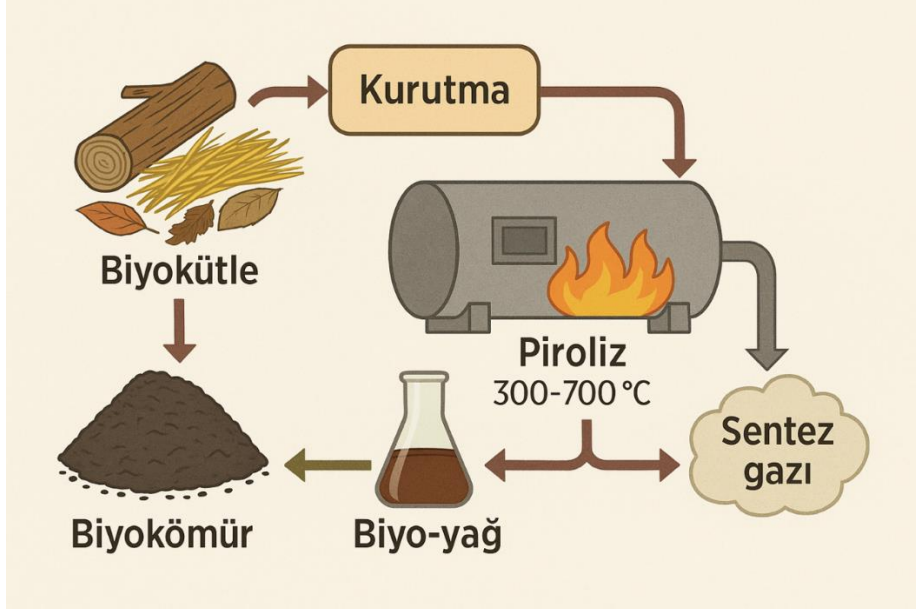
Bu işlevsellik büyük ölçüde bazı faktörlerden kaynaklanır. Aromatik karbon yapıların yüksek oranı, kimyasal stabilite sağlar. Geniş yüzey alanı, besin adsorpsiyonunu, su tutmayı ve mikrobiyal yerleşimi kolaylaştırır. Gözenek yapısı, hem suyu hem mikroorganizmayı barındırabilecek mikrohabitatlar oluşturur. Fonksiyonel yüzey grupları, KDK'yi artırır, metal iyonlarını bağlar, organik molekülleri adsorbe eder. Biyokömür bu nedenle hem bir toprak iyileştiricisi hem de karbon yutağı olarak değerlendirilir.

2.2. Piroliz Süreci ve Mekanizması

Piroliz, biyokömürün oluşumunda temel süreç olup, organik hammaddenin oksijensiz veya düşük oksijenli bir ortamda kontrollü biçimde ısıtılmasıyla gerçekleşir (Chen vd., 2022). Bu süreçte biyokütle içerisinde yer alan selüloz, hemiselüloz ve lignin gibi polimer yapılar sıcaklığın artmasına bağlı olarak parçalanır (Mukherjee vd., 2022). İlk aşamada materyal, 100–200 °C arasında nemini kaybeder ve bu dehidrasyon evresi biyokütlenin pirolize hazırlanmasını sağlar (Syguła vd., 2024). Sıcaklık 200–400 °C aralığına ulaştığında hemiselüloz ve selüloz fraksiyonlarının termal bozulması hızlanır; uçucu organik bileşikler, organik asitler ve katran benzeri maddeler ortamdan uzaklaşır. Pirolizin ilerleyen aşamalarında, özellikle 400–700 °C arasında lignin komplekslerinin aromatik halkalara dönüşmesiyle biyokömürün kimyasal olarak dayanıklı yapısı şekillenmeye başlar. Sürecin sonunda, uçucu bileşiklerin büyük bölümü ayrılmış, karbon yoğunluğu artmış ve aromatik yapı baskın hâle gelmiş stabil bir katı ürün olan biyokömür oluşur (Chen vd., 2022). Bu mekanizma, biyokömürün diğer organik maddelere kıyasla çok daha uzun süre toprakta kalabilen kalıcı bir karbon formu olmasının temel nedenidir (Şekil 1.)(Syguła vd., 2024).

Piroliz, organik materyalin ısıtılmasıyla gerçekleşen ve üç ana ürün ortaya çıkaran termokimyasal bir süreçtir (Fawzy vd., 2021). Birinci katı ürün

olan biyokömürdür, ikinci sıvı ürün olan piroliz yağıdır (bio-oil), ve üçüncü gaz ürün olan sentez gazıdır (syngas).



Şekil 1. Biyokömür üretim şeması

Bu süreçte biyokütlede bulunan selüloz, hemiselüloz ve lignin gibi organik polimerler sıcaklığın artmasıyla parçalanır; oksijenli fonksiyonel grupların çoğu kaybolur ve geride karbon açısından zengin, aromatik bir yapı kalır (Osman vd., 2023). Piroliz mekanizması 3 aşamada işler (Syguła vd., 2024). İlk aşama dehidrasyon (100–200 °C) aşaması biyokütlenin fiziksel olarak su kaybetmesidir. İkinci aşama termal parçalanma (200–400 °C) aşaması selüloz ve hemiselülozun parçalanması ve uçucu bileşiklerin hızla uzaklaşmasıdır. Üçüncü aşama ise aromatikleşme ve karbonizasyon (400–700 °C) aşaması buda ligninin parçalanması ve aromatik halka yapılarının oluşmasıdır. Bu aşama biyokömürün kararlılığını, yüzey alanını ve pH özelliklerini belirler.

2.3. Piroliz Sıcaklığının Biyokömür Özelliklerine Etkisi

Piroliz sıcaklığı, biyokömürün yapısal ve kimyasal karakterini belirleyen en önemli faktörlerden biridir (Beusch, 2021). Daha düşük sıcaklıklarda, yani

300–450 °C aralığında üretilen biyokömürler genellikle daha yüksek uçucu madde içerir (Albalasmeh vd., 2024) ve bünyelerinde azot, fosfor gibi besin maddeleri daha iyi korunur. Bu nedenle düşük sıcaklık piroliz ürünleri bitki besleme açısından daha zengin olmakla birlikte, aromatik karbon oranlarının daha düşük olması nedeniyle kimyasal stabilite sınırlıdır (Roshan vd., 2023). Buna karşılık yüksek sıcaklıklarda (500–700 °C) üretilen biyokömürler, daha geniş bir yüzey alanına (Beusch, 2021) , daha gelişmiş bir gözenek yapısına (Albalasmeh vd., 2024) ve çok daha yüksek karbon stabilitesine sahiptir (Roshan vd., 2023). Sıcaklık arttıkça biyokömürün pH'ı çoğunlukla yükselir (Kayalıoğlu vd., 2020) oksijenli, oksijenli fonksiyonel grupların sayısı azalır (Roshan vd., 2023) ve karbon yapısı çok daha aromatik ve dirençli hâle gelir. Bu nedenle yüksek sıcaklık biyokömürleri uzun dönemli karbon depolama (Beusch, 2021) ve toprak fiziksel özelliklerinin iyileştirilmesi açısından daha etkili görülürken (Albalasmeh vd., 2024), besince zengin formülasyonlar için daha düşük sıcaklık pirolizi tercih edilebilir (Roshan vd., 2023).



Şekil 2. Piroliz Sıcaklığının Biyokömür Özelliklerine Etkisi

Sıcaklık, biyokömürün karakterini belirleyen en kritik parametrelerden biridir (Şekil 2). Düşük sıcaklık pirolizi (300–450 °C) ile oluşturulan biyokömürün uçucu madde oranı yüksek, besin içeriği daha fazla (N, P, K korunur), daha düşük karbon stabilitesi ve daha fazla oksijenli fonksiyonel gruba sahiptir. Bu tip biyokömür besince zengin, ancak daha az stabil

olduğundan toprakta hızlı etkileşim oluşturur (Roshan vd., 2023). Yüksek sıcaklık pirolizi (500–700 °C) ile oluşturulan biyokömürün aromatik karbon oranı yüksek, pH daha yüksek, yüzey alanı ve gözenek miktarı artmış, KDK potansiyeli daha büyük ve çok uzun ömürlü karbon yapısına sahiptir. Bu tip biyokömür karbon depolama ve toprak fiziksel iyileştirme için daha uygundur (Albalasmeh vd., 2024).

2.4. Hammadde Türlerinin Biyokömür Özelliklerine Etkisi

Biyokömürün özellikleri yalnızca piroliz sıcaklığına değil, kullanılan hammadde türüne de büyük ölçüde bağlıdır (Hassan vd., 2020). Odunsu materyaller, yüksek lignin içerikleri ve düşük kül oranları nedeniyle genellikle daha kararlı, yüksek karbon içerikli ve yapısal olarak güçlü biyokömürlere dönüşür (Fawzy vd., 2021). Bu tip biyokömürler ağır bünyeli toprakların fiziksel olarak iyileştirilmesi veya uzun dönemli karbon depolama hedefleri için uygundur (Ippolito vd., 2020). Tarımsal atıklar –örneğin mısır sapı, buğday samanı ya da pirinç kabuğu gibi materyaller– daha yüksek mineral içeriğine sahip olmaları nedeniyle biyokömüre daha fazla besin elementi kazandırabilir (Paiva vd., 2024). Pirinç kabuğundan elde edilen biyokömürün yüksek silisyum içeriği buna iyi bir örnektir (Tu vd., 2022). Hayvansal gübre kökenli biyokömürler ise özellikle kalsiyum ve fosfor açısından zengindir (Freitas vd., 2020); bu nedenle bu biyokömürlerin pH düzenleme kapasiteleri daha belirgin olabilir (Ippolito vd., 2020). Gıda atıkları gibi heterojen hammaddelerden elde edilen biyokömürler ise içerik bakımından çeşitlilik gösterebilir ve üretim süreçlerinde daha dikkatli kontrol gerektirir (López-Cano vd., 2018). Sonuç olarak, hangi biyokömürün hangi toprak koşullarında daha etkili olacağı, hammaddenin kimyasal bileşimi, kül oranı, mineral içeriği ve organik yapı özellikleriyle yakından ilişkilidir (Bednik vd., 2022).



Şekil 3. Hammadde Türlerinin Biyokömür Özelliklerine Etkisi

Kullanılan biyokütle, biyokömürün hem yapısal hem kimyasal özelliklerini belirleyen temel unsurdur (Şekil 3.). Odunsu materyal (çam, meşe, kavak vb.) kullanılan biyokütle yüksek karbon içeriği sahip, alkali karakterli, daha kararlı yapıda ve düşük kül içeriğine sahiptir. Avantajları ise bunlar fiziksel iyileştirme ve karbon depolamada en etkili biyokömürlerdir (Fawzy vd., 2021). Tarımsal atıklar (mısır sapı, buğday samanı, pirinç kabuğu vb.)dan üretilen biyokömürün mineral içeriği daha yüksek, silisyum gibi spesifik elementlerce zengin, toprak besin içeriğini artırabilir niteliktedir. Avantajları ise bitki besleme yönlerinin güçlü olmasıdır (López-Cano vd., 2018). Hayvansal gübre ve organik artıklardan üretilen biyokömür P ve Ca açısından zengindir ve pH yükseltici etkisi daha belirgindir. Avantajları ise asidik toprakları düzeltmede etkilidir (Ippolito vd., 2020). Gıda atıklarından üretilen

biyokömür heterojen yapıya sahiptir, , organik bileşiklerce zengindir. Depolama ve hijyen açısından daha dikkatli süreçler gerektirir (López-Cano vd., 2018).

2.5. Biyokömürün Fiziksel ve Kimyasal Özelliklerinin Oluşumu

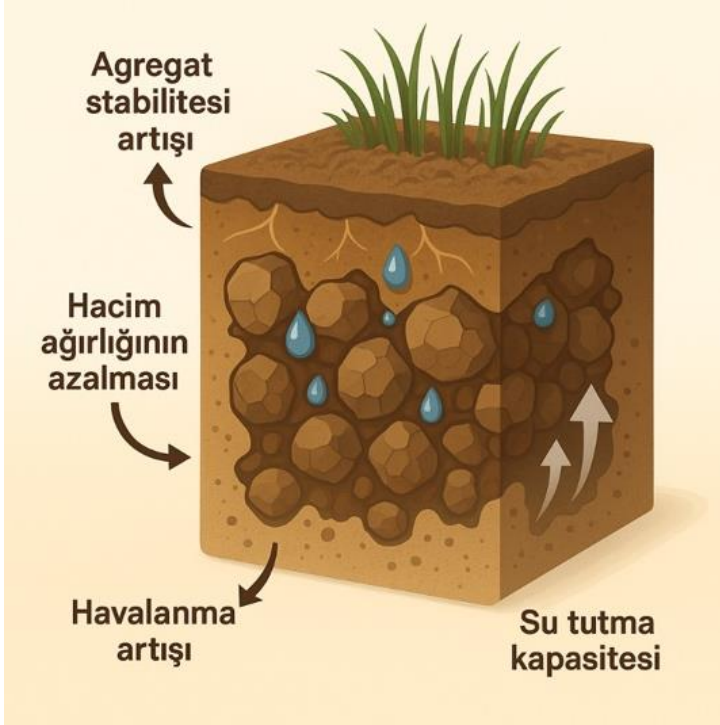
Piroliz sürecinin ilerlemesiyle birlikte biyokömürün fiziksel ve kimyasal özellikleri hammadde ve sıcaklık koşullarına bağlı olarak şekillenir (Ferraro vd., 2021;). Gözenekli yapı, piroliz sırasında uçucu bileşiklerin uzaklaşmasıyla ortaya çıkar ve bu yapı biyokömüre yüksek yüzey alanı sağlar (Hafeez vd., 2022). Bu geniş yüzey alanı, suyun adsorpsiyonu, besin elementlerinin tutulumu ve mikroorganizmaların barınması açısından kritik öneme sahiptir. Kimyasal açıdan ise piroliz sıcaklığı arttıkça biyokömürün karbon yapısı daha aromatik hâle gelir, hidrojen ve oksijen oranı azalır ve böylece kimyasal stabilite artar (Tomczyk vd., 2020). Ayrıca, potasyum, kalsiyum, magnezyum gibi mineral elementler kül formunda biyokömürde yoğunlaşarak çoğu biyokömüre alkalın bir pH kazandırır (Nan vd., 2020). Yüzeydeki karboksil, fenolik ve hidroksil grupları ise biyokömürün katyon değişim kapasitesini belirleyen unsurlardır (Abdelhafez ve Abbas, 2020). Bu fonksiyonel gruplar özellikle düşük ve orta sıcaklıklarda daha fazla bulunurken, yüksek sıcaklıklarda aromatikleşmenin artmasıyla bir miktar azalabilir (Rizwan vd., 2023). Bu nedenle biyokömürün toprakta gösterdiği etkiler, bu fiziksel ve kimyasal özelliklerin birleşimi ile belirlenir ve her biyokömürün farklı topraklar üzerinde farklı etki mekanizmaları geliştirmesi mümkündür (Kalina vd., 2022).

3. Toprağın Fiziksel Özellikleri Üzerindeki Etkileri

Toprağın fiziksel özellikleri, bitkilerin suya, havaya ve besin maddelerine erişimini belirlediği için tarımsal üretimin temel bileşenlerinden biridir (Şekil 4.). Erozyon, organik madde kaybı ve yoğun toprak işleme gibi etkenler, bu özelliklerin zaman içinde bozulmasına yol açarak verimliliği azaltır. Biyokömür uygulamaları ise toprak yapısını dönüştürme potansiyeline sahip olup, fiziksel özelliklerin iyileştirilmesinde çok yönlü bir rol üstlenmektedir (Murtaza vd., 2023). Gözenekli ve hafif yapısı sayesinde biyokömür toprağa eklendiğinde, hem mikro hem makro ölçekli fiziksel

süreçlerde iyileşme ortaya çıkar. Bu etkiler, toprağın uzun vadeli üretkenliğinin artırılması açısından önemli bir avantaj sağlar.

Biyokömürün toprak fiziksel yapısı üzerindeki en belirgin etkilerinden biri agregat stabilitesinin artırılmasıdır (Pituello vd., 2018). Toprak agregatları, mineral parçacıkların organik ve inorganik bağlayıcılarla bir arada tutulması sonucu oluşur ve toprağın erozyona karşı direncini, havalanmasını ve su hareketini doğrudan etkiler. Biyokömür parçacıkları, bu agregatları bir arada tutan çekirdek yapılar gibi davranarak, toprak tanecikleri arasında bağlanmayı güçlendirir (Liang vd., 2020). Organik yüzey fonksiyonel gruplarının yanı sıra biyokömürün gözenekli yapısı, agregatların daha stabil hâle gelmesini sağlar. Bu stabilizasyon hem rüzgâr hem su erozyonuna karşı belirgin bir direnç oluşturur. Agregat yapısının iyileşmesi, aynı zamanda toprak işlenebilirliğini artırarak bitki köklerinin daha kolay ilerlemesine ve havalanmanın doğal biçimde gelişmesine katkıda bulunur.



Şekil 4. Biyokömürün Toprağın Fiziksel Özellikleri Üzerindeki Etkileri

Biyokömürün fiziksel açıdan en çok araştırılan etkilerinden biri su tutma kapasitesinin artırılmasıdır (Acharya vd., 2024). Piroliz sürecinden kaynaklanan yüksek yüzey alanı ve çok katmanlı gözenek yapısı, biyokömürü doğal bir su rezervuarına dönüştürür (Jatav vd., 2020). Bu gözenekler, suyu hem fiziksel olarak adsorbe eder hem de toprağın suyu daha uzun süre muhafaza etmesine yardımcı olur (Wei vd., 2023). Özellikle kumlu ve düşük organik maddeli topraklarda biyokömür uygulamaları, suyun hızla süzülmesini engelleyerek kök bölgesinde daha dengeli bir nem rejimi sağlar. Böylece bitkilerin sulama ihtiyacı azalır ve kurak dönemlerde su stresine karşı dayanıklılık artar. Biyokömürün suyu tutma yeteneği, toprağın nem dalgalanmalarını yumuşatarak bitkilerin daha istikrarlı büyümesine olanak tanır.

Toprak fiziksel özellikleri açısından bir diğer önemli parametre, hava geçirgenliği ve oksijen hareketidir (Obia vd., 2018). Toprakta gaz değişimi, bitki köklerinin solunumu ve aerobik mikroorganizmaların yaşamı için kritik öneme sahiptir. Biyokömürün düşük kütle yoğunluğu ve yüksek makro gözenekliliği, toprağın gevşemesine ve daha geçirgen bir yapı kazanmasına yardımcı olur (Murtaza vd., 2023). Bu iyileşme, özellikle ağır killi topraklarda belirgindir; çünkü bu tip topraklarda su birikimi ve oksijen eksikliği bitki köklerinde stres yaratır. Biyokömür uygulamasıyla toprağın havalanma kapasitesi artar, oksijen difüzyonu hızlanır ve kök çürümesi gibi sorunların ortaya çıkma olasılığı azalır. Artan hava boşlukları, aynı zamanda suyun infiltrasyon hızını yükseltir ve yüzey akışını azaltarak suyun toprak profilinde daha etkin bir şekilde dağılmasını sağlar.

Toprak fiziksellğinde iyileşen bir başka özellik de erozyon direncidir (Wani vd., 2023). Biyokömürün hem agregat stabilitesini artırması hem de toprağın suyu tutma yeteneğini geliştirmesi, suyla taşınabilecek ince toprak fraksiyonlarının kaybını sınırlar (Sharma, 2024). Ayrıca biyokömürün toprağın organik maddesiyle etkileşime girerek agregat yapısını güçlendirmesi, rüzgâr erozyonuna karşı da koruyucu bir bariyer görevi görür. Bitki yetiştirme ortamının daha stabil hâle gelmesi, kök gelişimi için daha güvenli bir altyapı oluşturur ve bitkilerin yatma, devrilme gibi mekanik streslere karşı dayanıklılığı artar.

Biyokömürün toprağın fiziksel sıcaklık rejimi üzerine etkileri de giderek daha çok ilgi gören bir konudur (Acharya vd., 2024). Biyokömürün koyu rengi,

güneş ışığını güçlü biçimde absorbe ederek toprağın yüzey sıcaklığını hafifçe artırabilir. Bu özellik, özellikle erken ekim dönemlerinde tohum çimlenmesini hızlandırabilir ve ilk kök gelişimini teşvik edebilir. Ayrıca gözenekli yapı, toprak içerisindeki ısı transferini etkileyerek mikroklimayı daha dengeli bir seviyede tutabilir. Böylece hem aşırı ısınma hem ani sıcaklık düşüşleri hafifletilerek bitki kökleri için daha istikrarlı bir ortam sağlanmış olur.

Genel olarak değerlendirildiğinde biyokömürün toprağın fiziksel özellikleri üzerindeki etkileri, toprak-su-hava ilişkilerinin bütüncül biçimde iyileşmesine dayanır (Acharya vd., 2024). Biyokömür, agregat yapısını güçlendirir, suyun toprakta tutulmasını artırır, havalanmayı iyileştirir ve erozyon riskini düşürür. Bu süreçler birbirini destekleyerek toprağın fiziksel verimliliğini artırır ve bitkilerin daha elverişli bir kök ortamında gelişmesini sağlar. Bu nedenle biyokömür, kuraklıkla mücadele, su kaynaklarının etkin kullanımı ve toprak sağlığının korunması açısından önemli bir sürdürülebilir tarım aracı olarak görülmektedir.

4. Toprağın Kimyasal Özellikleri Üzerindeki Etkileri

Toprağın kimyasal özellikleri, bitkilerin besin maddelerini alabilme kapasitesini, topraktaki iyonların hareketliliğini, pH dengesini, organik ve inorganik bileşiklerin dönüşümünü ve mikrobiyal süreçlerin etkinliğini belirleyerek tarımsal üretimin temel kimyasal altyapısını oluşturur. Bu nedenle, toprağın kimyasal yapısının iyileştirilmesi hem bitki besleme açısından hem de çevresel sürdürülebilirlik bakımından kritik öneme sahiptir (Liu vd., 2025). Biyokömür uygulamaları, sahip olduğu yüksek yüzey alanı, alkalın karakteri, fonksiyonel yüzey grupları ve mineral içerikleri sayesinde toprak kimyasını pek çok yönde dönüştürebilme kapasitesine sahiptir. Bu dönüştürücü etki, özellikle besin elementlerinin tutulumu, pH düzenlenmesi, karbon depolama süreçleri, ağır metal hareketliliğinin azaltılması ve organik kirleticilerin adsorpsiyonu gibi alanlarda belirginleşir (Huang vd., 2023).

Biyokömürün toprak kimyasına yaptığı katkıların başında toprak pH dengesinin düzenlenmesi gelir (Jindo vd., 2020). Çoğu biyokömür, özellikle odunsu materyallerden ve hayvansal kökenli hammaddelerden üretilenler, yüksek sıcaklıktaki piroliz işlemi nedeniyle alkalın özellik taşır (Tusar vd., 2023). Asidik topraklara uygulandığında biyokömür, içerdiği karbonatlar, oksitler ve bazik kül bileşenleri sayesinde pH'ı yükselterek bitkiler için daha

uygun bir kimyasal ortam oluşturur. Toprak pH'sının nötr seviyeye yaklaşması, özellikle fosfor, molibden ve bazı mikro besin elementlerinin biyoyararlanımını artırırken, toksik Al^{3+} gibi iyonların etkinliğini azaltır. Bu iyileştirici etki, asit topraklarda verim artışına doğrudan katkı sağlar. Ancak biyokömürün pH üzerindeki etkisi, hammaddenin mineral içeriğine, piroliz sıcaklığına ve uygulama dozuna bağlı olarak değişir; bu nedenle her toprak için beklenen sonuçlar aynı değildir (Huang vd., 2023).



Şekil 5. Biyokömürün Toprağın Kimyasal Özellikleri Üzerindeki Etkileri

Toprak kimyasının iyileştirilmesindeki bir diğer önemli unsur katyon değişim kapasitesinin (KDK) artırılmasıdır (Domingues vd., 2020). Biyokömür, yüksek yüzey alanına ve karboksil, hidroksil ve fenolik yapılar gibi fonksiyonel yüzey gruplarına sahip olduğu için topraktaki Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ ve NH_4^+ gibi besin iyonlarının tutulmasında etkin rol oynar (Dey vd., 2023). KDK'nin artması, besin elementlerinin yıkanmasını azaltır ve toprakta daha uzun süre kalmasını sağlayarak bitkiler için sürekli bir besin kaynağı oluşturur. Bu etki özellikle kumlu ve düşük organik maddeli topraklarda dikkat çekicidir; çünkü biyokömür bu tür toprakların doğal olarak düşük olan iyon tutma kapasitesini hızlı biçimde yükseltebilir. Yüksek sıcaklıkta üretilen

biyokömürlerin KDK potansiyeli daha fazla olmakla birlikte, düşük sıcaklık ürünleri fonksiyonel grup bakımından zengin olduğu için kısa vadede daha etkili de olabilir. Bu durum, biyokömürün toprak kimyasında hem kısa hem uzun vadeli faydalar sağlayabildiğini göstermektedir.

Biyokömür uygulamalarının kimyasal açıdan en çok vurgulanan yönlerinden biri de besin elementlerinin toprakta tutulmasını ve biyoyararlanımını artırmasıdır (Oelbermann, 2020). Biyokömür, gözenekli yapısı sayesinde özellikle amonyum, nitrat ve fosfat gibi tarımsal gübre uygulamalarında kayba uğrayabilen iyonları adsorbe ederek toprak profilinde daha uzun süre tutabilir (Pantoja vd., 2023). Bu özellik, hem gübre kullanım verimliliğini artırır hem de yeraltı suyuna besin sızıntısını azaltarak çevresel kirliliği sınırlar. Ayrıca biyokömürün yüksek pH ve kül içeriği, kalsiyum, potasyum ve bazı mikro elementlerin toprak çözeltisine geçmesine katkıda bulunabilir. Bununla birlikte fosfor açısından biyokömürün etkisi karmaşıktır; bazı biyokömürler fosforu çözünür hâle getirerek biyoyararlılığını artırırken, bazıları ise metal oksit yüzeyleri nedeniyle fosforu bağlayarak erişilebilirliği sınırlayabilir. Bu nedenle biyokömürün besin yönetimindeki rolü, hem hammaddenin mineral bileşimine hem de toprak tipine bağlı olarak değişkenlik gösterebilir (Gupta vd., 2024).

Kimyasal süreçlerin daha geniş ekosistem ölçeğindeki bir diğer boyutu da karbon depolama ve sera gazı emisyonlarının azaltılmasıdır (Kannan vd., 2024). Biyokömür, piroliz sonucunda aromatik karbon halkalarının baskın hâle gelmesi sayesinde mikrobiyal bozunmaya karşı oldukça dirençlidir (Li ve Tasnady, 2023). Bu nedenle toprakta yüzlerce yıla varan sürelerde kalabilen kararlı bir karbon havuzu oluşturur. Biyokömürün toprağa uygulanması, bu uzun vadeli karbon depolama etkisiyle atmosferdeki CO₂ seviyesinin azaltılmasına katkıda bulunduğu için iklim değişikliğiyle mücadelede önem taşır. Ayrıca biyokömür, toprakta organik karbon mineralizasyon hızını yavaşlatarak, doğal organik maddenin korunmasına yardımcı olabilir. Bu durum, hem toprak verimliliğinin sürdürülmesini hem de ekosistemdeki karbon dengesinin iyileştirilmesini destekler.

Toprak kimyasında biyokömürün en kritik rollerinden biri de ağır metaller ve toksik bileşiklerle etkileşimidir. Biyokömür, yüzeyindeki fonksiyonel gruplar ve mineral fraksiyonları aracılığıyla kurşun (Pb), kadmiyum (Cd), nikel (Ni) ve bakır (Cu) gibi ağır metalleri adsorbe ederek

onların toprak çözeltisine geçişini ve bitkiler tarafından alınmasını sınırlar (Rahim vd., 2022). Bu immobilizasyon etkisi, kirlenmiş toprakların rehabilitasyonunda biyokömürü son derece değerli bir materyal hâline getirir. Benzer şekilde pestisit kalıntıları ve organik kirleticiler de biyokömür tarafından tutulabilir; böylece hem bitkilerin toksik maddelere maruz kalması azaltılır hem de yerüstü ve yeraltı sularının kirlenmesi önlenir (Shi vd., 2024).

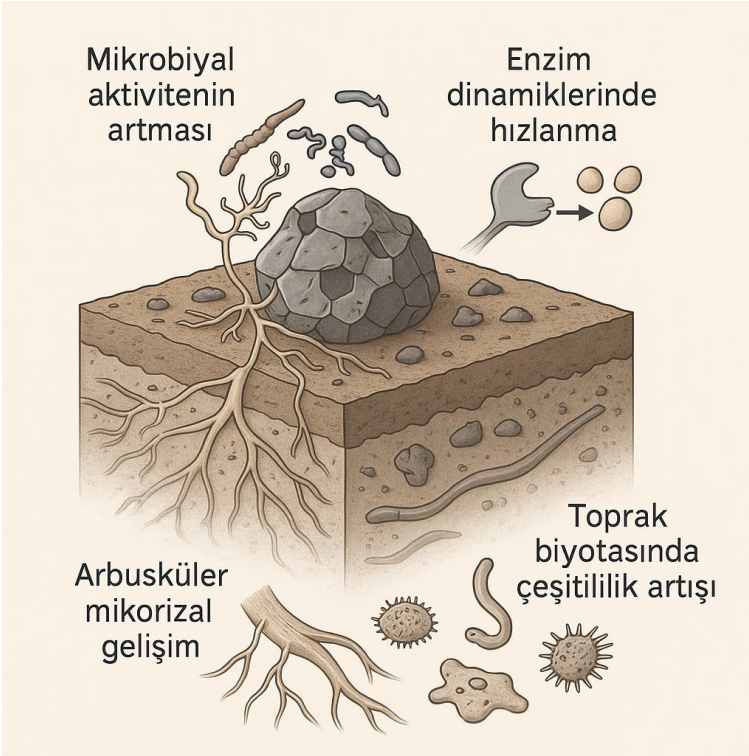
Genel olarak değerlendirildiğinde biyokömür, toprak kimyasını düzenleyen çok yönlü bir toprak iyileştiricisi olarak karşımıza çıkar. pH düzenlemesi, besin elementlerinin tutulumu, kimyasal toksisitelerin azaltılması, karbon stabilizasyonu ve çevresel kirliliğin önlenmesi gibi etkileri, biyokömürü hem verimlilik artırıcı hem de çevresel sürdürülebilirlik açısından stratejik bir materyal hâline getirmektedir. Ancak biyokömürün kimyasal etkileri her toprak tipinde aynı yoğunlukta gerçekleşmediği için, uygulama öncesinde toprak analizi, hammadde seçimi ve uygun piroliz sıcaklığının belirlenmesi büyük önem taşır.

5. Toprağın Biyolojik Özellikleri Üzerindeki Etkileri

Toprak biyolojisi, toprak ekosisteminin en dinamik bileşenlerinden biridir ve besin döngülerinin sürdürülmesinden organik maddenin parçalanmasına, toprak yapısının oluşumundan bitki kökleriyle simbiyotik ilişkilerin yönetilmesine kadar pek çok temel süreçte rol oynar (Dai vd., 2021). Toprak mikroorganizmaları, enzimler, mezofauna ve bitki kökleri arasındaki karmaşık etkileşimler, toprak sağlığının biyolojik temelini oluşturur. Ancak yoğun tarım uygulamaları, organik madde kaybı, pestisit kullanımı ve iklim değişikliğine bağlı stres faktörleri, bu biyolojik işlevleri zayıflatabilmektedir. Biyokömür uygulamaları, toprağın biyolojik yapısını iyileştirerek bu olumsuzlukları hafifletebilme ve toprak biyolojisini yeniden canlandırabilme potansiyeline sahiptir (Bolan vd., 2023).

Toprağa biyokömür uygulandığında, öncelikle mikrobiyal habitat koşulları belirgin şekilde değişir (Maroušek ve Trakal, 2021). Biyokömürün çok katmanlı ve yüksek poroziteli yapısı, mikroorganizmalar için korunaklı mikrohabitatlar oluşturur (Dai vd., 2021). Bu gözenekli yapı, hem aerobik hem anaerobik mikroorganizmaların yerleşebileceği ve biyokimyasal faaliyet gösterebileceği stabil ortamlar sunarak mikrobiyal çeşitliliğin artmasına katkı

sağlar (Murtaza vd., 2023). Mikroorganizmaların biyokömür yüzeyine kolonize olma eğilimi, hem fiziksel barınma olanakları hem de biyokömürün yüzeyindeki fonksiyonel grupların mikrobiyal enzimatik süreçlere uygun kimyasal ortam sunmasıyla ilişkilidir (Ighalo vd., 2024). Bu kolonizasyon süreci, özellikle düşük organik maddeli topraklarda biyolojik aktivitenin canlanmasını teşvik eder.



Şekil 6. Toprağın Biyolojik Özellikleri Üzerindeki Etkileri

Biyokömür uygulaması, mikrobiyal popülasyonların büyüklüğünün yanı sıra mikrobiyal aktiviteleri de olumlu yönde etkiler (Hu vd., 2024). Toprakta substrat erişilebilirliğinin artması, su dengesinin iyileşmesi ve pH düzenlenmesi gibi ikincil etkiler, mikroorganizmaların metabolik süreçlerini hızlandırır. Bu doğrultuda biyokömür, dehidrogenaz, β -glukosidaz, fosfataz ve ureaz gibi toprak enzimlerinin aktivitesini artırabilmekte (Ali vd., 2025); bu da karbon, azot ve fosfor döngülerinde daha hızlı ve etkin bir dönüşümü mümkün kılmaktadır (Hassan vd., 2024). Böylelikle biyokömür, yalnızca

mikroorganizma sayısını değil, aynı zamanda toprak ekosisteminin işlevsel kapasitesini artırarak besin elementlerinin mineralizasyonunu ve bitkiler tarafından kullanılabilir hâle gelmesini kolaylaştırır (Rizwan vd., 2023).

Toprak biyolojisinin bir diğer boyutu olan bitki–mikroorganizma etkileşimleri de biyokömürden güçlü biçimde etkilenmektedir (Idbella vd., 2023). Biyokömür, rizosfer bölgesindeki mikroklimayı iyileştirerek kök gelişimi ve mikrobiyal kolonizasyon için daha elverişli bir ortam yaratır (Ali vd., 2025). Bu durum özellikle mikorizal mantarların bitki kökleriyle simbiyotik ilişki kurmasını kolaylaştırır (Dai vd., 2021). Mikorizal hiflerin gelişmesi, hem su hem besin elementi alımını artırarak bitki büyümesini destekler (Kumar vd., 2023). Ayrıca biyokömürün yüksek pH ve mineral yapısı, bazı yararlı bakterilerin ve bitki büyümesini teşvik eden rizobakterilerin aktivitesini artırabilir. Böylece biyokömür, toprak biyotasını yalnızca niceliksel olarak değil, işlevsel olarak da yeniden şekillendirerek bitki sağlığı üzerindeki olumlu etkilerini dolaylı yollarla güçlendirir.

Biyokömürün toprak biyolojisi üzerindeki etkileri yalnızca faydalı mikroorganizmaların teşvik edilmesiyle sınırlı değildir; aynı zamanda patojen baskılanmasında da rol oynayabilir (Bolan vd., 2023). Biyokömür yüzeyi, bazı kök patojenlerinin çoğalmasını sınırlayabilecek fiziksel ve kimyasal özelliklere sahiptir (Gunarathnea vd., 2022). Adsorpsiyon kapasitesi yüksek olan biyokömür, patojenlerin yayılması için gerekli çözünür organik bileşenleri ve toksinleri adsorbe ederek bunların etkisini azaltabilir (Dai vd., 2021). Ayrıca rekabetçi mikroorganizmaların biyokömür yüzeyine kolonize olması, patojenlerin varlığını baskılayabilecek ekolojik bir üstünlük oluşturur. Bu nedenle biyokömür, dolaylı biyolojik kontrol aracı olarak da değerlendirilebilir (Aftab vd., 2024).

Biyokömürün biyolojik süreçler üzerinde oluşturduğu olumlu etkilerin bir kısmı da organik maddenin korunması ve dönüşümü ile ilişkilidir (Hassan vd., 2024). Biyokömür, toprak organik maddesi ile etkileşime girerek onun mineralizasyon hızını yavaşlatabilir veya mikroorganizmaların organik maddeden besin salınımını daha etkin biçimde gerçekleştirmesine katkıda bulunabilir (Fan vd., 2023). Bu süreç, toprak karbon dengesinin korunmasına yardımcı olurken, aynı zamanda bitki beslenmesi açısından daha sürdürülebilir bir besin akışı sağlar.

Genel olarak bakıldığında biyokömür, toprak biyolojisinin temelini oluşturan mikrobiyal çeşitlilik, enzim aktiviteleri, rizosfer etkileşimleri ve patojen baskılanması gibi süreçleri çok boyutlu biçimde etkileyen güçlü bir biyolojik düzenleyicidir. Bu nedenle biyokömür, yalnızca fiziksel ve kimyasal iyileştirme aracı değil, aynı zamanda toprak ekosisteminin biyolojik canlılığını yeniden yapılandıran bir toprak iyileştiricisidir (Okoro vd., 2024). Ancak biyokömürün biyolojik etkilerinin büyüklüğü, uygulama miktarına, biyokömür kalitesine, toprak tipine ve çevresel koşullara bağlı olarak değişebileceğinden, her toprak sisteminde aynı sonuçların beklenmemesi gerektiği unutulmamalıdır.

6. Biyokömür Uygulamalarının Sınırlamaları ve Zorlukları

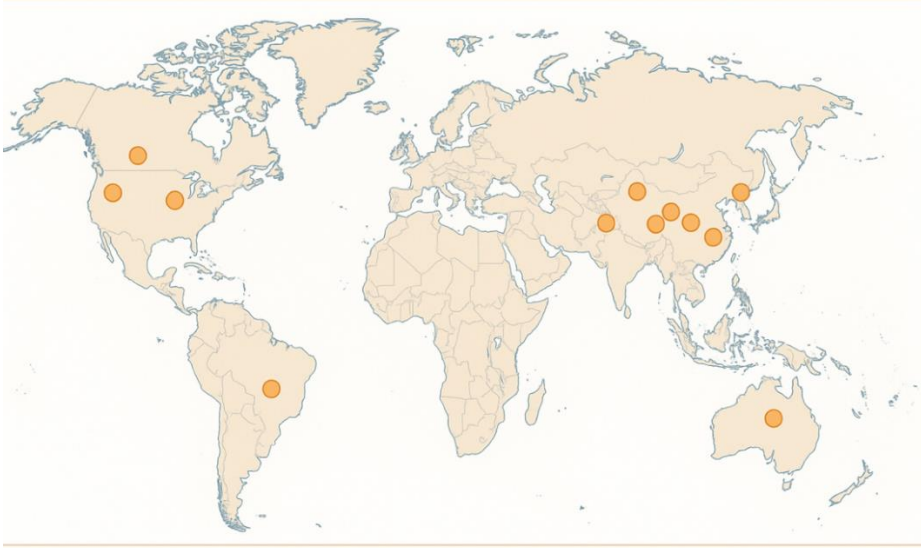
Biyokömür, toprak sağlığı, karbon depolama ve çevresel sürdürülebilirlik açısından önemli bir potansiyel sunmasına rağmen, büyük ölçekli uygulamaların hayata geçirilmesinde çeşitli sınırlamalar ve pratik zorluklar bulunmaktadır. (Brtnický vd., 2021) Bu zorluklar, biyokömürün üretim maliyetlerinden teknik kısıtlara, hammadde temininden uzun vadeli etkilerin belirsizliğine kadar geniş bir çerçevede değerlendirilmelidir. Dolayısıyla biyokömürün tarımsal ya da çevresel amaçlarla yaygın biçimde kullanılabilmesi, bu sınırlamaların doğru anlaşılmasına ve yönetilmesine bağlıdır.

Biyokömür üretimindeki en temel sınırlamalardan biri ekonomik maliyetlerdir (Wang vd., 2023). Piroлиз reaktörlerinin kurulumu, enerji gereksinimi, işçilik ve hammadde lojistiği, özellikle düşük gelirli tarım bölgelerinde biyokömürün geniş çaplı üretimini güçleştirmektedir (Bergman vd., 2022; Ravindiran vd., 2024). Endüstriyel ölçekte çalışan piroliz sistemleri yüksek sermaye yatırımı gerektirirken, küçük ölçekli üretim sistemleri ise çoğu zaman verimlilik ve kalite kontrolü açısından sınırlayıcı olabilir. Ayrıca biyokütlenin toplanması, taşınması ve kurutulması gibi süreçler de maliyetleri artırmakta, bu da biyokömürün ticari rekabet gücünü azaltmaktadır (Oelbermann, 2020). Bu durum, biyokömürün ekonomik olarak sürdürülebilir bir ürün hâline gelmesi için teknik inovasyonlara ve destekleyici politikalara ihtiyaç duyulduğunu göstermektedir (Pierson vd., 2024).

Bir diğer önemli sınırlama, hammaddenin temini ve niteliksel değişkenliğidir (Ippolito vd., 2020). Biyokömürün özellikleri, hammadde

türüne ve piroliz koşullarına bağlı olarak büyük farklılıklar gösterebildiğinden (Osman vd., 2023), her uygulama alanı için standart bir biyokömür formu tanımlamak mümkün değildir (Freitas vd., 2020). Tarımsal atıkların mevsimsel değişimi, hayvansal atıkların lojistik zorlukları veya orman ürünlerinin bölgesel dağılımı gibi faktörler, hammaddeye erişimi kısıtlayabilir. Aynı zamanda heterojen hammaddelerden üretilen biyokömürlerin besin içeriği, pH değeri, kül oranı ve karbon stabilitesi değişken olduğundan, uygulamada öngörülemeyen sonuçlar ortaya çıkabilir (Ravindirana vd., 2024). Bu nedenle biyokömür kullanımının yaygınlaştırılması için hammaddenin sürdürülebilir ve düzenli biçimde tedarik edilmesi gerekmektedir.

Biyokömürün toprakta gösterdiği uzun vadeli etkiler de hâlen tam olarak anlaşılmamıştır (Cai vd., 2021) (Şekil 7.). Biyokömürün toprağın fiziksel, kimyasal ve biyolojik özellikleri üzerindeki kısa vadeli faydaları birçok çalışmayla ortaya konmuş olsa da, uzun dönemli toprak dinamikleri açısından belirsizlikler bulunmaktadır (Vijay vd., 2021). Bazı araştırmalar, biyokömürün zaman içinde oksidasyona uğrayarak yüzey özelliklerinin değişebileceğini, bunun da besin tutma kapasitesi ve mikrobiyal etkileşimler üzerinde farklı sonuçlar doğurabileceğini göstermektedir (Groß vd., 2024). Ayrıca biyokömürün mineralizasyon süreçlerine etkisinin, topraktaki doğal organik maddenin parçalanma hızını artırabileceği veya azaltabileceği yönünde çelişkili bulgular bulunmaktadır (Zhang vd., 2024). Bu karmaşıklık, biyokömürün uzun vadeli toprak organik madde dengesi üzerindeki etkilerinin daha kapsamlı çalışmalarla değerlendirilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır.



Şekil 7. Dünya çapında biyokömür araştırma yerleri

Biyokömür uygulamalarında karşılaşılan bir diğer zorluk ise yanlış doz veya uygunsuz biyokömür tipinin olumsuz sonuçlar doğurabilmesidir (Jindo vd., 2020). Aşırı doz biyokömür uygulamaları bazı topraklarda hidrofobiklik oluşturarak suyun infiltrasyonunu azaltabilir (Lin vd., 2024). Ayrıca yüksek pH'lı biyokömürlerin büyük miktarda uygulanması, özellikle nötr veya hafif alkali topraklarda pH'ı aşırı yükselterek mikro element eksikliklerine yol açabilir (Jindo vd., 2020). Besin içeriği düşük biyokömürlerin fazla uygulanması ise kısa vadede toprak-azot ilişkilerini bozarak bitkilerde geçici azot eksikliğine neden olabilir (Vijay vd., 2021). Bu nedenle biyokömür uygulamalarının bilimsel analizlere, toprak testlerine ve uygun doz hesaplamalarına dayandırılması büyük önem taşır.

Biyokömürün çevresel etkileri açısından da bazı riskler değerlendirilmelidir. (Godlewska vd., 2020) Özellikle düşük kaliteli veya kontrolsüz piroliz süreçlerinde üretilen biyokömürler, polisiklik aromatik hidrokarbonlar (PAH'lar), ağır metaller veya diğer istenmeyen bileşenler içerebilir (Bo vd., 2023, p. 15; Ling vd., 2021). Bu tür kirleticiler toprağa taşındığında çevre ve bitki sağlığı üzerinde olumsuz sonuçlar doğurabilir (Brtnický vd., 2021). Bu nedenle biyokömürün tarımsal kullanımında kalite kontrol süreçleri, üretim standartları ve sertifikasyon sistemleri önem kazanmaktadır (Niedziński vd., 2023).

Son olarak biyokömür uygulamalarının yaygınlaşmasını etkileyen kurumsal ve teknik zorluklar da göz ardı edilmemelidir (Pierson vd., 2024). Birçok ülkede biyokömürün tarımda kullanımıyla ilgili mevzuat ve düzenlemeler sınırlı veya belirsizdir (Enaime vd., 2023). Çiftçilerin biyokömür hakkında bilgi eksikliği, uygulama yöntemlerinin yeterince tanınmaması ve ekonomik teşviklerin eksikliği, biyokömürün pratikte benimsenmesini güçleştirmektedir. Ayrıca üretim ve uygulama teknolojilerinin yerel koşullara uyarlanması için bölgesel araştırmalara ihtiyaç duyulmaktadır (Wang vd., 2023).

Genel olarak değerlendirildiğinde biyokömür, sürdürülebilir toprak yönetimi için önemli fırsatlar sunarken, bu potansiyelin tam olarak hayata geçirilebilmesi için teknolojik, ekonomik, çevresel ve düzenleyici sınırlamaların dikkatle ele alınması gerekmektedir (Brtnický vd., 2021). Bu zorlukların aşılması, biyokömürün tarımda yaygın, etkili ve güvenli bir şekilde kullanılmasına olanak sağlayacaktır.

7. Sonuç

Biyokömür, sürdürülebilir toprak yönetimi açısından giderek daha fazla ilgi gören, çok yönlü etkileri olan bir toprak düzenleyicisidir. Organik atıkların piroliz yoluyla dönüştürülmesiyle elde edilen bu materyal, toprakların fiziksel, kimyasal ve biyolojik özelliklerinde belirgin iyileşmeler sağlayabilmektedir. Gözenekli yapısı sayesinde toprak su tutma kapasitesinin artmasına, agregat stabilitesinin güçlenmesine ve havalanmanın iyileşmesine katkı sağlaması, biyokömürü özellikle su stresi ve erozyon riski yüksek bölgelerde değerli bir araç hâline getirmektedir. Benzer şekilde yüksek yüzey alanı ve fonksiyonel gruplarla zengin kimyasal yapısı, besin elementlerinin tutulması, pH düzenlemesi ve toksik elementlerin bağlanması gibi çok yönlü kimyasal iyileştirmeleri mümkün kılmaktadır. Toprak mikrobiyal çeşitliliğini ve enzim aktivitesini desteklemesi ise biyokömürün yalnızca yapısal değil, aynı zamanda ekosistem işlevlerini canlandırıcı bir unsur olduğunu göstermektedir.

Biyokömürün sağladığı bu faydalar, onun hem tarımsal üretim hem de çevresel sürdürülebilirlik açısından stratejik bir araç olma potansiyelini güçlendirmektedir. Ayrıca biyokömür, karbonun uzun süre toprakta tutulmasını sağlayarak iklim değişikliğiyle mücadelede önemli bir katkı sunmaktadır. Bu özellik, biyokömürü günümüz sürdürülebilir tarım vizyonunun merkezine

yerleştirebilecek niteliktedir. Ancak biyokömür uygulamalarının etkileri her toprak tipinde ve her koşulda aynı değildir. Piroliz sıcaklığı, hammadde türü, uygulama dozu ve toprak özellikleri arasındaki etkileşimler, sonuçların değişken olmasına yol açmaktadır. Bu nedenle biyokömürün “her koşulda olumlu etki gösteren tek tip bir ürün” olarak değerlendirilmesi doğru değildir; aksine, başarıyı belirleyen temel unsur uygun biyokömür–toprak–bitki eşleşmesinin sağlanmasıdır.

Öte yandan biyokömür kullanımının yaygınlaşmasını sınırlayan ekonomik, teknik ve düzenleyici zorluklar da bulunmaktadır. Üretim maliyetleri, hammaddeye erişim, kalite kontrol süreçleri, çevresel standartlar ve çiftçi farkındalığı, biyokömürün pratik uygulamasında önemli engeller oluşturmaktadır. Ayrıca biyokömürün topraktaki uzun dönemli etkileri ve doğal organik madde döngüsüyle olan etkileşimleri hâlen tam olarak anlaşılmamıştır. Bu nedenle biyokömürün büyük ölçekli tarımsal uygulamalarda güvenli ve etkili bir şekilde kullanılabilmesi, kapsamlı uzun vadeli araştırmalara ve bölgesel bazda yapılacak değerlendirmelere bağlıdır.

Genel olarak değerlendirildiğinde biyokömür, hem toprak verimliliğini artırma hem de çevresel sürdürülebilirliği güçlendirme açısından önemli bir potansiyele sahip olsa da, bu potansiyelin tam anlamıyla hayata geçirilebilmesi için bilimsel, ekonomik ve politik boyutların bir arada ele alınması gerekmektedir. Biyokömürün gelecekte tarımda yaygın bir uygulama hâline gelebilmesi, uygun üretim teknolojilerinin geliştirilmesi, kalite standartlarının oluşturulması, bölgeye özgü uygulama rehberlerinin hazırlanması ve çiftçilerin bilinçlendirilmesi ile mümkün olacaktır. Bu doğrultuda biyokömür, doğru bağlam ve doğru uygulama stratejileriyle değerlendirildiğinde, hem toprak sağlığını iyileştiren hem de iklim değişikliğiyle mücadelede etkin bir araç olarak öne çıkma potansiyeline sahiptir.

Kaynaklar

- Abdelhafez, A. A., ve Abbas, M. H. H. (2020). Applications of Biochar for Environmental Safety. In *IntechOpen eBooks*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.87828>
- Acharya, B. S., Dodla, S. K., Wang, J. J., Pavuluri, K., Darapuneni, M., Dattamudi, S., Maharjan, B., ve Kharel, G. (2024). Biochar impacts on soil water dynamics: knowns, unknowns, and research directions. *Biochar*, 6(1). <https://doi.org/10.1007/s42773-024-00323-4>
- Aftab, Z., Anjum, T., Akram, W., Bokhari, N. A., Rehman, A., Sharif, S., Rizwana, H., ve Munir, B. (2024). Biological Pest Control and Sustainable Agroecosystems. In *IntechOpen eBooks*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.1006693>
- Albalasmeh, A. A., Quzaih, M. Z., Gharaibeh, M. A., Rusan, M., Mohawesh, O., Rabab'ah, S. R., Alqudah, A. M., Alghamdi, A. G., ve Naserin, A. (2024). Significance of pyrolytic temperature, application rate and incubation period of biochar in improving hydro-physical properties of calcareous sandy loam soil. *Scientific Reports*, 14(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-024-57755-y>
- Ali, A., Jabeen, N., Chachar, Z., Chachar, S., Ahmed, S., Ahmed, N., Laghari, A. A., Sahito, Z. A., Farruhbek, R., ve Yang, Z. (2025). The role of biochar in enhancing soil health ve interactions with rhizosphere properties and enzyme activities in organic fertilizer substitution. *Frontiers in Plant Science*, 16, 1595208. Frontiers Media. <https://doi.org/10.3389/fpls.2025.1595208>
- Bednik, M., Medyńska-Juraszek, A., ve Ćwieląg-Piasecka, I. (2022). Effect of Six Different Feedstocks on Biochar's Properties and Expected Stability. *Agronomy*, 12(7), 1525. <https://doi.org/10.3390/agronomy12071525>
- Bergman, R., Sahoo, K., Englund, K., ve Mousavi-Avval, S. H. (2022). Lifecycle Assessment and Techno-Economic Analysis of Biochar Pellet Production from Forest Residues and Field Application. *Energies*, 15(4), 1559. <https://doi.org/10.3390/en15041559>
- Beusch, C. (2021). Biochar as a Soil Ameliorant: How Biochar Properties Benefit Soil Fertility—A Review. *Journal of Geoscience and*

- Environment Protection*, 9(10), 28.
<https://doi.org/10.4236/gep.2021.910003>
- Bo, X., Zhang, Z., Wang, J., Guo, S., Li, Z., Lin, H., Huang, Y., Han, Z., Kuzyakov, Y., ve Zou, J. (2023). Benefits and limitations of biochar for climate-smart agriculture: a review and case study from China [Review of *Benefits and limitations of biochar for climate-smart agriculture: a review and case study from China*]. *Biochar*, 5(1). Springer Nature. <https://doi.org/10.1007/s42773-023-00279-x>
- Bolan, S., Sharma, S., Mukherjee, S., Kumar, M., Rao, Ch. S., Nataraj, K. C., Singh, G., Vinu, A., Bhowmik, A., Sharma, H., El-Naggar, A., Chang, S. X., Hou, D., Rinklebe, J., Wang, H., Siddique, K. H. M., Abbott, L. K., Kirkham, M. B., ve Bolan, N. (2023). Biochar modulating soil biological health: A review [Review of *Biochar modulating soil biological health: A review*]. *The Science of The Total Environment*, 914, 169585. Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.169585>
- Brtnický, M., Datta, R., Holátko, J., Bielská, L., Gusiatin, Z. M., Kučerík, J., Hammerschmiedt, T., Danish, S., Radziemska, M., Mravcová, L., Fahad, S., Kintl, A., Šudoma, M., Ahmed, N., ve Pecina, V. (2021). A critical review of the possible adverse effects of biochar in the soil environment [Review of *A critical review of the possible adverse effects of biochar in the soil environment*]. *The Science of The Total Environment*, 796, 148756. Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148756>
- Cai, Y., Ok, Y. S., Lehmann, J., ve Chang, S. X. (2021). Recommendations for stronger biochar research in soil biology and fertility. *Biology and Fertility of Soils*, 57(3), 333. <https://doi.org/10.1007/s00374-021-01548-2>
- Chen, D., Cen, K., Zhuang, X., Gan, Z., Zhou, J., Zhang, Y., ve Zhang, H. (2022). Insight into biomass pyrolysis mechanism based on cellulose, hemicellulose, and lignin: Evolution of volatiles and kinetics, elucidation of reaction pathways, and characterization of gas, biochar and bio-oil. *Combustion and Flame*, 242, 112142. <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2022.112142>
- Dai, Z., Xiong, X., Zhu, H., Xu, H., Leng, P., Li, J., Tang, C., ve Xu, J. (2021). Association of biochar properties with changes in soil bacterial, fungal

- and fauna communities and nutrient cycling processes. *Biochar*, 3(3), 239. <https://doi.org/10.1007/s42773-021-00099-x>
- Dey, S., Purakayastha, T. J., Sarkar, B., Rinklebe, J., Kumar, S., Chakraborty, R., Datta, A., Lal, K., ve Shivay, Y. S. (2023). Enhancing cation and anion exchange capacity of rice straw biochar by chemical modification for increased plant nutrient retention. *The Science of The Total Environment*, 886, 163681. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.163681>
- Domingues, R. R., Sánchez-Monedero, M. Á., Spokas, K. A., Melo, L. C. A., Trugilho, P. F., Valenciano, M. N., ve Silva, C. A. (2020). Enhancing Cation Exchange Capacity of Weathered Soils Using Biochar: Feedstock, Pyrolysis Conditions and Addition Rate. *Agronomy*, 10(6), 824. <https://doi.org/10.3390/agronomy10060824>
- Enaime, G., Wichern, M., ve Lübken, M. (2023). Contribution of biochar application to the promotion of circular economy in agriculture. *Frontiers in Agronomy*, 5. <https://doi.org/10.3389/fagro.2023.1214012>
- Fan, C., Cui, Y., Zhang, Q., Yin, N., Cai, X., Yuan, X., Senadheera, S. S., Cho, Y., ve Ok, Y. S. (2023). A critical review of the interactions between rhizosphere and biochar during the remediation of metal(loid) contaminated soils [Review of *A critical review of the interactions between rhizosphere and biochar during the remediation of metal(loid) contaminated soils*]. *Biochar*, 5(1). Springer Nature. <https://doi.org/10.1007/s42773-023-00278-y>
- Fawzy, S., Osman, A. I., Yang, H., Doran, J., ve Rooney, D. W. (2021). Industrial biochar systems for atmospheric carbon removal: a review [Review of *Industrial biochar systems for atmospheric carbon removal: a review*]. *Environmental Chemistry Letters*, 19(4), 3023. Springer Science+Business Media. <https://doi.org/10.1007/s10311-021-01210-1>
- Ferraro, G., Pecori, G., Rosi, L., Bettucci, L., Fratini, E., Casini, D., Rizzo, A. M., ve Chiaramonti, D. (2021). Biochar from lab-scale pyrolysis: influence of feedstock and operational temperature. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 14(5), 5901. <https://doi.org/10.1007/s13399-021-01303-5>
- Freitas, A. M., Nair, V. D., ve Harris, W. G. (2020). Biochar as Influenced by Feedstock Variability: Implications and Opportunities for Phosphorus

- Management. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 4. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2020.510982>
- Godlewska vd., 2020
- Godlewska, P., Ok, Y. S., ve Oleszczuk, P. (2020). THE DARK SIDE OF BLACK GOLD: Ecotoxicological aspects of biochar and biochar-amended soils [Review of *THE DARK SIDE OF BLACK GOLD: Ecotoxicological aspects of biochar and biochar-amended soils*]. *Journal of Hazardous Materials*, 403, 123833. Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.123833>
- Groß, A., Bromm, T., Polifka, S., Fischer, D. A., ve Glaser, B. (2024). Long-term biochar and soil organic carbon stability – Evidence from field experiments in Germany. *The Science of The Total Environment*, 954, 176340. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.176340>
- Gunarathnea, V., Bandara, T., Ramanayaka, S., ve Vithanage, M. (2022). Benefits of Biochar Addition in a Sustainable Agriculture Practice: Soil Nutrients Dynamics, Enzyme Activities and Plant Growth. *Vidyodaya Journal of Science*, 25(1). <https://doi.org/10.31357/vjs.v25i01.5921>
- Gupta, R. K., Vashisht, M., Naresh, R. K., Dhingra, N., Sidhu, M. S., Singh, P., Rani, N., Al-Ansari, N., Alataway, A., Dewidar, A. Z., ve Mattar, M. A. (2024). Biochar influences nitrogen and phosphorus dynamics in two texturally different soils. *Scientific Reports*, 14(1), 6533. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-55527-2>
- Hafeez, A., Pan, T., Tian, J., ve Cai, K. (2022). Modified Biochars and Their Effects on Soil Quality: A Review [Review of *Modified Biochars and Their Effects on Soil Quality: A Review*]. *Environments*, 9(5), 60. Multidisciplinary Digital Publishing Institute. <https://doi.org/10.3390/environments9050060>
- Hassan, A., Ali, S., Baloch, S. B., Naheed, F., Amjad, E., Saeed, Q., Naveed, M., ve Mustafa, A. (2024). Biochar Application for Soil Quality Improvement: An Overview. In *IntechOpen eBooks*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.114192>
- Hassan, M., Liu, Y., Naidu, R., Parikh, S. J., Du, J., Qi, F., ve Willett, I. R. (2020). Influences of feedstock sources and pyrolysis temperature on the properties of biochar and functionality as adsorbents: A meta-analysis [Review of *Influences of feedstock sources and pyrolysis temperature on*

- the properties of biochar and functionality as adsorbents: A meta-analysis*]. *The Science of The Total Environment*, 744, 140714. Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140714>
- Hu, W., Zhang, Y., Rong, X., Zhou, X., Fei, J., Peng, J., ve Luo, G. (2024). Biochar and organic fertilizer applications enhance soil functional microbial abundance and agroecosystem multifunctionality. *Biochar*, 6(1). <https://doi.org/10.1007/s42773-023-00296-w>
- Huang, K., Li, M., Li, R., Rasul, F., Shahzad, S., Wu, C., Shao, J., Guo-qin, H., Li, R., Almari, S., Hashem, M., ve Aamer, M. (2023). Soil acidification and salinity: the importance of biochar application to agricultural soils [Review of *Soil acidification and salinity: the importance of biochar application to agricultural soils*]. *Frontiers in Plant Science*, 14. Frontiers Media. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1206820>
- Idbella, M., Baronti, S., Giagnoni, L., Renella, G., Becagli, M., Cardelli, R., Maienza, A., Vaccari, F. P., ve Bonanomi, G. (2023). Long-term effects of biochar on soil chemistry, biochemistry, and microbiota: Results from a 10-year field vineyard experiment. *Applied Soil Ecology*, 195, 105217. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2023.105217>
1. Ighalo, J. O., Ohoro, C. R., Ojukwu, V. E., Oniye, M., Shaikh, W. A., Biswas, J. K., Seth, C. S., Mohan, G. B. M., Chandran, S. A., ve Selvasembian, R. (2024). Biochar for ameliorating soil fertility and microbial diversity: From production to action of the black gold [Review of *Biochar for ameliorating soil fertility and microbial diversity: From production to action of the black gold*]. *iScience*, 28(1), 111524. Cell Press. <https://doi.org/10.1016/j.isci.2024.111524>
- Ippolito, J. A., Cui, L., Kammann, C., Wrage, N., Estavillo, J. M., Fuertes-Mendizábal, T., Cayuela, M. L., Sigua, G. C., Novak, J. M., Spokas, K. A., ve Borchard, N. (2020). Feedstock choice, pyrolysis temperature and type influence biochar characteristics: a comprehensive meta-data analysis review. *Biochar*, 2(4), 421. <https://doi.org/10.1007/s42773-020-00067-x>
- Jahangir, M. M. R., Jahan, I., ve Mumu, N. (2019). Management of Soil Resources for Sustainable Development under a Changing Climate. *Journal of Environmental Science and Natural Resources*, 11, 159. <https://doi.org/10.3329/jesnr.v11i1-2.43383>

- Jatav, H. S., Singh, S. K., Jatav, S. S., Rajput, V. D., Parihar, M., Mahawer, S. K., Singhal, R. K., ve Sukirtee. (2020). Importance of Biochar in Agriculture and Its Consequence. In *IntechOpen eBooks*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.93049>
- Jindo, K., Audette, Y., Higashikawa, F. S., Silva, C. A., Akashi, K., Mastrolonardo, G., Sánchez-Monedero, M. Á., ve Mondini, C. (2020). Role of biochar in promoting circular economy in the agriculture sector. Part 1: A review of the biochar roles in soil N, P and K cycles [Review of *Role of biochar in promoting circular economy in the agriculture sector. Part I: A review of the biochar roles in soil N, P and K cycles*]. *Chemical and Biological Technologies in Agriculture*, 7(1). Springer Nature. <https://doi.org/10.1186/s40538-020-00182-8>
- Kalina, M., Sovová, Š., Švec, J., Trudičová, M., Hajzler, J., Kubíková, L., ve Enev, V. (2022). The Effect of Pyrolysis Temperature and the Source Biomass on the Properties of Biochar Produced for the Agronomical Applications as the Soil Conditioner. *Materials*, 15(24), 8855. <https://doi.org/10.3390/ma15248855>
- Kannan, P., Vijayakumar, S., Mustaffa, M. R. A. F., Subramanian, P., ve Chitraputhirapillai, S. (2024). Biochar – a sustainable soil conditioner for improving soil health, crop production and environment under changing climate: a review [Review of *Biochar – a sustainable soil conditioner for improving soil health, crop production and environment under changing climate: a review*]. *Frontiers in Soil Science*, 4. Frontiers Media. <https://doi.org/10.3389/fsoil.2024.1376159>
- Kayalıoğlu, A., Varol, E. A., Bruckman, V. J., ve Uzun, B. B. (2020). Opportunity for sustainable biomass valorization to produce biochar for improving soil characteristics. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 11(3), 1041. <https://doi.org/10.1007/s13399-020-00923-7>
- Khadem, A., ve Raiesi, F. (2017). Influence of biochar on potential enzyme activities in two calcareous soils of contrasting texture. *Geoderma*. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.08.004>
- Kumar, A., Bhattacharya, T., Shaikh, W. A., Roy, A., Chakraborty, S., Vithanage, M., ve Biswas, J. K. (2023). Multifaceted applications of biochar in environmental management: a bibliometric profile. *Biochar*, 5(1). <https://doi.org/10.1007/s42773-023-00207-z>

- Lehmann, J., ve Joseph, S. (2015). Biochar for environmental management: Science and technology. Earthscan.
- Li, S., ve Tasnady, D. (2023). Biochar for Soil Carbon Sequestration: Current Knowledge, Mechanisms, and Future Perspectives. *C – Journal of Carbon Research*, 9(3), 67. <https://doi.org/10.3390/c9030067>
- Liang, J., Wei, D., Yin, D., Zhou, B., Ding, J., Wang, W., Zhang, J., Qiu, S., Zhang, C., Li, Y., An, Z., Gu, J., ve Wang, L. (2020). Investigations of the effect of the amount of biochar on soil porosity and aggregation and crop yields on fertilized black soil in northern China. *PLoS ONE*, 15(11). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0238883>
- Lin, Y., Cai, Q., Chen, B., ve Garg, A. (2024). A Review of the Negative Effects of Biochar on Soil in Green Infrastructure with Consideration of Soil Properties [Review of *A Review of the Negative Effects of Biochar on Soil in Green Infrastructure with Consideration of Soil Properties*]. *Indian Geotechnical Journal*. Springer Nature. <https://doi.org/10.1007/s40098-024-00875-z>
- Ling, X., Liu, S., Ye, S., Yang, H., Song, B., Qin, F., Shen, L., Tan, C., Zeng, G., ve Tan, X. (2021). Potential hazards of biochar: The negative environmental impacts of biochar applications [Review of *Potential hazards of biochar: The negative environmental impacts of biochar applications*]. *Journal of Hazardous Materials*, 420, 126611. Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.126611>
- López-Cano, I., Cayuela, M. L., Mondini, C., Takaya, C., Ross, A. B., ve Sánchez-Monedero, M. Á. (2018). Suitability of Different Agricultural and Urban Organic Wastes as Feedstocks for the Production of Biochar—Part 1: Physicochemical Characterisation. *Sustainability*, 10(7), 2265. <https://doi.org/10.3390/su10072265>
- Maroušek, J., ve Trakal, L. (2021). Techno-economic analysis reveals the untapped potential of wood biochar. *Chemosphere*, 291, 133000. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.133000>
- Mukherjee, A., Patra, B. R., Podder, J., ve Dalai, A. K. (2022). Synthesis of Biochar From Lignocellulosic Biomass for Diverse Industrial Applications and Energy Harvesting: Effects of Pyrolysis Conditions on the Physicochemical Properties of Biochar. *Frontiers in Materials*, 9. <https://doi.org/10.3389/fmats.2022.870184>

- Murtaza, G., Ahmed, Z., Eldin, S. M., Ali, B., Bawazeer, S., Usman, M., Iqbal, R., Neupane, D., Ullah, A., Khan, A., Hassan, M., Ali, I., ve Tariq, A. (2023). Biochar-Soil-Plant interactions: A cross talk for sustainable agriculture under changing climate. *Frontiers in Environmental Science*, 11. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2023.1059449>
- Nan, H., Zhao, L., Yang, F., Liu, Y., Xiao, Z., Cao, X., ve Qiu, H. (2020). Different alkaline minerals interacted with biomass carbon during pyrolysis: Which one improved biochar carbon sequestration? *Journal of Cleaner Production*, 255, 120162. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120162>
- Nepal, J., Ahmad, W., Munsif, F., Khan, A., ve Zou, Z. (2023). Advances and prospects of biochar in improving soil fertility, biochemical quality, and environmental applications. *Frontiers in Environmental Science*, 11. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2023.1114752>
- Niedziński, T., Łabętowicz, J., Stępień, W., ve Pęczek, T. (2023). Analysis of the Use of Biochar from Organic Waste Pyrolysis in Agriculture and Environmental Protection. *Journal of Ecological Engineering*, 24(4), 85. <https://doi.org/10.12911/22998993/159347>
- Oelbermann, M. (2020). Biochar and its Use in Soil: Lessons from Temperate Agriculture. *World Journal of Agriculture and Soil Science*, 5(2). <https://doi.org/10.33552/wjass.2020.05.000610>
- Okoro, I. G., Onwuka, I. M., ve Nwogu-chigozie, L. N. (2024). Perspective Chapter: The Role of Biochar in Soil Amelioration. In *IntechOpen eBooks*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.1002906>
- Osman, A. I., Farghali, M., Ihara, I., Elgarahy, A. M., Ayyad, A., Mehta, N., Ng, K. H., El-Monaem, E. M. A., Eltaweil, A. S., Hosny, M., Hamed, S. M., Fawzy, S., Yap, P., ve Rooney, D. W. (2023). Materials, fuels, upgrading, economy, and life cycle assessment of the pyrolysis of algal and lignocellulosic biomass: a review [Review of *Materials, fuels, upgrading, economy, and life cycle assessment of the pyrolysis of algal and lignocellulosic biomass: a review*]. *Environmental Chemistry Letters*, 21(3), 1419. Springer Science+Business Media. <https://doi.org/10.1007/s10311-023-01573-7>
- Paiva, I. de O., Morais, E. G. de, Jindo, K., ve Silva, C. A. (2024). Biochar N Content, Pools and Aromaticity as Affected by Feedstock and Pyrolysis

- Temperature. *Waste and Biomass Valorization*, 15(6), 3599. <https://doi.org/10.1007/s12649-023-02415-x>
- Pantoja, F. L., Sukmana, H., Beszédes, S., ve László, Z. (2023). Removal of ammonium and phosphates from aqueous solutions by biochar produced from agricultural waste. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 25(4), 1921. <https://doi.org/10.1007/s10163-023-01687-8>
- Pierson, D., Anderson, N., Brewen, J., Clark, N., Hardy, M. C., McCollum, D. W., McCormick, F. H., Morissette, J. T., Nicosia, T., Page-Dumroese, D. S., Rodriguez-Franco, C., ve Tirocke, J. M. (2024). Beyond the basics: a perspective on barriers and opportunities for scaling up biochar production from forest slash. *Biochar*, 6(1). <https://doi.org/10.1007/s42773-023-00290-2>
- Pituello, C., Ferro, N. D., Francioso, O., Simonetti, G., Berti, A., Piccoli, I., Pisi, A., ve Morari, F. (2018). Effects of biochar on the dynamics of aggregate stability in clay and sandy loam soils. *European Journal of Soil Science*, 69(5), 827. <https://doi.org/10.1111/ejss.12676>
- Rahim, H. U., Akbar, W. A., ve Alatalo, J. M. (2022). A Comprehensive Literature Review on Cadmium (Cd) Status in the Soil Environment and Its Immobilization by Biochar-Based Materials. *Agronomy*, 12(4), 877. <https://doi.org/10.3390/agronomy12040877>
- Ravindiran, G., Rajamanickam, S., Janardhan, G., Hayder, G., Alagumalai, A., Mahian, O., Lam, S. S., ve Sonne, C. (2024). Production and modifications of biochar to engineered materials and its application for environmental sustainability: a review [Review of *Production and modifications of biochar to engineered materials and its application for environmental sustainability: a review*]. *Biochar*, 6(1). Springer Nature. <https://doi.org/10.1007/s42773-024-00350-1>
- Rizwan, M., Murtaza, G., Zulfikar, F., Moosa, A., Iqbal, R., Ahmed, Z., Irshad, S., Khan, I., Li, T., Chen, J., Zhang, M., Siddique, K. H. M., Leng, L., ve Li, H. (2023). Sustainable manufacture and application of biochar to improve soil properties and remediate soil contaminated with organic impurities: a systematic review [Review of *Sustainable manufacture and application of biochar to improve soil properties and remediate soil contaminated with organic impurities: a systematic review*]. *Frontiers in*

- Environmental Science*, 11. Frontiers Media.
<https://doi.org/10.3389/fenvs.2023.1277240>
- Roshan, A., Ghosh, D., ve Maiti, S. K. (2023). How temperature affects biochar properties for application in coal mine spoils? A meta-analysis. *Carbon Research*, 2(1). <https://doi.org/10.1007/s44246-022-00033-1>
- Shi, X., Yang, W., Li, J., ve Yao, Z. (2024). The Application of Biochar as Heavy Metals Adsorbent: The Preparation, Mechanism, and Perspectives. *International Journal of Environmental Research*, 18(3). <https://doi.org/10.1007/s41742-024-00592-8>
- Smith, P., Cotrufo, M., Rumpel, C., Paustian, K., Kuikman, P. J., Elliott, J. A., McDowell, R. W., Griffiths, R. I., Asakawa, S., Bustamante, M., House, J. I., Sobocká, J., Harper, R. J., Pan, G., West, P., Gerber, J., Clark, J. M., Adhya, T. K., Scholes, R. J., ve Scholes, M. C. (2015). Biogeochemical cycles and biodiversity as key drivers of ecosystem services provided by soils. *SOIL*, 1(2), 665. <https://doi.org/10.5194/soil-1-665-2015>
- Syguła, E., Ciolkosz, D., ve Białowiec, A. (2024). The significance of structural components of lignocellulosic biomass on volatile organic compounds presence on biochar - a review [Review of *The significance of structural components of lignocellulosic biomass on volatile organic compounds presence on biochar - a review*]. *Wood Science and Technology*, 58(3), 859. Springer Science+Business Media. <https://doi.org/10.1007/s00226-024-01557-y>
- Tomczyk, A., Sokołowska, Z., ve Boguta, P. (2020). Biochar physicochemical properties: pyrolysis temperature and feedstock kind effects. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 19(1), 191. <https://doi.org/10.1007/s11157-020-09523-3>
- Tu, P., Zhang, G., Wei, G., Li, J., Li, Y., Deng, L., ve Yuan, H. (2022). Influence of pyrolysis temperature on the physicochemical properties of biochars obtained from herbaceous and woody plants. *Bioresources and Bioprocessing*, 9(1). <https://doi.org/10.1186/s40643-022-00618-z>
- Tusar, H. M., Uddin, Md. K., Mia, S., Suhi, A. A., Samsuri, A. W., Kasim, S., Sairi, N. A., Alam, Md. Z., ve Anwar, F. (2023). Biochar-Acid Soil Interactions—A Review. *Sustainability*, 15(18), 13366. <https://doi.org/10.3390/su151813366>

- Vijay, V., Shreedhar, S., Adlak, K., Payyanad, S., Sreedharan, V., Gopi, G., Voort, T. S. van der, Malarvizhi, P., Yi, S., Gebert, J., ve Aravind, P. (2021). Review of Large-Scale Biochar Field-Trials for Soil Amendment and the Observed Influences on Crop Yield Variations. *Frontiers in Energy Research*, 9. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2021.710766>
- Wang, Y., Lin, Q., Liu, Z., Liu, K., Wang, X., ve Shang, J. (2023). Salt-affected marginal lands: a solution for biochar production. *Biochar*, 5(1). <https://doi.org/10.1007/s42773-023-00219-9>
- Wei, B., Peng, Y., Lin, L., Zhang, D., Ma, L., Jiang, L., Li, Y., He, T., ve Wang, Z. (2023). Drivers of biochar-mediated improvement of soil water retention capacity based on soil texture: A meta-analysis. *Geoderma*, 437, 116591. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2023.116591>
- Xiao, X., Chen, B., Chen, Z., Zhu, L., ve Schnoor, J. L. (2018). Insight into Multiple and Multilevel Structures of Biochars and Their Potential Environmental Applications: A Critical Review [Review of *Insight into Multiple and Multilevel Structures of Biochars and Their Potential Environmental Applications: A Critical Review*]. *Environmental Science ve Technology*, 52(9), 5027. American Chemical Society. <https://doi.org/10.1021/acs.est.7b06487>
- Zhang, H., Ma, T., Wang, L., Yu, X., Zhao, X., Gao, W., Zwieten, L. V., Singh, B. P., Li, G., Lin, Q., Chadwick, D. R., Lu, S., Xu, J., Luo, Y., Jones, D. L., ve Jeewani, P. H. (2024). Distinct biophysical and chemical mechanisms governing sucrose mineralization and soil organic carbon priming in biochar amended soils: evidence from 10 years of field studies. *Biochar*, 6(1). <https://doi.org/10.1007/s42773-024-00327-0>
- Zornoza, R., Moreno-Barriga, F., Acosta, J. A., Muñoz, M. A., ve Faz, A. (2016). Stability, nutrient availability and hydrophobicity of biochars derived from manure, crop residues, and municipal solid waste for their use as soil amendments. *Chemosphere*. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2015.08.046>

BÖLÜM 2

İKLİM DEĞİŞİKLİĞİNE UYUMDA YÜZEY ALTI DAMLA SULAMA SİSTEMLERİNİN ROLÜ

Prof. Dr. Ali Fuat TARI^{1*}

Dr. Öğr. Üyesi Sabri AKIN²

DOI: <https://www.doi.org/10.5281/zenodo.17966445>

^{1*}Harran Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Tarımsal Yapılar ve Sulama Bölümü, Şanlıurfa, Türkiye. aftari@harran.edu.tr, ORCID: 0000-0001-9157-1682

²Harran Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Tarımsal Yapılar ve Sulama Bölümü, Şanlıurfa, Türkiye. sabriakin@harran.edu.tr, ORCID: 0000-0002-9196-3157

1. Giriş

İklim değişikliği, dünya su döngüsünde köklü değişiklikler yaparak tarımsal üretim sistemlerini etkilemektedir (Tao ve ark., 2003). Birçok tarım uzmanı, iklim değişikliğinin tarımsal üretime olası etkisinden oldukça endişelidir (Kumar ve Gautam, 2014). Artan sıcaklıklar, yağış rejimlerinde düzensizlik, buharlaşma-terleme (ET) miktarlarının artması ve kuraklık olaylarının sık sık yaşanması en başta suya bağımlı verim alanları olmak üzere tarımsal verimliliği tehdit eden önemli unsurlardır. Günümüzde farklı tahmin modellerinde yer alan projeksiyonlar, yarı kurak ve kurak bölgelerde 21. yüzyıl boyunca yağış düşüşü (Ragab ve Prudhomme, 2002), fazla kurak ve aşırı yağış olayları (Zhang ve ark., 2014) ve tarıma yönelik su talebinin artacağını öngörmektedir (De Fraiture ve Wichelns, 2010). Bu durum, sınırlı su kaynakları üzerindeki baskıyı artırmakta ve geleneksel sulama yöntemlerinin sürdürülebilirliğini ciddi şekilde sorgulamaktadır. Tarımsal üretimde uzun vadeli dayanıklılık için, suyun verimli kullanımını merkezine alan, yenilikçi ve iklim uyumlu sulama çözümlerine ihtiyaç olduğu göz ardı edilmemelidir.

Tarım, dünyada tüketilen tatlı suyun %70'inin kullanıldığı bir sektördür (Pimentel ve ark., 2004). Su kıtlığının derinleştiği bu dönemde yüksek talep, tarımsal su yönetiminde dönüşümü zorunlu kılmaktadır. Yüzey sulama gibi geleneksel sulama yöntemlerinin buharlaşma kayıpları, düzensiz nem dağılımı ve düşük verim gibi sorunlarının iklim değişikliğine bağlı baskılar karşısında yetersiz kaldığı söylenebilir (Pereira ve Gonçalves, 2018). Yükselen sıcaklıklara bağlı olarak artan buharlaşma kayıpları suyu toprağın üst katmanlarında tutulmasını zorlaştırmakta olup, bitkinin kritik dönemlerinde suya erişimini kısıtlamaktadır. Bu durum tarımsal su yönetiminde kayıpları minimize eden stratejik ve etkin kök bölgesi nem sağlayan sistemlerin önemi artırmaktadır.

Yüzey altı damla sulama sistemleri (YADS), yeraltı arıtma suyu kullanımına da imkân tanıyan bu teknoloji, iklim değişikliğine uyum sağlayan modern sulama teknolojileri arasında güçlü bir çözüm olarak değerlendirilmektedir. YADS, suyu toprak yüzeyinde buharlaşmasını en aza indirecek şekilde, sulama suyunu doğrudan kök bölgesine ulaştıran, su uygulama randımanını geleneksel yöntemlere kıyasla çok daha yüksek seviyelere taşıyan bir teknolojidir (Camp, 1998). Bitkilerde su stresini azaltması ve su kullanım etkinliğini (WUE) önemli ölçüde arttırması nedeniyle

iklim değişikliğine uyumda stratejik bir araç olarak kabul edilmektedir (Al-Ghobari ve Dewidar, 2018).

Yüzey altı damla sulamanın iklim uyumu açısından önemli bulunmasının en başta gelen nedeni su uygulama randımanının %90'ın üzerinde olabilmesidir (Camp ve ark., 2000). Bu sistemin sağladığı etkiyle, daha önce tespit edilmiş yeraltı sularının yüzeyde akış ve buharlaşma yoluyla kaybolması engellenmektedir. Yarı kurak bölgelerde, özellikle yağışsız periyotların uzadığı ve toprak neminin hızla kaybolmaya başladığı dönemlerde, YADS suyun doğrudan kök bölgesine ulaştırması sayesinde bitkilerin optimum düzeyde gelişimi için gerekli nemi sağlar. Bu özellik ile, hem üretim istikrarının artmasını, hem de iklim değişikliği nedeniyle yaşanan su baskısı altında verim kayıplarının minimuma inmesini sağlamaktadır.

İklim değişikliğine karşı sürdürülebilir adaptasyon stratejilerinin merkezinde yer alan bir diğer kavram, toprak-bitki-atmosfer etkileşimlerinin yönetilmesidir (Silva ve Lambers, 2021). Toprak yüzeyinde oluşan nem kaybı, sıcaklıkların artması ve buharlaşmanın meydana gelmesi ile hızlanmaktadır. Yüzey altı sulama uygulaması ile suyun bitki kök bölgesinde uzun bir süre barındırılması sonucu kök bölgesinde mikroklima iyileştirmektedir. Yüzey altı damla sulama gerekli iklimsel risklerin artmasından dolayı avantajlı bir sistem olmuştur. Bitki kök bölgesinin daha stabil nem profiline sahip olabilmesi ve suyun bitki tarafından daha etkin kullanılabilmesi, toprak sıcaklığının kontrol altında tutulması sayesinde olacaktır (Rengasamy ve ark., 2003).

Sadece daha fazla su verimliliği açısından değil, aynı zamanda enerji kullanımı, gübre yönetimi, toprak tuzluluğunun düzenlenmesi (Zhu ve ark., 2025) ve toprak sağlığının korunması gibi birçok ek avantajı da vardır. Gübreleme uygulamalarını daha kontrollü bir şekilde yaparak bitkinin besin elementlerine daha etkin erişimi sağlanabilir (Camp, 1998). Toprağın üst katmanında su olmaması yabancı ot gelişimini sınırlayarak su yarışını azaltabilir (Abouziena ve ark., 2014). Toprak tuzluluğunun yüzeyde birikmesini engellemesi, özellikle kurak bölgelerde tuzluluk risklerinin artması bağlamında yararlı bir durumdur. Bu unsurlar bir araya geldiğinde, YADS'nin yalnızca bir sulama sisteminden ziyade iklim dostu ve sürdürülebilir bir tarımsal üretim modeli sunduğu görülmektedir. Bu bölüm, yüzey altı damla sulama sistemlerinin iklim değişikliğine uyum açısından neden stratejik bir çözüm olduğunu kapsamlı biçimde ele almayı amaçlamaktadır.

2. İklim Değişikliğinin Su Kaynakları ve Tarımsal Üretim Üzerindeki Etkileri

İklim değişikliği, tarımsal üretim sistemleri üzerinde çok ciddi ve kapsamlı etkiler yaratmakta olup, küresel su döngüsünün bütün unsurlarını etkilemektedir (Yuan ve ark., 2024). Artan sıcaklıklar, yağış rejimindeki düzensizlikler (Trenberth, 2011) ve ET oranlarındaki artışların neden olduğu su kaynaklarının sürdürülebilir yönetimini zorlaştıran kuraklıklarda meydana gelen artışlar (Loucks, 2000); tarımsal verimlilik üzerinde ciddi baskılar oluşturmaktadır. Özellikle sulak alan ve yarı kurak alanlarda uygulanan üretim sistemlerinde daha belirgin olan bu değişiklikler uygun modern sulama yaklaşımlarının iklim uyumu açısından kritik önemi olduğunu göstermektedir (Ahmed ve ark., 2023).

İklim değişikliğinin en temel etkisi yağış rejimlerinin değişmesidir (Dore, 2005). Bölgesel iklim modellerinin çoğu daha az yağış, yıl içinde düzensiz yağış dağılımları ve daha sık görülen kısa süreli yoğun yağışlar gibi eğilimleri doğrulamaktadır. Yağışlardaki düzensizlikler, tarımsal üretim açısından önemli dönemlerde yeterli nemin sağlanmamasını ve bunun da bitkilerin su stresinin artmasını sağlamaktadır. Özellikle bahar ve yaz aylarında düzensiz yağmur yağması, ekim ve büyüme dönemlerinde toprakta nem yetersizliğine yol açmakta (Zeppel ve ark., 2014), üreticilerin tamamlayıcı veya planlı sulama uygulama ihtiyacı arttırmaktadır.

Su kaynakları üzerinde iklim değişikliğinin ikinci büyük etkisi buharlaşmanın artmasıdır (Arnell, 1999). Atmosferdeki sıcaklık artışları, toprak yüzeyinden ve bitkilerin bünyesinden daha fazla su kaybına neden olmakta, bu da tarımsal olarak daha fazla suya ihtiyaç doğurmaktadır (Malhi ve ark., 2021). ET artışı, sulama ihtiyacını doğrudan artırırken, yüzey sulama, yağmurlama sulama gibi yöntemler buharlaşma kayıplarını daha da artırarak mevcut suyun etkin kullanımını olumsuz etkilemektedir. İklim değişikliği sebebiyle sulama uygulamalarında oluşan su kaybının en aza indirmek için yüzeyden daha çok kök bölgesine suyu ileten yüzeyaltı damla sulama sistemleri kritik bir çözüm olarak öne çıkmaktadır. Kuraklık olaylarının daha sık ve şiddetli hale gelmesi, tarımsal ürünlerin belirsizliğini ve riskini artırmaktadır (Li ve ark., 2009). İklim olayları sebebiyle yaşanan kuraklıklar, tarımsal anlamda arazide suyun eksikliği ve hidrolojik birikimlerde depolanan miktarların düşmesi olayını ifade eder (Van Loon, 2015). Kuraklık döngüleri planlı sulama yapmayı zorlaştırır ve

maliyetleri yükseltir (Iglesias ve ark., 2003). Yeraltı su seviyesinin düşmesi ve geleneksel kuyulardan su alarak sulamanın sürdürülebilirliğinin azalması, yüzey suyu kaynaklarının dönemsel azalması su tahsis planlarının güncellenmesini gerekli kılmaktadır. Yüzey altı sulama sistemleri, suyu en verimli biçimde kullanan, düşük basınç ile çalışan ve su rezervlerini en az düzeyde tüketen bir sistemdir.

İklim değişikliğinin tarımsal üretime etkileri yalnızca su miktarı ile sınırlı değildir; fenolojik dönem kaymaları, bitki büyüme dönemlerinde değişimler, verim istikrarında azalma gibi sonuçlar da olmaktadır (Piao ve ark., 2019). Artan sıcaklıklar, birçok bitki türünün çiçeklenme ve olgunlaşma dönemlerinin daha erken gerçekleşmesine, bazı dönemleri olumsuz etkilemesi ile de sıcaklık stresi kritik büyüme dönemlerine denk düşmektedir. Bu durum, hem üretim takvimlerinin belirsizleşmesine hem de bitki su gereksinimlerinin değişmesine neden olmaktadır. Sulama uygulaması bir zamanlama hassasiyetine ihtiyaç duyduğundan, yüzey altı damla sulama gibi kontrollü, düzenli ve kök bölgesine odaklı bir sulama tekniği olan bu yeni uygulamalara uyum sağlamada önemli avantajlar sunmaktadır.

Bununla birlikte, iklim değişikliği toprak sağlığı ve tuzluluğu da etkilemektedir (Corwin, 2021). Yüzey sulama sistemlerinde bu durum daha belirgin bir şekilde ortaya çıkarken, yüzey altı damla sulama sistemleri suyu nerdeyse tamamıyla kök bölgesine vermesine bağlı olarak yüzeydeki tuz hareketini en azda tutar (Abdoli ve ark., 2022), tuz birikimindeki stresin önüne geçerken toprak profiline çözücü enjekte edilebilmekte (Qadir ve ark., 2000), tuz birikimini daha efektif bir şekilde yönetebilmektedir. İklim uyumlu tarımsal üretim için, artan ET oranları, azalan düzensiz yağışlar, artan kuraklık riski ve toprak sağlığındaki bozulmalar, suyun yüzeyde kaybını en aza indiren ve kök bölgesine hassas kontrollü uygulama imkânı sağlayan yüzey altı damla sulama sistemlerini öne çıkarmaktadır.

3. Yüzey Altı Damla Sulama Sistemlerinin Temel Yapısı ve Çalışma Prensipleri

Yüzey altı damla sulama sistemleri (YADS), suyu doğrudan bitki kök bölgesine ileterek yüzeyden kaynaklanan buharlaşma, akış ve sızma kayıplarını en aza indiren modern sulama teknolojileridir (Camp ve Lamm, 2003). Bu sistemlerin temel işlevi, toprağın kök zonunda sürekli ve kontrollü bir nem

bölgesi oluşturarak bitkinin suya erişimini optimize etmek, aynı zamanda su uygulama verimini maksimum seviyeye çıkarmaktır. YADS, özellikle kurak ve yarı kurak bölgelerde su kıtlığının arttığı iklim değişikliği koşullarında verimliliği korumak ve su kullanım etkinliğini artırmak için etkili bir araç olarak öne çıkmaktadır. Sistemin başarılı bir şekilde tasarlanması ve işletilmesi, teknik bileşenlerinin doğru anlaşılmasına ve çalışma prensiplerinin bilimsel temelde uygulanmasına bağlıdır.

YADS'nin temel bileşenleri lateraller (damla hatları), emitterler (damlatıcılar), filtrasyon birimi, basınç düzenleme elemanları, ana boru hattı ve kontrol–otomasyondur. Damla lateralleri genellikle 20 cm (Hanson ve ark., 2008) –40 cm (Ben-Gal, ve ark., 2004) derinliğe gömülür ve toprak özellikleri ile bitki sıklığına bağlı olarak sıra üzeri veya sıra arası yerleştirilir. Bu derinlik, kök bölgesine optimum mesafede su iletimi sağlayarak hem bitkinin ulaşabileceği bir nem alanı oluşturur hem de yüzey buharlaşmasını azaltır. Damlatıcılar, belirli debilerde su sağlayarak suyun toprak içinde yatay ve dikey yönde kontrollü bir şekilde hareket etmesini sağlar. Bu hareket, damlatıcının debisine, toprağın tekstürüne ve organik madde içeriğine bağlı olarak değişmekte ve kök bölgesinde homojen bir nem dağılımı oluşturmayı hedeflemektedir.

Filtrasyon birimi, YADS'nin en kritik bileşenlerinden biridir (Rogers ve ark., 2003). Çünkü yüzey altı damla sulamada damlatıcı kanallarının tıkanması, sistem performansını doğrudan etkileyen başlıca sorundur (Zaiyu ve ark., 2025). Kum filtreleri, hidrosiklonlar, disk filtreler veya elek filtrelerden oluşan filtrasyon sistemi, suyun içinde bulunan organik ve inorganik partiküllerin sisteme girişini engelleyerek damlatıcıların tıkanmasını önler. Tıkanmayı önlemek için periyodik kimyasal yıkamalar (asit uygulamaları) ve gerektiğinde klorlama işlemi de yapılabilir. Basınç düzenleyiciler ve geri akış önleyiciler ise sistemde istenilen basınç aralığının korunmasını sağlar ve özellikle geniş alanlarda homojen su dağılımı için kritik öneme sahiptir.

Yüzey altı damla sulamanın çalışma prensibi, suyun toprakta kılcallık (kapilarite) yoluyla yayılmasına dayanır. Su, damlatıcıdan çıktıktan sonra toprak içinde hem yatay hem dikey yönde hareket ederek kök bölgesinde huni veya elipsoidal bir nem hacmi oluşturur. Bu hacmin büyüklüğü ve şekli, toprak dokusu ile damlatıcı debisine bağlı olarak değişir:

- Kumlu topraklarda su daha çok düşey yönde ilerler,

- Killi topraklarda ise su yatay yönde daha geniş bir alana yayılır.

Bu nedenle sistem tasarımında toprak özellikleri dikkate alınmalı, lateral aralıkları ve damlatıcı mesafeleri toprak dokusuna göre optimize edilmelidir.

YADS'nin en önemli avantajlarından biri, kök bölgesinde sürekli bir nem seviyesi sağlayarak su stresini azaltmasıdır. Toprak yüzeyi kuru kaldığından buharlaşma kayıpları minimize olur ve su daha uzun süre kök zonunda tutulur. Bu durum hem su kullanım verimliliğini artırır hem de bitkinin suya erişimini sürekli kılar. Ayrıca bitki, toprak yüzeyinde su bulunmadığından yabancı ot rekabetiyle daha az karşılaşır; böylece suyun tamamına yakını bitki tarafından kullanılır. Yüzeyaltı uygulamalar, yüzey damla sulamaya göre kök gelişimini daha derine yönlendirerek bitkinin kuraklık dönemlerinde daha dayanıklı olmasını sağlar.

Fertigasyon (sıvı gübre uygulaması), yüzey altı damla sulama sistemlerinde yüksek hassasiyetle uygulanabilir (Mahendran ve ark., 2013). Gübreler kök bölgesine doğrudan ulaşır, yüzeye çıkmadığından kayıplar azalır ve bitkinin besin elementlerini kullanma etkinliği artar. Bu, özellikle su ve gübre maliyetlerinin yükseldiği iklim değişikliği koşullarında önemli bir ekonomik avantaj sunar. YADS aynı zamanda yüzeyde su birikimini önlediği için hastalık ve patojen oluşumunu azaltır; nem kaynaklı fungal etkilerin görülme sıklığı düşer.

4. Yüzey Altı Sulamanın Su Kullanım Etkinliği ve İklim Değişikliğine Uyum Kapasitesi

İklim değişikliğinin tarımsal su yönetimi üzerindeki baskıları artarken, suyu daha verimli kullanan ve iklim stresine karşı dayanıklı üretim sistemlerinin geliştirilmesi zorunlu hale gelmiştir (Rockström ve ark., 2009). Bu bağlamda yüzey altı damla sulama sistemleri (YADS), hem su kullanım etkinliğini artırma hem de artan kuraklık riski altında sürdürülebilir üretimi destekleme kapasitesiyle dikkat çekmektedir (Thompson, 2009). Suyun doğrudan kök bölgesine uygulanması, yüzey kaynaklı kayıpların minimize edilmesi ve toprak-bitki etkileşimlerinin kontrollü şekilde yönetilmesi, YADS'yi iklim değişikliğine uyum stratejilerinin merkezinde konumlandırmaktadır.

Yüzey altı damla sulama sistemlerinin iklim uyumu açısından en kritik avantajı, su uygulama randımanını %90–95 seviyelerine kadar

yükseltebilmesidir (Camp ve ark., 2000). Geleneksel yüzey sulama yöntemlerinde bu oran %40'a kadar değişirken (Chávez ve ark., 2020), yüzey damla sulamada ise buharlaşma ve yüzey akışı nedeniyle verimlilik %70–85 civarındadır. YADS'de suyun doğrudan kök bölgesine iletilmesi sayesinde yüzeye çıkışı olmadığından buharlaşma kayıpları en düşük düzeye iner. Bu özellik, yükselen sıcaklıklar ve artan buharlaşma-terleme oranlarının hâkim olduğu iklim değişikliği koşullarında su tasarrufu açısından büyük önem taşır.

YADS'nin su kullanım etkinliği üzerindeki bir diğer önemli etkisi, kök bölgesinde optimum nem düzeyini sürekli sağlayabilme kapasitesidir. Toprak yüzeyi kuru kaldığı için su toprak profilinde daha uzun süre tutulur ve kök bölgesinde dengeli bir nem dağılımı sağlanır. Kontrollü sulama sayesinde bitki ani su stresi yaşamaz ve büyüme dönemlerinde daha stabil bir fizyolojik denge sürdürür. Bitkinin daha derine kök salması, hem kurak dönemlere dayanıklılığı artırır hem de toprak içindeki suyun daha etkin kullanılmasına olanak tanır. Bu özellik, özellikle yarı kurak bölgelerde su erişiminin dalgalı olduğu koşullarda tarımsal verim istikrarını güçlendiren bir avantaj sunar.

Yüzey altı sulama, yüksek buharlaşma miktarlarının görüldüğü sıcak dönemlerde su kaybını minimize eden en etkili yöntemlerden biridir (Al-Ghobari ve Dewidar, 2018). Yüzey damla sulamada suyun toprağın üst katmanlarına uygulanması nedeniyle yüksek sıcaklıkta günlük buharlaşma kayıpları artar; oysa yüzey altı sulamada bu kayıplar toprak örtüsü nedeniyle büyük ölçüde engellenir. Model çalışmaları, YADS kullanımında buharlaşma kaybının yüzey damla sulamaya göre daha düşük olduğunu göstermektedir (Martínez ve Reca, 2014). Bu durum, iklim değişikliğinin neden olduğu buharlaşma artışına karşı doğrudan bir adaptasyon faydası sağlar.

Yüzey altı damla sulama sistemleri, aynı zamanda bitki su tüketimini (ET_c) optimize etme potansiyeli ile de iklim uyumuna katkı sağlar. ET_c, yalnızca iklim koşullarına değil, aynı zamanda toprak nemi, kök dağılımı ve bitki fizyolojisine bağlı olarak değişen dinamik bir parametredir. YADS, kök bölgesinde daha stabil bir nem sağlayarak ET_c'deki dalgalanmaları azaltır ve su kullanım etkinliğini yükseltir. Bu durum, artan sıcaklıklar ve düzensiz yağışlarla birlikte ET değerlerinin yükseldiği modern iklim koşullarında oldukça önemli bir avantajdır.

İklim değişikliğinin beraberinde getirdiği bir diğer sorun, toprak tuzluluğunun artması ve yüzeyde iyon birikimi riskidir. Yüzeyden sulama

yapılan sistemlerde suyun buharlaşmasıyla birlikte tuzlar yüzeyde birikerek bitki kök bölgesinde tuzluluk stresine yol açabilir. Yüzey altı sulamada suyun yeraltından uygulanması, tuzların yüzeye taşınmasını sınırlamakta ve kök bölgesinde tuzluluk birikimini engellemektedir. Bu özellik, özellikle kurak iklimlerde artan tuzluluk riskine karşı yüzey altı sulamayı stratejik bir çözüm haline getirir.

YADS, yalnızca su tasarrufu sağlamaz; aynı zamanda iklim değişikliğine karşı verim istikrarını artıran bir üretim modeli sunar. Toprakta optimum nem koşulu sağlandığında bitki, sıcaklık dalgalanmaları veya kısa süreli kuraklık dönemlerinde daha az stres yaşar. Bu durum hem verim miktarını hem de kalite parametrelerini olumlu yönde etkiler. Birçok saha çalışması, yüzey altı sulamanın yüzey damla sulamaya (Mattar ve ark., 2020) veya yağmurlama sulamaya kıyasla (Valentín ve ark., 2020) daha yüksek verim sağladığını ve verim varyansını azalttığını ortaya koymuştur.

İklim değişikliğine uyum açısından yüzey altı sulamanın sunduğu bir diğer avantaj, enerji ve gübre kullanımında sağladığı tasarruftur. Fertigasyon uygulamalarında besin maddeleri doğrudan kök bölgesine taşındığı için gübreleme verimliliği artar, kayıplar azalır ve bitkinin besin elementi kullanımı optimize edilir. Enerji gereksiniminin düşük basınçla karşılanabilmesi, hem maliyetleri düşürür hem de daha düşük karbon ayak izi ile iklim dostu üretim yapılmasına olanak tanır.

Sonuç olarak yüzey altı damla sulama, artan sıcaklıklar, düşen yağış miktarları ve yükselen evapotranspirasyon nedeniyle giderek zorlaşan iklim koşullarında suyun korunmasını, verimliliğin devamlılığını ve sürdürülebilir tarımsal üretimi destekleyen etkili bir adaptasyon stratejisi sunmaktadır. Su kullanım etkinliğindeki belirgin artış, buharlaşma kayıplarının minimize edilmesi, tuzluluk yönetimi, enerji ve gübre tasarrufu gibi avantajları sayesinde YADS, iklim değişikliğinin tarımsal üretime yönelik riskleri karşısında uzun vadeli, güçlü ve bilimsel temelli bir çözüm olarak konumlanmaktadır.

5. Yüzey Altı Damla Sulamanın Toprak–Bitki–Atmosfer Sistemine Etkileri

Yüzey altı damla sulama sistemleri (YADS), suyun doğrudan kök bölgesine uygulanmasını sağlayarak yalnızca su verimliliğini artırır (Yang ve ark., 2020). Aynı zamanda toprak–bitki–atmosfer etkileşimlerini dönüştürerek

tarımsal üretimin fizyolojik, ekolojik ve mikroklimatik süreçlerinde kapsamlı iyileşmeler sağlar. İklim değişikliğinin etkilerinin giderek belirginleştiği günümüz koşullarında, bitkinin suya erişimi, kök davranışları, toprak nem dengesi ve mikroklima dinamikleri üzerinde olumlu etkiler yaratan bu sistem, tarımsal dayanıklılık açısından stratejik bir araç olarak değerlendirilmektedir.

5.1. Toprak Sistemi Üzerine Etkiler

YADS'nin toprak sistemi üzerindeki en önemli etkisi, toprak nem profilini homojen ve stabil bir şekilde yönetmesidir (Dukes ve ark., 2025). Suyun yüzeye çıkmaması, üst toprak tabakasındaki buharlaşmayı önemli ölçüde azaltır ve nemin toprak profilinde daha uzun süre tutulmasını sağlar. Bu sayede toprağın su tutma kapasitesi etkin biçimde kullanılır ve nem kayıpları minimize edilir. Toprak içinde suyun kapillar hareketi ile kök bölgesinde geniş bir nem hacmi oluşur; bu hacim, bitkinin ihtiyaç duyduğu süre boyunca suya erişimini kolaylaştırır.

Ayrıca yüzey altı sulama, toprak hareketsizliğini koruyarak fiziksel yapıyı iyileştirir. Yüzey sulamada görülen yüzey kabuklanması, infiltrasyon kayıpları veya sıkışma problemleri YADS'de minimize olur. Toprak yüzeyinin kuru kalması, yağmur sonrası kabuklanmayı ve yüzey akışını azaltır, böylece erozyon riski düşer.

YADS toprak tuzluluğu üzerinde de olumlu etki yapar (Hanson ve May, 2004). Yüzeyde su birikmediği için tuzların yüzeyde birikmesi engellenir, tuzluluk riski minimize edilir ve iyon hareketi daha dengeli biçimde yönetilir. Özellikle kurak bölgelerde artan tuzluluk tehdidine karşı yüzey altı sulama, bitki kök bölgesinde daha uygun bir iyonik denge sağlar.

5.2. Bitki Sistemi Üzerine Etkiler

YADS'nin en dikkat çekici etkilerinden biri, kök gelişimini derine ve geniş bir alana yönlendirmesidir (Camp ve Lamm, 2003). Toprak yüzeyinde su bulunmaması, köklerin yüzeye yönelmesini engeller ve daha derine doğru büyümelerini teşvik eder. Bu, bitkinin kurak dönemlerde toprak altındaki daha derin nem depolarına ulaşmasını kolaylaştırır ve su stresine dayanımını artırır.

Kök bölgesinde stabil nem bulunması, bitki fizyolojik süreçlerinde denge sağlar (Comas ve ark., 2010). Fotosentetik aktivite, hücre büyümesi ve stomaların davranışı daha kararlı bir ritim kazanır (Allen ve Percy, 2000). Bitkide ani su stresine bağlı stomal kapanmalar daha az görülür; bu durum

karbon alımını ve dolayısıyla biyokütle üretimini olumlu yönde etkiler. Suyun doğrudan kök bölgesine uygulanması, besin elementi alımını da optimize eder. Fertigasyon uygulamaları sayesinde besin maddeleri doğrudan kök bölgesine verilir, besin kayıpları minimize olur ve bitki gelişimi daha homojen bir hâl alır. Ayrıca yüzeyde su bulunmaması, yabancı ot rekabetini azaltarak bitkinin su ve besin kaynaklarına erişimini artırır.

5.3. Atmosfer Sistemi Üzerine Etkiler

YADS'nin atmosfer bileşeni üzerindeki etkisi, esas olarak buharlaşma-terleme süreçleri ve mikroklima düzenlemeleri üzerinden gerçekleşir. Toprak yüzeyi kuru kaldığı için buharlaşma kayıpları önemli ölçüde azalır (Camp, 1998). ET'nin buharlaşma bileşeninin küçülmesi, toplam su tüketiminin daha verimli kullanılmasını sağlar ve bitkide sıcaklık stresine karşı daha iyi bir denge oluşturur.

Buna ek olarak, kök bölgesinde suyun kontrollü ve derine uygulanması, toprak sıcaklığı profilini stabilize eder. Yüzey sulamada görülen ani yüzey serinlemeleri ve hızlı ısınmalar YADS'de görülmez; bu durum kök bölgesinde daha stabil bir termal ortam oluşturur. Kök sıcaklığındaki bu stabilite, besin alımı ve kök büyümesi açısından büyük önem taşır. YADS aynı zamanda bölgesel mikroklima üzerinde de etkilidir (Camp, 1998). Yüzey sulamada suyun yüzeye uygulanması, kısa süreli soğutma etkisi yaratırken buharlaşma yoluyla nem oranını artırabilir; oysa yüzey altı sulamada bu etki görülmez. Bu durum özellikle sera ve tünel ortamlarında nem kaynaklı hastalık riskini azaltır.

5.4. Toprak–Bitki–Atmosfer Etkileşiminin Bütüncüllüğü

YADS'nin en büyük üstünlüğü, toprak, bitki ve atmosfer bileşenlerinin birbirini destekleyecek biçimde optimize edilmesidir (Lamm, 2002). Toprakta daha stabil nem, bitkide daha stabil fizyolojik süreçlere; bu ise atmosferik koşullara karşı daha yüksek dayanıklılığa yol açar. Bu bütüncül yaklaşım, iklim değişikliğinin neden olduğu sıcaklık artışı, yağış düzensizliği ve su kıtlığı koşullarında üretimin sürdürülebilirliğini destekleyen stratejik bir mekanizma oluşturur.

Sonuç olarak yüzey altı damla sulama, toprak–bitki–atmosfer üçlüsünün her bir bileşeninde olumlu etkiler yaratarak tarımsal üretimde hem fizyolojik hem ekolojik hem de iklimsel dayanıklılığı artırmaktadır. Bu sistem, iklim

değişikliği koşullarında optimize edilmiş doğal süreç yönetimiyle tarımsal adaptasyonun en etkili araçlarından biri olarak öne çıkmaktadır.

6. İklim Değişikliği Senaryolarında Yüzey Altı Sulamanın Performansı

İklim değişikliği senaryoları, gelecekte yağış miktarlarının azalacağı, sıcaklıkların artacağı ve evapotranspirasyon (ET) oranlarının yükseleceği yönünde güçlü göstergeler sunmaktadır (Dai ve ark., 2018). Bu değişimler, tarımsal su talebinin artmasına, büyüme döneminde su stresinin şiddetlenmesine ve üretim istikrarının azalmasına yol açmaktadır. Bu nedenle, suyu daha verimli kullanan sulama teknolojilerinin iklim projeksiyonları altındaki performansını değerlendirmek, sürdürülebilir su yönetimi açısından kritik öneme sahiptir. Yüzey altı damla sulama sistemleri (YADS), iklim değişikliği senaryoları altında en yüksek adaptasyon kapasitesine sahip sulama yöntemlerinden biri olarak ortaya çıkmaktadır.

6.1. RCP ve SSP Senaryolarında Su Talebindeki Değişim

IPCC tarafından geliştirilen RCP (Representative Concentration Pathways) ve SSP (Shared Socioeconomic Pathways) senaryoları, gelecekteki iklim koşullarını farklı emisyon düzeylerine göre modellemektedir. RCP4.5 orta emisyon senaryosunu ve RCP8.5 ise yüksek emisyon senaryosunu temsil etmektedir (Xue ve Song, 2020).

Orta ve yüksek emisyon senaryolarında yıllık ortalama sıcaklıklarda 1.5–2°C artış ön görülmektedir (Wang ve ark., 2017). Bu artış, bitkilerin daha fazla suya ihtiyaç duyacağı anlamına gelmektedir. Yüzey sulama ve yüzey üstü damla sulama sistemlerinde artan buharlaşma nedeniyle daha yüksek su kayıpları yaşanması beklenirken, YADS bu kayıpları minimize ettiği için gelecekte artacak su talebine karşı daha dayanıklı uygun bir sulama alternatifidir.

6.2. Artan ET_c Değerleri Karşısında Yüzey Altı Sulamanın Üstünlüğü

Gelecekte ET_c (bitki su tüketimi) değerlerinin artması, sulama ihtiyacının geleneksel yöntemlerle karşılanmasını daha zor hale getirecektir. YADS bu noktada iki temel avantaj sunar:

1. Buharlaşma kayıplarını minimize ederek toplam ET'yi düşürür.

Toplam ET; buharlaşma (E) ve terleme (T) bileşenlerinden oluşur.

- Yüzey damla sulamada E oranı yüksektir.
- Yüzey altı sulamada E neredeyse sıfıra yakındır.

Böylece iklim senaryolarıyla artan ETc'nin önemli bir kısmı kontrol altına alınabilir.

2. Kök bölgesinde nem stabilitesini artırarak su kullanım etkinliğini yükseltir.

Artan sıcaklıklarda dengesiz toprak nemi su stresine yol açarken, YADS homojen nem sağlayarak ETc'nin bitki üzerinde olumsuz etkilerini hafifletir.

Çeşitli modelleme çalışmaları, YADS kullanımının gelecekteki iklim koşullarında %20–40 daha az sulama suyu gerektirdiğini ve su kullanım etkinliğini belirgin şekilde artırdığını göstermektedir (Al-Ghobari ve Dewidar, 2018).

6.3. Kuraklık Senaryolarında YADS Performansı

Kuraklık; meteorolojik, tarımsal ve hidrolojik bileşenleri olan çok yönlü bir süreçtir. RCP8.5 gibi yüksek emisyon senaryolarında:

- Kurak dönemlerin süresinin uzadığı,
- Yağışların daha düzensiz hale geldiği,
- Toprak neminin daha hızlı azaldığı

belirlenmiştir. YADS bu şartlarda aşağıdaki uyum avantajlarını sunar:

- Su yüzeye çıkmadığı için buharlaşma kaybı çok düşük seviyede kalır.
- Toprak yüzeyi kuru kaldığından yabancı ot rekabeti azalır.
- Kök gelişimi derinleştiği için kurak dönemlerde toprak altı suyu daha iyi kullanılır.
- Nem değişkenliği düşük olduğu için bitki stres eşiği düşer.

Bu özellikler, YADS'yi kurak dönemlerde yüksek performans gösteren bir sulama sistemi haline getirir.

6.4. YADS'nin Aşırı İklim Olaylarına Karşı Dayanıklılığı

İklim senaryoları, yalnızca kuraklığı değil, aynı zamanda:

- Kısa süreli şiddetli yağışlar,
- Ani sıcak hava dalgaları,

- Rüzgâr kaynaklı buharlaşma artışları gibi aşırı iklim olaylarının artacağını göstermektedir.

YADS bu koşullarda diğer sistemlere kıyasla daha yüksek dayanım sergiler:

- Yüzeyde su olmadığı için suyun yağışla karışması veya akışa geçmesi söz konusu değildir.
- Rüzgârın su dağılımı üzerindeki etkisi ortadan kalkar.
- Sıcak hava dalgalarında bile kök bölgesinde nem kaybı düşük kalır.

Bu nedenle YADS, aşırı iklim olayları karşısında sürdürülebilir su yönetimi için uzun vadeli bir adaptasyon stratejisi sağlar.

6.5. İklim Projeksiyonlu Model Çalışmalarında Elde Edilen Bulgular

Türkiye, Orta Doğu, Avustralya ve ABD’de yapılan modelleme çalışmalarında YADS’nin iklim senaryoları altında sağladığı faydalar ortak olarak şu şekilde özetlenmektedir (Camp, 1998):

- Sulama suyu ihtiyacında azalma
- Verim artışında iyileşme
- Verim varyansında ve stres kaynaklı kayıplarda belirgin düşüş
- Tuzluluk riskinin kontrolünde üstün performans
- Sulama zamanlamasında daha geniş esneklik
- Yüksek sıcaklık dönemlerinde kök bölgesi nem stabilitesi

Bu bulgular, YADS’nin gelecekteki iklim koşullarında geleneksel sulama yöntemlerine kıyasla daha sürdürülebilir olduğunu açıkça ortaya koymaktadır.

7. Yüzey Altı Sulamada Karşılaşılan Sorunlar ve Yönetim Stratejileri

Yüzey altı damla sulama sistemleri (YADS), su kullanım etkinliği, buharlaşma kayıplarının azaltılması ve kök bölgesinde homojen nem dağılımı gibi önemli avantajlar sunmakla birlikte, doğru tasarlanmadığında veya uygun şekilde yönetilmediğinde çeşitli teknik ve agronomik sorunlarla karşılaşabilmektedir. Bu sorunların büyük bir kısmı sistem tasarımı, filtrasyon yönetimi, toprak özellikleri, kök davranışları ve bakım süreçleri ile ilişkilidir. YADS’nin iklim değişikliğine uyum açısından sürdürülebilir bir çözüm olarak

işlev görebilmesi için, karşılaşılan problemlerin erken aşamada doğru teşhis edilmesi ve etkili yönetim stratejilerinin uygulanması kritik öneme sahiptir.

7.1. Damlatıcı Tıkanması (Emitter Clogging)

YADS’de en sık karşılaşılan sorunlardan biri damlatıcıların tıkanmasıdır (Petit ve ark., 2022). Tıkanma; organik madde, kil-partikülleri, mangan-demir birikimi, biyofilm oluşumu veya kireçlenme gibi nedenlerle ortaya çıkabilir. Tıkanma suyun debisini düşürerek lateral boyunca homojen su dağılımını bozar ve bitki gelişiminde düzensizliklere yol açar.

Yönetim stratejileri:

- Yüksek kaliteli filtrasyon sistemlerinin kullanılması (disk, kum veya elek filtre).
- Düzenli asit uygulamaları ile kireç ve karbonat birikiminin giderilmesi.
- Biyolojik tıkanmalara karşı klorlama veya periyodik kimyasal yıkama.
- Sulama suyunun EC, pH ve Fe/Mn analizlerinin rutin olarak yapılması.

Bu stratejiler, tıkanmayı minimize ederek sistemin uzun ömürlü ve yüksek verimle çalışmasını sağlar.

7.2. Kök Girişimi (Root Intrusion)

Bazı bitki türlerinde kökler damlatıcılardan çıkan suyu algılayarak YADS laterallerine doğru büyüyebilir (Mmolawa ve Or, 2000). Bu durum damlatıcı girişlerinin kapanmasına ve sistem performansının azalmasına neden olabilir.

Yönetim stratejileri:

- Bitki türüne uygun damlatıcı bariyer teknolojilerinin kullanılması (herbisit kaplı damlatıcılar gibi).
- Valfli damlatıcılar
- Sulama zamanlamasının kök büyüme dönemlerine göre optimize edilmesi.
- Lateral derinliğinin bitki türüne uygun belirlenmesi (örn. derin köklü bitkilerde daha fazla derinlik).

Kök girişimi, doğru teknolojik önlemlerle büyük ölçüde önlenabilen bir sorundur.

7.3. Tuz Birikimi (Salt Accumulation)

YADS yüzeyi sulamadığından tuzlar yüzeyde birikebilir (Roberts ve ark., 2008). Bu durum genel olarak kök bölgesini etkilemese de yağışsız dönemlerde tuz zonunun aşağıya taşınması yetersiz olabilir.

Yönetim stratejileri:

- Sezon içinde belirli dönemlerde yüzey yıkama (leaching) sulamaları uygulanması.
- Düşük EC'li su kullanılması ve tuzluluk analizinin düzenli yapılması.
- Toprak profilinin izlenmesi (EC sensörleri veya periyodik toprak analizleri).

Kurak iklimlerde bu sorun önem kazanmakla birlikte, doğru yıkama stratejileri ile kontrol altına alınabilir.

7.4. Lateral Derinliği ve Yerleşimi ile İlgili Sorunlar

YADS'nin etkinliği, laterallerin doğru derinlikte ve doğru aralıklarla yerleştirilmesine bağlıdır. Yanlış derinlik, suyun kök bölgesinin altında veya çok üzerinde birikmesine yol açabilir (Enciso ve ark., 2005).

Yönetim stratejileri:

- Toprak tekstürü, organik madde ve bitki tipi dikkate alınarak derinliğin optimize edilmesi (genelde 20–40 cm).
- Ağır killi topraklarda daha sık, kumlu topraklarda daha derin yerleşim tercih edilmesi.
- Yatay ve dikey su hareketinin modellenmesi için CROPWAT veya HYDRUS gibi programların kullanılması.

Bu planlama, kök bölgesinin doğru şekilde sulanmasını garanti eder.

7.5. Sistemin İzlenmesi ve Bakım Eksiklikleri

YADS'de sorunların fark edilmesi yüzeyde gözle görülmez; dolayısıyla izleme ve bakım eksiklikleri performans kaybına yol açabilir (Enciso-Medina ve ark., 2011).

Yönetim stratejileri:

- Basınç ölçerler, debi ölçerler ve toprak nem sensörleri ile düzenli izleme.
- Lateral hatların sezon sonu hava veya su basıncı ile temizlenmesi.
- Otomasyon sistemlerinde alarm mekanizmalarının kullanılması.

Bu stratejiler, görünmeyen sorunların erken aşamada tespit edilmesine olanak tanır.

7.6. Hayvan Zararı ve Mekanik Hasar

Kemirgenler, tarım makineleri veya derin sürüm gibi işlemler yüzey altı borulara zarar verebilir (Sorensen, 2007).

Yönetim stratejileri:

- Derin sürüm yapılan alanlarda uygun işleme derinliğinin belirlenmesi.
- Kemirgenlere karşı koruyucu bariyerlerin kullanılması.
- Tarlada sabit işleme güzergâhlarının planlanması.

7.7. Ekonomik ve İşletme Kaynaklı Zorluklar

YADS, başlangıç yatırım maliyeti yüksek olan bir sistemdir (Wilde ve ark., 2009). Ayrıca çiftçilerin sistem hakkında yeterli bilgiye sahip olmaması da kullanımını sınırlandırabilir.

Yönetim stratejileri:

- Uzun vadeli ekonomik analizler ile sistemin geri dönüş süresinin planlanması.
- Çiftçi eğitim programları ve demonstrasyon sahalarının kurulması.
- Devlet destekleri, sulama modernizasyon hibeleri gibi politik araçların uygulanması.

8. Sonuç ve Politika Önerileri

İklim değişikliği, tarımsal su yönetimi üzerinde benzeri görülmemiş baskılar oluşturarak su kıtlığını derinleştirmekte, yağış rejimlerini düzensizleştirmekte ve kuraklık sıklığını artırmaktadır. Bu koşullar altında geleneksel sulama sistemleri su kayıplarını azaltmakta yetersiz kalmakta ve sürdürülebilir tarımsal üretimi destekleyememektedir. Yüzey altı damla sulama sistemleri (YADS), suyu doğrudan kök bölgesine iletmesi, buharlaşma kaynaklı

kayıpları en aza indirmesi ve toprak–bitki–atmosfer etkileşimlerini optimize etmesi nedeniyle iklim değişikliğine uyumda güçlü bir çözüm olarak öne çıkmıştır. Bu kitap bölümünde ele alınan teknik, fizyolojik, mikroklimatik ve yönetsel avantajlar, YADS’nin geleceğin iklim şartlarında tarımsal dayanıklılık için kritik bir araç olduğunu açıkça göstermektedir. YADS’nin iklim değişikliğine uyum kapasitesini güçlendiren temel unsurlar arasında; su kullanım etkinliğini %90’ın üzerine çıkaran hassas su uygulaması, kök bölgesinde stabil nem sağlayarak bitki stresini azaltması, tuzluluk riskini düşürmesi, enerji ve gübre kullanımında tasarruf sağlaması ve aşırı sıcaklık veya kuraklık dönemlerinde verim istikrarını koruması yer almaktadır. RCP ve SSP senaryolarına dayalı projeksiyonlar, gelecekte evapotranspirasyon değerlerinde artış, yağış miktarlarında azalma ve su talebinde yükseliş olacağını ortaya koymakta; bu koşullar altında yüzey altı sulamanın performansının diğer yöntemlere kıyasla daha üstün olacağını doğrulamaktadır. Ayrıca YADS, ekstrem iklim olaylarına karşı daha dayanıklı bir sulama yaklaşımı sunarak tarımsal üretimin sürdürülebilirliğine stratejik bir katkı sağlamaktadır. Bu bütünsel değerlendirme, YADS’nin sadece teknik bir sulama sistemi değil, aynı zamanda iklim uyumlu tarım politikalarının merkezinde yer alması gereken bir stratejik su yönetimi aracıdır. Ancak sistemin tüm potansiyelinin hayata geçirilebilmesi için doğru politikaların geliştirilmesi, çiftçi eğitimlerinin yaygınlaştırılması ve yatırım destek mekanizmalarının oluşturulması gerekmektedir.

Yüzey altı damla sulama sistemlerinin (YADS) yaygınlaştırılabilmesi için politika düzeyinde modern sulama yatırımlarına yönelik hibe ve düşük faizli kredilerin güçlendirilmesi, basınçlı sulama projelerinde YADS’nin önceliklendirilmesi ve çiftçilere filtrasyon yönetimi, fertigasyon, sensör kullanımı ve tıkanma önleme gibi konularda kapsamlı yayım–eğitim programlarının sunulması gerekmektedir. Ayrıca havza bazlı su tahsis politikalarında su verimliliği yüksek sistemlere öncelik verilmesi, performansa dayalı su tahsisi kriterlerinin geliştirilmesi ve yeraltı suyu kullanımının düşük tüketimli yöntemlerle desteklenmesi stratejik bir önem taşır. YADS’nin etkinliğini artırmak için toprak nem sensörleri, IoT tabanlı otomasyon, ET tahmin modelleri ve uzaktan algılama teknolojilerinin tarım sektörüne entegre edilmesi; kurak bölgelerde artan tuzluluk riskine karşı düzenli izleme programları ile toprak–su kalite haritalarının oluşturulması ve gerektiğinde

yüzey yıkama sulamalarının teşvik edilmesi kritik görülmektedir. Son olarak, iklim değişikliğine uyum stratejilerinde YADS ve hassas sulama teknolojilerinin merkezde konumlandırılması, düşük su tüketimli tarım uygulamalarının yaygınlaştırılmasını destekleyen bütüncül bir politika yaklaşımı gerektirir.

Kaynaklar

- Abdoli, S., Farrokhian Firouzi, A., Abbasi, F., & Naseri, A. A. (2022). Heat, moisture, and salt transport in the soil profile under surface and subsurface drip irrigation methods in the presence of shallow saline groundwater. *Arabian Journal of Geosciences*, 15(22), 1666.
- Abouziena, H. F., El-Saeid, H. M., & Amin, A. A. E. (2014). Water loss by weeds: a review. *International Journal of ChemTech Research*, 7(01), 323-336.
- Ahmed, Z., Gui, D., Murtaza, G., Yunfei, L., & Ali, S. (2023). An overview of smart irrigation management for improving water productivity under climate change in drylands. *Agronomy*, 13(8), 2113.
- Al-Ghobari, H. M., & Dewidar, A. Z. (2018). Integrating deficit irrigation into surface and subsurface drip irrigation as a strategy to save water in arid regions. *Agricultural Water Management*, 209, 55-61.
- Allen, M. T., & Pearcy, R. W. (2000). Stomatal behavior and photosynthetic performance under dynamic light regimes in a seasonally dry tropical rain forest. *Oecologia*, 122(4), 470-478.
- Arnell, N. W. (1999). Climate change and global water resources. *Global environmental change*, 9, S31-S49.
- Ben-Gal, A., Lazorovitch, N., & Shani, U. (2004). Subsurface drip irrigation in gravel-filled cavities. *Vadose Zone Journal*, 3(4), 1407-1413.
- Camp, C. R. (1998). Subsurface drip irrigation: A review. *Transactions of the ASAE*, 41(5), 1353-1367.
- Camp, C. R., & Lamm, F. R. (2003). Irrigation systems, subsurface drip. *Encyclopedia Water Science*, 560-564.
- Camp, C. R., Lamm, F. R., Evans, R. G., & Phene, C. J. (2000, November). Subsurface drip irrigation—Past, present and future. In *Proc. Fourth Decennial Nat'l Irrigation Symp.*, Nov (pp. 14-16).
- Chávez, C., Limón-Jiménez, I., Espinoza-Alcántara, B., López-Hernández, J. A., Bárcenas-Ferruzca, E., & Trejo-Alonso, J. (2020). Water-use efficiency and productivity improvements in surface irrigation systems. *Agronomy*, 10(11), 1759.
- Comas, L. H., Bauerle, T. L., & Eissenstat, D. M. (2010). Biological and environmental factors controlling root dynamics and function: effects of

- root ageing and soil moisture. *Australian Journal of Grape and Wine Research*, 16, 131-137.
- Corwin, D. L. (2021). Climate change impacts on soil salinity in agricultural areas. *European Journal of Soil Science*, 72(2), 842-862.
- Dai, A., Zhao, T., & Chen, J. (2018). Climate change and drought: a precipitation and evaporation perspective. *Current Climate Change Reports*, 4(3), 301-312.
- De Fraiture, C., & Wichelns, D. (2010). Satisfying future water demands for agriculture. *Agricultural water management*, 97(4), 502-511.
- Dore, M. H. (2005). Climate change and changes in global precipitation patterns: what do we know?. *Environment international*, 31(8), 1167-1181.
- Dukes, M. D., & Scholberg, J. M. (2005). Soil moisture controlled subsurface drip irrigation on sandy soils. *Applied Engineering in Agriculture*, 21(1), 89-101.
- Enciso, J. M., Colaizzi, P. D., & Multer, W. L. (2005). Economic analysis of subsurface drip irrigation lateral spacing and installation depth for cotton. *Transactions of the ASAE*, 48(1), 197-204.
- Enciso-Medina, J., Multer, W. L., & Lamm, F. R. (2011). Management, maintenance, and water quality effects on the long-term performance of subsurface drip irrigation systems. *Applied engineering in agriculture*, 27(6), 969-978.
- Hanson, B., & May, D. (2004). Effect of subsurface drip irrigation on processing tomato yield, water table depth, soil salinity, and profitability. *Agricultural water management*, 68(1), 1-17.
- Hanson, B., Hopmans, J. W., & Šimůnek, J. (2008). Leaching with subsurface drip irrigation under saline, shallow groundwater conditions. *Vadose Zone Journal*, 7(2), 810-818.
- Iglesias, E., Garrido, A., & Gómez-Ramos, A. (2003). Evaluation of drought management in irrigated areas. *Agricultural Economics*, 29(2), 211-229.
- Kumar, R., & Gautam, H. R. (2014). Climate change and its impact on agricultural productivity in India. *Journal of Climatology & Weather Forecasting*, 2(1), 1-3.

- Lamm, F. R. (2002, December). Advantages and disadvantages of subsurface drip irrigation. In *International meeting on advances in drip/micro irrigation, Puerto de La Cruz, Tenerife, Canary Islands* (pp. 1-13).
- Li, Y., Ye, W., Wang, M., & Yan, X. (2009). Climate change and drought: a risk assessment of crop-yield impacts. *Climate research*, 39(1), 31-46.
- Loucks, D. P. (2000). Sustainable water resources management. *Water international*, 25(1), 3-10.
- Mahendran, P. P., Yuvaraj, M., Parameswari, C., Gurusamy, A., & Krishnasamy, S. (2013). Enhancing growth, yield and quality of banana through subsurface drip fertigation. *International Journal of Chemical, Environmental & Biological Sciences*, 1(2), 391-94.
- Malhi, G. S., Kaur, M., & Kaushik, P. (2021). Impact of climate change on agriculture and its mitigation strategies: A review. *Sustainability*, 13(3), 1318.
- Martínez, J., & Reca, J. (2014). Water use efficiency of surface drip irrigation versus an alternative subsurface drip irrigation method. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 140(10), 04014030.
- Mattar, M. A., Zin El-Abedin, T. K., Al-Ghobari, H. M., Alazba, A. A., & Elansary, H. O. (2021). Effects of different surface and subsurface drip irrigation levels on growth traits, tuber yield, and irrigation water use efficiency of potato crop. *Irrigation Science*, 39(4), 517-533.
- Mmolawa, K., & Or, D. (2000). Root zone solute dynamics under drip irrigation: A review. *Plant and soil*, 222(1), 163-190.
- Pereira, L. S., & Gonçalves, J. M. (2018). Surface irrigation. In *Oxford research encyclopedia of environmental science*.
- 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.
- Piao, S., Liu, Q., Chen, A., Janssens, I. A., Fu, Y., Dai, J., ... & Zhu, X. (2019). Plant phenology and global climate change: Current progresses and challenges. *Global change biology*, 25(6), 1922-1940.
- Pimentel, D., Berger, B., Filiberto, D., Newton, M., Wolfe, B., Karabinakis, E., ... & Nandagopal, S. (2004). Water resources: agricultural and environmental issues. *BioScience*, 54(10), 909-918.

- Qadir, M., Ghafoor, A., & Murtaza, G. (2000). Amelioration strategies for saline soils: a review. *Land Degradation & Development*, 11(6), 501-521.
- Ragab, R., & Prudhomme, C. (2002). Sw—soil and Water: climate change and water resources management in arid and semi-arid regions: prospective and challenges for the 21st century. *Biosystems engineering*, 81(1), 3-34.
- Rengasamy, P., Chittleborough, D., & Helyar, K. (2003). Root-zone constraints and plant-based solutions for dryland salinity. *Plant and Soil*, 257(2), 249-260.
- Roberts, T. L., White, S. A., Warrick, A. W., & Thompson, T. L. (2008). Tape depth and germination method influence patterns of salt accumulation with subsurface drip irrigation. *Agricultural Water Management*, 95(6), 669-677.
- Rockström, J., Falkenmark, M., Karlberg, L., Hoff, H., Rost, S., & Gerten, D. (2009). Future water availability for global food production: The potential of green water for increasing resilience to global change. *Water resources research*, 45(7).
- Rogers, D. H., Lamm, F. R., & Alam, M. (2003). Subsurface drip irrigation (SDI) components: Minimum requirements. *K-State Research and Extension*, MF-2576, 550-554.
- Silva, L. C., & Lambers, H. (2021). Soil-plant-atmosphere interactions: structure, function, and predictive scaling for climate change mitigation. *Plant and Soil*, 461(1), 5-27.
- Sorensen, R. B., Nuti, R. C., & Lamb, M. C. (2007). Rodent management for surface drip irrigation tubing in corn, cotton, and peanut. *Peanut Science*, 34(1), 32-37.
- Tao, F., Yokozawa, M., Hayashi, Y., & Lin, E. (2003). Future climate change, the agricultural water cycle, and agricultural production in China. *Agriculture, ecosystems & environment*, 95(1), 203-215.
- Thompson, T. L. (2009). The potential contribution of subsurface drip irrigation to water-saving agriculture in the western USA. *Agricultural Sciences in China*, 8(7), 850-854.
- Trenberth, K. E. (2011). Changes in precipitation with climate change. *Climate research*, 47(1-2), 123-138.

- Valentín, F., Nortes, P. A., Domínguez, A., Sánchez, J. M., Intrigliolo, D. S., Alarcón, J. J., & López-Urrea, R. (2020). Comparing evapotranspiration and yield performance of maize under sprinkler, superficial and subsurface drip irrigation in a semi-arid environment. *Irrigation Science*, 38(1), 105-115.
- Van Loon, A. F. (2015). Hydrological drought explained. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*, 2(4), 359-392.
- Wang, Z., Lin, L., Zhang, X., Zhang, H., Liu, L., & Xu, Y. (2017). Scenario dependence of future changes in climate extremes under 1.5 C and 2 C global warming. *Scientific reports*, 7(1), 46432.
- Wilde, C., Johnson, J., & Bordovsky, J. P. (2009). Economic analysis of subsurface drip irrigation system uniformity. *Applied Engineering in Agriculture*, 25(3), 357-361.
- Xue, Q., & Song, W. (2020). Spatial distribution of China's industrial output values under global warming scenarios RCP4. 5 and RCP8. 5. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 9(12), 724.
- Yang, M. D., Leghari, S. J., Guan, X. K., Ma, S. C., Ding, C. M., Mei, F. J., ... & Wang, T. C. (2020). Deficit subsurface drip irrigation improves water use efficiency and stabilizes yield by enhancing subsoil water extraction in winter wheat. *Frontiers in Plant science*, 11, 508.
- Yuan, X., Li, S., Chen, J., Yu, H., Yang, T., Wang, C., ... & Ao, X. (2024). Impacts of global climate change on agricultural production: a comprehensive review. *Agronomy*, 14(7), 1360.
- Zaiyu, L., Yan, M., Hao, G., Shihong, G., Yanqun, Z., Guangyong, L., & Feng, W. (2025). The hydraulic performance and clogging characteristics of a subsurface drip irrigation system operating for five years in the North China plain. *Agricultural Water Management*, 307, 109217.
- Zeppel, M. J. B., Wilks, J. V., & Lewis, J. D. (2014). Impacts of extreme precipitation and seasonal changes in precipitation on plants. *Biogeosciences*, 11(11), 3083-3093.
- Zhang, B., Zhu, J. J., Liu, H. M., & Pan, Q. M. (2014). Effects of extreme rainfall and drought events on grassland ecosystems. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 38(9), 1008-1018.
- Zhu, Q., Wang, H., Ma, H., Ding, F., Xu, W., Ma, X., & Fu, Y. (2025). Synergistic Regulation of Soil Salinity and Ion Transport in Arid

Agroecosystems: A Field Study on Drip Irrigation and Subsurface Drainage in Xinjiang, China. *Water*, 17(9), 1388.

BÖLÜM 3

YENİ STRATEJİ; İKLİM DİRENÇLİ PAMUK TARIMI

Doç. Dr. Cevher İlhan CEVHERİ^{1*}

DOI: <https://www.doi.org/10.5281/zenodo.17966457>

^{*1}Harran Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Tarla Bitkileri Bölümü. Şanlıurfa, Türkiye.
icevheri@harran.edu.tr, <https://orcid.org/0000-0002-7070-2652>
Sorumlu Yazar: icevheri@harran.edu.tr

GİRİŞ

Hızlı nüfus artışıyla birlikte enerji ve yakıt tüketimindeki artışın yanı sıra doğal kaynakların tahribi sonucu küresel ısınmanın etkileri giderek ciddi boyutlarda hissedilmektedir. Küresel ısınmanın bir sonucu olan iklim değişikliği, dünyanın bazı bölgelerinde olduğu gibi Türkiye’de de kuraklığa bağlı sorunların katlanarak artmasına neden olmaktadır. Kuraklık riski altındaki bölgelerde bulunan kurak ve yarı kurak alanların sorunları arasında rüzgâr erozyonu, çoraklık ve çölleşme gibi problemler yer almaktadır. İyileştirme çalışmalarına öncelik verilecek sahalarda belirten çölleşmeye ve rüzgâr erozyonuna hassas alanların belirlenmesi çalışmaları, olumsuzluklarla mücadelede önemli bir altlık olarak kullanılmaktadır. Kurak ve yarı kurak alanlar ile marjinal sahalardaki olumsuzluklara karşı iklim dirençli bitki tespit ve adaptasyon çalışmalarına ağırlık verilerek, bu tür sahaların iyileştirilmesinde tespit ve adaptasyonu yapılmış türlere öncelik verilmesi hedeflenmiştir (Sarıhan ve ark., 2024). Günümüzde iklim değişikliği göz ardı edilemeyen bir durumdur. Pamuk, Türkiye’de yetiştirilen önemli bir endüstri bitkisidir. Dolayısı ile iklim değişikliğinden tarım sektöründe önemli bir yer tutan pamuğun nasıl etkileneceğini belirleyebilmek, gelecekte yetiştirilme alanlarının nasıl değişeceğini doğru bir şekilde tahmin edebilmek çok önemlidir (Deveci, 2024). Avrupa ve Asya kıtalarının arasında yer alan Türkiye, farklı coğrafik bölgeler ve iklim yapıları nedeniyle iklim değişikliğinin ve küresel ısınmanın etkilerine karşı oldukça hassas ve savunmasızdır (Kurnaz, 2023). İklim değişikliğinin sağlık, ulaşım, ticaret ve benzeri sektörlerle etkilerinin yanı sıra en önemli etkilerinin olduğu sektörlerin başında tarım sektörü gelmektedir (Dudu ve Çakmak, 2017; Gürkan ve ark., 2017; Hayaloğlu, 2018; Bozoğlu ve ark., 2019; Dellal, 2021; Karahasan ve Pınar, 2023; Kurnaz, 2023). Dolayısıyla tarım sektöründe değişen iklim koşullarına uyumun sağlanması gerekmektedir (Deveci, 2024).

Pamuk Dünya üzerinde Amerika, Asya, Avrupa, Afrika gibi farklı kıtalarda ticari olarak yetişse de pamuk üretiminde iklim dostu onarıcı uygulamalara başlamadan önce, arazimizin ekolojik koşullarının pamuk üretimine uygun olup olmadığı, herhangi bir riskin olup olmadığı örneğin su miktarı veya kalitesinde olumsuzluk veya toprakta sert tabaka (pulluk tabanı), yüksek taban suyu, tuzluluk gibi irdelenmelidir. Bu değerlendirmede iklim değişikliklerine bağlı risklerin de yakın gelecekte olup olmayacağı konusu

yerel koşullar dikkate alınarak gözden geçirilmelidir. Tüm bu değerlendirmelerden sonra işletme planı hazırlanmalıdır. Bu planda pamuk başta olmak üzere, ekim nöbeti veya örtü bitkisi için seçilecek tür ve çeşitler, çevrenin biyoçeşitliliği koruyacak düzenleme, yapılması gereken analizler, seçilecek çeşit, uygulanması gereken girdiler, uygun alet-ekipman, sosyal altyapı (mola alanları, konaklama vb.), işgücü ve finansman ihtiyacı yer almalıdır. Pamuk, don olaylarının yaşanmadığı, sıcaklığın 15-35°C dolayında seyrettiği çeşitlere göre farklılık göstermekle birlikte ideal olarak 24-29°C lerdeki kuru iklim ve uzun vejetasyon dönemine sahip alanlarda başarı ile yetiştirilmektedir. Çimlenmeden koza oluşumuna kadar olan dönemde yaklaşık 500 mm suya ihtiyaç duyar. Bitki etkilense de taban suyunun yüksek olduğu yerlerde tarak silkme nedeniyle verim düşer. Pamukta başarılı bir yetiştiricilik için öncelikle temel olan ekolojik isteklerin karşılanması gerekir. Bu ekolojik koşullar aşağıda özetlenmiştir: 1. Sıcaklık: Pamuk, çeşitlere ve gelişme dönemine göre değişen sıcak bir büyüme mevsimi gerektirir. Ülkemizde de yazın, sıcaklıkların istediği karşıladığı dönemde ve Güneydoğu, Ege ve Akdeniz bölgelerinde yetiştirilmesi bunun göstergesidir. 2. Işıklanma: Pamuk bitkilerinin bol güneş ışığına ihtiyacı vardır. Tam olarak güneşte kalma, bitkinin büyümesi, çiçeklenmesi ve koza gelişimi için kritik öneme sahiptir. 3. Toprak: Pamuk en iyi şekilde iyi drene edilmiş, verimli ve iyi besin kaynaklarına sahip topraklarda yetişir. Tınlı topraklar idealdir, ancak pamuk, iyi drene edildikleri sürece kumlu veya killi topraklarda da gelişebilir. Toprağın pH seviyesi ideal olarak 5.5 ile 8.0 arasında olmalıdır. 4. Su: Pamuk tohumu suyla temasa geçtikten 4 gün sonra çimlenmeye başlar. Bir kez çimlenip gelişmeye başladıktan sonra kazık kökü aracılığı ile kuraklığa nispeten dayanıklı olsa da özellikle çiçeklenme ve koza gelişim aşamalarında belirli bir toprak nemi gerektirir. Bununla birlikte, aşırı su veya su ile doymuş topraklar kurak koşullardakine benzer şekilde tarak silkmesine neden olur. Ayrıca kök çürümesine veya diğer hastalıklara yol açabilir. Kısa süreli etkilerde bitki tekrar kendini toplar. Sulama uygulamalarının yağış, sıcaklık ve toprak tipine göre düzenlenmesi gerekir. 5. Rüzgâr: Pamukun ekolojik isteklerinde önemli bir faktör olmasa da, pamuk tarlaları kuvvetli rüzgarlardan etkilenebilir, bu da bitkilere fiziksel olarak zarar verebilir veya tozlaşmayı etkileyebilir. 6. Denizden yükseklik: Pamuk tipik olarak ovalarda düşük rakımlarda yetiştirilir. Bununla birlikte, sıcaklık gereksinimlerinin karşılanması koşuluyla, denizden

daha yüksek alanlarda da yetiştirilebilir. Ekolojik gereksinimlerin karşılanması, pamuğun başarılı bir şekilde yetiştirilmesi için çok önemlidir ve üretilen pamuğun hem verimini hem de kalitesini etkiler. Mevcut koşulları iyileştirmek ve pamuk bitkileri üzerindeki çevresel faktörlerden kaynaklanan stresi en aza indirmek için iklim dostu onarıcı tekniklerini uygulamak gerekir. Örneğin, ürün rotasyonu (ekim nöbeti, nöbetli ekim, münavebe), çiftlik koşullarına ve pamuğun büyüme ve gelişme dönemlerine uygun biçimde düzenlenmiş sulama programı, sırta ekim veya hastalık, zararlı, ve yabancı otların izlenmesi ve doğru yönetimi gibi çeşitli kültürel uygulamalar pamuk alanındaki ekolojik dengeyi iyileştirerek başarıyı artırır.



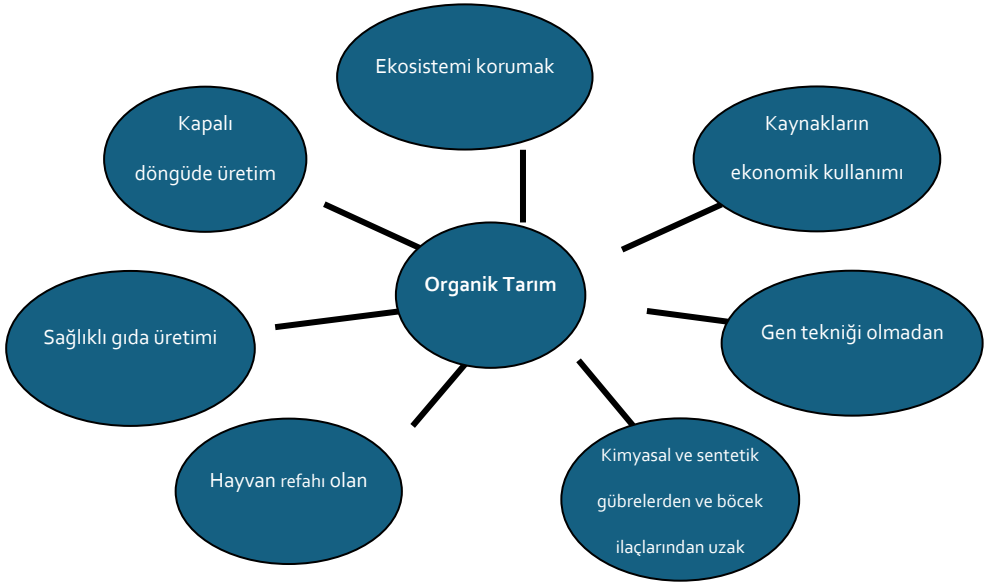
Pamuk lifleri tekstil sanayinin en önemli hammaddesidir (Cevheri, 2022). Tekstil sektöründe organik pamuğa olan talep, pamuğun doğal lif özellikleri nedeniyle artmaktadır. Organik pamuk, kimyasal gübre, pestisit, herbisit, büyüme düzenleyici veya yaprak dökücü kullanılmadan yetiştirilen, hasat edilen ve işlenen pamuktur. Organik pamuk yetiştiriciliğinin temel amacı, toprak verimliliğinin geri kazanılması, üretim maliyetinin düşürülmesi ve sertifikalı organik hasat için daha iyi fiyat elde edilmesidir. Çevreyi korumak için insanlara yönelik riski azaltmanın bir başka yolu da Better Cotton Initiative (BCI), yani su, kimyasal gübre ve pestisitlerin akıllıca kullanımıyla pamuk yetiştirmektir. Bu bölümün amacı, geleneksel pamuk üretimine kıyasla organik pamuk ve BCI pamuk üretiminin faydalarını vurgulamaktır. Yazarlar,

sürdürülebilir, çevre dostu ve çiftçilere sağlıklı bir geçim kaynağı sağlayan organik pamuk yetiştiriciliğinin önemini vurgulamaya çalışmıştır. Geleneksel pamuk üretiminde olduğu gibi, pestisitlerin/bitki koruma ürünlerinin aşırı ve yanlış kullanımı çevre ve tarım işçileri üzerinde olumsuz bir etkiye neden olmaktadır. Bu etkiyi azaltmak için organik ve BCI pamuk ortaya çıkmıştır. Çevresel ve sosyal açıdan sağladığı faydaların yanı sıra, organik pamuk ekonomiktir ve yetiştiriciliğinde tarım kimyasallarının kullanım maliyetini ortadan kaldırdığı için üretim maliyetini düşürmüştür. BCI pamuk, çevreyi iyileştirmek ve pamuk yetiştiricilerinin gelirini sürdürülebilir bir şekilde artırmak amacıyla üretilmektedir. BCI, küresel pamuk üretimini, onu üreten insanlar, yetiştirildiği çevre ve sektörün geleceği için daha iyi hale getirmek amacıyla kurulmuştur. Bu bölümde, organik ve BCI pamuğun üretim yöntemleri, faydaları ve uygulamaları ele alınmaktadır.

ORGANİK PAMUK ÜRETİMİNDE AGROEKOLOJİK YAKLAŞIMLAR

Organik Tarım

Biyolojik, ekolojik, bio gibi ülkelere göre farklı kelimelerle tanımlanan “Organik Tarım”, tarımsal üretimde artan kimyasal gübre ve ilaç kullanımının doğa ve insan sağlığı üzerinde yarattığı olumsuz etkilerin ve ticari problemlerin aşılmasında bir alternatif yöntem olarak ortaya çıkmıştır. Üretimde kimyasal sentetik girdi ve ilaçlar kullanmadan yönetmeliklerde izin verilen girdilerin kullanımı ile yapılan, üretimden tüketime kadar her aşaması kontrollü ve sertifikalı tarımsal üretim biçimidir.



Organik tarım?

Organik tarım; ekolojik sistemde hatalı uygulamalar sonucu kaybolan doğal dengeyi yeniden kurmaya yönelik, insana ve çevreye dost üretim sistemlerini içermekte olup, esas itibariyle Sentetik, kimyasal ilaçlar ve gübrelerin kullanımının yasaklanmasının yanında, Organik ve yeşil gübreleme, münavebe, toprağın muhafazası, bitkinin direncini artırma Parazit ve predatörlerden yararlanmayı tavsiye eden, bütün bu olanakların kapalı bir sistemde oluşturulmasını talep eden, üretimde miktar artışı yanında ürünün kalitesini de yükselmesini amaçlayan bir üretim şeklidir.

Organik Tarımda Amaç:

Çevre, toprak, su kaynakları ve tarımsal ürünleri kirletmeden insan ve diğer canlıların sağlığını azami derecede koruyarak temiz ve kaliteli gıda üretiminde sürdürülebilirliği sağlamak.

‘Sürdürülebilirlik’

Sürdürülebilir tarım, uzun dönemde doğal kaynakların korunması yanında çevreye zarar vermeyen tarımsal teknolojilerin kullanıldığı bir tarımsal yapı şeklidir. Dünyanın gelişmiş ülkelerinde olduğu gibi ülkemizde de, bir yandan sentetik üretim girdileri denetimsizce kullanılırken, bir yandan da

işleme teknik ve teknolojilerinin oluşturdukları olumsuz sonuçlar düşünülmeden kullanılan yoğun (konvansiyonel ya da entansif) tarımsal üretim yapılmaktadır. Günümüzde bu uygulamalar doğal dengenin bozulmasına olan etkileri ve besin zinciri yoluyla insanın yanı sıra tüm canlılara ulaşabilen yaşam tehlikesi yaratma özelliği ile artık sanayi ya da kentsel kirlilikler kadar dikkati çekmeye başlamıştır. Bu nedenle de sürdürülebilir tarımda, henüz doğallığını kaybetmemiş tekniklerin kullanılması bir gereklilik haline gelmiştir. Burada, ilaç, sentetik gübre gibi doğal olmayan girdilerin kullanılmasından kaçınılarak kalite, sağlık ve çevresel standartlarla buluşan organik tarım teknikleri anahtar rol oynamaktadır. Sürdürülebilir tarımın pratiğe yansımaları açısından önem taşıyan organik tarım, özellikle son yıllarda çevre bilincinin de gelişmesiyle birlikte bir zorunluluk olarak görülmeye başlamıştır (Turhan, 2005).

Organik Gıda Ürünlerinin Tercih Edilme Nedenleri

- Sağlıklı nesiller yetiştirmek
- Toprak, su ve rüzgâr erozyonunu önlemek
- Su kalitesini korumak
- Enerji tasarrufu
- Kimyasal ilaç kalıntılarından arındırmak
- Tarım çalışanlarını korumak
- Dar gelirli çiftçilerin gelir düzeylerini yükseltmek
- Ekonomik üretimi hedeflemek
- Biyolojik çeşitliliği korumak
- Ürünlerde daha zengin bir aroma yaratmak

Neden Organik Ürün Üretimi ve Tüketimi

1. Etkin Kaynak Kullanımı
2. Sosyal Adalet
3. Katma Değer Yaratma
4. İstihdam
5. Ekolojik Bileşenler (Su Kaynakları-Tarım Alanları-İşleme/Üretim-İnsan Sağlığı)
6. Soframızdan Kimyasalları Uzaklaştırmak
7. Daha Sağlıklı Ve Lezzetli Ürünler Tüketmek
8. İzlenebilirlik
9. Gıda Güvenliği

- 10.Sertifikalandırılmış Ürünler
- 11.Gelecek Nesilleri Korumak
- 12.Küçük Çiftçilere Yardımcı Olmak
- 13.Tarım İşçisi Sağlığı
- 14.Kırsal Kalkınmaya Destek
- 15.Biyolojik Çeşitlilik ve Sürdürülebilirliği Sağlamak
- 16.Toprak Erozyonunu Engellemek
- 17.Su Kaynakları Tasarrufu

Neden organik pamuk?

- Konvansiyonel pamuk üretiminde çok fazla kimyasal pestisit ve gübre kullanılmaktadır.
- Bu kullanılan kimyasal maddeler çevreye zarar vermekte, yararlı böcekleri öldürmekte, toprak ve su kirliliğine zarar vermektedir.
- Ayrıca,çok sık yapılan sentetik kimyasal uygulamalarıyla, dayanıklı böcek çeşitlerinin gelişmesi de ek bir zarar olarak karşımıza çıkmaktadır.
- Organik tarımda kimyasal uygulamaların olmayışı yararlı ve zararlı böcekler arasındaki dengenin korunmasını sağlamakta ve biyolojik çeşitliliğe zarar vermemektedir.
- Konvansiyonel pamuk tarımında kullanılan kimyasal maddelerin zehirli etkileri insan sağlığını uzun yıllar olumsuz yönde etkileyebilmektedir.
- Oysa organik pamuk tarımında kimyasal madde uygulaması olmadığı için ürünler güvenilir ve sağlıklıdır.
- Konvansiyonel tarımda kullanılan kimyasal gübreler ve mono kültür ekim sistemi toprağın verimliliğini azaltırken organik tarım sisteminde toprak canlılığı ve verimliliği artmaktadır.
- Konvansiyonel sistemde çiftçi açık pazar sistemine bağlıdır. Organik tarımda ise çiftçi ile satın alan arasında bir yakın bir ilişki olup prim ödenmektedir.
- İlk yıllarda organik üretim düşük olabilir ancak üretimdeki düşük girdi olması nedeniyle finansal risk de düşük olmaktadır.

Standartlar

- 1990'lı yıllardan itibaren organik üretim ve ticaretinde üreticiyi ve tüketiciyi sahte ve hileli olabilecek ürünlerden korumak amacıyla organik etiket kullanım zorunluluğu getirilmiştir.

Organik pamuk üretiminde uygun çeşitlerin seçimi

- Belirli bir alanla ilgili uygun pamuk çeşitlerinin belirlenmesi, iyi bir gözlem ve deney gerektirir.
- Bölgeye iyi uyum sağlamış çeşitler seçilmelidir.
- Bu çeşitler bölgedeki ana zararlılara ve hastalıklara dayanıklı ve dirençli olmalıdır.
- Organik pamuk üretimi için ıslah materyali, organik koşullar altında üretilmelidir. Islah aşaması süreci boyunca da bu böyle devam etmelidir.
- Organik pamuk üretiminde uygun çeşitlerin seçimi:
- Elimizde organik üretim materyalimiz yoksa, bölgeye iyi uyum sağlamış mevcut ticari çeşitler organik üretim için uygundur ancak organik üretim için yeni çeşitler geliştirilmek istendiğinde ekolojik uyum göz önünde tutulması gereken en önemli faktördür.

Toprak kalitesi:

- Pamuk, su tutma kapasitesi iyi, yeterli besin maddesi içeren verimli toprakları tercih eder.
- Konvansiyonel tarımda çiftçiler kimyasal gübreleri her yıl ve çoğu zaman gereğinden fazla toprağa uygulayarak toprak verimliliği kaybına yol açmaktadırlar.
- Organik madde toprak kalitesinde en önemli faktördür.

Rotasyon :

- Organik tarım da rotasyon yoksa, organik üretim sayılamaz.
- İyi planlanmış bir rotasyon sistemi, hastalık ve zararlı mücadelesinde etkin bir araç olabilmektedir.

Pamuk dan sonra;

- Buğdaygiller
- Mısır
- Tütün

- Baklagiller (Soya fasulyesi, nohut, fiğ, bakla vs)

Organik yetiştiricilikte kullanılan bazı organik gübreler

- Kompost
- Çiftlik gübresi
- Yeşil gübre
- Zeytin keki
- Kanatlı gübresi
- Solucan kompostu
- Kaya fosfatı
- Sertifikalı hazır organik gübreler vb.

Bitki Besin İhtiyacı:

- Organik gübreler, kimyasal gübrelerden farklı olarak toprakta uygun nem ortamında ayrışmaya uygulamalarından 1-2 hafta sonra başlarlar.
- Böylece uygulama dönemleri konvansiyonel tarımdan farklı olarak yapılmalıdır.
- Besin kaynağı olarak ilk basal uygulamada kompost yada çiftlik gübresi daha sonra gerekli ikinci uygulamada biraz daha zenginleştirilmiş (örn zeytin keki ile) kompost uygulanabilmektedir.
- En kolay bulunabilen ve uygulanan hazır sertifikalı organik gübrelerdir.
- Ancak, çoğu organik standarda göre kompostlaştırılmadıkça, yoğun yetiştirmeden (örneğin, derin altlıklı tavuk yetiştirme) elde edilen gübrelere izin verilmemektedir. Kafesteki tavuklardan elde edilen gübrelere, yani fabrika çiftçiliğine, çoğu organik standart kapsamında hiçbir şekilde izin verilmemektedir.
- Toprakta fazla suyun olması, yeterli suyun olmayışı, yada bazı besin element miktarının çok fazla olması N, P ve K alımını etkilemektedir.

Ara bitkiler

- Pamuk da ara bitki olarak; mısır, sorgum, fasulye ve fıstık gibi bitkiler sıra aralarına ekilerek zararlıların burada konaklamasını sağlar yada yabancı ot popülasyonunu baskı altında tutarak doğal dengenin korunmasını sağlar. Hastalıklardan koruma sağlamaktadır.
- Örneğin; Her 20 sıra pamuk sırasından sonra ekilen mısır yada tütün koza kurduna karşı mücadelede olumlu sonuçlar vermektedir.

- Her 5 sıra pamuk ekiminden sonra ekilen ayçiçeği yada börülce çeşitli zararlılara tuzak bitki olarak kullanılmakta ve pamuğa zararı önlenmektedir.
- Seçilen ara bitkiler ana üründen farklı bir tür seçilerek yapılmaktadır.

Organik pamukta su tüketimi

- Diğer yandan organik tarımda kullanılan gübrelerin su tutma kapasiteleri çok daha fazladır. Yüksek agregat stabilitesi organik gübrelerle daha fazla sağlanmaktadır.
- Ancak yine de organik yetiştiricilikle ilgili su tüketimi konularında araştırmalara ihtiyaç vardır.
- Suyun etkili ve tasarruflu bir şekilde kullanılması organik prensiplerin içinde yer almaktadır.
- Duyarlı olunmalı.

Depolama

- Hasat sonrası depolanan organik pamuk geçiş süreci ürün yada konvansiyonel üretimle aynı yerde depolanamaz ve saklanamaz.
- Depolanan yer temiz ve kuru olmalıdır.
- Kimyasal maddeler, petrol ürünleri yada gübrelerden uzak yerlerde saklanmalıdır. Böyle ortamlarda bulaşma riski her zaman mevcuttur.
- Kesinlikle depolanan yerde haşerelere karşı kimyasal ilaçlama yapılmamalıdır.

Bütüncül Yönetim

Binlerce yıl boyunca, otlayarak beslenen büyük sürüler, çayır ve meralarla birlikte gelişme göstermiş ve gübreleri ile bitkilerin üretimini desteklemiştir. Bütünsel yönetim anlayışı ile ekosistemdeki tüm canlıların karşılıklı fayda sağlamasına dayalı ilişkilerini benimsediğimizde hayvancılığı bitkisel üretimle entegre ederek işletmeyi planlayabiliriz. Böylece işletmenin dışarıdan yem veya gübre ihtiyacını en aza indirmiş oluruz. Ancak günümüzde hayvansal ve bitkisel üretim birbirinden ayrılarak özelleşmiştir.

Sonucunda gelişen monokültür (tek ürün) yetiştiricilikte örneğin pamukta, bitki köklerinin yayıldığı toprak seviyesinden sürekli aynı besin maddeleri aynı oranda kaldırıldığında eksilenlerin yerine işletme dışından gübre getirerek uygulamamızı gerektirir. Kimyasal gübreler, eksilen besin

maddelerini tamamlarken toprağın fiziksel veya mikrobiyolojik açılardan iyileşmesi yönünde katkı sağlamaz, böylece iklim değişikliklerine karşı kırılganlığı devam eder. Ayrıca sera gazı emisyonlarına neden olur. Günümüzde küresel ölçekte iklim değişikliğine önlem olarak emisyonların azaltılması ve önlem almayan işletmelerin de yarattıkları zararı karbon vergisi olarak ödemeleri yoğun olarak tartışılmaktadır. Alıcı ülkelerdeki tekstil sektöründe de gündemde olan karbon vergisi tartışmaları, pamuk üretiminde kullanılan girdilerin ve yapılan uygulamaların bütüncül planlanmasını ve iklim dostu olmasını zorunlu kılmaktadır. Toprakları ve geçim kaynaklarını yenileme gücü, uygulamalarımızla birlikte, ekolojik, finansal ve sosyal dinamikleri nasıl yönettiğimizle de yakından ilgilidir. Bir tarımsal üretim sisteminden çok daha fazlası olan Bütüncül Yönetim, sürekli değişen koşullar altında canlı ve cansız tüm varlıkların karşılıklı etkileşimini dikkate alan kararlar almaya yönelik bir çerçevedir. Özellikle çevre bilincinin artması ve Avrupa Birliği politikalarında Yeşil Mutabakat ile sürdürülebilirliğin ön plana çıkması ile birlikte, pamuğun hammadde olarak kullanıldığı tekstil ve ilgili diğer sektörlerde üretim süreci sorgulanmaya başlamıştır. Pamuk değer zincirinde sera gazı emisyonlarının % 5-10'u pamuk üretiminde, % 20-30'u mamul ürün üretiminde, % 30-60 ise ürünü kullanan tüketicilerin yıkama ve kurutma gibi kullanma sürecindeki enerji sarfiyatı nedeniyle ortaya çıkmaktadır. Pamuk, fotosentez özelliği nedeniyle C3 bitkisi olarak adlandırılır ve böylece yüksek karbondioksit koşullarında performansı mısır, sorgum veya şeker kamışı gibi C4 bitkilerine oranla daha yüksektir. Günümüzde atmosferde mevcut karbondioksit seviyesinin hemen hemen iki katına çıkması (820 ppm) durumunda bile pamuk bitkisi yetiştirilebilir. Ancak iklim değişikliğinde asıl tehdit edici faktör yüksek sıcaklıklar olacaktır (Hughes, 2021). Sera gazı emisyonlarını değerlendirmede kullanılan karbon tarımı, karbon ayak izi, karbon milleri veya karbon kredisi gibi birçok ölçüt bulunmaktadır. Bu kavramların halihazırda etiketlere de yansıdığı görülmektedir. Ancak tüketiciyi yanıltıcı beyanlar olmamasını sağlamak üzere uluslararası düzeyde çalışmalar devam etmektedir. Karbon emisyonları veya iklim dostu beyanlar konusu henüz sonuçlandırılmamıştır.

Karbon tarımı nedir?

Karbondioksiti atmosferden toprağa veya bitki örtüsüne bağlamayı amaçlayan tarımsal uygulamaları ifade eder. Bu uygulamalar, küresel ısınmaya

katkıda bulunan ve önemli bir sera gazı olan karbondioksitin atmosferdeki miktarını azaltarak iklim değişikliğini azaltmaya yardımcı olur. Karbon tarımı yöntemleri arasında ağaç dikme (tarımsal ormancılık), örtülü bırakma, münavebeli otlatma ve toprak işlemez tarım tekniklerinin kullanılması yer alır.

Karbon ayak izi nedir?

İnsan faaliyetleri tarafından doğrudan veya dolaylı olarak salınan sera gazlarının, özellikle karbondioksitin (CO₂) toplam miktarıdır. Tipik olarak yılda salınan karbondioksit eşdeğeri olarak eşdeğer ton CO₂ olarak ifade edilir. Bu emisyonlar, ulaşım, enerji kullanımı, endüstriyel süreçler ve mal ve hizmetlerin üretimi ve imhası gibi çeşitli faaliyetlerden kaynaklanmaktadır. Karbon ayak izlerini hesaplamak ve azaltmak, bireylerin, kuruluşların ve hükümetlerin küresel ısınmaya ve çevresel bozulmaya katkılarını azaltmak için harekete geçmelerine ve harekete geçmelerine yardımcı olduğu için iklim değişikliğini azaltmada kilit bir stratejidir.

Karbon kredisi nedir?

Atmosferden bir metrik ton karbondioksit eşdeğeri (CO₂) emisyonunun uzaklaştırılmasını veya azaltılmasını temsil eden bir ölçü birimidir. Karbon çiftçiliği gibi karbon emisyonlarını azaltan faaliyetlerde bulunan kuruluşlar veya bireyler karbon kredisi kazanabilir. Bu krediler, işletmelerin karbon ayak izlerini dengelemelerinin veya emisyon azaltımlarıyla ilgili yasal gereklilikleri karşılamalarının bir yolu olarak karbon piyasalarında satın alınabilir, satılabilir veya takas edilebilir.

Karbon milleri nedir?

Malların uzun mesafelerde taşınmasının yarattığı karbon ayak izi ile ilgili bir kavramdır. Malların taşınması sırasında üretilen, tipik olarak kat edilen mesafe (mil cinsinden) ve mil başına üretilen emisyonlar cinsinden ölçülen karbondioksit emisyonu miktarını ifade eder. Esasen, kullanılan taşıma şekli (örneğin, kamyon, gemi, uçak vb.) ve ilgili araçların yakıt verimliliği gibi faktörleri dikkate alarak, malların uzun mesafelerde taşınmasının çevresel etkisini ölçer. Karbon millerini azaltmak, iklim değişikliğini hafifletme ve tedarik zincirlerinde sürdürülebilirliği teşvik etme çabalarında genellikle bir hedeftir.

Sonuç

Pamuk bitkisi tekstil sektörü ve yağ sanayisinin önemli bir hammaddesi olduğu için tarıma dayalı sanayinin kalkınmasında önemli lokomotif bir güçtür. Bu nedenle önümüzdeki süreçte pamuk tarımının stratejik önemi dahada artacaktır. Bu nedenle birim alan miktarının yanında verimlilik konusunda da gereken önlemlerin alınması gerekir. Özellikle artan kuraklık ve susuzluğun olumsuz etkilerini ortadan kaldırmak ve iklim dirençli bitki yetiştirme teknikleri konusunda gerekli önlemlerin alınması gerekir.

Kaynaklar

- Altındışli, A ve E. İlter, 2002. Ekolojik Tarımda İlke ve Kavramlar. Organik Tarım Eğitimi Ders Notları, s:18-24, Emre Basımevi. İzmir.
- Bozoglu, M., Başer, U., Eroglu, N. A., & Topuz, B. K. (2019). Impacts of climate change on Turkish agriculture. *Journal of International Environmental Application and Science*, 14(3), 97-103.
- Cevheri, C. I. (2022). The effect of rain on fiber and yarn quality of cotton (G. hirsutum L.) varieties in two different growing seasons. *Journal of Natural Fibers*, 19(9), 3558-3570.
- Dellal, İ., 2021. İklim Krizi ve Tarım-Gıda Sektörü. 3. Uluslararası Tarım ve Gıda Etiği Kongresi, 5-6 Kasım, Çevrimiçi.
- Deveci, H. (2024). İklim Değişikliğinin Pamuk Yetiştiriciliğine Etkisinin Modellenmesi. *ÇOMÜ Ziraat Fakültesi Dergisi*, 12(1), 96-107.
- Dudu, H., & Çakmak, E. H. (2018). Climate change and agriculture: an integrated approach to evaluate economy-wide effects for Turkey. *Climate and Development*, 10(3), 275-288.
- Hayaloğlu, P. (2018). İklim Değişikliğinin Tarım Sektörü Ve Ekonomik Büyüme Üzerindeki Etkileri. *Gümüşhane Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, 9(25), 51-62.
- Goyal, A., & Parashar, M. (2023). Organic cotton and BCI-certified cotton fibres. In *Sustainable fibres for fashion and textile manufacturing* (pp. 51-74). Woodhead Publishing.
- Gürkan, H., Bayraktar, N., & Bulut, H. (2017). İklim değişikliği nedeniyle artan kuraklığın ayçiçeği ve pamuk verimi üzerine etkileri. *KSÜ Doğa Bilimleri Dergisi*, 20, 216-221.
- Hughes, K. 2021. Cotton and climate change, International Cotton Advisory Committee, https://www.wto.org/english/tratop_e/agric_e/item_3_icac_climate_change_cotton_final.pdf.
- Karahasan, B. C., & Pinar, M. (2023). Climate change and spatial agricultural development in Turkey. *Review of Development Economics*, 27(3), 1699-1720.
- Kurnaz, M. L. (2023). İklim değişikliği ve uyum süreçlerinde Türkiye. *Resilience*, 7(1), 199-208.

- Sarıhan, B., Acar, R., & Uzun, A. (2024). Kurak ve Yarı Kurak Alanlarda İklim Dirençli Bitkilerin Kullanılması. *Çevre Şehir ve İklim Dergisi*, 1(Özel), 195-235.
- Turhan, Ş. (2005). Tarımda sürdürülebilirlik ve organik tarım. *Tarım Ekonomisi Dergisi*, 11(1 ve 2), 13-24.

BÖLÜM 4

İKLİM DEĞİŞİKLİĞİ VE TARIMIN GELECEĞİ

Prof. Dr. Ali Rıza ÖZTÜRKMEN^{1*}

DOI: <https://www.doi.org/10.5281/zenodo.17966479>

^{1*} Harran Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Tarımsal Yapılar ve Sulama Bölümü,
Şanlıurfa, Türkiye.

arozturkmen@harran.edu.tr, <https://orcid.org/0000-0001-5575-3278>

Sorumlu Yazar: arozturkmen@harran.edu.tr

GİRİŞ

İklim değışikliği, günümüzde insanlığın karşılaştığı en büyük küresel sorunlardan biri haline gelmiştir. Artan sera gazı emisyonlarına bağı küresel ısınma, sıcaklık ortalamalarını eşı benzeri görülmemiş bir hızla yükseltmektedir. Bu durum, yağış rejimlerinin bozulması ve aşırı hava olaylarının sıklığında artış gibi sonuçlarla birlikte tarım sistemlerini derinden etkilemektedir. Tarım sektörü, doğası gereğı iklim koşullarına en bağımlı sektörlerden biri olduğu için iklim değışikliğinin olumsuz etkilerini en ciddi şekilde hisseden alanların başında gelmektedir. Gıdaya olan talebin giderek arttığı ve milyonlarca insanın yetersiz beslendiğı bir dünyada, iklim krizinin tarımsal üretime etkileri gıda güvenliği ve güvencesi açısından kritik bir tehdit oluşturmaktadır. Dolayısıyla, iklim değışikliğinin tarım üzerine etkilerinin anlaşılması ve gerekli önlemlerin alınması, gelecek nesillerin beslenme ihtiyaçlarını karşılayabilmek ve sürdürülebilir bir tarım sistemi inşa edebilmek için zorunlu hale gelmiştir (Bayraç, H.N. & Doğan, E. (2016).

Türkiye de iklim değışikliğinin etkilerine karşı hassas konumdaki ülkeler arasındadır. Coğrafi olarak Akdeniz iklim kuşağında yer alan Türkiye’de son yıllarda ortalama sıcaklıklar belirgin bir artış eğilimi göstermektedir. Meteoroloji verilerine göre 2024 yılı, Türkiye’de ölçülmüş en sıcak yıl olmuş; 2024’te ülke genelinde yıllık ortalama sıcaklık 15,6°C ile 1991–2020 ortalaması olan 13,9°C’nin 1,7°C üzerinde gerçekleşerek önceki rekor yılı 2010’u geride bırakmıştır (Meteoroloji Genel Müdürlüğü (2025)). Diğer yandan, yağış rejiminde de önemli değışimler gözlenmektedir. Örneğın 2024 yılında Türkiye geneli yağış miktarı, uzun yıllar ortalamasına göre %6,3 daha düşük gerçekleşmiştir. Bölgesel bazda bakıldığında, özellikle Ege Bölgesi’nin yağışları normaline göre %22 gibi ciddi oranlarda azalırken, yalnızca Doğu Anadolu’da yağış miktarı ortalamanın hafif üzerinde kalmıştır. Bu veriler, iklim değışikliğinin Türkiye’de halihazırda hissedilen etkilerine bir işaret niteliğindedir.

Bu bölümde, iklim değışikliğinin tarım sektörü üzerindeki mevcut ve olası etkileri kapsamlı bir biçimde ele alınacak; Türkiye özelinde güncel durum analiz edilerek geleceğė dönük projeksiyonlar ve riskler değerdendirilecektir. Ayrıca, tarım sektöründe iklim değışikliğine uyum sağlamak ve etkileri en aza indirmek için geliştirilebilecek stratejiler ve politikalar tartışılacaktır. Amaç,

iklim krizinin tarımsal üretim ve gıda arzı üzerindeki etkilerini ortaya koyarak, akademisyenlerden çiftçilere, karar vericilerden genel kamuoyuna kadar geniş bir kitle için farkındalık oluşturmak ve çözüm arayışlarına ışık tutmaktır.

İklim Değişikliğinin Tarıma Etkileri

İklim değişikliğinin tarım sektörü üzerindeki etkileri çok yönlü ve karmaşıktır. Sıcaklık ortalamalarındaki artış, yağış düzenlerindeki değişim, ekstrem hava olaylarının şiddeti ve sıklığının yükselmesi gibi faktörler tarımsal üretimin miktarını, verimini ve kalitesini doğrudan etkilemektedir. Bu etkiler neticesinde tarımsal üretimde dalgalanmalar, gıda fiyatlarında artış, kırsal gelirlerde azalma ve gıda güvencesinde risk artışı gibi sonuçlar ortaya çıkabilmektedir. Aşağıda, iklim değişikliğinin tarımı etkileme biçimleri başlıca alt başlıklar halinde incelenmiştir:

Sıcaklık Artışı ve Kuraklık Riski

Küresel ısınmaya bağlı olarak atmosferik sıcaklıkların yükselmesi, bitkilerin büyüme ve verim süreçlerini çeşitli şekillerde aksatmaktadır. Fotosentez, çiçeklenme ve ürün dolumu gibi hayati evreler, optimum sıcaklık aralıklarının dışına çıkmadığında olumsuz etkilenir. Özellikle yaz aylarında aşırı sıcaklıklar bitkilerde sıcaklık stresine yol açarak verim kayıplarına neden olabilir. Türkiye özelinde yapılan çalışmalar, sıcaklık değişimlerinin tarım sektörü üzerindeki etkisinin olumsuz olduğunu ve uzun vadede tarımsal üretimi kısıtladığını ortaya koymaktadır. Artan sıcaklıklar aynı zamanda buharlaşma ve terleme (evapotranspirasyon) yoluyla su kayıplarını artırarak kuraklık riskini şiddetlendirir (Bayraç, H.N. & Doğan, E. (2016).

Kuraklık, tarım için en kritik tehlikelerden biridir ve iklim değişikliği nedeniyle birçok bölgede daha sık ve şiddetli kuraklıklar yaşanmaktadır. Yağış rejimindeki düzensizlikler ve uzun yağışsız periyotlar, toprağın nem içeriğini azaltarak özellikle yağışa bağımlı tarım yapan bölgelerde ciddi rekolte kayıplarına yol açar. Güneydoğu Anadolu, İç Anadolu gibi yarı kurak bölgeler, halihazırda dönemsel kuraklıklardan etkilenmektedir ve küresel ısınmanın bu bölgelerde kuraklık sıklığını artırması beklenmektedir. Nitekim son yıllarda yaşanan kuraklıklar bu riski doğrular niteliktedir. Örneğin, 2024-2025 dönemindeki şiddetli kuraklık sonucunda Türkiye genelinde özellikle buğday gibi temel tahılların verimi dramatik şekilde düşmüştür; Güneydoğu Anadolu,

İç Anadolu ve Trakya'nın bazı kesimlerinde buğday veriminde %40'lara varan azalmalar kaydedilmiş, benzer şekilde mısır, mercimek ve pamuk gibi ürünlerde de belirgin verim düşüşleri gözlenmiştir (Meteoroloji Genel Müdürlüğü (2025)). Bu denli büyük çaplı verim azalışları, çiftçi gelirlerini azaltmakla kalmamış, aynı zamanda gıda fiyatlarını yükselterek hem üretici hem tüketici düzeyinde ekonomik zorluklar yaratmıştır (Bayraç, H.N. & Doğan, E. (2016)).

Kuraklık, sadece ürün miktarını değil kaliteyi de olumsuz etkiler; tane doldurma döneminde su yetersizliği yaşayan hububatlarda kalite parametreleri düşer, meyve-sebze sektöründe ürünler yeterli iriliğe ve olgunluğa ulaşamaz. Ayrıca uzun süreli kurak koşullar bitkilerin zayıflamasına ve hastalıklara duyarlılığının artmasına yol açar. Sonuç olarak, sıcaklık artışları ve kuraklık tehdidi, Türkiye tarımının geleceğinde önemli belirsizlik ve risk unsurları olarak öne çıkmaktadır.

Yağış Düzenleri ve Su Kaynakları Üzerindeki Etkiler

İklim değişikliğinin en belirgin sonuçlarından biri, yağış rejimlerinde meydana gelen değişikliklerdir. Yağışların mevsimsel ve bölgesel dağılımı tarımsal üretimi doğrudan şekillendirdiği için, iklimdeki kaymalar su kaynaklarının durumunu ve tarımda su kullanımını kritik biçimde etkilemektedir. Türkiye, kişi başına düşen su miktarı açısından zaten su stresi yaşayan bir ülkedir; Tarım ve Orman Bakanlığı verilerine göre Türkiye'nin yıllık kullanılabilir su potansiyeli toplam 112 milyar m³ civarındadır (yaklaşık 98 milyar m³ yüzey suyu, 14 milyar m³ yeraltı suyu) ve bu değer ülkemizin “su zengini” değil, aksine su kıtlığı sınırında bir ülke olduğunu göstermektedir. Halihazırda sulanabilir tarım arazilerinin yalnızca %65'inde sulama yapılabilmekte olup mevcut sulama sistemlerinde ortalama su kullanım verimliliği %45 gibi düşük bir seviyededir. İklim değişikliğinin su döngüsü üzerindeki etkileri, bu tabloyu daha da zorlaştırmaktadır (Tarım ve Orman Bakanlığı (2021).

Yağış miktarının azalması veya mevsimsel dağılımının öngörülemez hale gelmesi, baraj ve göletlerdeki su birikimini olumsuz etkileyerek sulama suyu yetersizliğine yol açabilir. 2024 yılı verilerine göre ülke genelinde yağışların normalden %6 daha az olması, pek çok bölgede sulama amaçlı su rezervlerini azaltmış ve tarımsal üretimde su kısıtına neden olmuştur. Özellikle

Ege Bölgesi gibi tarımsal üretimde suya yüksek ihtiyaç duyan bölgelerde 2024'te yağışlar normallerinin yaklaşık dörtte bir altında kalarak kuraklık etkisini artırmıştır. Buna karşılık, yağış rejimindeki değişim tüm bölgelerde eşit olmamaktadır; Doğu Anadolu gibi bazı bölgelerde ise iklim değişikliği bağlamında zaman zaman yağış artışı da gözlenebilmektedir (2024'te Doğu Anadolu'nun yağışı normalin %7 üzerinde gerçekleşmiştir). Ancak genel eğilim, iklim senaryolarına göre Türkiye'nin büyük bölümünde orta ve uzun vadede yağışların azalacağı yönündedir.

Yağış miktarındaki azalma kadar, yağışların zamanlamasındaki kaymalar da tarım için zararlıdır. Uzun kurak dönemlerin ardından gelen ani ve şiddetli yağmurlar, toprağın suyu emme kapasitesini aşarak yüzey akışına geçer ve efektif fayda sağlamadan sele neden olabilir. Bu durum hem suyun depolanamadan boşa akmasına hem de toprak erozyonuna yol açar. Öte yandan ilkbahar ve yaz mevsimlerinde beklenen yağışların gelmemesi, kuru tarım yapılan alanlarda ekinlerin başak dolduramadığı veya meyvelerin olması gerektiği boyuta ulaşamadığı “verimsiz yıllar” oluşturur. Kısacası, iklim değişikliğinin yağış düzeni üzerindeki etkileri Türkiye'nin su kaynaklarını ve tarımsal su kullanımını kritik seviyede zorlamakta; suyun etkin ve sürdürülebilir yönetimini her zamankinden daha önemli hale getirmektedir.

Ekstrem Hava Olayları ve Tarımsal Hasarlar

Değişen iklim, aşırı hava olaylarının hem sıklığını hem de şiddetini artırmaktadır. Meteorolojik afetler olarak da adlandırılan sel, fırtına, dolu, don, hortum ve orman yangını gibi ekstrem olaylar, tarımsal üretimde ani ve büyük kayıplara yol açabilir. İklim kayıtları, son yıllarda bu tür olayların Türkiye'de daha sık görüldüğünü ve daha geniş alanları etkilediğini göstermektedir.

Örneğin, şiddetli dolu fırtınaları birkaç dakikada bir bölgedeki ekili alanların tamamını tahrip edebilir; yetiştirme döneminde yağan dolu, bitkilerin yaprak, çiçek ve meyvelerini yaralayarak ürün alınmasını engeller. Benzer şekilde, ani sel baskınları tarım alanlarında erozyon ve kumlanmaya neden olarak verimli üst toprağı götürür ve ekili ürünleri sürükleyip yok edebilir. Fırtına ve hortumlar, sera ve tarım altyapısını tahrip ederek özellikle örtü altı tarımı yapan üreticilere büyük zararlar verebilir. Don olayları, hassas meyve ağaçlarının çiçeklenme dönemine rastladığında o yılki meyve rekoltesini sıfıra indirebilir. Tüm bu olaylar, iklim değişikliğinin tetiklediği ekstrem koşulların

tarım üzerindeki yıkıcı etkilerini göstermektedir (Tarım ve Orman Bakanlığı (2021)).

Son yıllarda Türkiye’de yaşanan bazı örnekler, ekstrem hava olaylarının tarıma maliyetine ışık tutmaktadır. 2020 yılındaki ani haziran doluları Orta Karadeniz’de fındık bahçelerinde ciddi hasara yol açmış; 2021’de Antalya ve Mersin civarında peş peşe yaşanan hortum ve fırtınalar seraları yerle bir etmiştir. 2023 yılında İç Anadolu’da bahar geç donları nedeniyle meyve ağaçlarında büyük ürün kayıpları rapor edilmiş; aynı yıl yaz aylarında görülen uzun süreli sıcak hava dalgaları ve orman yangınları tarım alanlarına da sıçrayarak zeytinlikler ve diğer bahçelerde kayıplara neden olmuştur. İklim bilimciler, küresel ısınmanın 1.5°C ve 2°C eşiğini aşması halinde bu tür aşırı olayların çok daha sık ve yoğun yaşanacağı konusunda uyarmaktadır. Türkiye de bu riskten muaf değildir: IPCC öngörülleri, Akdeniz havzasında yer alan ülkemizde aşırı sıcak hava dalgaları, kuraklık, orman yangını ve ani yağış kaynaklı sellerin gelecekte daha da artacağına işaret etmektedir. Dolayısıyla tarımsal üretim, bu beklenmedik şoklara karşı her zamankinden daha kırılgan hale gelmektedir.

Ekstrem hava olaylarının tarım sektörü üzerindeki ekonomik etkileri de büyüktür. Bir yandan üretici gelirleri dalgalanırken, diğer yandan ülke genelinde toplam tarımsal üretimde yıllara göre istikrarsızlık oluşmakta, bu da gıda arz güvenliğini tehdit etmektedir. Ayrıca, sık tekrar eden afetler yüzünden tarım sigortaları (TARSİM) için tazminat ödemeleri artmakta, sigorta primleri yükselerek üreticinin maliyetine ek yük getirmektedir. Sonuç olarak, iklim değişikliğinin yol açtığı ekstrem hava olayları, tarımsal üretimde öngörülemezlik ve istikrarsızlık yaratmakta; bu da hem yerel çiftçiler hem ulusal ekonomi açısından önemli bir meydan okumadır.

Toprak Verimliliği ve Çölleşme

İklim değişikliğinin dolaylı fakat son derece kritik etkilerinden biri, toprak sistemleri üzerindeki bozucu etkisidir. Toprak, tarımsal üretimin temel unsurudur ve verimlilik düzeyi; toprağın organik madde içeriği, besin elementleri, yapısal bütünlüğü ve nem kapasitesi gibi faktörlere bağlıdır. Uzun vadede iklimde meydana gelen değişimler, toprak verimliliğini tehdit eden bir dizi süreci hızlandırabilir.

Artan sıcaklıklar ve değişen yağış rejimleri, birçok bölgede toprağın nem dengesini bozarak kuraklaşmaya yol açmaktadır. Toprakta yeterli nemin olmaması, organik maddelerin parçalanma hızını ve mikroorganizma faaliyetlerini düşürür. Ayrıca, ekstrem yağış olayları toprağın üst katmanlarını aşındırarak verimli üst toprağın kaybına (erozyona) neden olur. Özellikle bitki örtüsünün seyrekleştiği kurak dönemlerde şiddetli rüzgâr ve sağanak yağış kaynaklı erozyon, toprak kayıplarını katlayarak artırmaktadır. Çölleşme riski, yarı kurak iklim kuşağında bulunan Türkiye için gerçek bir tehlikedir; iklim modelleri, mevcut iklim trendlerinin devam etmesi halinde bozkır ekosistemlerinin genişleyebileceğini ve meraların daralabileceğini öngörmektedir.

Toprak verimliliği açısından endişe verici bir gösterge, ülkemizde toprakların organik madde ve besin elementlerindeki azalmalardır. Yapılan araştırmalar, Türkiye’de toprağın verimlilik göstergelerinin son yıllarda belirgin biçimde gerilediğini ortaya koymaktadır. Örneğin, Tarım ve Orman Bakanlığı’nın ilgili raporuna göre Türkiye’nin toprak verimliliği son 10 yıl içinde %23 oranında azalmıştır. Bu ciddi düşüş, toprağın organik yapısının zayıflaması ve tarımsal üretim için elzem olan azot, fosfor, potasyum gibi bitki besin elementlerinin eksilmesi anlamına gelmektedir. Toprak verimliliğindeki bu azalma, çiftçileri daha fazla kimyasal gübre kullanmaya yöneltmekte; aşırı gübre kullanımı ise hem maliyetleri artırmakta hem de nitrat kirliliği ve azot oksit (N₂O) emisyonları gibi çevresel sorunlara yol açmaktadır.

İklim değişikliği kaynaklı toprak bozulmasının bir diğer boyutu da tuzluluk ve çoraklaşma riskidir. Deniz seviyesinin yükselmesi, kıyı ovalarında tuzlu su girişimine yol açarak tarım alanlarının tuzlanmasına neden olabilir. Yine azalan yağış ve artan buharlaşma, sulama yapılan yarı kurak alanlarda tuz birikimini tetikleyerek toprak kalitesini düşürebilir. Tüm bu etkenler bir arada değerlendirildiğinde, iklim değişikliği karşısında toprağın korunması ve iyileştirilmesi, tarımın sürdürülebilirliği için hayati önemdedir. Aksi takdirde, topraktaki verim kaybı geri döndürülemez boyutlara ulaşabilir ve tarımsal üretimin geleceğini ciddi şekilde tehlikeye atabilir.

Bitki Hastalıkları ve Zararlılar

İklim koşullarındaki değişimler, bitkisel üretimde karşılaşılan hastalık ve zararlı etmenlerin davranışlarını da etkilemektedir. Genel olarak sıcaklıkların artması ve kışların ılıman geçmesi, bir yandan bazı zararlı böcek popülasyonlarının kış aylarını daha fazla canlı bireyle atlatmasına ve coğrafi olarak daha geniş alanlara yayılmasına olanak sağlarken diğer yandan bitki hastalıklarının (fungal, bakteriyel vs.) yıl içinde görülme sıklığını ve şiddetini değiştirebilir.

Örneğin, daha sıcak ve kuru geçen dönemler bazı böcek türlerinin üreme döngülerini kısaltarak yılda birden fazla jenerasyon vermelerine yol açabilir. Bu da ekili ürünlere verilen zararın katlanmasına neden olur. Akdeniz iklim kuşağında sıcaklık artışıyla birlikte zeytin sineği, Akdeniz meyve sineği gibi zararlıların daha yüksek rakımlara ve daha kuzey enlemlere yayılabildiği gözlemlenmektedir. Benzer şekilde, ılıman kışlar hububat hastalıklarının (pas, mildiyö gibi) yıl içinde daha erken başlamasına ve bitkilerin büyüme mevsimi boyunca tehdit oluşturmaya sebebiyet verebilir.

Özellikle nemli bölgelerde sıcaklığın artması bazı fungal hastalıkları teşvik ederken, kuraklığın artması ise bitkileri zayıflatarak zararlılara karşı dirençsiz hale getirebilir. Ayrıca, iklim değişikliğiyle bağlantılı olarak yabancı ot popülasyonlarında da değişiklikler beklenmektedir; rekabetçi yabancı ot türleri yeni iklim koşullarına adapte olarak tarımsal ürünlerle daha agresif rekabete girebilir.

Her ne kadar bu konuda Türkiye özelinde detaylı ve sayısal projeksiyonlar sınırlı olsa da, uluslararası araştırmalar iklim değişikliğinin bitki koruma alanında önemli zorluklar yaratacağını vurgulamaktadır. İleride tarımsal üretimde verimi koruyabilmek için, iklim değişikliğinin getireceği yeni hastalık ve zararlı risklerine karşı proaktif tedbirler (erken uyarı sistemleri, biyolojik mücadele, dayanıklı çeşit geliştirme vb.) büyük önem taşıyacaktır.

Türkiye’de Mevcut Durum: Bulgular ve Örnekler

Yukarıda genel hatlarıyla ele alınan etkiler, şüphesiz her ülkenin kendi coğrafi ve sosyoekonomik koşullarına göre farklı düzeylerde hissedilmektedir. Türkiye açısından bakıldığında, iklim değişikliğinin tarımsal üretime etkilerini şimdiden göstermeye başladığı çeşitli araştırmalar ve istatistiklerle ortaya

konmuştur. Bu bölümde, Türkiye’de son yıllarda gözlemlenen eğilimler ve somut örnekler üzerinden iklim değişikliği-tarım ilişkisi değerlendirilecektir.

Sıcaklık Trendleri: Türkiye’de uzun vadeli sıcaklık verileri, belirgin bir ısınma eğilimine işaret etmektedir. Özellikle 1990’lardan itibaren ortalama sıcaklıklarda hızlanan bir artış görülmektedir. Meteoroloji Genel Müdürlüğü’nün 1971-2024 dönemini kapsayan analizine göre, 2010 yılı 15,5°C ortalama sıcaklık ile 20. yüzyılın son çeyreğinden bu yana en sıcak yıl olarak kaydedilmişti; ancak 2024 yılında ortalama sıcaklık 15,6°C’ye ulaşarak bu rekoru tazeledi ve son 53 yılın en sıcak yılı oldu (Meteoroloji Genel Müdürlüğü (2025)). Bu değer, sanayileşme öncesi dönemin oldukça üzerindedir. Türkiye’nin yıllık ortalama sıcaklığındaki artış, bölgesel farklılıklar göstermekle birlikte hemen her coğrafyada hissedilmektedir. Örneğin, İç Anadolu Bölgesi’nde yaz mevsimi sıcaklıklarının geçmişe kıyasla daha yüksek değerlere çıktığı; Doğu Anadolu’da kışların eskisine göre daha ılıman geçtiği gözlenmektedir. Sıcaklıklardaki bu artış eğilimi, tarımsal üretim takvimini de değiştirmeye başlamıştır. Çiftçiler, ekim-dikim zamanlarını kaydırmak veya erken olgunlaşan tohum çeşitlerine yönelmek zorunda kalabilmektedir. Ayrıca meyve ağaçları için soğuklama gereksiniminin karşılanamaması gibi yeni problemler ortaya çıkmaktadır. Tüm bu işaretler, iklim değişikliğinin Türkiye tarımında halihazırda etkili olmaya başladığını göstermektedir.

Yağış ve Kuraklık Gözlemleri: İklim istatistikleri, Türkiye’de yağış rejiminde uzun vadede hafif bir azalma ve daha düzensiz bir dağılım eğilimi olduğunu ortaya koymaktadır. Özellikle kış ve ilkbahar yağışlarının azalması, baraj dolgularını ve toprağın suya doygunluğunu olumsuz etkileyerek yaz kuraklıklarını şiddetlendirmektedir. Son yıllarda peş peşe gelen kurak yıllar tarımsal üretimi düşürmüştür. Örneğin, 2021 yılı ülke genelinde ciddi bir kuraklıkla geçmiş ve buğday rekoltesinde önceki yıla göre büyük düşüş yaşanmıştır (resmi istatistiklere göre buğday üretimi 2020’ye kıyasla yaklaşık %14 azalmıştır) (Dinç, A. & Toğay, Y. (2025)). Aynı şekilde, 2022 ve 2023 yıllarında da bazı bölgelerde (özellikle Güneydoğu ve İç Anadolu’da) yağış yetersizliği nedeniyle hububat ve bakliyat verimleri düşük gerçekleşmiştir. 2024 yılı ise yukarıda belirtildiği gibi geniş alanlarda kuraklık etkisi göstermiş, Güneydoğu Anadolu ve Trakya başta olmak üzere buğday

verimleri ortalamaların çok altına inmiştir (Demircan, V. (2022)). Özellikle Güneydoğu Anadolu tarım havzaları, iklim değişikliğinin neden olduğu yağış azlığına karşı kırılgan bir yapı sergilemektedir. GAP bölgesinde son on yılda yağışlardaki dalgalanma ve azalma eğilimi, sulama projelerinin önemini daha da artırmıştır. Kurak yıllarda Fırat-Dicle gibi ana su kaynaklarındaki düşüş, sulamaya bağımlı pamuk ve mısır üretimini de olumsuz etkilemektedir. Meteoroloji Genel Müdürlüğü'nün Tarımsal Kuraklık Raporları, 2020-2022 periyodunda bile Türkiye'nin bazı kesimlerinde toprak neminin kritik eşiğin altına indiğini ve tarımsal kuraklık uyarıları verildiğini kaydetmektedir. Özetle, mevcut gözlemler Türkiye'nin iklim değişikliği kaynaklı kuraklık tehlikesiyle karşı karşıya olduğunu açıkça göstermektedir.

Verim ve Üretim Üzerindeki Etkiler: İklim değişikliğinin somut etkilerini en net gösteren alan, tarımsal ürün verimlerindeki değişimdir. Yapılan bilimsel çalışmalar ve istatistikler, iklimdeki dalgalanmaların tarımsal üretimde dalgalanmalara yol açtığını ortaya koymaktadır. Örneğin, Türkiye'de 1980-2013 dönemini kapsayan bir ekonometrik analiz, yağış miktarındaki değişimlerin tarımsal GSYİH üzerinde anlamlı ve pozitif etkisi olduğunu (yani yağış artışının tarımsal üretimi artırdığını), buna karşın sıcaklık değişimlerinin tarım sektörünü olumsuz etkilediğini göstermiştir (Oğul, B. (2022)). Başka bir ifadeyle, yağış azalması ve sıcaklık artışı bir arada değerlendirildiğinde Türkiye'nin tarımsal ekonomik çıktısını düşürücü yönde etkiler yapmaktadır. 2024 yılında yaşanan kuraklığın da çarpıcı bir etkisi kaydedilmiştir: Bu yıl buğday, arpa, mısır gibi temel ürünlerin üretimi, kuraklığın yoğun hissedildiği bölgelerde önceki yıllara oranla ciddi ölçüde azalmıştır. Örneğin Trakya'da 2024 kuraklığı buğday verimini yarı yarıya düşürmüştür; Güneydoğu Anadolu'da mercimek üretimi kurak koşullar nedeniyle çok zayıf kalmıştır (Oğul, B. (2022)). Bu durum, tarım sektörünün iklim anormalliklerine ne denli duyarlı olduğunu göstermektedir.

Toprak verimliliğindeki düşüş de üretim üzerinde hissedilmektedir. Önceki bölümde değinilen %23'lük toprak verimliliği kaybı elbette tek başına iklim değişikliğinden kaynaklanmasa da kuraklık ve aşırı hava olaylarının toprağın fiziksel ve kimyasal yapısını bozması bu kaybın önemli bir etkenidir (Dayan, A. & Bayram, C.A. (2022)). Toprağın organik maddesinin azalması, ürün verimini uzun vadede azaltan bir tehdittir; nitekim son yıllarda bazı

bölgelerde gözlenen verim düşüşleri sadece iklim koşullarına değil, aynı zamanda toprağın yorgunluğuna ve zayıflamasına bağlanmaktadır.

Hayvancılık Üzerine Etkiler: Tarımsal üretimin bir diğer ayağı olan hayvancılık sektörü de iklim değişikliğinden etkilenmektedir. Artan sıcaklıklar, hayvanların verimini ve sağlık koşullarını olumsuz etkileyebilir. Özellikle yaz aylarında görülen aşırı sıcaklar, büyükbaş ve küçükbaş hayvanlarda **ısı stresi** yaratarak et-süt verimini düşürür ve hastalıklara yatkınlığı artırır. Türkiye'nin de içinde bulunduğu Akdeniz kuşağında gelecekte hayvancılık için risklerin artacağı öngörülmektedir. Örneğin meralardaki otlatma kapasitesinin düşmesi, su kaynaklarının azalması ve yeni parazit-hastalık riskleri hayvan yetiştiriciliğini zorlaştırabilir. Son yıllarda Güneydoğu Anadolu'da kuraklık nedeniyle bazı yörelerde küçükbaş hayvan sürülerinin erken kesime gönderildiği, besicilik maliyetlerinin yükseldiği bildirilmektedir. Ayrıca yüksek sıcaklıklara bağlı olarak tavukçuluk sektöründe de verim kayıpları (örneğin yumurta veriminin düşmesi) kaydedilmiştir. İklim değişikliğinin devam etmesi halinde, hayvancılık işletmelerinin barınak koşullarını iyileştirme, soğutma sistemleri kurma gibi adaptasyon yatırımlarına daha çok ihtiyaç duyacağı açıktır.

Özetle, Türkiye'de iklim değişikliği tarım sektörünü halihazırda ölçülebilir biçimde etkilemeye başlamıştır. Sıcaklık ve yağıştaki değişimlerin tarımsal üretime negatif yansıdığı bilimsel bulgularla desteklenmektedir. Mevcut çiftçi deneyimleri de bu bulgularla örtüşmektedir: İklim anormalliklerinin artmasıyla çiftçiler ekim takvimlerini değiştirmek, farklı ürün desenlerine yönelmek, bazen de üretimden vazgeçmek zorunda kalmaktadır. Nitekim Ziraat Odaları'ndan gelen raporlar, bazı bölgelerde üst üste birkaç kurak yıl yaşayan üreticilerin maliyetleri karşılayamadığı için üretimden çekildiğini bildirmektedir. Bu durum, tarımda sürdürülebilirliğin tehdit altında olduğunu gösterir niteliktedir.

Geleceğe Yönelik Projeksiyonlar ve Riskler

İklim modellemeleri ve senaryolar, önlem alınmadığı takdirde iklim değişikliğinin ilerleyen yıllarda çok daha belirgin ve şiddetli etkiler doğuracağını ortaya koymaktadır. Geleceğe yönelik projeksiyonlar, Türkiye'nin de içinde bulunduğu coğrafyada sıcaklık artışlarının küresel ortalamanın üzerinde olabileceğine ve yağış rejiminin ciddi ölçüde

değişebileceğine işaret etmektedir. Bu bölümde, bilimsel senaryolara dayalı olarak Türkiye tarımı açısından öngörülen iklim koşulları ve bunların muhtemel sonuçları ele alınacaktır.

Sıcaklık Artış Projeksiyonları: Mevcut iklim modelleri, 21. yüzyılın ortasından itibaren Türkiye’de sıcaklıkların belirgin derecede artacağını öngörmektedir. Yapılan bölgesel iklim modellemesi çalışmalarına göre, 2040’lı yıllardan itibaren özellikle yaz aylarında Türkiye genelinde ortalama sıcaklıkların +3°C ile +5°C arasında artması beklenmektedir (Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı (2025)). Yüzyıl sonuna (2100'lere) doğru ise emisyon senaryolarına bağlı olarak yaz mevsimi sıcaklık artışının +4°C ile +7°C gibi çok yüksek değerlere ulaşabileceği tahmin edilmektedir. Isınmanın en belirgin hissedileceği yerler, model sonuçlarına göre Güneydoğu Anadolu, Akdeniz ve Ege Bölgeleri olacaktır; zaten sıcak ve yarı kurak iklime sahip bu bölgelerde ekstra 4-7 derecelik bir artış, yaz mevsimlerini bugünkünden çok daha bunaltıcı ve kurak hale getirebilir. Kış aylarında ise özellikle iç bölgelerde sıcaklık artışının biraz daha sınırlı (örneğin +2°C ile +3°C arası) kalacağı tahmin edilmektedir (Tarım ve Orman Bakanlığı (2023)). Ancak kışların ılımanlaşması da kar yağışlı gün sayısının azalması, kar birikiminin düşmesi ve dolayısıyla yazın suya dönüşecek kar rezervuarlarının zayıflaması anlamına geldiği için su kaynakları üzerinde olumsuz etki yapacaktır.

Sıcaklık artışına bağlı olarak sıcak hava dalgaları ve yaz günleri (maksimum sıcaklığın 30°C üzeri olduğu günler) sayısının da katlanarak artması beklenmektedir. Örneğin, ileriki yıllarda İç Anadolu’da bugüne dek nadir görülen 40°C üzeri ekstrem sıcaklıkların artık her yaz rutin hale gelebileceği, Ege ve Akdeniz sahillerinde ise tropik gece olarak tanımlanan 25°C üzeri gece sıcaklıklarının sıklaşacağı ifade edilmektedir. Bu koşullar, hem bitkilerin ve hayvanların fizyolojik sınırlarını zorlayacak hem de tarla faaliyetlerinin (hasat, ekim vb.) belirli dönemlerde yapılmasını güçleştirecektir.

Yağış ve Su Kaynakları Projeksiyonları: Gelecek projeksiyonlarında yağışlar için tablo ne yazık ki sıcaklıklardan daha karamsar görünmektedir. Akdeniz havzası genelinde kuraklaşma öngörüsü mevcuttur ve Türkiye de bu eğilimden payını alacaktır. Modellerin çoğunluğuna göre, Karadeniz kıyı bölgeleri hariç Türkiye’nin büyük kısmında yıllık toplam yağış miktarında belirgin azalmalar yaşanacak, bu azalış yüzyılın sonuna doğru bazı

yerlerde ortalama 100-250 mm seviyesine ulaşacaktır. Bu, mevcut yağış ortalamalarıyla kıyaslandığında oldukça ciddi bir düşüş anlamına gelir (örneğin İç Anadolu'nun yıllık yağışı ~400 mm civarı ise 2100'de 300 mm'nin altına inebilir). Özellikle ilkbahar yağışlarında azalma ve yağışların daha ziyade kışın yoğunlaşması beklenmektedir. Bu durum, bitkilerin büyüme döneminde suya erişimini zorlaştıracak ve sulama ihtiyacını arttıracaktır (Bayraç, H.N. & Doğan, E. (2016)).

Kurak dönemlerin uzaması ve şiddetlenmesi, su kaynaklarının yenilenme hızını düşürecektir. Baraj göllerinin beslenmesi için kritik olan kar yağışlarının azalması da baraj doluluk oranlarını olumsuz etkileyebilir. Ayrıca yağışların daha kısa sürede ve sağanak şeklinde düşeceği tahmini, yüzey akışının artacağı ve suyun yeraltına sızamadan denize veya akarsulara hızlıca akacağı anlamına gelir. Bu da yeraltı suyu rezervlerinin yeterince beslenememesi riskini doğurur. Halen birçok tarım bölgesinde yoğun biçimde kullanılan yeraltı sularının, iklim değişikliği etkisiyle daha yavaş yenileneceği ve seviyelerinin düşeceği öngörülebilir.

Kuraklık projeksiyonları tarım açısından endişe vericidir. Modellemeler, 21. yüzyıl ilerledikçe Türkiye'nin özellikle Batı ve Orta Anadolu kesimlerinde meteorolojik kuraklıkların daha sık ve uzun süreli olacağını, tarımsal kuraklık riskinin artacağını belirtmektedir. Bir çalışmada, yüksek emisyon senaryosu gerçekleşirse yüzyılın sonunda Türkiye'nin güney kesimlerinde şu andakine kıyasla çok daha şiddetli kuraklık dönemlerinin norm haline gelebileceği bildirilmiştir. Bu da eğer önlem alınmazsa tarımsal üretimde ciddi aksamalar olabileceği anlamına gelir (Dinç, A. & Toğay, Y. (2025)).

Ürün Desenleri ve Verim Üzerine Öngörüler: İklim değişikliğiyle birlikte tarımsal üretimde ürün deseninin de değişebileceği sıkça dile getirilen bir konudur. Sıcaklık artışları ve yağış azalması, bazı geleneksel ürünlerin belirli bölgelerde yetiştirilememesine yol açabilirken, diğer yandan daha sıcak iklim isteyen yeni ürünlerin yetişmesine olanak sağlayabilir. Örneğin, Akdeniz kıyı şeridinde turuncgil tarımı iklim değişikliği nedeniyle zorlanırsa, yerini kısmen daha dayanıklı tropik meyvelere (avokado, mango gibi) bırakabilir (Dellal, İ. (2012)). İç Anadolu'da buğday tarımı kuraklık nedeniyle verimsiz hale gelirse, belki kışa dayanıklı arpaya veya su istemeyen nohut gibi baklagillere yönelim artabilir.

Verim projeksiyonları konusunda, yapılmış sınırlı çalışmalar olsa da geleceğe ışık tutmaları açısından değerlidir. Türkiye'nin II. Ulusal Bildirimi kapsamında yapılan bir modelleme çalışması (Dellal, 2012), 2050 yılı itibarıyla iklim değişikliğinin ana tarla ürünlerinin üretim miktarına muhtemel etkilerini hesaplamıştır. Bu senaryoya göre 2050'de iklim değişikliği sonucu verimde yaşanacak azalmalar nedeniyle üretim miktarındaki düşüşün, buğdayda yaklaşık %8, arpada %2, mısırdaki %9, pamukta %5 ve ayçiçeğinde %13 civarında olacağı tahmin edilmektedir (mgm.gov.tr). Aşağıdaki tablo, söz konusu çalışmanın öngördüğü 2050 yılı üretim azalışlarını özetlemektedir:

Tablo 1: 2050 yılında iklim değişikliği nedeniyle seçili ürünlerde öngörülen üretim azalması (mgm.gov.tr).

Ürün	2050 Öngörülen Üretim Azalışı (%)
Buğday	8,2 %
Arpa	2,2 %
Mısır	9,1 %
Pamuk	4,5 %
Ayçiçeği	12,9 %

Bu öngörüler, mevcut tarımsal üretim sisteminde herhangi bir adaptasyon yapılmadığı varsayımıyla ortaya konmuştur. Dolayısıyla, adaptasyon tedbirleri alınır ve yeni teknolojiler kullanılırsa gerçekleşecek kayıplar bu değerlerin altında tutulabilir. Yine de tablo, iklim değişikliğinin tarla bitkileri üretimine yönelik potansiyel riskinin boyutunu göstermesi açısından çarpıcıdır. Özellikle stratejik öneme sahip buğday gibi bir üründe %8'lik üretim kaybı, Türkiye ölçeğinde milyonlarca ton tahılın eksik üretilmesi anlamına gelir ki bu da ithalat ihtiyacını artırabilir (Dayan, A. & Bayram, C.A. (2022).

Bazı ürünlerde ise iklim değişikliği daha karmaşık etkiler doğurabilir. Örneğin üzüm, zeytin gibi çok yıllık bitkilerde sıcaklık artışı başlangıçta olgunlaşmayı hızlandırıp kaliteyi yükseltebilir; ancak eşik değerler aşıldığında

yüksek sıcaklık strese dönüşerek verimi düşürebilir. Benzer şekilde, çay tarımı Karadeniz’de yükselen sıcaklıklardan olumsuz etkilenebilir, belki gelecekte daha yüksek rakımlara taşınmak zorunda kalabilir. Hayvancılıkta ise artan sıcaklıkların yem bitkileri üretimini azaltması ve meraların zayıflaması, dolaylı yoldan et ve süt üretimini sınırlandıracaktır.

Son olarak, iklim değişikliğinin getireceği gıda güvencesi riskine değinmek gerekir. Üretimdeki düşüşler ve dalgalanmalar, nüfus artışıyla birleştiğinde gıda fiyatlarının yükselmesine, ithalat bağımlılığının artmasına ve kırılgan kesimlerin gıdaya erişimde sıkıntı yaşamasına neden olabilir. Bu nedenle, geleceğe dönük projeksiyonlar ne kadar olumsuz olursa olsun, bunları azaltmanın ve uyum sağlamanın yolları bir sonraki bölümde ele alınmaktadır.

İklim Değişikliğine Uyum Stratejileri ve Sürdürülebilir Tarım

İklim değişikliğinin tarım sektörü üzerindeki mevcut ve potansiyel etkileri göz önüne alındığında, hem kamu otoriteleri hem de çiftçiler düzeyinde kapsamlı uyum (adaptasyon) stratejilerinin geliştirilmesi hayati önem taşımaktadır. Uyum stratejileri, iklimdeki kaçınılmaz değişimlere tarımsal üretim sistemlerini adapte etmeyi, esnekliği artırmayı ve riskleri azaltmayı hedefler. Türkiye, bu konuda son yıllarda çeşitli planlar ve programlar ortaya koymuş; tarımda iklim değişikliğine uyum ve sera gazı azaltımına yönelik eylem planları hazırlamıştır. Bu bölümde, tarım sektörünün iklim değişikliğine karşı direncini artırmak için uygulanabilecek başlıca stratejiler incelenmektedir (Tarım ve Orman Bakanlığı (2021)).

Politika ve Planlama Düzeyinde Adımlar: Türkiye’de İklim Değişikliğine Uyum Eylem Planları ve Tarımsal Kuraklıkla Mücadele Stratejileri gibi politika dokümanları hazırlanmıştır. Örneğin, Tarım ve Orman Bakanlığı bünyesinde “Türkiye Tarımsal Kuraklıkla Mücadele Stratejisi ve Eylem Planı” uygulanmakta olup, bu çerçevede tarım havzaları bazında kuraklık risk yönetimi geliştirilmektedir. Benzer şekilde, 2024 yılında güncellenen İklim Değişikliğine Uyum Ulusal Stratejisi (2024-2030) tarım sektörü için kısa ve uzun vadeli uyum tedbirleri öngörmektedir. Bu planlarda vurgulanan bazı önemli başlıklar şunlardır:

- **Tarımsal Kuraklık Erken Uyarı Sistemleri:** Kuraklık gelişimini önceden tespit edip çiftçiye uyarı verecek sistemlerin ülke genelinde kurulması hedeflenmektedir. Toprak nemi ve meteorolojik verileri sürekli izleyip belirli

eşiklerin altına düşüldüğünde alarm veren bu sistemler, çiftçilerin önlem alması veya sulama planlamasını ayarlaması için kritik önemdedir.

• **İklim Risk Haritaları ve Arazi Kullanım Planlaması:** İklim değişikliğine karşı hassasiyetlerin bölgesel düzeyde belirlenip tarımsal üretimin buna göre planlanması gerekmektedir. Örneğin, kuraklık riski yüksek havzalarda suyu az kullanan bitkilere yönelinmesi, taşkın riski yüksek ovalarda drenaj yatırımlarının artırılması gibi kararlar, bilimsel iklim risk haritaları ışığında alınmalıdır.

• **Ar-Ge ve Eğitim:** Tarımda iklim değişikliğine uyum ve sera gazı azaltımı konusunda araştırma-geliştirme faaliyetlerinin desteklenmesi, yeni teknolojilerin geliştirilmesi ve çiftçilere yayım yoluyla aktarılması büyük önem taşır. Bu kapsamda üniversiteler, araştırma enstitüleri ve özel sektör iş birliğiyle iklim dostu tarım tekniklerinin geliştirilmesi teşvik edilmektedir.

Teknik ve Çiftçi Düzeyinde Uyum Önlemleri: Politika belgelerinde de yer alan ve sahada uygulanabilecek başlıca uyum tedbirleri şöyle özetlenebilir:

• **Kuraklığa Dayanıklı Çeşit Geliştirme:** Bitki ıslahı çalışmalarıyla, daha az suyla yetinebilen veya yüksek sıcaklığa toleranslı yeni tohum çeşitlerinin geliştirilmesi önceliklidir. Nitekim Tarım Bakanlığı, kuraklığa ve soğuğa toleranslı tohum çeşitlerinin geliştirilmesi ve kullanıma sunulması için Ar-Ge projelerini desteklemektedir. Bu kapsamda özellikle buğday, arpa, mısır gibi stratejik ürünlerde kurak koşullarda verim verebilecek hatların ıslahı önem kazanmıştır (Dinç, A. & Toğay, Y. (2025)).

• **Sürdürülebilir ve Tasarruflu Sulama Teknikleri:** Su kıtlığına uyum sağlamanın en etkili yolu, mevcut suyun en verimli şekilde kullanılmasıdır. Bu doğrultuda modern sulama sistemlerinin yaygınlaştırılması hedeflenmektedir. Damla sulama, yağmurlama gibi yöntemler, vahşi sulamaya kıyasla su tasarrufu sağladığı için devlet teşvikleriyle desteklenmektedir. Ayrıca Bakanlık, gece sulaması gibi buharlaşma kayıplarını azaltan uygulamaları teşvik etmektedir; gece serin saatlerde yapılan sulama ile suyun daha etkin kullanılması sağlanabilir. Bir diğer yenilikçi uygulama, yağmur sularının depolanmasıdır: Tarla kenarlarında veya köy ölçeğinde yapılacak küçük bentler, göletler ile yağışlı dönemde su depolayıp kurak dönemde

kullanma (yağmur hasadı) planlanmaktadır ve bu tür projelere %50 hibe desteği verilmektedir.

• **Toprak Yönetimi ve Koruyucu Tarım:** Toprağın iklim değişikliğine uyumunda en önemli hususlardan biri organik maddeyi artırmak ve nem tutma kapasitesini yükseltmektir. Bu amaçla anızın toprakta bırakılması, anız yakmanın önlenmesi kritik bir adımdır. Anız yakılmasının etkin denetimi sürdürülmekte ve yakmaya alternatif yöntemler (örneğin malçlama, parçalama) çiftçilere aktarılmaktadır. Koruyucu toprak işleme (Minimum toprak işleme) teknikleri ile toprağın sürülmeden ekim yapılması veya asgari sürümle işlenmesi teşvik edilmektedir; bu sayede toprak nemi korunmakta ve karbon salımı azaltılmaktadır. Ayrıca erozyon kontrolü için eğimli arazilerde teraslama, ağaçlandırma ve bitki örtüsü iyileştirme çalışmaları da önem arz etmektedir.

• **Ekosistem Tabanlı Uyum (Agroekoloji):** Tarım alanlarının iklim değişikliğine karşı direncini artırmak için ekosistem yaklaşımından yararlanılabilir. Örneğin “Canlı rüzgar perdeleri” adı verilen ve tarla kenarlarına ağaç sıraları dikerek oluşturulan rüzgar kıranlar, hem erozyonu azaltmakta hem de lokal iklimi iyileştirerek ürünleri korumaktadır. Benzer şekilde, agroforestry (tarımsal ormancılık) uygulamaları teşvik edilmektedir; yukarı havzalarda meyve ağaçları, orman ve mera kombinasyonları oluşturularak su tutma kapasitesinin artırılması, su döngüsündeki kırılganlıkların giderilmesi hedeflenmektedir. Bu tür ekosistem temelli uyum yöntemleri, doğal süreçleri kullanarak iklim risklerini hafifletmeyi amaçlar.

• **Tarım Sigortaları ve Risk Paylaşımı:** İklim risklerinin tamamını çiftçinin omuzlamaması için tarım sigortası sistemi (TARSİM) kritik bir uyum aracıdır. Mevcut durumda dolu, don gibi riskler için yaygın olan sigorta, kuraklık riski için de geliştirilmektedir. Halen kuru tarım alanlarında köy bazlı kuraklık verim sigortası uygulansa da bunun parsel bazlı hale getirilip genişletilmesi planlanmaktadır. Böylece kuraklık yaşandığında çiftçinin uğrayacağı gelir kaybının bir kısmı telafi edilebilecek, bu da çiftçilerin iklim riskine rağmen üretimde kalmasına yardımcı olacaktır.

• **Çiftlik Ölçeğinde Yenilenebilir Enerji ve Azaltım:** Uyumun yanı sıra tarımda sera gazı azaltım önlemleri de bütüncül bir yaklaşımla düşünülmektedir. Tarım sektörünün kendi emisyonlarını düşürmesi, iklim

değişikliğinin hızını yavaşlatmaya katkı sunacaktır. Bu kapsamda çiftlik ölçeğinde güneş ve biyogaz enerjisi kullanımı teşvik edilmektedir. Örneğin, bazı destek programları çiftçilerin kendi elektriğini üretebileceği güneş panelleri kurulumu için hibeler sağlamaktadır. Ayrıca hayvancılık işletmeleri için biyogaz tesisleri kurulumu desteklenmekte, böylece hem hayvan atıkları yönetilmekte hem de enerji elde edilmektedir. Bunlara ek olarak iklim dostu tarımsal destekleme modeli geliştirilmesi hedefi bulunmaktadır; yani tarımsal desteklemelerin dağıtımında, bölgelerin iklim risklerine duyarlılığı ve yapılan faaliyetlerin sera gazı emisyon profili göz önüne alınacaktır. Örneğin, su sıkıntısı çeken bölgelerde su tasarrufu sağlayan ürünlere daha fazla destek verilmesi gibi düzenlemeler söz konusu olabilir.

• **Eğitim ve Yayım Faaliyetleri:** İklim değişikliğine uyum stratejilerinin başarısı, büyük ölçüde çiftçilerin ve paydaşların bilinç düzeyine bağlıdır. Bu nedenle yayım çalışmalarına ağırlık verilmektedir. Bakanlık ve ziraat odaları, çiftçilere iklim dostu tarım uygulamaları, sürdürülebilir sulama teknikleri, toprak koruma yöntemleri gibi konularda eğitimler düzenlemektedir. Ayrıca erken uyarı sistemlerinden gelen bilgilerin çiftçilere SMS, mobil uygulama gibi yollarla anlık iletilmesi için dijital altyapılar geliştirilmektedir.

Uluslararası İşbirliği ve Destekler: Tarım sektörü, iklim değişikliğine uyum konusunda uluslararası düzeyde de işbirliğine açıktır. Türkiye, Paris Anlaşması'na taraf olarak uyum ve azaltım konularında uluslararası finansman ve teknoloji transferi imkanlarından yararlanabilmektedir. Özellikle iklim fonları ve hibe programları (örneğin Yeşil İklim Fonu) ile tarımda uyum projelerine kaynak sağlanması mümkündür. Komşu ülkelerle ortak havza yönetimi, bölgesel erken uyarı sistemleri ağı gibi işbirliği alanları da gündemdedir. Ayrıca FAO gibi kuruluşların teknik desteğiyle kuraklıkla mücadele, çölleşmeyi önleme projeleri yürütülmektedir.

Ekonomik ve Sosyal Politikalar: İklim uyumunu desteklemek için ekonomik teşvikler ve sosyal politikalar da devreye alınmalıdır. Örneğin, su kullanım ücretlendirmesinde tasarruflu sisteme geçen çiftçiye indirim sağlanması, sigorta primlerinin devlet katkısıyla düşürülmesi, afet yaşayan çiftçilerin borçlarının ertelenmesi gibi uygulamalar halihazırda kısmen yapılmaktadır ve bunların kapsamının genişletilmesi planlanmaktadır. Kırsal kalkınma yatırımlarının da iklim değişikliğini dikkate alacak şekilde

yönlendirilmesi (örneğin, kurak bölgelerde güneş enerjili sulama sistemleri kuranlara hibe gibi) söz konusudur.

Tüm bu strateji ve önlemler, tek bir amaca hizmet etmektedir: İklim değişikliğinin kaçınılmaz etkileri karşısında tarım sektörünü dirençli kılmak ve sürdürülebilir bir üretim yapısını korumak. Unutmamak gerekir ki, iklime uyum sağlamak yalnızca tarımsal üretimi değil, aynı zamanda kırsal yaşamın devamlılığını, gıda arz güvenliğini ve genel olarak ekonomik istikrarı da güvence altına almak demektir.

Sonuç ve Öneriler

İklim değişikliği, etkilerini her geçen yıl daha fazla hissettiren ve 21. yüzyıl boyunca da insanlığı zorlamaya devam edecek olan kapsamlı bir krizdir. Tarım sektörü, bu krizin hem mağduru hem de kısmen sorumlusu olarak özel bir konumdadır. Bir yandan iklim değişikliği, tarımsal üretimin temel parametrelerini (sıcaklık, su, toprak verimliliği vb.) olumsuz etkileyerek gıda üretimini tehdit etmekte; diğer yandan sürdürülen bazı tarımsal uygulamalar (örneğin ormansızlaşma, aşırı gübre kullanımı, pirinç tarlalarından ve hayvancılıktan metan salımı) iklim değişikliğine katkıda bulunmaktadır. Dolayısıyla tarımın geleceği, iklim değişikliği ile mücadele ve uyum politikalarının başarısına büyük ölçüde bağlıdır.

Türkiye için değerlendirdiğimizde, iklim projeksiyonları ülkemizin ciddi bir ısınma ve kuraklık trendi ile karşı karşıya kalabileceğini göstermektedir. Bu durum, tarımsal üretimde mevcut coğrafi dağılımın ve yöntemlerin gözden geçirilmesini zorunlu kılacaktır. Bazı bölgelerde belki de geleneksel ürün desenleri terk edilip yeni ürünlere geçilmesi, üretim tekniklerinin tamamen değiştirilmesi gerekebilecektir. Örneğin, su kıtlığının derinleştiği Orta Anadolu’da yoğun su isteyen şeker pancarı yerine kuru koşullara dayanıklı yağlı tohumların ekimi daha mantıklı hale gelebilir; veya Akdeniz Bölgesi’nde narenciye bahçeleri daha yüksek rakımlara taşınmak durumunda kalabilir. Bu tür değişimler, iyi planlanmazsa üreticiler ve ekonomik sistem üzerinde sancılı geçişlere yol açabilir. Bu nedenle öngörü ve planlama önemlidir: Tarımsal araştırma enstitülerinin ve üniversitelerin, bölgesel iklim senaryolarını tarımsal ürün bazında detaylandırarak şimdiden hangi ürünün nerede daha sürdürülebilir olacağına dair yol haritaları hazırlaması gerekmektedir.

Öte yandan, iklim değişikliği her ne kadar tehditler barındırsa da doğru politikalarla bazı fırsatları da beraberinde getirebilir. Örneğin yenilenebilir enerjinin kırsalda yaygınlaştırılması, çiftçilere ek gelir sağlayabilir (örneğin biyogazdan elde edilen enerji veya tarlalara kurulan güneş panelleri). Karbon piyasalarının gelişimiyle, karbon tutan tarımsal uygulamalara (örneğin agroforestry, organik tarım) teşvikler gelebilir ve çiftçiler karbon kredileri satarak gelir elde edebilir. Ayrıca iklim dostu üretim yapan ülkelerin uluslararası pazarlarda tercih edilme olasılığı artacaktır; Türkiye, sürdürülebilir ve yeşil tarım uygulamalarını yaygınlaştırarak ihracat pazarlarında rekabet avantajı yakalayabilir.

Sonuç olarak, iklim değişikliği ve tarımın geleceği konusu, tüm paydaşların (akademisyenler, çiftçiler, karar vericiler ve genel kamu) birlikte çalışmasını gerektiren bir mesele olarak karşımızda durmaktadır. Tarım sektörü, iklim değişikliğiyle mücadelede hem uyum hem azaltım tarafında önemli bir rol oynayacaktır. İklim dirençli tohumların geliştirilmesinden tutun su yönetimine, erken uyarı sistemlerinden tutun finansal mekanizmalara kadar geniş bir yelpazede yapılacak çalışmalar, Türk tarımının geleceğini belirleyecektir.

Öneriler: Türkiye'nin tarımsal geleceğini güvence altına almak için aşağıdaki adımlar önerilebilir:

- **Uzun Vadeli Entegre Planlama:** Tarım, su, enerji ve çevre politikalarının iklim değişikliği hedefleri doğrultusunda entegre şekilde planlanması ve 2050-2100 perspektifine sahip stratejilerin oluşturulması.

- **Bilimsel Araştırmaların Desteklenmesi:** İklim değişikliği etkilerinin ürün bazında daha iyi anlaşılması için yerli araştırmaların artırılması; özellikle mikro ölçekte (il/ilçe bazında) iklim risk haritalarının çıkarılması.

- **Çiftçi Eğitim ve Yayım:** İklim dostu tarım teknikleri, su tasarrufu, toprak koruma, alternatif ürünler gibi konularda çiftçi eğitim programlarının yaygınlaştırılması ve başarılı uygulamaların paylaşılması.

- **Altyapı Yatırımları:** Sulama altyapısının modernizasyonu, yağmur suyu hasadı yapıları, rüzgar perdeleri ve erozyon kontrol tesisleri gibi somut yatırımların hızlandırılması.

• **Finansal Destek ve Teşvikler:** İklim risklerine karşı sigorta sisteminin güçlendirilmesi; uyum sağlayan çiftçiye (örneğin damla sulamaya geçen, kuraklığa dayanıklı ürün eken) doğrudan destek veya vergi avantajı sağlanması.

• **Toplumsal Farkındalık:** Genel kamuoyunun da iklim değişikliği ve gıda güvenesi ilişkisi hakkında bilinçlendirilmesi; böylece iklim dostu tarım uygulamalarına talebin ve desteğin artması.

Unutulmamalıdır ki, tarım sektörü **stratejik** bir sektördür ve iklim değişikliği karşısında bu sektörün ayakta kalması, bir ülkenin gıda bağımsızlığı ve ekonomik refahı için vazgeçilmezdir. Türkiye, geçmişte pek çok zorluğun üstesinden gelmiş köklü bir tarım geleneğine sahiptir. Bu geleneği geleceğe taşıırken, bilim ve teknolojinin rehberliğinde iklim değişikliğine uyum sağlamak mümkündür. Yeter ki bugünden gerekli adımlar atılsın. İklim değişikliğinin tarım üzerindeki etkilerini azaltacak her yatırım, aslında ülkenin geleceğine yapılmış en önemli yatırımlardan biri olacaktır.

KAYNAKLAR

- Bayraç, H.N. & Doğan, E. (2016). *Türkiye’de iklim değişikliğinin tarım sektörü üzerine etkileri*. Eskişehir Osmangazi Üniversitesi İİBF Dergisi, 11(1), 23-48.
- Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı (2025). *2024 Yılı Sıcaklık ve Yağış Değerlendirmesi – Haber Bülteni*.
- Dayan, A. & Bayram, C.A. (2022). *İklim Değişikliğinin Sebze Üretimi Açısından Ön Görülen Tehditleri ve Uyum Stratejileri*. Bahçe Dergisi, 51(Özel Sayı 1): 310–321.
- Dellal, İ. (2012). *Türkiye’de İklim Değişikliğinin Tarım ve Gıda Güvencesine Etkileri*. T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, Ankara, mgm.gov.tr.
- Demircan, V. (2022). İklim Değişikliğinin Türkiye Tarımı Üzerindeki Olası Etkileri. Tarım Ekonomisi Dergisi, 28(1), 12–20.
- Dinç, A. & Toğay, Y. (2025). İklim Değişikliği ve Tarımsal Kuraklığın Türkiye Tarımına Etkisi. Euroasia Mühendislik, Doğa ve Tıp Bilimleri Dergisi, 12(2), 387–396.
- Meteoroloji Genel Müdürlüğü (2025). *2024 Yılı İklim Değerlendirme Raporu – Basın Bülteni* (13/01/2025).
- Oğul, B. (2022). İklim değişikliği tarım sektörünü nasıl etkiliyor? Türkiye ekonomisi üzerine ekonometrik bir uygulama. Tarım Ekonomisi Dergisi, 28(2), 151-162.
- Tarım ve Orman Bakanlığı (2021). *İklim Değişikliği ve Tarım Değerlendirme Raporu*.
- Tarım ve Orman Bakanlığı (2023). *Türkiye Tarımsal Kuraklıkla Mücadele Stratejisi ve Eylem Planı 2023-2027 – (Resmi Doküman)*.

BÖLÜM 5

AGRİVOLTAİK SİSTEMLER VE TARIMSAL ÜRETİM

Arş. Gör. Dr. Ferhat UĞURLAR¹

DOI: <https://www.doi.org/10.5281/zenodo.17966517>

^{*1} Harran Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Toprak Bilimi ve Bitki Besleme Bölümü, Şanlıurfa, Türkiye. ferhatugurlar@gmail.com, ORCID: 0000-0002-3663-3497

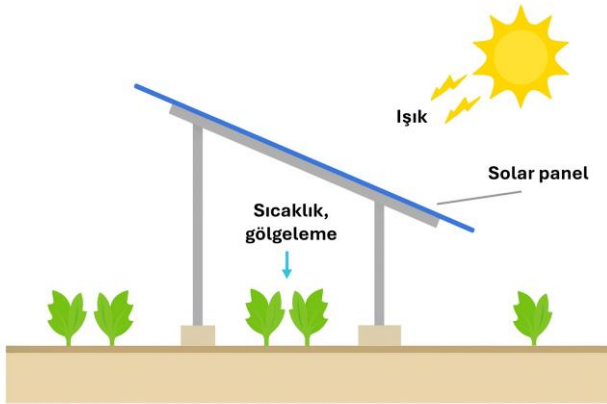
1. GİRİŞ

Küresel ölçekte artan enerji ve gıda talebi, iklim değişikliğinin hızlanan etkileri ve doğal kaynakların giderek sınırlı hâle gelmesi, tarımsal üretim sistemlerinin yeniden düşünülmesini zorunlu kılmaktadır. Fosil yakıtlara dayalı enerji üretimi, sera gazı emisyonlarının temel kaynaklarından biridir ve küresel ısınmayı hızlandırarak tarımsal üretim üzerinde ilave baskılar oluşturmaktadır. Artan sıcaklıklar, değişen yağış rejimleri, kuraklık ve aşırı hava olayları, birçok bölgede verim kayıplarına ve tarımsal üretkenliğin azalmasına yol açmaktadır (IPCC, 2019). Diğer yandan dünya nüfusunun ve yaşam standartlarının yükselmesi, enerji tüketimini hızla artırmakta ve yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımını iklim değişikliği ile mücadelede stratejik bir konuma taşımaktadır. Güneş enerjisi, hemen her coğrafyada bulunabilen ve teknolojik maliyetleri hızla düşen bir kaynak olarak elektrik üretiminde önemli bir paya doğru ilerlemektedir. Ancak büyük ölçekli fotovoltaik sistemlerin kurulumu önemli miktarda arazi gerektirmekte ve özellikle tarımsal üretimle yoğun şekilde kullanılan bölgelerde arazi tahsis konusunda gıda ve enerji arasında rekabet ortaya çıkarmaktadır (Gagnon ve ark., 2016; Adeh ve ark., 2019).

Geleneksel yaklaşımda, geniş alanlı güneş enerjisi santralleri çoğu zaman tarımsal üretimden çekilen araziler üzerine kurulmakta ve bu durum özellikle sınırlı ekilebilir alanlara sahip ülkelerde gıda güvenliği açısından risk oluşturmaktadır. Tarımsal alanların enerji üretimi için devre dışı kalması, enerji dönüşümünün dolaylı bir çevresel maliyeti olarak değerlendirilmektedir. Bu çerçevede Birleşmiş Milletler Gıda ve Tarım Örgütü (FAO), arazi kaynaklarının aynı anda hem gıda hem de enerji üretimine hizmet ettiği entegre gıda-enerji sistemlerinin önemini vurgulamaktadır (FAO, 2011). Hem gıda üretimi hem de yenilenebilir enerji yatırımları için uygun arazilerin sınırlı olduğu, kentleşme baskısının arttığı ve toprak bozunumu ile çölleşmenin hızlandığı bir dünyada, aynı arazi biriminin çok amaçlı kullanımı, sürdürülebilirlik açısından kritik bir strateji hâline gelmiştir (Dupraz ve ark., 2011; Warmann ve ark., 2024).

Agrivoltaik sistemler, fotovoltaik paneller ile tarımsal üretimin aynı arazi üzerinde birlikte yürütüldüğü ve bu sayede arazi kullanım etkinliğini artırmayı hedefleyen yenilikçi bir yaklaşım olarak ortaya çıkmıştır. Bu bütünleşik yapının temel bileşenleri ve panel bitki etkileşiminin genel işleyişi Şekil 1’de kavramsal olarak gösterilmiştir. Temel prensip, güneş panelleri ile bitkilerin güneş ışığını

paylaşması ve böylece birim alan başına hem elektrik hem de biyokütle üretiminin gerçekleştirilmesidir. Araştırmalar, uygun tasarlanan agrivoltaik sistemlerde arazi kullanım etkinliğinin geleneksel ayrı sistemlere göre %60–70 oranında artabildiğini ve arazi eşdeğerlik oranının genellikle birin üzerinde olduğunu göstermektedir (Dupraz ve ark., 2011; Dinesh ve Pearce, 2016). Yine birçok çalışma, özellikle gölgeye kısmen toleranslı türlerde, panellerin sağladığı kısmi gölgelemenin bitki su tüketimini düşürdüğünü, toprak yüzeyi sıcaklığını azalttığını ve su kullanım etkinliğini artırabildiğini rapor etmektedir (Marrou ve ark., 2013; Adeh ve ark., 2018; Barron-Gafford ve ark., 2019). Böylece agrivoltaik sistemler yalnızca arazi paylaşımına yönelik bir çözüm sunmakla kalmamakta, aynı zamanda kuraklık stresi ve ısı stresi gibi iklim kaynaklı risklerin azaltılmasında da potansiyel bir uyum aracı olarak öne çıkmaktadır.



Şekil 1. Agrivoltaik sistem tasarım şeması

Agrivoltaik uygulamalar, açık tarla koşullarının yanı sıra sera sistemleri ile bütünleşik biçimde de geliştirilmektedir. Fotovoltaik seralarda paneller, hem elektrik üretimi hem de gölgeleme sağlayan bir yapı elemanı olarak kullanılmakta ve böylece seranın iklimlendirme gereksinimleri kısmen yenilenebilir enerji ile karşılanabilmektedir (Cossu ve ark., 2014; Hassanien ve Ming, 2017). Seralarda kullanılacak panellerin yerleşimi, kaplama oranı ve optik özellikleri, bitki gelişimini belirleyen ışık miktarı ve dağılımını doğrudan etkilediği için son yıllarda opak panellerin yanında yarı saydam ve tayf seçici yeni nesil fotovoltaik teknolojilere yönelik ilgi artmıştır. Organik fotovoltaikler

ve diğer yarı saydam PV teknolojileri, bitkilerin fotosentez için ihtiyaç duyduğu dalga boylarını seraya iletirken, spektrumun kalan kısmını elektrik üretimi için kullanabilme potansiyeli ile agrivoltaik sera tasarımlarında öne çıkan adaylar arasında yer almaktadır (De Francesco ve ark., 2025).

Dünya genelinde Almanya, Fransa, İtalya, Japonya, Amerika Birleşik Devletleri, Çin ve Güney Kore gibi ülkeler agrivoltaik sistemlere yönelik pilot ve ticari ölçekli uygulamalar başlatmış durumdadır. Bu ülkelerde farklı iklim koşulları, ürün desenleri ve panel konfigürasyonları test edilmekte; özellikle kurak ve yarı kurak bölgelerde su tasarrufu ve mikroklima düzenleme etkileri ayrıntılı biçimde incelenmektedir (Amaducci ve ark., 2018). Son yıllarda yayın sayısındaki artış, agrivoltaik sistemlerin yalnızca teknik açıdan değil, ekonomik, çevresel ve sosyo-politik boyutları ile de giderek daha fazla araştırıldığını göstermektedir. Bununla birlikte literatür, sistem tasarımı, panel yerleşimi, ürün seçimi, uzun dönem toprak sağlığı, karbon döngüsü, biyoçeşitlilik etkileri ve izleme yöntemleri gibi alanlarda önemli bilgi boşluklarının hâlen var olduğunu ortaya koymaktadır (Carvalho ve ark., 2025; Singla ve ark., 2025).

Türkiye gibi hem tarımsal üretimin hem de güneş enerjisi potansiyelinin yüksek olduğu ülkelerde agrivoltaik sistemler, iklim değişikliğine uyumlu ve sürdürülebilir tarımsal üretim senaryoları içinde giderek daha fazla önem kazanmaktadır. Artan sıcaklıklar ve düzensiz yağışlar nedeniyle su yönetimi ve kuraklık riski ön plana çıkarken, aynı zamanda yenilenebilir enerji yatırımlarının da hız kazandığı bir dönemde tarım arazilerinde enerji üretimi ile gıda üretimini karşı karşıya getirmeyen çözümlere duyulan ihtiyaç belirginleşmektedir. Türkiye özelinde yapılan çalışmalar, farklı iklim bölgelerinde öne çıkan ürünler için agrivoltaik potansiyelin değerlendirilmesine ve panel yerleşiminin ile gölgeleme oranlarının ürün verimi ve enerji çıktısı üzerindeki etkilerinin modellenmesine odaklanmaktadır (Alkan ve ark., 2023; Shafiullah ve ark., 2024). Bu bağlamda agrivoltaik sistemlerin tarımsal üretime entegrasyonu, yalnızca teknik bir tasarım sorunu değil, aynı zamanda enerji politikaları, tarımsal destek mekanizmaları ve kırsal kalkınma stratejileri ile birlikte ele alınması gereken çok boyutlu bir konudur.

Bu bölümde agrivoltaik sistemlerin tarımsal üretime entegrasyonu, iklim değişikliği, arazi kullanımı ve su yönetimi bağlamında ele alınacak, farklı sistem konfigürasyonları ve ürün grupları için literatürde ortaya konan bulgular

tartışılacak ve tarım odaklı bir bakış açısıyla agrivoltaik uygulamaların olanakları ve sınırlılıkları değerlendirilecektir. Böylece hem araştırmacılar hem de politika yapıcılar için agrivoltaik sistemlerin sürdürülebilir ve dirençli tarımsal üretim modelleri içindeki yerini anlamaya yönelik bütüncül bir çerçeve sunulması amaçlanmaktadır.

2. Agrivoltaik Sistemlerin Bitki Fizyolojisi ve Tarımsal Üretim Üzerindeki Etkileri

Agrivoltaik sistemler, tarımsal alanlarda yenilenebilir enerji üretimi ile bitkisel üretimi bir araya getirerek hem enerji erişimini kolaylaştırmak hem de tarımsal verimliliği korumak amacıyla geliştirilmiştir. Bu sistemlerin tarımsal üretim üzerindeki etkilerinin anlaşılabilmesi için bitkilerin ışığa verdiği fizyolojik tepkiler ile mikroklimadaki değişimlerin ayrıntılı şekilde değerlendirilmesi gerekir. Son yıllarda farklı agroekolojik bölgelerde yürütülen çalışmalar, agrivoltaik sistemlerin ışık dağılımı, sıcaklık rejimi, toprak neminin korunması ve bitki morfolojisi üzerinde belirleyici sonuçlar ortaya koyduğunu göstermektedir.

Bitkisel üretimde ışığın yönü ve yoğunluğu temel belirleyiciler arasındadır. Fotosentez performansı büyük ölçüde yapraklara ulaşan fotosentetik aktif radyasyon (PAR) miktarına bağlıdır (Noriega Gardea ve ark., 2021). Agrivoltaik sistemlerde panel düzeni ve panellerin yerden yüksekliği, gün içinde ışığın gölgelenme desenini değiştirir ve bu durum bitkiler tarafından farklı şekillerde algılanır. Barron-Gafford ve ark., (2019), bitkilerin aşırı ışığın yarattığı stres altında fotosentetik kapasitelerini düşürdüğünü ve kısmi gölgelenme altında gün ortası fotosentetik verimliliğin arttığını göstermiştir. Marrou ve ark., (2013) ise marul yetiştiriciliğinde panel gölgesi altında ışık yoğunluğunun azalmasına karşın bitkilerin hafif gölge koşullarına uyum sağlayabildiğini ve büyüme süreçlerini dengeleyebildiğini ortaya koymuştur. Bu bulgular ışığın yalnızca niceliksel değil, niteliksel etkilerinin de önemli olduğunu gösterir. Aşırı ışığın sınırlandığı koşullar bitki için koruyucu olabilir ve bu durum özellikle ışık stresinin yoğun yaşandığı sıcak dönemlerde daha belirgindir.

Agrivoltaik yapıların tarımsal verimlilik açısından en önemli katkılarından biri oluşturdukları mikroklimadır. Panel gölgelerinin toprak yüzeyine düşmesi toprak sıcaklığını düşürür ve bu durum hem suyun

buharlaşmasını sınırlar hem de bitki kök bölgesinin daha dengeli bir sıcaklık rejimine sahip olmasını sağlar. Adeh ve ark., (2018), panel gölgeleri altında toprak neminin daha uzun süre korunduğunu ve bunun evapotranspirasyon kayıplarını azalttığını göstermiştir. Weselek ve ark., (2019) ise gündüz saatlerinde hava sıcaklığının panel altında açık alana göre bir derece veya daha fazla düşebildiğini, nispi nemin özellikle sabah ve akşam saatlerinde daha yüksek seyrettiğini rapor etmektedir. Bu mikroklimatik değişimler özellikle yarı kurak ve kurak bölgelerde su kullanım etkinliğinin artmasına doğrudan katkı sağlar. Toprak neminin korunması, bitkinin su stresıyla karşılaşma olasılığını azaltır ve kök bölgesi koşullarının daha dengeli kalması gelişim sürecini destekler.

Bitkilerin morfolojik tepkileri de gölgeleme koşullarının yoğunluğu ile yakından ilişkilidir. Kadowaki ve ark., (2012), hafif gölgeleme koşullarında yaprak alanının arttığını ancak fazla gölgeleme altında bazı türlerde biyokütle birikiminin azaldığını göstermiştir. Panel yerleşiminin doğrusal (sıra halinde) veya dama (kare) düzeninde olması da bitki tepkilerini etkiler. Araştırmalar, dama (checkerboard) düzeninin ışığın seraya veya açık alana daha dengeli dağılmasına yardımcı olduğunu ve bitkinin büyüme bölgeleri arasında ışık miktarı farkını azalttığını ortaya koymaktadır (Cossu ve ark., 2014). Bu düzenleme özellikle sera içi agrivoltaik uygulamalarında önem taşır, çünkü panel gölgelemesinin homojenliği bitkilerin farklı kısımlarının eşit ışık almasını kolaylaştırarak gelişme farklarını azaltır.

Agrivoltaik sistemlerin tarımsal verim üzerindeki etkisi bitki türüne bağlı olarak değişir. Gölgeye tolerans düzeyi yüksek yazlık sebzelerin, kısmi gölgelemeden daha fazla yararlandığı ve özellikle sıcaklık stresinin yüksek olduğu dönemlerde verim stabilitesinin korunduğu belirtilmiştir (Dupraz ve ark., 2011). Barron-Gafford ve ark., (2019) tarafından yapılan çalışmalarda, benzer şekilde gölgelemenin yarattığı serinletici etki sayesinde bazı türlerde sulama ihtiyacının azaldığı ve bitki gelişiminin daha dengeli ilerlediği bildirilmiştir. Marrou ve ark., (2013) tarafından marul üzerinde yapılan denemelerde, panel gölgesi altında toprak su potansiyelinin daha yüksek kaldığı ve bunun bitki büyüme hızını artırdığı gösterilmiştir. Cossu ve ark., (2014) ise panel kaplama oranının %25'i aşmadığı koşullarda domates gibi türlerde verim kaybının sınırlı kaldığını, bu gölgeleme düzeyinde bazı sebze türlerinin büyümeyi sürdürebildiğini belirtmektedir. Bu çalışmalar birlikte

değerlendirildiğinde, farklı gölge toleransına sahip bitki türleri için agrivoltaik sistemler doğru tasarlandığı takdirde hem verimi koruyabilmekte hem de üretimde yıl içindeki dalgalanmaları azaltabilmektedir.

Agrivoltaik sistemlerin su kullanım etkinliği üzerindeki etkisi son yıllarda en çok dikkat çeken konulardan biridir. Gölgeleme ile toprak sıcaklığının düşmesi buharlaşma hızını azalttığı için sulama aralıkları uzayabilir ve tarımda su verimliliği yükselebilir. Adeh ve ark., (2018) tarafından yapılan bir çalışmada, panel gölgesinin altında yetiştirilen ürünlerde su kullanım etkinliğinin belirgin şekilde arttığı raporlanmıştır. Aynı çalışmada bu etkinin özellikle yaz aylarında daha güçlü olduğu ve su tasarrufunun verim korunurken gerçekleştiği vurgulanmaktadır. Bu sonuçlar, iklim değişikliği altında artan sıcaklık ve kuraklık riskinin tarımsal üretim üzerindeki olumsuz etkilerini dengeleyebilecek önemli bir stratejiye işaret etmektedir.

Tarım alanlarında gölgeleme düzeninin bitki fizyolojisine etkileri dikkate alınarak sistem tasarımının yapılması gerekmektedir. Bitki türlerinin ışık gereksinimleri farklıdır ve bazı türler düşük ışık koşullarına daha toleranslıdır. Bu nedenle agrivoltaik sistemlerde ürün/desen seçimi kritik önem taşır. Marrou ve ark. (2013) marul üzerinde yürüttükleri denemelerde kısmi gölgeleme altında üretim performansının büyük ölçüde korunabildiğini ortaya koyarken, Kadowaki ve ark. (2012) yeşil soğanın gölgeleme koşullarına daha duyarlı olduğunu ve düşük çatı kaplama oranlarında dahi verimde anlamlı azalmalar görüldüğünü bildirmektedir. Bununla birlikte, aşırı gölgelemenin yaratacağı olumsuz etkiler uygun sistem tasarımı ile büyük ölçüde hafifletilebilir. Panel yüksekliğinin artırılması, gölge deseninin daha geçirgen olacak şekilde düzenlenmesi veya yarı geçirgen fotovoltaik teknolojilerin kullanılması ile ışık dağılımı iyileştirilebilir ve bitkilerin ihtiyaç duyduğu asgari ışık düzeyi korunabilir. Bu amaçla dama düzeni, panel sıralarının seyreltilmesi ve ışık geçirgenliği artırılmış panel tasarımları etkili stratejiler arasında yer almaktadır.

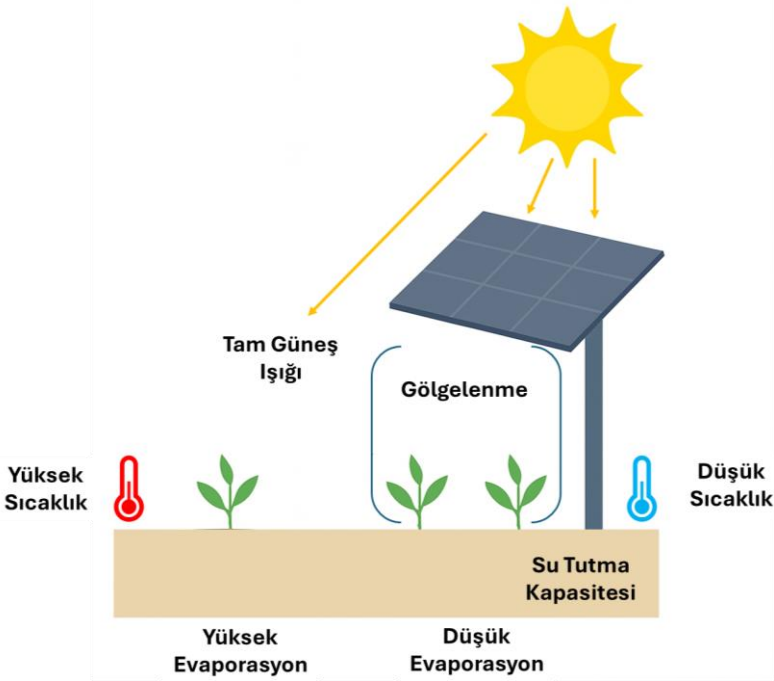
Agrivoltaik sistemler aynı zamanda iklim değişikliğine uyum açısından önemli bir araçtır. Sıcaklık artışları, ani ısı dalgaları ve buharlaşma kayıpları tarımsal verimi düşüren başlıca süreçlerdir. Panellerin oluşturduğu mikro gölge, bitkinin aşırı ısı yükünü azaltır ve su kaybını sınırlar. Barron-Gafford ve ark., (2019) tarafından yürütülen çalışmalar, sıcak iklimlerde gölgeleme yapılan parsellerde bitki stresinin belirgin şekilde azaldığını ortaya

koymaktadır. Bu bulgu özellikle sıcaklık artışlarının yoğun olarak yaşandığı bölgelerde agrivoltaik uygulamaların tarımsal adaptasyon kapasitesi açısından güçlü bir seçenek olduğunu göstermektedir. Dolayısıyla agrivoltaik sistemler yalnızca enerji üretimi yönüyle değil, uzun vadede tarımsal sürdürülebilirlik ve iklim dirençliliği açısından da stratejik bir uygulama niteliğindedir.

Özetle agrivoltaik sistemler bitki fizyolojisi üzerinde çok yönlü etkiler oluşturur ve çoğu zaman stres koşullarını hafifletir. Gölgeleme ile sıcaklık ve su kaybı azalır ve bitkiler aşırı ışığın zararlarından daha iyi korunur. Panel düzeni ve kullanılan teknolojiler bitkisel süreçleri destekleyecek biçimde tasarlandığında verim korunabilir ya da bazı durumlarda artırılabilir. Mevcut çalışmalar agrivoltaik sistemlerin çevresel stresleri azaltma, su kullanım etkinliğini artırma ve iklim değişikliğine uyumu güçlendirme potansiyeline açık biçimde işaret etmektedir.

3. Agrivoltaik Sistemlerde Mikroklima Yönetimi ve Tarımsal Uygulamalar

Agrivoltaik sistemlerde panel varlığı, bitkilerin geliştiği mikroklimayı doğrudan şekillendirir ve bu değişim tarımsal üretimin verimliliği üzerinde belirleyici bir rol oynar. Gölgeleme, ışığın spektral bileşimini, toprağın ısı dengesi, hava sıcaklığını ve nemi değiştirir. Bu değişimler panel dizilim yoğunluğu ve yerleşim biçimine bağlı olarak farklılık gösterir. Bu nedenle agrivoltaik uygulamaların başarıyla yönetilebilmesi için panel-bitki etkileşiminin mikroklima üzerindeki etkilerinin iyi anlaşılması gerekir. Panel gölgesinin sıcaklık ve su dengesi üzerindeki bu düzenleyici etkiler Şekil 2’de özetlenmektedir. Literatürdeki çok sayıda çalışma, panel gölgelemesinin gündüz sıcaklıklarını düşürdüğünü, toprak nemini artırdığını ve buharlaşma hızını azalttığını göstermektedir. Özellikle yarı kurak bölgelerde bu etkiler, su yönetimi ve bitki sağlığı açısından önemli avantajlar sunar. Örneğin Barron-Gafford ve ark. (2019), gün içinde panel altı sıcaklığın ortalama 1 °C daha düşük seyrettiğini ve bitki su kaybının belirgin şekilde azaldığını bildirmiştir.



Şekil 2. Agrioltaik sistemlerde panel gölgelemesinin toprak sıcaklığı, evaporasyon ve su tutma kapasitesi üzerindeki etkilerinin şematik gösterimi. Tam güneş koşullarında bitkiler daha yüksek sıcaklık ve yüksek evaporasyon nedeniyle daha fazla su kaybına maruz kalırken, panel gölgesi altında düşük sıcaklık ve düşük evaporasyon sayesinde toprağın su tutma kapasitesi artar ve bitki su stresi azalır. Scarano ve ark. (2025) tarafından önerilen kavramsal diyagramdan uyarlanmıştır.

Gölgeleme etkisi yalnızca ısı ve su dengesini düzenlemekle kalmaz, bitkilerin fotosentetik ışık kullanımında da belirgin değişiklikler yaratır. Paneller altındaki PAR seviyeleri günün saatine ve panel yoğunluğuna bağlı olarak azalır, ancak aşırı ışık stresine duyarlı türlerde daha dengeli bir ışık dağılımı fotosentetik süreci destekleyebilir. Weselek ve ark. (2021), panel gölgesinin aşırı güneş ışığına bağlı fotoinhibisyonu azalttığını ve bitkilerin daha uzun süre fotosentetik açıdan aktif kalabildiğini ortaya koymuştur. Yaz dönemlerinde yüksek ışık ve ısı yükünün baskın olduğu bölgelerde kısmi gölgelemenin su tüketimini düşürmesi ve bitkilerin strese girme olasılığını azaltması bu bulgularla uyumludur.

Panel konumu, eğimi ve dizilim biçimi, ışığın tarla içinde nasıl dağıldığını belirlediği için tarımsal sonuçlar bu mühendislik kararlarından doğrudan etkilenir. Doğrusal sıralar yerine dama düzeninde yerleştirilen

panellerin ışığı daha homojen dağıttığı ve bitkiler arası gelişim farklılıklarını azalttığı gösterilmiştir. Cossu ve ark., (2014), sera içi fotovoltaiik uygulamalarda dama düzeninin ışık homojenliğini artırarak bitki büyümesini dengeli hâle getirdiğini, panel kaplama oranı %25'in altında olduğunda ürün veriminin büyük ölçüde korunabildiğini raporlamaktadır. Bu bulgular, panel yerleşimi ile bitkinin ışık gereksinimi arasında uyum sağlanmasının tasarım aşamasında kritik olduğunu göstermektedir.

Sıcaklık ve nem koşullarının düzenlenmesi de mikroklima yönetiminin önemli bir boyutudur. Panel gölgeleri altında ölçülen daha düşük hava ve toprak sıcaklıkları, özellikle aşırı sıcak dönemlerde verim kayıplarını azaltan tamponlayıcı bir etki yaratır (Adeh ve ark., 2018). Ayrıca panel altı ortamlarda sabah ve akşam saatlerinde nispi nemin daha yüksek olması, kuraklık dönemlerinde bitkilerin su stresine karşı daha dayanıklı olmasına katkı sağlar (Weselek ve ark., 2019). Bu mikroklimatik iyileşmeler türler arasında değişmekle birlikte genel eğilim, gölgelemenin su kaybını sınırlayarak bitkiyi kuraklık stresine karşı koruması yönündedir.

Mikroklima yönetimi yalnızca panellerin pasif etkilerinden ibaret değildir, teknolojik gelişmelerle birlikte sensör tabanlı izleme ve akıllı kontrol sistemleri tarımsal karar süreçlerine entegre edilmektedir. Toprak nem sensörleri, PAR ölçerler ve sıcaklık-nem kayıt cihazları sayesinde sulama zamanlaması daha hassas yapılabilmekte, girdi kullanımı optimize edilebilmektedir. Ayrıca yarı saydam ve tayf seçici fotovoltaiik teknolojiler, bitkilerin fotosentez açısından en verimli dalga boylarının geçişine izin vererek enerji üretimi ile bitki büyümesi arasındaki dengeyi iyileştirmeyi amaçlamaktadır. Boya duyarlı güneş pilleri ve üçüncü nesil yarı saydam PV teknolojileri bu nedenle özellikle sera ortamlarında giderek daha fazla denenmektedir.

Mikroklimanın tarımsal uygulamalara yansımaları oldukça çeşitlidir. Panel gölgesinin bitki gelişim hızını yavaşlattığı koşullarda ekim tarihinin daha erken planlanması gerekebilir. Gölge toleransı yüksek çeşitlerin seçilmesi, verim kaybı yaşanmadan aynı alanda hem tarımsal hem de enerji üretimini mümkün kılar. Nitekim marul, domates ve salatalık gibi türlerde kısmi gölge altında adaptasyon mekanizmalarının gelişebildiği ve verim kayıplarının çoğu durumda sınırlı kaldığı bildirilmektedir (Marrou ve ark., 2013; Cossu ve ark., 2014; Zaky ve ark., 2024). Buna karşılık ışık gereksinimi yüksek türlerde panel

dizisinin seyrek tutulması veya panellerin daha yüksek konumlandırılması daha uygun sonuç verebilmektedir.

Genel olarak değerlendirildiğinde, agrivoltaik sistemlerde mikroklima yönetimi yalnızca çevresel koşulların düzenlenmesi anlamına gelmez. Bitki fizyolojisi, ışık-ısı-su ilişkileri ve panel yerleşimi birlikte ele alınmalıdır. Gölgeleme sayesinde azalan ısı stresi ve su kaybı, özellikle sıcaklık ve su stresinin arttığı dönemlerde tarımsal üretimin istikrarını destekleyen önemli bir avantaj sağlar. Doğru planlandığında mikroklima yönetimi hem enerji üretimini hem de tarımsal verimi optimize ederek agrivoltaik sistemlerin sürdürülebilirliğini güçlendirir. Literatürdeki bulgular, bu bütüncül yaklaşımın başarılı sonuçlar verdiğini ve agrivoltaik uygulamaların uygun tasarım ve yönetimle yüksek performans gösterebildiğini ortaya koymaktadır.

4. Agrivoltaik Sistemlerde Su Yönetimi ve Sulama Stratejileri

Agrivoltaik sistemler, bitkilerin üzerinde oluşturdıkları kısmi gölgeleme sayesinde yalnızca ışık rejimini değil aynı zamanda evapotranspirasyon süreçlerini, toprak nem dinamiklerini ve sulama gereksinimlerini de doğrudan etkiler. Güneş panellerinin altındaki mikroklima genellikle daha düşük sıcaklıklar ve daha yüksek oransal nem ile karakterize edilir. Bu farklılık bitkilerin su kullanım biçimini değiştirir ve bazı koşullarda su tüketiminde kayda değer azalmalar sağlayabilir. Bu nedenle agrivoltaik sistemlerde su yönetimi, tarımsal verimliliğin sürdürülebilirliği ve iklim adaptasyonu açısından kritik bir bileşen olarak değerlendirilmektedir.

Gölgeleme etkisinin bitki su tüketimi üzerindeki en belirgin sonuçlarından biri evapotranspirasyon hızının düşmesidir. Kısa dalga güneş radyasyonunun azalması ile birlikte toprak yüzeyi daha az ısınır ve bu durum buharlaşma miktarının azalmasına yol açar. Adeg ve ark., (2018), bu etkiyi nicel olarak ortaya koymuş ve agrivoltaik panellerin altında gündüz saatlerinde hava sıcaklığının ortalama 1 °C daha düşük olduğunu bildirmiştir. Aynı şekilde, Barron-Gafford ve ark., (2019), panel gölgesi altında toprak su kayıplarının belirgin şekilde azaldığını ve bunun kurak bölgelerde bitki fizyolojisi üzerinde olumlu sonuçlar yarattığını vurgulamıştır.

Toprak nemindeki artış bazı türlerde su kullanım etkinliğini yükseltir. Marrou ve ark., (2013) gölgelenen alanlarda toprak su potansiyelinin daha yüksek olduğunu ve marulda hasat edilen taze ağırlığın arttığını bildirmiştir.

Dolayısıyla suyun sınırlayıcı olduğu bölgelerde agrivoltaik sistemler sulama ihtiyacını azaltan tamamlayıcı bir yönetim aracı olarak öne çıkmaktadır. Bitki su tüketimindeki azalma sulama stratejilerinin de yeniden düzenlenmesini gerektirebilir. Kısmi gölge altında fotosentetik aktivitenin gün içi ritmi ve bitkilerin suya talep dönemleri değişebilir. Kurak bölgelerde yapılan bazı çalışmalarda sulama aralıklarının gölgeleme altında yaklaşık %15–25 oranında uzadığı bildirilmiştir.

Su verimliliği açısından bir başka önemli boyut fotosentez süreçleriyle ilgilidir. Orta düzeydeki bir gölgeleme, bazı türlerde stomaların aşırı sıcaklık nedeniyle erken kapanmasını engelleyerek fotosentetik verimliliği artırabilir. Bu durum, özellikle yaz aylarında aşırı ışık ve ısı nedeniyle strese giren bitkiler için geçerlidir ve literatürde kabak gibi türlerde su kullanım etkinliğini artırdığı gösterilmiştir (Rouini ve ark., 2025). Bununla birlikte gölgeleme oranı çok yükseldiğinde, su tüketimi azalsa bile fotosentetik kapasite sınırlanabildiği için verimde düşüş yaşanabilmektedir. Bu nedenle gölgeleme oranı ile sulama optimizasyonunun birlikte ele alınması gerekir. Aksi durumda su tüketimindeki azalmaya rağmen fotosentetik kapasitedeki sınırlanma nedeniyle birim alan verimi düşebilir ve su verimliliği göstergeleri mutlak verim kaybı ile birlikte değerlendirilmek zorunda kalır.

Bitki su tüketimindeki bu değişimler sulama sistemi tercihlerini de etkiler. Damla sulama agrivoltaik koşullarda düşük buharlaşma kaybı ve suyun doğrudan kök bölgesine verilmesi sayesinde belirgin bir avantaj sağlar. Kurak bölgelerde yürütülen çalışmalarda damla sulama ile panel gölgesinin birlikte kullanılması su kullanım etkinliğinde yüzde 20–40 artışla ilişkilendirilmiştir (Adeh ve ark., 2018; Barron-Gafford ve ark., 2019). Yüzey sulama yöntemlerinde de gölgeleme nedeniyle evaporatif kayıplar azalabilir, ancak tuzluluk ve düzensiz su dağılımı gibi riskler dikkatle yönetilmelidir.

Agrivoltaik sistemlerde su yönetimi yalnızca bitki su tüketimiyle sınırlı değildir. Aynı zamanda panel yüzey sıcaklığının su püskürtme sistemleriyle düşürülmesi gibi yenilikçi yaklaşımlar da gündeme gelmektedir. Bazı araştırmalarda, panel yüzeylerine kontrollü su uygulamasının soğutma amaçlı olarak elektrik üretim verimini artırdığı ve bu işlemin tarımsal sulama ile eş zamanlı planlanabildiği gösterilmiştir. Böylece tek bir su kaynağı hem bitkiyi hem de paneli destekleyerek sistemin toplam verimliliğini artırabilmektedir.

Sonuç olarak agrivoltaik sistemlerde su yönetimi, tarımsal üretim ve enerji üretimi arasındaki etkileşimin en kritik bileşenlerinden biridir. Gölgelemenin evapotranspirasyonu azaltması, toprak nemini artırması ve sulama aralıklarını uzatması özellikle kurak ve yarı kurak bölgelerde su tasarrufu açısından önemli avantajlar sunar. Bununla birlikte gölgeleme oranının çok yüksek olması bitki büyümesini sınırlayabileceği için ideal su yönetimi, sistem mimarisi, ürün deseni ve bölgesel iklim koşulları dikkate alınarak tasarlanmalıdır. Literatürdeki saha çalışmaları, agrivoltaik uygulamaların sulama ihtiyacını belirgin şekilde azaltabildiğini ve iklim değişikliği koşullarında su kaynaklarının daha verimli kullanılmasına güçlü bir katkı sağlayabileceğini ortaya koymaktadır.

5. Agrivoltaik Sistemlerde Ürün Seçimi ve Tarımsal Performansın Değerlendirilmesi

Agrivoltaik sistemlerin tarımsal açıdan sürdürülebilirliği büyük ölçüde yetiştirilen bitki türlerinin gölgeleme rejimine ve mikroklima değişimlerine verdiği fizyolojik tepkilere bağlıdır. Farklı ürün türleri, gölgeleme yoğunluğu ve ışık dağılımındaki değişim karşısında çeşitlenmiş tepkiler gösterir. Bu nedenle, ürün seçimi agrivoltaik uygulamaların başarısını belirleyen temel unsurlardan biridir. Gölgelemenin yönü ve şiddeti aynı kalsa bile farklı türler ışık gereksinimleri ve gölge toleransı nedeniyle birbirinden oldukça farklı tepkiler verebilmektedir. Bazı türler kısmi gölgeleme altında su stresinin azalmasından ve daha serin bir mikroklimadan fayda sağlarken, ışık talebi yüksek türlerde benzer koşullar fotosentetik kapasitenin sınırlandırılmasına ve verim kaybına yol açabilmektedir.

Araştırmalar özellikle gölge toleransı yüksek türlerin agrivoltaik sistemlerde daha başarılı olduğunu göstermektedir. Marrou ve ark., (2013) tarafından yürütülen deneylerde, kısmi gölgelemenin toprak su potansiyelini artırdığı ve toprağın su tutma kapasitesini yükselttiği, bunun da marul gibi hızlı yapraklanma gösteren bir üründe verimi artırdığı belirlenmiştir. Benzer şekilde, yapılan uygulamalarda gölgelemenin bu tür yapraklı sebzelerde evaporatif su kayıplarını azalttığı ve bitki bünyesinde su kullanım etkinliğini artırdığı gösterilmiştir (Barron-Gafford ve ark., 2019). Bazı çalışmalar, marul, ıspanak ve lahana gibi gölge toleransı yüksek sebzelerin agrivoltaik ortama en iyi uyum sağlayan türler olduğunu bildirmektedir (Cossu ve ark., 2020). Kök gelişimi

yüzeye yakın olup gölgelemeden sınırlı düzeyde etkilenen türler de agrivoltaik uygulamalarda avantajlıdır. Patates, havuç, turp ve pancar gibi kök sebzelerin kısmi gölge koşullarında fizyolojik bütünlüğünü koruduğu ve fotosentetik aktivitede belirgin bir kayıp yaşamadığı ifade edilmektedir (Dupraz ve ark., 2011). Ayrıca gölgeleme sayesinde bu ürünlerde toprağın daha serin kaldığı ve su kaybının azaldığı, böylece kök bölgesinin sıcaklık stresinden korunduğu bildirilmektedir. Diğer yandan her ürün agrivoltaik koşullara olumlu tepki vermemektedir. Örneğin soğan gibi ışık gereksinimi yüksek türlerde, gölgeleme altında taze ve kuru madde veriminde düşüş yaşandığı bilinmektedir. Marrou ve ark., (2013) marulun kısmi gölge koşullarına uyum sağlayarak üretim performansını koruyabildiğini gösterirken, Kadowaki ve ark., (2012) yeşil soğanın gölgeleme koşullarına daha duyarlı olduğunu ve %12.9 gibi düşük bir kaplama oranında dahi taze ve kuru madde veriminde anlamlı düşüşler yaşandığını rapor etmiştir. Bu durum, gölgeye duyarlı türlerde ışık doygunluk noktasının yüksek olması ve fotosentez için gerekli ışığın azalmasıyla açıklanmaktadır. Dolayısıyla, ışık talebi fazla olan ürünler için panel kaplama oranı düşük sistemler tercih edilmeli ya da bu tür ürünler tam güneşli arazilerde yetiştirilmelidir.

Meyve-sebze grubunda sonuçlar daha çeşitlilik göstermektedir. Domates yetiştiriciliği üzerine yapılan araştırmalarda, %20–25 panel kaplama oranının altında verim kayıplarının genellikle kabul edilebilir düzeyde kaldığı ve çoğu durumda bitki gelişiminin sürdürülebilir olduğu belirlenmiştir (Cossu ve ark., 2020). Öte yandan, bazı çalışmalar yüksek gölgelemenin çiçeklenme ve meyve tutumu dönemlerinde ışık ve ısı talebi fazla olan türlerde büyümeyi olumsuz etkileyebildiğini ortaya koymaktadır. Bununla birlikte, kısmi gölgeleme koşullarının stres azaltıcı etkisinin sıcak iklimlerde domates yetiştiriciliğinde avantaj sağlayabildiği de vurgulanmaktadır.

Son yıllarda yapılan saha çalışmaları, kurak ve yarı kurak bölgelerde kabak gibi bitkilerin agrivoltaik gölgelemeden fayda sağlayabildiğini göstermiştir. Örneğin Rouini ve ark., (2025), sıcak ve kurak iklim koşullarında kabak bitkisinin panel gölgesi altında fizyolojik performansının arttığını ve gün ortasında görülen fotosentetik stresin azaldığını bildirmektedir. Bu durum, panellerin yarattığı gölgenin aşırı ışık yükünü ve ısı stresini dengelemesiyle ilişkilendirilmiştir. Agrivoltaik sistemlerde ürün seçiminin önemli bir diğer boyutu da su kullanım etkinliğidir. Adeh ve ark., (2018), panel gölgesinin

evaporatif talebi azalttığını ve özellikle su kıtlığı yaşanan bölgelerde su tasarrufunun anlamlı düzeyde arttığını ortaya koymuştur. Bu sonuç, su stresi altında verim kaybı yaşayan türlerde agrivoltaik uygulamanın sağlayabileceği avantajı göstermektedir.

Literatürde yer alan farklı örnekler incelendiğinde, agrivoltaik sistemler için uygun bitkiler genel olarak dört grup altında toplanabilir. Birinci grup, gölgeleme toleransı yüksek olan marul, ıspanak ve diğer yapraklı sebzelerdir. İkinci grup, kök yapısı yüzeye yakın ve kısmi gölgeden olumsuz etkilenmeyen havuç, turp gibi kök sebzelerdir. Üçüncü grup, sıcaklık stresinden fayda görebilen kabak ve benzeri türlerdir. Dördüncü grup ise kısmi gölgeyle verim kaybı minimal kalan domates gibi meyve-sebzeler olarak sayılabilir. Buna karşılık, soğan gibi ışık talebi yüksek türler agrivoltaik gölge altında daha fazla verim kaybı yaşayabilmektedir. Tüm bu çalışmalar, agrivoltaik sistemlerde ürün seçiminin başarı için kritik olduğunu göstermektedir. Bitkilerin ışık gereksinimi, fotosentetik kapasitesi, gelişim evreleri boyunca gölge toleransı ve su kullanım etkinliği bir arada değerlendirilmelidir. Arazi topografyası, panel düzeni, gölgeleme yüzdesi ve iklim koşulları ile uyumlu ürün tercihleri yapıldığında, agrivoltaik sistemlerin hem enerji hem tarımsal üretim açısından yüksek bir performans ortaya koyabileceği görülmektedir.

6. SONUÇ

Agrivoltaik sistemler, tarımsal üretim ve enerji üretimini aynı alanda bir araya getirerek iklim baskılarının arttığı günümüzde üreticilere yeni bir uyum aracı sunmaktadır. Bilimsel çalışmalar, bu sistemlerin su kaybını azaltarak, bitki stresini hafifleterek ve üretim ortamını daha istikrarlı hale getirerek birçok tarım ürününde yetiştirme koşullarını iyileştirebildiğini göstermektedir.

Bu sistemlerin tarımsal açıdan en önemli katkısı, kuraklık ve yüksek sıcaklık gibi giderek sıklaşan iklim risklerine karşı üretimi daha dayanıklı kılabilmesidir. Doğru ürün seçimi ve uygun yönetim uygulamaları ile agrivoltaik sistemler verimliliği koruma potansiyeli taşımakta ve su kaynaklarının daha etkin kullanımına katkı sağlamaktadır. Agrivoltaik uygulamalar, geleceğin tarımında hem çevresel dayanıklılığı artıran hem de üreticilere ek gelir ve esneklik sağlayan bütüncül bir yaklaşım olarak öne çıkmaktadır. Teknolojik gelişmeler ve uygun yönetim modelleri ile bu

sistemlerin tarımsal verimliliği sürdürme ve kırsal kalkınmayı destekleme kapasitesinin daha da güçleneceği öngörülmektedir.

KAYNAKÇA

- Adeh, E. H., Good, S. P., Calaf, M., & Higgins, C. W. (2019). Solar PV power potential is greatest over croplands. *Scientific reports*, 9(1), 11442.
- Adeh, E. H., Selker, J. S., & Higgins, C. W. (2018). Remarkable agrivoltaic influence on soil moisture, micrometeorology and water-use efficiency. *PloS one*, 13(11), e0203256.
- Amaducci, S., Yin, X., & Colauzzi, M. (2018). Agrivoltaic systems to optimise land use for electric energy production. *Applied energy*, 220, 545-561.
- Barron-Gafford, G. A., Pavao-Zuckerman, M. A., Minor, R. L., Sutter, L. F., Barnett-Moreno, I., Blackett, D. T., ... & Macknick, J. E. (2019). Agrivoltaics provide mutual benefits across the food–energy–water nexus in drylands. *Nature Sustainability*, 2(9), 848-855.
- Carvalho, F., Montag, H., Bentley, L., Šarlej, R., Broyd, R. C., Blaydes, H., ... & Armstrong, A. (2025). Plant and soil responses to ground-mounted solar panels in temperate agricultural systems. *Environmental Research Letters*, 20(2), 024003.
- Cossu, M., Murgia, L., Ledda, L., Deligios, P. A., Sirigu, A., Chessa, F., & Pazzona, A. (2014). Solar radiation distribution inside a greenhouse with south-oriented photovoltaic roofs and effects on crop productivity. *Applied Energy*, 133, 89-100.
- Cossu, M., Yano, A., Solinas, S., Deligios, P. A., Tiloca, M. T., Cossu, A., & Ledda, L. (2020). Agricultural sustainability estimation of the European photovoltaic greenhouses. *European Journal of Agronomy*, 118, 126074.
- De Francesco, C., Centorame, L., Toscano, G., & Duca, D. (2025). Opportunities, Technological Challenges and Monitoring Approaches in Agrivoltaic Systems for Sustainable Management. *Sustainability*, 17(2), 634.
- Dere, S., Günay, E. E., & Kula, U. (2023). Investigation of the potentials of the agrivoltaic systems in Turkey. In *Advances in Intelligent Manufacturing and Service System Informatics* (pp. 534-545). Springer, Singapore.
- Dinesh, H., & Pearce, J. M. (2016). The potential of agrivoltaic systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 54, 299-308.

- Dupraz, C., Marrou, H., Talbot, G., Dufour, L., Nogier, A., & Ferard, Y. (2011). Combining solar photovoltaic panels and food crops for optimising land use: Towards new agrivoltaic schemes. *Renewable energy*, 36(10), 2725-2732.
- FAO, 2011. *Energy Smart Food at FAO An Overview*. Rome FAO.
- Gagnon, P., Margolis, R., Melius, J., Phillips, C., & Elmore, R. (2016). *Roofstop solar photovoltaic technical potential in the United States. A detailed assessment* (No. NREL/TP-6A20-65298). National Renewable Energy Lab.(NREL), Golden, CO (United States).
- Hassanien, R. H. E., & Ming, L. (2017). Influences of greenhouse-integrated semi-transparent photovoltaics on microclimate and lettuce growth. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 10(6), 11-22.
- IPCC, 2019. *Climate Change and Land*. An IPCC Special Report on climate change desertification land degradation sustainable land management food security and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems. Geneva IPCC.
- Kadowaki, M., Yano, A., Ishizu, F., Tanaka, T., & Noda, S. (2012). Effects of greenhouse photovoltaic array shading on Welsh onion growth. *Biosystems Engineering*, 111(3), 290-297.
- Marrou, H., Wéry, J., Dufour, L., & Dupraz, C. (2013). Productivity and radiation use efficiency of lettuces grown in the partial shade of photovoltaic panels. *European Journal of Agronomy*, 44, 54-66.
- Noriega Gardea, M. M. Á., Corral Martínez, L. F., Anguiano Morales, M., Trujillo Schiaffino, G., & Salas Peimbert, D. P. (2021). Modeling photosynthetically active radiation: A review. *Atmósfera*, 34(3), 357-370
- Rouini, N., Salazar, A., Murphy, P., Lepley, K., & Barron-Gafford, G. A. (2025). High-shade dryland agrivoltaic conditions enhanced carbon uptake and water-use efficiency in zucchini (*Cucurbita pepo*). *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 9, 1686773.
- Scarano, A., Curci, L. M., Semeraro, T., Calisi, A., Lenucci, M. S., Santino, A., Basset, A., & De Caroli, M. (2025). Agrivoltaics as a Sustainable Strategy to Enhance Food Security Under Water Scarcity. *Horticulturae*, 11(4), 401.
<https://doi.org/10.3390/horticulturae11040401>

- Shafiullah, G. M., Ferdous, S. M., Shoeb, M., Reza, S. S., Elavarasan, R. M., & Rahman, M. M. (2024). Agrivoltaics system for sustainable agriculture and green energy in Bangladesh. *Applied Energy*.
- Singla, M. K., Gupta, J., Gupta, A., Safaraliev, M., Zeinoddini-Meymand, H., & Kumar, R. (2025). Empowering rural farming: Agrovoltaic applications for sustainable agriculture. *Energy Science & Engineering*, 13(1), 35-59.
- Warmann, E., Jenerette, G. D., & Barron-Gafford, G. A. (2024). Agrivoltaic system design tools for managing trade-offs between energy production, crop productivity and water consumption. *Environmental Research Letters*, 19(3), 034046.
- Weselek, A., Bauerle, A., Zikeli, S., Lewandowski, I., & Högy, P. (2021). Effects on crop development, yields and chemical composition of celeriac (*Apium graveolens* L. var. *rapaceum*) cultivated underneath an agrivoltaic system. *Agronomy*, 11(4), 733.
- Weselek, A., Ehmann, A., Zikeli, S., Lewandowski, I., Schindele, S., & Högy, P. (2019). Agrophotovoltaic systems: applications, challenges, and opportunities. A review. *Agronomy for sustainable development*, 39(4), 35.
- Zaky, M., Abd-El Wanis, M., MEDANY, M., & Radwan, G. (2024). Effect of integrating photovoltaic panels with greenhouses for energy production on greenhouse microclimate, and cucumber growth and production in the greenhouse.

BÖLÜM 6

AZALAN YAĞIŞ KOŞULLARINDA BAKLAGİL ÜRETİMİNDE SÜRDÜRÜLEBİLİR SULAMA STRATEJİLERİ

Dr. Öğr. Üyesi Sabri AKIN^{1*}

Prof. Dr. Ali Fuat TARI²

DOI: <https://www.doi.org/10.5281/zenodo.17966529>

^{1*}Harran Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Tarımsal Yapılar ve Sulama Bölümü, Şanlıurfa, Türkiye. sabriakin@harran.edu.tr, ORCID: 0000-0002-9196-3157

²Harran Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Tarımsal Yapılar ve Sulama Bölümü, Şanlıurfa, Türkiye. aftari@harran.edu.tr, ORCID: 0000-0001-9157-1682

1. Giriş

İklim değişikliği, yağış rejimlerini ve miktarlarını, sıcaklık düzenlerini, aşırı hava olayları sıklıklarını küresel ölçekte değiştirmesiyle tarımsal üretim üzerinde çok yönlü baskılar oluşturmaktadır (IPCC, 2013). Son dönem iklim projeksiyonları, özellikle yarı kurak ve kurak alanlarda, yıllık yağış miktarlarının düşeceği, daha düzensiz mekânsal ve zamansal yağış dağılımlarının görüleceği, mevsimler arası geçişlerin belirgin biçimde kayacağı yönündedir (Farokhzadeh ve ark., 2025). Tarım sektörünün en kırılgan unsurlarından biri olan su kaynakları, sürdürülebilir suya olan ihtiyacı ön plana çıkarmaktadır. Yağış miktarlarının azalması, toprak su depolama kabiliyetini (Wang, 2018), bitkilerin gelişim dönemlerindeki nem varlığını (Zeppel ve ark., 2014) ve tarımsal su talebini etkilemekte (Mizyed, 2009) ve böylelikle de su kıtlığına karşı riskleri artırmaktadır.

Baklagiller insan beslenmesinin yanı sıra sürdürülebilir tarımsal üretim açısından stratejik öneme sahiptir (Rubiales ve Mikic, 2015). Nohut, mercimek, kuru fasulye gibi türler; yüksek protein içeriği, azot bağlama yeteneği (Raza ve ark., 2020) ve düşük girdi gereksinimleri nedeniyle iklim dostu tarım politikalarının merkezi haline gelmiştir. Baklagillerin büyük bir çoğunluğu geleneksel olarak kuru tarımla yetiştirilmektedir. Bu, yağışı az olan yıllarda bu ürünlerin rekoltesinin çok düşmesine yol açmaktadır. Yağışların özellikle vejetatif gelişim, çiçeklenme ve dane doldurma dönemlerinde azalması, bitkilerde su stresini artırmakta bunlarda verim kayıplarına neden olmaktadır (Farooq ve ark., 2014). Yarı kurak bölgelerde yer alan çalışmalarda çiçeklenme dönemindeki kısa süreli su yetersizliğinin bile dane sayısı, bitki biyokütlesi ve su kullanım etkinliği üzerinde olumsuz etkileri olduğu saptanmıştır.

İklim değişikliğinin tarımsal su döngüsü üzerindeki etkileri, sulama ihtiyacının artacağına ve üretimde su verimliliğinin sağlanmasının zorunlu hale geleceğine işaret etmektedir. Azalan yağışlarla birlikte toprakta depolanan nemin azalması, yağışın mevsim içi düzensizliği ve buharlaşma-terleme (ET) miktarının artması, baklagillerde tamamlayıcı sulamanın önemini daha da artırmaktadır. Tamamlayıcı sulama, yağışa dayalı olan üretim sistemlerinin göz önünde bulundurulması gereken kritik dönemlerinde verim kaybını azaltmak için yapılan kısıtlı sulama uygulamasıdır. Bitkinin suya hassas dönemlerinde yapılan az miktardaki

sulamalar, hem su kullanımının etkinliğini artırmakta hem de verim düzenliliği sağlamaktadır.

Sürdürülebilir sulama yönetimi, azalan yağış rejimleri altında, su kaynaklarının korunması ve tarımsal üretimin devamlılığının sağlanması amacı ile uygulanan bir yaklaşımdır. Su verimliliği açısından; sulama zamanlamasının optimizasyonu, minimum su ile maksimum verim uygulamalarının yaygınlaştırılması, iklim senaryolarına duyarlı planlama yaklaşımlarının geliştirilmesi ile mümkündür. Ayrıca, maçlama (Zhang ve ark., 2024), azaltılmış toprak işleme (Freebairn, 2024), bitki sıklığı düzenlemesi gibi tarımsal uygulamaların yapılması sağlar. Toprak neminin korunmasına, yüzey buharlaşmasının azaltılmasına ve kök bölgesinin su tutma kapasitesinin artırılmasına önemlidir. Kuraklığa dayanıklı genotipler, üretimi sürdürülebilir kılmak (Slabbert ve ark., 2004) için çeşit parsel uyumluluğunu da dikkate almaya çalışacaktır. Benzer şekilde, iklime dayanıklı baklagil çeşitlerinin geliştirilmesine yönelik çalışmalar da sürdürülebilir baklagil üretim stratejileri programına dahil edilecektir.

Azalan yağış rejimleri altında baklagil üretiminin sürdürülebilirliğini sağlamak, hem sulama yönetiminin iklim odaklı yeniden yapılandırılmasını hem de su kaynaklarının verimli kullanımını gerektirmektedir. Bu bölüm, iklim değişikliğinin baklagil üretimindeki su gereksinimleri üzerindeki etkilerini ele almakta; sürdürülebilir sulama yaklaşımlarını, tamamlayıcı sulama stratejilerini, su verimliliğini artıran teknolojileri ve iklim senaryolarına dayalı sulama planlamasını inceleyerek geleceğe yönelik uygulanabilir çözümler sunmayı amaçlamaktadır.

2. Azalan Yağışların Baklagil Üretimine Etkileri

İklim değişikliğine bağlı olarak yağış miktarlarındaki azalma (Trenberth, 2011), yağışın mevsimsel dağılımının düzensizleşmesi (Khozaymehnezhad ve Nazeri Tahroudi, 2019) ve ekstrem kuraklık olaylarının artması (Spinoni ve ark., 2018), tarımsal üretimde özellikle yağışa bağımlı sistemler için önemli bir tehdit oluşturmaktadır. Nohut, mercimek ve fasulye gibi baklagiller, çoğunlukla yarı kurak bölgelerde kuru tarım koşullarında yetiştirilmekte ve üretim süreçlerinin büyük bölümünde bitki su ihtiyacı yağışlar ile karşılanmaktadır. Bu nedenle baklagiller, yağış rejimindeki değişimlere ve toprakta mevcut suyun azalmasına karşı yüksek

duyarlılık gösteren ürün gruplarından biridir. Azalan yağışlar, hem bitkinin suya erişimini sınırlayarak büyüme ve gelişmeyi doğrudan etkiler, hem de üreticilerin ekonomik istikrarını azaltarak tarımsal sürdürülebilirliği tehdit etmektedir.

Azalan yağışların baklagil üretimine etkilerinden en önemli etkilerinin başında, toprak su içeriğinin düşmesi gelmektedir. Yağış miktarları azaldıkça toprak profilindeki su birikimi de azalmakta (Chen ve ark., 2008), özellikle toprağın 30–60 cm’lik kök bölgesinde suyun bitki tarafından kullanılabilir kısmı hızlıca düşmektedir. Baklagillerin çoğu derin kök yapısına sahip olsa da, toprak neminin yetersizliği kök gelişimini sınırlandırmaktadır. Bu da bitkinin daha derin katmanlardaki suya erişimini zorlaştırmaktadır. Bunun sonucunda, özellikle vejetatif gelişim döneminde bitki boyu, yaprak alanı ve fotosentezik kapasite azalmakta; generatif döneme zayıf bir bitki gelişimiyle girilmektedir (Zeppel ve ark., 2004).

İkinci önemli etki yağışların, bitkinin kritik gelişme dönemlerinde yetersiz kalmasıdır. Çiçeklenme ve dane dolum dönemleri, baklagil türlerinin su stresine en duyarlı olduğu fenolojik evrelerdir. Bu dönemlerde yaşanan kısa süreli su yetersizliği bile çiçek dökülmesini artırmakta, kapsül veya bakla sayısını azaltmakta ve dane bağlama oranını ciddi oranda düşürmektedir. Çiçeklenme dönemindeki su stresinin verimde ciddi azalışlar yaşanabilir (Yang ve ark., 2019; . Dane doldurma döneminde su yetersizliği ise dane ağırlığını düşürmekte (Ouattar, 1987), protein içeriğini olumsuz etkilemekte ve kalite parametrelerinde ciddi düşüşlere neden olmaktadır.

Yağışın azalması evapotranspirasyonu da etkilemektedir (Wang, 2020). Sıcaklık ve buharlaşma hızının artması, bitkilerin su ihtiyacını arttırmaktadır (Hatfield ve Dold, 2019). Bu koşullar toprak yüzeyinden buharlaşma yoluyla kaybedilen su miktarını da artırmaktadır. Mevcut suyun daha hızlı tüketilmesine sebebiyet vermesi ve yağış miktarında ki azalma bitki su stresi şiddetini arttırmaktadır. İklim değişikliğine ilişkin güncel projeksiyonlar, artan sıcaklıklar ve düzensizleşen yağış rejimlerinin baklagillerin evapotranspirasyon gereksinimini yükselterek özellikle yağışa dayalı üretim sistemlerinde su stresini ve verim risklerini artıracığını göstermektedir.

Yağışların azalması aynı zamanda toprak sağlığı ve besin elementi dengesi üzerinde doğrudan olmasa da dolaylı etkiler yaratmaktadır. Düşük toprak nemi, organik maddenin mineralizasyonunu yavaşlatmakta, azot

bağlama süreçlerini sınırlamakta ve simbiyotik bakteri etkinliğini azaltmaktadır. Rhizobium aktivitelerinin yetersiz kalması, baklagillerin doğal azot fiksasyonu kapasitesini önemli ölçüde düşürmekte ve bitkinin gelişimi için gerekli azotun sağlanamamasına yol açmaktadır. Bu durum, hem bitkisel gelişimi hem de tanelerin protein içeriğini etkileyen kritik bir sınırlayıcı faktör olmaktadır.

Yağış rejimlerindeki değişimlerin bir diğer etkisi de verim de ciddi kayıpların yaşanmasıdır. Yıllar arası yağış değişkenliği arttıkça baklagil verimlerindeki dalgalanmalar büyümekte, üretim tahminleri zorlaşmakta ve çiftçiye ekonomik risk ile karşı karşıya bırakmaktadır. Özellikle Akdeniz iklim kuşağında yapılan çalışmalarda, azalan yağış dönemlerinde nohut ve mercimek veriminin yıldan yıla geniş bir aralıkta değiştiği (Devkota ve ark., 2021) ve üretim güvenilirliğinin azaldığı gösterilmiştir. Bu durum, bölgesel gıda güvenliğini ve tarımsal planlamayı olumsuz etkileyen önemli bir sonuçtur.

Yağışlardaki azalma sadece bitki fizyolojisi ve toprak suyu ile değil, baklagil üretiminin ekolojisinde de değişimlere neden olmaktadır (Daryanto ve ark., 2015). Kurak dönemlerde yabancı ot rekabeti artmakta, toprak yüzeyinde kapillarite ve kabuklanma eğilimi yükselmekte ve toprak sıcaklıkları artarak kök bölgesindeki mikroklimayı olumsuz etkilemektedir. Bu unsurlar, bitkinin su teminini daha da zorlaştırarak stres koşullarını artırmaktadır.

Azalan yağış rejimleri; toprak su dengesinin bozulması, kritik dönemlerde su stresinin artması, besin elementi döngüsünün zayıflaması ve verim istikrarının azalması gibi çok yönlü mekanizmalarla baklagil üretimini olumsuz etkilemektedir. Bu nedenle baklagillerde suyun etkin kullanımına, tamamlayıcı sulama stratejilerine, hassas sulama teknolojilerine ve iklim senaryoları doğrultusunda planlanan sulama yönetimine duyulan ihtiyaç her zamankinden daha kritik hale gelmiştir.

3. Baklagillerde Su Yönetimi Temelleri

Baklagiller, sulama ve tarımda önemli bir yere sahip olmakla birlikte, su yetersizliğinden oldukça fazla etkilenebilen ürün gruplarından (Randhawa ve ark., 2014). Su yönetiminin doğru planlanması bitki gelişiminin kritik dönemlerinde su kısıtını azaltmayı, verim potansiyelini

korumayı ve iklim değişikliğinin olumsuz etkilerine karşı üretimin dayanıklılığını artırmayı sağlar. Su yönetimi; baklagil bitkilerinin su ihtiyacının doğru tespit edilmesi, bitkilerin evapotranspirasyon (ET_c) miktarını hesaplayarak sulama zamanlamasının planlanması ve mevcut suyun akıllıca kullanılmasını sağlayacak teknik ve agronomik uygulamaların bir bütündür.

Baklagillerin su gereksinimi, bitkinin gelişim dönemlerine göre önemli farklılıklar gösterir. Vejetatif gelişim döneminde su ihtiyacı nispeten düşük olmakla birlikte, bu dönemde toprak neminin yetersizliği bitki boyunun kısılmasına, yaprak alanının azalmasına ve fotosentetik kapasitenin düşmesine neden olur. Su yönetimi açısından en kritik evreler çiçeklenme ve dane doldurma dönemleridir. Çiçeklenme döneminde yaşanan su yetersizliği çiçek dökülmesine ve bakla sayısında belirgin azalmaya yol açarken (Mwanamwenge, 1999), dane doldurma dönemindeki su sınırlılığı dane ağırlığını düşürerek verim kalitesini olumsuz etkiler (Alghabari

Ihsan, 2018). Bu nedenle baklagillerde su yönetimi stratejileri, özellikle bu iki fenolojik dönem üzerinde yoğunlaşmalı ve sulama programları bu dönemlerin ihtiyaçlarını karşılayacak şekilde optimize edilmelidir.

Baklagilleri su yönetiminin en önemli bileşenlerinden biri, bitki su tüketimi (ET_c) miktarının doğru kestirilmesidir (Siddique ve ark., 2001). ET_c , referans evapotranspirasyon (ET_0) ve bitki katsayısının (k_c) çarpımı sonucu elde edilir (Farg ve ark., 2012). FAO Penman-Monteith eşitliği gibi standart usullerle belirlenen ET_0 değerlerine karşın, K_c değerleri bitkinin gelişme evresine bağlı olarak değişmektedir. Nohut, mercimek ve fasulye gibi türlerin K_c değerleri, erken devrede düşük, çiçeklenme ve tam gelişme devresinde daha yüksektir. İklim değişikliği oranında artan sıcaklık ve buharlaşma oranlarının ET_0 değerlerini artırmasıyla sulama suyu gereksiniminin yükselmesi sulama yönetiminin daha hassas hesaplamalara dayanmasını zorunlu kılmaktadır.

Toprak su dengesinin doğru yönetilmesi, baklagillerde su yönetiminin bir diğer temel unsurudur. Toprak tekstürü, organik madde miktarı, infiltrasyon kapasitesi ve su tutma özellikleri sulama zamanlamasını doğrudan belirler. Killi topraklarda su tutma kapasitesinin yüksek olması nedeniyle sulama aralıkları daha uzun olabilirken, kumlu toprakların su tutma kapasitesi düşük olduğu için daha sık ancak daha düşük miktarda sulama gerektirir.

Toprak su içeriğinin izlenmesi, hem su tasarrufu sağlar hem de bitki kök bölgesinde optimum nem koşullarının korunmasına katkıda bulunur. Bu amaçla gravimetrik ölçümler, tansiyometreler, nem sensörleri ve kapasitif prob sistemleri gibi yöntemler kullanılabilir.

Sulama zamanlaması, baklagillerde başarıyı belirleyen kritik faktörlerden biridir. Sulamaya karar verme sürecinde toprak nem durumu, ET tahminleri, bitki gelişim evresi ve hava durumu verileri birlikte değerlendirilmelidir. Özellikle yağışa bağımlı sistemlerde tamamlayıcı sulama uygulamaları, su yönetiminin stratejik bir parçasıdır. Kritik dönemlerde düşük miktardaki sulamalar, verim ve su kullanım etkinliği üzerinde önemli iyileştirmeler sağlar. Ancak sulamanın fazla veya yanlış zamanda yapılması da üretimi olumsuz etkileyebilir; aşırı sulama toprakta oksijen dengesini bozarak kök gelişimini sınırlar, hastalık riskini artırır ve suyun etkin kullanımını düşürür.

Su yönetiminin etkinliğinin artırılmasında agronomik uygulamalar ile suyun topraktaki tutulma kapasitesinin artırılması önerilmektedir. Malçlama (Sun ve ark., 2020), anızı toprak yüzeyine bırakma (Cutforth ve McConkey, 1997), azaltılmış toprak işleme (Su ve ark., 2007) ve yabancı ot kontrolü (Singh ve ark., 2018), yüzey buharlaşmasını azaltarak toprağı nemli tutar ve sulama gereksinimini azaltır. Ayrıca kuraklığa dayanıklı çeşit seçimi de su yönetimi açısından önemli bir uygulamadır. Derin köklenen, erken olgunlaşan veya su stresine yüksek toleransa sahip çeşitlerin tercih edilmesi kurak dönemlerde verim kayıplarını azaltmaktadır.

Baklagillerin su yönetimi; bitkilerin fenolojik ihtiyaçlarının iyi anlaşılması, ETc hesaplamalarının dikkatle yapılması, sulama zamanlamasının optimize edilmesi ve suyun toprakta tutulmasını sağlayan agronomik uygulamaların bütünsel olarak uygulanmasını gerektirmektedir. Su yönetimi stratejileri baklagil üretiminin sürdürülebilirliği için iklim değişikliği ile artan su stresine karşı bir ön koşuldur.

4. Sürdürülebilir Sulama Yaklaşımları

Baklagil üretiminde suyun etkin ve sürdürülebilir kullanımı, azalan yağış rejimleri, artan su talebi, zorunlu hale getirmiştir. Sürdürülebilir sulama yaklaşımları, hem mevcut su kaynaklarını korumayı hem de bitkilerin kritik dönemlerinde ihtiyaç duyduğu suyun etkili bir şekilde sağlanmasını amaçlar.

Tamamlayıcı sulama, su tasarruflu sulama sistemleri, hassas sulama teknolojileri ve agronomik su koruma uygulamaları baklagildeki sürdürülebilir su yönetiminin temel unsurlarıdır.

Sürdürülebilir sulamanın en önemli araçlarından biri tamamlayıcı (supplemental) sulama uygulamalarıdır (Oweis, 1997). Tamamlayıcı sulama, yağışa dayalı tarım yapılan bölgelerde kritik büyüme dönemlerinde sınırlı miktarda su uygulanmasıyla verim istikrarını artırmayı hedefleyen bir yaklaşımdır. Baklagillerde özellikle çiçeklenme ve dane doldurma dönemlerinde uygulanan düşük miktartlı sulamalar, su kullanım etkinliğini yükselterek hem verimde hem de kalite parametrelerinde önemli iyileşmeler sağlar. Tamamlayıcı sulama, tam sulama yerine geçmez; yağışın yetersiz kaldığı kritik anlarda verim kayıplarını önleyen stratejik bir destek mekanizması işlevi görür. Bu nedenle su kısıtlı bölgelerde sürdürülebilir baklagil üretimi için tamamlayıcı sulama planlaması giderek daha önemli hale gelmektedir.

Su tasarrufuna neden olan tamamlayıcı sulamanın yaygınlaştırılması önerilmektedir. Damla sulama ya da yağmurlama sulama gibi basınçlı sulama sistemleri, üst tarafta akış ve alt tarafta drenaj kaybını en aza indirmektedir. Sulama suyu kök bölgesine verilmektedir. Damla sulama sistemleri, baklagil bitkileri için oldukça uygundur. Yüzey altı damla sulama, su uygulamalarında homojenlik, gübreleme (fertilizasyon) imkânı ve düşük buharlaşma kayıpları sayesinde su kullanım etkinliğini artırmaktadır. Yağmurlama sulama daha geniş alanlarda uygulanabilme imkânı sunmasına karşın, rüzgâr ve buharlaşma etkileri göz önüne alınmalıdır (Molle ve ark., 2012). Su tasarruflu sistemlerin yaygınlaştırılması su kaynaklarının korunmasına ve üretim maliyetlerinin azaltılmasına önemli katkılar sağlar.

Hassas sulama uygulamaları, gelişen teknolojiler sayesinde sürdürülebilir sulama yönetiminde kullanılmaktadır (Adeyemi ve ark., 2017). Bu sistemler, bitkinin gerçek zamanlı su ihtiyacına göre sulama yapan hassas sulamadır. Hassas sulama, sensörler, uzaktan algılama araçları, dronlar ve uydu görüntüleri kullanılarak veri toplanmasını ifade eder. Toprak nem sensörleri (Soulis, 2015) ve NDVI (Crusiol, 2017) gibi bitki canlılığı göstergeleri sulama zamanlamasının bilimsel bir zeminde oluşturulmasına olanak tanır. Bu sistemler ile birlikte aşırı ya da yetersiz sulama riski azaltılmakta, su ve enerji tasarrufu yapılmakta, verim istikrarı artmaktadır.

İklim verilerinin anlık izlenmesiyle ET tahminlerinin güncellenmesi, sulama programlarının dinamik olarak optimize edilmesine yardımcı olur.

Tarımsal su tasarrufu uygulamaları sürdürülebilir su yönetiminin önemli bir bileşenidir. Malçlama, toprak yüzeyini kaplayarak toprak buharlaşmasını azaltmak ve toprak su tutma kapasitesinin korumaktadır (Jacks ve Brind, 1955). Anızın toprağın yüzeyine bırakılması, buharlaşma kayıplarının düşmesini sağlar. Ayrıca toprağın organik madde içeriği arttıkça daha fazla su tutar. Azaltılmış toprak işleme uygulamaları, toprak yapısının korunmasını sağlamakta aynı zamanda suyun toprak altında tutulması ve toprak içine girmesini kolaylaştırmaktadır. Yabancı ot yönetimi, sürdürülebilir sulamanın bir parçasıdır. Çünkü yabancı otlar, su kısıtlı dönemlerde bitki ile rekabete girerek toprak neminin hızla tükenmesine neden olabilir.

Mevcut teknolojilerin uygulanmasından çok daha fazlası gerektiğini söyleyebiliriz. Çiftçilerin iklime uyumlu hale getirmesi zorunludur. İklim projeksiyonlarına ve su stresine dayanıklı baklagil türleri için ekim zamanının optimize edilmesi ve su uygulamalarının bitki fizyolojisi ile uyum içine getirilmesi ve su uygulamalarının geliştirilmesi ile su uygulamalarının yaygınlaşması için eğitim programları, çiftçi bilgilendirme faaliyetleri ve karar destek sistemleri önemli birer kolaylaştırıcıdır.

Sürdürülebilir sulama yaklaşımları; tamamlayıcı sulama uygulamaları, su tasarruflu sistemler, hassas sulama teknolojileri ve suyu koruyan agronomik uygulamaları içeren çok bileşenli bir yapıya sahiptir. Bu yaklaşımlar, azalan yağış rejimleri altında baklagil üretiminin sürdürülebilirliğini ve verim istikrarını sağlamada temel araçlar olarak değerlendirilmelidir.

5. İklim Senaryolarına Dayalı Sulama Planlaması

İklim değişikliği, yağış miktarında ve sıcaklık düzeninde gerçekleşen değişimlerle tarımsal su talebi üzerinde doğrudan etkili olmaktadır. Ağırlıklı olarak yağışa bağımlı sistemlerden biri olan baklagil üretimi için sulama programları iklim projeksiyonları ile birlikte oluşturulmalıdır. Bu durum, hem verim sürekliliği hem de su havzaları açısından önem arz etmektedir. Sulama planlaması çalışmasında iklim senaryoları, kuraklık indeksi, evapotranspirasyon projeksiyonları ve iklim bazlı karar alma sistemleri gibi konular, en temel unsurlar arasında yer alır.

Gelecekteki yağış ve sıcaklık projeksiyonlarının doğru bir şekilde değerlendirilmesinde sulama planlaması ilk adımdır. IPCC'nin geliştirdiği RCP (Representative Concentration Pathways) (Van Vuuren ve ark., 2011) ve günümüze uyarlanan SSP (Shared Socioeconomic Pathways) (Riahi ve ark., 2017) senaryoları, çeşitli sera gazı emisyonları altında gelecekteki iklim koşullarını modellemektedir. Yarı kurak bölgelerin çoğunda RCP 4.5, RCP 6.0 ve özellikle RCP 8.5 senaryolarının etkisiyle yağışların azalması, yükselen sıcaklıkların buharlaşma-terleme (ET) oranlarını artırması beklenmektedir. Bu durum baklagillerin su ihtiyacının artmasına, toprakta suyun daha hızlı tükenmesine ve sulama aralıklarının yeniden düzenlenmesine neden olacaktır. Sulama planlaması yalnızca mevcut koşullara göre değil, gelecekteki hidroklimatik değişimlere göre de olmalıdır.

Sulama planlamasında başka bir önemli araç ise kuraklık indeksleridir (Pedro-Monzonís ve ark., 2015). Standart Yağış İndeksi (SPI) (Svoboda ve ark., 2012), Standart Yağış-Buharlaşma İndeksi (SPEI) (Tirivarombo ve ark., 2018) ve Toprak Nem İndeksi (SMI) (Hunt ve ark., 2009) gibi göstergeler, belirli bir dönemdeki yağış açığını ve su stresinin şiddetini ortaya koymaktadır. SPEI'nin farklı iklim şartlarına daha yüksek uyum yeteneği mevcuttur. Çeşitli İklim Değişikliği spektrumunda güvenilir olduğu bilinmektedir. Baklagil üretiminde bu endekslerin kullanımı, hem sulama zamanlamasını hem de tamamlayıcı sulama miktarlarını riske dayalı olarak belirlemekte faydalıdır.

İklim senaryolarına dayanan sulama planlamasında en önemli hesaplamalardan biri, bitki su tüketimi projesidir (Smith, 1992). Hava sıcaklıklarının yükselmesi, devam eden kurak dönemler ve toprak neminin azalması, ET_0 değerlerinin yükselmesine ve bitkilerin su tüketiminin gelecekte daha yüksek seviyelerde seyretmesine yol açmaktadır.

İklim senaryolarının dayandığı sulama planlaması yalnızca model ve indeks kullanımı değil, stratejik saha uygulaması da gerektirir. Örneğin, ekim tarihinin kaydırılmasıyla bitkinin çiçeklenme dönemi aşırı sıcaklık ve kuraklık dönemlerine denk gelmez. Su stresine dayanıklı çeşitlerin tercih edilmesi, bu durumların yaygınlaşmasının önüne geçer. Tamamlayıcı sulama uygulamalarının miktarı ve zamanı iklim projeksiyonları doğrultusunda yıldan yıla farklılık gösterebilir; bu nedenle bu yöntemlerin esnek sulama ortamları tasarlamak amacıyla uygulanması gerekmektedir.

Sonuç olarak, iklim senaryolarına dayalı sulama planlaması, baklagil üretiminde suyun etkin kullanımını sağlayan ve iklim değişikliğine uyum kapasitesini artıran stratejik bir yaklaşımdır. Gelecekteki yağış azalışları, artan ET değerleri ve kuraklık riskleri dikkate alınarak hazırlanan sulama programları, üreticilerin verim kayıplarını azaltmalarına, su kaynaklarını korumalarına ve sürdürülebilir tarımsal üretim yapmalarına önemli katkılar sağlayacaktır.

6. Sonuç ve Öneriler

Azalan yağışlar, artan sıcaklıklar ve kuraklık sıklığı gibi değişimler tarımsal üretim sistemleri üzerinde küresel ölçekte belirgin baskılar oluşturmaktadır. Yağışa dayalı üretim yapılan yarı kurak ve kurak bölgelerde bu değişikliklerin etkisi daha fazla hissedilmekte ve stratejik öneme sahip baklagiller gibi ürün gruplarının su stresi altındaki üretim performansı ciddi etkilenmektedir. Nohut, mercimek ve fasulye gibi baklagillerin besin değeri yüksek, azot bağlama özellikleri ile toprak verimliliğini artırıcı ve düşük girdili üretime uygun ürünler olması bu ürünlerin iklim değişikliği uyumu tarımsal sistemler içinde önemli olduğunu göstermektedir. Buna karşın, bu ürünler kuru tarıma bağımlı olduğundan, yağışlardaki azalış ve düzensizlik karşısında üretim güvenliği kırılgandır.

Bu bölümde ortaya konulduğu üzere, azalan yağışların baklagil üretimine etkileri çok boyutludur. Toprak su içeriğinin azalması, kritik gelişme dönemlerinde su stresinin artması, bitki su tüketimindeki yükseliş, besin elementlerinin döngüsünde yaşanan bozulmalar ve verim istikrarının düşmesi gibi mekanizmalar üretimin tüm aşamalarını etkilemektedir. Bu nedenle, baklagil üretiminde suyun etkin kullanımını temel alan bir yaklaşım benimsenmeden iklim değişikliğinin olumsuz etkilerini hafifletmek mümkün görünmemektedir.

Baklagil üretiminin geleceği açısından sürdürülebilir sulama yaklaşımları önemlidir. Tamamlayıcı sulama yani destekleyici sulama, su tasarruflu sağlayan sulama sistemleri, hassas sulama teknolojileri ve modern su tasarrufu uygulamaları, hem su kullanım etkinliğini artırmakta hem de verim kayıplarını azaltmaktadır. Devam eden iklim değişikliklerinin gelecekte mevcut üretim deseni üzerinde olası etkileri yadsınamaz. İklim senaryolarına dayalı sulama planlaması, ET projeksiyonlarının değerlendirilmesi, kuraklık

indekslerinin izlenmesi, sulama stratejilerinin bu verilere göre dinamik şekilde optimize edilmesi, baklagil üretim sistemlerinin iklim değişikliğine karşı dayanma gücünün artmasında önemli bir araçtır.

Sürdürülebilir su yönetimi sadece tarlada uygulanan teknikleri değil, aynı zamanda politika, eğitim ve havza yönetimi bileşenlerini de içeren bir yaklaşımdır. Çiftçilerin sulama yönetimi konusunda bilinçlendirilmesi, su tasarruflu teknolojilere erişimlerinin desteklenmesi; havza düzeyinde su tahsis planlarının güncellenmesi ve su kaynaklarının adil, verimli ve uzun vadeli korunması için gerekçeler geliştirilmesi tarımsal su yönetiminin sağlamlaştırıyor. Bundan dolayı, yenilikçi su hasadı tekniklerinin üretim sistemlerine entegrasyonu ve su stresine dayanıklı baklagil çeşitlerinin geliştirilmesi, gelecekte su kaynaklarının daha sınırlı olacağı dönemlere hazırlık açısından kritik öneme sahiptir.

Sonuç olarak, azalan yağış rejimleri altında, sürdürülebilir baklagil üretimi çok boyutlu bir süreçtir. Bunun için ise teknik, agronomik ve yönetsel stratejilerin entegre biçimde uygulanması gerekir. Bu bölümde sunulan çalışmalar, kırmızı mercimek ekim alanı rasyonel kullanımını, iklimin uyum yeteneğini geliştirmek için özel çalışmalar sağlamaktadır. Sürdürülebilir su yönetimi, ekosistem sağlığının sürekliliği ve gelecek nesiller için gıda güvenliğini sağlamak açısından üretim verimliliğini korumaktan daha fazlası bir anlama sahiptir.

Kaynaklar

- Adeyemi, O., Grove, I., Peets, S., & Norton, T. (2017). *Advanced monitoring and management systems for improving sustainability in precision irrigation*. Sustainability, 9(3), 353.
- Alghabari, F., & Ihsan, M. Z. (2018). *Effects of drought stress on growth, grain filling duration, yield and quality attributes of barley (Hordeum vulgare L.)*. Bangladesh Journal of Botany, 47(3), 421–428.
- Chen, H., Shao, M., & Li, Y. (2008). *The characteristics of soil water cycle and water balance on steep grassland under natural and simulated rainfall conditions in the Loess Plateau of China*. Journal of Hydrology, 360(1–4), 242–251.
- Crusiol, L. G. T., Carvalho, J. D. F. C., Sibaldelli, R. N. R., Neiverth, W., do Rio, A., Ferreira, L. C., ... & Farias, J. R. B. (2017). *NDVI variation according to the time of measurement, sampling size, positioning of sensor and water regime in different soybean cultivars*. Precision Agriculture, 18(4), 470–490.
- Cutforth, H. W., & McConkey, B. G. (1997). *Stubble height effects on microclimate, yield and water use efficiency of spring wheat grown in a semiarid climate on the Canadian prairies*. Canadian Journal of Plant Science, 77(3), 359–366.
- Daryanto, S., Wang, L., & Jacinthe, P. A. (2015). *Global synthesis of drought effects on food legume production*. PLoS One, 10(6), e0127401.
- Devkota, M., Patil, S. B., Kumar, S., Kehel, Z., & Wery, J. (2021). *Performance of elite genotypes of barley, chickpea, lentil, and wheat under conservation agriculture in Mediterranean rainfed conditions*. Experimental Agriculture, 57(2), 126–143.
- Farg, E. S. L. A. M., Arafat, S. M., Abd El-Wahed, M. S., & El-Gindy, A. M. (2012). *Estimation of evapotranspiration ET_c and crop coefficient K_c of wheat in south Nile Delta of Egypt using integrated FAO-56 approach and remote sensing data*. The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science, 15(1), 83–89.
- Farokhzadeh, B., Imani, R., & Choobeh, S. (2025). *Spatiotemporal prediction of precipitation distribution in the Urmia Basin using an*

- EEMD-SVM-LSTM hybrid model*. Desert Ecosystem Engineering, 14(48), 73–92.
- Farooq, M., Hussain, M., & Siddique, K. H. (2014). *Drought stress in wheat during flowering and grain-filling periods*. Critical Reviews in Plant Sciences, 33(4), 331–349.
- Freebairn, D. M., Loch, R. J., & Cogle, A. L. (1993). *Tillage methods and soil and water conservation in Australia*. Soil and Tillage Research, 27(1–4), 303–325.
- Hatfield, J. L., & Dold, C. (2019). *Water-use efficiency: Advances and challenges in a changing climate*. Frontiers in Plant Science, 10, 103.
- Hunt, E. D., Hubbard, K. G., Wilhite, D. A., Arkebauer, T. J., & Dutcher, A. L. (2009). *The development and evaluation of a soil moisture index*. International Journal of Climatology, 29(5), 747–759.
- IPCC. (2013). *Climate Change 2013: The physical science basis*. Cambridge University Press.
- Jacks, G. V., Brind, W. D., & Smith, R. (1955). *Mulching*. (Yayınevi ve yer belirtilmedi – özgün kaynakta yoksa bu şekilde bırakılır.)
- Khozeymehnezhad, H., & Nazeri Tahroudi, M. (2019). *Annual and seasonal distribution pattern of rainfall in Iran and neighboring regions*. Arabian Journal of Geosciences, 12(8), 271.
- Mizyed, N. (2009). *Impacts of climate change on water resources availability and agricultural water demand in the West Bank*. Water Resources Management, 23(10), 2015–2029.
- Molle, B., Tomas, S., Hendawi, M., & Granier, J. (2012). *Evaporation and wind drift losses during sprinkler irrigation influenced by droplet size distribution*. Irrigation and Drainage, 61(2), 240–250.
- Mwanamwenge, J. W. A. U., Loss, S. P., Siddique, K. H. M., & Cocks, P. S. (1999). *Effect of water stress during floral initiation, flowering and podding on the growth and yield of faba bean (Vicia faba L.)*. European Journal of Agronomy, 11(1), 1–11.
- Ouattar, S., Jones, R. J., & Crookston, R. K. (1987). *Effect of water deficit during grain filling on the pattern of maize kernel growth and development*. Crop Science, 27(4), 726–730.
- Oweis, T. (1997). *Supplemental irrigation: A highly efficient water-use practice*. ICARDA.

- Pedro-Monzonís, M., Solera, A., Ferrer, J., Estrela, T., & Paredes-Arquiola, J. (2015). *A review of water scarcity and drought indexes in water resources planning and management*. Journal of Hydrology, 527, 482–493.
- Randhawa, N., Kaur, J., Singh, S., & Singh, I. (2014). *Growth and yield in chickpea (Cicer arietinum L.) genotypes in response to water stress*. African Journal of Agricultural Research, 9(11), 982–992.
- Raza, A., Zahra, N., Hafeez, M. B., Ahmad, M., Iqbal, S., Shaukat, K., & Ahmad, G. (2020). *Nitrogen fixation of legumes: Biology and physiology*. In *The plant family Fabaceae: Biology and physiological responses to environmental stresses* (pp. 43–74). Springer Singapore.
- Riahi, K., Van Vuuren, D. P., Kriegler, E., Edmonds, J., O'Neill, B. C., Fujimori, S., ... & Tavoni, M. (2017). *The Shared Socioeconomic Pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications: An overview*. Global Environmental Change, 42, 153–168.
- Rubiales, D., & Mikic, A. (2015). *Introduction: Legumes in sustainable agriculture*. Critical Reviews in Plant Sciences, 34(1–3), 2–3.
- Siddique, K. H., Regan, K. L., Tennant, D., & Thomson, B. D. (2001). *Water use and water-use efficiency of cool season grain legumes in low rainfall Mediterranean-type environments*. European Journal of Agronomy, 15(4), 267–280.
- Singh, R., Das, T. K., Kaur, R., Raj, R., & Shekhawat, K. (2018). *Weed management in dryland agriculture in India for enhanced resource use efficiency and livelihood security*. Proceedings of the National Academy of Sciences, India Section B: Biological Sciences, 88(4), 1309–1322.
- Slabbert, R., Spreeth, M., Krüger, G. H. J., & Bornman, C. H. (2004). *Drought tolerance, traditional crops and biotechnology: Breeding towards sustainable development*. South African Journal of Botany, 70(1), 116–123.
- Smith, M. (1992). *CROPWAT: A computer program for irrigation planning and management* (Vol. 46). FAO.
- Soulis, K. X., Elmaloglou, S., & Dercas, N. (2015). *Investigating the effects of soil moisture sensors positioning and accuracy on soil moisture-based*

- drip irrigation scheduling systems*. Agricultural Water Management, 148, 258–268.
- Spinoni, J., Vogt, J. V., Naumann, G., Barbosa, P., & Dosio, A. (2018). *Will drought events become more frequent and severe in Europe?* International Journal of Climatology, 38(4), 1718–1736.
- Su, Z., Zhang, J., Wu, W., Cai, D., Lv, J., Jiang, G., ... & Gabriels, D. (2007). *Effects of conservation tillage practices on winter wheat water-use efficiency and crop yield on the Loess Plateau, China*. Agricultural Water Management, 87(3), 307–314.
- Sun, D., Li, H., Wang, E., He, W., Hao, W., Yan, C., ... & Zhang, F. (2020). *An overview of the use of plastic-film mulching in China to increase crop yield and water-use efficiency*. National Science Review, 7(10), 1523–1526.
- Svoboda, M., Hayes, M., & Wood, D. (2012). *Standardized precipitation index: User guide*. WMO.
- Tirivarombo, S., Osupile, D., & Eliasson, P. (2018). *Drought monitoring and analysis: Standardised precipitation evapotranspiration index (SPEI) and standardised precipitation index (SPI)*. Physics and Chemistry of the Earth, 106, 1–10.
- Trenberth, K. E. (2011). *Changes in precipitation with climate change*. Climate Research, 47(1–2), 123–138.
- Van Vuuren, D. P., Edmonds, J., Kainuma, M., Riahi, K., Thomson, A., Hibbard, K., ... & Rose, S. K. (2011). *The representative concentration pathways: An overview*. Climatic Change, 109(1), 5–31.
- Wang, S., Wang, H., Zhang, Y., Wang, R., Zhang, Y., Xu, Z., ... & Li, J. (2018). *The influence of rotational tillage on soil water storage, water-use efficiency and maize yield in semi-arid areas under varied rainfall conditions*. Agricultural Water Management, 203, 376–384.
- Wang, S., Zhang, Q., Yue, P., & Wang, J. (2020). *Effects of evapotranspiration and precipitation on dryness/wetness changes in China*. Theoretical and Applied Climatology, 142, 1–15. (Sayfa aralığı verilmemişse böyle bırakılır.)
- Yang, X., Wang, B., Chen, L., Li, P., & Cao, C. (2019). *The different influences of drought stress at the flowering stage on rice physiological traits, grain yield, and quality*. Scientific Reports, 9(1), 3742.

Zeppel, M. J. B., Wilks, J. V., & Lewis, J. D. (2014). *Impacts of extreme precipitation and seasonal changes in precipitation on plants*. Biogeosciences, 11(11), 3083–3093.

(Tekrarı olduğu için APA gereği aynı şekilde yazılır.)

Zeppel, M. J. B., Wilks, J. V., & Lewis, J. D. (2014). *Impacts of extreme precipitation and seasonal changes in precipitation on plants*. Biogeosciences, 11(11), 3083–3093.

Zhang, L., Wei, H., Zhang, K., Li, Z., Li, F. M., & Zhang, F. (2024). *Plastic film mulching increases crop yields and reduces global warming potential under future climate change*. Agricultural and Forest Meteorology, 349, 109963.

BÖLÜM 7

İKLİM DEĞİŞİKLİĞİ VE AKDENİZ BÖLGESİ TARIMSAL ÜRETİMDE YENİ BİTKİSEL ÜRETİM DESENİ

Dr. Öğr. Üyesi. Hülya SAYĞI ^{1*}

DOI: <https://www.doi.org/10.5281/zenodo.17966546>

^{*1}Çukurova University Yumurtalık Meslek Yüksekokulu, Bitkisel ve Hayvansal
Üretim Bölümü, Adana,
husaygi@gmail.com, ORCID:<https://orcid.org/0000-0002-2327-566X>

1. GİRİŞ

Ekonomik faaliyetlerin temelinde insanların karşılamak zorunda oldukları ihtiyaçları vardır. Ekonomik faaliyetler insanın da yaşamını devam ettirmekte olduğu doğal çevre, dünya uzay ve hatta ulaşılabilirse ki gelecekte bir gün ulaşılabilmesi ihtimal dahilinde olan evren olarak tanımlanan doğada gerçekleştirilmektedir. İnsanlar ihtiyaçlarını gidermede sahip oldukları sermaye mallarını yani önceden üretim için üretilmiş girişimci, emek, sermaye, doğa ve teknolojiden oluşan üretim faktörlerini kullanırlar. Üretim faktörlerinden biri olan doğa üretim, ticaret ve hizmet hangi tür işletme ya da faaliyet olursa olsun insan ihtiyaçlarının karşılanmasında gerçekleştirilen her ekonomik faaliyet için temel bir üretim faktörüdür (Kindness et al. 2025). Doğada gerçekleştirilen ekonomik faaliyetlerde insan ihtiyaçlarını karşılanması amacıyla doğa hammadde, üretim aracı, işyeri gibi farklı amaçlarla değiştirilip, dönüştürülerek kullanılmaktadır. Genelde doğa aleyhine olan bu değişim ve dönüşüm sürecinde doğanın bileşenleri üzerinde meydana gelen zararlar belli bir dereceye kadar doğa tarafından bertaraf edilip doğadaki işlevini ilk hali gibi tekrar yerine getirmeye hazır hale getirilebilmekteydi (Saygı ve ark. 2018) Bu durumda doğa insan varlığının korunması, iyileştirilmesi ve geliştirilmesinde hem elzem olan ihtiyaçların karşılandığı hem insan yaşamının devamlılığının sağlanmasında sağlıklı bir çevre ortamı sunabilmekteydi. Tabi ki bu durumda insanların var olan ihtiyaçlarını karşılamada kullandıkları ekonomik faaliyetlerde kullandıkları üretim/tüketim yöntemlerinin doğa ile uyumlu ya da o zamanki şartlarda gücünün doğaya zarar verecek boyutta olmaması en önemli faktördür. Ancak bu durum 1900'lü yıllarda buhar gücünün keşfedilmesi, üretimde makinelerin kullanılmaya başlanmasından oluşan ana faktörler ekonomik faaliyetlerde (üretim, ticaret ve hizmet) nispeten küçük işletme ya da bireysel esnaf faaliyetlerinden oluşan üretim/tüketim yöntemlerinden çıkılmasına neden oldu (Külcü, 2016). Yeni durumda ekonomik faaliyetlerde kitlesel üretim/tüketim yöntemlerine geçiş yapılması doğaya o güne kadar tanışmadığı yeni bir düşman kazandırdı. İnsan ihtiyaçlarının karşılanmasında kullanılan ekonomik faaliyetlerde kullanılan doğa ile uyumlu olmayan üretim/tüketim yöntemleri tarafından yaratılan bu yeni düşman, doğanın var olan dengesini bozarak doğanın insan ihtiyaçlarının karşılanmasında doğanın kendini yenileme özelliğini yok ederek görevini yapmasını engellemektedir.

İnsana bağlı ekonomik faaliyetlerden kaynaklı zarar görerek dengesi bozulan doğa, görmüş olduğu zararları farklı yollarla içerisinde bulunan insan, bitkiler, hayvanlar ve diğer canlı varlıklardan oluşan bileşenlerine yansıtmaktadır (Evans, 2024). Doğa dengesinin bozulmasından kaynaklanan olumsuz yansımaların etkileri insanların gerçekleştirdikleri tüm ekonomik faaliyetlere özellikle doğrudan doğaya bağlı gerçekleştirilen tarımsal üretim faaliyetlerinde neden olduğu temel bir problem olan iklim değişikliği problemi ile çok derinden hissedilmektedir. İklim değişikliği insana bağlı doğada gerçekleştirilen tarım dahil diğer tüm ekonomik faaliyetlerde kullanılan üretim/tüketim yöntemlerinin sonsuz olduğu düşünülen ama gerçekte kıt (sınırlı, limitli, sayılı) olan doğal kaynakların bilinçsizce, aşırı ve doğayla uyumsuz bir şekilde kullanılmasının hava, su ve toprağı kirletmesi, hava içerisindeki azot, oksijen, karbondioksit, hidrojen ve ozon gazları bileşenlerindeki dengeyi bozmasından meydana gelmektedir (Güllü, 2025).

İnsana ait tüm ihtiyaçların karşılanmasında insanlığın bu günkü medeniyetinin oluşturulmasında kullanılan Tarım vazgeçilemeyen bir ekonomik faaliyet olarak doğa koşullarına bağlı doğada gerçekleştirilmektedir. Diğer taraftan bir bölgede doğanın şekillenmesi de iklim koşullarına (Yalçın ve ark. 2005), tarım doğa koşullarına, doğanın dengesi insan ihtiyaçlarının karşılanmasında gerçekleştirilen tarım dahil tüm ekonomik faaliyetlere (WHO, 2025), iklim bu ekonomik faaliyetlerde gerçekleştirilen üretim/tüketim yöntemlerine bağlı olduğu artık bilinen bir gerçektir (Yalçın ve ark. 2005).

2. İKLİM DEĞİŞİKLİĞİ

Sıcaklık ve hava koşullarındaki uzun vadeli değişiklikleri ifade eden iklim değişikliği olgusu dünya var olduğundan beri güneş aktivitesi veya büyük volkanik patlamalar nedeniyle doğal olarak zaten gerçekleşen bir durumdu. Tarihsel süreçte dünya üzerinde canlı yaşamın ortaya çıkması, farklı canlı türlerinin oluşması nihayetinde insan varlığının ortaya çıkışı, bu varlığın sürdürülmesi temelde iklim değişikliğine bağlıdır. Bu anlamda iklim değişikliğini doğal süreçte meydana gelen iklim değişiklikleri, insan faaliyetleri dolayısıyla ortaya çıkan iklim değişiklikleri diye iki başlık altında değerlendirebiliriz.

İnsan faaliyetlerinden kaynaklanan iklim değişiklikleri baskın olarak 1900'li yıllarla birlikte ortaya çıkan ekonomik faaliyetlerde kitlesel

üretim/tüketim yöntemlerinin kullanılması, özellikle kömür, petrol ve gaz gibi fosil yakıtların yakılması nedeniyle dünyayı saran atmosfer tabakasındaki güneşin ısısını hapseden ve sıcaklıkları artıran sera gazı emisyonlarının artması iklim değişikliğinin diğer ve bir bakıma yapay nedenidir (Hegerl et al. 2019). İklim değişikliğine neden olan ve sera etkisi olarak tanımlanan bu durum atmosferde bulunan karbondioksit (CO_2), metan (CH_4) ve nitroz oksit (N_2O) gibi bazı gazların dünya yüzeyinden yansıyan güneş ışınlarının bir kısmını hapsederek uzaya kaçmasını engelleyerek aslında dünyanın yaşanabilir bir sıcaklıkta kalmasını sağlayan belirli bir dengede işleyen doğal bir süreçtir (Filonchik et al. 2024; Saleem et al. 2025). İklim değişikliğini tetikleyen süreç Fosil yakıtların yakılması, bitki örtüsünün ve doğal yaşamın tahrip edilmesi, tarımsal üretim faaliyetleri ve endüstriyel üretim faaliyetleri gibi insan kaynaklı üretim/tüketim süreçlerinde CO_2 salınımını arttırarak bu gazlar arasındaki dengeyi bozmasıdır. Bu durumda güneşten gelen ışınların atmosferde tutulma oranı artmakta ve dünya yüzeyindeki sıcaklık değerlerinde arttırmakta ve iklim değişikliğine neden olan temel faktörlerden biridir (Carbodeck, 2025).

İklim değişikliğinin olumlu/olumsuz etkileri bazen doğrudan bazen dolaylı tarımsal üretim faaliyetleri etkilemektedir. Bu etkiler aşırı sıcaklıklar, kuraklık, biyoçeşitliliğin azalması, hava, su ve toprak kaynaklarının kirlenmesi, ürün ekim/hasat zamanlarının değişmesi, üretilen bitki deseninin değişmesi, verim kayıpları ve artan üretim maliyetleri gibi daha fazla sayılabilecek bir dizi birbirini tetikleyen, birbirinden bağımsız olumsuzluklardır. Diğer yandan yeni ürün yetiştirme fırsatı, iklim nedeniyle üretime açık olmayan bölgelerin tarıma açılması, artacak ürün verimleri gibi nispeten sınırlı ve olumlu etkilerdir.

3. TARIMDA İKLİM VE BİTKİ DESENİ

Tarımsal üretimde uygun iklim koşulları ve buna bağlı oluşan üretim sürecinde kullanılan bitki deseni tarımsal üretim kaynakları, bitki gelişimi, ürün verimi, ürün kalitesi üretim maliyetleri ve çevre maliyetleri üzerinde değişen oranlarda etkilidir (EPA. 2025).

3.1. Tarımda İklim

İklim, tarımsal üretimde hangi ürünlerin yetiştirileceğini, hangi ürünlerin ekilebileceğini belirleyen ve tarımda ana üretim girdisi olan farklı toprak tiplerinin bileşimi ve verimliliğini etkileyen başlıca doğal faktörlerden biridir.

Tarımsal üretim faaliyetlerinde bitkisel üretimi etkileyen en önemli iklim bileşenleri sıcaklık, yağış türü ve seviyesi, rüzgar, ışık, nem ve dondur (Kapur ve ark. 2012; Lewandowski et al.. 2018):

Sıcaklık, üretilecek ürünün seçiminde, bitkinin büyüme süresini ve bitki örtüsünün tipini belirleyerek tarımsal üretimde yüksek ekonomik fayda elde etmede büyük önem taşır (Walsh et al. 2020) Sıcaklık, belirli bir bölgede belirli bitkilerin üretimine imkan vererek tarımsal üretimde uzmanlaşma olgusunu geliştirirken üretimi yapılacak bitkinin sıcaklığa karşı dayanma kabiliyeti ne kadar yüksekse o bitkinin üretimi o kadar yaygınlaşır.

Bitkisel üretim sürecinde bitkilerin ihtiyacı olan sıcaklık değerleri minimum derecenin altına düşmemesi aynı şekilde dayanabileceği maksimum derecenin üstüne de çıkmamalıdır. Her ürünün büyümesi için optimum, minimum ve maksimum sıcaklık dereceleri vardır. Sıcaklık derecesi optimum sıcaklığa ne kadar yakınsa bitkisel üretimden elde edilen sonuçlar o kadar iyi olur ve örneği pirinç, soya fasulyesi ve buğdayda büyüme periyodu boyunca sıcaklık derecesi minimum seviyesinin altında kalırsa ürünler olgunlaşmaz ve verim düşüklüğüne neden olur (Walsh et al. 2020). Genellikle, bitkisel üretim için gerekli sıcaklık değerleri minimum değerlerin altında olursa, örneğin don olayı ve kar yağışı sonrası toprağın buz tutması gibi bitkilerde büyüme hızı yavaşlar hatta durur, ve sıcaklık değerleri maksimum değerlerin üstünde olursa bitkiler zarar görür (Başaran ve Aytas Akçin, 2022). Büyüme mevsimi boyunca ısı birikimi diye adlandırılan bitkilerin büyümesi için gereken minimum sıcaklığın üzerinde hava sıcaklığında meydana gelen 10 santigrat derece artışı bitkilerin büyüme hızı artar. Su ve toprak gibi tarımsal üretim kaynakları sağlandığı sürece ekvator bölgesinde tüm yıl olduğu kabul edilen büyüme mevsimi kutuplara doğru gidildikçe zamansal anlamda azalmaktadır (Britannica, 2022).

Yağış türü ve oranı bitki gelişimi üzerinde bitkinin ihtiyaç duyduğu tatlı suyun ana kaynağı olarak önemli bir etkiye sahiptir. Belirli bir bölgede bitkisel üretimin verimliliğini etkileyen yağışın miktarı, mevsimi ve sıklığı, üretimi yapılacak bitki desenini belirler. Örneğin pirinç yetiştiriciliği için yaz aylarında, yağış alan tropikal nemli bölgeler uygun bir ortam oluştururken buğday yetiştiriciliğinde ise kış aylarında yağış alan Akdeniz Bölgesi uygun bir ortam oluşturur. Yağış miktarı, yağışın düzenliliği, bitkisel yetiştiricilikte bitkinin su

ihtiyacını hissettiği dönemlerde, doğru zamanda yağması yanında sıcaklık, suyun buharlaşma hızı, toprak yapısı ve bitki örtüsü önemlidir.

Bitkilerin su ihtiyacı, bitki türüne göre, örneğin pirinç, ayçiçeği, ve yetiştirildiği bölgelere göre, örneğin orta kuşakta 100 mm yağış miktarı tarım için uygun olabilirken ekvator bölgesinde yüksek buharlaşma nedeniyle yetersiz kalabilmekte, değişkenlik gösterir. Bitkisel üretimde yağışın türü, düzensizliği ve yoğunluğu örneğin aşırı yağışın neden olduğu vahşi seller, bitkilere zarar veren dolu yağışı ve hasat döneminde meydana gelen yağış, yağıştan beklenen faydayı tersine olduğu gibi zararlı da olabilir.

Tarımsal üretimde polen transferi, ürünlerin olgunlaşmasını desteklemesi ve bir enerji kaynağı olarak olumlu katkıları olan rüzgarın bitkiye ve ürüne zarar verecek derecede yüksek hızda esmesi, erozyon, buharlaşmayı hızlandırması ve bitkilere ve ürünlere zararlı tozlar taşınması gibi olumsuz etkileri vardır. Bu olumsuzluklar bitkisel üretimde ürün kalitesi düşebilir bu da ürün fiyatları artabilir.

Tarımsal üretimde iklimin etkili olduğu önemli bileşenlerden biri olan ışık bitkinin topraktan aldığı tuz ve çözölmüş maddeleri bitkinin gelişimini sağlayan besinlere dönüştüren fotosentez üzerinde etkilidir. Bitkisel üretimde üretimi yapılan bitkilerin vejetatif gelişimi için ihtiyaç duyulan ışıktanma sürelerine göre kısa gün çeşidi veya uzun gün çeşidi ya da hiç etkilenmeyen nötr çeşitler olarak tanımlanırlar. Tarımsal üretimde havadaki nem miktarı buna bağlı olarak buharlaşma düzeyi sulama imkanı olan bölgelerde bitki sulama ihtiyacını etkilerken sulama imkanı olmayan bölgelerde bitkinin ihtiyacı olan suyun bitkiye sağlanmasını sağlayabilir. Tüm bu iklim bileşenleri tarımsal üretimde bitki gelişimi, ürün verimi ve üretim maliyetlerini etkilemektedir.

3.2. Tarımda Bitki Deseni

Tarımsal üretimde kullanılan bitki deseni iklim özelliklerine bağlı olarak belirli bir bölgede baskın olarak yetiştirilen, üreticilerin zamanla yetiştiriciliğinde uzmanlık kazandığı ve ekonomik olarak yeterli kazanç sağladığı tarımsal üretimde kullanılan bitki tür ve çeşitliliğidir. Belirli bir coğrafi bölgedeki ekim deseni ve ürün çeşitliliği, tarımsal, ekonomik ve politik olmak üzere farklı faktör kategorilerine bağlıdır. Tüm bu faktörlerin, farklı koşullar ve zamanlarda ürünler üzerindeki etkisi farklılık gösterir.

Tarımsal üretimde gelineen noktada iklim değışiklinin neden olduğu sorunlar su kıtlığı, toprak besin değerlerinin düşmesi, üretim maliyetlerinin artması, biyolojik çeşitliliğin azalması, yeni tür zararlı ve hastalıkların ortaya çıkması, tarım arazilerinin parçalanması ve değışen tüketim modeli, birlikte belirli bir bölgede tarımsal üretimde kullanılan bitki deseninde değışikliklere neden olmuş/olmaktadır: Bu değışiklikler ekim yoğunluğu, ticari olarak yeterli gelir sağlamayan ürünlerin öneminin azalması ekim alanlarını gıda dışı ürünlere kaydırmaya, bahçe bitkilerinin yetiştiriciliğinde artış, teknolojiadaki gelişmeler nedeniyle su ihtiyacı fazla olan farklı tür bitkilerin yetiştiriciliğini karlı kılmasıdır. İklim değışikliğini en yoğun hissedileceğı ve dolayısıyla iklim değışikliğinin olumsuz etkilerinden en fazla etkileneceğı öngörülen Akdeniz bölgesinde (Aksu, 2022) tarımsal üretimde kullanılan bitki desenindeki değışimler yukarıda sayılan nedenlere tipik bir örnek oluşturmaktadır. Akdeniz Bölgesi'nde iklim değışikliği sonucu tarımsal üretimde kullanılan bitki desenine önceden bölgede üretimi yapılmayan muz, avakado, mango ve ejder meyvesi gibi tropikal ürünler yoğun olarak üretilmeye başlanmıştır.

4. İKLİM DEĞİŞİKLİĞİNİN AKDENİZ BÖLGESİ BİTKİ DESENİNE ETKİSİ

Akdeniz Bölgesi Türkiye'nin güneyinde yer alan Akdeniz kıyısına paralel tipik Akdeniz ikliminin, yazları sıcak ve kurak kışları ılık ve yağışlı, maki bitki örtüsü hakim, özelliklerinin görüldüğü bölgedir. İklim değışikliğinin Akdeniz Bölgesi'ndeki tarımsal üretimde kullanılan bitki desenine etkisi bölgede yer alan Çukurova Bölgesi'nde tüm yönleri ile gözlemlenebilir. Akdeniz Bölgesi'nde farklı iklim koşulları nedeniyle çay ve fındık hariç neredeyse tüm ürünler üretilebilir. Narenciye, zeytin, pamuk, mısır, ayçiçeğı, buğday, patates, kavun-karpuz, sebzeler belirgin bir şekilde tarımı yapılan bitki desenini oluşturmaktaydı (Yurdakul ve Emeksiz, 1993). İklim değışikliği ile birlikte tarımsal üretimi yapılan bitki desenine muz, avokado, mango, ejder meyvesi (pitaya) ve pasiflora gibi tropikal bitki türleri eklenmiştir.

4.1. Çukurova’da İklim Değişikliği Öncesi Tarımsal Üretim Kullanılan Bitki Deseni Etkisi

Çukurova Bölgesi’nde üretimi yapılan bitki deseni iklim değişikliğinin olumsuz etkilerinin yoğun olarak hissedildiği son 20-30 yıl içinde değişim göstermeye başlamıştır (Demircan, 2022). Ceyhan ve Seyhan ırmaklarının beslediği Çukurova’da tarımsal üretimde sulama önceden sorun olarak görülmezken ve kışlık sebzelerin patates, marul, lahana soğan ve sarımsak gibi çok su tüketen bitkilerin üretimi bu günkü şartlarda su yetersizliği nedeniyle sınırlı olmaktadır (Ortaş, 2024).

İklim değişikliğinin olumsuz etkilerinde su kıtlığı Çukurova’da tarımsal üretimde susuzluğa dayanıklı ayçiçeği gibi türlerin yetiştiriciliğini teşvik etmektedir. Ayçiçeği yetiştiriciliği için 2002 yılında Çukurova’da kullanılan alan 98,640 dekar (Hürriyet Gazetesi, 2007) 2023 yılında 740,000 dekar alana ulaşmıştır (Analiz Gazetesi, 2023). Çukurova adı ile özdeşleşmiş tarımsal üretimde kullanılan bitki deseninin en önemli bitkisi pamuk yetiştiriciliğinde de aynı durum söz konusudur (Tablo 1.).

Tablo 1. Çukurova bölgesinde yetiştirilen bazı bitkilere ait verim değerleri

Yıllar	Buğday	Kütlü/Lifli Pamuk	Mısır	Ayçiçeği
2015	1.475.814	486.177	1.766.289	153.711
2016	1.279.103	551.441	1.892.565	186.471
2017	1.345.817	620.025	1.717.239	222.654
2018	1.311.123	694.652	1.436.112	201.295
2019	1.095.525	622.690	1.188.163	295.963
2020	1.261.030	436.716	1.377.403	217.636
2021	1.368.026	462.945	1.425.073	242.946
2022	1.062.154	553.324	1.565.655	258.477
2023	861.373	296.327	1.720.517	275.655

Her ne kadar pamuk üretimindeki azalmalar yetersiz gelir ile açıklansa da iklim değişikliği, pamuğun üretim sürecinde pamuk bitkisinin ihtiyaç duyduğu sıcaklık değerlerinde değişim ve dengesizlikler ve su kıtlığına neden olması yoluyla doğrudan pamuk yetiştiriciliğinin azalmasında önemli bir faktördür (Baydar ve Kanber, 2012). Sıcaklık değişimleri ve su kaynaklarının azalması, pamuk üretiminin geleceği için ciddi tehditler oluşturmaktadır (Baydar ve Kanber, 20).

Çukurova’da iklim değişikliğinin tarımsal üretimde neden olduğu olumsuzluklar buğday üretimini de yıldan yıla giderek azaltmıştır (Tablo 1). İklim değişikliğinin buğday yetiştiriciliği araştıran bir çalışmada iklim değişikliği nedeniyle sıcaklıkta meydana gelen 1°C’lik artışın buğday veriminde %6’lık azalışa neden olacağı rapor edilmiştir (Çığ ve Toprak, 2023). Çukurova’da iklim değişikliğinden kaynaklanan artan sıcaklık (Buğday çimlenme döneminde 5-10 °C sıcaklık isteği vardır,) artan kuraklık (%60 nispi neme ihtiyaç duyar, iklim değişikliği ile söz konusu değerlerde ani değişimler buğday üretimine zarar verir.) düzensiz ve ani yağışlar buğday yetiştiriciliğinde yeterli su alımını etkiler ve ayrıca sulama yapılması ise üretim maliyetlerini arttırmaktadır (Çığ ve Toprak, 2023). Bu da üreticilerin buğday üretiminde vazgeçerek daha karlı ve risk düşük bitki türlerine yönelmelerine neden olmaktadır.

4.2. Çukurova’da İklim Değişikliği Sonrası Tarımsal Üretim Kullanılan Bitki Deseni

Akdeniz Bölgesi ve dolayısıyla Çukurova Bölgesi’nde iklim değişikliğine bağlı olarak tarımsal üretimde kullanılan bitki deseni değişmektedir (İklim Haber, 2021). Çukurova bitki deseni içinde yer alan pamuk üretimi azalırken, tropikal meyve bitkilerinin yetiştiriciliğinde artış olduğu görülmektedir. Çukurova’da tarımsal üretimde kullanılan bitki desenine muz, avokado, mango, ejder meyvesi (pitaya) ve pasiflora gibi tropikal bitki türler eklendi (İlkh Haber, 2022).

Çukurova’da tropikal bitki yetiştiriciliği muz ile başlamıştır. Çukurova bölgesinde iklim değişikliğinin etkisi ile muz bitkisinin yetiştiriciliğine uygun iklim koşullarının oluşmasıyla 2018 yılında 330 dekar alanla başlayan muz yetiştiriciliği (AA. 2020) son sekiz yılda yüz kat artarak 7,500 dekar alana ulaşmıştır (DHA. 2025). Bu üretim verilere göre Mersin ve Antalya’dan sonra en fazla muz yetiştiriciliği yapılan il Adana’dır. (DHA. 2025).

Çukurova bölgesinde Adana Tarım ve Orman Müdürlüğü verilerine göre iklim değişikliği nedeniyle geleneksel olarak üretimi yapılan bitki desenindeki bitkilerin yetiştiriciliğinde artan üretim maliyetleri üreticileri daha fazla gelir elde edebilecekleri alternatif yeni bitki türü arayışlarına yöneltti. Uygun yetiştirme ortamının oluşmasını fırsat bilen üreticiler birim satış fiyatı açısından yüksek gelir elde etme potansiyeline sahip olan avokado yetiştiriciliğine

yöneldi ve Adana’da ilk kez 2017 yılında Kozan İlçesi’nde 11 dekar, Yüreğir İlçesi’nde ise 56 dekar alanda avokado yetiştiriciliğine başlandı. Avokado ekim alanlarının 2020 yılında 528 dekar, 2021 yılında ise 1000 dekar olması tahmin edilmektedir (AA, 2021). Ancak bu hedef aşılıarak 2022 yılı itibarıyla Yumurtalık İlçesi’nde 3,500 dekar alana ulaşmıştır. İlk mango yetiştiriciliği 2020 yılında 59 dekar alanla başlamış 2022 yılı itibarıyla 200 dekar alana çıkmıştır. İlk ejder meyvesi (pitaya) yetiştiriciliği 2017 yılında 5 dekar alandan 2021 yılında 50 dekar alana ve ilk kivi üretimi 2020 yılında 60 dekar alandan 2021 yılında 100 dekar alana ulaşmıştır (AA, 2021).

6. SONUÇ

İklim değişikliğinin olumsuz etkilerinden en fazla zarar görecektir bölge Akdeniz Bölgesi olacağı yapılan iklim değişikliği projeksiyonlarında görülmektedir. Akdeniz Bölgesini bu anlamda temsil edebilecek iklim özelliklerine sahip olan ve Akdeniz Bölgesinde yer alan Çukurova Bölgesi’nde uzun yıllar hakim olan Akdeniz iklim özellikleri iklim değişikliğinin etkisi ile dönüşmeye ve değişmeye başlamıştır. Çukurova’da hakim olan yazları kurak ve sıcak kışları ılık ve yağışlı Akdeniz iklimi son 20 yılda yazları çok yüksek sıcaklıklar ve şiddetli kuraklıklar ile kışları ise daha sıcak ve daha az, düzensiz yağış özellikleri olan bir iklime dönüşmüştür. Bu olumsuz iklim koşulları bölgede geleneksel olarak yetiştiriciliği yapılan bitki deseninin değişmesine neden olmuştur. Bölgede yoğun bir şekilde tarımı yapılan pamuk, buğday gibi bitkilerin yetiştiriciliği giderek azalırken ayçiçeği gibi su ihtiyacı az olan ekonomik açıdan üretim maliyetleri düşük olan türlerin yetiştiricilik alanları artmaktadır. Diğer yandan daha küçük alanlarda daha fazla ekonomik kazanç elde etmeyi isteyen üreticiler muz, avokado, mango, ejder meyvesi (pitaya) ve pasiflora gibi tropikal bitki türlerinin yetiştiriciliğini yaparak Çukurova’da yetiştiriciliği yapılan bitki desenine bu yeni türler eklenmişlerdir. Bu yeni tür bitkilerin bölgede yetiştiriciliğini yapılmasına neden olan iklim değişikliğinin kuraklık, yüksek sıcaklık, ekim/hasat zamanlarının belirsizliği, yağışların az ve düzensiz olması, ani hava değişimleri gibi olumsuz sonuçlarıdır. Bu olumsuz sonuçlar üretim maliyetlerini arttırmasına, yüksek verim kayıplarına ve düşük ekonomik gelir elde edilmesine neden olmuştur. İklim değişikliğinin olumsuz etkilerinde kurtulmak ve iyi bir ekonomik gelir elde etmek amacıyla alternatif çözüm arayan üreticiler tropikal bitki türlerinin yetiştiriciliğine yönelmişlerdir.

Sonuç olarak iklim değişikliği Akdeniz Bölgesi'nde üretimi yapılan bitki deseni üzerinde etkili olmuş ve olacaktır.

KAYNAKLAR

- AA. (2021). Çukurova çiftçisinin tropikal meyve üretimine ilgisi artıyor. Anadolu Ajansı (AA), by Bekir Ömer Fansa'nın haberi. <https://www.aa.com.tr/tr/ekonomi/cukurova-ciftcisinin-tropikal-meyve-uretimine-ilgisi-artiyor/2161504> E. T. 01.12.2025
- AA. 2020. Çukurova'da muz üretim alanları genişliyor. Anadolu Ajansı (AA), Muzaffer Çağlıyaner Haberi. <https://www.aa.com.tr/tr/ekonomi/cukurovada-muz-uretim-alanlari-genisliyor/1883795> E. T. 01.12.2025
- Aksu, İ. F. 2022. Sunuş. Ed. Bektaş, A., Küresel İklim Değişikliği ve Sosyo-Ekonomik Etkileri, https://www.tasav.org/media/k2/attachments/Kitap_K%C3%BCresel_%C4%B0klim_De%C4%9Fi%C5%9Fikli%C4%9Fi.pdf E. T. 01.12.2025
- Analiz Gazetesi, 2023. Çukurova'da Ayçiçeği Başladı. <https://analizgazetesi.com.tr/haber/cukurovada-aycicegi-basladi-3532/> E. T. 01.12.2025
- Başaran, F., Aytas Akçin, Z. T. (2022). Sıcaklık Faktörünün Bitkiler Üzerindeki Etkileri ve Yüksek Sıcaklık Stresi. Bahçe, 51(2), 139-147. <https://doi.org/10.53471/bahce.1124625>
- Baydar, A., & Kanber, R. (2012). Effects of Climatic Changes on Cotton Production. Toprak Su Dergisi, 1(1), 47-54. <https://dergipark.org.tr/tr/pub/topraksu/issue/21412/229510> E. T. 01.12.2025
- Britannica, 2022. Growing season agriculture. <https://www.britannica.com/topic/growing-season> E. T. 01.12.2025
- Carbodeck, 2025. Karbon (CO2) emisyonu nedir? <https://semtrio.com/blog/karbon-co2-emisyonu-nedir> E. T. 01.12.2025
- Çığ, F., Toprak, Ç. C. 2023. Küresel İklim Değişikliğinin Buğday Ekim Alanlarına Etkisi. 6. International Cukurova Agriculture and Veterinary Congress, December 22-24, 2023, Adana, Türkiye
- Demircan, M. 2022. İklim, İklim Değişikliği ve Su İlişkisi. Ed. Bektaş, A., Küresel İklim Değişikliği ve Sosyo-Ekonomik Etkileri, https://www.tasav.org/media/k2/attachments/Kitap_K%C3%BCresel_

- %C4%B0klim_De%C4%9Fi%C5%9Fikli%C4%9Fi.pdf E. T. 01.12.2025
- DHA. 2025. Adana'da muz üretimi, devlet teşvikleriyle 7 bin 500 dekara çıktı. Doğan Haber Ajansı (DHA), Yusuf Yıldız ve Eser Pazarbaşı'nın haberi. <https://www.dha.com.tr/foto-galeri/adanada-muz-uretimi-devlet-tesvikleriyle-7-bin-500-dekara-cikti-2766657/1> E. T. 01.12.2025
- EPA. 2025. Climate Change Impacts on Agriculture and Food Supply. <https://www.epa.gov/climateimpacts/climate-change-impacts-agriculture-and-food-supply> E. T. 01.12.2025
- Evans, H. 2024. Human Impacts on the Environment: A Focus on Climate Change. Population Connection. <https://populationconnection.org/resources/human-activities-and-climate-change/> E. T. 01.12.2025
- Filonchyk, M., Michael P. Peterson, M. P., Zhang, L., Hurynovich V., He, Y. 2024. Greenhouse gases emissions and global climate change: Examining the influence of CO₂, CH₄, and N₂O. Science of The Total Environment, 935, 173359. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.173359>
- Güllü, G. 2025. İklim Değişikliği ve Hava Kirliliği Sunumu. International Workshop on “World Water Day” Combating Climate Change: Mitigation and Adaptation 21-22 March 2025, Muğla, Türkiye https://iklim.mugla.bel.tr/docs/iklim_calistayi_2025/6.2.G%C3%BClen%20G%C3%BCII%C3%BC_22_3_2025.pdf E. T. 01.12.2025
- Hegerl, G. C., Brönnimann, S., Cowan, T., Friedman, A. R., Hawkins, E., Iles, C., Müller, M., Schurer A., Undorf, S. 2019. Causes of climate change over the historical record. IOP Science: Environ. Res. Lett. 14 123006. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab4557>
- Hürriyet Gazetesi, 2007. Çukurova'da 'Ayçiçeği alanları kuruyor <https://www.hurriyet.com.tr/gundem/cukurovada-aycicegi-alanlari-kuruyor-6807826> E. T. 01.12.2025
- İklim Haber, 2021. Çukurova'da Verim ve Kalite Kaybı Endişesi. TRT Haber Fatma Er'in haberi. <https://www.iklimhaber.org/cukurovada-verim-ve-kalite-kaybi-endisesi/> E. T. 01.12.2025
- İlkhaber, 2022. Yumurtalık İlçesi Tropikal ürün cenneti oldu. İlkhaber Gazetesi, Bayram Bulut'un haberi. <https://www.ilkhaber->

- gazetesi.com/gundem/yumurtalik-ilcesi-tropikal-urun-cenneti-oldu-70852 E. T. 01.12.2025
- Kapur, B., Koç, M., Özekici, B. 2012. Artan CO₂ ve Küresel İklim Değişikliğinin Çukurova Bölgesinde Buğday Verimliliği Üzerine Etkileri. Ç.Ü Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi, 28(4), 152-162. <https://fbe.cu.edu.tr/storage/fbeyedek/makaleler/cild28sayi4-152-162.pdf> E. T. 01.12.2025
- Kindness, D. Rosenston, M. Fernando, J. 2025. 4 Factors of Production Explained With Examples. Investopedia. <https://www.investopedia.com/terms/f/factors-production.asp> E. T. 01.12.2025
- Külcü, R. 2016. Sanayi Devriminden 1700 Yıl Önce Yapılmış Erken Bir Keşif: Heron'un Buhar Türbini (Aerolipie). Akademia Sosyal Bilimler Dergisi(2), 32-39. <https://dergipark.org.tr/tr/pub/asj/issue/40220/478952> E. T. 01.12.2025
- Lewandowski, I., Lippe, M., Montoya, J. C., Uta Dickhofer, U., Langenberger, G., Pucher, j. Schließmann, U., Derwenskus, U., Schmid-Staiger, U., Lippert, C. 2018. Chapter 6. Primary Production. In Bioeconomy, Ed. Lewandowski, I., Shaping the Transition to a Sustainable, Biobased Economy, 97-126. https://doi.org/10.1007/978-3-319-68152-8_6
- Ortaş, İ. 2024. İklim Değişikliğine Dayalı Su Kıtlığı Çukurova'da İlan Edildi: Ürün Deseni ve Su Yönetimi Planlanması Kaçınılmaz!. Su ve Çevre Teknolojileri e-Dergi. https://www.suvecevre.com/yayin/327/iklim-degisikligine-dayali-su-kitligi-cukurova-da-ilan-edildi-urun-deseni-ve-su-yonetimi-planlanmasi-kacinilmaz-_34686.html E. T. 01.12.2025
- Saleem, A., Anwar, S., Nawaz, T. Fahad, S., Saud, S., Ur Rahman, T., Khan, M. N. R., Nawaz, T. 2025. Securing a sustainable future: the climate change threat to agriculture, food security, and sustainable development goals. J.Umm Al-Qura Univ. Appl. Sci. 11, 595-611. <https://doi.org/10.1007/s43994-024-00177-3>
- Saygı, H., Saygı, A., Gokce, M. A., 2018. Importance of sustainable agricultural management. International Journal of Agriculture, Environment and Bioresearch 3(04), 233-241. https://ijaeb.org/uploads2018/AEB_03_211.pdf E. T. 01.12.2025

- Walsh, M. K., P. Backlund, L. Buja, A. DeGaetano, R. Melnick, L. Prokopy, E. Takle, D. Todey, L. Ziska. 2020. Climate Indicators for Agriculture. USDA Technical Bulletin 1953. Washington, DC. 1-70. <https://doi.org/10.25675/10217/210930>.
- WHO, 2025. Biodiversity. World Health Organization (WHO). <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/biodiversity> E. T. 01.12.2025
- Yalçın, G., Demircan, M., Ulupınar, Y., Bulut, E. 2005. Klimatoloji – I. Çevre Ve Orman Bakanlığı Devlet Meteoroloji İşleri Yayınları, 1-236, Ankara. <https://www.mgm.gov.tr/files/genel/kitaplar/klimatoloji1.pdf> E. T. 01.12.2025
- Yurdakul, O., & Emeksiz, F. (1993). Çukurova’da Tarımsal Üretim Yapısındaki Gelişmeler ve GAP Alanı İçin Öngörüler. Tarım Ekonomisi Dergisi, 02(1 ve 2), 32-45. <https://dergipark.org.tr/tr/pub/tarekoder/issue/25827/272326> E. T. 01.12.2025

BÖLÜM 8

ARTAN SICAKLIKLARIN *Chrysoperla Carnea*'nın YAŞAM DÖNGÜSÜ VE BİYOLOJİK MÜCADELE POTANSİYELİ ÜZERİNE ETKİLERİ

Doktora Öğrencisi Mehmet AKYOL¹

DOI: <https://www.doi.org/10.5281/zenodo.17966572>

¹Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Bitki Koruma Bölümü, Van, Türkiye,
mehmet.aky47@gmail.com, ORCID: 0000-0002-7496-6292

Giriş

İklim değışikliği, günümüzde tarımsal üretim ve biyolojik çeşitlilik üzerinde önemli tehditler oluşturan başlıca çevresel sorunlardan biridir. Bu değışim, böceklerin fizyolojisi, fenolojisi, dağılımı, popölasyon dinamikleri ve davranışları üzerinde kayda değerk etkiler meydana getirmektedir (Küçük ve Tunca, 2024). Söz konusu etkiler, konukçu bitkiler, zararlı böcekler ve doğal düşmanlar arasındaki tri-trofik ilişkinin bozulmasına yol açarak biyolojik mücadele etkinliğini olumsuz yönde etkileyebilmektedir (Thomson ve ark., 2010; Küçük ve Tunca, 2024). İklim değışikliğinin günümüzde en temel problemlerin başında yer alan sıcaklık, böceklerin gelişim hızı, hayatta kalma oranı, üreme kapasitesi ve popölasyon büyümesi üzerinde doğrudan etkili olan en kritik abiyotik faktördür (Pathan ve ark., 2016).

Hükümetlerarası İklim Değışikliği Paneli (IPCC)'nin üçüncü değerkendirme raporuna göre, 2100 yılına kadar küresel yüzey sıcaklığı ortalamasının 1.4 ila 5.8 °C arasında artması ve atmosferdeki karbondioksit (CO₂) konsantrasyonunun 540 ila 970 ppm seviyelerine ulaşması öngörülmektedir (Yasar ve ark., 2021; Küçük ve Tunca, 2024). Bu projeksiyonlar, iklim değışikliğinin *Chrysoperla carnea* gibi biyolojik mücadele etmenlerinin yaşam döngüsü, popölasyon dinamikleri ve etkinlik düzeyi üzerindeki potansiyel etkilerini değerkendirmek açısından büyük önem taşımaktadır.

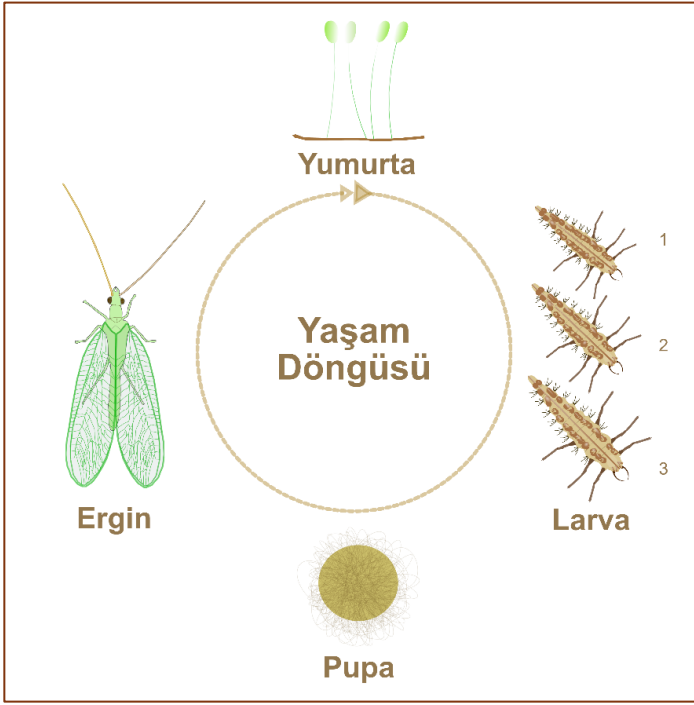
Bu bağlamda, *Chrysoperla carnea* (Stephens) (Neuroptera: Chrysopidae), tarımsal ekosistemlerde yaygın olarak bulunan ve birçok zararlı türün kontrolünde etkili olan önemli bir predatör böcek türü olarak öne çıkmaktadır. Yeşil Dantel Kanatlılar olarak da bilinen bu türün larvaları; yaprak bitleri, kabuklu bitler, yaprak pireleri, beyaz sinekler, unlu bitler, akarlar, thripsler ve lepidoptera takımına ait böceklerin yumurtaları ve erken dönem larvaları gibi ekonomik zarara neden olan çeşitli zararlılarla beslenerek, tarımsal ürünlerin korunmasında etkili bir çözüm sunmaktadır (Chen ve ark., 2006; Pappas ve ark., 2011; Mirmoayedı ve ark., 2014; Pathan ve ark., 2016; Martins ve ark., 2019; Lai ve Liu, 2020; Tian ve ark., 2023). *Chrysoperla carnea*, geniş bir tarımsal habitat çeşitliliğinde yayılış gösteren, kozmopolit dağılıma sahip ve polifag beslenme davranışı sergileyen etkili bir biyolojik mücadele ajanıdır (Canard ve Duelli, 1984; Lai ve Liu, 2020).

Chrysoperla carnea'nın biyolojik mücadele etmeni olarak değerini artıran özellikler arasında laboratuvar koşullarında kitle üretiminin nispeten kolay olması, yumurtalarının kısa süreli, ergin bireylerinin ise uzun süreli depolanabilmesi ve özellikle larval evrede sergilediği yüksek iştah ile etkin av arama davranışı bulunmaktadır. Bu özellikler, türün yaprak bitleri, akarlar ve çeşitli zararlı larvalara karşı biyolojik mücadelede yaygın kullanımını mümkün kılmaktadır.

Sürdürülebilir Tarımda Biyolojik Mücadele

Tarımsal ekosistemlerde, zararlı böceklerin kontrolünde kimyasal mücadele yöntemlerinin yoğun kullanımı, çevre kirliliği, hedef dışı organizmalara zarar verme ve zararlılarda direnç gelişimi gibi çok yönlü sorunları beraberinde getirmektedir. Bu sorunlar, sürdürülebilir tarım uygulamalarının önemini artırmış ve biyolojik mücadele yöntemlerinin geliştirilmesine olan ilgiyi yoğunlaştırmıştır. Biyolojik mücadele, zararlı popülasyonlarını ekonomik zarar eşiğinin altında tutmak için doğal düşmanların kullanılmasını içeren ekolojik bir yaklaşımdır (Mahzoum ve ark., 2020).

Chrysoperla carnea türü, tam başkalaşım (holometabol) geçiren böceklerde olduğu gibi yumurta, larva, pupa ve ergin olmak üzere dört temel evreden oluşan bir yaşam döngüsüne sahiptir (Şekil 1). Yaşam döngüsünün her bir evresi, çevresel koşullara bağlı olarak farklı fizyolojik ve davranışsal özellikler sergilemektedir. Özellikle üç gelişim döneminden (instar) oluşan larva evresi, türün beslenme aktivitesinin en yoğun olduğu ve biyolojik mücadelede en etkili rolü üstlendiği dönem olarak dikkat çekmektedir.



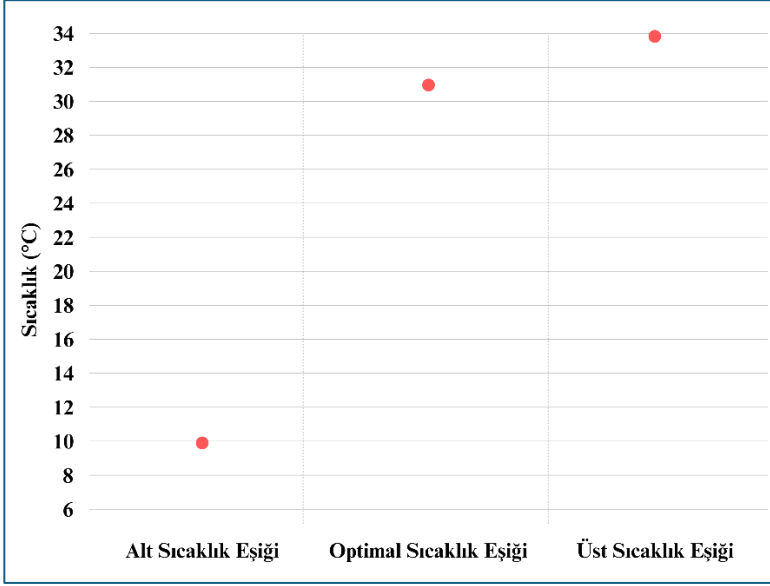
Şekil 1. *Chrysoperla carnea*'nin yaşam döngüsü

***Chrysoperla carnea*'nin Yumurta Evresi**

Chrysoperla carnea 'nın yumurtaları oval formda olup beyaz, sarı ya da yeşil tonlarında gözlemlenen ve boyutları yaklaşık 0.7 ila 2.3 mm arasında değişmektedir. Dişi bireyler yumurtalarını genellikle yaprakların alt veya üst yüzeylerine, genç larvaların besin kaynaklarına kolay erişimini sağlayacak şekilde, avın bol bulunduğu bölgelere bırakmaktadır. Yumurtalar ipeksi yapıdaki ince bir sap (stilus) ucuna tek tek bırakılır ki bu adaptasyon, yumurtaların predasyon ve kanibalizm riskine karşı korunmasına katkı sağlar (Pappas ve ark., 2011).

Sıcaklık, böceklerin gelişim hızını etkileyen en önemli abiyotik faktörlerden biridir ve *Chrysoperla carnea*'nin yumurta gelişimi üzerinde belirleyici rol oynamaktadır (Pathan ve ark., 2016; Pappas ve ark., 2011). Farklı çalışmalar, sıcaklığın yumurta gelişim süresi üzerindeki etkisini tutarlı bir şekilde ortaya koymaktadır. Düşük sıcaklıklarda gelişim süresi uzarken, optimal sıcaklık aralığına yaklaştıkça bu süre kademeli olarak kısalmaktadır. Ranjbar Aghdam ve Nemati (2020) tarafından yapılan çalışmada, 15°C'de

yumurta gelişim süresi 12.49 gün olarak belirlenirken, 20°C'de bu süre yaklaşık yarı yarıya azalarak 6.21 güne düşmüştür. Sıcaklık artışı ile gelişim süresi 25°C'de 4.05 güne, 27°C'de 3.45 güne ve 30°C'de minimum değer olan 3.00 güne kadar azalmıştır. Benzer şekilde, Pappas ve ark. (2011) *Chrysoperla carnea* embriyolarının 15°C'de yaklaşık 13 günde, 35°C'de ise sadece 2.5 günde geliştiğini bildirmiştir.



Şekil 2. Lactin-2 modeline göre *Chrysoperla carnea*'nın yumurta evresine ait termal gelişim eşikleri.

Ranjbar Aghdam ve Nemati (2020) çalışmasında 32°C'de gelişim süresinde hafif bir artış gözlenmiş ve süre 3.22 güne yükselmiştir. Bu durum, yüksek sıcaklıkların yumurta gelişimi üzerinde olumsuz etkiler göstermeye başladığını işaret etmektedir. Pathan ve ark. (2016) çalışması da bu bulguyu destekler niteliktedir. Araştırmacılar, *Chrysoperla carnea*'nın yumurta inkübasyon süresinin 22°C'de ortalama 4.8 gün, 25°C'de 3.7 gün, 28°C'de 3.0 gün ve 31°C'de yaklaşık 2.8 gün olduğunu, ancak 34°C ve 37°C'de yumurtaların büyük çoğunluğunun açılmadığını ve dolayısıyla inkübasyon süresinin tamamlanamadığını bildirmişlerdir.

***Chrysoperla carnea* 'nın Larva Evresi**

Chrysoperla carnea 'nın yaşam döngüsünde larva evresi, biyolojik mücadele açısından kritik öneme sahiptir. Bu evrede *Chrysoperla carnea* larvaları, çatal veya orak biçiminde özelleşmiş mandibulleri ve toksik bileşenler içeren tükürük bezleri sayesinde etkili predatörler olarak işlev görürler. Larvaların beslenme davranışı oldukça karakteristiktir. Avına yaklaşırken anten ve palplarıyla fiziksel temas kurar, mandibullerini genellikle avın toraks bölgesine batırarak onu felç eder ve vücut sıvılarını emerek beslenmesini tamamlar (Bozdoğan ve ark., 2021).

Chrysoperla carnea larvaları; yaprak bitleri, kabuklu bitler, yaprak pireleri, beyaz sinekler, unlu bitler, akarlar, thripsler ve Lepidoptera takımına ait böceklerin yumurtaları ile erken dönem larvaları gibi ekonomik öneme sahip çok sayıda zararlı türle beslenerek geniş bir av spektrumu sergiler (Chen ve ark., 2006; Pappas ve ark., 2011; Mirmoayed ve ark., 2014; Pathan ve ark., 2016; Martins ve ark., 2019; Lai ve Liu, 2020; Ranjbar Aghdam ve Nemati, 2020; Tian ve ark., 2023). Üç larval dönem geçiren *Chrysoperla carnea*'nın beslenme davranışları ve av tercihleri her dönemde değişiklik gösterir. Birinci dönem larvalar genellikle daha küçük avları tercih ederken, ikinci ve üçüncü dönem larvalar daha büyük avları da yakalayabilir. Özellikle üçüncü dönem larvalar, en yoğun beslenme davranışını sergiledikleri için biyolojik mücadelede en etkili oldukları aşamayı temsil eder (Pappas ve ark., 2011; Mahzoum ve ark., 2020).

Sıcaklık, *Chrysoperla carnea* larvalarının gelişim süresini ve predasyon etkinliğini belirleyen temel faktörlerden biridir. Ranjbar Aghdam ve Nemati (2020) tarafından yapılan çalışmada, 15°C'de toplam larval gelişim süresi 31.13 gün olarak tespit edilirken, bu süre 30°C'de 6.30 güne kadar düşmüştür. Ancak sıcaklık 32°C'ye yükseldiğinde gelişim süresi hafifçe artarak 6.84 güne çıkmıştır. Benzer şekilde, Pathan ve ark. (2016) tarafından yürütülen araştırmada, toplam larval gelişim süresi 22°C'de 11.9 gün iken, 31°C'de 8.4 güne ve 34°C'de 7.6 güne düşmüştür.

Larval dönemlerin ayrı ayrı incelenmesi de sıcaklığın etkisini net biçimde ortaya koymaktadır. Ranjbar Aghdam ve Nemati (2020) çalışmasında, 15°C'de birinci larva dönemi ortalama 10.94 gün, ikinci dönem 9.80 gün ve üçüncü dönem 10.41 gün sürerken, 30°C'de bu süreler sırasıyla 2.79, 1.60 ve 1.96 güne düşmüştür. Pathan ve ark. (2016) bulgularına göre ise birinci larva

evresi 22°C'de ortalama 3.6 gün iken, 31°C'de yaklaşık 2.9 güne ve 34°C'de sınırlı sayıda bireyde yaklaşık 2.1 güne kadar kısalmıştır. İkinci larva evresi 22°C'de 3.4 gün, 31°C'de yaklaşık 2.4 gün, 34°C'de ise yaklaşık 2.3 gün olarak ölçülmüştür. Üçüncü larva evresi süresi ise 22°C'de 4.9 gün, 31°C'de 3.1 gün ve 34°C'de yaklaşık 3.2 gün olarak kaydedilmiştir. Bu veriler incelendiğinde, sıcaklık artışının her larval dönem üzerinde benzer etkiler gösterdiği, ancak ikinci larval dönemin sıcaklık değişimlerine daha duyarlı olduğu görülmektedir. Bu durum, ikinci larval dönemin metabolik aktivitesinin ve fizyolojik süreçlerinin sıcaklık değişimlerine karşı daha hassas olabileceğini göstermektedir.

Tablo 1. Farklı çalışmalara ait toplam larval gelişim sürelerinin karşılaştırması (Pathan ve ark., 2016; Ranjbar Aghdam ve Nemati, 2020)

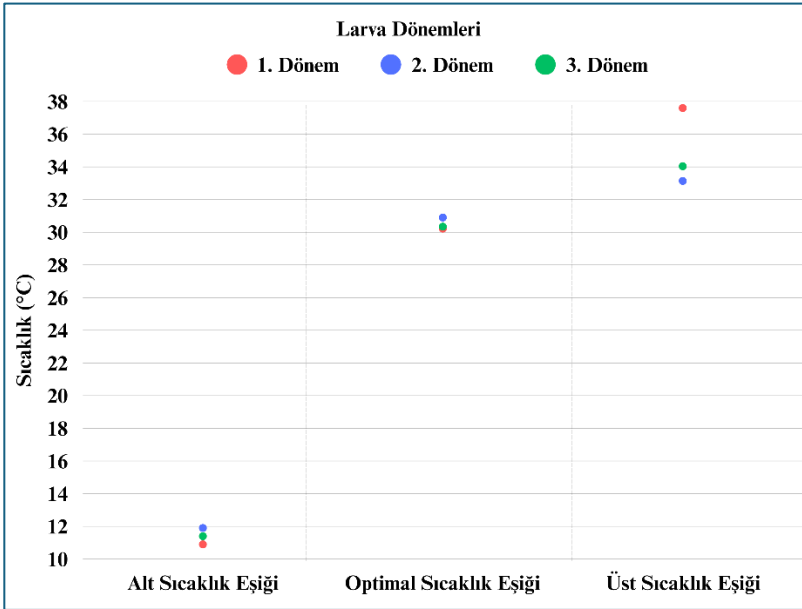
Sıcaklık (°C)	Ranjbar Aghdam & Nemati (2020)	Pathan vd. (2016)
15	31.13	-
22	-	11.9
30	6.30	-
31	-	8.4
32	6.84	-
34	-	7.6

Larva Gelişim Sürecinde *Chrysoperla carnea*'nın Sıcaklık Duyarlılığı

Chrysoperla carnea larvalarının gelişimi için termal tolerans aralığı, Ranjbar Aghdam ve Nemati (2020) tarafından yapılan çalışmada Lactin-2 modeli, istatistiksel ve biyolojik kriterler açısından gelişim oranını en iyi tanımlayan model olarak bulunmuştur. Bu modele göre, birinci, ikinci ve üçüncü dönem larvalar için alt sıcaklık eşikleri sırasıyla 10.90°C, 11.90°C ve 11.40°C; üst sıcaklık eşikleri ise sırasıyla 37.66°C, 33.14°C ve 34.04°C olarak tespit edilmiştir. Optimal sıcaklıklar ise sırasıyla 30.22°C, 30.90°C ve 30.34°C'dir (Şekil 3.). Bu değerler, *Chrysoperla carnea* larvalarının gelişimi ve predasyon etkinliği için termal tolerans aralığını net biçimde ortaya

koymaktadır. Dikkat çekici bir nokta, ikinci ve üçüncü dönem larvaların üst sıcaklık eşiklerinin birinci dönem larvalarına göre daha düşük olmasıdır. Bu durum, larval gelişimin ilerleyen evrelerinde yüksek sıcaklıklara karşı duyarlılığın arttığını göstermektedir. İklim değişikliği senaryolarında sıcaklıkların 33-35°C'yi aştığı durumlarda, özellikle ikinci ve üçüncü dönem larvaların gelişiminin olumsuz etkilenebileceği ve dolayısıyla biyolojik mücadele etkinliğinin azalabileceği öngörülebilir.

İklim değişikliği, *Chrysoperla carnea* larvalarının predasyon etkinliği ve hayatta kalma oranlarını önemli ölçüde etkileme potansiyeline sahiptir. Ortalama sıcaklıkların türün termal optimum aralığına (25–30°C) yaklaşması, larvaların beslenme davranışlarını ve biyolojik mücadele potansiyelini artırabilirken, sıcaklıkların üst eşik değerlere ($\geq 35^\circ\text{C}$) ulaşması bu etkinliği ve hayatta kalma oranlarını belirgin biçimde azaltmaktadır (Ranjbar Aghdam ve Nemati, 2020).



Şekil 3. Lactin-2 Modeline göre *Chrysoperla carnea* 'nın larva dönemlerine göre termal gelişim eşikleri

Sıcaklık ve nem gibi abiyotik faktörlerin larva fizyolojisine olan doğrudan etkilerine ek olarak, iklim değişikliğinin av popülasyonları, doğal

düşmanlar ve habitat yapısında meydana getirdiği değişimler dolaylı yoldan *Chrysoperla carnea* popülasyon dinamiklerini olumsuz etkileyebilir. Mevcut çalışmalardan elde edilen veriler ışığında, iklim değişikliğinin *Chrysoperla carnea* larvalarının gelişim dinamikleri üzerindeki etkilerinin karmaşık ve çok boyutlu olduğu söylenebilir.

***Chrysoperla carnea* 'nın Pupa Evresi**

Chrysoperla carnea 'nın pupa evresi, larva evresinden ergin evresine geçişte kritik bir metamorfoz aşamasıdır. Bu evrede, organizmanın morfolojik ve fizyolojik olarak yeniden yapılandığı kompleks bir süreç gerçekleşir. *Chrysoperla carnea*'nın üçüncü dönem larvası, beslenmeyi durdurduktan sonra kokon örmek için uygun bir yer arar ve ipeksi maddelerden oluşan bir kokon içerisinde pupa evresine girer. Bu evrede böcekler hareketsiz olduklarından, çevresel streslere karşı daha savunmasızdırlar ve iklim değişikliğinin etkileri bu dönemde özellikle belirgindir.

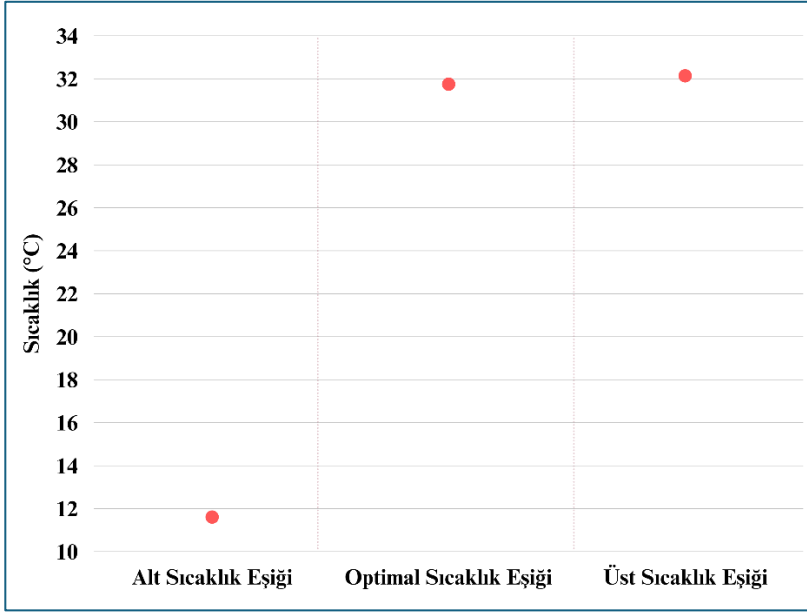
Ranjbar Aghdam ve Nemati (2020) tarafından yürütülen kapsamlı bir çalışmada, *Chrysoperla carnea*'nın pupal gelişim süresi 7 farklı sabit sıcaklıkta (15, 20, 25, 27, 30, 32 ve 35°C) incelenmiştir. Bu çalışmada pupal gelişim süresinin sıcaklık arttıkça belirgin şekilde azaldığı gözlemlenmiştir. Örneğin, 15°C'de ortalama 36.1 gün süren pupal dönem, 30°C'de 6.4 güne kadar düşmektedir. Ancak sıcaklık 35°C'ye ulaştığında gelişim süresi hafifçe artarak 6.8 güne çıkmıştır. Bu durum, yüksek sıcaklıkların pupal gelişim üzerinde olumsuz etkiler göstermeye başladığını ve organizmanın fizyolojik tolerans sınırlarına yaklaşıldığını göstermektedir.

Benzer şekilde, Pathan ve ark. (2016) tarafından yapılan çalışmada, pupal gelişim süresinin sıcaklıkla kısaldığı gözlemlenmiştir: 22°C'de 7.8 gün, 25°C'de 6.5 gün, 28°C'de 5.4 gün, 31°C'de 4.6 gün ve 34°C'de yaklaşık 4.2 gün olarak bulunmuştur. Aynı çalışmada, 37°C'de pupal döneme ulaşan birey gözlenmemiştir, bu da yüksek sıcaklıkların pupal gelişim için kritik bir üst sınır oluşturduğunu göstermektedir.

Tablo 2. *Chrysoperla carnea* pupal gelişim süresi (gün) – farklı çalışmaların karşılaştırması

Sıcaklık (°C)	Ranjbar Aghdam ve Nemati (2020)	Pathan ve ark. (2016)
15	36.13	-
20	14.69	-
22	-	7.8
24	-	-
25	9.80	6.5
27	8.08	-
28	-	5.4
30	6.43	-
31	-	4.6
32	6.82	-
34	-	4.2
35	5.5	-

Ranjbar Aghdam ve Nemati (2020) tarafından yapılan çalışmada, Lactin-2 modeline göre pupa gelişimi için alt sıcaklık eşiği 11,61°C, üst sıcaklık eşiği 32,14°C ve optimal gelişim sıcaklığı 31,75°C olarak hesaplanmıştır. Bu değerler, *Chrysoperla carnea* pupalarının gelişimi için termal tolerans aralığını göstermektedir. Alt sıcaklık eşiğinin altında ve üst sıcaklık eşiğinin üstünde, pupal gelişim durmakta veya ölüm oranları artmaktadır. İklim değişikliği senaryolarında öngörülen sıcaklık artışları, *Chrysoperla carnea* pupalarının gelişim hızını ve hayatta kalma oranlarını önemli ölçüde etkileyebilir. Ortalama sıcaklıkların optimal değere yaklaştığı bölgelerde, pupal gelişim hızı artabilir ve gelişim süresi kısalsabilir. Ancak, sıcaklıkların üst eşik değerine yaklaştığı veya aştığı bölgelerde, pupal ölüm oranları artabilir ve popülasyon dinamikleri olumsuz etkilenebilir.



Şekil 4. Lactin-2 modeline göre *Chrysoperla carnea*'nın pupa evresine ait termal gelişim eşikleri.

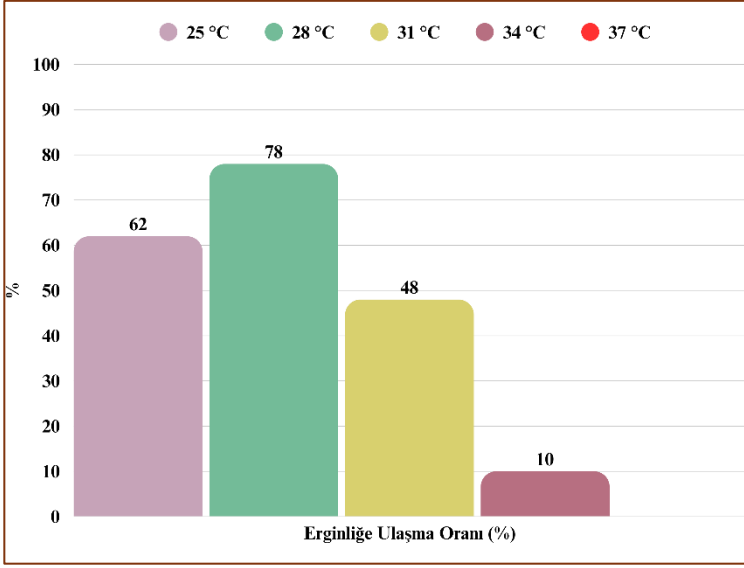
***Chrysoperla carnea* 'nın Ergin Evresi**

Chrysoperla carnea 'nın yaşam döngüsünün son evresi olan ergin evresi, üreme ve yayılma açısından kritik öneme sahiptir. Ergin bireyler, larva evresinden farklı olarak, genellikle predatör değildir ve polen, nektar ve ballı madde gibi besinlerle beslenirler (Pappas ve ark., 2011; Mahzoum ve ark., 2020). Bu beslenme alışkanlığı, erginlerin yaşam süresi ve üreme kapasitesi üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Yüksek kaliteli besin kaynaklarına erişim, erginlerin yaşam süresini uzatabilir ve üreme başarısını artırabilir.

Chrysoperla carnea dişilerinin yumurta bırakma davranışı, sıcaklık, nem, fotoperiyot ve besin kaynaklarının varlığı gibi çevresel faktörlerden önemli ölçüde etkilenmektedir (Pappas ve ark., 2011). Optimal çevresel koşullarda bir dişi yaşamı boyunca 100 ila 1800 arasında yumurta bırakabilmektedir; ancak bu sayı, mevcut besin kaynaklarının kalitesi ve çevresel koşulların elverişliliğine bağlı olarak önemli ölçüde değişiklik gösterebilmektedir (Li ve Romeis, 2009; Diaz ve ark., 2023).

Saljoqi ve ark. (2015), sıcaklığın böcek biyolojisini doğrudan etkileyen yaşamsal bir çevresel faktör olduğunu vurgulamıştır. Sıcaklık, metabolizma

hızını düzenlemenin yanı sıra, gelişim süresini uzatıcı veya kısaltıcı etkiler gösterebilmekte ve bazı durumlarda diyapoz gibi fizyolojik süreçleri tetikleyerek yaşam döngüsünde belirleyici rol oynamaktadır. Bu yönüyle sıcaklık, hem gelişimi doğrudan etkileyen yaşamsal bir unsur, hem de çevresel bir işaret faktörü olarak değerlendirilmektedir.



Şekil 5. *Chrysoperla carnea*'nın yumurtadan erginliğe ulaşma oranının farklı sıcaklıklarda değişimi.

Sharif ve ark. (2023) yaptığı çalışmada, *Chrysoperla carnea* bireylerinin en yüksek yumurta veriminin 27°C'de, en düşük verimin ise 19°C'de gerçekleştiği bildirilmiştir. Aynı çalışmada, ergin çıkış yüzdesinin de sıcaklığa bağlı olarak değiştiği, en düşük çıkış oranının 19°C'de, en yüksek çıkış oranının ise 27°C'de gözlemlendiği belirtilmiştir. Benzer şekilde Saljoqi ve ark. (2015), $28 \pm 1^\circ\text{C}$ 'de yetiştirilen *Chrysoperla carnea* bireylerinde gelişimsel ve üreme özelliklerinin diğer sıcaklık koşullarına kıyasla daha iyi olduğunu, bu sıcaklıkta dişi bireylerin yumurta veriminin en yüksek seviyeye ulaştığını ve yumurtadan ergine kadar olan süreçte hayatta kalma oranının %96 olduğunu rapor etmişlerdir. Bu bulgular, *Chrysoperla carnea*'nın gelişimi ve üreme performansı açısından 27–28°C sıcaklık aralığının optimal olduğunu göstermektedir. Öte yandan, sıcaklığın yanı sıra bağıl nem ve fotoperiyot gibi

çevresel faktörlerin de ergin bireylerin yaşam süresi ve üreme başarısı üzerinde etkili olduğu bilinmektedir.

İklim değişikliğinin bir sonucu olarak artan sıcaklıklar, *Chrysoperla carnea* dişilerinin yumurta bırakma davranışını ve alan seçimini etkileyebilir. Yüksek sıcaklıklar, dişilerin yumurta bırakma alanı seçiminde adaptif değişikliklere yol açabilir. Örneğin, dişiler daha serin mikrohabitatları tercih edebilir veya günün daha serin saatlerinde yumurta bırakma aktivitesini yoğunlaştırabilir. Bu davranışsal adaptasyonlar, yumurtaların optimal gelişim koşullarında kalmasını sağlayarak türün üreme başarısını korumaya yönelik stratejiler olarak değerlendirilebilir.

Sonuç ve Öneriler

İklim değişikliğinin etkileri gelecekte *Chrysoperla carnea* popülasyonları üzerindeki dramatik sonuçlar meydana getirmesi beklenmektedir. Sıcaklıkların düzenli olarak 35°C'yi aştığı bölgelerde, türün yaşam döngüsünün tamamlanması zorlaşacak ve popülasyon büyüklüğünde ciddi düşüşler yaşanacaktır. IPCC'nin projeksiyonlarına göre, 2100 yılına kadar küresel yüzey sıcaklığı ortalamasının 1.4 ila 5.8°C arasında artması beklenmektedir. Bu artış, *Chrysoperla carnea*'nın yaşam döngüsü ve biyolojik mücadele etkinliği üzerinde önemli etkiler yaratacaktır.

Chrysoperla carnea'nın yaşam döngüsünün her evresi (yumurta, larva, pupa ve ergin), sıcaklık değişimlerine farklı tepkiler vermektedir. Yumurta evresinde, gelişim süresi sıcaklık artışıyla belirgin şekilde kısalmaktadır. Larva evresinde, sıcaklığın gelişim süresine etkisi daha belirgindir. Özellikle larval gelişimin ilerleyen evrelerinde yüksek sıcaklıklara karşı duyarlılığın arttığını göstermektedir. Pupa evresinde yine 15°C'de ortalama 36.1 gün süren pupal dönem, 30°C'de 6.4 güne kadar düşüş gösterdiği, ancak sıcaklık 35°C'ye ulaştığında gelişim süresi hafifçe artarak 6.8 güne çıkmaktadır. Bu durum, yüksek sıcaklıkların pupal gelişim üzerinde olumsuz etkiler göstermeye başladığını işaret etmektedir.

Ergin evrede ise sıcaklık artışında yaşam süresinin kısaldığı ve hiçbir birey erginliğe ulaşmadığı daha önce yapılan çalışmalarda belirtilmiştir.

Bu sonuçlar, iklim değişikliğinin neden olduğu aşırı hava olaylarının sıklığındaki artış, *Chrysoperla carnea* popülasyonlarının istikrarını tehdit edecektir. Ani sıcaklık dalgalanmaları, uzun süreli kuraklıklar ve şiddetli

yağışlar, türün hayatta kalma oranlarını düşürerek biyolojik mücadele başarısını olumsuz etkileyecektir.

İklim değişikliğinin *Chrysoperla carnea* popülasyonları üzerindeki olumsuz etkilerini azaltmak için çeşitli önlemler alınabilir:

- Tarımsal alanlarda, *Chrysoperla carnea* için uygun mikrohabitatların oluşturulması ve korunması önemlidir. Gölge alanlar, rüzgar kıranlar ve su kaynakları, aşırı sıcaklıkların etkisini azaltarak türün hayatta kalma şansını artırabilir.
- *Chrysoperla carnea*'nın salım zamanlaması ve yoğunluğu, değişen iklim koşullarına göre ayarlanmalıdır. Özellikle sıcaklıkların kritik eşik değerlerin altında olduğu dönemlerde salımların yoğunlaştırılması, biyolojik mücadele başarısını artırabilir.
- *Chrysoperla carnea*'nın diğer biyolojik mücadele ajanları ve sürdürülebilir tarım uygulamalarıyla birlikte kullanımı, iklim değişikliğinin olumsuz etkilerine karşı dayanıklılığı artırabilir.

Kaynaklar

- Bozdoğan, H., Bahadıroğlu, C., Toroğlu, S. (2012). Altıngözlü Böcekler (Neuroptera: *Chrysopidae*). Genel Özellikleri ve Biyolojik Mücadelede Önemi, Nevşehir Üniversitesi Fenbilimleri Enstitü Dergisi, 1, 51-57.
- Canard, M., Duelli, P. (1984). Predatory behavior of *Chrysoperla carnea* (Stephens) larvae (Neuroptera: *Chrysopidae*) in the field. Zeitschrift für angewandte Entomologie, 97(4), 433-439.
- Chen, T.Y., Chu, C.C., Hu, C., Mu, J.Y., Henneberry, T.J. (2006). Observations on Midgut Structure and Content of *Chrysoperla carnea* (Neuroptera: *Chrysopidae*). Ann. Entomol. Soc. Am. 99(5), 917-919.
- Díaz-Rivas, M.A., Aragón-Sánchez, M., Huerta-de la Peña, A. (2023). Population parameters of *Chrysoperla carnea* under laboratory conditions in Puebla. Revista mexicana de ciencias agrícolas, 14(SPE29).
- Küçük, M.E., Tunca, H. (2024). İklim Değişikliğinin Tarım Ürünleri ve Böcekler Üzerindeki Etkisi. Bursa Uludağ Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi, 38(2), 535-564.
- Lai, Y., Liu, X. (2020). The natural enemy species of Chrysopidae from China and their applications in biological control: a review. 47(6): 1169–1187.
- Li, Y., Romeis, J. (2009). Impact of snowdrop lectin (*Galanthus nivalis* agglutinin; GNA) on adults of the green lacewing, *Chrysoperla carnea*. Journal of insect physiology, 55(2), 136-143.
- Martins, C.C., Santos, R.S., Sutil, W.P., de Oliveira, J.F.A. (2019). Diversity and abundance of green lacewings (Neuroptera: *Chrysopidae*) in a conilon coffee plantation in Acre, Brazil. Acta Amazonica, 49(3), 173-178.
- Mahzoum, A.M., Villa, M., Benhadi-Marín, J., Pereira, J.A. (2020). Functional response of *Chrysoperla carnea* (Neuroptera: Chrysopidae) larvae on *Saissetia oleae* (Olivier)(Hemiptera: Coccidae): Implications for biological control. Agronomy, 10(10), 1511.
- Mirmoayedi, A., Marami, S., Yari, K., Kahrizi, D. (2014). Use of RAPD-PCR to reveal genetic proximity of species of Chrysopidae family. Insecta, Neuroptera. International Journal of Farming and Allied Sciences, 3(4), 402-407.

- Pappas, M.L., Broufas, G.D., Koveos, D.S. (2011). Chrysopid predators and their role in biological control. *Journal of Entomology*, 8, 301-326.
- Pathan, S.N., Bukero, A., Nizamani, I.A., Lanjar, A.G., Kumbhar, M.I., Rajput, L.B., Sahito, M.H. (2016). Influence of varying temperature on life stages of *Chrysoperla carnea* (Stephens) under laboratory conditions. *Journal of Basic & Applied Sciences*, 12, 388-393.
- Ranjbar Aghdam, H., Nemati, Z. (2020). Modeling of the effect of temperature on developmental rate of common green lacewing, *Chrysoperla carnea* (Steph.) (Neuroptera: *Chrysopidae*). *Egyptian Journal of Biological Pest Control*, 30(1), 145.
- Saljoqi, A.U.R., Asad, N., Khan, J., Haq, E.U., Rehman, S., Huma, Z., Saeed, H.G., Nadeem, M., Salim, M., Ahmad, B. (2015). The impact of temperature on biological and life table parameters of *Chrysoperla carnea* Stephens (Neuroptera: *Chrysopidae*) fed on cabbage aphid, *Brevicoryne brassicae* (Linnaeus). *Journal of Entomology and Zoology Studies*, 3(2), 238-242.
- Sharif, M., Ali, A., Solangi, B.K., Tariq, M.A., Ahmed, F., Shah, R., Bazai, M.J.K., Khan, A. W., Shahzad, F., Amin, M., Khan, M. (2023). Effects of different thermal stress on life cycle of *Chrysoperla carnea* (Neuroptera: *Chrysopidae*) under laboratory condition Quetta Balochistan. *Pure and Applied Biology*, 12(1), 424-433.
- Thomson, L.J., Macfadyen, S., Hoffmann, A.A. (2010). Predicting the effects of climate change on natural enemies of agricultural pests. *Biological control*, 52(3), 296-306.
- Tian, S., Jiang, Y., Lai, Y., Wang, S., Liu, X., Wang, Y. (2023). New Mitogenomes of the Green Lacewing Tribe Ankylopterygini (Neuroptera: *Chrysopidae*: *Chrysopinae*) and Phylogenetic Implications of *Chrysopidae*. *Insects*, 14(11).
- Yaşar, İ., Kök, Ş., Kasap, İ. (2021). Küresel Isınma ve İklim Değişikliğinin Böcekler Üzerindeki Olası Etkileri. *Lapseki Meslek Yüksekokulu Uygulamalı Araştırmalar Dergisi*, 2(4), 67-75.

BÖLÜM 9

BİBERİYENİN (*Rosmarinus officinalis* L.) KURAKLIK STRESİ KOŞULLARINA UYUMU VE SÜRDÜRÜLEBİLİRLİĞİ

Dr. Öğrt. Üyesi Muzaffer KIRPIK^{1*}

DOI: <https://www.doi.org/10.5281/zenodo.17966585>

^{*1} Adıyaman Üniversitesi Kahta Meslek Yüksekokulu Bitkisel ve Hayvansal Üretim Bölümü, Adıyaman-Kahta, Türkiye, mkirpik@adiyaman.edu.tr,
<https://orcid.org/0000-0002-8089-2533>
Sorumlu Yazar: mkirpik@adiyaman.edu.tr

Giriş

Tarım üretiminde abiyotik ve biyotik stres faktörleri, bitkilerin morfolojik, fizyolojik ve kimyasal özelliklerinde önemli değişikliklere yol açmaktadır. Abiyotik stres faktörleri arasında yer alan kuraklık stresi, su kısıtı nedeniyle bitki büyümesini sınırlayan ve metabolik süreçleri yeniden düzenleyen en kritik stres etmenlerinden biri olarak kabul edilmektedir. Bununla birlikte, pek çok çalışma, bitkilerin kuraklık koşullarına karşı savunma mekanizması olarak ikincil metabolit sentezini artırabildiğini göstermektedir. Özellikle fenolik bileşikler, flavonoidler, uçucu yağ bileşenleri ve terpenoidler gibi metabolitlerde artış görülebilmektedir (Laribi vd., 2009; Hamrouni vd., 2001; Sangwan vd., 2001).

Bitkiler, yaşam döngüleri boyunca sık sık toprak ve atmosfer kaynaklı su eksikliklerine maruz kalmakta ve dünyanın birçok bölgesinde yüksek toprak tuzluluğu ile karşılaşmaktadır. Bitkilerin kuraklık, tuzluluk ve bu streslerin birlikte ortaya çıkmasına nasıl tepki verdiğini anlamak, kurak ve tuzlu koşullarda ürün performansının istikrarını sağlamak ve doğal bitki örtüsünü korumak açısından büyük önem taşır (Chaves vd., 2009).

Literatürde, kuraklık stresinin ikincil metabolitleri artırdığına dair bulgular geniş biçimde rapor edilmektedir. Örneğin, Selmar ve Kleinwächter (2013) kuraklığın kontrollü bir şekilde uygulanmasının bitkilerde kalite artırıcı ikincil metabolit birikimini tetiklediğini göstermektedir. (Chaves vd. 2009) ise kuraklık stresinin bitki fizyolojisini yeniden düzenleyerek antioksidan aktivite ve fenolik bileşik düzeylerini artırabildiğini belirtmektedir. Ayrıca Mohammadkhani ve Heidari (2008), su stresinin bitkilerde ozmotik düzenleme ve metabolit birikimi ile ilişkili olduğunu bildirmektedir. Bitkisel uçucu yağlarla ilgili çalışmalarda da benzer şekilde, kuraklık koşullarının esansiyel yağ miktarı ve bileşimini değiştirdiği ortaya konmuştur (Turtola vd., 2003).

Rosmarinus officinalis L., yaygın olarak biberiye olarak bilinen, Akdeniz bölgesine özgü çok yıllık aromatik bir çalı olup, mutfak, tıbbi ve endüstriyel uygulamalarda kullanılmak üzere dünyanın birçok yerinde yetiştirilmektedir. Biberiye, *Lamiaceae* (ballıbabagiller) familyasına ait, hoş kokulu ve terapötik özellikleriyle bilinen bir bitkidir. Biberiye, uçucu ve uçucu olmayan biyoaktif bileşiklerin en önemli kaynaklarından biri olarak kabul edilir. Uçucu yağları, fenolik bileşikleri ve diğer biyoaktif metabolitleri, antioksidan, antimikrobiyal, antienflamatuvar ve nöroprotektif özellikler göstermesi nedeniyle oldukça

değerlidir. Son yirmi yılda biberiye, gıda, ilaç, kozmetik ve tarım-endüstri sektörlerindeki potansiyeli sayesinde önemli bilimsel ilgiyi üzerine çekmiştir. Bu durum, biberiyeyi ürün çeşitliliği ve sürdürülebilir tarım açısından yüksek katma değerli bir bitki türü haline getirmiştir (Kumar vd., 2025).

Biberiye" adı, yalnızca deniz havasındaki nemle yaşayabilme yeteneğine atıfta bulunan "deniz çiyi" anlamına gelen Latince *ros marinus*'tan gelir. Bitki, mutfak, tıbbi ve sembolik özellikleri nedeniyle değer gördüğü Akdeniz bölgesinde binlerce yıldır yetiştirilmektedir. Mısırlılar biberiyeyi cenaze ritüellerinde kullanmışlar ve MÖ 3000 yılına tarihlenen mezarlarda izlerine rastlanmıştır. Antik Yunanistan ve Roma'da hafıza ve arınma ile ilişkilendirilmiş, genellikle tütsü olarak yakılmış ve hastalıkları ve kötü ruhları kovduğu düşünülmüştür. Orta Çağ boyunca biberiye, Avrupa'da hastalıkları önlemek için yaygın olarak kullanılmış ve genellikle arınma için evlerde ve hastanelerde yakılmıştır. 9. yüzyılda Roma imparatoru Şarلمان'ın emriyle imparatorluk bahçelerinde yetiştirilmiştir (Britannica Editors. 2025).

1. İklim Değişikliği ve Kuraklık Sorunu

Akdeniz kökenli tıbbi ve aromatik bir bitki olan biberiye kuraklık stresine yanıt vermektedir. Kontrollü kuraklık stresi, biberiyenin uçucu yağ kompozisyonunu olumlu yönde değiştirebilmekte ve bitkinin biyokütlesinde ciddi kayıplara neden olmamaktadır. Biberiye, özellikle kuraklık gibi çevresel stresler altında savunma mekanizması olarak uçucu yağ sentezini artırabildiğinden, su kaynaklarının sınırlı olduğu marjinal kuru alanlar için potansiyel bir yetiştiricilik türü olarak değerlendirilebilir (Formica vd. 2024).

Formica vd. (2024) tarafından yapılan çalışmada, Sicilya'da çiftçi iş birliğiyle yürütülen iki tarla denemesinde, balsamık döneme yakın üç haftalık kontrollü su kısıtlamasının biberiye biyokütlesi, uçucu yağ verimi ve kimyasal bileşimi üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Sonuçlar, kuraklık stresinin bitki büyümesi üzerinde belirgin bir olumsuz etki yaratmadığını; buna karşın bazı değerli terpen bileşiklerinin oranını artırdığını göstermiştir. Özellikle *bornyl acetate* ve *β -caryophyllene* stres altında yükselirken, *α -pinene* genellikle daha düşük seviyede bulunmuştur. Ayrıca, çeşit (genotip) farklılıklarının stres yanıtını önemli ölçüde etkilediği görülmüş; örneğin 'Barbeque' çeşidinin bitki boyu, 'Tuscan Blue'a göre daha fazla gelişme göstermiştir. Bu bulgular,

biberiyenin Akdeniz'in su kıtlığı yaşayan marjinal alanlarında hem toprak koruma hem de ürün çeşitlendirme açısından uygun bir tür olduğunu göstermektedir.

Benzer şekilde, Bidgoli (2018) tarafından yapılan çalışmada, farklı düzeylerde uygulanan kuraklık stresinin biberiye (*Rosmarinus officinalis* L.) bitkisinin büyüme performansı ve uçucu yağ bileşimi üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Çalışma sonuçları, azalan toprak neminin bitkinin sürgün uzunluğu, kök ve gövde biyokütlesi gibi temel büyüme parametrelerinde belirgin düşüslere yol açtığını göstermiştir. Bununla birlikte, hafif düzeyde su stresinin uçucu yağ oranını artırdığı; ancak şiddetli kuraklık koşullarının yağ verimini azaltmakla birlikte belirli bileşenlerin (örneğin kamfor) oranını artırarak yağın kimyasal kalitesini değiştirdiği belirlenmiştir. Bu bulgular, iklim değişikliğinin yol açtığı kuraklık koşullarının aromatik bitkilerde hem verim hem de ürün kalitesi üzerinde çifte etkiler oluşturabileceğini göstermekte; biberiye gibi türlerin sürdürülebilir üretimi için uygun su yönetiminin kritik önem taşıdığını vurgulamaktadır.

Türkiye'de yapılan pek çok araştırma (Tarım ve Orman Bakanlığı, 2024; Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC, 2021) iklim değişikliğinin su kaynaklarını, su dengesini, kuraklık riskini ve tarımsal üretimi her geçen yıl daha fazla zorladığını ortaya koymaktadır. Sıcaklıkların yükselmesi, yağışların düzensizleşmesi ve buharlaşmanın artması özellikle yarı kurak bölgelerde su stresini hissedilir biçimde artırmaktadır. Ancak tüm bu genel bulgulara rağmen, Adıyaman'da yaşanan kuraklık sürecini ve bunun biberiye yetiştiriciliğiyle ilişkisini doğrudan ele alan bir çalışmaya literatürde rastlanmamıştır. Bu boşluk, hem konunun ne kadar araştırılmaya açık olduğunu göstermekte hem de yapılacak çalışmanın neden önemli ve özgün olduğunu daha net ortaya koymaktadır.

2. Biberiyenin Yetiştiriciliği

Biberiye, kurak şartlarda yetiştiriciliğe uygunluğu, ekolojik ve endüstriyel değeri değer yaratabilecek önder bitkilerden biridir. Ayrıca doğal dengenin devamlılığında önemli rol alan arılar içinde önemli besin kaynaklarındanır.

Kurak veya yarı kurak diye adlandırdığımız iklim yapısına sahip olan Adıyaman'da Adıyaman Üniversitesi, Tarımsal Araştırma ve Uygulama

Merkezinde biberiye bitkisinde çoğaltma ve üretim amaçlı yaptığımız çalışmalarda bitkinin erken ilkbaharda köklendirme ve bitki gelişiminin hızlı olduğunu çalışmalarımız ortaya çıkarmıştır. Aşağıdaki fotoğraflar yaptığımız uygulamaların ilimizde bitkinin durumunu gösteren çalışmalara örnektir. Fotoğraf 1’ de bitkinin çiçek ve yaprakları yer almaktadır. Bitkinin çiçek ve yaprakları baharat ve uçucu yağ eldesi için kullanılabilir. Bitkinin çoğaltılması genellikle fotoğraf 2’ de görüldüğü gibi çelik yöntemi ile yapılmaktadır. Bitkinin tohumla doğal yolla üremesinde sıkıntılar yaşanmaktadır. Ana bitkiden alınan dallardan 7-10 cm uzunluğunda çeliklerin yarıya kadar yaprakları alınarak uygun bir çelik oluşturulmuş olur. Uygun zaman ve şartlarda çeliklerin dikilmesi sonucu sulama haricinde herhangi bir uygulama yapmadan çelikler köklenmektedir. Çeliklerin ince elenmiş topraklara dikilmesi ile çeliklerin köklendirilmesi sağlanır. Biberiye bitkisi üretim amaçlı fotoğraf 3’te dikilebildikleri gibi süs amaçlı bahçelerde, erozyonu önlemek amaçlı eğimli arazilerde ve otoyol kenarlarında ağır metallere karşı (Kırpık vd. 2017), ormanlık alanlarda ise yangın hızını azaltmak gibi amaçlarla dikimler yapılmaktadır.



Şekil 1. Adıyaman Üniversitesi, Tarımsal Araştırma ve Uygulama Merkezi, Biberiye
Çiçek ve Yaprakları, Kırpık 2025



Şekil 2. Adıyaman Üniversitesi, Tarımsal Araştırma ve Uygulama Merkezi, Biberiye Yaprak ve Çelikleri (Kırpık 2025).



Şekil 3. Adıyaman Üniversitesi, Tarımsal Araştırma ve Uygulama Merkezi, Gelişmiş Bitki Biberiye, (Kırpık, 2025)

Biberiye tarımsal açıdan daha çok baharat ve uçucu yağ amaçlı üretim yapılmaktadır. Biberiye (*Rosmarinus officinalis* L.) uçucu yağında başlıca bileşenlerin genellikle 1,8-cineole (eukaliptol), α -pinene ve kamfor olduğunu ve bu bileşenlerin mevsim, habitat, genotip, hasat zamanı, ekstraksiyon yöntemi ve çevresel stresler (kuraklık / tuzluluk) gibi faktörlere göre değişkenlik gösterdiğini bildirmektedir (Borges vd., 2018; Lakušić vd., 2013). Spesifik olarak su kısıtı / kuraklık ya da tuz stresi uygulamaları; toplam uçucu yağ verimini ve bileşenlerin niceliksel (oran, yüzde) ve niteliksel (hangi bileşenlerin bulunduğu) profillerini değiştirebilir. Bazı çalışmalar su/tuz stresi altında uçucu yağ veriminde artış (özellikle bei bazı uygulamalarda, genotipe bağlı) bildirmiş; bazı çalışmalar ise verimde azalma göstermiş — yani etki çeşide, stresin türüne ve şiddetine bağlıdır (Sarmoum vd., 2019; Tounekti vd., 2011). Ayrıca, genel kuramsal çerçeve ve deneysel derlemeler, su kısıtının

karbon akışını ve redüksiyon-oksidasyon dengesini değiştirerek ikincil metabolit (ör. monoterpenler) sentezini etkileyebileceğini belirtmektedir (Selmar & Kleinwächter, 2013).

Kuraklık ve tuzluluk streslerinin fotosentez üzerindeki etkileri, stomalar ve mezofil dokusu üzerinden difüzyon sınırlamaları ile fotosentetik metabolizmadaki değişiklikler gibi doğrudan olabileceği gibi, birden fazla stresin üst üste binmesi sonucunda ortaya çıkan oksidatif stres gibi ikincil etkiler şeklinde de görülebilir (Chaves vd., 2009).

Soltani Alikooyi vd. (2025) tarafından yürütülen çalışmada, biberiyenin kuraklık stresi altındaki fizyolojik, biyokimyasal ve uçucu yağ bileşimi değişimleri ayrıntılı biçimde incelenmiştir. Araştırmada tam sulama ile %50 sulama (kuraklık stresi) koşulları karşılaştırılmış ve bitkiye salisilik asit (100–400 mg/L), L-fenilalanin (80–320 mg/L) ve lovastatin (40–160 mg/L) gibi büyüme uyarıcılarının uygulanması değerlendirilmiştir. Çalışma sonuçlarına göre kuraklık, biberiyede klorofil b içeriğinde %40, uçucu yağ veriminde %12,6 ve sürgün kuru ağırlığında %16,6 oranında azalmaya neden olurken antioksidan aktivitede %5'lik bir artışa yol açmıştır. Bu bulgular, bitkinin stres koşullarında savunma mekanizmalarını aktive ettiğini ancak büyüme ve metabolik üretkenlikte belirgin kayıplar yaşadığını göstermektedir. Bununla birlikte, özellikle 200 mg/L salisilik asit ve 320 mg/L L-fenilalanin uygulamalarının klorofil a, karotenoidler, PAL enzimi aktivitesi, fenolik ve flavonoid bileşikler ile uçucu yağ içeriğini artırdığı bildirilmiştir. Bu artışlar, biberiyenin kuraklığa karşı biyokimyasal toleransını güçlendiren önemli bir adaptasyon stratejisi olarak değerlendirilmektedir. Uçucu yağ bileşenleri açısından α -pinen, kafur, 1,8-sineol, kamfen, borneol, verbenon ve bornil asetat temel bileşenler olarak belirlenmiş; kuraklık altında çoğu bileşenin azaldığı ancak borneol ve bornil asetatın arttığı görülmüştür. Salisilik asidin özellikle α -pinen, kamfen ve 1,8-sineol gibi monoterpenlerde; L-fenilalaninin ise borneol ve bornil asetatta arttırıcı etkisi olduğu belirlenmiştir. Daha yüksek uyarıcı konsantrasyonları hidrokarbon monoterpenlerini azaltırken oksijenli monoterpenleri ve seskiterpenleri artırmış; lovastatinin ise bitkinin enerji yönetimini değiştirerek karotenoid üretimini desteklediği ifade edilmiştir.

Ayrıca, Chetia vd. (2025) tarafından yapılan kapsamlı derleme çalışmasında, biberiyenin (*Rosmarinus officinalis* L. / *Salvia rosmarinus*) uçucu yağının kimyasal bileşimi, ekstraksiyon teknikleri ve farmakolojik

özellikleri ayrıntılı olarak ele alınmıştır. Araştırmacılar, biberiyenin aromatik yapraklarıyla bilinen çok yıllık bir tıbbi–aromatik bitki olduğunu; uçucu yağının ise çeşitli uçucu ve yarı uçucu bileşikleri içerdiğini ve bu bileşenlerin terapötik etkiler açısından büyük önem taşıdığını vurgulamaktadır. Çalışmada, biberiye uçucu yağının kimyasal profilinin; kullanılan ekstraksiyon yöntemi, toprak yapısı, ışık miktarı, sıcaklık değişimleri, genetik varyasyonlar, iklim koşulları, kullanılan bitki kısmı, kurutma süresi ve yetiştirme ortamının jeografik özellikleri gibi çok sayıda çevresel ve teknik faktöre bağlı olarak değişebildiği belirtilmektedir. Geleneksel yöntemler olan hidrodistilasyon ve su buharı distilasyonunun yaygın olmakla birlikte zaman alıcı olduğu ve bazı uçucu bileşenlerin kaybına yol açabileceği ifade edilmiştir. Buna karşılık, süperkritik CO₂ ekstraksiyonunun daha yüksek verim ve bileşen korunumu sağlama potansiyeli taşıdığı ancak teknolojik ve mali sınırlılıkları bulunduğu aktarılmıştır. Chetia vd. (2025), özellikle 1,8-sineol, kafur, *p*-simen, linalol, borneol, γ -kadinen, izokarnozol, β -pinen ve α -pinen gibi ana bileşenlerin biberiye uçucu yağının farmakolojik etkilerini belirlediğini; bu bileşenlerin antimikrobiyal, antioksidan, antiinflamatuvar, analjezik, antifungal ve antitümör aktivitelere katkı sağladığını bildirmektedir. Ayrıca uçucu yağın saç büyümesini desteklediği ve karaciğeri koruyucu (hepatoprotektif) etkilere sahip olabileceği ifade edilmiştir.

Yukarıdaki bulgular, Adıyaman gibi kurak veya yarı kurak iklim özelliklerine sahip bölgelerde sürdürülebilir biberiye yetiştiriciliğini ve biberiyenin uçucu yağ bileşenlerini etkilemektedir. Kurak alanlarda sulamaya geçilmesi biberiyenin verimliliğini artırmaktadır (Çelik vd. 2017). Kuraklık stresinin biberiyenin uçucu yağ bileşimi ve verimi üzerinde belirgin etkiler oluşturabildiği dikkate alındığında hem yetiştirme koşullarının optimize edilmesi hem de uygun ekstraksiyon yöntemlerinin seçilmesi kritik önem taşımaktadır. Chetia vd. (2025) tarafından ortaya konan, biberiyenin biyokimyasal çeşitliliğinin çevresel koşullara oldukça duyarlı olduğu yönündeki tespitler; kurak iklimlerde kaliteli uçucu yağ elde edebilmek için doğru yetiştirme yönetimi ve işleme tekniklerinin birlikte değerlendirilmesi gerektiğini göstermektedir.

Ayrıca, büyüme düzenleyicilerinin bilinçli kullanımıyla bitkinin kuraklık stresine dayanıklılığının artırılması, uçucu yağ bileşenlerinin kalitesinin korunması ve verim kayıplarının azaltılması mümkün

olabilmektedir. Böylece hem tıbbi–aromatik bitkilerin bölgesel kalkınmaya olan katkısı güçlendirilebilmekte hem de iklim değişikliğinin neden olduğu su kısıtı koşullarında daha sürdürülebilir üretim modellerinin geliştirilmesi için güçlü bir temel oluşturmaktadır.

3. Biberiyenin Erozyon ve Orman Yangınlarına Karşı Kullanımı

Dünyada ve ülkemizde son yıllarda kuraklık ve yüksek sıcaklıklardan dolayı erozyon ve orman yangınları sorun olarak sık sık karşımıza çıkmaktadır. İklim değişikliğiyle birlikte artan sıcaklıklar ve düzensiz yağış rejimleri; kuraklık periyotlarının uzaması doğa üzerinde ağır baskılar oluşturmuştur. Bu baskı hem toprak sağlığı hem de orman ve bitki örtüsü açısından ciddi tehditler getirmiştir. Kuraklık, toprak nemini azaltıyor, bitkilerin su stresine girmesine neden oluyor; bu da toprak örtüsünün zayıflamasına ve yüzey erozyonuna yol açabiliyor. Özellikle aşırı yağış dönemleri kuraklık sonrası toprak yapısı bozulan alanlarda su akışıyla toprak kaybını artırıyor artırmaktadır. Biberiye bitkisi çok yıllık çalı formunda olmasından dolayı yağmur sularının direk toprağa çarparak toprağın parçalanmasının ve taşınmasının azaltılmasını sağlayarak erozyonu önlemektedir.

Ormanların ve içinde yaşayan canlıların yok olmasına veya büyük zarar görmesine neden olan yüksek sıcaklıklar ve kuraklıklar sonucu ortaya çıkan orman yangınları orman ekosistemlerini yangına karşı daha savunmasız hâle getirmektedir. Bitkilerde su stresi, kurumuş ot, yaprak ve gövde neminin düşmesi; yangına yakıt oluşturacak kuru organik madde miktarını artırmaktadır. Bu durum, özellikle yaz dönemlerinde yüksek yangın riski anlamına gelmektedir. Böyle bir ortamda, bir kıvılcım ya da insan kaynaklı ihmal, büyük ölçekli orman yangınlarına yol açmaktadır. Erozyon ve yangınlar bir arada değerlendirildiğinde, yangından sonra bitki örtüsünün yok olması toprak koruma mekanizmalarını devre dışı bırakmaktadır. Bu da hem toprak verimliliğini hem su tutma yeteneğini bozmaktadır (FAO, 2020).

Yukarıdaki tehditler, yalnızca ekosistemleri değil; aynı zamanda tarımsal üretimimizi, su kaynaklarımızın sürdürülebilirliğini, biyolojik çeşitliliğimizi ve kırsal yaşamımızı da doğrudan etkilemektedir. Erozyonla birlikte verim kaybı yaşayabilir; orman yangınları ekosistemleri, habitatları, su döngüsünü bozabilir. Bu nedenle, su yönetimi, yangına hazırlık, toprak koruma, yangın

önleyici planlar ve sürdürülebilir arazi kullanımı gibi stratejiler büyük önem taşımaktadır. Biberiye bitkisi ormanlık alanlarda aralarda sedde oluşturacak şekilde kullanılabilir. Oluşturulan şeritlerde yangın alçalarak veya bu setler yan o alana ulaşmadan önce yakılarak yangın önlenmeye çalışılmaktadır. Ayrıca belli aralıklarla biçimler yapılarak hem orman tali ürünü hem de biçimden sonra oluşan yeşil aksam yangının önlenmesine katkı sağlayabilmektedir.

SONUÇ VE ÖNERİLER

Biberiye (*Rosmarinus officinalis* L.), kurak ve yarı kurak bölgeler için kuraklığa dayanıklı ve yüksek katma değerli bir bitkidir. Kuraklık stresi altında, savunma mekanizması olarak ikincil metabolit (fenolik bileşikler ve uçucu yağlar) sentezini artırma yeteneği göstermektedir. Kontrollü ve hafif düzeydeki su kısıtlaması, bitki biyokütlesini düşürmeden uçucu yağ miktarını ve kimyasal bileşimini olumlu yönde (örneğin bornyl acetate gibi değerli terpen oranlarını yükselterek) değiştirebilir. Ancak şiddetli kuraklık, verimi düşürmekle birlikte kamfor, borneol ve bornil asetat gibi bileşenlerin oranını artırarak yağın kalitesini farklılaştırır. Bu bulgular, biberiye'nin iklim değişikliğinin getirdiği su kıtlığı koşullarında bile ticari potansiyelini koruyabileceğini göstermektedir.

Bölgesel koşullarda biberiye yetiştiriciliğinin sürdürülebilirliği, uygun su yönetimi (hafif kısıtlama rejimleri) ve doğru genotip seçimiyle mümkündür. Ayrıca, salisilik asit gibi büyüme düzenleyicilerinin optimize edilmiş kullanımı, bitkinin kuraklık stresine karşı biyokimyasal toleransını güçlendirerek verim ve kalite kayıplarını azaltmaktadır. Tarımsal üretimin ötesinde, biberiye'nin çok yıllık çalı formu, eğimli arazilerde erozyonun önlenmesi ve ormanlık alanlarda yangın hızını azaltma gibi kritik ekolojik hizmetler sunarak arazi yönetimine ve doğal kaynakların korunmasına önemli katkılarda bulunmaktadır.

Biberiye, Adıyaman koşullarında kuraklık stresine karşı güçlü adaptasyon mekanizmaları sergilemektedir. Fizyolojik, biyokimyasal ve morfolojik yanıtlar, sürdürülebilir aromatik bitki üretiminde model oluşturma potansiyeli taşır. Bölgesel üretim stratejilerinin iklim değişikliği bağlamında yeniden planlanması gerekmektedir. Adıyaman gibi yarı kurak iklimlere sahip bölgelerde, biberiye'nin çoğaltılması ve gelişimi konusunda başarılı ön çalışmalar mevcuttur. Bu potansiyeli maksimize etmek için, bölgeye özgü hafif sulama rejimlerinin belirlenmesi, en yüksek uçucu yağ kalitesini sağlayan

genotiplerin tespiti ve biyostimülan uygulamalarının optimize edilmesi gerekmektedir.

Sonuç olarak biberiye, iklim değişikliğine karşı hem ekonomik kalkınmaya katkı sağlayabilecek hem de toprak koruma ve çevre güvenliği açısından önemli faydalar sunabilecek entegre bir tarım ve çevre stratejisinin kilit bitki türlerinden biri olarak öne çıkmaktadır.

KAYNAKLAR

- Bidgoli, R. D. (2018). Effect of drought stress on some morphological characteristics, quantity and quality of essential oil in rosemary (*Rosmarinus officinalis* L.). *Advancement in Medicinal Plant Research*, 6(3), 40–45. <https://doi.org/10.30918/AMPR.63.18.019>.
- Borges, R. S., Sánchez-Ortíz, B. L., Pereira, A. C. M., Keita, H., & Carvalho, J. C. T. (2018). *Rosmarinus officinalis* essential oil: A review of its phytochemistry, anti-inflammatory activity, and mechanisms of action involved. *Journal of Ethnopharmacology*, 229, 29–45. <https://doi.org/10.1016/j.jep.2018.09.038>.
- Britannica Editors. (2025, November 19). Rosemary (*Salvia rosmarinus*). In *Encyclopaedia Britannica*. <https://www.britannica.com/plant/rosemary> (Erişim Tarihi: 05.12.2025).
- Chaves, M. M., Flexas, J., & Pinheiro, C. (2009). Photosynthesis under drought and salt stress: Regulation mechanisms from whole plant to cell. *Annals of Botany*, 103(4), 551–560.
- Chetia, M. P., Ashraf, G. J., Sahu, R., Nandi, G., Karunakaran, G., Paul, P., & Dua, T. K. (2025). *Rosemary (Rosmarinus officinalis L.) essential oil: A review of extraction technologies, and biological activities*. **Next Research**, 2(3), 100545. <https://doi.org/10.1016/j.nexres.2025.100545>.
- Çelik., A, M İnan, E Sakin, G Büyük, M Kırpık, E Akça, (2017). Kuru tarımdan sulu tarıma geçiş sonrası toprak özelliklerindeki değişimler: Adıyaman örneği. *Toprak Bilimi ve Bitki Besleme Dergisi* 5 (2), 80-86
- Formica, V., Leoni, F., Duce, C., Gonzalez-Rivera, J., Onor, M., Guarnaccia, P., Carlesi, S., & Barberi, P. (2024). Controlled drought stress affects rosemary essential oil composition with minimal impact on biomass yield. *Industrial Crops & Products*, 221, 119315. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2024.119315>.
- Food and Agriculture Organization. (2020). The state of the world's forests 2020: Forests, biodiversity and people. FAO & UNEP. <https://doi.org/10.4060/ca8642en>
- Hamrouni, I., Ben Salah, H., & Marzouk, B. (2001). Effects of water-deficit on lipids of safflower aerial parts. *Phytochemistry*, 58, 277–280.

- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2021). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press.
- Kumar, A., Sharma, N., Singh, M., Chamotiya, C. S., Semwal, M., & Lal, R. K. (2025). Recent advancements and the potential for growing *Rosmarinus officinalis* L., a new fragrant, medicinal, and industrial crop: A review. *Journal of Food, Nutrition and Diet Science*, 9(1), 1–8. <https://doi.org/10.51745/jfnds.v9.i1.2025>.
- Kırpık M., Büyük G., İnan M., Çelik A. (2017). The heavy metal content of some herbal plants on the roadside of Adana-Gaziantep highway, *Journal of Agricultural Faculty of Gaziosmanpasa University*, Cilt: 34, Sayı:1, 129-136
- Lakušić, D., Ristić, M., Slavkovska, V., & Lakušić, B. (2013). Seasonal variations in the composition of the essential oils of rosemary (*Rosmarinus officinalis*, Lamiaceae). *Natural Product Communications*, 8(1), 131–134. (PMID: 23472478).
- Laribi, B., Bettaieb, I., Kouki, K., Sahli, A., Mougou, A., & Marzouk, B. (2009). Water deficit effects on caraway (*Carum carvi* L.) growth, essential oil and fatty acid composition. *Industrial Crops and Products*, 30, 372–379.
- Mohammadkhani, N., & Heidari, R. (2008). Water stress induced by polyethylene glycol 6000 and sodium chloride in two maize cultivars. *Pakistan Journal of Biological Sciences*, 11(1), 92–97.
- Sangwan, N. S., Farooqi, A. H. A., Shabih, F., & Sangwan, R. S. (2001). Regulation of essential oil production in plants. *Plant Growth Regulation*, 34, 3–21.
- Sarmoum, R., Haid, S., Biche, M., Djazouli, Z., Zebib, B., & Merah, O. (2019). Effect of salinity and water stress on the essential oil components of rosemary (*Rosmarinus officinalis* L.). *Agronomy*, 9(5), 214. <https://doi.org/10.3390/agronomy9050214>.
- Selmar, D., & Kleinwächter, M. (2013). Influencing the product quality by deliberately applying drought stress during the cultivation of medicinal plants. *Industrial Crops and Products*, 42, 558–566. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2012.06.020>.

- Soltani Alikooyi, M., Abbasi Surki, A., Fallah, S., & Ghasemi Nafchi, M. (2025). Essential oil variations and physiological responses of rosemary (*Rosmarinus officinalis* L.) to growth elicitors under drought stress condition. *Results in Chemistry*, 18, 102797.
- Tounekti, T., Vadel, A. M., Oñate, M., Khemira, H., & Munne-Bosch, S. (2011). Salt-induced oxidative stress in rosemary plants: Damage or protection? *Environmental and Experimental Botany*, 71(2), 298–305. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2010.12.016>.
- Turtola, S., Manninen, A. M., Rikala, R., & Kainulainen, P. (2003). Drought stress alters the concentration of terpenoids in Scots pine and Norway spruce seedlings. *Journal of Chemical Ecology*, 29, 1981–1995.

BÖLÜM 10

İKLİM-TARIMSAL ÜRETİM VE KURAKLIK STRESİ

Doç. Dr. Hüseyin ARSLAN^{1*}

DOI: <https://www.doi.org/10.5281/zenodo.17966599>

^{1*} Harran Üniversitesi Ziraat Fakültesi, Tarla Bitkileri Bölümü, Şanlıurfa, Türkiye
huarslan@harran.edu.tr, <https://orcid.org/0000-0001-7221-7952>

GİRİŞ

İklim, belirli bir bölgedeki uzun süreli hava koşulları, sıcaklık, yağış, rüzgar ve nem gibi atmosferik parametrelerin ortalaması ve değişim desendir (Trenberth et al., 2014). Küresel ve bölgesel ölçekte iklim, ekosistemlerin işleyişini, tarımsal üretimi, su kaynaklarını ve biyolojik çeşitliliği belirleyen temel faktörlerden biridir (IPCC, 2021). İklim, yalnızca günlük hava olaylarını değil, yıllık ve mevsimsel döngülerde meydana gelen ortalama koşulları da kapsar ve uzun vadeli istatistiksel analizler ile karakterize edilir (Wallace & Hobbs, 2006).

İklim sınıflandırmaları, genellikle sıcaklık ve yağış rejimine göre yapılır; örneğin Köppen iklim sınıflaması, bu parametreleri temel alarak farklı ekosistem tiplerini tanımlar (Peel et al., 2007). İklim değişikliği, sera gazı birikimi, ormansızlaşma ve antropojenik etkiler nedeniyle uzun vadeli ortalama koşullarda gözlenen değişimler olarak tanımlanmaktadır (IPCC, 2021). Bu değişimler, sıcaklık artışları, yağış rejimlerinin kayması, kuraklık ve aşırı hava olaylarının sıklığının artması şeklinde kendini gösterir (Hansen et al., 2006).

Bitki üretim açısından iklimin önemi büyüktür; sıcaklık, yağış ve güneşlenme süresi, fotosentez, büyüme ve verim bileşenlerini doğrudan etkiler (Lobell et al., 2008). Kuraklık ve aşırı sıcaklık, bitkilerde fizyolojik stres oluşturarak gelişim süreçlerini sınırlar ve verim kaybına yol açabilir (Farooq et al., 2009). Bu nedenle, tarımsal planlama ve su kaynakları yönetimi iklim verilerine dayanarak optimize edilmektedir (Wallace & Hobbs, 2006).

İklim biliminde kullanılan ölçüm ve analiz yöntemleri arasında uzun dönemli meteorolojik veri toplama, istatistiksel iklim analizi, iklim modellemeleri ve uzaktan algılama teknikleri yer alır (Trenberth et al., 2014). Bu yöntemler, iklim değişikliğinin etkilerini tahmin etmek ve adaptasyon stratejileri geliştirmek için kritik öneme sahiptir (IPCC, 2021).

Genel iklim kavramı ve iklim değişikliğinin fiziksel temelleri ortaya konulduktan sonra, iklimin doğrudan insan yaşamı, günlük alışkanlıklar ve psikolojik süreçler üzerindeki etkileri ayrıntılı biçimde değerlendirilmektedir.

İklim, yalnızca meteorolojik süreçleri açıklamakla kalmaz, aynı zamanda yeryüzündeki canlı yaşamının, ekosistemlerin, tarımsal üretimin ve insan faaliyetlerinin temel belirleyicilerinden biri olarak kabul edilmektedir (Peixoto & Oort, 1992). Her bölgenin iklimi, o bölgenin doğal çevre özelliklerini, su

döngüsünü, toprak oluşum süreçlerini ve biyolojik çeşitliliğini doğrudan şekillendirir (Lutgens & Tarbuck, 2018).

İKLİM ÜZERİNDE ETKİLİ OLAN FAKTÖRLER

1. Enlem: Enlem, güneş ışınlarının geliş açısını belirleyen temel coğrafi faktör olduğundan, bir bölgedeki sıcaklık rejimi üzerinde en belirleyici unsurlardan biridir (Ahrens, 2012).
2. Yükselti: Yükseldikçe atmosfer basıncı azalmakta ve sıcaklık her 200 metrede yaklaşık 1°C düşmektedir (Critchfield, 1983).
3. Kara ve Deniz Dağılımı: Kıtalar denizlere göre daha hızlı ısınıp soğuduğu için karasal ve denizel iklim tipleri oluşur (Barry & Chorley, 2010).
4. Okyanus Akıntıları: Okyanus akıntıları, bulundukları bölgelerde sıcaklık ve nem dengesini değiştirerek iklimi yönlendirir (Trenberth & Hurrell, 1994).
5. Rüzgârlar ve Basınç Merkezleri: Atmosferdeki basınç farklarından doğan sürekli rüzgâr sistemleri yağış dağılımı üzerinde önemli rol oynar (Peixoto & Oort, 1992).
6. Yer Şekilleri: Dağların uzanış yönü, hava kütlelerinin hareketini etkileyerek yağışın dağılımını belirler (Lutgens & Tarbuck, 2018).

İKLİM VE İNSAN

İklim, yalnızca doğal çevreyi değil, insan yaşamını, günlük alışkanlıkları ve psikolojik durumu da derinden etkileyen bir faktördür (Trenberth et al., 2014; IPCC, 2021). Sıcaklık, yağış, rüzgar ve güneşlenme süresi gibi iklim değişkenleri, insanların sosyal ve ekonomik faaliyetlerini, uyku düzenlerini, beslenme alışkanlıklarını ve genel yaşam kalitesini doğrudan etkiler (Hsiang et al., 2017). Örneğin, yüksek sıcaklıklar ve nem, fiziksel aktiviteyi sınırlayabilir ve enerji tüketim alışkanlıklarını değiştirebilir; aşırı soğuk koşullar ise giyim, ısınma ve ulaşım davranışlarını şekillendirir (Sherwood & Huber, 2010).

İklim değişiklikleri ve ekstrem hava olayları, insan psikolojisi üzerinde belirgin etkiler yaratır. Uzun süreli sıcak hava dalgaları depresyon, anksiyete ve stres seviyelerinde artışa yol açabilir (Huang et al., 2017). Mevsimsel değişiklikler, uyku düzeni, enerji seviyesi ve ruh hali üzerinde etkili olup mevsimsel duygudurum bozukluğu (Seasonal Affective Disorder, SAD) gibi

psikolojik durumların ortaya çıkmasına zemin hazırlar (Lam & Levitan, 2000). Ayrıca kuraklık, sel ve fırtına gibi ekstrem olaylar, travma, kaygı ve sosyal izolasyon gibi psikolojik etkiler doğurabilir ve bireylerin toplumsal bağlarını zayıflatabilir (Clayton et al., 2021).

İklim, insan davranışları ve alışkanlıklarını da etkiler. Örneğin, güneşli ve sıcak günlerde dış mekan aktiviteleri artarken, soğuk ve yağışlı koşullarda kapalı alan etkinlikleri ve dijital medya kullanımı yükselmektedir (Hsiang et al., 2017). Tarımsal ve ekonomik faaliyetler, iklim koşullarına göre optimize edilir; su kaynaklarının yönetimi, enerji tüketimi ve ulaşım planlaması, uzun dönemli iklim verilerine dayalı olarak şekillenir (Lobell et al., 2008).

İklim değişikliği, toplumların adaptasyon stratejilerini de etkiler. Artan sıcaklıklar ve ekstrem hava olayları, insanların yaşam alanlarını değiştirmesine, göç etmesine ve sosyal alışkanlıklarını yeniden organize etmesine neden olabilir (IPCC, 2021). Bu durum, hem fiziksel hem de psikolojik sağlık açısından yeni riskler doğurur ve toplumların dayanıklılık kapasitesini test eder. Eğitim, kamu sağlığı politikaları ve psikososyal destek mekanizmaları, iklimin insan yaşamına olan etkilerini azaltmada kritik rol oynar (Clayton et al., 2021; Hsiang et al., 2017).

TARIMSAL ÜRETİMDE İKLİM

Tarımsal üretim, çevre koşullarının karmaşık ve dinamik etkileşimleri tarafından şekillenen biyofiziksel bir süreçtir. Bitkilerin büyümesi ve metabolik aktiviteleri; sıcaklık, yağış, güneşlenme, nispi nem, rüzgâr ve atmosferik gaz bileşimi gibi iklim elemanlarının belirli sınırlar içerisinde gerçekleşmesine bağlıdır. Bu nedenle iklim, tarımın yalnızca çevresel bir bileşeni değil aynı zamanda tarım sistemlerinin verimliliğini, sürdürülebilirliğini ve mekânsal dağılımını belirleyen temel faktördür (Ahrens, 2012; Barry & Chorley, 2010).

Tarımsal üretimin iklim koşullarına duyarlılığı, küresel iklim değişikliği sürecinde daha da kritik bir önem kazanmıştır. Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli (The Intergovernmental Panel on Climate Change –IPCC) (2021), tarım sektörünün hem iklim kaynaklı olumsuzluklardan en çok etkilenen hem de uyum stratejilerine en çok ihtiyaç duyan alanlardan biri olduğunu belirtmektedir. Artan sıcaklık, düzensiz yağışlar, ekstrem hava olayları ve atmosferdeki CO₂ oranındaki değişimler tarımsal verimlilik üzerinde doğrudan etkili olmaktadır.

1. Sıcaklık Sıcaklık bitki metabolizmasının neredeyse tüm süreçlerini düzenleyen bir değişkendir. Bitkiler belirli sıcaklık aralıklarında optimum büyüme gösterir; bunun dışındaki değerler stres oluşturarak büyüme performansını düşürür (Larcher, 2003).

Sıcaklığın tarımsal üretim üzerindeki temel etkileri:

- Fotosentez hızını belirler (Taiz et al., 2015). Fotosentezin ideal sıcaklık (optimum sıcaklık) derecesi 25-35°C arasındır. 35°C'un üstüne çıktığında genellikle enzim yapısı bozulacağından fotosentez hızı düşer ve durur.
- Enzimatik reaksiyonların etkinliğini düzenler. Çünkü bu tepkimelerde bir çok enzim görev yapmaktadır. Sıcaklık artışı tepkimelerin hızını da artırır; belirli bir noktadan sonra ise bu artış tepkimeleri durdurabilir.
- Çiçeklenme ve meyve bağlama dönemlerinin zamanlamasını belirler.
- Yüksek sıcaklık, polen canlılığını azaltarak ürün kaybına neden olabilir. Bu durum bölgesel ürün deseninde değişime yol açacaktır (Hatfield & Prueger, 2015).
- Soğuk stresine duyarlı türlerde hücre zarlarında kristalizasyon ve ölüm görülebilir. IPCC (2021) raporuna göre ekstrem sıcaklık olaylarının sıklığı ve şiddeti artmaktadır; polen canlılığında azalma, meyve dökümü ve vejetatif büyümenin yavaşlaması gözlenir.

2. Yağış ve Su Mevcudiyeti Yağış, kurak ve yarı kurak bölgelerde tarımsal verimliliğin en belirleyici iklim unsurudur. Su yetersizliği bitkilerde hücre genişlemesinin durması, stomaların kapanması, yaprak alanının küçülmesi ve kök gelişiminin yavaşlamasına neden olur. Bu durum genellikle bitkilerin, dokulardaki su kaybını önlemek, yada dokularda bulunan düşük su düzeylerinin mümkün olduğunca yarayışlı bir şekilde kullanma stratejisi ile doğrudan alakalıdır. Su stresi yaşayan bitkiler öncelikle stomalarının kapanarak su kaybını önlemeye çalışmaktadırlar. Nihayetinde bu durum fotosentez ürünlerinin azalmasına neden olmaktadır (Chaves et al., 2003). FAO (2017) raporlarına göre dünya tarım alanlarının %80'i yağışa bağımlıdır ve yağış rejimindeki %10'luk bir dalgalanma tahıl veriminde %20 değişime yol açabilir. Türkiye'nin büyük bölümü yarı kurak iklim şartlarının etkisi altındadır. Tarımsal üretimde su kaynakları çok büyük önem arz etmektedir. Yağış miktarının azalması ve dağılımındaki değişiklikler tarımsal üretimde üreticiler için çaresizliği yaratmaktadır (Anonim a). Dünyanın birçok bölgesinde yağışın

azalması tarımsal üretim için kritik tehdit oluştururken aşırı yağışlarda, bir çok ürün için ciddi kayıplara yol açmaktadır.

3. Güneşlenme Süresi ve Işınım Güneş ışınımı, bitkilerin biyokütle üretiminin temel enerji kaynağıdır. Işınım miktarı arttıkça fotosentez hızlanır; ancak aşırı ışınım yapraklarda fotooksidatif zararlar meydana getirebilir (Monteith, 1977).

4. Nispi nem, bitkilerin su kaybı ile enerji dengesini doğrudan etkiler. Yüksek nem mantar ve bakteri hastalıklarının yayılmasını kolaylaştırırken (Agrios, 2005) düşük nem ise transpirasyonu artırarak bitkilerin su stresine girmesine yol açmaktadır. Bunun yanında toprak nemi, sıcaklığı ve buharlaşma/transpirasyon süreçleri tarımsal üretimde verimi direk etkileyen faktörler arasına girmektedir.

5. Rüzgâr, fiziksel hasara neden olabilir ve transpirasyonu artırarak bitkileri su stresine sokar (Rosenberg et al., 1983).

KURAKLIK VE DÖLLENME

Kuraklık ve besin maddesi etkileşimi üzerine yapılan araştırmalar, bitkilerin büyüme ve gelişme süreçlerinin su stresi ile yakından ilişkili olduğunu göstermektedir. Kuraklık, kök ve sürgün gelişimini sınırlandırarak bitkilerin su ve besin maddelerini etkin bir şekilde kullanma kapasitesini azaltır (Lawlor, 2013). Bu durum, özellikle genç bitkilerde morfolojik değişimlere yol açmakta, yaprak alanını azaltmakta ve fotosentez kapasitesini düşürmektedir (Farooq et al., 2009).

Generatif evrelerde kuraklık, çiçeklenme ve meyve oluşumunu etkileyerek verim kaybına neden olur. Kuraklık ayrıca hücresel düzeyde reaktif oksijen türlerinin artmasına ve ozmotik stresin yükselmesine sebep olur; bu durum bitkilerin metabolik faaliyetlerini olumsuz yönde etkiler (Passioura, 2012).

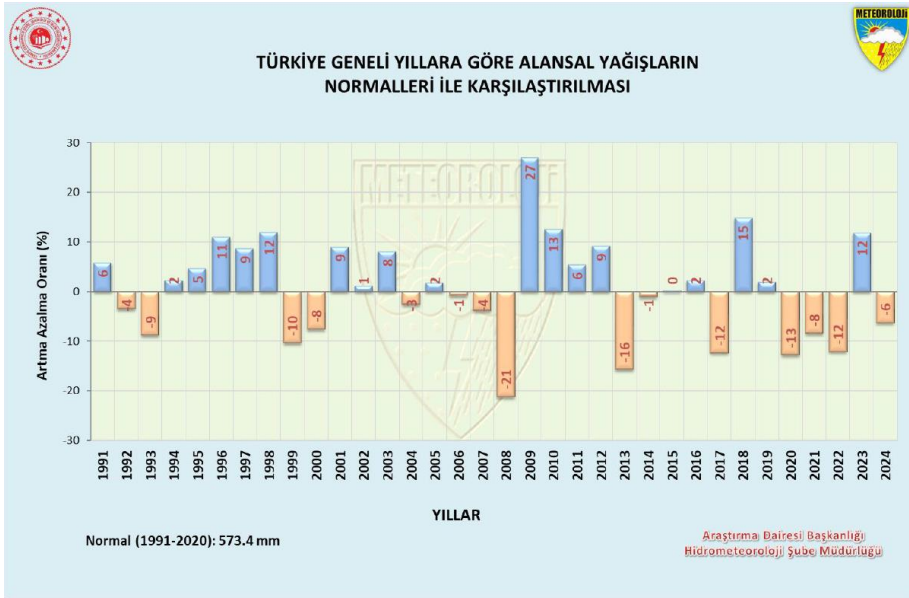
Döllenme uygulamaları, kuraklık stresine karşı bitkilerin adaptasyon yeteneğini artırabilir. Azot uygulamaları, fotosentetik pigmentlerin miktarını artırarak karbon kazanımını destekler ve su stresi koşullarında bitkinin büyüme kapasitesini korur (Foulkes et al., 2009). Fosfor uygulamaları kök gelişimini teşvik ederek bitkilerin toprak profilinin daha derinlerinden su çekmesini kolaylaştırır (Vance, 2001). Potasyum, stomal hareketliliği düzenleyerek su

kullanım etkinliğini artırmakta ve stres koşullarında osmotik dengeyi sağlamaktadır (Cakmak, 2005).

Ek olarak, kuraklığın zamanlaması ve şiddeti bitki türlerinin morfolojik ve fizyolojik yanıtlarını belirler. Özellikle çiçeklenme ve meyve tutumu döneminde meydana gelen su stresi, ürün kalitesi ve miktarında dramatik düşümlere neden olabilir (Passioura, 2012). Bu nedenle, stres yönetimi stratejilerinin fenolojik evreleri dikkate alacak şekilde tasarlanması gerekmektedir.

TÜRKİYE'DE YAĞIŞ REJİMİ VE ANALİZİ

Şekil 1., Türkiye genelinde yıllık ortalama alansal yağışların 1991–2024 klimatolojik normali (573.4 mm) ile karşılaştırmalı olarak yüzde sapmalar şeklinde ifade edilmesini sağlamaktadır. Şekilde 1.'de yer alan pozitif ve negatif anomaliler, Türkiye ikliminin hem kurak hem de yağışlı ekstrem koşullara duyarlı yapısını göstermesi açısından önemlidir.



Şekil 1. Türkiye geneli yıllık yağışların normallerine göre değişim oranları (URL 1)

İncelenen 33 yıllık periyotta yağış anomalilerinin hem pozitif hem de negatif yönde belirgin salınımlar yaptığı görülmektedir. 1991–2000 yılları arasında genel olarak normale yakın yağışların görüldüğü, anomalilerin ± 10

sınırları içinde seyrettiği bir süreçtir. 1996 ve 1998 yıllarında yağışta sınırlı artışlar, 1994 ve 1999 yıllarında ise ölçülü azalışlar dikkat çekmektedir.

2001–2010 dönemindeki veriler incelendiğinde, en çarpıcı değişimlerin yaşandığı yıllar olduğu görülmektedir. 2007 yılı normalin %28 altında yağış alarak en şiddetli kurak yıl olarak öne çıkarken buna karşılık 2009 yılı, normalin %28 üzerinde yağış ile serinin en belirgin pozitif anomalilerinden birini teşkil etmektedir.

Şekil 1.'de 2011 sonrası dönemde yağış profili yeniden negatif yöne kaymış ve kuraklık eğiliminin belirginleştiği yıllar olduğu görülmektedir. 2013, 2017 ve 2020 yıllarında yağışlar normalin %10–20 altında seyretmiştir.

Son dört yılda (2021-2024) yağış anomalilerinin daha belirginleştiği görülmektedir. 2021 yılında normalin %8 altında kalan yağışlar, 2022'de % 12 azalış; 2023 yılında ise yeniden %12 ile artış, 2024 yılında ise % 6 ile yeniden azalış göstermiştir.

Şekil 1.'in ifadesi ile Türkiye'de yağış rejimi belirgin olarak yıllık oynaklık sergilemektedir.

2008 yılı kuraklığı ve 2009 yılı aşırı yağışı, ekstrem iklim davranışlarının göstergeleridir. 2011 sonrası dönem kuraklık karakterinin güçlendiği süreçtir. 2020'li yıllarda ani yağış değişimleri, iklim değişikliğine bağlı atmosferik düzensizliklerin arttığını düşündürmektedir. Bu veriler, tarım, su kaynakları yönetimi ve kuraklık politikaları açısından yağış anomalilerinin yakından izlenmesi gerektiğini göstermektedir.

SONUÇ VE ÖNERİLER

Tarımsal üretim açısından sıcaklık, yağış, güneşlenme süresi, nispi nem ve rüzgâr gibi iklim elemanları; bitkilerin büyüme hızını, fotosentetik etkinliğini, su kullanım verimliliğini, kök–sürgün dengesini, çiçeklenme zamanlamasını ve generatif gelişimini önemli ölçüde yönlendirmektedir. İklim değişikliği ile birlikte ekstrem sıcaklık artışları, düzensiz yağış rejimi, uzun süreli kuraklıklar ve ani taşkınlar daha sık meydana gelmekte; bu durum hem ürün miktarı hem de ürün kalitesi üzerinde belirgin kayıplara yol açmaktadır. Özellikle kuraklık stresinin çiçeklenme, polen canlılığı, dölleme başarısı ve meyve tutumu üzerinde yarattığı olumsuz etkiler bitkisel üretimde kritik verim düşüşlerine neden olmaktadır. Besin elementleri ile yapılan dengeli gübreleme uygulamalarının kuraklık toleransını artırdığı görülmekle birlikte, aşırı

gübrelemenin su talebini yükselterek stresi daha da derinleştirebileceği tespit edilmiştir.

Türkiye özelinde değerlendirildiğinde, yağış rejiminin yüksek yıllar arası değişkenlik gösterdiği, 2007 ve 2013 gibi belirgin kurak yılların tarımsal üretim, su kaynakları ve hidroelektrik enerji üretimi üzerinde ciddi etkiler yarattığı görülmektedir. Son yıllarda pozitif ve negatif yağış anomalilerinin sıklığındaki artış, iklim değişikliği altında yağış rejiminin giderek istikrarsız bir yapıya büründüğünü göstermektedir. Bu durum, su kaynaklarının sürdürülebilir yönetimi, tarımsal planlama ve risk azaltma stratejilerinin önemini daha da artırmaktadır.

ÖNERİLER

1. İklim-Duyarlı Tarımsal Planlama

Tarımda ürün deseninin belirlenmesinde uzun dönemli iklim verileri, bölgesel su potansiyeli, toprak özellikleri ve hidroklimatik riskler temel alınmalıdır. Kuraklık riski yüksek bölgelerde su-verimli türlere ve kısa vejetasyon dönemine sahip çeşitlere yönelim önemlidir.

2. Su Kaynaklarının Entegre Yönetimi

Basınçlı sulama sistemlerinin yaygınlaştırılması, sulama randımanının artırılması, su kullanımının izlenmesi ve rezervuarların iklim projeksiyonlarına göre planlanması gerekmektedir.

3. Kuraklık Toleranslı Çeşit Geliştirme

İslah çalışmalarında kök derinliği, su kullanım etkinliği, ısı toleransı, polen canlılığı ve antioksidan kapasite gibi fizyolojik özellikler önceliklendirilmelidir.

4. Besin Yönetiminin Optimizasyonu

Azot, fosfor ve potasyumun dengeli uygulamaları kuraklık etkilerini azaltabilir; ancak yanlış gübreleme stratejileri stresi artırabilir. Bu nedenle fenolojik evreye ve toprak analizlerine dayalı hassas gübreleme yaklaşımı benimsenmelidir.

5. İklim Risk Erken Uyarı Sistemleri

Meteorolojik, tarımsal ve hidrolojik kuraklık göstergelerini izleyen ve üreticiyi zamanında bilgilendiren bölgesel erken uyarı sistemleri geliştirilmelidir.

6. Çiftçi Eğitimi ve Yayım Hizmetleri

Kuraklık yönetimi, modern sulama teknikleri, toprak işleme stratejileri ve hastalık–zararlı risk yönetimi konularında kapsamlı çiftçi eğitimleri yapılmalıdır.

7. Ulusal Ölçekte İklim Uyum Politikaları

Su tahsisi, ürün desteklemeleri ve bölgesel planlamalar uzun vadeli iklim projeksiyonlarına göre yeniden yapılandırılmalı; tarımsal üretimin iklim değişikliğine dirençli hâle getirilmesi için stratejik planlamalar geliştirilmelidir.

KAYNAKÇA

- Agrios, G. N. (2005). *Plant pathology*. Elsevier.
- Ahrens, C. D. (2012). *Meteorology today: An introduction to weather, climate, and the environment* (10th ed.). Brooks/Cole, Cengage Learning.
- URL 1. <https://mgm.gov.tr/FILES/iklim/yillikiklim/2024-iklim-raporu.pdf> (erişim Tarihi:01.12.2025)
- Barry, R. G., & Chorley, R. J. (2009). *Atmosphere, weather and climate*. Routledge.
- Cakmak, I. (2005). The role of potassium in alleviating detrimental effects of abiotic stresses in plants. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 168(4), 521-530.
- Critchfield, H. J. (1983). *General Climatology*. Prentice-Hall.
- Farooq, M., Wahid, A., Kobayashi, N. S. M. A., Fujita, D. B. S. M. A., & Basra, S. M. (2009). Plant drought stress: effects, mechanisms and management. In *Sustainable agriculture* (pp. 153-188). Dordrecht: Springer Netherlands.
- Foulkes, M. J., Hawkesford, M. J., Barraclough, P. B., Holdsworth, M. J., Kerr, S., Kightley, S., & Shewry, P. R. (2009). Identifying traits to improve drought resistance in wheat. *Journal of Experimental Botany*, 60(7), 1899–1918.
- Hansen, J., Sato, M., Ruedy, R., Lo, K., Lea, D. W., & Medina-Elizade, M. (2006). Global temperature change. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 103(39), 14288-14293.
- Hatfield, J. L., & Prueger, J. H. (2015). Temperature extremes: Effect on plant growth and development. *Weather and climate extremes*, 10(Part A), 4-10.
- IPCC. (2021). **Sixth Assessment Report**. Cambridge University Press.
- Larcher, W. (2003). *Physiological plant ecology: ecophysiology and stress physiology of functional groups*. Springer Science & Business Media.
- Lawlor, D. W. (2013). Genetic engineering to improve plant performance under drought: Physiological evaluation of achievements, limitations, and possibilities. *Journal of Experimental Botany*, 64(1), 83–108.
- Lobell, D. B., Schlenker, W., & Costa-Roberts, J. (2008). Climate trends and global crop production since 1980. *Science*, 333(6042), 616–620.

- Lutgens, F. K., & Tarbuck, E. J. (2018). *The Atmosphere: An Introduction to Meteorology*. Pearson.
- Monteith, J. L. (1977). Climate and the efficiency of crop production in Britain. *Philosophical transactions of the royal society of London. B, Biological Sciences*, 281(980), 277-294.
- Passioura, J. (2012). Phenotyping for drought tolerance in grain crops: When is it useful to breeders? *Functional Plant Biology*, 39(11), 851–859.
- Peel, M. C., Finlayson, B. L., & McMahon, T. A. (2007). Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. *Hydrology and Earth System Sciences*, 11(5), 1633–1644.
- Peixoto, J.P., Oort, A.H., (1992). *Physics of Climate*. American Institute of Physics, 520pp.
- Rosenberg, N. J., Blad, B. L., & Verma, S. B. (1983). *Microclimate: the biological environment*. John Wiley & Sons.
- Taiz, L., Zeiger, E., Moler, I., & Murphy, A. (2015). *Plant physiology and development* (Sinauer As). *Sunderland, MA, USA*.
- Trenberth, K. E., & Hurrell, J. W. (1994). Decadal atmosphere–ocean variations in the Pacific. *Climate Dynamics*, 9, 303–319.
- Trenberth, K. E., Fasullo, J. T., & Shepherd, T. G. (2015). Attribution of climate extreme events. *Nature climate change*, 5(8), 725-730.
- Vance, C. P. (2001). Symbiotic nitrogen fixation and phosphorus acquisition. Plant nutrition in a world of declining renewable resources. *Plant physiology*, 127(2), 390-397.
- Wallace, J. M., & Hobbs, P. V. (2006). *Atmospheric science: an introductory survey* (Vol. 92). Elsevier.
- Clayton, S., Manning, C., Speiser, M., & Hill, A. N. (2021). Mental health and our changing climate.
- Hsiang, S. M., Burke, M., & Miguel, E. (2013). Quantifying the influence of climate on human conflict. *Science*, 341(6151), 1235367.
- Huang, C., Barnett, A. G., Wang, X., Vaneckova, P., FitzGerald, G., & Tong, S. (2011). Projecting future heat-related mortality under climate change scenarios: a systematic review. *Environmental health perspectives*, 119(12), 1681.
- IPCC. (2021). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the

Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press.

- Lam, R. W., & Levitan, R. D. (2000). Pathophysiology of seasonal affective disorder: a review. *Journal of Psychiatry and Neuroscience*, 25(5), 469.
- Sherwood, S. C., & Huber, M. (2010). An adaptability limit to climate change due to heat stress. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 107(21), 9552–9555.

BÖLÜM 11

KURAKLIKLILA MÜCADELEDE SU KAYNAKLARININ KORUNMASI VE AKILLI SULAMA SİSTEMLERİ

Prof. Dr. Ali Rıza ÖZTÜRKMEN^{1*}

DOI: <https://www.doi.org/10.5281/zenodo.17966610>

^{1*} Harran Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Tarımsal Yapılar ve Sulama Bölümü,
Şanlıurfa, Türkiye.

arozturkmen@harran.edu.tr, <https://orcid.org/0000-0001-5575-3278>

Sorumlu Yazar: arozturkmen@harran.edu.tr

GİRİŞ

Küresel iklim değişikliğinin etkileri, özellikle yarı kurak ve kurak bölgelerde tarımsal üretimi ciddi biçimde tehdit etmektedir. IPCC’nin 2021 raporu, Akdeniz Havzası’nı iklim değişikliğine karşı en hassas “hotspot” bölgelerden biri olarak tanımlamakta ve artan sıcaklıklar ile düzensiz yağış rejimlerinin toprak nemini azaltıp buharlaşmayı artırarak bitkisel üretimde ciddi riskler oluşturduğunu vurgulamaktadır (ipcc.ch). Nitekim Türkiye’de 2024-2025 su yılında Güneydoğu Anadolu ve İç Anadolu bölgelerinde yağışlar uzun yıllar ortalamasına göre %50’ye varan oranda azalmış; bu durum buğday gibi temel ürünlerde %20–35’e varan verim kayıplarına yol açmıştır (surkad.org.tr).

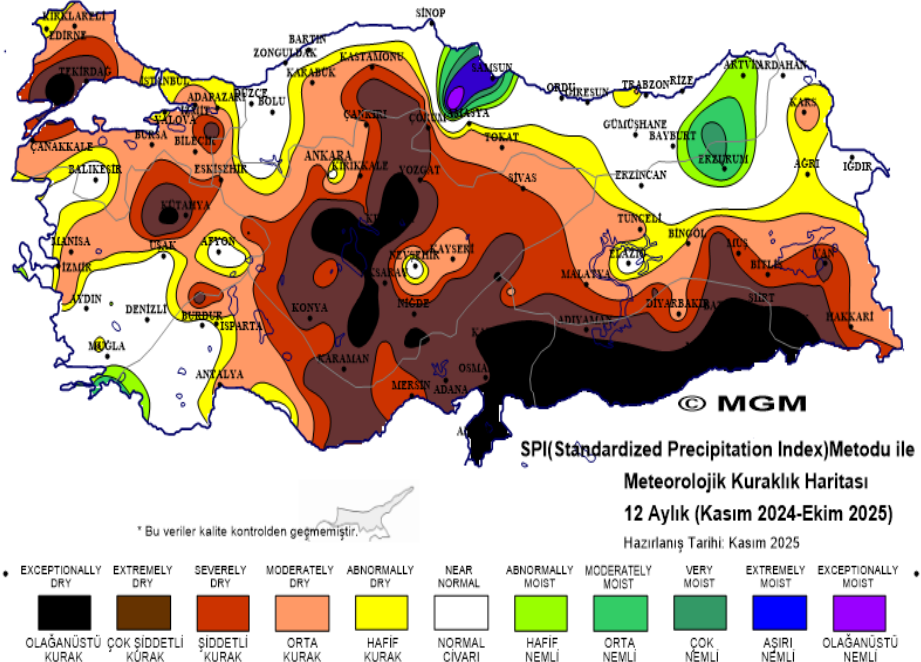
Türkiye, kişi başına düşen yıllık su miktarı ~1340 m³ ile su stresi yaşayan bir ülke olup hızla artan nüfusla 2030’da bu değerin ~1120 m³ seviyesine gerileyeceği tahmin edilmektedir (artemisaritim.com). TÜİK verilerine göre Türkiye’de çekilen suyun yaklaşık %74’ü tarımda, %16’sı sanayide, %10’u içme-kullanma suyunda kullanılmaktadır.

Tablo 1. Türkiye’de su kullanımının sektörlere göre dağılımı (TÜİK, 2024)

Sektör	Su Kullanım Payı (%)	Açıklama
Tarım	74	Sulama, hayvancılık
Sanayi	16	Endüstriyel proses ve soğutma suyu
İçme ve kullanma (belediye)	10	Şebeke suyu, kentsel kullanım
Toplam	100	

“Tablo 1’de görüldüğü üzere Türkiye’de tarım sektöründe kullanılan %74’lük suyun kuraklıkla mücadelede ve verimlilikte kritik rolünü ortaya koymaktadır (TÜİK, 2024).”

Türkiye, kişi başına düşen yıllık su miktarı ~1340 m³ ile su stresi yaşayan bir ülke olup hızla artan nüfusla 2030’da bu değerin ~1120 m³ seviyesine gerileyeceği tahmin edilmektedir. Ülkemizde su tüketiminin sektörel dağılımına bakıldığında ise toplam su kullanımının yaklaşık %74’ü tarım sektöründe gerçekleşmektedir(artemisaritim.com).



Şekil 1: 2024-2025 dönemine ait Meteoroloji Genel Müdürlüğü Standart Yağış İndeksi (SPI) haritası (12 aylık değerlendirme). Haritada Güneydoğu ve İç Anadolu bölgelerinin büyük bölümünde “şiddetli” ve “olağanüstü” kuraklık yaşandığı görülmektedir (MGM, 2025).

Bu tablo, iklim değişikliği kaynaklı kuraklığın etkilerini azaltmak için tarımsal sulamada suyun verimli kullanımının ve mevcut su kaynaklarının korunmasının stratejik önemini ortaya koymaktadır.

Kuraklıkla mücadelede en etkili stratejilerden biri, mevcut suyun etkin korunması ve yönetimidir. Toprakta var olan nemin korunması, su kullanım verimliliğini artırırken bitki stresini azaltır, verim kayıplarını önler ve tarımsal üretimin sürdürülebilirliğine katkı sağlar. Bu nedenle, yeni su kaynakları aramaktan ziyade “mevcut suyu tutmak ve verimli kullanmak” yaklaşımı benimsenmelidir. Aşağıdaki bölümlerde, kuraklığa karşı su kaynaklarının

korunması kapsamında toprakta suyun muhafazası ve akıllı sulama sistemleri ile ilgili bilimsel ve pratik yöntemler, güncel literatürden alınan verilerle birlikte ele alınmaktadır.

Toprakta Suyun Korunmasının Temel İlkeleri

Toprak suyu yönetimi, kuraklıkla mücadelede sürdürülebilir tarımın temel taşlarından biridir. Literatürde toprakta suyun korunmasına yönelik öne çıkan üç temel ilke şöyledir:

1.Toprak yüzeyinden buharlaşmanın azaltılması: Sıcak ve kurak iklimlerde toprak nem kaybının en büyük nedeni buharlaşmadır. Malçlama, bitki örtüsünü koruma ve asgari toprak işleme gibi yöntemler, buharlaşmayı azaltarak suyun toprakta daha uzun süre kalmasını sağlar. Nitekim yüzey örtüsü (malç) uygulamalarının buharlaşmayı %30'a varan oranda azaltabildiği rapor edilmiştir. Buharlaşma kayıplarını azaltmak, bitki kök bölgesinde daha fazla suyun kalmasına imkan tanır ve kurak dönemlerde bitki gelişimini destekler.

2.Toprağın su tutma kapasitesinin artırılması: Toprağın daha fazla su depolayabilmesi için organik madde içeriğinin artırılması, toprak yapısının iyileştirilmesi ve su tutmayı destekleyen katkı maddelerinin kullanılması önerilir. Yapılan çalışmalar, organik madde artışı ve uygun toprak düzenleyicilerin su tutma kapasitesini belirgin biçimde yükseltebildiğini göstermektedir. Örneğin, koruyucu toprak işleme (anız bırakma, münavebe) uygulamaları toprak organik maddesini zenginleştirerek suyun daha uzun süre tutulmasını kolaylaştırır.

3.Yağış ve sulama suyunun infiltrasyonunun iyileştirilmesi: İnfiltrasyon, yağış veya sulama suyunun toprak profiline giriş hızıdır. İyi bir infiltrasyon, yüzey akışını ve erozyonu azaltırken suyun bitki kök bölgesine ulaşmasını maksimize eder. FAO tarafından kurak bölgelerde yapılan değerlendirmelerde, infiltrasyonun artırılmasının özellikle düzensiz yağış rejimine sahip yörelerde verimlilik için kritik olduğu belirtilmektedir. İnfiltrasyonu iyileştirmek, yağın yağmurun yüzeyde akıp gitmek yerine toprakta depolanmasını sağlar.

Yukarıdaki ilkeler hem modern tarımsal teknikleri (örneğin damla sulama, polimer malçlar, vb.) hem de geleneksel yöntemleri (örn. anız örtüsü,

nadas, vb.) kapsar. Dolayısıyla kuraklıkla mücadelede yeni teknolojiler kadar yerel bilgi ve geleneksel uygulamalardan da yararlanılmalıdır. Aşağıda, bu temel ilkelerin her biriyle ilişkili somut yöntemler ve uygulamalar detaylandırılmaktadır.

Toprak Yüzeyinden Buharlaşmanın Azaltılması

Toprak yüzeyinden doğrudan su kaybının önlenmesi, kurak dönemlerde toprağın nemini korumanın ilk adımıdır. Bu kapsamda malçlama, anızın tarlada bırakılması ve agroforestry (tarımsal orman) sistemleri öne çıkan yöntemlerdir.

1.Malçlama (Mulching): Kuraklık koşullarında toprak nemini korumak için en etkili yöntemlerden biri malçlamadır. Malçlama, bitkilerin etrafındaki toprak yüzeyinin organik materyaller (sap, saman, kompost, hasat kalıntıları) veya inorganik materyaller (plastik örtü, çakıl taşları) ile kaplanmasını içerir. Bu sayede toprak yüzeyi doğrudan güneş ışığına ve rüzgâra maruz kalmaz, buharlaşma önemli ölçüde azalır ve toprak daha serin kalır.

Bilimsel araştırmalar, organik malç kullanmanın toprak yüzeyinden buharlaşmayı %25–50 oranında azaltabildiğini göstermektedir. Türkiye koşullarında yapılan bir çalışmada ise buğday sapı ile malçlama uygulamasının toprak sıcaklığını 3–4 °C düşürerek su kaybını yaklaşık %30 azalttığı tespit edilmiştir. Bu bulgular malçlamanın su verimliliğini artırmada ve bitki stresini azaltmada kritik bir rol oynadığını ortaya koymaktadır. Ayrıca malçlama, yağmur damlalarının toprağı dövmesini engelleyerek kabuklanmayı önler, yüzey akışını azaltır ve toprak erozyonunu sınırlayarak toprağın yapısını korur. Organik malçlar zamanla parçalanarak toprağı karıştırdığında toprak organik maddesini artırdığından, uzun vadede toprağın su tutma kapasitesine de katkı sağlar. Bu nedenle malçlama, düşük maliyetli ve uygulanması kolay bir teknik olarak, hem modern tarım işletmelerinde hem de geleneksel tarım sistemlerinde yaygınlaştırılmalıdır.

2.Anızın Tarlada Bırakılması (Anız Yakmama): Hasat sonrası bitki artıklarının (anız) tarlada bırakılması, hem erozyonu engellemek hem de toprak nemini korumak açısından son derece önemli bir uygulamadır. Anız tabakası, tıpkı malç gibi, toprağı güneşin yakıcı etkisinden ve rüzgârın kurutucu gücünden koruyarak buharlaşmayı azaltır; böylece yağış veya sulama ile gelen

suyun toprakta daha uzun süre tutulmasına yardımcı olur. Ayrıca anız, yağış sularının toprağa süzülmesini kolaylaştırarak infiltrasyonu iyileştirir.

FAO'nun Koruyucu Tarım (Conservation Agriculture, 2017) raporuna göre anızın tarlada bırakılması, toprağın nem içeriğini %20–35 oranında artırmaktadır. Yarı kurak iklimlerde bu artış, bitkilerin su verimliliğini yükseltmek açısından büyük önem taşır. Güneydoğu Anadolu Projesi (GAP) bölgelerinde yapılan saha araştırmaları ise anızlı tarlalarda su infiltrasyon hızının anız yakılan tarlalara kıyasla yaklaşık 2 kat arttığını göstermiştir. Bu sonuç, anız örtüsünün suyun korunmasına ek olarak toprak yapısını iyileştirerek yağış sularının bitki kök bölgesine daha etkin ulaşmasına katkı sağladığını ortaya koymaktadır. Dolayısıyla anız yakmanın kesin olarak engellenmesi ve hasat artıklarının tarlada bırakılması, hem modern koruyucu tarımın hem de geleneksel tarım yöntemlerinin vazgeçilmez bir parçası olmalıdır. Bu yaklaşım, kuraklıkla mücadelede benimsediğimiz “mevcut suyu tutmak ve verimli kullanmak” ilkesini doğrudan desteklemektedir.

3.Agroforestry Sistemleri (Tarlada Ağaçlık Alanlar):

Agroforestry, tarımsal alanlarda ağaç ve çalılar entegre ederek çok katmanlı bir üretim sistemi oluşturulmasını ifade eder. Bu sistemler, kuraklıkla mücadelede toprak nemini korumak açısından en etkili yöntemlerden biri olarak kabul edilmektedir. Tarla kenarlarına veya içine dikilen rüzgâr perdeleri (barınak ağaçları) ve gölge sağlayan ağaçlar, toprağın doğrudan güneş ve rüzgâr etkisiyle kurumasını engeller. Ağaçların yarattığı kısmi gölgelenme ile *mikroklima* düzenlenir; böylece toprak buharlaşma kayıpları azalır ve nem daha uzun süre muhafaza edilir.

Dünya Agroforestry Merkezi (ICRAF) tarafından yayımlanan 2016 tarihli bir rapora göre, tarımsal alanlarda gölge sağlayan ağaçların varlığı toprak yüzeyinden buharlaşmayı %12–27 oranında azaltmaktadır. Bu önemli azalma, özellikle yarı kurak bölgelerde su verimliliğini artırmak için agroforestry uygulamalarının ne denli kritik olabileceğini göstermektedir. Örneğin Türkiye’de bağ ve zeytinlik gibi geleneksel tarım sistemlerinde, sıra aralarına örtü bitkileri ekilmesi veya alan içinde belirli noktalarda ağaç bulundurulmasıyla toprağın neminin arttığı ve su tutma kapasitesinin yükseldiği gözlemlenmiştir.

Agroforestry uygulamaları, suyun korunmasının yanı sıra pek çok yan faydaya da sahiptir: Toprağın organik madde ve besin içeriğini zenginleştirir, biyolojik çeşitliliği destekler ve tarımsal ekosistemlerin iklim değişikliğine karşı dirençli olmasına yardımcı olur. Bu nedenlerle, özellikle kurak ve yarı kurak bölgelerde tarla ağaçlandırma ve gölgelendirme tekniklerinin yaygınlaştırılması, sürdürülebilir tarım politikalarının önemli bir bileşeni olmalıdır (Davies, W. et al. (2000).

Toprağın Su Tutma Kapasitesinin Artırılması

Toprağın su tutma kapasitesini yükseltmek, kuraklık şartlarında alınabilecek en önemli önlemlerden biridir. Toprağın daha fazla su depolamasını sağlamak, yağış veya sulama ile verilen suyun boşa gitmeden bitkilerin kullanımına sunulması demektir. Bu amaçla öne çıkan yaklaşımlar: organik madde miktarını artırmak, azaltılmış toprak işleme (mümkün olduğunca toprağı gevşek bırakma) ve toprak düzenleyici katkıları kullanmaktır. Aşağıda, bu yöntemlerin su tutma kapasitesine etkileri ele alınmaktadır.

Tablo 2. Toprak Tiplerine Göre Su Tutma Kapasitesi

Toprak Tipi	Su Tutma Kapasitesi (mm/m)	Açıklama
Kumlu	50–100	Düşük organik madde, hızlı drenaj
Tınlı	150–250	Tarım için ideal, dengeli yapı
Killi	300–450	Yüksek su tutma, ancak düşük infiltrasyon

Tablo 2, farklı toprak tiplerinin doğal su tutma potansiyelini göstermektedir. Kumlu topraklar geniş gözenekli yapıları nedeniyle suyu tutmakta zorlanır ve su hızla drene olurken, killi topraklar çok daha fazla su tutabilir fakat bu kez de suyun infiltrasyonu (içeri sızması) yavaş olur. Tarımsal üretim için ideal olan tınlı topraklar ise orta düzeyde su tutma ve iyi drenaj

özellikleriyle dengeli bir yapı sunar. Ancak, toprak tipi ne olursa olsun, uygulanacak iyi tarım pratikleriyle su tutma kapasitesini artırmak mümkündür.

1.Organik Madde Miktarının Artırılması: Toprak organik maddesi, su tutma kapasitesini belirleyen en önemli faktörlerden biridir. Organik madde (humus), sünger gibi davranarak ağırlığının katbekat fazlası suyu emip depolayabilir. Toprakta organik madde oranı arttığında, toprak yapısı iyileşir, gözenekli yapı artar ve suyun tutulması kolaylaşır.

Tablo 3. Toprak organik madde düzeyi ile su tutma kapasitesi arasındaki ilişki (USDA, 2014)

Organik Madde (%)	Tahmini Ek Su Tutma (mm/ha)	Açıklama
0,5	Referans seviye	Türkiye’de yaygın düşük OM düzeyi
1,5	+25	≈ %1’lik artış ≈ +25 mm/ha
2,5	+50	Artan OM ile su deposu etkisi belirginleşir
3,5	+75	Humusça zengin toprak, kuraklığa daha dayanıklı

Birleşmiş Devletler Tarım Bakanlığı’nın (USDA) *Soil Health* rehberine göre toprağın organik madde oranındaki her %1’lik artış, toprak tarafından tutulabilen su miktarını hektar başına yaklaşık 25 ton (25 mm) artırabilmektedir. Bu çarpıcı istatistik, organik maddenin su depolama kapasitesi üzerindeki etkisini ortaya koymaktadır.

Türkiye topraklarının maalesef büyük bir kısmında (%60’tan fazlasında) organik madde oranı %1’in altındadır. Dolayısıyla organik maddeyi zenginleştirici uygulamalar kritik öneme sahiptir. Bu amaçla çürümüş çiftlik gübresi, kompost, yeşil gübre (ara ürünlerin toprağa karıştırılması) gibi uygulamalar yaygınlaştırılmalıdır. Bu yöntemler toprağın verimliliğini artırırken aynı zamanda suyun toprakta tutulmasına da büyük katkı sağlamaktadır. Toprak organik maddesinin artırılmasıyla kurak dönemlerde

bitkilerin kök bölgesinde daha uzun süre nem bulunması mümkün olacak, böylece sulama ihtiyacı ve kuraklığın bitkiye zararı azaltılacaktır.

2.Azaltılmış Toprak İşleme (Konservasyon Tarım): Toprağın sık sık ve derin sürülmesi, organik madde kaybına ve toprak yapısının bozulmasına yol açarak su tutma kapasitesini düşürebilir. Bu nedenle azaltılmış toprak işleme veya toprak işlemez tarım (no-till) uygulamaları, suyun toprakta daha etkin tutulması için önerilir. Toprak işlemeyi azaltmak, toprağın doğal yapısını korur, sıkışmayı engeller ve yağış sularının toprağa girişini hızlandırır.

Yapılan karşılaştırmalı araştırmalar, geleneksel sürüm yerine *no-till* (hiç sürmeden ekim) sistemlerinin toprağın su içeriğini %10–15 daha yüksek seviyede tutabildiğini göstermektedir. Govaerts ve arkadaşlarının (2009) Orta Meksika yaylalarında yürüttüğü çalışmada, yılda bir defa sürülen tarlalara kıyasla hiç sürülmeyen tarlalarda toprak neminin ortalama %12 civarında daha fazla olduğu rapor edilmiştir. Benzer şekilde Türkiye’de Konya ovası gibi yarı kurak bölgelerde yürütülen konservasyon tarım denemelerinde, anızlı alanlarda ekim yapan çiftçilerin tarlalarında nemin daha uzun süre kaldığı belirlenmiştir. Azaltılmış toprak işleme, aynı zamanda traktör yakıt maliyetlerini düşürmesi ve karbon emisyonlarını azaltması gibi ek faydalar da sağlar. Sonuç olarak, toprağı gereksiz yere işlememek, hem toprağın su tutma kapasitesini hem de genel tarımsal sürdürülebilirliği olumlu yönde etkileyen bir yaklaşımdır.

3.Toprak Düzenleyiciler (Polimer, Jips, Zeolit vb.): Toprağın fiziksel yapısını iyileştirmek ve su tutma kapasitesini yükseltmek amacıyla toprak düzenleyici malzemelerin kullanımı da önem taşır. Bu malzemeler arasında su tutucu polimerler (hidrojeller), jips (alçı taşı) ve doğal mineraller (ör. zeolit) yaygın olarak kullanılmaktadır. Özellikle hafif bünyeli, kumlu topraklarda veya organik maddece fakir alanlarda bu düzenleyiciler büyük fayda sağlayabilir.

Örneğin, doğal bir aluminosilikat minerali olan zeolit parçacıkları, toprakta bir rezervuar gibi davranarak ağırlığının bir kaç katı suyu emebilir ve yavaşça serbest bırakabilir. Yapılan çalışmalar, zeolit uygulamalarının toprakların su tutma kapasitesini %20–35 oranında artırabildiğini göstermektedir. Yine sodik (sodyumca zengin) alkali topraklarda kullanılan jips, toprak yapısını düzelterek geçirgenliği artırır. Jips uygulaması ile toprağın infiltrasyon hızı yükselir, böylece yağmur veya sulama suyu daha

hızlı bir şekilde alt katmanlara inerek bitki köklerine ulaşabilir. Su tutucu polimerler ise toprağa karıştırıldığında suyu jelleştirerek tutar ve toprak kurudukça bu suyu geri vererek adeta bir depo vazifesi görür. Bu polimerler küçük ölçekli bahçe tarımında dahi artık popüler hale gelmiştir (Shainberg, I., & Levy, G. (1984).

Toprak düzenleyicilerinin bilinçli ve doğru dozlarda kullanımı, kurak koşullarda tarımsal üretimin su yönetimine önemli bir destek sağlar. Ancak, her toprak düzenleyicinin her koşulda uygun olmayabileceği, toprak analizi yapıldıktan sonra ihtiyaçlara göre kullanılmaları gerektiği unutulmamalıdır.

Yağış Suyunun Etkin Kullanımı ve İnfiltrasyonun Artırılması

Kuraklıkla mücadelede bir diğer kritik adım, yağış suyunun boşa akıp gitmesini önleyip toprakta depolanmasını sağlamaktır. Düşen yağışların her damlasından azami faydayı sağlamak için infiltrasyonu artırıcı ve yüzey suyu hasadı yöntemleri uygulanır. Özellikle eğimli arazilerde yağış suyu hızla akışa geçip bölgeyi terk etme eğilimindedir; bunu engellemek için suyu tutan fiziksel tedbirlere ihtiyaç vardır. Bu kapsamda en çok önerilen uygulamalar yüzeyde kabuklanmanın önlenmesi ile mikrohavuz, teras ve kontur sürüm teknikleridir.

1. Yüzey Kabuklanmasının Önlenmesi: Kurak ve yarı kurak bölgelerde sık rastlanan bir problem, yağmur sonrası toprağın üstünde oluşan ince sert kabuk tabakasıdır. Bu yüzey kabuklanması, toprağın su geçirimsizliğini ciddi ölçüde düşürür; yağmur suları bu sert tabakayı aşamadığından toprak içine sızamaz ve yüzey akışına geçer. Sonuç olarak suyun önemli bir kısmı bitkilere fayda sağlamadan kaybolur, ayrıca yüzey akışı erozyonu tetikleyerek toprak kaybına yol açar.

Yüzey kabuklanmasını önlemenin en etkili yolu, toprak yapısını iyileştirici uygulamalarla toprağı çıplak bırakmamaktır. Organik madde uygulamaları (kompost, gübre), azaltılmış toprak işleme ve malç kullanımı, kabuklanmayı büyük ölçüde engeller. Organik maddenin artırılması toprak agregatlarının stabilitesini yükselttiğinden, yağmur damlalarının toprağı parçalayıp çamur tabakası oluşturması zorlaşır. Malç veya bitki örtüsü ise yağış damlalarının doğrudan toprağa çarpmasını önleyerek kabuk oluşumunu minimize eder. Yapılan araştırmalarda bu yöntemlerin birlikte kullanımının, kabuklanma eğilimini belirgin şekilde azalttığı gösterilmiştir. Shainberg ve Levy'nin (1994) klasik çalışmasında, organik madde takviyesi ve malçlama

uygulanan alanlarda suyun toprağa girişinin çıplak toprağa kıyasla çok daha etkin gerçekleştiği rapor edilmiştir. Bu tip uygulamalar sayesinde yağın yağmurun önemli bir kısmı toprağa nüfuz ederek bitki kök bölgesine ulaşabilir.

2.Mikrohavuzlar, Teraslar ve Kontur Sürüm: Eğimli arazilerde yağış suyunu arazide tutmanın en başarılı yöntemleri mikrohavuz (göletçikler) açmak, teraslama yapmak ve konturlara göre sürüm tekniğini uygulamaktır. Mikrohavuzlar, tarla içerisinde veya yamacın uygun noktalarında oluşturulan küçük çukur veya setlerdir; yağmur yağdığında su bu çukurda birikerek yavaş yavaş toprağa sızar. Benzer şekilde teraslama, eğimli arazilerde toprağın basamaklar halinde düzenlenmesiyle suyun akış hızını keser ve infiltrasyona zaman tanır.

Kontur (iz) sürümü, arazinin eğimine dik doğrultuda sürüm yapma prensibine dayanır. Tarla, eğim yönünde değil de yatay (izohips) doğrultuda sürülürse, oluşan ince sürüm setleri suyun yamaçtan aşağı akışını engeller ve su bir süre için tutulur. Türkiye’de özellikle Güneydoğu Anadolu’da kontur sürüm uygulamasının, aynı arazide geleneksel (eğim yönünde) sürüme kıyasla toprak nemini belirgin ölçüde yüksek tuttuğu tespit edilmiştir. FAO’nun su hasadı tekniklerine ilişkin 2015 raporunda, kontur sürüm uygulamasının yağmur suyunun toprağa infiltrasyonunu %30–50 oranında artırdığı, teraslamanın ise bu oranı %40–80’e kadar çıkardığı belirtilmektedir. Bu veriler, eğimli arazilerde topografyayı şekillendirerek ve suyun akışını yavaşlatarak önemli miktarda suyun toprağa kazandırılabilceğini göstermektedir.

Bu yöntemlerin tamamı, yüzey akışını azaltıp erozyonu önlerken yağış sularının bitki kök bölgesine yönelmesini sağlar. Böylece yağmurun tarımsal üretime katkısı maksimize edilmiş olur. Kuraklıkla mücadelede, özellikle yağış az ve düzensiz alanlarda, mikrohavuz, teraslama ve kontur sürüm tekniklerinin uygun teşviklerle yaygınlaştırılması büyük fayda sağlayacaktır (Eslamian, Saeid, and Faezeh A. Eslamian, 2021).

Akıllı Sulama Sistemleri ve Dijital Tarım Teknolojileri

Kuraklık şartlarında su kaynaklarının korunmasında, geleneksel yöntemlerin yanı sıra modern sulama teknolojileri ve dijital tarım uygulamaları da devreye girerek önemli kazanımlar sağlamaktadır. Sulama sistemlerinde verimliliği artırmaya yönelik yenilikler, sınırlı suyu daha etkin kullanarak birim su başına daha fazla ürün alınmasına imkan tanımaktadır. Bu bölümde, damla

sulama, kısmi kök kurutma (PRD) ve toprak nem sensörleri ile otomasyon gibi akıllı sulama yaklaşımları ele alınmıştır.

1. Damla Sulama ve Kısmi Kök Kurutma (PRD): Modern sulama yöntemleri içinde su tasarrufu bakımından en etkililerden biri damla sulama sistemleridir. Damla sulamada su, borular ve damlatıcılar vasıtasıyla doğrudan bitkilerin kök bölgesine yavaş ve kontrollü bir şekilde verilir. Böylece geleneksel salma (karık veya tava) sulamaya kıyasla su kayıpları asgariye iner. Yapılan araştırmalar, damla sulama sistemlerinin su kullanım verimliliğini geleneksel yüzey sulamaya göre %40–60 oranında artırdığını ortaya koymaktadır. Başka bir ifadeyle, aynı miktar su ile damla sulama sayesinde neredeyse yarı yarıya daha fazla alan sulanabilir veya aynı alan için yarı yarıya daha az su tüketilebilir. Bu, kurak bölgeler için hayati bir kazanımdır (Karaşahin (2018).

Tablo 4 Farklı sulama yöntemlerinde su kullanım verimliliği ve kayıplar (Feres & Soriano, 2007)

Sulama Yöntemi	Su Kullanım Verimliliği (%)	Su Kayıpları (buharlaşma, sızma, akış)	Uygulama Özelliği
Salma (yüzey)	35–45	Yüksek	Açık kanallar, tesviye kritik
Yağmurlama	55–70	Orta	Büyük parseller, basınçlı sistem
Damla sulama	80–90	Düşük	Su doğrudan kök bölgesine, yüksek yatırım
Damla + sensörlü PRD	85–95	Çok düşük	Otomasyon ve PRD ile hedefli sulama

Tablo 4’e göre salma sulamadan damla sulamaya geçişle su kullanım verimliliği yaklaşık iki katına çıkmakta; sensör destekli PRD uygulamaları ile birim su başına alınan verim daha da yükselmektedir.

Damla sulamanın bir ileri adımı olarak geliştirilen Kısmi Kök Kurutma (Partial Rootzone Drying, PRD) tekniği ise bitki köklerinin bir kısmının sulanıp

diğer kısmının geçici olarak kuru bırakılması esasına dayanır. PRD yönteminde, bitkinin kök bölgesi iki kısma ayrılır ve sulama her seferinde bu iki kısımdan sadece birine uygulanır (diğer kısım kuru tutulur); belirli bir süre sonra kuru kalan kısım sulanırken, bu kez diğer kısım kuru bırakılır. Bu dönüşümlü sulama yaklaşımı, bitkide hafif bir su stresi oluşturarak suyu daha tutumlu kullanmasını teşvik eder. Bitki, köklerinin bir bölgesi suya erişebildiği için tamamen strese girmese de, diğer kök bölgesinin kuruluğu hormonal sinyallerle su tasarrufu mekanizmalarını harekete geçirir. Yapılan çalışmalar PRD uygulamasının, klasik tam sulamaya kıyasla su verimliliğini yaklaşık %20 oranında artırdığını göstermiştir (Li et al. (2013). Özellikle meyve bahçeleri ve bağlarda PRD tekniği ile su tasarrufu sağlanırken verimde önemli bir düşüş olmaması, bu yöntemin çekiciliğini artırmaktadır.

2.Toprak Nem Sensörleri ve Akıllı Sulama Otomasyonu: Dijital tarım teknolojileri, “akıllı sulama” kavramını tarımsal pratiğe kazandırmış ve suyun doğru zamanda, doğru miktarda kullanılabilmesini mümkün kılmıştır. Özellikle toprak nem sensörleri, otomatik sulama sistemleri ve IoT (Nesnelerin İnterneti) tabanlı izleme cihazları, tarladaki nem durumunu gerçek zamanlı takip ederek sulama kararlarını bilimsel veriye dayandırmayı sağlar (Polat, E. et al. (2017).

Toprak nem sensörleri, belirli derinliklerde toprağın su içeriğini ölçerek çiftçiye veya otomasyon sistemine bildirimde bulunur. Bu sayede “ne zaman ve ne kadar sulama yapılmalı?” sorusu, hissiyata veya takvime göre değil, veriye göre cevaplanır. Tablo 5 de görüldüğü üzere toprak nem sensörü kullanılan ve kullanılmayan parsellerde su tüketimi ve verim ilişkisi verilmiştir. Gelişmiş otomatik sulama sistemleri, sensörlerden gelen veriler belirli eşik değerlerin altına düştüğünde sulamayı kendiliğinden başlatıp yeterli seviyeye ulaştığında durdurabilmektedir. Bu teknolojiler, aşırı veya yetersiz sulamanın önüne geçerek suyu israf etmez ve bitkilerin strese girmesini engeller.

Tablo 5. Toprak nem sensörü kullanılan ve kullanılmayan parsellerde su tüketimi ve verim.

Uygulama	Su Tüketimi (m ³ /ha)	Bağıl Su Tüketimi (%)	Verim (t/ha)	Birim Su Başına Verim (kg/m ³)
Çiftçi uygulaması (takvim)	1000	100	6,0	6,0
Sensör destekli sulama	650–750	65–75	5,8–6,2	7,7–8,9

Toprak nem sensörleriyle yönetilen sulama programlarında, su tüketiminin %25–35 oranında azaldığı, buna karşın verimde önemli bir düşüş olmadığı, hatta birim su başına verimin yükseldiği bildirilmiştir.

Araştırmalar, toprak nem sensörleriyle desteklenen akıllı sulama sistemlerinin geleneksel yöntemlere göre %25–40 arasında su tasarrufu sağladığını göstermektedir. Fereres ve Soriano (2007) tarafından yapılan bir değerlendirmede, iklim ve bitki ihtiyaçlarına göre planlanan *defisit sulama* ve sensör destekli sulama stratejileriyle birim suyla alınan verimin belirgin biçimde yükseltildiği belirtilmiştir. Akıllı sulama otomasyonu, özellikle suyun kısıtlı olduğu yarı kurak bölgelerde tarımsal üretimin sürdürülebilirliği açısından kritik öneme sahiptir. Bu sistemler sayesinde hem su faturaları düşmekte hem de su kaynakları üzerindeki baskı azalmaktadır.

Elbette, bu teknolojilerin çiftçi tarafından benimsenmesi ve kullanımı için eğitim ve başlangıç maliyeti gibi faktörler söz konusudur. Ancak uzun vadede sağlanan su ve enerji tasarrufu, yatırımı fazlasıyla geri ödemektedir. Tarım sektörü paydaşlarının ve devlet destek programlarının, akıllı sulama teknolojilerinin yaygınlaşmasına yönelik teşvik edici adımlar atması, kuraklıkla mücadelede önemli bir adımdır.

Arazi Ölçeğinde Kuraklıkla Mücadele Önerileri

Kuraklıkla mücadelenin başarılı olabilmesi için sadece tarlada uygulanan teknik önlemler değil, aynı zamanda arazi ölçeğinde planlama, politika ve destek mekanizmalarının da devreye sokulması gerekmektedir. Aşağıda, bilimsel bulgulara ve ulusal/uluslararası kurumların raporlarına dayanan temel politika ve uygulama önerileri sıralanmıştır:

- **Anız yakmanın kesin olarak engellenmesi ve organik madde yönetimi politikalarının geliştirilmesi:** FAO'nun raporlarına göre anızın tarlada bırakılması, toprağın nemini %20–35 oranında artırmaktadır. Bu nedenle, anız yakmanın yasal ve pratik tedbirlerle tamamen önüne geçilmeli; çiftçilerin anızı değerlendirmesi (ör. toprağa karıştırma, malç olarak kullanma) teşvik edilmelidir. Ayrıca organik gübre kullanımı ve anızın işlenmesi konularında farkındalık artırılmalı, toprak organik maddesini yükseltici politikalar (örneğin, yeşil gübre bitkileri eken çiftçiye destek gibi) geliştirilmelidir.

- **GAP bölgesinde ekim nöbetine (münavebeye) baklagillerin zorunlu entegrasyonu:** Baklagil bitkileri (mercimek, nohut, fiğ vb.), köklerindeki simbiyotik bakteriler sayesinde havadaki azotu fikse ederek toprağa kazandırır. Bu sayede toprağın verimliliğini artırırken aynı zamanda genellikle suyu daha verimli kullanırlar. GAP bölgesi gibi kuraklığa hassas alanlarda ürün desenine baklagillerin dâhil edilmesi, toprağın dinlenmesi ve su verimliliğinin artması açısından faydalı olacaktır. Nitekim bölgedeki araştırmalar, münavebe sistemine baklagillerin eklenmesinin hem su verimliliğini hem de ürün verimini desteklediğini göstermektedir. Bu doğrultuda, örneğin her 2-3 yılda bir, buğday/pamuk gibi ana ürünlerin arasına baklagil ekilmesi teşvik edilebilir.

- **Çiftçilere toprak nem sensörleri ve akıllı sulama sistemleri için destek sağlanması:** Dijital sulama teknolojilerinin başlangıç maliyeti yüksek olabilmektedir. Ancak su tasarrufu potansiyeli göz önüne alındığında, bu teknolojilerin yaygınlaşması ulusal çıkaradır. Fereres & Soriano (2007) çalışmasında, akıllı sulama sistemlerinin su tüketimini %25–40 azalttığını belirtilmiştir. Bu çerçevede, çiftçilere toprak nem sensörleri, otomatik vana ve kontrol sistemleri gibi akıllı sulama ekipmanlarını temin etmeleri için maddi destek (hibe, düşük faizli kredi) verilmesi önerilir. Ayrıca bu sistemlerin kullanımı konusunda eğitim programları düzenlenerek maksimum fayda sağlanmalıdır.

- **Taş malçlama ve çakıllı yüzey örtüsü uygulamalarının yaygınlaştırılması:** Özellikle bağ, zeytinlik gibi geniş sıra arası alanı bulunan ve yıllık ekim yapılmayan tarım alanlarında, toprak yüzeyinin taş veya

çakıllarla malçlanması buharlaşmayı ciddi oranda azaltan bir yöntemdir. Organik malçlara alternatif olarak çakıl malçlama, çok yıllık bitkilerde uzun vadeli bir çözüm sunar. Araştırmalar, organik malç uygulamalarının buharlaşmayı %25–50 oranında azalttığını ortaya koymaktadır. Benzer şekilde, çakıllı/taşlı malçların özellikle yamaç arazilerde toprak nemini korumada etkili olduğu gözlemlenmiştir. Bu yöntemin uygun olduğu bölgelerde demonstrasyon projeleri yapılarak çiftçiler arasında yaygınlaşması teşvik edilmelidir.

• **Eğimli alanlarda teraslama ve kontur sürümün desteklenmesi:** Eğimli tarım arazilerinde yağış suyunu tutmak için teraslama ve kontur sürümün önemi büyüktür. FAO (2015) verilerine göre kontur sürüm uygulaması, yağmur suyunun toprağa girişini %30–50, teraslama ise %40–80 oranında artırabilmektedir. Bu nedenle engebeli arazilerde erozyon kontrolü ve su hasadı amacıyla teras yapımı ile konturlama çalışmalarının devlet destek programlarına alınması önerilir. Özellikle dağ köylerinde veya yüksek eğimli tarlalarda yaşayan çiftçilere, teras yapımı için makine desteği veya sübvansiyon sağlanabilir.

• **Yerel tohum ve kuraklığa dayanıklı çeşit kullanımının teşvik edilmesi:** Her bölgenin yerel tohumları ve geleneksel çeşitleri, o bölgenin iklimine binyıllardır adapte olagelmıştır. Bu nedenle yerel çeşitler, kuraklık stresine karşı çoğu zaman daha toleranslı olabilir. ICRAF’ın 2016 raporu, agroforestry uygulamalarıyla birlikte yerel bitki çeşitlerinin kullanımının iklim değişikliğine dirençli üretim sistemleri geliştirmede önemli bir araç olduğunu belirtmektedir. Tohumculuk politikalarında, bölgelerin yerel kurakçıl çeşitlerini koruma ve çiftçilere temin etme yönünde adımlar atılmalı; çiftçiler yerel tohum kullanımı konusunda bilinçlendirilmelidir. Ayrıca yeni geliştirilen kuraklık-toleranslı tohum çeşitlerinin (örn. kuraklığa dayanıklı buğday, mısır vb.) demonstrasyonu yapılarak üreticiler tarafından benimsenmesi sağlanabilir.

• **Tarımsal kuraklık eylem planlarında toprak suyu yönetimine ayrı bir başlık açılması:** Ulusal ve bölgesel kuraklık eylem planları hazırlanırken, toprakta suyun korunması hususu stratejik bir konu olarak ön plana çıkarılmalıdır. IPCC (2021) raporu, Akdeniz Havzası’nın iklim değişikliğine karşı en kırılgan bölgelerden biri olduğunu vurgulayarak mevcut

su kaynaklarının korunması için etkin planlama yapılmasını önermektedir. Bu doğrultuda, Tarım ve Orman Bakanlığı'nın kuraklıkla mücadele planlarında "Toprakta Su Koruma ve Verimlilik" başlıklı özel bir bölüm yer alması, konuya verilen önemi göstermesi açısından değerlidir. Böylece politika düzeyinde, sulama altyapısı yatırımları kadar tarla içi su koruma uygulamaları da teşvik edilebilir.

Yukarıdaki öneriler, kuraklık tehdidinin azaltılması için bütüncül bir yaklaşım sunmaktadır. Hem çiftçi düzeyinde alınacak önlemler hem de devlet politikaları birlikte uygulanırsa, tarım sektörü iklim değişikliğinin getirdiği zorluklara karşı daha dayanıklı hale gelecektir.

Sonuç

İklim değişikliği ile birlikte tarımsal kuraklık artık geleceğin değil, bugünün gerçeği haline gelmiştir. IPCC raporlarında da vurgulandığı üzere Akdeniz Havzası, artan sıcaklık ve azalan yağış eğilimleri nedeniyle iklim krizine karşı en kırılgan bölgelerden biridir. Türkiye ise yarı kurak coğrafyalarıyla bu etkinin merkezinde yer almakta, özellikle Güneydoğu Anadolu Bölgesi tarımsal üretimde ciddi risklerle karşı karşıya kalmaktadır.

Bu nedenle, toprakta suyun korunması ve mevcut suyun akıllıca kullanılması yalnızca çevresel bir gereklilik değil, aynı zamanda ülkemiz tarımının ayakta kalması için stratejik bir önceliklidir.

Ele aldığımız yöntemlerin çoğu – malçlama, anızın tarlada bırakılması, gölgeleme bitkileri (agroforestry), organik madde artırımı, azaltılmış toprak işleme, toprak düzenleyicileri, teraslama, kontur sürüm ve modern sulama teknolojileri – uygulanması görece kolay, maliyeti düşük ve ekosistem dostu tekniklerdir. Bu uygulamaların yaygınlaştırılması, özellikle kuraklığa maruz kalan Güneydoğu Anadolu gibi bölgelerde hem su kaynaklarının korunmasına hem de tarımsal verimliliğin sürdürülebilirliğine büyük katkı sağlayacaktır.

FAO ve USDA gibi uluslararası kurumların raporları da bu yöntemlerin su verimliliğini artırmada ve kuraklıkla mücadelede etkin olduğunu teyit etmektedir.

Sonuç olarak, kuraklıkla mücadelede temel paradigma değişikliği şarttır:

- "Daha fazla su getirmek" yerine "mevcut suyu tutmak ve akıllıca kullanmak" anlayışı benimsenmelidir.

- Tarım sektörü, bu bakış açısıyla gerek tarlada gerekse politika düzeyinde dönüşüm geçirirse, iklim değişikliğinin zorlu koşullarına rağmen gıda güvenliğini korumak mümkün olacaktır.

Bugün yaşadığımız kuraklık koşulları artık olağanüstü değil, yeni normaldir. Bu nedenle tarlada alınacak küçük ama etkili önlemler, hem sizin ürün veriminizi hem de ülkemizin gıda güvenliğini doğrudan etkilemektedir.

Sevgili üreticiler, sizden istegimiz:

- Anız yakmayın, toprağı karıştırarak toprağı koruyun.
- Malçlama ve organik madde artırımını yaparak nemi tutun.
- Basınçlı sulama sistemlerine geçerek %30–35 su tasarrufu sağlayın.
- Havzanızda birlikte su yönetiminde dayanışma gösterin.

Unutmayın: Su, geleceğimizin en değerli ürünü. Onu korumak, hem sizin emeğinizin karşılığını almak hem de çocuklarımızın sofralarını güvence altına almak demektir.

KAYNAKLAR

- Conservation Agriculture, 2017.
<https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/d571cf1a-7ff4-4565-8af9-eb25d198b41a/content>
- Davies, W. et al. (2000). Differential Screening Indicates a Dramatic Change in mRNA Profiles during Grape Berry Ripening. Cloning and Characterization of cDNAs Encoding Putative Cell Wall and Stress Response Proteins, Plant Physiology, Plant Physiology, Vol. 122, No. 3 (Mar., 2000), pp. 803-812 Published by: Oxford University Press.
- Eslamian, Saeid, and Faezeh A. Eslamian, eds. *Handbook of Water Harvesting and Conservation*. John Wiley & Sons, Incorporated, 2021.
- Fereres & Soriano, 2007, Deficit irrigation for reducing agricultural water use, Journal of Experimental Botany, Vol. 58, No. 2, pp. 147–159, 2007 Integrated Approaches to Sustain and Improve Plant Production under Drought Stress Special Issue doi:10.1093/jxb/erl165 Advance Access publication 6 November, 2006
- Govaerts*, B., N. Verhulst*, A. Castellanos-Navarrete, K. D. Sayre, J. Dixon, and L. Dendooven. 2009. “Conservation Agriculture and Soil Carbon Sequestration: Between Myth and Farmer Reality.” Critical Reviews in Plant Sciences 28 (3): 97–122. doi:10.1080/07352680902776358.
<https://surkad.org.tr/bulten/iklim-degisikligi-ve-turkiyede-son-aylarda-yasanan-kurakligin-gidaya-erisim-uzerindeki-etkileri/#:~:text=2024%E2%80%932025%20y%C4%B1llar%C4%B1nda%20G%C3%BCneydo%C4%9Fu%20ve%20%C4%B0%C3%A7,MGM%2C%2025>
- <https://www.artemisaritim.com/turkiye-genelinde-su-kaynaklarinin-durumu#:~:text=Tar%C4%B1m%20sekt%C3%B6r%C3%BC%20,11%E2%80%99i%20sanayi%20i%C3%A7in%20kullan%C4%B1m%C4%B1%C5%9Ft%C4%B1r>
- ipcc.ch, Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli IPCC Sixth Assessment Report 2021.
- Karaşahin, Muhammed, Özgür Dünder ve Ahmet Samancı. "Tarımda verimi artırmanın ve maliyeti düşürmenin yolu: Akıllı sulama ve

- gübreleme." *Türk Tarım-Gıda Bilimi ve Teknolojisi Dergisi* 6.10 (2018): 1370-1380.
- Li, Lijuan, et al. "The flexible global ocean-atmosphere-land system model, Grid-point Version 2: FGOALS-g2." *Advances in Atmospheric Sciences* 30.3 (2013): 543-560.
- MGM (2025), Türkiye İklim Raporu.
- POLAT, TAŞKIN, et al. "Effects of mepiquat chloride applications on non-oilseed sunflower." *Turkish journal of agriculture and forestry* 41.6 (2017): 472-479.
- Shainberg, I., Emerson, WW ve Keren, R. (1984). Kimyasal Reaksiyon ve Toprak Fiziksel Özelliklerinin Kontrolü. *Sulama Altında Toprak Tuzluluğu: İşlemler ve Yönetim* (s. 49-99). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- surkad.org.tr, Sürdürülebilir Kalkınma ve Kent Araştırmaları Derneği, "Türkiye'nin İklim Hedefleri ve Mevcut Politikalarının 1,5°C Uyumlu Senaryolar ile Karşılaştırılması" Dünya Demokrasi Platformu Raporu, 4-7 Kasım 2025.
- Tarım ve Orman Bakanlığı (2025), https://www.tarimorman.gov.tr/TAGEM/Belgeler/yayin/Tar%C4%B1msal%20Sulama%20SPB_2021-2025.pdf
- TÜİK (2024), <https://data.tuik.gov.tr/Kategori/GetKategori?p=Tarim-111>
- USDA, 2014, <https://www.ers.usda.gov/topics/farm-bill/2014-farm-bill/organic-agriculture>

BÖLÜM 12

İKLİM DEĞİŞİKLİĞİNE KARŞI KARBON TARIMI

Dr. Öğr. Üyesi. Hülya SAYĞI ^{1*}

DOI: <https://www.doi.org/10.5281/zenodo.17966632>

^{1*}Çukurova Üniversitesi Yumurtalık Meslek Yüksekokulu, Bitkisel ve Hayvansal
Üretim Bölümü, Adana, Türkiye
husaygi@gmail.com, ORCID:<https://orcid.org/0000-0002-2327-566X>

1. GİRİŞ

Tarımsal üretimi yakından etkileyen bir dizi sorunun kaynağı olan iklim değişikliği sürecinde tarım hem sorunun oluşmasına katkıda bulunan bir unsuru hem de çözümün hayati bir parçasıdır. Tarım iklim değişikliğine neden olan önemli bir faktör olan sera gazı emisyonlarının (SGE) yaklaşık %20'si tarımsal üretim sürecinde kullanılan enerji kaynağı fosil yakıtlar, verimi arttırmak amacıyla kullanılan kimyasallar tarafından salınmaktadır (Akalin, M. 2014). Yeni bir yaklaşım iklim değişikliğine neden SGE'nin kökeninden bir çözüm üretilebilirse bu sorun ortadan kalkacaktır. Karbon tarımı olarak tanımlanan bu yenilikçi yaklaşımlar iklim değişikliğinin ortaya çıkardığı olumsuz koşulları tersine çevirmek için umut vadetmektedir (Yadav et al. 2025).

Karbon tarımını geniş bir bakış açısıyla sürdürülebilirlik stratejisine entegre edilerek, işletmeler ve çiftçiler gibi tarımsal üretimde rol alan paydaşlarca toprakta, bitkilerde ve biyokütlede karbondioksiti hapsedebilirler (Singh et al. 2024). Karbondioksiti toprakta, bitkilerde ve biyokütlede depolamak iklim değişikliğinin olumsuz etkilerini azaltılmasına yardımcı olurken toprak sağlığını, biyolojik çeşitliliği ve üretimde verimliliği artırır. Karbon tarımının ilkelerini, temel yöntemlerini ve tüm potansiyelini ortaya çıkarmak için üstesinden gelinmesi gereken finansal sorunlar, karbon ölçümünde ortaya çıkan karmaşıklıklar ve konu hakkında bilgi eksiklikleri gibi temel zorluklarla bulunmaktadır.

Karbon tarımının temel fikri, tarımın gücünü iklim değişikliğiyle mücadelede kullanmaktır (Inbestsoil, 2024). Karbon tarımı, atmosferdeki karbondioksiti hapsedip toprakta, bitkilerde ve biyokütlede depolamak için özel olarak tasarlanmış tarımsal uygulamaları ifade eder (CEW. 2022). Doğa temelli bir çözüm olarak karbon tarımı toprak sağlığını iyileştirir, biyolojik çeşitliliği destekler ve tarımsal üretim verimliliğini artırır daha da önemlisi tarımı iklim değişikliğine neden olmaktan çıkararak iklim değişikliğinin azaltılmasında hayati bir rol oynar (Ghimirey et al. 2025).

Karbon tarımı, özünde, tarım arazilerindeki karbonu emme ve tutma yeteneğini artıran sürdürülebilir tarım uygulamalarına odaklanır. Buna göre karbon tarımında öncelikle tarımsal üretim sürecinde ortaya çıkabilecek karbonun doğrudan toprakta depolanması sağlayarak toprak organik maddesinin artırılmasıdır. Ayrıca karbon tarımında yetiştiriciliği yapılacak bitki fotosentez yoluyla bünyesine almış olduğu karbonu köklerinde,

gövdesinde ve yapraklarında depolayarak sağlıklı bir bitki gelişimini sağlamış olur (CEW. 2022). Karbon tarımı, topraklarda, bitkilerde ve biyokütlede karbon sekestrasyonuna (atmosfere salınacak veya atmosferde kalacak karbonun yakalanması ve güvenli bir şekilde depolanması) katkıda bulunan çeşitli yöntemlere dayanır (Ghimirey et al. 2025). Bu teknikler toprak sağlığının iyileştirilmesi, bitki gelişimini hızlandırmak ve SGE'nin azaltılmasına odaklanır. Karbon tarımındaki uygulamalar iyileştirilmiş toprak sağlığı, toprakta daha iyi su tutulması, biyolojik çeşitliliğin artırılması, su kaynaklarının daha verimli kullanımı ve daha düşük kimyasal girdi maliyetleri gibi birçok ek faydalar sağlar (McDonald et al. 2021). Karbon tarımıyla uğraşan üreticiler, doğayı, insanı ve diğer canlı varlıkları koruyup/iyileştirmek yanında karbon piyasalarına katılarak ekstra para kazanma fırsatına da sahip olurlar. Tarımsal alandaki uzmanlığı iklim bilimiyle birleştiren karbon tarımı, dünyanın iklim değişikliği kaynaklı sorunlarına potansiyel bir çözüm sunmaktadır. Böylece, tarım SGE'nin kaynağı olmak yerine, tarım karbondioksit ve diğer SGE'nı bir depolama birimine dönüştüren bir çözüm ortağı olur.

2. KARBON TARIMI VE ÖNEMİ

Karbon tarımı, karbondioksitin tutulma hızını (atmosferden alınıp bitki materyali ve/veya toprak organik maddesine bağlanma hızı) artırdığı bilinen tarımsal üretim uygulamalarıdır. Karbon tarımı uygulamaları tarımsal üretimde en etkili bitki seçimlerini ve kombinasyonlarını yaparak karbon tutma amaçlı ekim yapmak ve toprağın karbon depolama kapasitesini arttırmak için toprağa organik madde eklenmek topraktaki organik maddeyi azaltan tarımsal üretim faaliyetlerinden kaçınmaktan oluşan iki temel stratejiyi kapsar (Waddington, E. 2020). Buna göre karbon tarımının amacı, doğaya uyumlu olmayan ve iklim değişikliğine neden olan tarımsal üretim faaliyetlerinden kaynaklanan karbon ayak izini belirgin bir şekilde azaltacak bir dizi önlemleri uygulamak (López, 2025), tarımsal üretimi karbonu üreten ve yayan bir yapıdan çıkarıp bir karbonu toplayan ve depolayan bir yapıya dönüştürmektir (BBC, 2021).

Farklı rezervuarlarda atmosferde, toprakta, okyanuslarda ve canlı organik maddelerde bulunan karbon bu farklı rezervuarlar arasında çok çeşitli doğal süreçlerle doğal karbon akışı gerçekleşir (Carlson et al. 2001). İnsan faktörü olmadan, doğal denge ya da ekosistem doğal karbon akış seviyelerini rahatlıkla sabit tutar, yani karbon döngüsü uyumlu bir dengede kalır. Doğal

karbon döngüsündeki denge insan kaynaklı faaliyetlerden ortaya çıkan yüksek miktarlardaki karbonun her yıl atmosfere salınması karbon miktarını önemli ölçüde artırarak doğal karbon döngüsünde bir dengesizlik yaratmaktadır (NOAA, 2025).

Bitkiler fotosentez ile karbondioksiti ve güneş ışığı enerjisini emer (Tezcan ve ark. 2011). Bitkiler ışık enerjisi ile suyu oksijen ve hidrojene ayırır ve ortaya çıkan hidrojeni bünyesindeki karbondioksit ile birleştirerek hayatta kalmasını sağlayan besin olarak kullanacağı şekeri üretir ve bu süreçte ortaya çıkan oksijeni ise atık olarak ortama salar (Tezcan ve ark. 2011). Bitkinin fotosentez sürecinde havadaki karbon bitkiler tarafından alınır, işlenir, bitkilerin dokularında depolanır ve bitkiler çürüyene veya toprağa karışana kadar bünyesinde kalır (Tezcan ve ark. 2011). İnsani faaliyetlerden kaynaklanan aşırı karbon salınımının neden olduğu iklim değişikliğinin olumsuz etkilerinden kurtulmanın ortaya çıkan olumsuzlukların etkisini tersine çevirmenin yolu bitkilerin atmosferden karbon tutma ve depolama kapasitesini artırmak açısından karbon tarımı ve uygulamaları hayati önem taşımaktadır. Konu hakkında hazırlanan bir rapora göre karbon tarımı uygulamaları devam ederse 2045 yılına kadar İskoçya tarım sektörü sera gazları salınımını en az %38 oranında azaltabileceğini bildirdi (Waddington, 2020)

Görüldüğü üzere iklim değişikliğine neden olan ve karbon salınımında %20 payı olan tarımsal üretim faaliyetleri, artık sürdürülemez hale gelen ve doğayı tahrip eden üretim sistem ve yöntemlerinden karbon tarımı uygulamaları gibi doğaya uyumlu, sürdürülebilir üretim sistem ve yöntemlerine geçiş yapılmalıdır. Böylece %20 karbon salınımı azalacağı bir o kadar da depolanacağı düşünüldüğünde karbon salınımında %40 bir etki yaratacak bu da iklim değişikliği başta olmak üzere tarımsal üretimde yaşanan birçok soruna çözüm üretilmiş olacaktır.

3. KARBON TARIMI UYGULAMALARI

Karbon tarımı, depolanan karbon miktarını en üst düzeye çıkarmak ve/veya SGE'nın (çoğunlukla karbondioksit ve metan) salınmasını en aza indirmek için tarımsal üretim kaynaklarını yönetmeyi ifade eder (Yadav et al. 2025). Karbon tarım uygulamaları, karbonu aktif olarak tutmayı ve/veya tarım kaynaklı SGE'yi azaltmayı hedefler. Karbon tarım uygulamaları tek tek veya kapsamlı bir tarım planının parçası olarak uygulanabilen bu uygulamalar, aynı

zamanda koruma önlemleri olarak da işlev görür. Karbon yakalama tarımının başarısı, yerelleştirilmiş yaklaşımlara ve çeşitli paydaşlarla iş birliğine bağlıdır; bu sayede uygulamaların belirli tarım ortamlarına uygun olması sağlanır.

3.1. Örtü bitkisi

Geleneksel ticari bitkilerin aksine, örtü bitkileri öncelikle toprağı korumak ve zenginleştirmek için yetiştirilir. Neredeyse her üretim sistemine uyarlanabilen örtü bitkileri olarak tahıllar, turpgiller, baklagiller ve diğer geniş yapraklı türleri içerir ve tek yıllık veya çok yıllık bitkiler olabilir. Popüler örtü bitkileri arasında tahıl çavdarı, kızıl yonca ve yağlı turp bulunur. Kışlık buğday ve arpa gibi bilindik küçük taneli bitkiler de örtü bitkisi olarak kullanıma uyarlanabilir (SARE, 2018). Yonca, çavdar veya baklagiller gibi örtü bitkileri, toprağı korumak ve zenginleştirmek amacıyla sezon dışında ekilir. Örtü bitkileri fotosentez yoluyla atmosferdeki karbonu yakalar ve ayrıştırarak toprağı organik madde ekler, toprak erozyonunu önler, toprak verimliliğini artırır, topraktaki nemi korur ve karbon depolamasını artırır. Bu bitkiler, yüzey bozulmasını en aza indirmeye, besin maddelerini yakalamaya ve toprak organik karbonunu artırmaya yardımcı olur. Çiftçiler, örtü bitkisi yetiştirerek toprak verimliliğini artırırken aynı zamanda atmosferden karbondioksit giderimine de katkıda bulunabilirler. Yapılan çalışmalardaki naliz sonuçları, 20 milyon dönümlük (8,1 milyon hektar) bir alana ekilen örtü bitkileri yılda yaklaşık 60 milyon ton karbondioksit eşdeğerinde karbondioksiti hapsedme potansiyeline sahiptir ve bu değer 12,8 milyon binek aracın SGE'yi telafi etmektedir (SARE, 2018).

3.2. Minimum Toprak İşleme

Toprak işleme, toprak yapısını bozar ve depolanan karbonu atmosfere geri salar. Toprak işlemesiz veya az işlemeli uygulamalar bu rahatsızlığı en aza indirir (Haddaway et al. 2017). Azaltılmış/minimum/sıfır toprak işlemede karbon tarımı, genellikle ekim için minimum toprak işleme makineleri veya şerit işleme ekipmanları kullanılarak minimum toprak işleme yöntemleri ile toprak işlemeden dolayı toprakta meydana gelebilecek zararları önleme cabalarını içerir (CSU. 2025). Bu yöntemde üreticiler toprağı aşırı işlemekten kaçınarak malç görevi gören ve toprağı koruyan bitki artıklarını tarlada bırakır, bu da karbonun tutulmasına ve toprak yapısının iyileştirilmesine yardımcı olur.

Azaltılmış toprak işleme tarlada yetiştiriciliği yapılan bitki kalıntılarını bırakarak ve toprak dönüşümünü sınırlayarak topraktaki toprak organik karbonunun korunmasına yardımcı olur (Şekil 1).



Şekil 1. Minimum toprak işleme. Kaynak: <https://croppnuts.com/benefits-of-reduced-tillage-and-no-till-farming-practices/> E. T. 01.12.2025

Minimum toprak işleme uygulamaları ayrıca erozyona karşı koruma sağlar, suyun sızmasını iyileştirir ve faydalı toprak organizmalarını korur (Cool Farm. 2025). Bu geçiş süreci, ilk başta zararlı ve besin maddelerinin yönetiminde zorluklara yol açsa da, birçok yetiştirici azaltılmış toprak işlemenin zamanla daha dayanıklı ve verimli tarım arazilerine yol açtığını fark eder. Azaltılmış toprak işlemede belirli stratejiler izlenebilir

Birincisi hasat sonrasında yeni bir bitki yetiştiriciliği dikimi arasındaki dönemde tarlada yapılan toplam toprak işleme geçişi sayısını azaltılmasıdır. Daha az toprak işleme geçişi, toprak bozulmasını azaltmaya yardımcı olarak daha iyi toprak yapısı, toprak gözenekleri ve toprak organik maddesi sağlar. Bu da karbon tutma oranlarını, su sızmasını, su depolamasını ve toprak taşıma kapasitesini artırmaya yardımcı olur. İkincisi hasattan sonra 90 gün süreyle toprak işlemeyi ertelemektir ki bu toplam geçiş sayısını artırmadan, toprağın yapısının iyileşmesi için toprağa daha fazla zaman kazandırır. Bir çeşit kısmi nadas olarak nitelendirilen bu strateji toprak yapısı ve toprak gözenek oluşumu, toprak mikrobiyal aktivitesi gibi hayati faktörler iyileşmesine ve toprak yapısını en üst düzeye çıkmasını ve toprak mikrobiyal aktivitenin artmasını sağlar.

3.3. Tarımsal Ormancılık

Tarımsal ormancılık, ağaçları, çalıları ve çok yıllık bitkileri tarımsal üretim sistemlerine entegre ederek ağaçları yetiştiriciliği yapılan bitkilerle bilinçli olarak birleştirir, ve doğada çeşitli biyolojik sistemlerin iş birliği yaptığı ortama benzer bir ortam sağlayan tarım uygulamalarını ifade eder. Bu karbon tarımı yönteminde, bitkiler, ağaçlar ve ekosistem birlikte çalışır. Buna göre tarımsal ormancılık hem toprak altı hem de toprak üstü bileşenleri ile bir bütün oluşturur. Toprak altı bileşeni kökler besinleri taşır ve karbonu toprağın derinliklerine depolarken, toprak üstü bileşeni ağaçlar mahsulleri ve hayvanları olumsuz hava koşullarından ve diğer doğa olaylarının etkilerinden korur (SAN. 2024). Ağaçlar ve bitkiler, kök büyümesi ve yaprak çöpü yoluyla toprak karbon seviyelerini iyileştirirken biyokütlelerinde karbonu hapsederler Tarımsal ormancılık tarımsal üretimde verimliliğini artırmak, toprağı erozyondan korumak, bozulmuş toprakları eski haline getirmek, havayı ve suyu arındırmak, biyolojik çeşitliliği artırmak ve korumak, yaban hayatı için yaşam alanı sağlamak, üreticilerin gelir akışlarını çeşitlendirmek gibi önemli faydalar üretmektedir. Avrupa'da, tarım alanlarının yaklaşık %60'ında %0 ağaç örtüsü bulunurken, tarım arazilerinin yaklaşık %18'inde maksimum %10'a kadar ağaç örtüsü bulunmaktadır (Lawson et al. 2025)

3.4. Rotasyonel Otlatma

Hücre otlatma, şerit otlatma veya sürü otlatma olarak da bilinen rotasyonel otlatma, otlakların toparlanmasını sağlamak için bir grup hayvanın kısa süreler için küçük alanlara rotasyonla dağıtılmasını, meralara arasında sistematik olarak taşınmasını içeren bir tarım uygulamasıdır (CMC. 2025). Uygun yetiştiricilik koşulları sağlandığında çimler sağlıklı ve hızla büyüyerek atmosferden karbonu çeker ve bu karbonu köklerinde ve toprakda depolarlar. Geleneksel açık otlatma çok az karbon depolamasına olanak tanırken, rotasyonel otlatma toprağın hektar başına yılda 4 tona kadar karbonu tutmasını sağlar (CMC. 2025). Ayrıca, toprak sağlığının ve su tutma kapasitesinin iyileşmesine ve biyolojik çeşitliliğin artmasına da katkıda bulunur. Rotasyonel otlatma, hayvanların otlatmak için dönüşümlü olarak otlanma alanlarına taşınmasıdır. Bu, 24-72 saatte bir yapılır ve hayvanın otlaması, sindirimi ve ürettiği atık arasında simbiyotik bir ilişki kurarak toprağa temel besin maddeleri ve bakterilerin sağlanmasına yardımcı olur. Bunu bir döngü halinde yapmak,

otlatma alanlarındaki bitkilerin ve çimlerin yeniden büyümesine imkanı vererek topraktaki karbon sekestrasyonunun artmasını sağlar. Rotasyonel otlatma ile toprak organik maddesini iyileştirir, aşırı otlatmayı önler ve sürdürülebilir bir ekosistemin oluşup gelişmesini sağlar

3.5. Biyokömür Uygulaması

İklim değişikliği nedeniyle ortaya çıkan aşırı sıcaklıklar, düzensiz ve aşırı yağılar, su kıtlığı ve kuraklık ve yarı kurak bölgelerdeki ekilebilir arazilerin giderek bozulması gibi sorunlar iklim değişikliği ile uyumlu etkisini azaltıcı, bozulan doğal yapıyı düzeltici ve sürdürülebilir tarım uygulamalarına acil ihtiyaç olduğunu ortaya koymaktadır (Hornaday, 2023). Biyokömür, oksijensiz bir ortamda biyokütle (organik maddelerin) düşük oksijen koşullarında çok yüksek sıcaklıkta ısıtılmasıyla (piroliz) oluşturulan kararlı gri-siyah küllü bir maddedir. Çoğu bakımdan biyokömür, kömürle neredeyse aynı şeydir. Biyokömür ile normal kömürün her ikisi de organik materyali kısmen ayrıştıran ve geride özellikle yüksek karbon içeriğine sahip hafif bir kalıntı bırakan bir piroliz işlemiyle üretilir. Ancak kömür yemek pişirmek veya ısıtmak için yakılmak üzere tasarlanmışken, biyokömür genellikle toprak düzenleyici olarak toz halinde kullanılır. Normal kömüre nazaran 1.000 °C'nin üzerindeki sıcaklıklarda üretilen biyokömür üretiminde en iyi hammadde genellikle ağaçlar veya kalın çalılar gibi daha yoğun, odunsu bir biyokütledir (Hornaday, 2023). Ayrıca hayvan yemine karıştırılabilir, çimento ya da karbonize çelik gibi endüstriyel uygulamalarda kullanılabilir. Biyokömür toprağa eklendiğinde, yüzyıllar boyunca karbonu hapsederken toprak yapısını ve besin tutumunu iyileştirir (Kochar and Grover, 2025). Biyokömür toprağa eklendiğinde karbonun toprakta uzun süre depolanmasını sağlama, toprağın su tutma kapasitesini iyileştirme/arttırma ve tarımsal üretimde toprak verimliliği yükseltme gibi ek faydalar sağlar. Biyokömür uygulaması bitki verimliliğini %16, bitkisel ürün verimi %13, su kullanım verimliliğini %20, toprakta organik karbonunu tutma kapasitesi %39 oranında arttırmaktadır (Kochar and Grover, 2025). Biyokömür uygulaması fosfor için kullanılabilir toprak besin elementlerini %45 oranında olumlu etkilemekteyken azot oksit emisyonlarını %11 ve bitkilerin topraktan ağır metal alımını %29 oranında azaltmaktadır (Kochar and Grover, 2025). Biyokömür, toprağın atmosferik karbondioksiti yakalayıp kararlı mineral formlarına dönüştürme kabiliyetini de artırarak

sekestrasyon potansiyelini artırır. Daha da önemlisi, biyokömürde tutulan karbon, ayrışmaya karşı oldukça dirençlidir ve 100 yılı aşkın karbon kalıcılığı sağlar (Sanchez and Belmont, 2025). Sonuç olarak biyokömür, hem iklim değişikliğinin etkisini tersine çevirmek hem de toprak sağlığı iyileştirmek ve geliştirmek açısından umut verici bir çözümdür.

3.6. Çok Yıllık Bitki Yetiştiriciliği

Bitkilerin tümü bir dereceye kadar karbon dönüşümünde ve depolanmasında yer alır, ancak derin kazık köklere sahip olan bitkiler topraktaki karbonun dönüşümünde ve depolanmasında daha etkilidir (Waddington, 2020). Çok yıllık bitkilerin derin ve odunsu kökler, uzun süreler boyunca yerinde kalarak, topraktaki karbonu yıllarca toprağın altında tutabilir. Tarımsal üretimde kullanılan tarım arazileri doğal ekosistemlere kıyasla toprak organik karbonu hapsetme kapasitesi çok daha düşüktür. Buna karşılık çok yıllık bitkiler (örneğin otlar, meyveler ve kuruyemişler) tekrar ekilmeden yıllarca büyür ve, topraktaki karbonu depolayarak uzun dönemler boyunca hapseden ve geniş ve gelişmiş kök sistemleri ile toprağı tutarak toprak bozulmasını azaltırlar. Toprak, ormanlar, ağaçlık alanlar, çayırlar, bozkırlar ve savanlar gibi doğal veya yarı doğal araziler tarım alanlarına dönüştürüldüğünde, organik karbonu hapsetme kapasitesi yaklaşık %30 ila %40 oranında azalır (Waddington, 2020). Çok yıllık bitkiler toprağın karbon depolama artırır, erozyonu önler ve kuraklığa karşı toprak dayanıklılığını artırır. Bu etki o arazide var olan çok yıllık bitkilerin alandan uzaklaştırılması ve işlevsiz hale gelmesindendir. Karbon tutma açısından özellikle ilgi çekici olan çok yıllık bir bitki ise bambudur. Devasa odunsu bambular, ağaçlarla aynı özellikleri paylaşır ve benzer şekilde etkileyici karbon tutma kapasitesine sahiptir.

3.7. Bitki Rotasyonu ve Polikültür

Tarımsal faaliyetlerin sürdürülebilirliğini destekleyen birçok uygulama arasında, bitkisel rotasyon ve polikültür, toprağın karbon tutma depolamayı kapasitesini geliştirmek, zararlıların yayılmasını önlemek ve toprak verimliliğini artırmak gibi birden çok faydası ile önemli bir yöntemdir (SAN, 2024b). Bitkilerin dönüşümlü olarak ekilmesi (bitki rotasyonu) ve birden fazla bitkinin bir arada yetiştirilmesi (çok kültürlü tarım) toprak sağlığını ve besin

döngüsünü iyileştirir. Bu uygulamalar yalnızca toprak sağlığını iyileştirmekle ve kimyasal girdilere olan bağımlılığı azaltmakla kalmaz, aynı zamanda toprak organik maddesini artırır, azot fiksasyonunu güçlendirir biyolojik çeşitliliği ve ürün verimini de artırır (Loughlin, B. 2024).

Bitkisel rotasyon ve ara ekim, tarihsel olarak toprak sağlığını iyileştirmeye, kimyasal girdi kullanımını azaltmaya ve doğal dengeyi korumaya yardımcı olan fonksiyonları ile sürdürülebilir tarım uygulamalarının en önemli bileşenlerinden biridir. Bitkisel rotasyon, aynı tarlaya ardışık mevsimler veya yıllar boyunca farklı bitkilerin yetiştirilmesini amaçlayan sistematik bir yöntemdir. Bu uygulama aynı bitkinin tekrar tekrar yetiştirildiği ve genellikle toprak besin maddelerinin tükenmesine, zararlıların birikmesine ve hastalıklara karşı artan hassasiyete yol açan monokültür yetiştiriciliğinin zararlarını ortadan kaldırılmasını sağlar. 2025'te yapılan araştırmalarında bir baklagillerin türü olan fasulye ile tahılların bir türü olan mısır yetiştiricilik dönemlerinde arka arkaya veya yıldan yıla dönüşümlü olarak yetiştirilmesi sentetik gübre ihtiyacını yaklaşık %40 oranında azaltabileceği rapor edilmiştir (Farmonaut, 2025).

Aynı arazi parçasında birden fazla bitki türünün eş zamanlı üretimi olarak tanımlanan polikültür bitki yetiştiriciliği, dünya çapında yaygın bir uygulamadır. Ancak polikültür bitki yetiştiriciliği hem boyut hem de kapsam açısından küçük işletmelerinden büyük tarım ve ormancılık işletmelerinin faaliyetlerine kadar büyük farklılıklar arz eder. Üreticilerin polikültür bitkisel yetiştiriciliğe yönelme nedenleri arasında sürdürülebilir tarımsal faaliyetleri artırmak, işletme gelir alanlarını çeşitlendirmek yanında hatta tozlaşma, biyolojik zararlı kontrolü ve besin döngüsü gibi ekosistemden sağlanan faydaları artırmak yer alır. Avantajlarına rağmen, birçok büyük ölçekli üretici bitkisel dikim ve hasat faaliyetlerini kolaylaştırmak için tek polikültür bitki yetiştiriciliği yerine monokültür bitki yetiştiriciliğini tercih etmektedir.

4. SONUÇ

Karbon tarımı, atmosferden karbondioksiti tutmak için tarımsal uygulamalardan yararlanarak iklim değişikliğiyle mücadelede yenilikçi bir yaklaşımı temsil eder. Tarım traktör kullanmak, toprağı işlemek, aşırı otlatmak, ormanlar alanlarını tahrip etmek ve su kaynaklarını bozmak gibi yaygın tarımsal uygulamalar aracılığıyla toprak ve biyokütle bünyesinde bulunan ve

iklim değışikliğıne neden olan fazla karbonunun karbondioksit havaya geri dönmesine neden olmaktadır. iklim değışikliğıne neden olan fazla karbondioksitin üçte birinin tarım ve arazi yönetimi uygulamalarından kaynaklanmaktadır. Karbon tarımı, iklim değışikliğinin olumsuz etkilerinden korunmak, bu etkileri tersine çevirmek ve bu olumsuz etkilerden zarar göre doğal dengeyi yeniden sağlamak amacıyla tarımsal faaliyetlerden kaynaklanan karbon salınımını azaltarak canlı biyokütlerde, ölü organik maddede ve topraktaki karbon depolanmasını artırmak ve SGE'yi azaltmak için uygulanan arazi yönetimi uygulamalarıdır. Karbon tarımı, karbonu bitkide ve/veya toprakta depolayarak atmosferden uzaklaştırmayı amaçlar. Bu amaçla karbon tarımında minimum toprak işleme, çok yıllık bitki yetiştiriciliğı, biyokömür, bitki rotasyonu ve polikültür, örtü bitkileri yetiştiriciliğı ve tarımsal ormancılık gibi yöntemlerden oluşan toprak ve bitki örtüsünün karbonu emme ve tutma kabiliyetini artıran uygulamalar gerçekleştirilir. Karbon tarımındaki bu yöntemler sera gazı etkisini azaltarak iklim değışikliğıne çözüm üretir, toprak sağlığını ve verimliliğı artırır, toprak yapısını iyileştirir, organik madde miktarını artırır ve biyolojik çeşitliliğı teşvik eden bir dizi önemli faydalar sağlar.

KAYNAKLAR

- Akalın, M. 2014. The Climate Change Impacts on Agriculture: Adaptation and Mitigation Strategies for these Impacts, Hitit University Journal of Social Sciences Institute, 7(2), 351-377. <https://dergipark.org.tr/tr/download/article-file/86091> E.T. 01.12.2025
- BBC, 2021. The regenerative revolution in food. <https://www.bbc.com/future/article/20211020-carbon-farming-a-better-use-for-half-earths-land> E. T. 01.12.2025
- Carlson, C. A., Bates, N. R., Hansell, D. A., Steinberg, D. K. 2001. Carbon Cycle. Encyclopedia of Ocean Sciences (Second Edition), 477-486. <https://doi.org/10.1016/B978-012374473-9.00272-1>
- CCI, 2022. What is Carbon Farming? Carbon Cycle Institute. <https://www.carboncycle.org/what-is-carbon-farming/> E. T. 01.12.2025
- CEW. 2022. Carbon farming explained: the pros, the cons and the EU's plans. Clean Energy Wire. <https://www.cleanenergywire.org/factsheets/carbon-farming-explained-pros-cons-and-eus-plans> E. T. 01.12.2025
- CMC. 2025. What is Rotational Grazing. <https://www.cmc-uruguay.earth/what-is-rotational-grazing/#:~:text=Carbon%20Sequestration,holding%20capacity%2C%20and%20increased%20b> E. T. 01.12.2025
- Cool Farm. 2025. What is Low Carbon Agriculture and Why Does it Matter? <https://coolfarm.org/what-is-low-carbon-agriculture-and-why-does-it-matter/> E. T. 01.12.2025
- CSU. 2025. Reduced Tillage. California State University (CSU). <https://www.csuchico.edu/regenerativeagriculture/ra101-section/reduced-tillage.shtml> E. T. 01.12.2025
- Farmonaut, 2025. Crop Rotation and Intercropping: 7 Key Benefits 2025. <https://farmonaut.com/blogs/crop-rotation-and-intercropping-7-key-benefits-2025> E. T. 01.12.2025
- Ghimirey, V., Chaurasia, J. Acharya, N. 2025. Understanding soil carbon sequestration: mechanistic insights, management approaches, and future challenges. Discov. Soil, 2, 101. <https://doi.org/10.1007/s44378-025-00133-5>

- Haddaway, N., Hedlund, K., Jackson, L., Kötterer, T., Lugato, E., Thomsen, I., Bracht Jørgensen, H. and Isberg, P. 2017. How does tillage intensity affect soil organic carbon A systematic review, Environmental Evidence, <https://doi.org/10.1186/s13750-017-0108-9>
- Hornaday, F. 2023. Applying Biochar for Regenerative Agriculture. Planboo. <https://planboo.eco/applying-biochar-for-regenerative-agriculture/> E. T. 01.12.2025
- Inbestsoil, 2024. Carbon Farming's Role in European Agriculture and Climate Action. <https://inbestsoil.eu/carbon-farmings-role-in-european-agriculture-and-climate-action/> E. T. 01.12.2025
- Kochar, M., Grover, V. 2025. Biochar and Microbial Application for Carbon Dioxide Removal. <https://www.teriin.org/article/biochar-and-microbial-application-carbon-dioxide-removal> E. T. 01.12.2025
- Lawson, G., Kay, S., den Herder, M. & Burgess, P. 2023. Agroforestry & the 2040 AFOLU net-zero target (Version 1). EURAF Policy Brief 26. <https://doi.org/10.5281/zenodo.8075187>
- López, G. P. 2025. Certifying Carbon Farming: (Legally) Fit for Purpose? European Law Blog. <https://www.europeanlawblog.eu/pub/0mimhe10/release/1> E. T. 01.12.2025
- Loughlin, B. 2024. Karbon tarımını anlamak: İklim dostu tarıma giden yol. Institute of Sustainability Studies. <https://instituteofsustainabilitystudies.com/insights/lexicon/understanding-carbon-farming-a-path-to-climate-smart-agriculture/> E. T. 01.12.2025
- McDonald, H., Frelih-Larsen, A., Lóránt, A., Duin, L., Pyndt Andersen, S., Costa, G., and Bradley, H. 2021, Carbon farming – Making agriculture fit for 2030, Study for the committee on Environment, Public Health and Food Safety (ENVI), Policy Department for Economic, Scientific and Quality of Life Policies, European Parliament, Luxembourg.
- NOAA, 2025. Carbon Cycle. National Oceanic and Atmospheric Administration. <https://www.noaa.gov/education/resource-collections/climate/carbon-cycle> E. T. 01.12.2025
- SAN. 2024a. Carbon Farming: Harnessing Agriculture for Carbon Sequestration. Sustainable Agriculture Network (SAN).

- <https://www.sustainableagriculture.eco/post/carbon-farming-harnessing-agriculture-for-carbon-sequestration> E. T. 01.12.2025
- SAN. 2024b. The Importance of Crop Rotation and Polyculture in Sustainable Farming. Sustainable Agriculture Network (SAN). <https://www.sustainableagriculture.eco/post/the-importance-of-crop-rotation-and-polyculture-in-sustainable-farming> E. T. 01.12.2025
- Sanchez, D., Belmont, E. 2025. Why biochar is gaining momentum in carbon removal. Direct Carbon. <https://www.carbon-direct.com/insights/what-is-biochar-a-carbon-removal-solution-gaining-ground> E. T. 01.12.2025
- SARE. 2018. Cover Crop Facts: Cover Crops and Carbon Sequestration. In Cover Crop Resource Series. Sustainable Agriculture research & Education (SARE). <https://cra.missouri.edu/wp-content/uploads/2021/08/Cover-Crops-and-Carbon-Sequestration.pdf> E. T. 01.12.2025
- Schmidt, H. P., Kammann, C., Hagemann, N., Leifeld, J., Bucheli, T. D., Sánchez Monedero, M. A. Cayuela, ML (2021). Tarımda Biochar – 26 küresel meta-analizin sistematik bir incelemesi. GCB Bioenerji, 13, 1708–1730. <https://doi.org/10.1111/gcbb.12889>
- Singh, S., Kiran, B. K., Mohan, S. V. 2024. Carbon farming: a circular framework to augment CO2 sinks and to combat climate change. (Critical Review) Environ. Sci.: Adv., 3, 522-542. <https://10.1039/D3VA00296A>
- Tezcan, A., Atılgan, A., & Öz, H. (2011). Seralarda Karbondioksit Düzeyi, Karbondioksit Gübrelemesi ve Olası Etkileri. Ziraat Fakültesi Dergisi, 6(1), 44-51. <https://dergipark.org.tr/tr/pub/sduzfd/issue/29597/317548> E. T. 01.12.2025
- Waddington, E. 2020. Carbon Farming: Sequestering Carbon in Plants and Soil. Earth.fm. <https://earth.fm/earth-stories/carbon-farming-sequestering-carbon-in-plants-and-soil/> E. T. 01.12.2025
- Yadav, D., Singh, D. V., Babu, S., Madhu, M., Kumawat, A 2025. Carbon farming: Innovations, potential, and challenges for sustainable future. Indian Journal of Agronomy, 70, 20-30. <https://doi.org/10.59797/ija.v70i.6270>

BÖLÜM 13

DİJİTAL TEKNOLOJİLERLE KURAKLIK STRESİ İZLEME YAKLAŞIMLARI

Arş. Gör. Dr. Ferhat UĞURLAR¹

DOI: <https://www.doi.org/10.5281/zenodo.17966646>

^{*1} Harran Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Toprak Bilimi ve Bitki Besleme Bölümü, Şanlıurfa, Türkiye. ferhatugurlar@gmail.com, ORCID: 0000-0002-3663-3497

1. GİRİŞ

Bitkiler, gelişim aşamalarında çeşitli çevresel faktörlerin olumsuz etkilerine maruz kalırlar. Bu olumsuz etkiler bitkilerin temel metabolik süreçlerinde ve işlevlerinde aksaklıklara yol açar ve bitkilerde stres olarak bilinen bir durumla sonuçlanır. Stres faktörleri, kökenlerine göre biyotik ve abiyotik stres faktörleri olmak üzere iki gruba ayrılır. Kuraklık stresi, abiyotik stres faktörleri arasında önemli bir yere sahiptir ve bitkilerin büyüme ve gelişme süreçlerini ciddi şekilde etkileyebilir. İklim değişikliğinin etkisiyle son yıllarda artan sıcaklıklar, uzun süren kurak dönemler ve yağış düzensizlikleri, dünya genelindeki tarımsal üretimi giderek daha fazla tehdit etmektedir. IPCC'nin (Intergovernmental Panel on Climate Change) raporlarına göre, küresel sıcaklıkların artmasıyla birlikte yağış düzenlerindeki değişiklikler, özellikle tropikal ve subtropikal bölgelerde tarımsal verimliliği ciddi şekilde etkilemektedir (IPCC, 2014; IPCC 2021). Uzun süreli kuraklık stresi, fotosentez hızını düşürerek verim kayıplarına yol açar. Uzun süreli kuraklık stresine maruz kalan bitkilerin gösterdiği fizyolojik değişiklikler, su ve besin maddesi alımının azalmasıyla sonuçlanmakta, bu da verim kayıplarına neden olmaktadır (Dietz ve ark., 2021; Nasir ve Toth, 2022). Kuraklık stresi, bitkilerin fotosentez hızını düşürmekte, stomalarının kapanmasına yol açmakta ve bitkilerin su kaybını önlemek için metabolik aktivitelerini yavaşlatmalarına neden olmaktadır (Seleiman ve ark., 2021; Pamungkas ve Faid, 2022). Uzun vadede bu süreç, tarımsal üretimde ciddi verim kayıplarına ve ekonomik zararlara yol açmaktadır. Bu nedenle, kuraklık stresi altında bitkilerin çevresel koşullara karşı verdikleri tepkileri izlemek ve yönetmek büyük önem taşır.

Tarımsal üretim sistemlerinde kuraklık stresini izlemek ve bu stresin bitkiler üzerindeki etkilerini yönetmek büyük bir öneme sahiptir. Geleneksel yöntemler, bitki stresini fiziksel belirtiler üzerinden gözleme dayalı bir şekilde izlerken, bu süreçte bitkilerde verim kayıpları meydana gelebilir ve genellikle subjektif kalır. Toprak numuneleri veya duyuşal gözlemlerle yapılan sulama kararları, anlık veriler sunmadığı için yavaş kalmakta ve geniş arazilerdeki durumu tam olarak yansıtmamaktadır. Buna karşılık, sensör teknolojileri, termal görüntüleme ve uzaktan algılama sistemleri, bitkilerin su ihtiyacını anlık verilerle izleyerek daha erken ve doğru müdahalelere olanak tanır. Teknolojik çözümler, su yönetimini optimize etmek ve verim kayıplarını en aza indirmek için proaktif bir yaklaşımla daha etkili ve hızlı sonuçlar sağlar (Evans ve Sadler,

2008). Bu nedenle, tarımda dijital teknolojilerin kullanımı, bitkilerin stres belirtilerini erken aşamada tespit ederek müdahale etme fırsatı sunmaktadır. Örneğin, termal görüntüleme teknolojisi, bitkilerin taç sıcaklıklarını ölçerek su stresini erken aşamalarında tespit edebilir (Pineda ve ark., 2020). Bu, tarımsal üretimde verim kayıplarını önlemek için önemli bir avantaj sağlar. Bununla birlikte, toprak nemi ve hava koşulları gibi çevresel faktörleri ölçen sensörler, bitkilerin ihtiyaçların gübreleme ve sulama gibi ihtiyaçlarının daha hızlı belirlenmesini ve müdahale edilmesine olanak sağlar (Li ve ark., 2020).

Dijital teknolojilerin tarımsal üretime entegrasyonu sadece verimliliği artırmakla kalmaz, aynı zamanda su, gübre ve diğer tarımsal girdilerin daha etkin kullanılmasını sağlar (Abiri ve ark., 2023). Su kaynaklarımızın kısıtlı ve tükenebilir olması nedeniyle bu kaynakları gelecek nesillere taşımak için etkin kullanmanın yöntemlerini geliştirmek bir zorunluluk haline gelmiştir. Bu nedenle tarımsal verimliliğin yanı sıra kaynaklarımızın korunması için geliştirilecek çözümler en az verimlilikteki artış kadar önem arz etmektedir. Teknolojiler ile donatılmış akıllı tarım sistemi, sensör ve modüller vasıtasıyla bulunduğu alana özel havadan ve topraktan topladığı verileri analiz ederek tarımsal işlemler için en uygun önerileri sunar (Saiz-Rubio ve Rovira-Más, 2020; Sinha ve Dhanalakshmi, 2022). Böylece temel tarımsal girdileri oluşturan ilaç, gübre, su ve enerjinin gereksiz kullanımının önlenmesi, maliyetlerin düşürülmesine yanı sıra, üretimde kalitenin ve verimliliğin artırılmasına olanak sağlar (Dayıoğlu ve Turker, 2021). Genel olarak bu teknolojiler, tarımda verimlilik artışının yanı sıra kaynak kullanımını optimize etmek, çevreyi korumak ve sürdürülebilir üretimi desteklemek için büyük bir potansiyele sahiptir.

Veri tabanlı karar verme süreçlerinin gelişmesiyle birlikte, tarımsal üretim daha hassas ve bilimsel bir temele dayanmaktadır (Zeng ve ark., 2022). Bu teknolojiler, yalnızca mevcut tarımsal sorunları çözmekle kalmaz, aynı zamanda gelecekteki zorluklara karşı hazırlıklı olmayı sağlar (Sinha ve Dhanalakshmi, 2022). Dijital tarımın sunduğu bu yeni bakış açısı, bitki sağlığını koruma ve tarımsal verimliliği artırma konularında geniş bir vizyon sunar.

2. BİTKİ STRESİNİN İZLENMESİNDE TEKNOLOJİK ARAÇLAR

Kuraklık stresinin tarımsal üretim üzerindeki olumsuz etkilerini en aza indirmek amacıyla kullanılan yüksek teknoloji çözümleri, izleme ve yönetim süreçlerini daha verimli hale getirmekte ve üreticilere erken müdahale imkânı sunmaktadır. Dijital tarım çözümleri, sensör teknolojileri, yapay zekâ tabanlı veri analizleri, dron kullanımı, termal görüntüleme ve uzaktan algılama sistemleri gibi araçlarla desteklenmektedir. Bu teknolojiler, bitki sağlığını ve tarımsal verimliliği artırmak için kritik veriler sağlamaktadır.

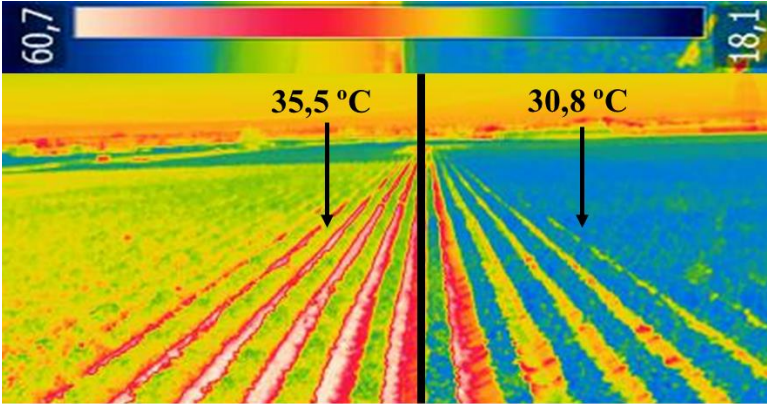
2.1. Termal görüntüleme sistemleri

Yaklaşık -273 derece üzerindeki tüm maddeler çevreye termal bir enerji yayar ve bu termal enerji insan gözünün göremediği bir kızılötesi alanda yayılır. Termal kameralar insan gözünün görmediği bu enerjiyi bir resme dönüştürerek insan gözünün görmesine olanak sağlar. Termal kameralar başlangıçta askeri ve endüstriyel alanlarda kullanılmaya başlandı. Özellikle savunma sanayiinde düşman hedeflerinin tespit edilmesi, yangın güvenliği alanında ısı artışının erken fark edilmesi gibi çeşitli amaçlarla yaygınlaştı. Daha sonrasında bu teknoloji, inşaat sektörü, enerji yönetimi ve mühendislik uygulamalarında da kullanılarak binalardaki enerji kayıplarını tespit etmek, elektrik sistemlerindeki aşırı ısınmaları fark etmek gibi amaçlarla da kendine yer buldu (Balakrishnan ve ark., 2022). Teknolojik gelişmelerle birlikte birçok alanda kullanılmaya başlanan termal kameralar, bitki stresinin belirlenmesinde önemli bir araç haline gelmiştir.

Termal görüntüleme uygulaması, ekipman maliyetindeki düşüşler, tarım ve gıda endüstrilerinin çeşitli alanlarında uygulanması için fırsatlar yaratan basit operasyonel prosedürler nedeniyle son yıllarda tarımda popülerlik kazanmaktadır (Vadivamdal ve Jayas, 2011) ve şu anda hassas tarıma entegre edilmek üzere geliştirilmektedir. Termal kameraların tarıma entegrasyonu, daha geniş çaplı tarımsal izleme ve sürdürülebilirlik uygulamalarının önem kazanmasıyla birlikte son yıllarda gündeme gelmeye başladı. Özellikle iklim değişikliği, su kaynaklarının verimli kullanımı ve tarımda verimliliğin artırılması gibi faktörler, termal kameraların bu alanda daha fazla kullanılmasına zemin hazırladı. Tarımda termografinin potansiyel kullanımı, bitki izleme, sulama planlaması, toprak tuzluluğu tespiti, hastalık ve patojen

tespiti, verim tahmini, olgunluk değerlendirmesi ve çürük tespiti gibi alanları kapsamaktadır (Ishimwe ve ark., 2014).

Stres altındaki bitkiler sağlıklı bitkilerden daha yüksek sıcaklıklara sahiptir (Pineda ve ark., 2020). Bitkiler, kuraklık stresi altındayken su kaybını minimize etmek için stomalarını kapatır, bu da transpirasyon oranlarının düşmesine neden olur (Pamungkas ve Faid, 2022). Bu durum bitkilerin kanopi sıcaklıklarının artmasına neden olur (Şekil 1). Bitki kanopi sıcaklıklarındaki bu değişimler dikkate alınarak sulama programları oluşturularak ve stresin olumsuz etkilerinin önüne geçilebilir. Bu görüntüler, geniş arazilerde sulama sistemlerinden doğacak hatalar sonucunda sulanmamış veya suyun ulaşmadığı alanların tespit edilerek müdahale edilmesine olanak sağlar. Sonuç olarak bitkilerin yüzey sıcaklıkları artar ve bu fark, termal görüntüleme teknolojileriyle tespit edilerek bitki stresinin erken aşamalarda belirlenmesine olanak tanır.



Şekil 1. Farklı sulama durumu altındaki pamuk bitkilerinin termal görüntüleri

2.2. Sensörlerin kullanımı

Termal kameralar, bitki yüzeyindeki sıcaklıkları ölçerek ve bitkilerin transpirasyon sürecini izleyerek su kaybı hakkında önemli bilgiler sağlar (Zhao ve ark., 2022). Stomaların kapanmasıyla birlikte bitki yüzeyindeki sıcaklık yükselir ve bu sıcaklık artışları termal kameralar tarafından tespit edilebilir. Ancak, bu görüntüler bitki yüzeyine odaklandığından, toprağın alt

katmanlarındaki su durumuna dair bilgi sağlamaz. Bitkiler, özellikle kök seviyesinde suya ihtiyaç duyarlar. Ancak yüzeyde nemli görünen bir toprak, alt katmanlarda kurak olabilir veya tam tersi durumda, alt katmanlar yeterince su barındırırken yüzey kuru görülebilir. Termal görüntülerin sunduğu veriler bu gibi durumları anlamakta sınırlı kalabilir. Ayrıca, termal veriler topraktaki su gibi önemli faktörleri hesaba katmadığından, yalnızca bitki yüzeyine dair verilerle sulama miktarı ve zamanlamasını kesin bir şekilde belirlemek zordur.

Termal görüntülerde bitkilerde görülen sıcaklık artışları, yalnızca su eksikliğinden kaynaklanmaz. Ani sıcaklık değişimleri ve hastalıklar gibi diğer çevresel stres faktörleri de bitki yapraklarında termal kameralarla tespit edilebilecek sıcaklık artışlarına neden olur (Pineda ve ark., 2020). Bu nedenle termal görüntüler tek başına bitki su stresini belirlemek için yeterli olamayabilir ve sulama stratejilerini optimize etmek için ek veri kaynaklarına ihtiyaç vardır. Yalnızca termal görüntülere dayalı bir karar, gereksiz sulamaya veya yetersiz sulamaya yol açabilir, bu da su israfına ya da bitki verimliliğinde kayıplara neden olabilir. Termal görüntüleme önemli bilgiler sunsa da tek başına sulama çizelgelerinin oluşturulmasında her koşulda yeterli olmayabilir.

Toprak nem sensörleri, sulama stratejilerinin geliştirilmesinde ve suyun daha verimli kullanılması için önemli bir araçtır. Bu sensörler, toprağın farklı katmanlarındaki su seviyelerini anlık olarak ölçer ve kök bölgesindeki su miktarını izler. Toprak nem sensörleri, çalışma prensiplerine göre birçok türe ayrılabilir. Dirençli toprak nem sensörleri, nemi ölçmek için topraktaki nemin elektriksel direnç değeri üzerindeki etkisini kullanır. Bu sensörler genellikle toprağa gömülü iki veya daha fazla elektrot içerir. Toprak nemi arttıkça, toprağın iletkenliği artar ve bu da direnç değerinde bir azalmaya neden olur. Direnç değerindeki değişikliği ölçmek, toprak nemindeki değişikliği yansıtır (Selvaperumal ve Muthuchamy, 2017). Kapasitif toprak nem sensörleri, topraktaki neminin dielektrik sabiti üzerindeki etkisine dayanarak nemi ölçer. Bu sensörler genellikle iki elektrottan oluşur ve aralarındaki kapasitans toprak nemi ile ilişkilidir. Toprak nemi arttıkça, toprağın dielektrik sabiti artar ve bu da kapasitans değerinde bir artışa neden olur (Hrisko, 2020). Frekans alanı yansımaları toprak nem sensörleri, elektromanyetik dalgaları ileterek ve alarak toprak nemini ölçer. Toprak nemi arttıkça, sensör elektromanyetik dalgaları daha yavaş yayılır. Elektromanyetik dalga yayılma süresindeki veya fazındaki değişiklikler toprak nemini gösterebilir. Bu yöntemle farklı toprak

katmanlarındaki su miktarı ve değişimi gerçek zamanlı olarak ölçülebilir. (Huan ve ark., 2017). Elde edilen veriler ile zamanında ve yeterli miktarda yapılan sulama stresin engellemesi ile verim kayıplarının önüne geçebilir. Ayrıca, kısıtlı su kaynaklarının gereksiz kullanılmasını önleyerek bu kaynakların gelecek nesillere aktarılmasında önemli katkılar sağlar.



Şekil 2. Pamuk arazisine yerleştirilen nem sensörleri

Hava durumu verileri tarımsal sulama planlarının optimizasyonu için kritik öneme sahiptir. Bu sensörler sıcaklık, nem, rüzgâr hızı ve rüzgâr yönü gibi çevresel verileri toplar. Bu özellikler bitkilerdeki su kaybını etkileyen en kritik faktörlerdir ve uygun sulama planlaması için gereklidir (Mattar ve ark., 2022). Örneğin, sıcaklık arttıkça bitkilerin terleme hızı artar ve bu da su kaybetmelerine yol açar (Sadok ve ark., 2021). Nem oranının düşük olduğu zamanlarda ise bitkiler daha fazla suya ihtiyaç duyar, çünkü havadaki düşük nem oranı, bitkilerin yapraklarından daha fazla su buharlaşmasına yol açar (Zhu ve ark., 2022). Rüzgâr hızı bitkilerdeki terleme oranını önemli ölçüde etkiler. Rüzgâr, bitki yüzeylerinden suyun buharlaşma oranını artırır ve bu da artan su kaybına neden olur (Zhang ve ark., 2022). Bitkiler, yüksek rüzgarların olduğu günlerde artan su gereksinimleri gösterir; bu nedenle rüzgâr hızı sensörleri sulama planlamasını optimize etmek için kritik veriler sağlayabilir. Hava durumu sensörleri, bitkilerin su ihtiyacını etkileyen dış faktörleri izleyerek sulama programlarını dinamik bir hale getirebilir. Bu sensörlerin sunduğu anlık veriler ile uygun sulama stratejileri oluşturulabilir.

Toprak nem sensörleri, termal kameralar ve meteorolojik sensörlerin entegrasyonu, tarımsal sulama sistemlerinin optimize edilmesine yardımcı olarak su kaynaklarının verimli kullanımını sağlar. Çeşitli sensörlerin entegrasyonu, tek bir kaynağa güvenmek yerine birden fazla veri kaynağını birleştirerek daha bütünsel ve kapsamlı bir izleme ve yönetim sistemi kolaylaştırır. Örneğin, termal kameralar bitki yüzey sıcaklıklarını izler, toprak nem sensörleri bitkilerin kök bölgesindeki su durumu hakkında bilgi sağlar ve hava durumu sensörlerinden çevresel faktörler hakkında gelen veriler ile daha dinamik bir sulama programı oluşturmasını sağlanabilir. Bu teknolojilerin entegrasyonu, gerçek zamanlı sulama kararlarının daha etkin şekilde alınmasına katkıda bulunabilir ve bitkilerin su stresine verdiği tepkilere anında tepki verilmesini sağlayabilir. Ayrıca, tüm bu sistemlerin otomatik sulama sistemleriyle entegre edilmesi, tarımsal sulama süreçlerinin insan müdahalesini azaltarak sürecin daha otomatik ve düzenli yürütülmesine katkı sağlayabilir. Böylece su israfı en aza indirilir ve bitkilerin su ihtiyaçlarını doğru zamanda karşılamaları sağlanır.

2.3. Kuraklık Stresi İzlemede Spektral İndekslerin Kullanımı

Bitkiler, yapraklardaki su içeriği, pigment yoğunluğu ve hücresel yapıdaki değişimler nedeniyle farklı dalga boylarındaki ışığı sağlıklı ve stresli koşullarda farklı oranlarda yansıtır ya da soğurur. Kuraklık stresine giren bitkilerde klorofil miktarı azalır, yaprak rengi sarıya döner ve kırmızı dalga boylarındaki yansıma artarken yeşil yansıma azalır (Junker ve Ensminger, 2016). Ayrıca sağlıklı bitkiler stres altındaki bitkilere kıyasla yakın kızılötesi (NIR) bölgede daha yüksek yansıma sergiler (Zahir ve ark., 2022). Bu spektral davranış farklılıkları Şekil 3'te görsel olarak gösterilmekte olup, bitki sağlığının değerlendirilmesi amacıyla matematiksel olarak ifade edilerek çeşitli spektral indekslerin geliştirilmesine temel oluşturmıştır.

Spektral indeksler genellikle iki veya daha fazla dalga boyundaki yansıma değerlerinin farkı, oranı ya da kombinasyonları ile elde edilir. Bu indeksler sayesinde ham yansıma değerleri karşılaştırılabilir hâle gelir ve bitki sağlığı geniş alanlarda mekânsal olarak haritalanabilir. Bitki örtüsünün izlenmesinde en yaygın kullanılan indekslerden biri Normalize Edilmiş Vejetasyon İndeksi (NDVI)'dir. NDVI, kırmızı ve yakın kızılötesi bantlar kullanılarak hesaplanır ve bitki örtüsünün yoğunluğu ile canlılığını

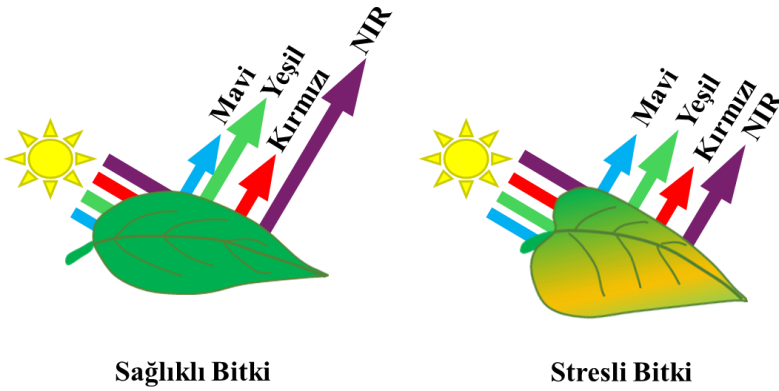
değerlendiren temel bir göstergedir. Yüksek NDVI değerleri yoğun ve sağlıklı bitki örtüsünü, düşük değerler ise stresli, seyrek veya zayıf bitki örtüsünü işaret eder.

NDVI, hava araçları (drone veya uçak) aracılığıyla yapılan uzaktan algılama uygulamalarında geniş tarım alanlarının hızlı biçimde değerlendirilmesine olanak sağlar (Olson ve Anderson, 2021). Uçuşlar sırasında elde edilen görüntüler, tarımsal üreticilerin stresli bölgeleri kısa sürede belirlemesine yardımcı olur. Bu sayede sulama, gübreleme veya müdahale gerektiren alanlara yönelik bölgesel uygulamalar yapılabilir; zaman, iş gücü ve girdi kullanımının optimize edilmesi mümkün hâle gelir. NDVI haritaları kullanılarak düşük değerli bölgeler belirlenebilir ve saha gözlemleri ile bu alanlarda su veya besin eksikliği teşhis edildikten sonra uygun uygulamalar gerçekleştirilebilir.

NDVI'ya ek olarak farklı stres türlerini veya bitki özelliklerini tespit etmeye yönelik çeşitli spektral indeksler geliştirilmiştir. Örneğin, toprağın yansımaya etkisinin yüksek olduğu alanlarda NDVI'nın toprak parlaklığından fazla etkilenmesi nedeniyle Toprak Ayarlı Vejetasyon İndeksi (SAVI) tercih edilir. Bitki örtüsünün yoğun olduğu bölgelerde, NDVI'nın doygunluğa ulaşmasını engelleyen ve atmosferik etkileri daha iyi yöneten Geliştirilmiş Vejetasyon İndeksi (EVI) kullanılabilir. Bitki su durumu açısından önemli olan Normalize Edilmiş Su İndeksi (NDWI), yaprak su içeriğindeki değişimlere karşı daha duyarlı olup su stresinin değerlendirilmesinde yardımcı bir gösterge sunar. Ayrıca fotosentetik aktivite ve ışık kullanım etkinliğini değerlendirmede kullanılan fotokimyasal yansımaya indeksi (PRI) gibi farklı indeksler, bitki fizyolojisinin belirli yönlerini analiz etmek için geliştirilmiştir.

Farklı spektral indekslerin birlikte kullanılması, bitkilerin fizyolojik durumuna ilişkin değerlendirmelerde daha geniş bir perspektif sunabilir. Çünkü her bir indeks, bitki bünyesindeki farklı özelliklere duyarlıdır ve kuraklık stresinin etkileri tek bir biyofiziksel parametre ile sınırlı değildir. Örneğin, NDVI bitki örtüsü yoğunluğu ve canlılığı hakkında genel bir gösterge sunarken, SAVI toprak parlaklığının etkisini azaltarak özellikle bitki örtüsünün seyrek olduğu alanlarda daha güvenilir bilgiler sağlayabilir. EVI, yoğun bitki örtüsü koşullarında yansımaya doygunluğunu azaltarak yapısal değişimleri daha net ortaya koyabilir; NDWI ise yaprak su içeriğindeki değişimlere karşı daha yüksek duyarlılık göstererek kuraklık stresinin erken belirtilerinin izlenmesine

katkıda bulunabilir. Bu indekslerin her biri farklı dalga boyu bantlarına tepki verdikleri için, bir arada kullanıldıklarında bitkilerin su durumu, pigment yoğunluğu, yapısal özellikleri ve fizyolojik stres düzeyleri hakkında daha bütüncül ve karşılaştırmalı değerlendirmeler yapılmasına olanak tanıyabilir. Dolayısıyla, dijital tarım uygulamalarında kuraklık stresinin izlenmesi amacıyla yalnızca tek bir indeks yerine çalışma koşullarına ve amaçlarına uygun bir indeks kombinasyonunun tercih edilmesi, elde edilen bilgilerin çeşitliliğini ve yorumlama gücünü artırabilmektedir.



Şekil 3. Sağlıklı ve stresli bitkilerde farklı dalga boyu yansıma davranışları

2.4. Dronların diğer teknolojik araçlar ile entegrasyonu

Dronlar, başlangıçta askeri ve keşif amaçlı kullanılan bu araçlar, gelişen sensör teknolojileri sayesinde tarımsal verimliliği artırma potansiyeli taşıyan önemli araçlar hâline gelmiştir. Dronlar, multispektral ve termal kameralar, hava durumu sensörleri ve diğer ileri teknoloji sensörler ile donatılarak tarımsal üretimde önemli bilgileri hızlıca sunarak karar alma süreçlerini destekleyebilir (Zalavadiya, 2024).

Multispektral kameralar, NDVI kullanılarak, geniş tarım arazilerinde bitkilerin su stresine girdiği bölgeleri erken aşamada tespit edilmesine yardımcı olabilir. Öte yandan, termal kameralar, bitki yüzeylerindeki sıcaklık değişimlerini izleyerek bitkilerin su kaybı ve su stresi hakkında erken uyarılar sağlar. Su stresine giren bitkiler, transpirasyon oranlarını azaltarak daha yüksek

yüzey sıcaklıklarına sahip olurlar, bu da termal görüntüleme ile anında tespit edilebilir (Masina ve ark., 2020). Bu verilerle, tarımsal üreticiler daha hedeflenmiş sulama stratejileri geliştirebilir ve sulama zamanlamalarını optimize edebilir. Dronlar, entegre edilen sensörler aracılığıyla sıcaklık, nem, rüzgâr hızı ve rüzgâr yönü gibi meteorolojik verileri toplayarak, sulama planlamasının daha doğru yapılmasını sağlar (Alexandris ve ark., 2021). Örneğin, sıcaklık ve nem oranları, bitkilerin suya olan ihtiyaçlarını doğrudan etkiler (Zhang ve ark., 2022). Benzer şekilde, rüzgâr hızının yüksek olduğu durumlarda, bitkilerdeki transpirasyon oranı artar ve su kaybı hızlanır (Bang ve ark., 2010). Bu meteorolojik faktörlerin doğru bir şekilde izlenmesi ve analiz edilmesi, sulama sistemlerinin gerçek zamanlı olarak ayarlanmasında yardımcı olur. Toplanan veriler, yapay zekâ tabanlı algoritmalar aracılığıyla analiz edilerek sulama zamanlamaları ve su miktarı optimize edilir. Bu stratejilerin gereksiz su kullanımını azaltmaya ve verimliliği artırmaya katkıda bulunabileceği belirtilmektedir.

Dronların tarımsal üretime entegrasyonu, hem izleme süreçlerinde hız ve doğruluk sağlaması hem de girdi kullanımını optimize etmesi açısından önemli bir potansiyel taşımaktadır. Dronların sunduğu hızlı veri toplama ve analiz imkânı, üreticilerin daha hedefe yönelik uygulamalar geliştirmesine yardımcı olur. Bitki sağlığının takibi için farklı sensörlerle birlikte kullanıldığında tarımsal karar süreçlerini destekleyen değerli bilgiler sağlar. Ayrıca bu teknolojilerin otomatik sistemlere entegre edilmesi, iş gücü gereksinimini azaltarak uygulamaların daha tutarlı yürütülmesine katkı sunar. Dronlar, tarımsal izleme süreçlerinde veri toplama ve değerlendirme kapasitesini artırarak bitki sağlığının izlenmesi, kaynak kullanımının iyileştirilmesi ve sürdürülebilir üretim hedeflerine yönelik çalışmaları destekleyen önemli araçlar olarak değerlendirilmektedir.

3. YAPAY ZEKÂ İLE VERİ ANALİZİ VE KARAR DESTEK SİSTEMLERİ

Yapay zekâ (AI), bilgi işlem gücündeki büyük ilerlemelerle 20. yüzyılın ortalarında ortaya çıkmış bir bilimsel disiplin olarak gelişmeye başlamıştır (Cai ve ark., 2021). 1950’lerde Alan Turing’in ünlü “Turing Testi” ile gündeme gelmesiyle yapay zekâ, bilgisayar bilimlerinde önemli bir dönüm noktası oluşturmuş ve matematiksel modeller ile bilgi işlem süreçlerine odaklanan

erken çalışmaların temeli atılmıştır (Turing, 2009). Makine öğrenimi, derin öğrenme ve veri madenciliği gibi yöntemlerin gelişmesiyle birlikte yapay zekâ, tarım sektörü de dahil olmak üzere birçok endüstriye entegre edilmiştir. Özellikle 2000’li yıllardan sonra büyük veri setlerinin toplanması ve işlenebilmesi, tarımsal üretim süreçlerinin yapay zekâ tabanlı olarak optimize edilmesine olanak tanımıştır.

Tarımda yapay zekâ uygulamaları, sensör teknolojileri, uzaktan algılama ve Nesnelerin İnterneti (IoT) ile birlikte ele alındığında önemli avantajlar sunmaktadır. Farklı kaynaklardan elde edilen yüksek hacimli veriler, yapay zekâ algoritmaları ile analiz edilerek üreticilere karar destek hizmeti sağlayan sistemler oluşturulabilmektedir. Bu sistemler, özellikle sulama yönetimi, gübreleme stratejileri, hastalık ve zararlı tespiti ile verim tahmini gibi kritik alanlarda öne çıkmaktadır.

Sulama yönetiminde yapay zekâ kullanımı, akıllı sulama sistemlerinin geliştirilmesine önemli katkılar sağlar. Toprak nem sensörleri, meteorolojik sensörler ve termal kameralar ile elde edilen veriler makine öğrenimi algoritmaları ile analiz edilerek sulama zamanı ve miktarı tahmin edilebilir (Togneri ve ark., 2022). Örneğin, bir makine öğrenimi modeli, geçmiş sulama kayıtlarını, toprak nemini, hava sıcaklığını ve bitki gelişim dönemini dikkate alarak önümüzdeki günlerde kök bölgesinde oluşacak su açığını öngörebilir. Bu tahminler kullanılarak, bitkilerin su stresine girmesine izin vermeden zamanında ve yeterli miktarda sulama yapılabilir. Böylece hem su tasarrufu sağlanır hem de verimlilik artırılır.

Gübreleme kararlarının optimize edilmesinde de yapay zekâ önemli rol oynamaktadır. Uzaktan algılama verilerinden elde edilen NDVI haritaları, toprak analiz sonuçları ve geçmiş verim değerleri birlikte değerlendirildiğinde, tarlalar içinde değişkenlik gösteren bölgeler belirlenebilir. Yapay zekâ tabanlı modeller, bu değişkenliği dikkate alarak her bir bölge için en uygun gübre dozunu önerebilir. Böylece hem gereksiz gübre kullanımının önüne geçilir hem de besin maddesi eksikliğinden kaynaklanan verim kayıpları azaltılır. Bu durum, ekonomik kazancın yanı sıra çevresel sürdürülebilirlik açısından da önemlidir.

Hastalık ve zararlı tespiti, tarımsal üretimde yapay zekânın hızla geliştiği bir diğer alandır. Bitki yapraklarının, gövde ve meyvelerinin fotoğrafları, görüntü işleme ve derin öğrenme yöntemleri ile analiz edilerek hastalık ve

zararlı belirtileri erken dönemde tespit edilebilir (Orchi ve ark., 2021). Örneğin, yapraklarda görülen lekeler, renk değişimleri veya şekil bozuklukları, görüntü sınıflandırma modelleri kullanılarak belirli bir hastalıkla ilişkilendirilebilir. Bu sayede üreticiler, kimyasal mücadeleye daha erken ve hedefe yönelik bir şekilde başlayarak hem ürün kayıplarını azaltabilir hem de gereksiz ilaç kullanımını önleyebilir.

Yapay zekâ, verim tahmini ve risk analizi gibi stratejik karar süreçlerinde de kullanılmaktadır. İklim verileri, toprak özellikleri, çeşit bilgisi, ekim zamanı, gübreleme ve sulama kayıtları gibi çok sayıda parametreyi içeren veri setleri, derin öğrenme veya diğer makine öğrenimi yöntemleri ile analiz edilerek sezon sonu verim tahminleri yapılabilir. Bu tahminler, üreticilerin pazarlama stratejilerini planlamalarına, girdi kullanımını optimize etmelerine ve risk yönetimi açısından daha hazırlıklı olmalarına yardımcı olur.

Genel olarak değerlendirildiğinde, yapay zekâ tabanlı karar destek sistemleri tarımsal üretimdeki verilerin anlamlandırılmasını kolaylaştırmakta ve üreticilere daha bilinçli kararlar almaları için güçlü araçlar sunmaktadır. Sulama stratejilerinin geliştirilmesi, gübre ve ilaç kullanımının optimize edilmesi, hastalık ve zararlıların erken tespiti ve verim tahmini gibi uygulamalar aracılığıyla hem ekonomik verimlilik artırılmakta hem de sürdürülebilir su ve girdi kullanımı desteklenmektedir. Böylece yapay zekâ, tarımsal üretimin daha dirençli, esnek ve çevre dostu bir yapıya kavuşmasında kilit bir teknoloji haline gelmektedir.

4. SONUÇ

Kuraklık stresi, iklim değişikliğinin etkileriyle birlikte tarımsal üretimi tehdit eden en önemli abiyotik stres faktörlerinden biri hâline gelmiştir. Bu stresin erken dönemde izlenebilmesi için termal görüntüleme, toprak nem sensörleri, meteorolojik sensörler, spektral indeksler, dronlar ve yapay zekâ tabanlı analizler gibi teknolojiler önemli avantajlar sunmaktadır. Termal kameralar bitki yüzey sıcaklığındaki değişimleri ortaya koyarken, nem ve hava durumu sensörleri kök bölgesindeki su durumunu ve atmosferik koşulları izlemeyi mümkün kılmaktadır. Uzaktan algılama temelli spektral indeksler geniş alanlarda stresli bölgelerin belirlenmesini kolaylaştırmakta; dronlar ise bu verilerin yüksek çözünürlükle ve hızlı şekilde elde edilmesini sağlamaktadır. Farklı veri kaynaklarının yapay zekâ destekli karar mekanizmalarına entegre

edilmesi, sulama ve diğer tarımsal uygulamaların daha doğru ve veriye dayalı biçimde planlanmasına katkıda bulunmaktadır. Bu teknolojilerin birlikte kullanımını içeren bütüncül yaklaşımlar, su ve diğer tarımsal girdilerin daha verimli kullanılmasına olanak tanıyarak sürdürülebilir ve iklim değişikliğine uyumlu üretim sistemlerinin geliştirilmesine destek sağlamaktadır.

KAYNAKÇA

- Abiri, R., Rizan, N., Balasundram, S. K., Shahbazi, A. B., & Abdul-Hamid, H. (2023). Application of digital technologies for ensuring agricultural productivity. *Heliyon*. Geliş tarihi gönderen [https://www.cell.com/heliyon/fulltext/S2405-8440\(23\)09809-2](https://www.cell.com/heliyon/fulltext/S2405-8440(23)09809-2)
- Alexandris, S., Psomiadis, E., Proutsos, N., Philippopoulos, P., Charalampopoulos, I., Kakaletis, G., ... Paraskevopoulos, A. (2021). Integrating drone technology into an innovative agrometeorological methodology for the precise and real-time estimation of crop water requirements. *Hydrology*, 8(3), 131.
- Balakrishnan, G. K., Yaw, C. T., Koh, S. P., Abedin, T., Raj, A. A., Tiong, S. K., & Chen, C. P. (2022). A review of infrared thermography for condition-based monitoring in electrical energy: Applications and recommendations. *Energies*, 15(16), 6000.
- Bang, C., Sabo, J. L., & Faeth, S. H. (2010). Reduced wind speed improves plant growth in a desert city. *PLoS One*, 5(6), e11061.
- Cai, Z.-X., Liu, L., Chen, B., & Wang, Y. (2021). *Artificial Intelligence: From Beginning to Date*. WORLD SCIENTIFIC. doi: 10.1142/11921
- Dayioğlu, M. A., & Turker, U. (2021). Digital transformation for sustainable future-agriculture 4.0: A review. *Journal of Agricultural Sciences*, 27(4), 373-399.
- Dietz, K. -J., Zörb, C., & Geilfus, C. -M. (2021). Drought and crop yield. *Plant Biology*, 23(6), 881-893. doi: 10.1111/plb.13304
- Evans, R. G., & Sadler, E. J. (2008). Methods and technologies to improve efficiency of water use. *Water Resources Research*, 44(7), 2007WR006200. doi: 10.1029/2007WR006200
- Hrisko, J. (2020). Capacitive soil moisture sensor theory, calibration, and testing. *no*, 2, 1-12.
- Huan, Z., Wang, H., Li, C., & Wan, C. (2017). The soil moisture sensor based on soil dielectric property. *Personal and Ubiquitous Computing*, 21, 67-74.
- IPCC, AR5, 2014: Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. <https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg2/>
- IPCC, AR6, 2021: Climate Change 2021: The Physical Science Basis.

- <https://www.ipcc.ch/report/sixth-assessment-report-working-group-i/>
Ishimwe, R., Abutaleb, K., & Ahmed, F. (2014). Applications of thermal imaging in agriculture—A review. *Advances in remote Sensing*, 3(03), 128.
- Junker, L. V., & Ensminger, I. (2016). Relationship between leaf optical properties, chlorophyll fluorescence and pigment changes in senescing *Acer saccharum* leaves. *Tree Physiology*, 36(6), 694-711.
- Li, W., Awais, M., Ru, W., Shi, W., Ajmal, M., Uddin, S., & Liu, C. (2020). Review of Sensor Network-Based Irrigation Systems Using IoT and Remote Sensing. *Advances in Meteorology*, 2020, 1-14. doi: 10.1155/2020/8396164
- Masina, M., Lambertini, A., Daprà, I., Mandanici, E., & Lamberti, A. (2020). Remote sensing analysis of surface temperature from heterogeneous data in a maize field and related water stress. *Remote Sensing*, 12(15), 2506.
- Mattar, M. A., Roy, D. K., Al-Ghobari, H. M., & Dewidar, A. Z. (2022). Machine learning and regression-based techniques for predicting sprinkler irrigation's wind drift and evaporation losses. *Agricultural Water Management*, 265, 107529.
- Nasir, M. W., & Toth, Z. (2022). Effect of drought stress on potato production: A review. *Agronomy*, 12(3), 635.
- Olson, D., & Anderson, J. (2021). Review on unmanned aerial vehicles, remote sensors, imagery processing, and their applications in agriculture. *Agronomy Journal*, 113(2), 971-992. doi: 10.1002/agj2.20595
- Orchi, H., Sadik, M., & Khaldoun, M. (2021). On using artificial intelligence and the internet of things for crop disease detection: A contemporary survey. *Agriculture*, 12(1), 9.
- Pamungkas, S. S. T., & Farid, N. (2022). Drought stress: Responses and mechanism in plants. *Reviews in Agricultural Science*, 10, 168-185.
- Pineda, M., Barón, M., & Pérez-Bueno, M.-L. (2020). Thermal imaging for plant stress detection and phenotyping. *Remote Sensing*, 13(1), 68.
- Sadok, W., Lopez, J. R., & Smith, K. P. (2021). Transpiration increases under high-temperature stress: Potential mechanisms, trade-offs and prospects for crop resilience in a warming world. *Plant, Cell & Environment*, 44(7), 2102-2116. doi: 10.1111/pce.13970

- Saiz-Rubio, V., & Rovira-Más, F. (2020). From smart farming towards agriculture 5.0: A review on crop data management. *Agronomy*, 10(2), 207.
- Seleiman, M. F., Al-Suhaibani, N., Ali, N., Akmal, M., Alotaibi, M., Refay, Y., ... Battaglia, M. L. (2021). Drought stress impacts on plants and different approaches to alleviate its adverse effects. *Plants*, 10(2), 259.
- Selvaperumal, A., & Muthuchamy, I. (2017). Irrigation automation using resistive soil moisture sensor. *International journal of agricultural science and research (IJASR)*, 7(1), 143-148.
- Sinha, B. B., & Dhanalakshmi, R. (2022). Recent advancements and challenges of Internet of Things in smart agriculture: A survey. *Future Generation Computer Systems*, 126, 169-184.
- Togneri, R., dos Santos, D. F., Camponogara, G., Nagano, H., Custódio, G., Prati, R., ... Kamienski, C. (2022). Soil moisture forecast for smart irrigation: The primetime for machine learning. *Expert Systems with Applications*, 207, 117653.
- Turing, A. M. (2009). Computing Machinery and Intelligence. İçinde R. Epstein, G. Roberts, & G. Beber (Ed.), *Parsing the Turing Test* (ss. 23-65). Dordrecht: Springer Netherlands. doi: 10.1007/978-1-4020-6710-5_3
- Vadivambal, R., & Jayas, D. S. (2011). Applications of thermal imaging in agriculture and food industry—A review. *Food and bioprocess technology*, 4, 186-199.
- Zahir, S. A. D. M., Omar, A. F., Jamlos, M. F., Azmi, M. A. M., & Muncan, J. (2022). A review of visible and near-infrared (Vis-NIR) spectroscopy application in plant stress detection. *Sensors and Actuators A: Physical*, 338, 113468.
- Zalavadiya, U. B. (2024). Drones in Agriculture: Mapping, Monitoring, and Decision-Making. *Smart Agritech: Robotics, AI, and Internet of Things (IoT) in Agriculture*, 373.
- Zeng, C., Zhang, F., & Luo, M. (2022). A deep neural network-based decision support system for intelligent geospatial data analysis in intelligent agriculture system. *Soft Computing*, 26(20), 10813-10826.
- Zhang, P., Yang, X., Manevski, K., Li, S., Wei, Z., Andersen, M. N., & Liu, F. (2022). Physiological and growth responses of potato (*Solanum*

tuberosum L.) to air temperature and relative humidity under soil water deficits. *Plants*, 11(9), 1126.

Zhang, T., Xu, X., Jiang, H., Qiao, S., Guan, M., Huang, Y., & Gong, R. (2022). Widespread decline in winds promoted the growth of vegetation. *Science of the Total Environment*, 825, 153682.

Zhao, W., Dong, X., Wu, Z., Wei, C., Li, L., Yu, D., ... Ma, Y. (2022). Using infrared thermal imaging technology to estimate the transpiration rate of citrus trees and evaluate plant water status. *Journal of Hydrology*, 615, 128671.

Zhu, Y., Cheng, Z., Feng, K., Chen, Z., Cao, C., Huang, J., ... Gao, Y. (2022). Influencing factors for transpiration rate: A numerical simulation of an individual leaf system. *Thermal Science and Engineering Progress*, 27, 101110.

CHAPTER 1

POTENTIAL EFFECTS OF CLIMATE CHANGE ON COTTON

Prof. Dr. Ahmet YILMAZ^{1*}

DOI: <https://www.doi.org/10.5281/zenodo.17966654>

^{1*} Department of Crop Science, Faculty of Agriculture, Harran University, 63190
Sanliurfa, Türkiye.

hayilmaz@harran.edu.tr, <https://orcid.org/0000-0002-8930-0952>

Sorumlu Yazar: hayilmaz@harran.edu.tr

1. INTRODUCTION

Climate change is regarded as one of the most critical environmental, economic, and societal challenges of the 21st century, and its impacts on agricultural production systems have become increasingly evident. Climate change is a multidimensional phenomenon that encompasses not only rising temperatures but also disruptions in precipitation patterns, an increased frequency of extreme weather events, intensified drought and desertification processes, irregularities in the hydrological cycle, and the weakening of ecosystem services (IPCC, 2007). For this reason, climate change represents one of the most comprehensive risk factors facing modern agriculture, exerting pronounced pressure particularly on crop production systems with high water dependency. Since agricultural production is directly tied to climatic variables, even minor shifts in current climate trends can lead to dramatic fluctuations in crop productivity. Climate parameters such as temperature, precipitation, solar radiation, relative humidity, and extreme weather conditions are key determinants that directly affect plant physiological development, growth processes, water-use efficiency, and yield components (Yadav et al., 2015). Consequently, climate change not only reduces agricultural productivity but also leads to multiple secondary effects, including regional shifts in crop cultivation zones, changes in planting seasons, rising water demand, and increasing production costs.

Recent scientific studies indicate that the global mean temperature has increased by approximately 1.1°C compared to pre-industrial levels, and depending on ongoing greenhouse gas emission scenarios, this increase is projected to reach 1.5–2°C within the next 30 years (IPCC, 2007). This rise is expected to significantly elevate evapotranspiration rates, particularly in arid and semi-arid climatic zones, thereby increasing crop water demand while simultaneously undermining the sustainability of water resources. This situation poses a critical threat to crops such as cotton, which require substantial amounts of water. Cotton (*Gossypium* spp.) is a strategic agricultural commodity with high economic value worldwide due to its use in fiber production as well as its oil and by-products. As a fundamental raw material of the textile industry, cotton constitutes an important component of the agricultural economies of many countries. However, the crop's high water requirement, long growing period, and sensitivity to heat stress make it

particularly vulnerable to the adverse impacts of climate change (Pettigrew, 2001). Furthermore, the fact that cotton cultivation is concentrated largely in semi-arid regions exacerbates the risk of drought. Since a substantial portion of global cotton production occurs in hot and dry climatic belts across South Asia, Central Asia, Africa, and the Americas, climate-induced water limitations pose a significant threat to the sustainability of cotton production (Voora et al., 2020).

The effects of climate change on cotton production must be evaluated in a multidimensional framework. Elevated temperatures directly influence photosynthesis, flowering, and boll development, resulting in reductions in yield. Temperature stress is known to negatively affect pollen viability, which in turn decreases boll retention rates (Singh et al., 2020). Similarly, irregular precipitation patterns disrupt soil moisture conditions prior to planting, reduce germination and emergence, and lead to root rot and drainage problems due to excessive rainfall. Drought, on the other hand, is one of the most critical stressors affecting cotton production. Under increasing water stress, stomatal closure causes photosynthetic rates to decline, vegetative and reproductive growth to slow, fiber formation to weaken, and ultimately final yield to decrease substantially (Khan et al., 2018). Beyond ecological impacts, the socioeconomic implications of climate change for cotton production are also highly significant. Rising water scarcity increases irrigation costs, reduces producer income stability, and in some regions leads to shifts from cotton to alternative crops. Additionally, the excessive exploitation of water resources contributes to declining groundwater levels, increasing energy costs and threatening the economic sustainability of cotton farming (Li et al., 2020). The growing frequency of extreme weather events—such as heatwaves, sudden heavy rainfall, hailstorms, and strong winds—can cause unexpected damage throughout the cotton production chain and lead to quality losses during harvest.

Understanding the impacts of climate change on cotton production is therefore essential for the future of agricultural planning at both regional and global scales. Moreover, the development of proactive approaches—such as drought management, water-use efficiency strategies, genetic improvement programs, agricultural technologies, and adaptation measures—plays a crucial role in enhancing the resilience of the cotton sector to climate change.

Accordingly, the relationship between climate change and cotton production must be examined comprehensively from physiological, ecological, and economic perspectives. This chapter aims to examine the effects of climate change on cotton production through a holistic perspective. It first presents the climatic requirements of the cotton plant, followed by an evaluation of the direct and indirect impacts of climate change on cotton, the physiological and production-related consequences of drought, and finally the future risks and adaptation strategies. In doing so, it provides a detailed overview of the vulnerabilities of cotton cultivation to climate change and potential solutions to mitigate these vulnerabilities.

2. Agroecological Requirements of the Cotton Plant

Cotton (*Gossypium* spp.) is a crop of high economic value cultivated predominantly in semi-arid and warm climate regions. The growth and development of the plant are substantially influenced by environmental factors such as temperature, water availability, soil conditions, solar radiation, and the coordinated functioning of physiological processes. Therefore, a thorough understanding of the climatic and ecological requirements of cotton is crucial for sustainable production and for optimizing yield. The following subsections provide a detailed overview of the fundamental agroecological requirements of the cotton plant.

Temperature Requirements

Cotton is classified as a warm-season crop and requires relatively high temperatures throughout its growth period. The minimum temperature required for seed germination is approximately 15–18°C, and conditions below this threshold prolong emergence and slow early seedling development (Reddy et al., 2018). The optimal temperature range for growth is 25–32°C, within which photosynthetic activity, enzymatic processes, and vegetative growth occur at their highest efficiency. Temperature requirements vary across the phenological stages of the cotton plant. While higher temperatures during the vegetative stage promote vigorous growth, excessive temperatures during the reproductive stage can impose stress. Temperatures exceeding 35–38°C have been shown to reduce pollen viability during flowering and boll initiation, resulting in increased boll shedding and a significant decline in yield (Reddy et al., 2018).

Extreme temperatures cause physiological imbalances within the plant. Elevated leaf temperatures increase transpiration rates, thereby predisposing the plant to water stress. Moreover, temperatures above 40°C negatively affect cellulose deposition during fiber development, leading to reductions in fiber length and strength (Pettigrew, 2001). For this reason, close monitoring of temperature fluctuations is essential in cotton cultivation—particularly in the context of climate change, which has intensified the frequency of heatwaves.

Water Requirements

The disruption of the global hydrological cycle and the rise in evapotranspiration rates due to climate change have made water management a critical necessity in cotton production systems. Increasing temperatures, irregular precipitation patterns, and more frequent drought episodes require that cotton water requirements be assessed with greater precision (Allen et al., 2005). In this regard, modern irrigation technologies play a strategic role not only in mitigating climate-induced stress but also in improving water-use efficiency. Among the irrigation techniques widely used in cotton cultivation today, drip irrigation, sprinkler irrigation, and sensor-based precision irrigation systems stand out. Drip irrigation systems deliver water directly to the root zone, reducing evaporation losses while maintaining optimal soil water–air balance (Çetin & Kara, 2019). Additionally, when combined with fertigation, these systems can enhance both yield and fiber quality by enabling the controlled application of nutrients (Girma et al., 2007).

Water stress induced by climate change is known to limit photosynthetic capacity in cotton, reduce pollen viability during flowering, and decrease boll retention (Gao et al., 2021). Therefore, irrigation scheduling is a determining factor not only for achieving high yields but also for maintaining fiber quality. Alleviating water stress during flowering and boll-filling stages is particularly critical for preserving fiber length, strength, and micronaire—key indicators of fiber quality (Dağdelen et al., 2009). Recent years have seen a widespread adoption of technologies such as soil moisture sensors, plant-based stress indicators, remote sensing–derived evapotranspiration models (e.g., SEBAL, METRIC), and automated irrigation control software. These tools facilitate real-time determination of plant water needs, significantly reducing the risks of over-irrigation, under-irrigation, and water wastage (Li et al., 2020). At the

same time, they enhance water-use efficiency and strengthen the adaptive capacity of farming systems to climate change.

In summary, modern irrigation management plays a dual role: it not only contributes to increased productivity but also serves as an essential adaptation strategy that reduces the adverse impacts of climate change on cotton production. The adoption of water-saving irrigation technologies, the use of scientifically informed irrigation scheduling, and the implementation of sustainable water management practices are critical for the future of cotton agriculture.

Sensitivity of Cotton to Water Stress

The sensitivity of cotton to water availability varies throughout its developmental stages; however, the period of rapid vegetative growth, the flowering stage, and the phases of boll formation and fiber development are considered the most critical phenological stages in terms of susceptibility to water stress. Water deficiency during the phase of accelerated vegetative growth restricts cell expansion, resulting in reduced plant height and diminished leaf area. Consequently, photosynthetic potential declines, adversely affecting the yield capacity of subsequent reproductive stages (Saleem et al., 2016). Water stress occurring during the flowering period directly disrupts the physiological functioning of the cotton plant; stomatal closure reduces photosynthetic carbon assimilation, while decreases in pollen viability and increases in flower abscission lead to a marked reduction in boll retention (Snider & Oosterhuis, 2012). It has been reported that a substantial proportion of cotton yield losses is associated with water stress during the flowering stage. The period of boll formation and fiber development represents one of the most critical phases for both yield and fiber quality. Water deficiency at this stage slows fiber elongation and carbon metabolism within the boll, resulting in reductions in fiber length, strength, and boll weight. Increased water stress during boll filling restricts the translocation of photosynthates to developing bolls, leading to dramatic declines in total yield (Pettigrew, 2004; Sarwar et al., 2024). The literature consistently highlights that most yield reductions in cotton are associated with water stress occurring during flowering and boll development, and that improper irrigation management during these critical stages results in irreversible yield losses (Dağdelen et al., 2009).

Water-Use Efficiency and Drought

The cotton plant, due to its deep root system and various physiological adaptation mechanisms, generally exhibits higher water-use efficiency than many other field crops; however, this advantage diminishes substantially under prolonged drought and high evaporative demand. Declining soil moisture in the root zone limits the plant's water uptake capacity, leading to reductions in photosynthetic rate, decreases in carbon assimilation, and consequently a decline in vegetative growth. Under water stress conditions, the reduction in leaf area decreases the plant's capacity for light interception and negatively affects the availability of assimilates required to support developing reproductive organs (Wiggins et al., 2014; Pace et al., 1999). The effects of drought on cotton are not limited to morphological changes; they also encompass key physiological and biochemical processes. Water deficit restricts cell division in growing tissues due to insufficient turgor pressure and slows carbon metabolism necessary for fiber development. This results in reductions in fiber length, strength, and maturity, ultimately diminishing overall fiber quality (Gorham et al., 1988). Additionally, drought disrupts the vegetative–reproductive balance of the plant by limiting the water and energy resources required for boll formation, resulting in reductions in both boll size and boll number.

One of the most pronounced plant responses to water stress is the alteration of hormonal balance. Under drought conditions, abscisic acid (ABA) levels rise rapidly, leading to stomatal closure. Although this response reduces transpirational water loss, it simultaneously restricts photosynthetic capacity. This hormonal adjustment serves as a protective mechanism aimed at conserving water, yet it exerts negative pressure on plant growth and yield (Zhao et al., 2024; Pandey et al., 2003). Prolonged ABA accumulation modifies the plant's developmental program, leading to reduced growth rates and weakened yield components. Therefore, although cotton exhibits relatively high water-use efficiency, extended drought periods negatively affect physiological processes, morphological development, and hormonal regulation, collectively resulting in substantial yield losses. For this reason, modern cotton production places great emphasis on irrigation strategies designed to mitigate water stress, the use of soil moisture sensors, precision irrigation applications, and the development of genetically drought-tolerant cultivars.

Irrigation Management and Its Importance

In modern cotton production, the efficient and sustainable management of water resources has become more critical than ever due to climate change–induced increases in evapotranspiration rates and irregular precipitation patterns. Among the most widely used irrigation technologies in contemporary cotton farming are drip irrigation, sprinkler systems, and sensor-based precision irrigation methods. These systems are commonly preferred to enhance water-use efficiency and to ensure that water is supplied in accordance with the developmental requirements of the crop. Drip irrigation, in particular, significantly reduces evaporation losses by delivering low-flow water directly to the root zone and supports root development and nutrient uptake by maintaining an optimal soil water–air balance (Fereres & Soriano, 2007). Owing to these advantages, drip irrigation is considered a strategic irrigation method for cotton production, especially in semi-arid regions where water scarcity continues to intensify. Accurate irrigation scheduling directly influences cotton yield and fiber quality components—including boll retention, boll maturation rate, and final yield. When the plant’s water requirements are not met, physiological responses such as stomatal closure, decreased photosynthetic rates, and limited carbon assimilation are triggered, collectively slowing the development of reproductive organs and reducing boll weight (Payero, 2010). Therefore, irrigation must be planned in accordance with the phenological stages of cotton not only to prevent yield losses but also to preserve fiber length, strength, and maturity.

In recent years, the adoption of sensor-based irrigation systems has marked a new era in cotton water management. Technologies such as soil moisture sensors, plant-based stress measurement tools, and remote-sensing models allow irrigation decisions to be based on scientific data rather than intuition, thereby reducing over-irrigation and water waste while improving water-use efficiency and supporting sustainable cotton production (Evet et al., 2020). Collectively, these advancements have further underscored the economic and ecological importance of effective irrigation management in modern cotton agriculture.

Photosynthesis and Growth Physiology

As a C3 species, the cotton plant exhibits high sensitivity to environmental changes due to the characteristics of its photosynthetic pathway. In C3 plants, the oxygenase activity of the Rubisco enzyme is relatively high; therefore, conditions such as elevated temperatures, low CO₂ concentrations, and water stress promote photorespiration, ultimately reducing net carbon gain. This constitutes a major physiological constraint limiting both vegetative growth and the development of reproductive organs in cotton. Photosynthesis is directly affected by a range of interrelated environmental factors, including temperature, light intensity, CO₂ concentration, and soil–plant water status. Under optimal conditions, cotton achieves its highest photosynthetic capacity at temperatures of 28–32°C, while temperatures above this range decrease Rubisco activity and chlorophyll stability, reducing photosynthetic efficiency (Carmo-Silva & Salvucci, 2012). Light intensity is a determining factor for carbon assimilation, as low light levels reduce electron transport rates and constrain CO₂ fixation. Conversely, excessive irradiance may induce photooxidative stress, causing damage to chloroplast membranes (Zhao et al., 2023). Variations in atmospheric CO₂ concentration strongly influence photosynthesis in C3 species. Elevated CO₂ enhances the carboxylase activity of Rubisco, reducing photorespiration and improving water-use efficiency in cotton; however, studies indicate that this positive effect may be limited under water stress and high-temperature conditions (Reddy et al., 1998).

Water availability is essential for maintaining photosynthetic activity. In cotton, water deficit leads to reduced stomatal conductance, decreased chlorophyll content, and a notable decline in photosynthetic rate. Stomatal closure limits CO₂ diffusion into the leaf, constraining carbon assimilation and resulting in reduced growth and insufficient carbon supply for boll development (Hutmacher, 2013). Under prolonged water stress, plant metabolism shifts toward photorespiration, reducing energy efficiency and significantly diminishing net biomass accumulation. In summary, the reliance of cotton on the C3 photosynthetic pathway renders it highly sensitive to environmental stressors, particularly elevated temperatures and insufficient water availability, both of which compromise growth physiology. Therefore, irrigation strategies that sustain photosynthetic performance, light management practices such as

shading, and the use of heat-tolerant varieties constitute essential components of sustainable productivity in modern cotton production.

Photosynthesis Process and Its Relationship with Temperature

The photosynthetic performance of the cotton plant is closely linked to temperature, and due to its C3 photosynthetic pathway, cotton exhibits marked sensitivity to elevated temperatures. The optimal temperature range for photosynthesis in cotton is reported to be 28–30°C; temperatures above this range restrict Rubisco enzyme activity, reduce carboxylation efficiency, and increase the rate of photorespiration. As the oxygenase activity of Rubisco increases with rising temperature, carbon assimilation declines and net photosynthetic rate decreases. Consequently, insufficient carbon accumulation in the leaves slows vegetative growth and weakens the energy flow required for the development of generative organs (Reddy et al., 2004). High-temperature stress also disrupts chloroplast structure, decreases chlorophyll content, and interferes with the electron transport chain, further reducing photosynthetic efficiency. This physiological pressure negatively affects boll formation and boll retention. Several studies have shown that temperatures exceeding 35°C during boll development reduce pollen viability, lower flowering success, and hinder boll growth (Zhang et al., 2023). Excessive heat additionally influences stomatal behavior: increased transpiration accelerates water loss, while stomatal closure limits CO₂ uptake, further suppressing photosynthesis.

Thus, temperature elevation in cotton not only restricts the photosynthetic mechanism but also affects all stages of carbon metabolism, ultimately impairing plant growth and yield components. Therefore, irrigation management to alleviate heat effects, shading strategies, the use of heat-tolerant cultivars, and stress-monitoring technologies are essential for sustaining productivity in modern cotton production systems.

Water Stress and Photosynthesis

Drought conditions constitute one of the most critical stress factors directly affecting the photosynthetic process in cotton. As soil moisture declines, stomatal closure reduces internal CO₂ concentration, limiting carboxylation rate and significantly decreasing net photosynthesis. Reduced CO₂ uptake not only decreases the carboxylase activity of Rubisco but also increases photorespiration, resulting in substantial energy loss. Under such

physiological pressure, the cotton plant cannot produce sufficient carbon resources required for growth and development (Medrano et al., 2002). A decline in photosynthetic rate triggers cascading effects on both vegetative and reproductive development. Reduced carbon assimilation slows leaf and shoot growth, decreases leaf area index, and lowers the plant's light interception capacity. More importantly, the limitation of photosynthates under drought directly affects reproductive processes such as boll formation, fiber elongation, and cellulose deposition. Since fiber elongation requires a high carbon supply, reduced photosynthesis leads to decreased fiber length, strength, and maturity (Chen et al., 2017).

Photochemical limitations resulting from stomatal closure not only reduce CO₂ entry but also create imbalances in electron transport within chloroplasts, leading to the accumulation of reactive oxygen species (ROS). This oxidative stress damages membrane structures and causes chlorophyll degradation, further restricting photosynthetic capacity (Lawlor & Tezara, 2009). Thus, the impact of water stress manifests as short-term carbon deficiency and long-term structural and metabolic damage. In conclusion, drought is a multi-layered stress factor that suppresses all stages of photosynthesis in cotton. Beginning with reduced CO₂ uptake, this process leads to significant losses in fiber formation, cellulose synthesis, and reproductive development. Therefore, precision irrigation strategies aimed at reducing water stress hold critical importance in modern cotton cultivation.

Plant Development Stages and Physiology

The development of the cotton plant is generally categorized into four major phenological stages: germination and emergence, vegetative growth, flowering, boll formation–fiber development, and finally maturation. Each of these stages has distinct climatic requirements aligned with the plant's physiological demands. During germination and emergence, soil temperature and moisture level are critical for the initiation of healthy root development. In the vegetative stage, leaf area expansion, stem elongation, and enhancement of photosynthetic potential occur in close dependence on water and temperature conditions. However, the stages in which cotton is most sensitive to climatic factors are flowering and boll formation, along with the fiber development process. The physiological mechanisms occurring during these generative

stages are extremely sensitive to environmental changes such as temperature fluctuations, light intensity, and soil–water balance (Kaur et al., 2021; Zhu et al., 2023; Azhar et al., 2020). Consequently, increases in temperature, elevated evapotranspiration, or intensified water stress during flowering and boll formation can significantly reduce boll retention and fiber development, causing major losses in both yield and quality.

The physiological nature of cotton reveals fundamental processes that explain its vulnerability to climate change. As a C3 plant, cotton is particularly sensitive to physiological stress caused by high temperatures and insufficient soil moisture. When temperatures exceed the optimal range or soil moisture decreases, stomatal closure, reduced Rubisco activity, increased photorespiration, and impaired chlorophyll stability rapidly decrease photosynthetic rate. This reduction in photosynthesis limits carbon acquisition, slows vegetative growth, and prevents generative organs from receiving adequate assimilates. These physiological constraints lead to poor boll development, reduced fiber length and strength, and ultimately yield losses. Therefore, the sensitivity of physiological processes across cotton’s developmental stages explains why temperature fluctuations and water stress driven by climate change have such profound impacts on cotton production. This necessitates the monitoring of phenological stages, early detection of stress factors, and the development of integrated irrigation and thermal management strategies in modern cotton agriculture.

Conclusion

An integrated evaluation of the existing literature and current scientific findings clearly demonstrates that cotton is highly sensitive to climatic fluctuations from physiological, ecological, and production-oriented perspectives. Rising temperatures, irregular precipitation patterns, and increased drought frequency adversely affect the plant’s growth physiology, water-use efficiency, and key yield components such as boll formation and fiber development. Temperature and water stress experienced particularly during the flowering and boll development stages represent major drivers of yield loss and are directly associated with physiological responses such as stomatal closure, reduced photosynthetic rates, limited carbon assimilation, and decreased pollen viability. Temperatures exceeding the optimal thresholds for cotton growth

suppress both vegetative development and the formation of reproductive organs, reducing boll retention through declines in pollen viability. Similarly, intensified water stress limits the plant's photosynthetic capacity, weakening quality parameters such as fiber elongation and cellulose deposition. Drought conditions also induce hormonal imbalances that further constrain growth and productivity. As a result, timely and adequate irrigation has become a strategic component of maintaining yield stability in modern cotton production.

The ecological pressures imposed by climate change on agricultural systems also manifest as economic and socio-economic challenges. Rising water costs, decreasing groundwater levels, and the heightened risks posed by extreme weather events threaten the long-term sustainability of cotton farming. In this context, the development of climate adaptation strategies, the widespread adoption of modern irrigation technologies, the implementation of practices that improve water-use efficiency, and the cultivation of stress-tolerant varieties emerge as essential requirements for the future of cotton production. Overall, sustaining cotton agriculture under changing climatic conditions requires the identification of cultivation strategies aligned with the plant's physiological demands, effective management of water resources, development of measures to mitigate heat stress, and continuous monitoring of environmental impacts on the production cycle. These approaches will play a fundamental role in minimizing yield losses and enhancing the adaptive capacity of cotton production systems in the face of climate change.

REFERENCES

- Allen, R. G., Clemmens, A. J., Burt, C. M., Solomon, K., & O'Halloran, T. (2005). Prediction accuracy for projectwide evapotranspiration using crop coefficients and reference evapotranspiration. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 131(1), 24–36.
- Azhar, M. T., Wani, S. H., Chaudhary, M. T., Jameel, T., Kaur, P., & Du, X. (2020). Heat tolerance in cotton: Morphological, physiological, and genetic perspectives. *Heat Stress Tolerance in Plants: Physiological, Molecular and Genetic Perspectives*, 1–22.
- Carmo-Silva, A. E., & Salvucci, M. E. (2012). The temperature response of CO₂ assimilation, photochemical activities and Rubisco activation in *Camelina sativa*, a potential bioenergy crop with limited capacity for acclimation to heat stress. *Planta*, 236(5), 1433–1445.
- Chen, B. L., Yang, H. K., Ma, Y. N., Liu, J. R., Lv, F. J., Chen, J., & Zhou, Z. G. (2017). Effect of shading on yield, fiber quality and physiological characteristics of cotton subtending leaves on different fruiting positions. *Photosynthetica*, 55(2), 240–250.
- Çetin, O., & Kara, A. (2019). Assessment of water productivity using different drip irrigation systems for cotton. *Agricultural Water Management*, 223, 105693.
- Dağdelen, N., Başal, H., Yılmaz, E., Gürbüz, T., & Akcay, S. (2009). Different drip irrigation regimes affect cotton yield, water use efficiency and fiber quality in western Turkey. *Agricultural Water Management*, 96(1), 111–120.
- Evett, S. R., O'Shaughnessy, S. A., Andrade, M. A., Kustas, W. P., Anderson, M. C., Schomberg, H. H., & Thompson, A. (2020). Precision agriculture and irrigation: Current US perspectives. *Transactions of the ASABE*, 63(1), 57–67.
- Fereres, E., & Soriano, M. A. (2007). Deficit irrigation for reducing agricultural water use. *Journal of Experimental Botany*, 58(2), 147–159.
- Gao, M., Xu, B., Wang, Y., Zhou, Z., & Hu, W. (2021). Quantifying individual and interactive effects of elevated temperature and drought stress on cotton yield and fibre quality. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 207(3), 422–436.

- Girma, K., Teal, R., Freeman, K., Boman, R., & Raun, W. (2007). Cotton lint yield and quality as affected by cultivar and long-term applications of N, P, and K fertilizers. 15th Annual 2017 NUE Conference, 12–19.
- Gorham, J., Bridher, J., Malik, M. N., & Khan, I. A. (1998). Physiological responses of cotton to water deficits in Pakistan. Proceedings of the World Cotton Research Conference, 2, 6–12.
- Hutmacher, R. B. (2013). Crop choices with limiting water supplies: Deficit irrigation and sensitive crop growth stages. In *Drought in Arid and Semi-Arid Regions* (pp. 123–142). Springer.
- IPCC. (2007). Climate change 2007: The physical science basis. *Agenda*, 6(07), 333.
- Kaur, J., Sandhu, S. S., & Sharma, S. (2021). Yield response of wheat grown under periodic heat stress imposed by using mini heat tents. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 207(2), 285–303.
- Khan, A., Pan, X., Najeeb, U., Tan, D. K. Y., Fahad, S., Zahoor, R., & Luo, H. (2018). Coping with drought: Stress and adaptive mechanisms, and management through cultural and molecular alternatives in cotton as vital constituents for plant stress resilience and fitness. *Biological Research*, 51.
- Lawlor, D. W., & Tezara, W. (2009). Causes of decreased photosynthetic rate and metabolic capacity in water-deficient leaf cells: A critical evaluation of mechanisms and integration of processes. *Annals of Botany*, 103(4), 561–579.
- Li, M., Xu, Y., Fu, Q., Singh, V. P., Liu, D., & Li, T. (2020). Efficient irrigation water allocation and its impact on agricultural sustainability and water scarcity under uncertainty. *Journal of Hydrology*, 586, 124888.
- Li, W., Awais, M., Ru, W., Shi, W., Ajmal, M., Uddin, S., & Liu, C. (2020). Review of sensor network-based irrigation systems using IoT and remote sensing. *Advances in Meteorology*, 2020(1), 8396164.
- Medrano, H., Escalona, J. M., Bota, J., Gulías, J., & Flexas, J. (2002). Regulation of photosynthesis of C₃ plants in response to progressive drought: Stomatal conductance as a reference parameter. *Annals of Botany*, 89(7), 895–905.

- Pace, P. F., Cralle, H. T., El-Halawany, S. H., Cothren, J. T., & Senseman, S. A. (1999). Drought-induced changes in shoot and root growth of young cotton plants. *Journal of Cotton Science*, 3(4), 183–187.
- Pandey, D. M., Goswami, C. L., & Kumar, B. (2003). Physiological effects of plant hormones in cotton under drought. *Biologia Plantarum*, 47(4), 535–540.
- Payero, J. (2010). Maximising profitability with limited water in cotton farming systems.
- Pettigrew, W. T. (2001). Environmental effects on cotton fiber carbohydrate concentration and quality. *Crop Science*, 41(4), 1108–1113.
- Pettigrew, W. T. (2004). Physiological consequences of moisture deficit stress in cotton. *Crop Science*, 44(4), 1265–1272.
- Reddy, K. R., Brand, D., Wijewardana, C., & Gao, W. (2017). Temperature effects on cotton seedling emergence, growth, and development. *Agronomy Journal*, 109(4), 1379–1387.
- Reddy, K. R., Koti, S., Davidonis, G. H., & Reddy, V. R. (2004). Interactive effects of carbon dioxide and nitrogen nutrition on cotton growth, development, yield, and fiber quality. *Agronomy Journal*, 96(4), 1148–1157.
- Reddy, K. R., Robana, R. R., Hodges, H. F., Liu, X. J., & McKinion, J. M. (1998). Interactions of CO₂ enrichment and temperature on cotton growth and leaf characteristics. *Environmental and Experimental Botany*, 39(2), 117–129.
- Saleem, M. F., Sammar Raza, M. A., Ahmad, S., Khan, I. H., & Shahid, A. M. (2016). Understanding and mitigating the impacts of drought stress in cotton: A review. *Pakistan Journal of Agricultural Sciences*, 53(3).
- Sarwar, M. K. S., Usman, M., Asif, F., Kalsoom, R., Tabbusam, S., & Zeeshan, M. (2024). Effect of drought stress and response in cotton. *Trends in Animal and Plant Sciences*, 4, 61–73.
- Singh, B., Chastain, D. R., Kaur, G., Snider, J. L., & Reddy, K. (2020). Cotton seedling growth and development responses to temperature and drought stress. *Cotton Seedlings*, 10, 101–115.
- Snider, J. L., & Oosterhuis, D. M. (2012). Heat stress and pollen-pistil interactions. In *Flowering and Fruiting in Cotton* (pp. 59–78). The Cotton Foundation.

- Voora, V., Larrea, C., & Bermudez, S. (2020). Global market report: Cotton. International Institute for Sustainable Development.
- Wiggins, M. S., Leib, B. G., Mueller, T. C., & Main, C. L. (2014). Cotton growth, yield, and fiber quality response to irrigation and water deficit in soil of varying depth to a sand layer.
- Yadav, S. S., Hunter, D., Redden, B., Nang, M., Yadava, D. K., & Habibi, A. B. (2015). Impact of climate change on agriculture production, food, and nutritional security. *Crop Wild Relatives and Climate Change*, 1–23.
- Zhang, J., Cheng, M., Cao, N., Li, Y., Wang, S., Zhou, Z., & Hu, W. (2023). Drought stress and high temperature affect the antioxidant metabolism of cotton anthers and reduce pollen fertility. *Agronomy*, 13(10), 2550.
- Zhao, P., Zhao, M., Gao, X., Shan, Y., Li, F., Tian, X., & Li, Z. (2024). GhWRKY1bD improves drought tolerance by co-regulation of ABA, ROS, and proline homeostasis in cotton (*Gossypium hirsutum*). *Industrial Crops and Products*, 220, 119179.
- Zhao, Q., Shen, W., Gu, Y., Hu, J., Ma, Y., Zhang, X., ... & Du, J. (2023). Exogenous melatonin mitigates saline–alkali stress by decreasing DNA oxidative damage and enhancing photosynthetic carbon metabolism in soybean. *Physiologia Plantarum*, 175(4), e13983.
- Zhu, Y., Sun, L., Luo, Q., Chen, H., & Yang, Y. (2023). Spatial optimization of cotton cultivation in Xinjiang: A climate change perspective. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 124, 103523.



ISBN: 978-625-378-458-4