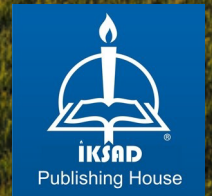


TARLA BİTKİLERİNDE YENİLİKÇİ YAKLAŞIMLAR VE MODERN TARIM UYGULAMALARI

EDİTÖRLER

Prof. Dr. Melekber SÜLÜŞOĞLU DURUL

Dr. Öğr. Üyesi Kerem MERTOĞLU



TARLA BİTKİLERİNDE YENİLİKÇİ YAKLAŞIMLAR VE MODERN TARIM UYGULAMALARI

EDİTÖRLER

Prof. Dr. Melekber SÜLÜŞOĞLU DURUL

Dr. Öğr. Üyesi Kerem MERTOĞLU

YAZARLAR

Prof. Dr. Hikmet GÜNAL

Prof. Dr. Hüsrev MENNAN

Prof. Dr. İlknur AYAN

Prof. Dr. İsmail ÇELİK

Prof. Dr. Mehmet POLAT

Prof. Dr. Mesut BUDAK

Prof. Dr. Tamer ERYİĞİT

Prof. Dr. Zeki ACAR

Prof. Dr. Yağmur UYSAL

Doç. Dr. Bahar AYDIN CAN

Doç Dr. Fırat PALA

Doç. Dr. Zeynep Görkem DOĞAROĞLU

Dr. Öğr. Üyesi Barış KARTAL

Dr. Öğr. Üyesi İlknur ESKİMEZ

Dr. Gülcan KAYMAK BAYRAM

Ali UÇAR

Turgay BAŞDİNÇ



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: 978-625-378-550-5

Cover Design: Ibrahim KAYA

December / 2025

Ankara / Türkiye

Size: 16x24cm

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ.....	1
-------------------	----------

BÖLÜM 1

TÜRKİYE’DE ORGANİK TIBBİ VE AROMATİK BİTKİLER: ÜRETİM VE DIŞ TİCARET

Doç. Dr. Bahar AYDIN CAN.....	3
-------------------------------	---

BÖLÜM 2

KABA YEMLERDE BULUNAN MİNERAL MADDELER VE ARALARINDAKİ İLİŞKİLER

Dr. Gülcan KAYMAK BAYRAM

Prof. Dr. İlknur AYAN.....	25
----------------------------	----

BÖLÜM 3

IN VITRO ÇOĞALTMADA DIŞ KOŞULLARA ADAPTASYON (ACCLIMATIZATION)

Prof. Dr. Mehmet POLAT

Dr. Öğr. Üyesi İlknur ESKİMEZ.....	41
------------------------------------	----

BÖLÜM 4

BAŞARILI BİR HERBİSİT UYGULAMASI İÇİN STRATEJİK KILAVUZ

Doç Dr. Fırat PALA

Prof. Dr. Hüsrev MENNAN.....	63
------------------------------	----

BÖLÜM 5

HERBİSİTLERİN KALICILIĞININ MÜNAVEBE BİTKİLERİNE ETKİLERİ

Doç. Dr. Fırat PALA

Prof. Dr. Hüsrev MENNAN.....79

BÖLÜM 6

SÜRDÜRÜLEBİLİR TOPRAK YÖNETİMİ İÇİN ARAZİ BOZULUMUNUN DENGELENMESİ YAKLAŞIMI

Prof. Dr. Mesut BUDAK

Prof. Dr. Hikmet GÜNAL.....101

BÖLÜM 7

KEKİK ÖZÜTÜ ARACILI ZNO-NANOPARTİKÜLLERİN HİDROJELE ENTEGRASYONU VE TARIMSAL ETKİNLİĞİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ

Prof. Dr. Yağmur UYSAL

Doç. Dr. Zeynep Görkem DOĞAROĞLU.....123

BÖLÜM 8

AYÇİÇEĞİNİN AĞIR METAL STRESİNE YANITI: FİZYOLOJİK ETKİLER, VERİM PERFORMANSI VE FİTOREMEDİASYON YETENEĞİ

Prof. Dr. Tamer ERYİĞİT

Turgay BAŞDİNÇ

Ali UÇAR.....151

BÖLÜM 9

BİTKİLERDE TUZLULUK STRESİ ve ETKİLERİ

Dr. Gülcan KAYMAK BAYRAM

Prof. Dr. Zeki ACAR.....223

BÖLÜM 10

PAMUK TARIMINDA SU AYAK İZİNİN ÖNEMİ VE İZLENMESİ

Prof. Dr. Mesut BUDAK

Prof. Dr. Hikmet GÜNAL

Prof. Dr. İsmail ÇELİK.....241

BÖLÜM 11

TARIMDA HERBİSİTLERİN KULLANIMI VE İSG UYGULAMALARI

Dr. Öğr. Üyesi Barış KARTAL.....266

ÖNSÖZ

Günümüzde tarımsal üretim sistemleri, artan nüfus baskısı, iklim değişikliğinin kısıtlayıcı etkileri, toprak yorgunluğu, su krizleri ve çevresel tehditler nedeniyle her zamankinden daha karmaşık bir yapıya evrilmiştir. Bu önlenemez dönüşüm, hem geleneksel üretim modellerinin yeniden değerlendirilmesini, hem de sürdürülebilir bilim temelli yaklaşımların tarımsal uygulamalara entegre edilmesini zorunlu kılmaktadır. Bu eser, Türkiye’de organik tıbbi ve aromatik bitkilerin üretim ve dış ticaret potansiyelinden başlayarak, kaba yemlerdeki mineral madde ilişkilerine, in vitro çoğaltımda dış koşullara adaptasyon süreçlerine ve herbisit uygulamalarında stratejik yönetim ilkelerine kadar uzanan kapsamlı konuları ele alarak, bitki stres fizyolojisinden biyoteknolojik çoğaltım tekniklerine, mikrobiyom destekli bitki korumadan nanoteknoloji uygulamalarına kadar geniş bir yelpazede, modern tarımın çok boyutlu yapısını işlemektedir.

Herbisit kalıcılığının münavebe bitkilerine etkileri, sürdürülebilir toprak yönetimi için arazi bozulumunun dengelenmesi yaklaşımı ve etkili bitki koruma stratejileri gibi güncel konular da bilimsel bir çerçevede ele alınmaktadır. Nanoteknolojinin tarıma entegrasyonu, bitki stres fizyolojisinin önemli konularından ağır metal ve tuzluluk stresine verilen yanıtlar, ayrıca pamuk tarımında su ayak izinin izlenmesi gibi bölümler ise tarımın geleceğini şekillendiren yenilikçi alanlara ışık tutmaktadır. Bu içerikler hem akademik araştırmacılar hem de uygulayıcılar için değerli bilgiler sunmakta; sürdürülebilir, verimli ve çevre dostu üretim modellerinin geliştirilmesine katkı sağlamaktadır. Bu eser, tarım bilimlerinin farklı alt disiplinlerini bir araya getirerek bütüncül bir bakış açısı sunmayı amaçlamaktadır. Ele alınan her konu, tarımsal üretimin yalnızca biyolojik değil, aynı zamanda ekonomik, çevresel ve teknolojik boyutlarını da içeren modern bir perspektifte değerlendirilmiştir. Hem akademik araştırmacılar hem de sahada modern tarım uygulayıcıları için kapsamlı bir başvuru niteliği taşıyan bu bölümler, bilime gönül vermiş bölüm yazarlarımızın emekleri ile şekillenmiştir. Bu kapsamlı çalışmaya emek veren tüm bölüm yazarlarına, tarımın geleceğine duydukları inanç ve bilime katkıları için en içten teşekkür ve şükranlarımızı sunarız.

EDİTÖRLER

Prof. Dr. Melekber SÜLÜŞOĞLU DURUL
Dr. Öğr. Üyesi Kerem MERTOĞLU

BÖLÜM 1

TÜRKİYE’DE ORGANİK TIBBİ VE AROMATİK BİTKİLER: ÜRETİM VE DIŞ TİCARET

Doç. Dr. Bahar AYDIN CAN¹

DOI: <https://www.doi.org/10.5281/zenodo.18108533>

¹ Kocaeli Üniversitesi, İzmit Meslek Yüksekokulu, Bitkisel ve Hayvansal Üretim Bölümü, Kocaeli, Türkiye, baharcan@kocaeli.edu.tr, ORCID ID: 000-0003-1076-7875

GİRİŞ

Organik tarım; ekosistem dengesini koruyan, biyolojik çeşitliliği destekleyen ve kimyasal girdilerin kullanımını sınırlandıran sürdürülebilir bir üretim modeli olarak tanımlanmaktadır. Küresel ölçekte organik tarım alanları ve organik ürün ticareti sürekli artış gösterirken, tıbbi ve aromatik bitkiler bu büyüme süreci içerisinde dikkat çeken ürün gruplarından biri olmuştur. Nitekim Organik Tarım Araştırma Enstitüsü (FİBL) ve Uluslararası Organik Tarım Hareketleri Federasyonu (IFOAM) tarafından yayımlanan *The World of Organic Agriculture* raporlarında, organik tıbbi ve aromatik bitkilerin hem üretim alanı hem de ticaret hacmi açısından hızlı bir gelişim gösterdiği vurgulanmaktadır (FİBL & IFOAM, 2024).

Organik tarım, kimyasal girdileri azaltarak ve biyoçeşitliliği destekleyerek ürün kalitesini, güvenliğini ve çevresel sürdürülebilirliği artırmaktadır. Özellikle sürdürülebilir uygulamalar ve katma değerle birleştirildiğinde, yüksek fiyatlandırma ve pazar erişimi yoluyla çiftçi gelirlerini iyileştirebilir (Golijan and Markovic, 2018; Shahrajabian ve ark., 2019; Jiang ve ark., 2022; Marcelino ve ark., 2023; Mendes ve ark., 2023; Adar Yazar, 2024).

Türkiye, sahip olduğu farklı iklim tipleri, zengin floristik yapısı ve geleneksel bitkisel üretim kültürü sayesinde tıbbi ve aromatik bitkiler açısından önemli bir potansiyele sahiptir. Kekik, defne, adaçayı, anason, rezene ve kimyon gibi birçok tür hem doğadan toplanmakta hem de tarımsal üretim yoluyla yetiştirilmektedir (Gül ve Çelik, 2016). Son yıllarda organik tarım uygulamalarının yaygınlaşmasıyla birlikte, bu ürünlerin organik üretimindeki artış da dikkat çekmektedir. Türkiye’de organik tarım alanları ve organik ürün çeşitliliği her geçen yıl artmakta olup, organik tıbbi ve aromatik bitkiler bu gelişim içinde özel bir yer tutmaktadır (T.C. Tarım ve Orman Bakanlığı, 2021).

Organik Tarım Araştırma Enstitüsü (FİBL) ve IFOAM tarafından yayımlanan *The World of Organic Agriculture 2024* raporuna göre, 2022 yılı

verileri esas alındığında 188 ülkede yaklaşık 4,5 milyon organik üretici bulunmaktadır ve bu alanda en fazla üreticiye sahip ülke 2,4 milyon hektar ile Hindistan'dır. Aynı yıl dünya genelinde 96,4 milyon hektarlık alanda organik tarım yapılmış olup, Avustralya 53 milyon hektar ile en fazla üretim alanına sahiptir. Dünya organik tarım alanı 2021 yılına kıyasla %26,6 oranında artış göstermiştir. Söz konusu alanın bir bölümünü oluşturan organik tıbbi ve aromatik bitkiler ise 2021'e göre %81,5'lik büyük bir artışla 223,9 bin hektar alanda üretilmiştir (FİBL, 2024).

Yaklaşık 26.000 bitki türü, gıda, kozmetik ve tıbbi ürünlerde temel bileşenler olarak tıbbi veya aromatik amaçlarla kullanılmaktadır. 2015 yılında, tıbbi bitkiler pazarının değeri 3 milyar doların üzerindeydi ve doğal bileşenlerin kullanımının artmasıyla birlikte genişlemeye devam etmektedir (ITC, 2023)

Tıbbi ve aromatik bitkiler, dünya ticaretinde Harmonize Sistem (HS) kapsamında altı ana ürün grubu altında sınıflandırılmaktadır. Bu gruplar; 07 kodlu yenilen sebzeler ile bazı kök ve yumrular, 09 kodlu kahve, çay, Paraguay çayı ve baharatlar, 13 kodlu tohumlar ve bitki kısımları, 33.01 kodlu lak, sakız ve reçineler ile 12 kodlu uçucu yağlar ve benzeri ürünleri kapsamaktadır. Küresel tıbbi ve aromatik bitkiler ticaretinin, mevcut veriler doğrultusunda 2001 yılından itibaren istikrarlı bir artış gösterdiği görülmektedir. Nitekim bu ürün grubunun dünya ihracat değeri 2001 yılında 18,3 milyar ABD doları iken, 2019 yılında 70,7 milyar ABD dolarına ulaşmıştır (TAGEM, 2021).

Tıbbi ve aromatik bitkileri ticareti 1999'dan beri üç kat artmıştır. En büyük ithalatçılar Amerika Birleşik Devletleri, Almanya, Japonya ve Çin'dir. Bu büyüyen pazarlara arz sağlama telaşı, bitki kaynakları üzerinde yoğun bir baskı oluşturarak aşırı sömürüye ve yabani popülasyonlara zarar verilmesine neden olmaktadır (ITC, 2023). Küresel pazarda, dış ticareti 1996'da 2,4 milyar dolardan 2013'te 6 milyar doları aşarak, artan hızla büyümeye devam etmektedir. Başlıca ihracat destinasyonları arasında ABD, AB ve Doğu Asya yer almaktadır. Bununla birlikte, ticaret genellikle istikrarsızdır ve pazar

erişimi, sertifikasyon engelleri ve tedarik zinciri sorunları nedeniyle ihracat hacimlerinde ve fiyatlarında dalgalanmalar yaşanmaktadır. İşleme yoluyla katma değer birçok bölgede sınırlı kalmakta ve bu da kaçırılmış bir ekonomik fırsatı temsil etmektedir.

Organik tıbbi ve aromatik bitki üretimi Hindistan, Türkiye, Çin ve birçok Avrupa ülkesinde öne çıkmaktadır. Hindistan ve Çin önde gelen ihracatçılarıdır; Hindistan, genellikle topluluk temelli ve sertifikalı organik projeler aracılığıyla geniş bir yelpazede tıbbi ve aromatik bitki ve uçucu yağ üretmektedir. (Karık ve Tunçtürk, 2019; Tripathi ve ark., 2019; Riaz ve ark., 2021; Parvin ve ark., 2023; Kowsalya ve Rohini, 2024). Türkiye, hem ham hem de işlenmiş ihracata odaklanarak tescilli çeşitler geliştirmiş ve üretim alanlarını artırmıştır (Karık ve Tunçtürk, 2019). Avrupa'da Portekiz ve Sırbistan'da organik tıbbi ve aromatic bitkiler yetiştiriciliğinde büyüme görülmüş olup, ara ekim ve sürdürülebilir uygulamalar verimi ve biyoçeşitliliği artırmaktadır (Golijan, 2016; Golijan, 2018; Marcelino ve ark., 2023; Mendes v e ark, 2023)

Organik ürün üretimi ve ticareti, sağlık bilincinin artması, çevresel kaygılar ve ekonomik nedenlerle dünya genelinde büyümeye devam etmektedir. Birçok ülke ekim alanlarını ve ihracatını artırırken, sertifikasyon süreçleri, katma değer yaratma ve pazarın istikrarı gibi konularda çeşitli sorunlar sürmektedir. Bu sektörün potansiyelinin tam olarak ortaya çıkarabilmesi için sürdürülebilir üretim yöntemlerinin yaygınlaştırılması ve destekleyici politikaların uygulanması büyük önem taşımaktadır.

Bununla birlikte, Türkiye’de organik tıbbi ve aromatik bitkiler üretimi ve ticareti; sertifikasyon maliyetlerinin yüksekliği, üretici örgütlenmesinin yetersizliği, katma değerli ürün üretiminin sınırlı olması ve pazarlama sorunları gibi çeşitli yapısal problemlerle karşı karşıyadır (Çelik ve Gül, 2016). Ayrıca, doğadan toplama faaliyetlerinin kontrolsüz bir şekilde sürdürülmesi, sürdürülebilirlik açısından önemli riskler oluşturmaktadır. Bu durum, hem

biyolojik çeşitliliğin korunması hem de sektörün uzun vadeli gelişimi açısından dikkatle ele alınması gereken bir konudur.

Bu çerçevede, Türkiye’de organik tıbbi ve aromatik bitkiler üretimi ve ticaretinin mevcut durumunun üretim, ticaret ve politika boyutlarıyla birlikte değerlendirilmesi büyük önem taşımaktadır. Bu nedende, bu sektördeki potansiyelimizi ve ticari durumumuzu son güncel verilerle ortaya koyacak çalışmalara ihtiyaç duyulmaktadır.

1. AMAÇ VE YÖNTEM

Bu araştırmanın temel amacı, Türkiye’de 2020-2024 yılları arasındaki son 5 yıllık dönemde organik tıbbi ve aromatik bitkiler üretimi ve dış ticaretini incelemek, dış ticaretimizde önemli gelişme kaydeden ürünleri belirlemek ve ayrıca tespit edilen sorunlara ilişkin çözüm önerileri getirmektir. Bu çalışma, söz konusu sektörün mevcut yapısını ortaya koymayı, temel sorun alanlarını belirlemeyi ve sürdürülebilir gelişime yönelik çözüm önerileri sunmayı amaçlamaktadır. Bu amaçla, Türkiye’de organik tıbbi ve aromatik bitkiler üretimi, ithalatı ve ihracatı bakımından istatistiksel verilerle incelenerek tarımsal pazarlama açısından durumunun ortaya konulması hedeflenmektedir.

Çalışmanın ana verilerini; Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK), Tarımsal Araştırma ve Geliştirme Genel Müdürlüğü (TAGEM), Uluslararası Ticaret merkezi (ITC) ve Tarım ve Orman Bakanlığı’ndan temin edilen istatistikler ile konuya ilişkin rapor ve yayınlar oluşturmaktadır. Elde edilen verilerin analizinde yüzde ve değişim yararlanılmış, bulgular çizelge ve grafikler aracılığıyla sunulmuştur.

2. ARAŞTIRMA SONUÇLARI

2.1 Türkiye’de Tıbbi ve Aromatik Bitkiler Üretimi

Türkiye, sahip olduğu 9.222 adet bitki türü ve 3.649’u endemik bitki türüne karşılık 500 bitkiyi tıbbi ve aromatik amaçla kullanmaktadır. Bu sayı

önemli olmakla birlikte, Çin’de 4.941, Hindistan’da 3.000 ve Amerika Birleşik Devletleri’nde 2.564 bitkinin bu amaçla kullanıldığı dikkate alındığında, Türkiye’nin sahip olduğu potansiyelin daha etkin değerlendirilmesine ihtiyaç olduğu görülmektedir (TAGEM, 2021).

Tıbbi bitkisel ürünlere yönelik talepteki artış, hem ulusal hem de uluslararası düzeyde belirgin bir eğilim olarak ortaya çıkmaktadır. Gıda muhafazasında kullanılan kimyasal maddelere getirilen yasal kısıtlamalar, bitkisel kaynaklı ve antioksidan özelliklere sahip uçucu yağlara olan ilgiyi giderek artırmaktadır. Bu nedenle, doğal kökenli uçucu yağların gıda endüstrisindeki kullanım alanları her geçen gün genişlemektedir (Temel ve ark., 2018). Tıbbi ve aromatik bitkilerin Türkiye ekonomisindeki artan değeri, kültürünün yapılarak yetiştirilmesi ile kalite ve miktar değerini yükseltmektedir (Yavuz ve Erdoğan, 2019).

Türkiye’de 2017-2024 yılları arasındaki tıbbi ve aromatik bitkiler üretimi ve değişimi Tablo 1’de verilmiştir. Buna göre 2024 yılında en fazla üretimi yapılan bitkiler içinde 1,45 milyon ton ile çay birinci sırada yer almaktadır. Kırmızıbiber 346 bin ton ile ikinci sırada, defne 37,1 bin ton (2023 yılı) ile üçüncü sıradadır. 2017-2024 yılları arasında yetiştirilen bitkiler arasında en fazla üretim artışı %1241,01 ile kuşkonmazda olmuştur. Diğer en fazla üretim artışı olan bitkiler sırasıyla lavanta, adaçayı ve kişnişdir. En fazla üretim azalışının olduğu bitki %60 ile ısırgan otudur. Şerbetçiotu, haşhaş ve rezene diğer en fazla üretim azalışının olduğu tıbbi ve aromatik bitkilerdir.

Tablo 1: Türkiye’de Tıbbi ve Aromatik Bitkiler Üretimi (ton) ve Değişimi (%)

Bitki Adı	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	Değişim(%)
Keçiboynuzu	15016	15506	16256	18806	20633	25106	24561	25000	66,49
Çay	1300000	1480534	1407448	1450556	1453964	1269546	1356556	1450034	11,54
Defne	27679	28583	32537	44350	45225	47250	37140	*	-
Anason	8418	8664	17589	10716	6936	5878	4521	5102	-39,39
Kimyon	19175	24195	20245	13926	8386	8130	11480	17018	-11,25
Rezene	2022	3067	4655	4365	2503	2323	1108	1125	-44,36
Kişniş	29	29	12	188	253	204	222	101	248,28
Kekik	14477	15895	17965	23866	21174	33849	30129	18213	25,81
Süpürge otu	2183	2324	1951	1788	1911	2060	1405	1815	-16,86
Kapari		2	3	3	18	17	17	23	-
Çörek otu	3094	3322	3603	3412	6435	10089	5386	4572	47,77
Kırmızıbiber	179264	227380	240656	256735	284694	273846	287322	346287	93,17
Haşhaş	13836	26991	27288	20542	21037	12240	7922	6412	-53,66
Isırganotu	1	1	0	0,1	0,5	1	1	0,4	-60,00
Adaçayı	557	428	1233	1271	1848	2356	3133	2329	318,13
Gül (yağlık)	13372	14773	16560	18202	18020	19879	19912	19318	44,47
Lavanta	845	1040	1462	3499	6108	7722	9509	9070	973,37
Oğul otu (Melissa)	106	84	93	150	266	324	253	234	120,75
Şerbetçiotu	1785	1785	1800	1908	1861	1051	758	759	-57,48
Nane	14213	14511	16011	23471	26438	26911	26198	26322	85,20
Dereotu	7208	8318	8740	8267	10432	10229	14470	15048	108,77
Kuşkonmaz	178	169	174	1079	1156	1342	1600	2387	1241,01

Kaynak: TÜİK ve T.C. Tarım ve Orman Bakanlığı Orman Genel Müdürlüğü, 2024, *resmi veri henüz açıklanmamıştır.

2.2. Türkiye’de Organik Tıbbi ve Aromatik Bitkiler Üretimi

Türkiye, sahip olduğu yüksek bitki çeşitliliği ve endemik türler bakımından dünya genelinde öne çıkan ülkeler arasında yer almaktadır. Böylesine zengin bir bitki örtüsüne sahip bir ülkede, bitkisel kaynaklardan yararlanmamak düşünülemez (Temel ve ark., 2018).

Tıbbi ve aromatik bitkilerin doğal ortamlarından toplanması, insanlığın çok eski dönemlerden beri sürdürdüğü geleneksel bir yöntemdir. Ancak bu uygulama, kontrolsüz şekilde yapıldığında bitki türlerinin sayısında azalmaya ve doğal varlıklarının tehdit altına girmesine yol açmaktadır (Yavuz ve Erdoğan, 2019). Doğadan bilinçsiz toplama nedeniyle birçok bitki türü yok olma tehlikesi ile karşı karşıya kalmaktadır.

Türkiye’de 2024 yılına göre organik tarım kapsamında üretimi yapılan bazı ürünlere ilişkin bilgiler Tablo 2’de verilmiştir. Buna göre kültür üretimi yöntemi ile 10753 dekar ile keçiboynuzu (harnup) en fazla üretim alanına sahip üründür. 6211 dekar ile kekik ve 1779 dekar ile lavanta diğer en çok üretim alanına sahip ürünlerdir. Doğadan toplama şekliyle en fazla toplanan ürün 9409 dekar ile kekiktir. 2856 dekar alanlarıyla ısırgan otu ve nane diğer en fazla doğadan toplanan tıbbi ve aromatik ürünlerdir.

Tablo 2: 2024 Yılında Türkiye’de Bazı Organik Tıbbi ve Aromatik Bitkilere Ait Üretim Verileri

Ürün Adı	Çiftçi Sayısı	Üretim Alanı (Dekar)	Doğadan Toplanan (Dekar)	Toplam Alan (Dekar)	Üretim Miktarı (Ton)
Adaçayı	37	838	0	838	202
Altınotu (Ölmez Çiçek)	4	29	0	29	7
Aronya	46	238	0	238	35
Aspir	21	444	0	444	63
Biberiye (Rozmarin)	33	77	603	680	46
Çörek Otu	11	279	0	279	35

Defne	23	377	0	377	128
Dere Otu	48	15	0	15	20
Ekinezya	9	2	603	605	1
Fesleğen (Reyhan)	19	4	0	4	3
Gül	23	817	0	817	332
Haşhaş Kapsül	68	833	0	833	270
Ihlamur	28	589	603	1192	175
Isırgan Otu	27	114	2856	2970	335
Kantaron	12	13	603	616	5
Keçiboynuzu (Harnup)	11	10753	61	10814	40585
Kekik	58	6211	9409	15619	918
Kimyon	11	582	0	582	66
Kişniş	23	11	0	11	2
Kuşburnu	8	603	0	603	302
Kuşkonmaz	14	29	0	29	14
Lavanta	44	1779	0	1779	254
Melissa (Oğul Otu)	20	30	0	30	5
Nane	58	474	2856	3330	1428
Rezene	16	257	0	257	204
Safran	4	151	0	151	0
Salep	9	9	0	9	9
Sarmısak	67	152	0	152	249
Susam	41	463	0	463	30

Kaynak: www.tarimorman.gov.tr

Türkiye’de genel olarak tıbbi ve aromatik bitkilerin üretim alanının son 5 yılda artış eğiliminde olduğu görülmektedir. 2020-2024 yılları arasında lavanta üretim alanı 14 dekardan, 1779 dekara yükselerek en fazla üretim alanı artışı gösteren bitkidir (Tablo 3). Diğer en fazla üretim alanı artışına sahip bitkiler sırasıyla gül, ekinezya ve kuşburnudur. Üretim alanında aynı dönemde %99,67 oranında azalış ile en fazla azalışın olduğu bitki kişniştir. Kuşkonmaz, sarı kantaron ve kimyon diğer üretim alanında en fazla düşüş yaşayan bitkilerdir.

Tablo 3: Türkiye’de Bazı Organik Tıbbi ve Aromatik Bitkilerin Yıllara Göre Üretim Alanı (Dekar)

Bitki Adı	Yıllar					Değişim (%)
	2020	2021	2022	2023	2024	
Adaçayı	653	1157	1156	1778	838	28,37
Altınotu (Ölmez Çiçek)	14	31	80	65	29	108,82
Aronya	3267	930	177	291	238	-92,71
Aspir	2	41	89	101	444	191,85
Biberiye (Rozmarin)	246	1089	1684	1411	680	176,76
Çörek Otu	131	163	163	120	279	113,49
Defne	439	1959	602	448	377	-14,25
Dere Otu	720	12718	918	2443	15	-97,88
Ekinezya	14	15	17	12	605	4354,56
Fesleğen (Reyhan)	2	4	3	4	4	100,00
Gül	8	15	12	9	817	9901,47
Haşhaş Kapsül	260	1506	1680	1718	833	220,99
İhlamur	1960	1711	1509	1123	1192	-39,17
Isırgan Otu	1926	1029	1069	461	2970	54,17
Kantaron	374	365	440	464	616	64,81
Keçiboynuzu (Harnup)	782	502	726	498	10814	1283,70
Kekik	11124	18569	42414	42303	15619	40,41
Kimyon	44029	9828	2357	5360	582	-98,68
Kişniş	3241	2262	1025	1223	11	-99,67
Kuşburnu	32	46	9	606	603	1804,00
Kuşkonmaz	7681	6234	3474	1416	29	-99,62
Lavanta	14	15	54	29	1779	12841,45
Melissa (Oğul Otu)	26	23	32	21	30	17,86
Nane	303	304	306	517	3330	998,80
Rezene	47	964	1087	1162	257	442,94
Safran	16	19	15	14	151	840,57
Salep	9	1	57	143	9	-5,45
Sarı Kantaron	1259	477	476	484	30	-97,60
Sarmısak	39	162	132	134	152	291,80
Susam	1529	1185	879	897	463	-69,73

Kaynak: www.tarimorman.gov.tr

Türkiye’de tıbbi ve aromatik bitkiler, TÜİK istatistiklerinde tek bir başlık altında toplanmamaktadır. Bu bitkiler; başka yerde sınıflandırılmamış diğer sebzeler (yaprağı yenen sebzeler), meyveler, içecekler ve baharat bitkileri ile tahıllar ve diğer bitkisel ürünler (parfümeri, eczacılık ve benzeri alanlarda kullanılan bitkiler ile yem bitkisi tohumları) başlıkları altında farklı gruplarda yer almaktadır (TAGEM, 2021).

Tablo 4’de 2020-2024 yılları arasında Türkiye’de bazı organik tıbbi ve aromatik bitkilerin yıllara göre üretim miktarı ve değişimi verilmiştir. 2024 yılına göre en fazla üretim miktarına sahip bitkiler, keçiboynuzu(harnup), nane ve kekiktir. İncelenen dönemde en fazla üretim artışına sahip bitkiler sırasıyla, keçiboynuzu (harnup), aspir, lavanta ve nanedir. Doğadan bilinçsiz bitki toplama, bazı türlerin yok olma tehlikesiyle karşı karşıya kalmasına neden olmaktadır.

Ayrıca haşhaşın üretimi, ithalatı ve ihracatı, Birleşmiş Milletler tarafından kabul edilen Tek Sözleşme (Single Convention on Narcotic Drugs) ve ilgili protokollerle düzenlenmektedir. Yasal haşhaş üretimi; Fransa, İspanya, Macaristan, Avustralya, Hindistan, Türkiye ve Çin ile sınırlıdır (TAGEM, 2021). Türkiye’de 2024 yılında 833 dekar alanda 270 ton organik haşhaş kapsülü üretilmiştir. Ekim alanlarının büyük bir kısmı Afyonkarahisar, Denizli ve Konya’da yer almaktadır.

Tablo 4:Türkiye’de Bazı Organik Tıbbi ve Aromatik Bitkilerin Yıllara Göre Üretim Miktarı (Ton)

Bitki Adı	Yıllar					Değişim (%)
	2020	2021	2022	2023	2024	
Adaçayı	83	49	58	77	202	143,25
Altınotu (Ölmez Çiçek)	5	2	7	16	7	47,59
Aronya	331	112	31	27	35	-89,31
Aspir	0	5	27	14	63	13676,87
Biberiye (Rozmarin)	25	190	246	192	46	84,72
Çörek Otu	51	75	83	62	35	-32,79
Defne	59	321	98	110	128	114,45
Dere Otu	158	1227	311	338	20	-87,49
Ekinezya	14	18	19	21	1	-95,76
Fesleğen (Reyhan)	1	1	1	1	3	336,30
Gül	7	6	9	7	332	4761,26
Haşhaş Kapsül	164	901	972	944	270	64,15
Ihlamur	639	513	264	250	175	-72,63
Isırgan Otu	22	4	9	5	335	1401,30
Kantaron	16	9	67	109	5	-66,96
Keçiboynuzu (Harnup)	65	7	8	8	40585	62178,90
Kekik	1245	3724	12975	6064	918	-26,22
Kimyon	2408	2605	494	910	66	-97,27
Kişniş	298	268	110	148	2	-99,24
Kuşburnu	6	4	2	3	302	4919,16
Kuşkonmaz	1022	280	162	84	14	-98,63
Lavanta	3	3	18	11	254	7522,11
Melissa (Oğul Otu)	40	47	41	43	5	-87,58
Nane	26	17	16	6	1428	5328,88
Rezene	20	184	318	924	204	908,29
Safran	20	32	20	27	0	-99,85
Salep	0	0	0	0	9	3925,14
Sarı Kantaron	1	0	2	9	3	224,54
Sarmısak	35	207	191	87	249	649,11
Susam	202	164	131	94	30	-85,00

Kaynak: www.tarimorman.gov.tr

2.3. Türkiye’de Organik Tıbbi ve Aromatik Bitkiler İhracatı

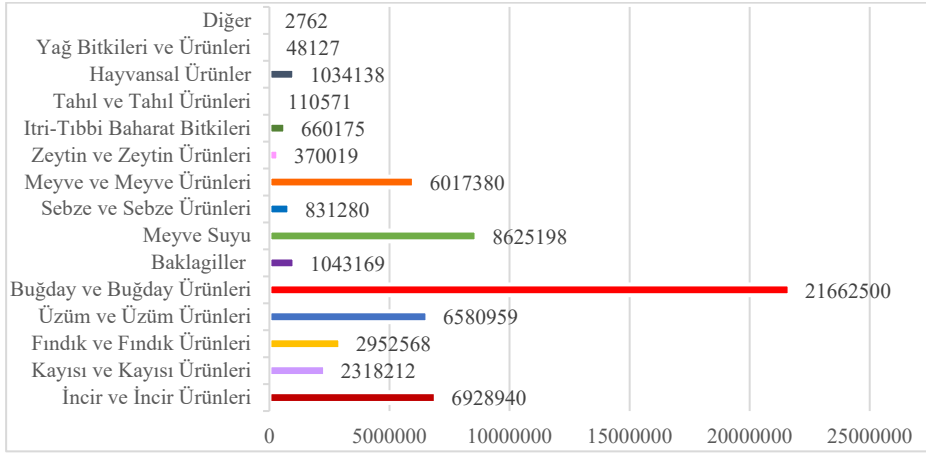
Türkiye’de ihracatı yapılan organik ürünlerin üretim miktarları ve değerleri Tablo 5’de verilmiştir. 2023 yılında 59186 ton organik ürün ihracatı gerçekleşmiş olup, buğday ve buğday ürünleri %36,60 ile en yüksek paya sahiptir. Aynı yıl tıbbi ve aromatik bitkiler 660 ton ve %1,11 ile düşük paya sahiptir (Şekil 1). 2020-2023 yılları arasında organik tıbbi ve aromatik bitkilerdeki ihracatımızda miktar olarak artış sağlanmış iken, değer olarak % 85 oranında düşük yaşanmıştır. 2022 yılında 727 ton gerçekleşen organik tıbbi ve aromatik bitki ihracatımız, 2023 yılında 660 ton gerçekleşerek % 9,21 düşüş oluşturmuştur.

Tablo 5: Türkiye En Çok İhracatı Yapılan Organik Ürünler Arasında Tıbbi ve Aromatik Bitkilerin Yıllara Göre Durumu

Ürün Adı	2020		2021		2022		2023		Değişim	
	Miktarı (ton)	Değeri (bin \$)	Miktarı (ton)	Değeri (bin \$)	Miktarı (ton)	Değeri (bin \$)	Miktarı (ton)	Değeri (bin \$)	Miktar (%)	Değer (%)
İncir ve İncir Ürünleri	7	34007	6799	35401	7324	58571	6929	38612	98885	14
Kayısı ve Kayısı Ürünleri	3	11716	2753	13992	2730	18991	2318	15852	77174	35
Fındık ve Fındık Ürünleri	4	27411	3492	25682	2593	18308	2953	21013	73714	-23
Üzüm ve Üzüm Ürünleri	10	28344	9196	27655	5989	23653	6581	21125	65710	-25
Buğday ve Buğday Ürünleri	34	16869	38550	22994	10648	7122	21663	13268	63613	-21
Baklagiller	18	29283	18029	24270	45	65	1043	1567	5695	-95
Meyve Suyu	-	-	8453	21084	10117	16377	8625	20691	-	-
Sebze ve Sebze Ürünleri	2	2079	2312	4081	792	1793	831	2048	41464	-2
Meyve ve Meyve Ürünleri	15	37078	7323	25366	8668	38524	6017	22581	40016	-39

Zeytin ve Zeytin Ürünleri	0	611	293	985	115	285	370	1915	-	214
İtri-Tıbbi Baharat Bitkileri	7	16621	968	2929	727	1707	660	2428	9331	-85
Tahıl ve Tahıl Ürünleri	3	3771	-	-	86	38	111	492	3586	-87
Hayvansal Ürünler	524	2293	1862	6894	1407	1827	1034	2238	97	-2
Yağ Bitkileri ve Ürünleri	14	38286	3222	7390	52	154	48	168	244	-100
Diğer	0	87	6665	14208	29	47	3	23	-	-73

Kaynak: www.tarimorman.gov.tr



Şekil 1: 2023 Yılında En Çok İhracatı Yapılan Organik Ürünlerin Dağılımı

Kaynak: www.tarimorman.gov.tr

2.4. Türkiye’de Organik Tıbbi ve Aromatik Bitkiler İthalatı

Türkiye’de 2020-2023 yılları arasında ithalatı yapılan organik tıbbi ve aromatik bitkilerin ithalat miktarları ve ithal edildikleri ülkeler Tablo 6’da verilmiştir. Türkiye birçok tıbbi ve aromatik bitkiyi ihraç etmesine rağmen, bazı tıbbi ve aromatik bitkilerinde ithalatını yapmaktadır. Kahve, tarçın,

zerdeçal, karanfil, zencefil, karabiber, kına, vanilya, küçük hindistan cevizi ve ginseng gibi bitkiler Türkiye'nin ekolojik koşullarında yetiştirilemediğinden, bu ürünlerin ithalatı zorunlu olarak yapılmaktadır (Temel ve ark., 2018). 2020-2023 yılları arasında en fazla organik tıbbi ve aromatik bitki ithalatımız 2020 yılında toplam 6690 ton ile gerçekleştirilmiştir. İncelenen dönemde en fazla organik kahve ithalatımız 121 ton ile Belçika ve Danimarka'dan gerçekleştirilmiştir. 2023 yılında gerçekleşen 1037 ton organik tıbbi ve aromatik bitkiler ithalatımızda meyan kökü 845 ton ve % 81,45 ile en fazla ithalatını yaptığımız üründür. Kahve (%7,05), sirke (%5,37), susam (%3,66) ve keten tohumu (%1,03) diğer en çok ithalatını yaptığımız ürünlerdir. 2023 yılında gerçekleştirdiğimiz organik tıbbi ve aromatik bitkiler ithalatımızda, meyan kökünü Özbekistan ve Gürcistan'dan, kahve Bulgaristan'dan, sirke Almanya ve İtalya'dan, susam Sudan'dan, keten tohumu ise Hindistan ve Almanya'dan ithal edilmiştir.

Tablo 6: Türkiye’de Organik Tıbbi ve Aromatik Bitkiler İthalatı

2020Yılı Organik Ürün İthalatı		
Ürün Adı	Miktarı (Kg)	İthal Edilen Ülke
Baharatlar (çörek otu, karabiber, tarçın, zerdaçal, zencefil)	57110	Almanya,Hindistan, ABD, Sri Lanka
Bitkisel Çay (adaçayı, papatya, nane/limon, mate, kuşburnu/bamya çiçeği)	7070	Almanya, ABD
Kahve ((kafeyini alınmamış, kavrulmuş, öğütülmüş	24480	Almanya,Avusturya,Hollanda, Belçika, Danimarka, İsveç
Kenevir (Tohumu ve Yağı)	5200	Litvanya, Çin, Romanya
Keten Tohumu (sarı, kahverengi)	4114400	Kazakistan, Rusya
Meyan kökü	316810	Gürcistan, Kazakistan
Susam Tohumu (Ham ve Soyulmuş)	2165160	Hindistan, Uganda, Nijerya, Etiyopya
Uçucu Yağ (Nane, Karanfil Yağı)	50	Hindistan
2021 Yılı Organik Ürün İthalatı		
Ürün Adı	Miktarı (Kg)	İthal Edilen Ülke
Sos Çeşitleri (biber, biberiye, fesleğen, kekik, soya, sarımsak, zencefil)	2853	Danimarka, İngiltere, Hollanda
Kahve Ve Kahve Çekirdeği (Çiğ, Kavrulmuş, Öğütülmüş)	54486	Belçika, Almanya, Hollanda, Avusturya Birleşik Krallık, Avustralya, Meksika, İtalya, İsveç
Karabiber	7300	Hindistan, Sri Lanka

TARLA BİTKİLERİNDE YENİLİKÇİ YAKLAŞIMLAR VE MODERN TARIM UYGULAMALARI

Susam (Ham)	95000	Mısır, Uganda
Tarçın (Toz Ve Çubuk)	8600	Hindistan, Sri Lanka
Kenevir Tohumu	3200	Hollanda, Litvanya, Çin
Meyan Kökü	620455	Gürcistan, Kazakistan, Özbekistan
Zencefil Ve Ürünleri (Tozu, İççeği)	167928	Hindistan, Sri Lanka, İsveç, İsviçre, Tanzanya, Hollanda, Avusturya
Keten Tohumu	1123	Almanya
Zerdeçal (Tozu)	2615	Hindistan, Sri Lanka, İsveç, İsviçre, Tanzanya, Hollanda, Avusturya
Papatya	1020	Almanya
Sarımsak Ve Kişniş Ekstresi	450	Almanya
2022 Yılı Organik Ürün İthalatı		
Ürün Adı	Miktarı (Kg)	İthal Edilen Ülke
Çay	100	Almanya
Dereotu	300	Tunus
Kahve	121053	İtalya, İsveç, Almanya, Avustralya, Kolombiya, Belçika, Danimarka
Kenevir Tohumu Ve Tozu	1709,1	Litvanya, Almanya
Keten Tohumu	1657	Almanya
Meyan Kökü	610091	Özbekistan, Gürcistan, Kazakistan
Sarımsak Tozu	5000	Hindistan
Susam	157000	Mısır, Uganda
Zencefil Ve Zerdeçal Tozu (Kurutulmuş)	6992	Hindistan, Tanzanya
Papatya	1620	Almanya
2023 Yılı Organik Ürün İthalatı		
Ürün Adı	Miktarı (Kg)	İthal Edilen Ülke
Çay (Siyah)	80	Almanya
Çay Ağacı Yağı	5	Hollanda
Çörek Otu Yağı	25	Hollanda
Kahve	73225	Almanya, Kolombiya, İsveç, Avusturya, Belçika, Bulgaristan
Karanfil (Tane)	1500	Sri Lanka
Karışım (Zencefil, Zerdeçal, Limonotu)	600	Almanya
Kenevir Tohumu ve Yağı	2140	Çin
Keten Tohumu	10749	Hindistan, Almanya
Meyan Kökü	845280	Özbekistan, Gürcistan
Lavanta Yağı	5	Hollanda
Nane Yağı	30	Hollanda
Sirke (Elma, Nar)	55776	Almanya, İtalya
Susam	38000	Sudan
Susam Yağı	300	Hollanda
Tarçın (Çubuk)	2100	Sri Lanka
Tarçın (Toz)	5550	BAE, Hollanda, Sri Lanka
Uçucu Yağ	30	Fransa
Zencefil Tozu	800	BAE
Zerdeçal Tozu	16	BAE

Kaynak: www.tarimorman.gov.tr

3. SONUÇ VE ÖNERİLER

Türkiye, sahip olduğu zengin floristik çeşitlilik, farklı ekolojik bölgeleri ve geleneksel bitki kullanım kültürü sayesinde organik tıbbi ve aromatik bitkiler üretimi açısından önemli bir potansiyele sahiptir. Dünya genelinde doğal ve organik ürünlere yönelik artan talep, bu ürün grubunu hem tarımsal üretim hem de dış ticaret açısından stratejik bir konuma taşımaktadır. Türkiye’de organik tarım uygulamalarının yaygınlaşmasıyla birlikte tıbbi ve aromatik bitkilerin üretim alanlarında artış gözlenmekte; ancak bu artışın ürün çeşitliliği, kalite, verimlilik ve ihracat performansı açısından istenen düzeye ulaştığını söylemek mümkün olamamaktadır.

Organik tıbbi ve aromatik bitkiler üretimi büyük ölçüde küçük ölçekli işletmeler tarafından gerçekleştirilmekte ve bu durum, standart üretim, sertifikasyon ve pazarlama süreçlerinde çeşitli sorunları beraberinde getirmektedir. Üretimde çoğunlukla ham ürün ihracatına dayalı bir yapı hâkimdir ve bu durum katma değer sınırlı kalmasına neden olmaktadır. Ayrıca, Türkiye bazı ürünlerde net ihracatçı konumunda olmasına rağmen, iklim koşulları nedeniyle yetiştirilemeyen veya yeterli miktarda üretilmeyen bazı tıbbi ve aromatik bitkilerde ithalata bağımlılığını sürdürmektedir. Bu yapı, dış ticarete ürün bazlı dengesizliklere yol açmaktadır.

Öte yandan, uluslararası pazarlarda organik ürünlere yönelik kalite, izlenebilirlik ve sertifikasyon kriterlerinin giderek sıkılaşması, Türkiye için hem bir risk hem de bir fırsat oluşturmaktadır. Mevcut potansiyelin etkin biçimde değerlendirilebilmesi için üretimden pazarlamaya kadar uzanan zincirin bütüncül bir yaklaşımla ele alınması gerekmektedir. Aksi halde, sahip olunan biyolojik ve ekonomik avantajların sürdürülebilir bir rekabet gücüne dönüşmesi zorlaşacaktır.

Türkiye’de organik tıbbi ve aromatik bitkiler sektörünün sürdürülebilir şekilde geliştirilmesi için öncelikle üretim yapısının güçlendirilmesi gerekmektedir. Bu kapsamda üreticilerin organik tarım teknikleri, hasat sonrası

işlemler ve kalite standartları konusunda bilgi düzeylerinin artırılması büyük önem taşımaktadır. Sertifikasyon süreçlerinin daha erişilebilir ve maliyet açısından desteklenebilir hale getirilmesi, üretici katılımını artırarak kayıtlı ve izlenebilir üretimin yaygınlaşmasına katkı sağlayacaktır.

Bunun yanı sıra, ürünlerin yalnızca ham madde olarak değil, işlenmiş ve yüksek katma değerli formlar halinde pazara sunulması teşvik edilmelidir. Uçucu yağlar, ekstraktlar, bitkisel ilaç hammaddeleri ve kozmetik bileşenler gibi işlenmiş ürünlerin geliştirilmesi, ihracat gelirlerinin artırılmasına önemli katkı sağlayacaktır. Bu süreçte üniversite, araştırma kurumları ve özel sektör arasındaki iş birliklerinin güçlendirilmesi, yenilikçi ürün geliştirme faaliyetlerini destekleyecektir.

Dış ticaret açısından ise hedef pazarların çeşitlendirilmesi ve Türkiye menşeli organik ürünlerin marka değerinin artırılması gerekmektedir. Coğrafi işaretleme, kalite sertifikaları ve sürdürülebilir üretim vurgusu, uluslararası pazarlarda rekabet avantajı sağlayabilecek önemli araçlar arasında yer almaktadır. Ayrıca, sektöre ilişkin güncel ve ayrıntılı veri altyapısının oluşturulması, politika yapıcılar ve sektör paydaşları için daha etkin planlama ve karar alma süreçlerine olanak tanıyacaktır.

Sonuç olarak, organik tıbbi ve aromatik bitkiler üretimi ve dış ticareti, doğru politikalar ve bütüncül bir yaklaşım ile ele alındığında Türkiye için hem ekonomik hem de çevresel açıdan önemli kazanımlar sağlayabilecek stratejik bir alan niteliğindedir.

KAYNAKÇA

- Adar Yazar, E. (2024). Organic fertilizer in medicinal and aromatic plant production: SWOT analysis and strategies. *Cihannüma Teknoloji Fen ve Mühendislik Bilimleri Akademik Dergisi*, 21(1): 68-77. doi: 10.55205/joctensa.21202377.
- FİBL & IFOAM. 2024. The World of Organic Agriculture. <https://www.fibl.org/fileadmin/documents/shop/5011-organic-world-2024.pdf>, Erişim: 10.11.2025
- Golijan, J. & Dimitrije, M. (2018). The benefits of organic production of medicinal and aromatic plants in intercropping system. *Acta Agriculturae Serbica*, 23: 61-76. doi:10.5937/aaser1845061g.
- Golijan, J. (2016). Organic medicinal and aromatic plants production in Republic of Serbia. *Lekovite Sirovine*, 36(1): 74-83. doi: 10.5937/leksir1636074g
- Çelik A.D. Aykut, G. (2016). Tıbbi ve aromatik bitki yetiştiriciliği ve dış ticareti: Hatay ili örneği. *Mustafa Kemal Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, 21(2)-227-235. <https://data.tuik.gov.tr/Kategori/GetKategori?p=tarim-111&dil=1>. Erişim: 21.11.2025
- ITC, 2023. Export Guide: Medicinal and Aromatic Ingredients and Plants .<https://www.intracen.org/news-and-events/news/improving-sme-access-to-information-unlocks-medicinal-plant-product-markets>. Erişim: 20.11.2025
- Jiang, L., Chen, Y., Wang, X., Guo, W., Bi, Y., Zhang, C., Wang, J., & Li, M. (2022). New insights explain that organic agriculture as sustainable agriculture enhances the sustainable development of medicinal plants. *Frontiers in Plant Science*, 13: 959810. doi: 10.3389/fpls.2022.959810.

- Karık, Ü., & Tunçtürk, M. (2019). production, trade and future perspective of medicinal and aromatic plants in Turkey. *Anadolu Ege Tarımsal Araştırma Enstitüsü Dergisi*, 29(2): 154-163. doi: 10.18615/anadolu.660316.
- Kowsalya, S., & Rohini, A. (2024). Export performance and direction of trade of organic products from India. *International Journal of Agriculture Extension and Social Development*, 7(1): 113-116. doi: 10.33545/26180723.2024.v7.i1b.194
- Marcelino, S., Hamdane, S., Gaspar, P., & Paço, A. (2023). Sustainable Agricultural Practices for the Production of Medicinal and Aromatic Plants: Evidence and Recommendations. *Sustainability*, 15(19): 14095. doi: 10.3390/su151914095.
- Mendes, A., Oliveira, A., Lameiras, J., Mendes-Moreira, P., & Botelho, G. (2023). Organic Medicinal and Aromatic Plants: Consumption Profile of a Portuguese Consumer Sample. *Foods*, 12(22): 4145. doi: 10.3390/foods12224145
- Parvin, S., Reza, A., Das, S., Miah, M., & Karim, S. (2023). Potential role and international trade of medicinal and aromatic plants in the world. *European Journal of Agriculture and Food Sciences*, 5(5): 89-99. doi: 10.24018/ejfood.2023.5.5.701.
- Riaz, U., Iqbal, S., Sohail, M., Samreen, T., Ashraf, M., Akmal, F., Siddiqui, A., Ahmad, I., Naveed, M., Khan, N., & Akhter, R. (2021). A comprehensive review on emerging importance and economical potential of medicinal and aromatic plants (MAPs) in current scenario. *Pakistan Journal of Agricultural Research*, 34(2): 381-392. doi: 10.17582/journal.pjar/2021/34.2.381.392.
- Shahrajabian, M., Sun, W., & Cheng, Q. (2019). Traditional Chinese medicine and agriculture; organic life and sustainability for future. *GSC*

Biological and Pharmaceutical Sciences, 7(1): 91-95. doi: 10.30574/gscbps.2019.7.1.0052

T.C. Tarım ve Orman Bakanlığı. 2021. Ulusal Eylem Planı 2018-2022.

TAGEM. 2021. Tıbbi ve Aromatik Bitkiler Sektör Politika Belgesi 2020-2024. Ankara.

Tarım ve Orman Bakanlığı Verileri. 2025. <https://www.tarimorman.gov.tr/Konular/Bitkisel-Uretim/Organik-Tarim/Istatistikler>. Erişim: 21.11.2025

Temel, M., Tınmaz, A.B., Öztürk, M. & Orhan, G. (2018). Dünyada ve Türkiye’de tıbbi -aromatik bitkilerin üretimi ve ticareti. *KSÜ Tarım ve Doğa Dergisi*, 21(Özel Sayı): 198-214. doi: 10.18016/ksutarimdog.vi.473036

Tripathi, S., Kumar, A., Kohli, K., & Kumar, J. (2019). Organic cultivation of medicinal plants in Uttarakhand: An overview. *Progressive Horticulture*, 51(1): 45-49. doi: 10.5958/2249-5258.2019.00005.8.

Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK) Verileri. 2025. <https://data.tuik.gov.tr/Kategori/GetKategori?p=tarim-111&dil=1>, Erişim: 015.11.2025

Yavuz, A. & Ümmügülüm, E. (2019). Organik tıbbi ve aromatik bitkilerin Türkiye’de üretim miktarı ve değerlendirilmesi. *Bayburt Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 2(1): 115-121.

BÖLÜM 2

KABA YEMLERDE BULUNAN MİNERAL MADDELER VE ARALARINDAKİ İLİŞKİLER

Dr. Gülcan KAYMAK BAYRAM², Prof. Dr. İlknur AYAN³

DOI: <https://www.doi.org/10.5281/zenodo.18108565>

²Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Tarla Bitkileri Bölümü Samsun, Türkiye. gulcan.kaymak@omu.edu.tr, Orcid ID: 0000-0002-0915-0529

³ Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Tarla Bitkileri Bölümü Samsun, Türkiye. ilknuray@omu.edu.tr , Orcid ID:0000-0002-5097-9013

1. GİRİŞ

Mineral maddeler, hem bitkilerde hem de hayvanlarda yaşamsal faaliyetlerin sürdürülmesinde temel işlevlere sahip olan besin elementleridir. Bitkiler, büyüme ve gelişmeleri için gerekli olan mineralleri toprak çözeltisinden kökleri aracılığıyla alarak metabolik süreçlerinde kullanırlar. Hayvanlar ise bu mineraller biyolojik olarak sentezleyemezler (Kutlu ve ark., 2005). Mineraller, hayvanlarda iskelet ve kas gelişiminden, enzim ve hormonların yapımı ve işleyişine, sindirim sisteminin düzenlenmesine kadar birçok faaliyette rol alırlar (Açıkgöz, 2021). Hayvan vücudunun mineral madde içeriğinin yaklaşık % 70'ini kalsiyum ve fosfor oluşturur (Kutlu ve Çelik, 2005). Hayvan beslemede kaba yemler, enerji ve proteinle birlikte mineral madde temininde de başlıca rol oynar. Kaba yemlerin mineral madde içerikleri, hem bitkisel üretimin verim ve kalitesi hem de hayvansal üretimin sürdürülebilirliği açısından büyük önem taşımaktadır.

Hayvan beslenmesinde minerallerin dengesi ve yem rasyonundaki miktarları, sindirim, büyüme, üreme ve süt verimi gibi birçok fizyolojik süreç üzerinde doğrudan etkilidir. Minerallerin en önemli fonksiyonlarından birisi, vitaminlerle birlikte çalışarak hem vitaminlerin hem de diğer besin maddelerinin etkin bir şekilde değerlendirilmesini sağlamaktır (Gürsoy ve Macit, 2017). Mineralların eksikliği ve fazlalığı hayvanlarda önemli sağlık sorunlarına neden olabilir. Bu nedenle, hayvan sağlığının korunması ve verimliliğin artırılması için, kullanılacak kaba yemlerin mineral madde kompozisyonunun doğru şekilde belirlenmesi büyük önem taşır.

2. MİNERAL MADDELER VE ARALARINDAKİ İLİŞKİLER

Yem bitkilerinin mineral madde içerikleri, birçok çevresel ve genetik faktörün etkisi altında değişkenlik göstermektedir. Bitki türü ve çeşidi, yem bitkilerinin karışım oranı, gelişme dönemi, biçim zamanı, toprakların fiziksel ve kimyasal özellikleri, gübreleme şekli ve iklim koşulları bu değişkenlerin başlıcalarıdır (Acar ve Önal Aşçı, 2018). Örneğin, topraktaki pH, organik

madde miktarı ve tuzluluk düzeyi bitkinin mineral alımını doğrudan etkileyebilir. Aynı zamanda, farklı yem bitkisi türleri ve hatta aynı türün farklı genotipleri arasında bile P, K, Ca ve Mg içerikleri bakımından önemli farklılıklar görülebilmektedir. Bu nedenle yem bitkilerinin karışık ekimleri, besin elementleri açısından daha dengeli ve kaliteli kaba yemler elde edilmesine katkı sağlamaktadır (Mut ve Gülümser, 2022).

Bitkilerde olgunluğun ilerlemesiyle genellikle mineral madde oranları azalma eğilimi gösterir, bu durum, besin maddelerinin özellikle yaşlı dokularda oransal olarak azalması ve taşınma süreçleriyle ilişkilidir (Acar ve Önal Aşçı, 2018). Kamışsı yumakta olgunlaşmaya bağlı olarak otun Ca ve P oranının azaldığı belirlenmiştir (Hannaway ve ark., 1999). Can ve Ayan (2017), domuz ayırığında olgunlaşmanın ilerlemesiyle bitkide Ca, Mg, P ve K oranının azaldığını, özellikle tam çiçeklenme döneminde Ca ve Mg oranının, erken vejetatif döneme göre yaklaşık %50 oranında düştüğünü bildirmişlerdir. Önal Aşçı ve ark., (2010)'nın bildirdiğine göre olgunlaşma ilerledikçe yem bezelyesi, arpa ve tritikale bitkilerinde Ca, Mg, P ve K oranları azalmıştır. Öte yandan, uygulanan gübre cinsi ve miktarı, bitkilerde mineral madde birikimini etkileyen en önemli kültürel uygulamalardan biridir. Toprak koşullarına göre belirlenen uygun gübreleme yöntemleri sayesinde, bitki veriminin yanında yemlerin besin kalitesi istenilen düzeye çıkarılabilir. Toprağın yapısı da mineral madde varlığını etkilemektedir. Toprağın içerisindeki kil miktarı arttıkça besin maddelerinin bağlanma oranı artar (Elinç, 2007). Bu nedenle killi toprakta yetişen bitkilerin mineral içerikleri kumlu topraklara nazaran daha fazladır. Sonuç olarak, kaba yemlerin mineral madde içeriğini etkileyen faktörlerin ayrıntılı biçimde değerlendirilmesi, hem sürdürülebilir yem üretimi hem de hayvansal üretim kalitesinin artırılması açısından vazgeçilmez bir gerekliliktir.

Hayvan beslenmesinde mineral dengesinin sağlanamaması, metabolik hastalıkların ortaya çıkmasında önemli bir faktördür. Dünyanın birçok

ülkesinde olduğu gibi Türkiye’de de hayvanlarda beslenmeye bağlı yetersizlikler sonucunda ekonomik kayıplara neden olan metabolik hastalıklar ortaya çıkmaktadır (Alp ve ark., 2001). Bu hastalıkların özellikle kaba yeme dayalı olarak beslenen süt inekleri ve koyunlarda, yeterli miktarda mineral karması ve konsantre yem kullanılmamasından kaynaklanmaktadır. Araştırmacılar bu çalışmada, mineral eksikliğinin belirlendiği bölgelerde koyunların yalnızca mera beslenmesine bırakılmaması; mineral dengesinin sağlanabilmesi için karma yemlerle ve/veya merada ya da ağılda mineral bloklarıyla desteklenmesi gerektiğini önermişlerdir.

Magnezyum (Mg), vücutta enerji kullanımı ve kemik büyümesi için gereklidir (Gültepe ve ark., 2017). Magnezyumca fakir meralarda otlayan sığırlarda çayır tetanisi (hipomagnezemi) önemli bir sağlık sorunu olarak görülmektedir. Yemin içerisine magnezyum tuzları katılarak ya da otlak alanlara magnezyum bileşikleriyle takviye edilerek hastalığın tedavi edildiği ve önlendiği bildirilmektedir. Baklagil yem bitkileri kalsiyum ve magnezyum bakımından buğdaygillere göre daha zengindir. Bu nedenle baklagil bitkilerinin dominant olduğu mera alanlarında otlayan hayvanlarda çayır tetanisi vakalarına sık rastlanmamaktadır (Whitehead, 1995). Özellikle laktasyon dönemindeki koyunların ve sığırların çayır tetanisine karşı çok hassas olduğu bilinmektedir (Mayland ve Hankins, 2001). Veterinerler tarafından yürütülen bir araştırmada, tuz alımının çayır tetanisini önlemede etkili olduğu belirtilmiştir. Kan serumunda yeterli sodyum bulunmadığında, vücudun sırasıyla magnezyumu ve ardından kalsiyumu kullandığı belirlenmiştir. Ayrıca, hayvanlar don zararına uğramış ve nitrat içeriği yüksek yemleri tükettiklerinde, kandaki Mg’nin nitrata uzaklaştırmak için kullanıldığını ve bu durumun Mg düzeyinin azalmasına neden olduğu bildirilmiştir (Berger, 2008). Samsun’da yapılan bir çalışmada, yem bitkilerindeki $K/(Ca+Mg)$ oranının 0.36-4.73 arasında değiştiği belirlenmiştir (Ayan ve ark., 2006). Isparta ilindeki farklı meralarda yürütülen çalışmada, otlatma sezonu boyunca çayır tetanisi oranının azaldığı, ayrıca

korunan meralarda bu oranın otlatılan meralara göre daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Yem örneklerinde ise $K/(Ca+Mg)$ oranının 0.77 ile 1.69 arasında değiştiği saptanmıştır (Türk ve ark., 2014).

Sığır ve koyunlarda sinir sistemini etkileyen çayır tetanisinin tek nedeni Mg^{2+} eksikliği değildir (Martens ve ark., 2018). Yüksek K^+ içeriğine sahip bitkiler, iyon antagonizması nedeniyle yalnızca mineral-elektrolit dengesizliğine değil, aynı zamanda Na^+ eksikliğine de yol açmaktadır (Swerczek, 2018). Bitkilerde Na^+ içeriği azaldıkça, hayvanlarda çayır tetanisi görülme riski artmaktadır (Martens ve ark., 2018). Bu bulgular, Na^+ 'ın çayır tetanisinin önlenmesinde dikkate alınması gereken bir mineral olduğunu ortaya koymaktadır.

Kalsiyum (Ca), hayvan vücudunda kemik ile diş yapısında ve süt salgısında etkilidir. Ayrıca kanın pıhtılaşması, kasların kasılması ve vücutta gerçekleşen birçok fizyolojik olayda etkilidir. Süt humması veya diğer adıyla doğum felci, süt ineklerinde doğum sonrası sık olarak görülen metabolik hastalıklardandır (Kutlu ve Serbest, 2014). Hastalık durumunda kandaki kalsiyum düzeyi önemli oranda düşmekte, bu düşüşle bağlı olarak kas hareketliliği (kasılma ve gevşeme) kaybolmakta, hayvan ayağa kalkamaz vaziyette yatma pozisyonuna geçmektedir. Bu durumda tedavi için damardan kalsiyum glukonat enjeksiyonu gerekir. Rasyonlarda yüksek düzeyde baklagil kullanıldığında ilave fosfora, yüksek düzeyde tahıl kullanıldığında ise ilave kalsiyuma ihtiyaç vardır (Gültepe ve ark., 2007). Açıkgöz (2001), genel olarak Ca/P oranının 2:1 olması tavsiye edilmekte, fazlalığında ise hayvanlarda süt hummasına neden olduğunu bildirmiştir. Buxton ve Fales (1994), ise hayvanların yeterince D vitamini aldıklarında bu oranı 7:1'e kadar tolere edebileceğini saptamışlardır. Ayan ve ark., (2006), yem bitkilerindeki Ca/P oranını 1.17-10.38 arasında, Acar ve ark., (2009) ise 0.29-5.27 arasında değiştiğini belirlemişlerdir.

Yemlerdeki enerjinin hayvanlar tarafından kullanılmasına izin veren tüm biyokimyasal reaksiyonlar fosfor gerektirir (Liesegang ve ark., 2007). Fosfor hayvan vücudunda kalsiyumdan sonra en yüksek miktarda bulunan bir makro elementtir (% 1). Vücutta fosforun % 78-80' i kemikte, % 9-10'u kasta, % 1 kadarı sinir sisteminde. Geri kalan kısım diğer organ ve iç sıvılarında yayılmış durumdadır. Fosfor iskeletin büyümesinde, diş gelişimi, kanın kimyasal yapısında, vücudun asit -baz dengesinde vitamin enzim aktivitelerinde çok önemli rol oynar (Olgun ve Ünal, 1983). Sanayi işletmelerinin atıkları, volkanik olaylar ya da yanlış amenajman uygulamalarıyla aşırı fosfor birikimi gerçekleşir. Bu alanlarda otlayan hayvanlarda florosis adı verilen fosfor zehirlenmeleri gerçekleşebilir (Cronin ve ark., 2000). Bitkilerin bünyesinde % 0.02-0.08 arasında fosfor bulunur. Ancak fosforca eksik topraklarda yetişen bitkilerde bu miktardan daha azdır. Bitkilerde fosforun % 50 -80'i suda erir. Bu bakımdan çiftçilerin hayvanlara yedireceği kuru otun yağmur altında kalması, sebzelerin pişirilip suyunun dökülmesi fosfor kaybına yol açar. Bitki tohumlarında fosfor, ait olduğu bitkinin yaprak ve saplarına nazaran daha fazladır. Bu durum kalsiyum ile birlikte tamamen ters şekildedir. İnsanlar genellikle taneleri tükettiklerinden fosforu çoğu kez ihtiyaçtan fazla alırlar. Hayvanlar tarafından yaprak ve saplar (yeşil ot, kuru ot, yonca, saman) yendiğinden kalsiyuma nazaran fosfor eksikliği daha çok görülür (Olgun ve Ünal, 1983).

Kayser ve Isselstein (2005), potasyumun bitki beslenmesinde önemli bir element olduğunu ve özellikle nitrojenle yakın ilişki içinde bulunduğunu belirtmişlerdir. Araştırmacılar, yüksek potasyum düzeylerinin bitkilerde magnezyum (Mg) ve kalsiyum (Ca) alımını olumsuz etkileyerek katyonların hızla yıkanmasına yol açtığını; bunun sonucunda ise hayvanlarda süt humması ve çayır tetanisi gibi metabolik bozuklukların ortaya çıkabileceğini vurgulamışlardır. Tauriainen (2001), kurudaki sığırlar için doğum felci

açısından rasyonda yüksek düzeyde bulunan potasyumun, yüksek düzeydeki kalsiyumdan daha önemli bir risk faktörü olduğunu vurgulamıştır.

Geviş getiren hayvanlarda beslenmeye bağlı olarak beyaz kas hastalığı, enzootik ataksi ve doğum felci gibi çeşitli metabolik bozukluklar görülebilmektedir (Umucalı ve Gülşen, 2005). Beyaz kas hastalığı, özellikle Karadeniz ve İç Anadolu Bölgelerinde yaygın olarak görülmekte olup, hayvanlarda %20–30 oranında ortaya çıktığı bildirilmektedir. Bu hastalık genellikle selenyum veya E vitamini eksikliğine bağlı olarak gelişir. Hastalıkla beraber önemli ekonomik kayıplar yaşanmakta; ancak yapılan araştırmalar, E vitamini ve selenyum içeren çözeltilerin enjeksiyonu ile hastalığın neredeyse tamamen önlenbildiğini göstermiştir (Ası, 1996). Selenyum eksikliği, kümes hayvanlarında Exudative Diathesis ve domuzlarda Mulberry kalp hastalığına neden olmaktadır (Gupta ve Gupta, 2002). Aşırı miktarda selenyum biriktiren *Astragalus* ve *Atriplex* türlerinin fazla tüketimi, hayvanlarda kalp ve karaciğer hasarlarının yanı sıra solunum bozuklukları ve körlük gibi rahatsızlıklara yol açmaktadır. En belirgin semptom olarak ise yele ve kuyruk kıllarının dökülmesi olarak gözlenmektedir (Molyneux ve Ralphs, 1992). Enzootik ataksi, bakır (Cu) yönünden fakir meralarda otlayan hayvanlarda sıkça görülen bir sinir sistemi hastalığıdır. Bakır yetersizliği sonucunda sığırlarda kronik ishal ve miyokard enfarktüsüne bağlı ani ölümler görülür ve ekonomik kayıplara sebep olur. Bakır, hemoglobin sentezi ve sinir iletiminde önemli rol oynadığından, eksikliğinde sinirsel bozukluklar, anemi ve tüy ile yapağı renginde açılmalar ortaya çıkar. Buğdaygil yem bitkilerinde Cu içeriği %3–15, baklagil yem bitkilerinde ise %3–30 arasında değişmektedir (Mayland ve Cheeke, 1995).

Çinko hayvanlarda çok sayıda enzim ve hormonun bir bileşeni olup, fizyolojik fonksiyonları işleyişi için gereklidir (Prasad, 1995). Çinko, hayvansal dokulara oldukça dengeli dağılıp, en çok deri, kıl, tüy ve yapağı gibi epidermal dokularda bulunur. Enzimlerin yapısına katılmakta görev alır. Noksanlığında, yem alınımında azalma, yemden yararlanmada düşme, üreme fonksiyonlarında

bozulma, büyümede gerileme, tüy, deri, saç ve yünlerde anormallikler görülür. Buğdaygil yem bitkilerinde çinko değerleri, %15-50, baklagil yem bitkilerinde %15-70 arasında olduğu bildirilmiştir (Mayland ve Cheeke, 1995).

Demir (Fe), kanda oksijen taşıyan hemoglobinin önemli bir parçasıdır. Hayvanlarda iştahsızlık ve canlı ağırlık kaybı demir eksikliğinin ana belirtileridir. Demir; birçok enzimin yapısına katılır ve kimyasal reaksiyonlarda anahtar rolü oynar. İlerleyen dönemde eksikliğinde anemi görülür (Artington, 2002).

Kobalt (Co) Vitamin B₁₂'nin bir bileşenidir. Rasyonda yeterince kobalt bulunması durumunda hayvanın ihtiyacı olan B12 vitamini rumen mikroorganizmaları tarafından sentezlenebilir (Umucalılar ve Gülşen, 2005). Eksikliği hayvanlarda gelişim bozuklukları, üreme bozuklukları ve anemiye neden olmaktadır (Ergün ve ark., 2002).

Mangan (Mn), kemik gelişiminde ve kolesterol sentezinde görev alır. Noksanlığında, perozis (tavuklarda ayak ve bacak iskeletlerinde biçim bozuklukları), yumurta kabuk oluşumunda bozulma ve üreme bozukluğu görülür. Buğdaygil yem bitkilerinde Mn değerlerinin, % 6.71-84.7 arasında değiştiği bildirilmiştir (Alp ve ark., 2001).

Bor (B), bitkilerde şeker taşınımı ve hücre duvarı oluşumunda önemli rol oynar. Hücre zarı fonksiyonları, hormon reseptörleri ve sinir iletimi üzerinde dolaylı etkilere sahiptir (Yeşilbağ, 2008). Kalsiyum ve magnezyum metabolizmasında görev alır, bu nedenle noksanlığı Mg eksikliğine ve bazı elementlerin fonksiyonlarında azalmaya neden olur (Türkmen ve ark., 2011). Buğdaygil yem bitkilerinde B değerleri, %3-40, baklagil yem bitkilerinde ise %30-80 arasında olduğu bildirilmiştir (Mayland ve Cheeke, 1995).

Kükürt (S), hayvan vücudunda protein ile bazı vitamin ve hormonların bir bileşenidir. Protein, yağ ve karbonhidrat metabolizmalarının yanı sıra kan pıhtılaşması ve vücut sıvılarının asiditesinin korunmasında etkilidir. Yem ham maddeleri genellikle ruminantlar için yeterli miktarda kükürt içerir.

Rasyonlarda yüksek miktarda tahıl bulunduğunda veya gerçek protein niteliğinde olmayan azot kaynakları kullanıldığında, ilave kükürt gerekli olabilir.

Yem bitkilerinin nitrat birikiminde birçok etken rol oynar. Kuraklık, yetersiz ışık, bitki türü, bitki dokusunun zarar görmesi ve azotlu gübrelerin kullanımı gibi faktörler bitkilerde nitrat birikimini artırır. Ayrıca 2.4- Dikloro fenoksiasetik asit ve 2.4.5-Trikloro fenoksiasetik asit gibi herbisitlerin özellikle bitkilerin erken gelişme dönemlerinde uygulanması bitkilerde nitrat birikimini artıran etkilere sahiptir (Rasby ve ark., 2014). Sulak ve Aydın (2005), bazı durumlarda yem bitkilerindeki nitrat düzeylerinin hayvanlar için ölümcül olabileceğini ve bu durumun özellikle sap ve saman gibi yem kaynakları açısından da önemli olduğunu bildirmişlerdir. Araştırmacılar, bitkilerde nitrat birikiminin başlıca nedenlerinin toprakta aşırı azot bulunması ve olumsuz çevre koşulları olduğunu; ayrıca bitki türleri arasında nitrat biriktirme eğiliminin farklılık gösterdiğini belirtmişlerdir. Yeşil materyalin kurutulmasının nitrat içeriğini değiştirmediğini, ancak silolama ile bu oranın yaklaşık yarıya düşebileceğini ifade etmişlerdir. Bununla birlikte, nitrat içeriği 1000 ppm'in üzerinde olan yemlerin hayvanlara verilmesinde dikkatli olunması gerektiğini vurgulamışlardır. Nitrat zehirlenmesinin erken ve kronik belirtileri arasında göz sulanması, iştahın azalması, süt veriminin düşmesi, sendeleme, kilo kaybı, A vitamini eksikliği ve yavru atma yer almaktadır. Akut belirtiler ise; hızlı nabız artışı, solunum güçlüğü, nefes darlığı, kas titremeleri, zayıflama, siyanoz (dil, ağız ve göz çevresinde kahverengimsi renk değişimi) ve ölüm şeklinde ortaya çıkmaktadır (Cash ve ark., 2006). Genellikle tüm bitkiler bir miktar nitrat biriktirirler. Ruminantlar tarafından nitrat içeren yemler tüketilince, rumendeki mikroorganizmalar tarafından nitrat önce nitrite ve son olarak amonyağa dönüştürülür. Nitratin amonyoğa dönüşmesi sonucu nitrat zehirlenmesi olur. Nitrit kan dolaşımında absorbe edilir ve hemoglobini methemoglobine çevirir. Hemoglobin akciğerden diğer dokulara oksijen

taşınmasını sağlar ancak methemoglobine dönüştüğünde bu oksijenin taşınması durur. Bu nedenle fazla methemoglobin üretimiyle kanın oksijen taşıma kapasitesi kritik seviyeye geldiğinden dolayı nitrat problem haline dönüşür.

3. SONUÇ

Hayvan beslenmesinde mineral maddeler, büyüme, bağışıklık, üreme ve süt verimi gibi temel fizyolojik süreçlerin düzenlenmesinde belirleyici rol oynar. Kaba yemlerin mineral madde içerikleri; bitki türü, gelişme dönemi, yetiştiği toprağın fiziksel ve kimyasal özellikleri, iklim koşulları ve uygulanan gübreleme yöntemleri gibi çok sayıda faktörden etkilenmektedir. Bu nedenle, yem bitkilerinin mineral kompozisyonunun doğru belirlenmesi ve dengeli rasyonların hazırlanması, hayvanlarda görülebilecek metabolik rahatsızlıkların önlenmesinde büyük önem taşımaktadır. Ayrıca, farklı yem bitkilerinin karışık ekimleri, mineral madde açısından daha dengeli ve besin değeri yüksek kaba yemlerin elde edilmesine katkı sağlamaktadır. Sonuç olarak, kaba yemlerin mineral içeriğinin belirlenmesi ve bu bilginin hayvan besleme programlarında etkin biçimde kullanılması, hem üretim verimliliğinin artırılması hem de sürdürülebilir bir hayvansal üretim bakımından büyük önem taşımaktadır.

KAYNAKÇA

- Acar, Z., I. Ayan, O. Asci, U. Basaran and H. Mut. (2009). Biodiversity in morphological properties and nutritional values of forage grass species. *J. Environ. Biol.*, 30: 583-589.
- Açıkgöz, E. (2001). Yem Bitkileri (3. Baskı) Uludağ Üniv. *Güçlendirme Vakfı Yayın*, 182.
- Açıkgöz, E. (2021). Yem Bitkileri. Tarım ve Orman Bakanlığı, Bitkisel Üretim Genel Müdürlüğü, Yenilenmiş ve genişletilmiş 4. bs. Ankara
- Alp, M., Kahraman, R., Kocabağlı, N., Özçelik, D., Eren, M., Türkmen, İ., Yavuz, M., Dursun, Ş., (2001). Marmara Bölgesi'ndeki Yem Bitkilerinin Mineral Madde Düzeylerinin Saptanması ve Koyunlarda Beslenme Bozuklukları İle İlişkisi. *Turk J. Vet. Anim. Sci.*, 25, 511-520.
- Artington J.D. (2002): Essential Trace Minerals for Grazing Cattle in Florida; AN 086 Animal Science Department, Florida Cooperative Extension Service, Institute of Food and Agricultural Sciences, University of Florida.October.
- Ası, T. (1996). Tablolarla Biyokimya, Cilt 1, (s. 37-69). Nobel Tıp, İstanbul.
- Aşçı, O., & Acar, Z. (2018). Kaba yemlerde kalite. TMMOB Ziraat Mühendisleri Odası Yayını, Ankara.
- Ayan I, Acar Z, Mut H, Basaran U, Asci O, (2006). Morphological Chemical and Nutritional Properties of Forage Plants in a Natural Rangeland in Turkey. *Bangladesh Journal of Botany*, 35(2): 133-142.
- Berger, L. L. (2008). *Salt reduces grass tetany*.
- Buxton, D.R., Fales, S.L., (1994). Plant environment and quality. Forage Quality, Evaluation and Utilization (Eds. G.C. Fahey, : Collins, D.R. Mertens & L.E. Moser), pp. 155-199, Madison, WI, USA
- Can M, Ayan İ, (2017). Domuz Ayırığı (*Dactylis glomerata* L .) Popülasyonlarında Gelişme Dönemlerine Göre Verim ve Bazı Özelliklerin Değişimi. *KSÜ Doğa Bilimleri Dergisi*, 20(2): 160–166.

- Cash, D., Funston, R., King, M., Wichman, D. (2006). Nitrate toxicity of Montana forages. Montana State University, Extension, Field Crops C-12 (Forages), 1000-05/06JM
- Cronin, S. J., Manoharan, V., Hedley, M. J., & Loganathan, P. (2000). Fluoride: A review of its fate, bioavailability, and risks of fluorosis in grazed-pasture systems in New Zealand. *New Zealand Journal of Agricultural Research*, 43(3), 295-321.
- Elinç, F. (2007). Bitki Besleme ve Toprak Verimliliği. Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Ziraat Fakültesi yayınları, 268 s. Samsun
- Ergün, A., Tuncer, Ş.D., Çolpan, İ. Yalçın, S., Yıldız, G., Küçükersan, M.K., Küçükersan, S., Öno, A.G., Muğlalı, Ö.H. ve Şehu, A., (2002). Yemler, Yem Hijyeni ve Teknolojisi. A.Ü. Veteriner Fakültesi, Hayvan Besleme ve Beslenme Hastalıkları Anabilim Dalı, Ankara, 465 s
- Gupta, U. C., & Gupta, S. C. (2002). Quality of animal and human life as affected by selenium management of soils and crops. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 33(15-18), 2537-2555.
- Gültepe, E. E., Uyarlar, C., Çetingül, İ. S., Iqbal, A., & Bayram, İ. (2017). Ruminantlar için vitamin mineral katkıları ve etkileri. *Türkiye Klinikleri*, 3(3), 218-26.
- Gürsoy E, Macit M, (2017). Erzurum İli Çayır ve Meralarında Doğal Olarak Yetişen Bazı Baklagil ve Buğdaygil Yem Bitkilerinin Mineral Madde Kompozisyonlarının Belirlenmesi. *Alinteri Ziraat Bilimler Dergisi*, 32(1): 1-9
- Hannaway, D, Fransen, S., Cropper, J., Teel, M., Chaney, M., Griggs., T., Halse, R., Hart., J., Cheeke, P., Hansen, D., Klinger, R., Lane, W. (1999). Tall fescue (*Festuca arundinacea* Schreb.). Pacific Northwest Extension Publication, PNW 504. Corvallis, OR, USA: Oregon State University, 19 pp

- Kayser, M., & Isselstein, J. (2005). Potassium cycling and losses in grassland systems: a review. *Grass and forage science*, 60(3), 213-224.
- Kutlu, H. R., & Serbest, U. (2014). Ruminant beslemede son gelişmeler. *Turkish Journal Of Agriculture-Food Science And Technology*, 2(1), 18-37.
- Kutlu, H.R. ve Çelik, L. (2005). Yemler Bilgisi ve Yem Teknolojisi. Ç.Ü. Ziraat Fak. Genel Yayın No:266, Ders Kitapları Yayın No:A-86, Adana.
- Kutlu, H.R., Görgülü, M., Çelik, B.M., (2005). Genel Hayvan Besleme. Çukurova Üniversitesi Ziraat Fakültesi Zootekni Bölümü. Ders notu. Adana
- Liesegang A, Chiappi C, Risteli J, Kessler J, Hess HD. Influence of different calcium contents in diets supplemented with anionic salts on bone metabolism in periparturient dairy cows. *J Anim Physiol Anim Nutr* 2007;91(3-4):120-
- Martens H, Leonhard-Marek S, Röntgen M, Stumpff F, (2018). Magnesium Homeostasis in Cattle: Absorption and Excretion. *Nutrition Research Reviews*, 31(1): 114–130.
- Mayland, H.F., Cheeke, P.R., (1995). Forage-Induced animal disorders. In : R. F. Barnes, D. A. Miller and Nelson C. J. (Eds) *Forages*, Iowa State Univ. Press, Ames, Iowa, p. 147-162
- Mayland, H.F., Hankins, J.L., (2001). Mineral imbalances and animal health: A management puzzle. Anti-quality factors in rangeland and pastureland forages. In: Launchbaugh, K. (Ed.), *University of Idaho, Moscow*, pp. 54-62.
- Molyneux, R. J., & Ralphs, M. H. (1992). Plant toxins and palatability to herbivores. *Rangeland Ecology & Management/Journal of Range Management Archives*, 45(1), 13-18.

- Mut, H., & Gülümser, E. (2022). Tek yıllık yem bitkilerinde karışık ekim. In *Karışık ekim* (1. bs., s. 18). Nobel Yayınevi. (ISBN: 978-625-427-765-8)
- Olgun, H., & Ünal, S. (1983). Hayvan beslemede fosfor. *Lalahan Hayvancılık Araştırma Enstitüsü Dergisi*, 23(1-2), 61-64.
- Önal Aşçı, O., Acar, Z., Basaran, U., Ayan, I., Mut, H., (2010). Determination of hay quality of some companion crops sown with red clover. *Journal of Food, Agriculture & Environment*, 8(1): 190 -194.
- Prasad, AS. (1995). Zinc: an overview. *Nutrition* (Burbank, Los Angeles County, Calif.), 11(1), 93-99.
- Rasby, R. J., Drewnoski, M. E., & Stalker, A. (2014). *Grazing crop residues with beef cattle. University of Nebraska-Lincoln Extension*.
- Sulak, M., Aydın, İ., (2005). Yem bitkilerinde nitrat birikmesi. *Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Ziraat Fakültesi Dergisi*, 20 (2): 106-109
- Swerczek, T. W. (2018). Sodium for the prevention of grass tetany and fetal losses associated with nitrate toxicosis in herbivores. *Nutri Food Sci Int J*, 8(1), 555728.
- Tauriainen, S. (2001). *Dietary cation-anion balance and calcium and magnesium intake of dry cow* (Doctoral dissertation, Helsingin yliopisto).
- Türk, M., Albayrak, S., & Bozkurt, Y. (2014). Seasonal trends in chemical composition of different artificial pastures. *Turkish Journal of Field Crops*, 19(1), 53-58.
- Türkmen, İ., Biricik, H., Deniz, G., Gezen, Ş.Ş., Tuncer, D., Çolpan, İ., Küçükersan, K., Küçükersan, S., Yalçın, S., Şehu, A., Saçaklı, P., Ergün, A., Yıldız, G., (2011). *Temel Yem Bilgisi ve Hayvan Besleme*, Anadolu Üniv.
- Umucalılar, H.D., Gülşen, N., (2005). Çiftlik hayvanlarında beslenme bozuklukları. Basımevi: Selçuk Üniversitesi, Konya.

- Whitehead, D.C., (1995). Grassland nitrogen. Biddles Ltd, p.397, Guildford.
- Yesilbağ, D. (2008). Hayvan Beslemede Bor Elementinin Kullanımı. Uludağ Üniversitesi Veteriner Fakültesi Dergisi, 27(1-2), 61-68.

BÖLÜM 3

IN VITRO ÇOĞALTMADA DIŞ KOŞULLARA ADAPTASYON (ACCLIMATIZATION)

Prof. Dr. Mehmet POLAT⁴

Dr. Öğr. Üyesi İlknur ESKİMEZ⁵

DOI: <https://www.doi.org/10.5281/zenodo.18108582>

⁴ Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Ziraat Fakültesi , Bahçe Bitkileri Bölümü, Isparta, Türkiye. mehmetpolat@isparta.edu.tr, orcid id: 0000-0002-2415-4229

⁵ Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Ziraat Fakültesi , Bahçe Bitkileri Bölümü, Isparta, Türkiye. ilknureskimez@isparta.edu.tr, orcid id: 0000-0003-4443-505X

1. GİRİŞ

İn vitro bitki çoğaltma kısa sürede çok sayıda bitki üretmek için hızlı bir yöntemdir. Ancak, doku kültürüyle çoğaltılmış bitkiler *in vitro* ortamdan *ex vitro* koşullara aktarılmaları sırasında birçok bitki türünde düşük hayatta kalma oranı nedeniyle doku kültürü yönteminin kullanımını sınırlandırmaktadır.



Şekil 1. *İn vitro* ortamdaki bitkiler

İn vitro çoğaltma yönteminde bitkilerin dış koşullara alışma (acclimatization), başka bir ifadeyle adaptasyon, oranı düşüktür. *Ex vitro* koşullarına transfer edilen bitkilerin düşük hayatta kalma oranı, *in vitro* çoğaltmanın birçok tür için ekonomik olmamasına neden olmaktadır (Nguyen vd., 1999; Asayesha, 2017).

Ex vitro ortamlarda çevresel koşullar, *in vitro* ortamların çevresel koşullarından oldukça farklıdır (Kozai vd., 1997; Hazarika, 2006; Cha-uma vd., 2009). *Ex vitro* koşullara adaptasyon (acclimatization) başarısını etkileyen en önemli faktör, öncelikle *in vitro* ortamda sağlıklı fideler üretmektir (Pospisilova vd., 1999; Hazarika, 2003; Cha-uma vd., 2009).

İn vitro ortamda çoğaltılan bitkiler *ex vitro* ortama nakledildiğinde, yeterli önlemler alınmadığı takdirde, çevre değişiklikleri sonucu hızla solabilir ve ölebilirler. *In vitro* ortamdaki bağıl nem ve ışık seviyelerine alışkın olan bitkilerin *ex vitro* ortamın çevresel koşullarına kademeli olarak alıştırılması, genç ve fizyolojik olarak hassas fidelerin daha iyi hayatta kalmasını sağlar. Bu

nedenle, anatomik anormallikleri düzeltmek ve fizyolojik performanslarını artırmak için bir adaptasyon döneminden geçirilmelidir (da Silva vd., 2017). Bu sayede hayatta kalma oranını artacaktır. *In vitro* ortamda heterotrofik durumda olan bitkiler ototrofik büyüme fazına geçerek işlevsel bir kök sistemi geliştirir. Ayrıca stoma ve kütiküler terlemelerini daha iyi kontrol eder hale gelirler (da Silva vd., 2017).

Adaptasyon aşamasında bağıl nem kontrolü yapılabilen bölmeler (sera içerisinde yoğun bakım odaları gibi) kullanılarak ve yüksek ışık yoğunluğundan zarar görmemesi için gölgeleme teknikleri kullanılarak kademeli olarak *ex vitro* ortama alıştırılmalıdır. Bu süreçte ışık yoğunluğu kademeli olarak artırılırken ortamın bağıl nemi kademeli bir şekilde düşürülür. Bitkiler *in vitro* ortamda sürekli sabit sıcaklıkta durdukları için ayrıca sıcaklık değişimi etkilerine de alışmaları gerekir. Bunun için mevsime ve gece gündüz döngüsüne göre ısıtma yada soğutma yapılarak kademeli olarak adaptasyonları sağlanır.

2. EX VİTRO ORTAMA ADAPTASYONU ETKİLEYEN FAKTÖRLER

2.1. In vitro ertamdaki çevresel faktörler

In vitro ortamdaki çevresel koşullar doku kültürüyle çoğaltılmış bitkilerin yapısı ve organların işlevlerini etkileyerek, bitkilerin *ex vitro* ortama adaptasyon yeteneklerini belirler (Ziv, 1995)

In vitro ortamdaki sıcaklık, ışık, besin seviyeleri ve bağıl nem (RH) gibi çevresel faktörlerin bitkilerin *ex vitro* adaptasyonunu olumsuz etkilediği literatürde bildirilmektedir (Kozai vd., 1997; Chen, 2004; Cui vd., 2000; Hazarika, 2006; Asayesh vd., 2017). Bu faktörler içerisinde dış koşullara adaptasyonu en çok olumsuz etkileyen faktörün bağıl nem olduğu ifade edilmektedir (Ghashghaie vd., 1992; Preece ve Sutter, 1991; Asayesh vd., 2017). Bu olumsuz etki bağıl nemin bitkilerin stoma iletkenliği ve terleme oranına etkileri nedeniyle olduğu düşünülmektedir (Grout ve Aston, 1977;

Fuchigami vd., 1981; Nogues vd., 1998; van Meeteren ve Aliniaiefard, 2016; Asayesh vd., 2017).

Birçok araştırmacı, *in vitro* ortamdaki yüksek bağıl nemin bazı fizyolojik ve morfolojik bozukluklara yol açabileceğini ifade etmiştir (Preece ve Sutter, 1991; Ritchie vd., 1991; Ziv, 1991; Ghashghaie vd., 1992; Asayesh vd., 2017). Uzun süreli yüksek bağıl nem, stomaların tamamen kapanma yeteneğini azaltmakta ve stomalar yoluyla veya kütiküler olarak terleme oranını artırmaktadır (Asayesh vd., 2017). Bitkiler *ex vitro* ortama çıktıklarında stoma iletkenlikleri artmış olduğu için yaprakların su kaybını kontrol etme kapasitesinin azalmasına yol açar (Aliniaiefard vd., 2014; Aliniaiefard ve van Meeteren, 2013, 2016; Asayesh vd., 2017).

Doku kültürü koşullarında bitkilerin maruz kaldığı yüksek bağıl nem, yaprakların morfolojik yapılarının zayıf gelişmesine, epikütiküler mum oluşumuna (Fuchigami vd., 1981; Grout ve Aston, 1977; Hazarika ve Parthasarathy, 2002; Wardle vd., 1983; Asayesh vd., 2017), stomatal fonksiyonun azalmasına (Brainerd ve Fuchigami, 1981; Ziv, 1991; Kozai vd., 1997; Asayesh vd., 2017) ve *ex vitro* koşullara aktarıldıktan sonra fidelerin yüksek oranda ölmesine neden olabilir (Crane ve Hughes, 1990; Shim vd., 2003; Asayesh vd., 2017). Sonuç olarak, *ex vitro* koşullara hızla uyum sağlayabilen sağlıklı fidelerin üretimi oldukça sınırlıdır. Bu nedenle, fizyolojik ve morfolojik bozukluklar olmadan ve yüksek uyum oranıyla sağlıklı fideler elde etmek için kültür kaplarındaki çevresel koşullar değiştirilerek kültür kaplarının üst kısmındaki bağıl nemi azaltıcı önlemler almak *ex vitro* ortama transfer edilen bitkilerin hayatta kalma oranlarını artırmak için yararlı olabilir (Crane ve Hughes, 1990; Posposilova vd., 1999; Hazarika ve Parthasarathy, 2002; Cha-um vd., 2003; Hazarika, 2003; Talbott vd., 2003; Asayesh vd., 2017). Bu amaçla, havalandırma hızının artırılması (Cui vd., 2000; Shim vd., 2003; Asayesh vd., 2017), ortamın erimiş lanolin tabakasıyla kaplanması ve kapların üst boşluğuna silika jel içeren bir torba asılması (Wardle vd., 1983;

Short vd., 1985; Asayesh vd., 2017), alttan soğutma tekniği ve su buharı geçirgen kapak kullanılması (Ghashghaie vd., 1992; Asayesh vd., 2017) ve kültür odasına doymuş tuz eklenmesi (Tanaka vd., 1992; Cha-um vd., 2003; Cha-um vd., 2010; Asayesh vd., 2017) gibi önlemler literatürde bildirilmektedir. Ancak, bu tekniklerin kullanılmasının kontaminasyon, düşük çoğalma katsayısı ve büyüme geriliğine yol açtığı bildirilmiştir (Ghashghaie vd., 1992; Sallanon ve Maziere, 1992; Asayesh vd., 2017). *İn vitro* ortamda bağlı nemin düşürülmesi durumunda küçük boyutlu çok sayıda stoma oluşmaktadır. Böylece fideler *ex vitro* ortama alındığında öncelikle stoma açıklığının azalması ve stoma işlevselliğinin artması nedeniyle hayatta kalma oranında iyileşmeler olmaktadır (Asayesh vd., 2017).

İn vitro ortamın çevresel koşullarının değiştirilmesi yanında, hayatta kalma oranının artırılmasına yönelik olarak bazı bitki büyüme düzenleyicilerin *in vitro* ortamda kullanılabileceği bildirilmektedir. Örneğin, Cha-uma vd. (2009)'a göre bazı bitki büyüme geciktiricileri, (unikonazol, paklobutrazol, triapentenol, triadimefon ve heksakonazol), bitkilerin boyutunu küçültmede etkili olmaktadır. Bitki boyutu küçülmekte ancak koyu yeşil yaprakları ve kalın kökleri koruyan bu maddeler, *ex vitro* ortama alınan bitkilerde solmayı önlemeye yardımcı olarak daha iyi hayatta kalma ve büyümeye yol açmaktadır (Smith vd., 1990; Smith vd., 1991; Murali ve Duncan, 1995; Hazarika, 2006; Kozak, 2006; Thakur vd., 2006; Cha-uma vd., 2009). Unikonazol, yüksek bitkilerde gibberellik asit biyosentezinin inhibitörüdür (Izumi ve diğerleri, 1984; Nishijima ve diğerleri, 1992; Nishijima ve diğerleri, 1997; Noguchi ve diğerleri, 1999; Cha-uma vd., 2009). Ayrıca tohum çimlenmesinin azalmasına neden olur (Fellner vd., 2001; Li vd., 2005; Cha-uma vd., 2009) ve bitki büyümesi (Oda, 1994; Sankhla vd., 1994; Ogawa vd., 1996; Nishijima vd., 1997; Pasyan, 1999; Inada ve Shimmen, 2000; Cavins vd., 2002; Hays vd., 2002; Blanchard ve Runkle, 2007; Hwang vd., 2008; Zhao ve Wang, 2008; Cha-uma vd., 2009). Bunun yanında yüksek bitkilerde *in vitro* çoğaltmada *ex*

vitro ortama adaptasyon (Murali ve Duncan, 1995), su kıtlığı toleransı (Li ve van Staden, 1998; Li vd., 1998; Zhang vd., 2007; Duan vd., 2008), tuz toleransı (Al-Rumaih ve Al-Rumaih, 2007; Kandil ve Eleiwa, 2008), su birikmesi toleransı (Leul ve Zhou, 1998; Qiu vd., 2005) ve aşırı sıcaklık toleransı (Zhou ve Leul, 1998; Zhou ve Leul, 1999; Fukuta vd., 2001; Kaneko ve Suzuki, 2006; Cha-uma vd., 2009) sağladığı bildirilmektedir. Ekzojen unikonazol uygulamaları, *in vitro* ortamda sağlıklı fideler üretme ve bunların *ex vitro* ortamlara hızlı uyum sağlamasında etkili olmaktadır (Cha-uma vd., 2009).

Fotomorfogenez, ışığın bitkinin büyümesini belirlediği bir gelişim sürecidir. Bitki büyüme şekli, bitkiye gelen ışık spektrumu tarafından kontrol edilir. Fotosentez ve fotomorfogenez radyasyona bağımlıdır. Fotosentez gereksinimleri yüksek ışınım (PAR) altında 400-700 nm arasındadır, oysa mavi, kırmızı ve uzak kırmızı bölgelerdeki fotomorfogenez gereksinimleri çok düşüktür. Çoğu doku kültürü odasında yaygın olarak kullanılan ışık kaynakları (özellikle floresan lambalar), uzak kırmızı dalga boylarında düşük olan (optimum olmayan) bir ışınım yayar. Çoğu büyüme odasında 16 saat aydınlık ve 8 saat karanlık dönemler uygulanır (Polat and Eskimez, 2022). Bu yapay ortam bitkilerin fotosentez ve fotomorfogenez süreçlerini etkilediği için düşük ışınım altında bitki etiyole bir görünüme sahip olabilir. Bu durum genellikle, bir radyasyon gradyanının oluştuğu dikey radyasyondan kaynaklanır (Ziv, 1995).

In vitro ortamda karanlık ve aydınlık dönemler arasında 22-26 °C civarında dalgalanan bir termoperiyot sağlanır. Dalgalanma aralığının yüksek olması istenen bir durum değildir. Düzensiz gelişim ve düşük rejenarasyona neden olabilir. Bu nedenle aydınlık periyotta yüksek ısı yayan ışık kaynakları tercih edilmemelidir.

2.2. *Ex vitro* ertamdaki çevresel faktörler

Nem

Ex vitro ortamların, *in vitro* çoğaltılmış bitkilerin adaptasyonunda en zorlayıcı etmeni nemdir. *Ex vitro* ortamın düşük nem koşulları çoğu zaman öldürücü olmaktadır. Epikütiküler mumların azlığı, birçok mikro çoğaltılmış bitkinin stomalarının *ex vitro* adaptasyon fazında kapanamaması ve yetersiz kök sistemleri, su kaybı, kuruma ve düşük hayatta kalma oranlarının başlıca nedenleridir (Fabbri vd. 1986; Sutter vd. 1992; Ziv, 1995). *In vitro* ortamda çok yüksek bağıl nem etkisi altında gelişen zayıf ve hassas bitkiler dış koşullarda çoğu zaman % 50 lerin altına inen bağıl nem ile karşılaştıklarında genellikle stoma işlevlerinde var olan bozukluk nedeniyle su kaybını kontrol edemedikleri için hızlı bir şekilde ölürlür. Bu nedenle *ex vitro* koşullara adaptasyon aşamasında en dikkat edilmesi gereken ve hassas önlemler alınması gereken faktör nemdir. *Ex vitro* ortama transfer edilen bitkilerin adaptasyon aşamasında başlangıçta bitkilerin *in vitro* ortamda maruz kaldıkları yüksek nem koşullarına yakın bir oransal nemde bir süre bekletilmeleri gerekir. Bu süre türlere göre değişmekle beraber birkaç gün devam eder. İlerleyen dönemde kademeli bir şekilde ortam nemi düşürülmeye başlar. Her kademedede yine birkaç gün bekletilmeleri gerekir. Nem oranını düşürme aşamalarında acele edilmemeli ve nem oranlarında büyük farklar oluşturulmamalıdır. Örneğin oransal nem %95 ten bir anda % 75 lere düşürülmemelidir. Bu farklar adaptasyon sürecinin başlarında daha az tutulmalıdır. İlerleyen süreçte daha geniş aralıklar verilebilir. Aksi halde *in vitro* ortamdan gelen hassas bitkiler zarar görebilir. Genel olarak *ex vitro* ortama adaptasyon aşamasında düşük nem koşullarına bitkilerin alışma süreci 10-12 gün ile 3 hafta arasında sürebilmektedir. Bu süreyi *in vitro* ortamdan gelen bitkinin kalitesi ve özellikle bitki türü etkilemektedir. Bunun yanında türün soğanlı veya yumrulu olması, bitki boyutu, yaprak hacmi gibi etkenler sürecin uzamasına etki edebilmektedir.

Işık

In vitro ortamda yetişen bitkiler, düşük ışık şiddetine maruz kalırlar. Işık ve diğer *in vitro* faktörler yüksek çoğalma oranlarına katkıda bulunur, ancak aynı zamanda *ex vitro* ortama adaptasyon aşamalarını zorlaştıran ve düşük hayatta kalma oranlarına neden olan fizyolojik, anatomik ve morfolojik anormalliklere de sıklıkla neden olur (Gaspar vd. 1987; Kevers vd. 1987; Ziv 1991; Ziv, 1995).

In vitro bitkilerin sınırlı fotosentetik kapasiteye sahip olduğu, enerji kaynağı olarak şekerlere ve belirli düzeylerde besin maddelerine ve büyüme düzenleyicilerine ihtiyaç duyduğu bilinmektedir (Ziv, 1995). *Ex vitro* ortama çıkarılan fotosentetik kapasitesi düşük bu bitkiler yüksek ışığa maruz kalırsa zarar görecektir. Bu nedenle *ex vitro* ortam koşullarına adaptasyon sırasında, kontrollü ışıklanma bitki adaptasyonu için ön koşullardan biridir (Ziv, 1995, Kozai 1991d; Preece ve Sutter 1991; Sutter vd. 1992). *In vitro* aşaması sona ermeden yani *ex vitro*ya transfer edilmeden önce *in vitro* kültür koşullarının, *ex vitro* fotoototrofik koşullarına benzer olması adaptasyona yardımcı olabilir (Ziv, 1995, Kozai 1991b; Sutter vd., 1992). *In vitro* çoğaltılmış bitkiler, çoğalma sırasında ve bazı türlerde adaptasyon sırasında enerji kaynağı olarak karbonhidratlara bağımlıdır. Bu bitkiler genellikle heterotroftir, sınırlı fotosenteze sahiptir ve adaptasyon sırasında ve nakilden sonra kademeli geçişe ihtiyaç duyarlar. *Ex vitro* koşullara getirilen bitkilerin fotosentetik kapasitesi, hayatta kalma için pozitif su dengesini koruma yetenekleri kadar önemli değildir (Ziv, 1995).

Sıcaklık

In vitro çoğaltılmış bitkilerin dış koşullara alıştırılması (aklimatizasyon) aşamasında sıcaklık, önemli faktörlerden biridir. Bitkinin stoma aktivitesinin yetersiz olması nedeniyle yüksek olan su kaybını azaltacak ve kök-yaprak dengesini kurmasına yardımcı olacak şekilde stabil bir aralıkta tutulmalıdır. Adaptasyonun gerçekleştirildiği yoğun bakım ünitelerinde gündüz

vakitlerinde 22-25°C ve geceleri 18-20°C sıcaklıklar aklimatizasyon için elverişli olacaktır. Bununla beraber bitki türlerinin özel isteklerini de göz önünde bulundurmak gerekir. Daha düşük sıcaklıklar gelişmeyi zayıflatabilir. Yüksek sıcaklıklar da su kaybını artıracığından ölüm oranı artacaktır. Bu nedenle 28°C nin üstüne çıkmamalıdır. Genellikle düşük ölüm oranı ve iyi bir kök ve sürgün gelişimi için 20-24°C yeterli olacaktır.

Yetiştirme Ortamı

Ex vitro adaptasyon döneminde kademeli olarak değiştirilen nem, ışık ve sıcaklık gibi çevresel koşulların yanında kullanılan yetiştirme ortamları da bitkilerin hayatta kalma oranlarını ve dayanıklılığını etkilemektedir (Pospóšilová vd., 1999; Özdemir, 2021). Yetiştirme ortamı olarak kullanılan substratın yapısı ve temizliği *in vitro* bitkilerin dış ortama alıştırılmasında etkili olabilmektedir. Yetiştirme ortamlarının; bitki patojenlerinden arınmış olması, yeterli gaz değişimi sağlaması, yeterli su tutma kapasitesine sahip olması gerekir (Pospóšilová vd., 2019; Özdemir, 2021). *İn vitro* bitkilerin dış koşullara adaptasyonunda hayatta kalma oranını desteklemek için kullanılabilecek organik veya inorganik pek çok malzeme bulunmaktadır. Yaygın ve kitlesel kullanımda tarımsal artık ve atıklar gibi biyolojik kaynaklar büyük bir potansiyel sunmaktadır (Gruda, 2019; Özdemir, 2021). Cocopeat, odunlülüzik kompost ve odun endüstrisi atıkları kullanılabilecek bazı organik malzemelerdir (Chandra vd., 2010; Özdemir, 2021). Ayrıca leonardit, biochar, kil granülleri ve vermikülit gibi büyümeyi uyarıcı hümit maddeler içeren malzemeler turba ve diğer kombinasyonlarla karıştırılarak kullanılmaktadır (Gruda, 2019; Özdemir, 2021). Bu malzemelerin yetiştirme ortamı olarak kullanım amacı, *in vitro* ortamdan *ex vitro* koşullara transfer sonrasında aşırı su kaybını önlemek için kök oluşumu ve koruyucu kütiküler doku oluşumunu hızlandırarak *in vitro* bitkilerin ölüm oranını azaltmaktır (Hartmann vd., 2002; Chandra vd., 2010; Özdemir, 2021). Köklerin su alımının az olması ve stoma

aktivitesinin yetersizliği nedeniyle su kaybının yüksek olması ölüm oranını yükseltmektedir.

3. *EX VITRO* ORTAMA TRANSFER

3.1. Bitkilerin *in vitro* ortamdan çıkarılması ve temizlik

In vitro ortamda çoğaltılan ve köklendirilen bitkiler (bazı türler *ex vitro* ortamda köklenebildikleri için köksüz olarak transfer edilebilir) öncelikle cam içerisinden çıkarılır. Katı besin ortamı kaba temizlik yapılarak uzaklaştırılır. Bu aşamadan sonra bitkiler durgun su içerisinde ve sonrasında akan su altında hassas bir şekilde yıkanarak üzerlerinde kalan tüm katı besin ortamından arındırılmalıdır. Temizlik işlemi tamamlanınca suların iyice süzülmesi için bir süre bekletilir. Daha sonra özellikle mantari hastalıkların etkilerinden korumak amacıyla bir fungusit uygulaması yapmak faydalı olacaktır (Çağdaş vd., 2025; Eskimez and Polat, 2025).

In vitro ortamdan çıkartma ve temizlik aşaması tamamlanan bitkiler kapaklı kutular içerisine alınarak yetiştirme ortamına dikilene kadar geçecek süreçte +4-5 °C’de bekletilebilir. Bekleme süresi mümkün olduğu kadar kısa tutulmalıdır. Aksi halde hayatta kalma oranları düşecektir.



Şekil 2. *In vitro* ortamdan çıkartılan bitkilerde temizlik

3.2. Bitkilerin yetiştirme ortamına dikilmesi

In vitro ortamdan gelen bitkiler oransal nemi düşük olmayan çalışma mekanlarında açıkta bekletilmeden yetiştirme ortamlarına dikilirler. Bitki dikilecek ortamlar önceden hazırlanmalı ve yeterince nemli olmalıdır. Yetiştirme ortamı olarak genellikle perlit, torf, cocopeat, kompost, pomza, vermikulit, kum karışımları ve kaya yünü gibi malzemeler kullanılmaktadır. Ticari işletmelerde genellikle perlit torf karışımı ile üretilen küçük “pod” lar kullanılmaktadır (Eskimez and Polat, 2023). Bu yöntem adaptasyon süreci sonunda sera, açık arazi yada saksılara transferde kolaylık sağlamaktadır. Bazı durumlarda ise *in vitro*dan gelen bitkiler doğrudan kasalar içerisine dikim yapılabilmektedir. Yetiştirme ortamı hazırlanırken ortam içerisine çok düşük dozda yavaş salınımlı gübreler ilave edilebilmektedir.

Dikimden önce köklü bitkilerde kök uzunluğu fazla ise kısaltılmalı, dikim sırasında bitki köklerinin yukarı dönmemesine dikkat edilmelidir. Bitki yerleştirildikten sonra alt kısmında boşluk kalmaması için hafifçe bastırılmalıdır. Dikimi tamamlanan bitkiler bekletilmeden yoğun bakım ünitelerine alınmalıdır.

3.3. *Ex vitro* ortama adaptasyon için yoğun bakım üniteleri

Yetiştirme ortamına dikilen bitkiler kademeli olarak *ex vitro* ortam koşullarına nem, ışık ve sıcaklık kontrolüne imkan veren tam otomasyonlu yoğun bakım ünitelerinde alıştırılmalıdır. Yüksek hayatta kalma oranı, kullanılan otomasyon ile yakından ilişkilidir (Ziv, 1995). Bu ünitelerde bir kontrol paneline bağlı ve sensörler yardımıyla alınan verilere göre çalışan nemlendirme sistemi, ısıtma-soğutma ve gölgeleme sistemi bulunmalıdır. Ünite, bitkilere kontrollü ışık, bağıl nem, hava sıcaklığı ve hava akışı sağlar (Ziv, 1995). Ticari işletmelerde nem kontrolü için genellikle ULV cihazı kullanılırken ısıtıcı veya klimalar yardımıyla ortam sıcaklığı istenilen ısıda tutulmaktadır. Yoğun bakım üniteleri genellikle sera içerisinde veya gün ışığına açık alanlarda bulunduğundan çoğu zaman yapay ışıkla aydınlatma

yapılmamaktadır. Işık kontrolü için başlangıçta yüksek ışık yoğunluğundan zarar görecektir. Yapıdaki hassas bitkilere manuel veya otomasyona bağlı gölgeleme yapılmakta, ilerleyen süreçte kademeli olarak gölgelemeye son verilmektedir.

Yoğun bakım ünitelerinde “pod” ların bulunduğu viyoller veya kasaları yerleştirmek için raf sistemi yapılmalıdır. Raf aralıklarının ışığı tamamen kesecek veya hava sirkülasyonuna engel olacak darlıkta olmamasına dikkat edilmelidir.



Şekil 3. Yoğun bakım ünitesi

3.4. Dış ortama çıkartma

Ex vitro ortamların nem, ışık ve sıcaklık koşullarına kademeli olarak alıştıran bitkiler yoğun bakım ünitelerinden çıkarılarak gün ışığına maruz kalacakları, ihtiyaç yoksa yapay ısıtma-soğutma yapılmayan, düzenli sulamaların yapılabildiği kapalı alanlara yerleştirilir. Bu amaçla genellikle seralar kullanılmaktadır. Burada dikkat edilmesi gereken nokta; üretim planlaması yaparken seraya çıkartma aşamasının sıcak yaz aylarına denk

getirilmemesidir. Aksi halde yüksek sıcaklıklar nedeniyle dış ortama yeni alışmış bitkiler zarar görebilir. Seraya çıkartma aşamasında “pod” lara dikili bitkiler saksı yada tüplere aktarılabilir. Ancak çoğu zaman bu aşamada nakliye maliyetleri ve yer tasarrufu açısından saksılara aktarılmamakta, ticari işletmelerde satış boyutuna gelene kadar gelişmesi beklenmektedir. *In vitro* çoğaltılan bu bitkiler genellikle fidancılar tarafından talep edilmektedir. Boyut olarak 15-20 cm uzunluk istenmektedir (soğanlı bitkiler için yaklaşık 1 cm çap). Türleri göre yapraklı veya yapraksız olarak satışa konu olabildiğinden üretim planlamasında bu husus dikkate alınmalıdır.



Şekil 1. Seraya aktarılan bitkiler

KAYNAKÇA

- Asayesh, Z. M., Vahdati, K., Aliniaefard, S., & Askari, N. (2017). Enhancement of *ex vitro* acclimation of walnut plantlets through modification of stomatal characteristics *in vitro*. *Scientia Horticulturae*, 220, 114-121.
- Blanchard, M. G., & Runkle, E. S. (2007). Dipping bedding plant liners in paclobutrazol or uniconazole inhibits subsequent stem extension. *HortTechnology*, 17(2), 178-182.
- Cavins, T. J., Whipker, B. E., & McCall, I. (2002). Response of Sun Coleus (*Solenostemon scutellarioides*) 'Burgundy Sun' and 'Solar Storm' to paclobutrazol and uniconazole foliar sprays.
- Chandra, S., Bandopadhyay, R., Kumar, V., & Chandra, R. (2010). Acclimatization of tissue cultured plantlets: from laboratory to land. *Biotechnology letters*, 32(9), 1199-1205.
- Cha-um, S., Mosaleeyanon, K., Kirdmanee, C., & Supaibulwatana, K. (2003). A more efficient transplanting system for Thai neem (*Azadirachta siamensis* Val.) by reducing relative humidity. *Sci Asia*, 29, 189-196.
- Cha-um, S., Ulziibat, B., & Kirdmanee, C. (2010). Effects of temperature and relative humidity during *in vitro* acclimatization, on physiological changes and growth characters of *Phalaenopsis* adapted to *in vivo*. *Australian journal of crop science*, 4(9), 750-756.
- Cha-um, S., Puthea, O., & Kirdmanee, C. (2009). An effective *in vitro* acclimatization using uniconazole treatments and *ex vitro* adaptation of *Phalaenopsis* orchid. *Scientia Horticulturae*, 121(4), 468-473.
- Chen, C. (2004). Humidity in plant tissue culture vessels. *Biosystems Engineering*, 88(2), 231-241.
- Crane, J., & Hughes, H. (1990). Medium overlays for improved hardening of micropropagated potatoes. *HortScience*, 25(7), 794-795.

- Cui, Y. Y., Hahn, E. J., Kozai, T., & Paek, K. Y. (2000). Number of air exchanges, sucrose concentration, photosynthetic photon flux, and differences in photoperiod and dark period temperatures affect growth of *Rehmannia glutinosa* plantlets in vitro. *Plant Cell, Tissue and Organ Culture*, 62(3), 219-226.
- Çağdaş, E. A., Polat, M., Sarıtoprak, O., Aktaş, H., & Eskimez, İ. (2025). Cennet Bambusu (*Nandina domestica* Thunb.) 'Seika' Çeşidinin *in vitro* Çoğaltımı ve Köklendirilmesi. *Bahçe*, 54(Özel Sayı 1), 71-75.
- da Silva, J. A. T., Hossain, M. M., Sharma, M., Dobránszki, J., Cardoso, J. C., & Zeng, S. (2017). Acclimatization of *in vitro*-derived *Dendrobium*. *Horticultural Plant Journal*, 3(3), 110-124.
- Eskimez, İ., & Polat, M. (2023). Aronya (*Aronia melanocarpa* (Michx.) Elliott)'nın mikroçoğaltımında bitki büyüme düzenleyicilerinin etkileri. *Meyve Bilimi*, 10(Özel Sayı), 92-99.
- Eskimez, İ., & Polat, M. (2025). Zambak (*Lilium* spp.) Soğan Pullarının, *in vitro* Koşullarda Köklendirilmesi Üzerine, Farklı Besin Ortamlarının Etkilerinin Belirlenmesi. *Bahçe*, 54(Özel Sayı 1), 231-237.
- Fellner, M., Zhang, R., Pharis, R. P., & Sawhney, V. K. (2001). Reduced de-etiolation of hypocotyl growth in a tomato mutant is associated with hypersensitivity to, and high endogenous levels of, abscisic acid. *Journal of Experimental Botany*, 52(357), 725-738.
- Fuchigami, L. H., Cheng, T. Y., & Soeldner, A. (1981). Abaxial Transpiration and Water Loss in Aseptically Cultured Plum1. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 106(4), 519-522.
- Gaspar, T., Kevers, C., Debergh, P., Maene, L., Paques, M., & Boxus, P. H. (1987). Vitrification: morphological, physiological, and ecological aspects. In *Cell and tissue culture in forestry: general principles and biotechnology* (pp. 152-166). Dordrecht: Springer Netherlands.

- Ghashghaie vd., (1992) Ghashghaie, J., Brenckmann, F., Saugier, B., 1992. Water relations and growth of rose plants cultured *in vitro* under various relative humidities. *Plant Cell Tissue Org.* 30, 51–57.
- Grout, B. W. W., & Aston, M. J. (1977). Transplanting of cauliflower plants regenerated from meristem culture. I. Water loss and water transfer related to changes in leaf wax and to xylem regeneration.
- Gruda, N. S. (2019). Increasing sustainability of growing media constituents and stand-alone substrates in soilless culture systems. *Agronomy*,(6), 298.
- Hartmann, H. T., Kester, D. E., Davies, F. T., & Geneve, R. L. (2002). Hartmann & Kester's plant propagation: principles and practice.(*No Title*).
- Hays, D. B., Yeung, E. C., & Pharis, R. P. (2002). The role of gibberellins in embryo axis development. *Journal of Experimental Botany*, 53(375), 1747-1751.
- Hazarika, B. N., & Parthasarathy, V. A. (2002). Effects of reduced humidity and antitranspirants in acclimatizing micropropagated Citrus plantlets. *Journal of Applied Horticulture*, 4(1), 30-32.
- Hazarika (2003). Hazarika, B.N., (2003). Acclimatization of tissue-cultured plants. *Curr. Sci.* 85, 1704–1712.
- Hazarika, B. N. (2006). Morpho-physiological disorders in *in vitro* culture of plants. *Scientia horticulturae*, 108(2), 105-120.
- Hwang, S.J., Lee,M.Y., Park, Y.H., Sivanesan, I., Jeong, B.R., (2008). Suppression of stem growth in pot kalanchoe ‘Gold Strike’ by recycled subirrigational supply of plant growth retardants. *Afr. J. Biotechnol.* 7, 1487–1493.
- Inada, S., Shimmen, T., (2000). Regulation of elongation growth by gibberellin in root segments of *Lemna minor*. *Plant Cell Physiol.* 41, 932–939.

- Izumi, K., Yamaguchi, I., Wada, A., Oshio, H., Takahashi, N., (1984). Effects of a new plant growth retardant (E)-1-(4-Chlorophenyl)-4,4-dimethyl-2-(1,2,4-triazol-1-yl)-1-penten-3-ol (S-3307) on the growth and gibberellin content of rice. *Plant Cell Physiol.* 25, 611–617.
- Kevers, C., Prat, R., & Gaspar, T. H. (1987). Vitrification of carnation *in vitro*: changes in cell wall mechanical properties, cellulose and lignin content. *Plant Growth Regulation*, 5(1), 59-66.
- Kozai, T., Iwabuchi, K., Watanabe, K., & Watanabe, I. (1991). Photoautotrophic and photomixotrophic growth of strawberry plantlets *in vitro* and changes in nutrient composition of the medium. *Plant Cell, Tissue and Organ Culture*, 25(2), 107-115.
- Kozai, T., Kubota, C., & Ryoung Jeong, B. (1997). Environmental control for the large-scale production of plants through *in vitro* techniques. *Plant Cell, Tissue and Organ Culture*, 51(1), 49-56.
- Kozak, D. (2006). The effect of growth retardants applied *in vitro* on the acclimatization and growth of *Tibouchina urvilleana* cogn. *in vivo*. *Acta Scientiarum Polonorum. Hortorum Cultus*, 5(1), 65-70.
- Li, W., Liu, X., Khan, M. A., Kamiya, Y., & Yamaguchi, S. (2005). Hormonal and environmental regulation of seed germination in flaxweed (*Descurainia sophia*). *Plant growth regulation*, 45(3), 199-207.
- Murali, T. P., & Duncan, E. J. (1995). The effects of *in vitro* hardening using triazoles on growth and acclimatization of banana. *Scientia horticulturae*, 64(4), 243-251.
- Nguyen, Q. T., Kozai, T., & Van Nguyen, U. (1999). Effects of sucrose concentration, supporting material and number of air exchanges of the vessel on the growth of *in vitro* coffee plantlets. *Plant Cell, Tissue and Organ Culture*, 58(1), 51-57.
- Nishijima, T., Koshioka, M., & Yamaji, H. (1992). Nondwarf rice seedling bioassay for gibberellins. *Plant physiology*, 98(3), 962-965.

- Nishijima, T., Katsura, N., Koshioka, M., Yamazaki, H., & Mander, L. N. (1997). Effects of uniconazole and GA3 on cold-induced stem elongation and flowering of *Raphanus sativus* L. *Plant growth regulation*, 21(3), 207-214.
- Noguchi, K., Kuramochi, H., Takeuchi, Y., Konnai, M., & Yoneyama, K. (1999). Restoration of gibberellin biosynthesis by 2, 6-diisopropylphenoxyacetic acid in uniconazole-treated rice plants. *Plant growth regulation*, 28(1), 67-72.
- Nogués, S., Allen, D. J., Morison, J. I., & Baker, N. R. (1998). Ultraviolet-B radiation effects on water relations, leaf development, and photosynthesis in droughted pea plants. *Plant physiology*, 117(1), 173-181.
- Oda, M. (1994). Effects of uniconazole and gibberellic acid application on elongation of hypocotyl and internodes in figleaf gourd [*Cucurbita ficifolia*] for rootstock. *JARQ (Japan)*, 28(3).
- Ogawa, S., Toyomasu, T., Yamane, H., Murofushi, N., Ikeda, R., Morimoto, Y., ... & Omori, T. (1996). A step in the biosynthesis of gibberellins that is controlled by the mutation in the semi-dwarf rice cultivar Tanginbozu. *Plant and cell physiology*, 37(3), 363-368.
- Özdemir, M. (2021). *Fındık zürufu ve GYTJA'dan in-vitro çoğaltılmış bitkiler için alıştırma toprağı geliştirilmesi* (Master's thesis, Sakarya Üniversitesi).
- Pasian, C. C. (1999). Response of *Dendranthema grandiflora* (Ramat) to three plant growth regulators in container paint mix applications. *Scientia horticulturae*, 80(3-4), 277-287.
- Petropoulos, S., Fernandes, Â., Stojković, D., Pereira, C., Taofiq, O., Di Gioia, F., & Ferreira, I. C. (2019). Cotton and cardoon byproducts as potential growing media components for *Cichorium spinosum* L. commercial cultivation. *Journal of Cleaner Production*, 240, 118254.

- Polat, M., & Eskimez, I. (2022). The effects of different hormone combinations on *in vitro* micropropagation of aronia (*Aronia melanocarpa* (Michx.) Elliott). *Fresenius Environmental Bulletin*, 31(01A), 1219-1227.
- Pospóšilová, J., Tichá, I., Kadleček, P., Haisel, D., & Plzáková, Š. (1999). Acclimatization of micropropagated plants to *ex vitro* conditions. *Biologia plantarum*, 42(4), 481-497.
- Preece, J., Sutter, E., (1991). Acclimatization of micropropagated plants to the greenhouse and field. In: *Micropropagation*. Kluwer, Dordrecht.
- Ritchie, G. A., Short, K. C., & Davey, M. R. (1991). In vitro acclimatization of chrysanthemum and sugar beet plantlets by treatment with paclobutrazol and exposure to reduced humidity. *Journal of experimental botany*, 42(12), 1557-1563.
- Sallanon, H., & Maziere, Y. (1992). Influence of growth room and vessel humidity on the *in vitro* development of rose plants. *Plant cell, tissue and organ culture*, 30(2), 121-125.
- Sankhla, D., Davis, T. D., Sankhla, N., & Upadhyaya, A. (1994). In vitro production of flowering shoots in 'German Red' carnation: effect of uniconazole and gibberellic acid. *Plant cell reports*, 13(9), 514-518.
- Shim, S. W., Hahn, E. J., & Paek, K. Y. (2003). In vitro and ex vitro growth of grapevine rootstock 5BB's influenced by number of air exchanges and the presence or absence of sucrose in culture media. *Plant Cell, Tissue and Organ Culture*, 75(1), 57-62.
- Short, K., Warburton, J., Roberts, A., (1985). *In vitro* hardening of cultured cauliflower and chrysanthemum plantlets to humidity. *Acta Hort.* 212 (50), 329-340.
- Smith, E.F., Roberts, A.V., Mottley, J., (1990). The preparation *in vitro* of chrysanthemum for transplantation to soil. 2. Improved resistance to desiccation conferred by paclobutrazol. *Plant Cell Tissue Org. Cult.* 21, 133-140.

- Smith, E.F., Roberts, A.V., Mottley, J., Denness, S., (1991). The preparation *in vitro* of chrysanthemum for transplantation to soil. 4. The effect of eleven growth retardants on wilting. *Plant Cell Tissue Org. Cult.* 27, 309–313.
- Sutter, E. G., Shackel, K., & Diaz, J. C. (1992). Acclimatization of tissue cultured plants. In *II International Symposium on Propagation of Ornamental Plants 314* (pp. 115-120).
- Talbott, L.D., Rahveh, E., Zeiger, E., (2003). Relative humidity is a key factor in the acclimation of the stomatal response to CO₂. *J. Exp. Bot.* 54, 2141–2147.
- Tanaka, K., Fujiwara, K., Kozai, T., (1992). Effects of relative humidity in the culture vessel on the transpiration and net photosynthetic rates of potato plantlets *in vitro*. *Acta Hortic.* 319 (3), 59–64.
- Thakur, R., Sood, A., Nagar, P.K., Pandey, S., Sobti, R.C., Ahuja, P.S., (2006). Regulation of growth of *Lilium plantlets* in liquid medium by application of paclobutrazol or ancymidol, for its amenability in a bioreactor system: growth parameters. *Plant Cell Rep.* 25, 382–391.
- van Meeteren ve Aliniaiefard, 2016 van Meeteren, U., Aliniaiefard, S., (2016). Stomata and postharvest physiology. In: *Postharvest Ripening Physiology of Crops.*, pp. 157–216.
- Wardle, K., Dobbs, E., Short, K., (1983). *In vitro* acclimatization of aseptically cultured plantlets to humidity. *J. Am. Soc. Hortic. Sci.* 108, 386–389.
- Zhao, G., Wang, J., (2008). Effect of gibberellin and uniconazole on mesocotyl elongation of dark-grown maize under different seedling depths. *Plant Prod. Sci.* 11, 423–429.
- Ziv, M. (1991). Vitrication: morphological and physiological disorders of *in vitro* plants. In *Micropropagation: technology and application* (pp. 45-69). Dordrecht: Springer Netherlands.

Ziv, M. (1995). In vitro acclimatization. In *Automation and environmental control in plant tissue culture* (pp. 493-516). Dordrecht: Springer Netherlands.

BÖLÜM 4

BAŞARILI BİR HERBİSİT UYGULAMASI İÇİN STRATEJİK KILAVUZ

Doç Dr. Fırat PALA⁶

Prof. Dr. Hüsrev MENNAN⁷

DOI: <https://www.doi.org/10.5281/zenodo.18109301>

⁶ Siirt Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Bitki Koruma Bölümü, Siirt, Türkiye.
(Sorumlu Yazar: firatpala@siirt.edu.tr, ORCID: 0000-0002-4394-8841)

⁷ Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Bitki Koruma Bölümü, Samsun, Türkiye. (hmennan@omu.edu.tr, ORCID: 0000-0002-1410-8114)

1. GİRİŞ

Modern tarım, dünya nüfusunun gıda ihtiyacını karşılamak için sürekli artan bir verimlilik baskısı altındadır. Tarımsal üretimi tehdit eden biyotik faktörler arasında, yabancı otlar rekabet güçleri ve yaygınlıkları nedeniyle en büyük paya sahiptir. Yabancı otlar, kültür bitkileriyle su, besin maddeleri, ışık ve yer için rekabete girerek önemli verim kayıplarına yol açar. Kontrol edilmedikleri takdirde, bu kayıpların küresel ortalamada %30'ları aşabileceği, hatta bazı durumlarda tarlanın tamamen elden çıkmasına neden olabileceği bilimsel olarak kanıtlanmıştır (Oerke, 2006). Yabancı otlarla mücadelede, 20. yüzyılın ortalarından itibaren herbisitler en etkili, ekonomik ve pratik çözüm olarak öne çıkmıştır.

Ancak bir herbisit, ne kadar etkili bir kimyasal yapıya sahip olursa olsun, başarısı nihayetinde tarladaki uygulamasına bağlıdır. **Bir herbisit, yalnızca doğru uygulandığı zaman iyi bir herbisittir.** Bu basit ama kritik ilke, modern yabancı ot yönetiminin temelini oluşturur. Yanlış uygulama, sadece herbisit etkinliğinin azalmasına veya tamamen kaybolmasına neden olmakla kalmaz, aynı zamanda bir dizi ciddi olumsuz sonucu da beraberinde getirir. Düşük dozda yapılan bir uygulama, yabancı otları kontrol edemeyerek ürün kaybına ve boşa harcanan kimyasal maliyetine yol açarken, aynı zamanda yabancı ot popülasyonu üzerinde subletal (öldürücü olmayan) bir baskı oluşturarak herbisit direncinin gelişimini hızlandırabilir (Shaner, 2014). Aşırı dozda yapılan bir uygulama ise, kültür bitkisinde fitotoksisiteye (zehirlenme) ve verim kaybına, toprakta daha uzun süre kalıcılığa (carryover) ve gereksiz maliyet artışına neden olur.

Uygulama hatalarının en tehlikeli sonuçlarından biri de **herbisit sürüklenmesidir (spray drift)**. Püskürtme sırasında oluşan küçük damlacıkların rüzgarla hedef dışı alanlara taşınması olarak tanımlanan sürüklenme, komşu tarlalardaki hassas ürünlere (örneğin, bağ, domates, pamuk), doğal yaşam alanlarına, su kaynaklarına ve hatta yerleşim yerlerine

zarar verebilir. Bu durum, hem ciddi ekonomik kayıplara hem de yasal sorunlara yol açabilen, son derece önemli bir çevresel ve sosyal risktir (Hofman & Solseng, 2004).

Bu nedenlerle, herbisit uygulamasının tüm yönleriyle doğru bir şekilde anlaşılması ve yönetilmesi, sürdürülebilir tarım için bir zorunluluktur. Bu süreç, sadece pülverizatörün düğmesine basmaktan çok daha fazlasını ifade eder; doğru herbisiti seçmek, doğru zamanda uygulamak, pülverizatörü doğru şekilde kalibre etmek, doğru memeyi seçmek, su kalitesini optimize etmek, doğru adjuvanları kullanmak ve uygulama anındaki çevresel koşulları doğru değerlendirmek gibi bir dizi birbiriyle bağlantılı kararı içerir. Bu zincirdeki herhangi bir halkanın zayıf olması, tüm uygulamanın başarısızlıkla sonuçlanmasına neden olabilir. Bu derlemenin amacı, herbisit uygulamasının bu temel prensiplerini bilimsel bir çerçevede ele almak, her bir adımın önemini vurgulamak ve başarılı bir uygulama için gereken pratik bilgileri sunmaktır. Ayrıca, bu geleneksel prensiplerin modern hassas tarım teknolojileri ile nasıl birleşerek daha etkin, ekonomik ve çevre dostu bir yabancı ot yönetimine olanak tanıdığı da incelenecektir.

2. HERBİSİT UYGULAMA TEKNOLOJİSİ VE PRENSİPLERİ

Başarılı bir herbisit uygulaması, bir dizi kritik parametrenin dikkatli bir şekilde yönetilmesini gerektiren bir optimizasyon sürecidir. Bu süreç, genellikle "Doğru Uygulamanın 5 Kuralı" olarak özetlenebilir: **Doğru Herbisit, Doğru Doz, Doğru Zaman, Doğru Yer (Kapsama) ve Doğru Yöntem**. Bu bölümde, bu kuralların arkasındaki bilimsel ve teknik detaylar incelenecektir.

2.1. Doğru Doz ve Kalibrasyon: Başarının Matematiksel Temeli

Bir herbisit uygulamasında belki de en temel ve en sık hata yapılan adım kalibrasyondur. **Kalibrasyon, belirli bir hızda ilerleyen bir pülverizatörün, belirli bir alana (örneğin, bir hektar veya bir dekar) tam olarak ne kadar**

su (ilaçlı mahlül) püskürttüğünü belirleme işlemidir. Bu değer bilinmeden, dekara uygulanması gereken herbisit dozunu doğru bir şekilde ayarlamak imkansızdır.

- **Neden Kritik?**

- **Düşük Doz (Under-dosing):** Yabancı otların yetersiz kontrol edilmesine, ürünün verim potansiyeline ulaşamamasına ve en önemlisi, subletal dozlara maruz kalan yabancı otlarda **herbisit direncinin gelişimini hızlandırmaya** yol açar.
- **Yüksek Doz (Over-dosing):** Kültür bitkisinde fitotoksisteye ve verim kaybına, toprakta kalıcılık (carryover) riskinin artmasına, gereksiz kimyasal maliyetine ve çevre kirliliğine neden olur.

- **Kalibrasyon Adımları:** Kalibrasyon için birçok yöntem bulunmakla birlikte, temel mantık aynıdır. Basit bir tarla pülverizatörü kalibrasyonu genellikle şu adımları içerir:

1. **Ekipman Kontrolü:** Pülverizatörün temiz olduğundan, hortumlarda sızıntı olmadığından ve tüm memelerin aynı tipte ve temiz olduğundan emin olunur.

2. **Hız Belirleme:** Pülverizatör, ilaçlama yapılacak tarla koşullarında, kullanılacak vites ve gaz ayarında çalıştırılarak sabit bir ilerleme hızı belirlenir (km/sa).

3. **Meme Debisi Ölçümü:** Pülverizatör sabit bir basınçta (genellikle 2-3 bar) çalıştırılırken, her bir memeden bir dakika boyunca akan su miktarı dereceli bir kap ile ölçülür. Tüm memelerin debileri toplanarak pülverizatörün toplam debisi (L/dak) bulunur.

4. **Hesaplama:** Aşağıdaki formül kullanılarak dekara ne kadar su atıldığı hesaplanır: **Dekara Atılan Su (L/da) = [Toplam Debi (L/dak) x 600] / [Çalışma Genişliği (m) x İlerleme Hızı (km/sa)]**

Bu hesaplamadan sonra, örneğin dekara 20 litre su atıldığı bulunmuşsa ve herbisit dozu dekara 100 ml ise, 1000 litrelik bir tank için ne kadar ilaç konulacağı kolayca hesaplanabilir. Bu alanda, uygulama teknolojileri üzerine çalışan **Robert E. Wolf** gibi araştırmacıların geliştirdiği pratik metotlar ve yayım materyalleri, dünya genelinde çiftçilere rehberlik etmektedir.

Tablo 1. Tarla pülverizatörü kalibrasyonunun basit adımları

Adım	İşlem	Amaç	Dikkat Edilmesi Gerekenler
1	Kontrol ve Hazırlık	Pülverizatörün çalışır durumda olduğundan emin olmak.	Tüm memeler aynı tip ve boyutta olmalı. Tıkalı veya aşınmış memeler değiştirilmeli.
2	Hız Tespiti	Gerçek tarla koşullarındaki çalışma hızını belirlemek.	Hız, boş ve düz bir yolda değil, ilaçlama yapılacak tarlanın eğim ve toprak yapısında ölçülmelidir.
3	Basınç Ayarı	İstenen damla boyutunu ve debiyi sağlayacak basıncı ayarlamak.	Basınç artarsa debi artar, damla boyutu küçülür ve sürüklenme riski artar.
4	Meme Debisi Ölçümü	Pülverizatörün bir dakikada ne kadar sıvı püskürttüğünü bulmak.	Her memeden ayrı ayrı ölçüm yapıp ortalaması alınabilir veya hepsi toplanabilir.
5	Hesaplama	Formülü kullanarak birim alana atılan su miktarını bulmak.	Hesaplama sonucuna göre tanka konulacak su ve ilaç miktarını doğru oranlamak.

Kaynak: Yazar tarafından çeşitli üniversitelerin (Purdue, Nebraska-Lincoln) yayım kılavuzları temel alınarak oluşturulmuştur.

2.2. Doğru Ekipman ve Meme Seçimi: Damlanın Kaderini Belirlemek

Herbisitin hedefe ulaşmasını sağlayan en kritik parça **memedir (nozzle)**. Meme, püskürtme sıvısını belirli bir modelde ve belirli boyutlarda damlacıklara

ayırır. Damla boyutu, herbisit etkinliği ve sürüklenme riski arasındaki dengeyi belirler.

- **Damla Boyutu Spektrumu:** Damla boyutu mikron (μm) ile ölçülür. Uluslararası standartlara (ASABE S572.1) göre damlalar şu şekilde sınıflandırılır: Çok İnce (VF), İnce (F), Orta (M), Kaba (C), Çok Kaba (VC), Ekstra Kaba (XC).
 - **İnce Damlalar ($< 200 \mu\text{m}$):** Yaprak yüzeyinde çok iyi bir kaplama sağlarlar. **Temas etkili** herbisitler (örneğin, Bentazon) için idealdirler. Ancak, çok hafiftirler ve en ufak bir rüzgarda bile **sürüklenme (drift) riskleri çok yüksektir.**
 - **Kaba Damlalar ($> 400 \mu\text{m}$):** Daha ağır oldukları için rüzgardan daha az etkilenirler ve **sürüklenme riskleri düşüktür. Sistemik herbisitler** (örneğin, Glyphosate, 2,4-D) için uygundur. Ancak, yaprak yüzeyinde daha az damla oluşturdıkları için kaplama oranları daha düşüktür.
- **Meme Tipleri:**
 - **Standart Düz Yelpaze (Flat-Fan):** En yaygın kullanılan meme tipidir. Genellikle orta boyutlu damlalar üretir. Çıkış sonrası uygulamalar için uygundur.
 - **Düşük Sürüklenmeli (Low-Drift) Memeler:** Daha kaba damlalar üreterek sürüklenme riskini azaltırlar.
 - **Hava Enjeksiyonlu (Air-Induction - AI):** En modern ve sürüklenme yönetimi için en etkili meme tiplerinden biridir. Memenin içine hava çekerek, içi hava dolu, patladığında dağılan kaba damlalar üretir. Bu, hem sürüklenmeyi azaltır hem de kaplamayı bir miktar iyileştirir. Hormonlu herbisitler gibi sürüklenmeye hassas uygulamalar için şiddetle tavsiye edilir.

Tablo 2. Yaygın meme tiplerinin karşılaştırılması ve kullanım alanları

Meme Tipi	Ürettiği Tipik Damla Boyutu	Avantajları	Dezavantajları	Önerilen Kullanım Alanı
Standart Düz Yelpeze (XR, FF)	İnce - Orta	İyi kaplama, düşük maliyet.	Orta düzeyde sürüklenme riski.	Genel amaçlı çıkış sonrası uygulamalar, temas etkili herbisitler (düşük rüzgarda).
Geniş Açılı Düz Yelpeze (Turbo TeeJet - TT)	Orta - Kaba	Daha geniş bir basınç aralığında çalışabilir, daha uniform dağılım.	Standart memeye göre kaplaması biraz daha düşük olabilir.	Sistemik herbisitler, genel amaçlı uygulamalar.
Hava Enjeksiyonlu (AI, AI XR)	Kaba - Çok Kaba	Mükemmel sürüklenme kontrolü.	Kaplama etkinliği temas herbisitleri için yetersiz olabilir, daha pahalıdır.	Sistemik herbisitler (Glyphosate, 2,4-D), rüzgarlı koşullar, hassas alanların yakınları.

Kaynak: Yazar tarafından TeeJet® Technologies ve Hypro® gibi üretici katalogları ve teknik bültenleri temel alınarak oluşturulmuştur.

2.3. Uygulama Zamanlaması ve Çevresel Faktörlerin Yönetimi

Doğru dozda ve doğru memeyle hazırlanan bir karışım bile, yanlış zamanda veya yanlış hava koşullarında uygulanırsa başarısız olabilir.

• Uygulama Zamanı:

- **Kritik Yabancı Ot Mücadele Periyodu:** Bu, yabancı otların kültür bitkisiyle rekabet ederek verim kaybına neden olmaya başladığı ve bu rekabetin verimi artık etkilemediği dönem arasındaki zaman aralığıdır. Çıkış sonrası uygulamalar, mutlaka bu kritik periyot içinde yapılmalıdır. Çok erken yapılan uygulama, sonradan çıkacak otları kaçıır; çok geç

yapılan uygulama ise verim kaybı zaten yaşandığı için etkisiz kalır.

- **Yabancı Otun Gelişim Dönemi:** Genç, aktif olarak büyüyen yabancı otlar, yaşlı ve strese girmiş otlara göre herbisitleri çok daha iyi emer ve kontrol edilmeleri daha kolaydır.

- **Çevresel Faktörler:**

- **Rüzgar:** Sürüklenmenin bir numaralı nedenidir. Genel kural olarak, rüzgar hızı **15 km/saati aştığında** uygulama yapılmamalıdır.
- **Sıcaklık ve Nem:** Yüksek sıcaklık ($>30^{\circ}\text{C}$) ve düşük nispi nem ($<\%40$), damlacıkların hedefe ulaşmadan buharlaşmasına ve herbisit etkinliğinin azalmasına neden olur. Ayrıca bitkiler sıcak stresi altındayken herbisit alımları da azalır.
- **Sıcaklık İnversiyonu:** Bu, en tehlikeli sürüklenme koşuludur. Genellikle gün batımına yakın, rüzgarsız ve açık akşamlarda, soğuk havanın yere çökmesi ve sıcak havanın bir kapak gibi üstte çıkmasıyla oluşur. Bu durumda, çok ince damlacıklar havada saatlerce asılı kalabilir ve hafif bir esintiyle kilometrelerce uzağa taşınabilir. **Sıcaklık inversiyonu koşullarında kesinlikle uygulama yapılmamalıdır.**
- **Yağmur:** Uygulamadan sonra, herbisit bitki tarafından emilmesi için belirli bir süreye ihtiyaç vardır (rainfastness). Bu süre, herbisit etiketinde belirtilir (genellikle 1 ila 6 saat arası). Bu süre dolmadan yağın yağmur, herbisiti yaprak yüzeyinden yıkayarak etkinliği azaltır.

2.4. Su Kalitesi ve Adjuvanlar: Karışımın Performansını Optimize Etmek

Püskürtme tankının %99'undan fazlasını oluşturan su, genellikle en az önemsenen ama en kritik bileşenlerden biridir.

- **Su Kalitesi:**

- **pH:** Suyun asitlik veya alkalilik derecesi. Yüksek pH'lı (alkali) sular, bazı herbisitlerin (örneğin, sülfonilüreler) kimyasal yapısını bozarak (alkali hidroliz) etkinliklerini düşürebilir.
- **Sertlik:** Suda çözünmüş Kalsiyum (Ca^{2+}), Magnezyum (Mg^{2+}) ve Demir (Fe^{3+}) gibi pozitif yüklü iyonlar, özellikle **Glyphosate, 2,4-D ve Clethodim** gibi negatif yüklü herbisit moleküllerine bağlanır. Bu bağlanma, herbisitinin bitki tarafından emilmesini engelleyerek **ciddi bir antagonizmaya (etkinlik kaybına)** neden olur.

- **Adjuvanlar (Yardımcı Maddeler):** Herbisitlerin performansını artırmak için karışıma eklenen maddelerdir.

- **Yüzey Aktif Maddeler (Surfactants - NIS):** Püskürtme damlasının yüzey gerilimini düşürerek yaprak yüzeyine daha iyi yayılmasını ve yapışmasını sağlarlar.
- **Yağlar (Oils - COC, MSO):** Bitkinin mumsu kütikula tabakasını çözerek herbisitinin içeri girmesini kolaylaştırırlar.
- **Gübreler (Fertilizers - AMS, UAN):** Amonyum Sülfat (AMS), sert sulardaki pozitif iyonlara bağlanarak glyphosate gibi herbisitleri korur. Üre Amonyum Nitrat (UAN) ise bazı herbisitlerin etkinliğini artırır ancak fitotoksosite riskini de yükseltir.
- **Sürüklenme Önleyiciler (Drift Retardants):** Karışıma eklenerek daha büyük damlacıkların oluşmasını sağlar ve sürüklenme riskini azaltır.

Tablo 3. Yaygın Adjuvan Türleri ve Fonksiyonları

Adjuvan Tipi	Kısaltma	Fonksiyonu	Ne Zaman Kullanılır?
Noniyonik Sürfaktan	NIS	Yüzey gerilimini düşürür, yayılmayı ve yapışmayı artırır.	Birçok çıkış sonrası herbisitlerin etiketinde tavsiye edilir.
Bitkisel Yağ Konsantresi	COC	Kütikulayı eriterek herbisit penetrasyonunu artırır.	Özellikle kurak koşullarda veya mumsu yapraklara sahip otlara karşı. NIS'den daha "sıcak" bir karışımdır (fitotoksisite riski artar).
Metillenmiş Tohum Yağı	MSO	Kütikula penetrasyonunda en agresif olanıdır.	Kontrolü çok zor olan otlara karşı ve bazı herbisitlerin etiketinde özel olarak istenir. Fitotoksisite riski en yüksek olan yağdır.
Amonyum Sülfat	AMS	Sert su antagonizmasını önler. Sert sudaki Ca, Mg gibi iyonları bağlayarak glyphosate'ı korur.	Glyphosate, 2,4-D, Clethodim gibi herbisitler sert su ile kullanılacaksa mutlaka eklenmelidir.
Sürüklenme Önleyici Ajan	DRA	İnce damlacıkların oranını azaltır, sürüklenmeyi önler.	Rüzgarlı koşullarda veya hassas alanların yakınında uygulama yapıldığında.

Kaynak: Yazar tarafından WSSA (Weed Science Society of America) ve çeşitli üniversite yayım kılavuzları temel alınarak oluşturulmuştur.

3. SONUÇ ve ÖNERİLER

3.1. Sonuçlar

Herbisit uygulaması, modern tarımın en temel agronomik faaliyetlerinden biri olmasına rağmen, başarısı bir dizi karmaşık ve birbiriyle ilişkili faktörün hassas bir dengesine bağlıdır. Bu çalışma, bir herbisitlerin etkinliğinin sadece kimyasal yapısına değil, büyük ölçüde onun hedefe nasıl ulaştırıldığına bağlı olduğunu açıkça ortaya koymuştur. Uygulama süreci, bir zincire benzetilebilir ve bu zincirin en zayıf halkası, tüm sistemin performansını belirler. Mükemmel bir herbisit, yanlış kalibre edilmiş bir pülverizatörle uygulandığında; doğru kalibre edilmiş bir pülverizatör, yanlış

seçilmiş bir memeyle kullanıldığında; veya en doğru ekipman, yanlış hava koşullarında çalıştırıldığında beklenen sonucu vermeyecektir.

Kalibrasyonun, doğru dozajın matematiksel garantisi olarak uygulamanın mutlak temeli olduğu; meme seçiminin ise etkinlik (kaplama) ve çevre güvenliği (sürüklenme) arasındaki kritik dengeyi kurduğu vurgulanmıştır. Çevresel faktörlerin, özellikle rüzgar ve sıcaklık inversiyonunun, öngörülemeyen ve yıkıcı sürüklenme olaylarına yol açabileceği; su kalitesinin ise, özellikle glyphosate gibi hassas herbisitlerin etkinliğini görünmez bir şekilde yok edebileceği gösterilmiştir. Son olarak, adjuvanların doğru kullanıldığında herbisit performansını zirveye taşıyabilen, ancak yanlış seçildiğinde fitotoksisiteye neden olabilen iki ucu keskin bir kılıç olduğu anlaşılmıştır.

Sonuç olarak, herbisit uygulaması, "sadece püskürtmekten" ibaret basit bir işlem değildir. Bilgi, tecrübe, dikkat ve doğru teknoloji kullanımını gerektiren, herbisit kimyası, bitki fizyolojisi ve mühendislik bilimlerinin kesişim noktasında yer alan profesyonel bir faaliyettir. Bu faaliyetteki başarı, hem çiftçinin ekonomik kârlılığını hem de tarımsal üretimin çevresel sürdürülebilirliğini doğrudan etkilemektedir.

3.2. Öneriler

Geleneksel herbisit uygulama yöntemlerinin getirdiği riskleri en aza indirmek ve verimliliği en üst düzeye çıkarmak için, hassas tarım teknolojileri ve yapay zekâ tabanlı sistemlerin tarımsal pratiğe entegrasyonu kaçınılmazdır. Bu alandaki geleceğe yönelik stratejiler ve öneriler şunlardır:

1. **Entegre Karar Destek Sistemleri (KDS) Geliştirilmesi:** Çiftçinin akıllı telefonundan erişebileceği mobil uygulamalar geliştirilmelidir.

Bu uygulamalar;

- o Gerçek zamanlı hava durumu verilerini (rüzgar hızı/yönü, sıcaklık, nem) ve hava tahminlerini (yağmur, inversiyon riski) analiz etmelidir.

- Uygulanacak herbisiti, kültür bitkisini ve hedef yabancı otları dikkate alarak ideal uygulama zamanını, doğru meme tipini ve gerekli adjuvanı önermelidir.
 - Çiftçinin girdiği su analiz sonuçlarına göre (pH, sertlik), antagonizma riskini hesaplamalı ve amonyum sülfat (AMS) gibi şartlandırıcıların dozunu otomatik olarak belirlemelidir.
2. **Drone ve Uydu Teknolojileriyle Yabancı Ot Tespiti:** Yüksek çözünürlüklü drone veya uydu görüntüleri, yapay zekâ algoritmaları ile işlenerek tarladaki yabancı otların yerlerini ve yoğunluklarını gösteren "yabancı ot haritaları" oluşturulmalıdır. Bu haritalar, tüm tarlayı ilaçlamak yerine sadece sorunlu bölgelere uygulama yapılmasına olanak tanır.
3. **Değişken Oranlı Uygulama (VRA) Sistemlerinin Yaygınlaştırılması:** Yabancı ot haritaları, GPS destekli, değişken oranlı uygulama yeteneğine sahip pülverizatörlere yüklenmelidir. Bu pülverizatörler, yabancı ot yoğunluğunun fazla olduğu yerlere tam doz, az olduğu yerlere düşük doz uygular ve temiz alanları pas geçer. Bu, toplam herbisit kullanımını %50'den fazla azaltma potansiyeli taşır.
4. **"Gör ve Püskürt" (See-and-Spray) Teknolojilerinin Benimsenmesi:** Bu, hassas uygulamanın zirvesidir. Traktör üzerine monte edilen yüksek hızlı kameralar ve yapay zekâ işlemcileri, tarlada ilerlerken her bir yabancı otu **gerçek zamanlı olarak tanır** ve sadece o yabancı otun üzerine, milisaniyeler içinde tek bir meme ile hassas bir şekilde ilaç püskürtür. Bu teknoloji, herbisit kullanımını **%90'lara varan oranlarda azaltma** potansiyeline sahiptir ve herbisit direnci yönetimi ile çevre koruma açısından bir devrim niteliğindedir.

5. Gelişmiş Pülverizatör Teknolojileri:

- **Darbe Genişlik Modülasyonu (PWM):** Hız değıştikçe damla boyutunu sabit tutan akıllı meme sistemleri, uygulamanın kalitesini artırır.
- **Doğrudan Enjeksiyon Sistemleri:** Kimyasalları tankta karıştırmak yerine, doğrudan püskürtme hattına enjekte ederek tank karışımı uyumsuzluklarını ve atık sorununu ortadan kaldırır.

Bu teknolojilerin benimsenmesi, herbisit uygulamasını reaktif bir işlem den, veri odaklı, proaktif ve ultra hassas bir operasyona dönüştürerek tarımı daha kârlı, verimli ve sürdürülebilir bir geleceğe taşıyacaktır.

KAYNAKLAR

- Hofman, V., & Solseng, E. (2004). *Spray equipment and calibration*. North Dakota State University Extension Service.
- Oerke, E.-C. (2006). Crop losses to pests. *The Journal of Agricultural Science*, 144(1), 31–43. <https://doi.org/10.1017/S0021859605005708>
- Shaner, D. L. (Ed.). (2014). *Herbicide handbook* (10th ed.). Weed Science Society of America.
- Wolf, R. E., & Butts, T. R. (2019). *The importance of proper nozzle selection and sprayer setup for pesticide application*. Kansas State University Agricultural Experiment Station and Cooperative Extension Service.
- Zimdahl, R. L. (2018). *Fundamentals of weed science* (5th ed.). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/C2016-0-04225-3>

BÖLÜM 5

HERBİSİTLERİN KALICILIĞININ MÜNAVEBE BİTKİLERİNE ETKİLERİ

Doç. Dr. Fırat PALA⁸

Prof. Dr. Hüsrev MENNAN⁹

DOI: <https://www.doi.org/10.5281/zenodo.18108909>

⁸ ¹Siirt Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Bitki Koruma Bölümü, Siirt, Türkiye.
(Sorumlu Yazar: firatpala@siirt.edu.tr, ORCID: 0000-0002-4394-8841)

⁹ Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Bitki Koruma Bölümü, Samsun, Türkiye. (hmennan@omu.edu.tr, ORCID: 0000-0002-1410-8114)

1. GİRİŞ

Tarım, insanlığın varoluşundan bu yana medeniyetlerin temelini oluşturan ve günümüzde 8 milyarı aşan dünya nüfusunun gıda güvenliğini sağlayan stratejik bir sektördür. Artan nüfusun gıda talebini karşılamak, birim alandan elde edilen verimi artırmayı zorunlu kılmaktadır. Ancak tarımsal üretim, yabancı otlar, hastalıklar ve zararlılar gibi biyotik stres faktörlerinin sürekli tehdidi altındadır. Bu faktörler arasında yabancı otlar, kültür bitkileri ile su, besin, ışık ve alan için girdikleri rekabet nedeniyle en önemli verim kısıtlayıcı unsur olarak kabul edilmektedir. Yapılan çalışmalar, yabancı otların kontrol edilmediği takdirde tarım ürünlerinde %30'u aşan, hatta bazı durumlarda %100'e varan verim kayıplarına neden olabildiğini göstermektedir (Oerke, 2006).

Yirminci yüzyılın ortalarında sentetik herbisitlerin keşfi, yabancı ot mücadelesinde bir çığır açmıştır. Herbisitler, geniş alanlarda etkili, ekonomik ve pratik bir kontrol sağlayarak tarımsal verimliliğin artırılmasında kilit rol oynamıştır. Bu "kimyasal devrim", çiftçilere daha önce görülmemiş bir kontrol gücü vermiş ve modern tarımın ayrılmaz bir parçası haline gelmiştir. Ancak her teknolojik gelişme gibi, herbisit kullanımının da madalyonun iki yüzü vardır. Etkin bir yabancı ot kontrolü için herbisitlerin toprakta belirli bir süre aktif kalması (kalıcılık) istenirken, bu kalıcılığın gereğinden uzun sürmesi, ciddi bir ekolojik ve ekonomik soruna yol açmaktadır: **herbisit kalıcılığı veya taşınması (herbicide carryover)**.

Herbisit kalıcılığı, bir sezonda uygulanan herbisitin toprakta tamamen parçalanmayarak, bir sonraki ekim döneminde ekilen farklı bir kültür bitkisi üzerinde toksik etki (fitotoksosite) yaratması durumudur. Bu durum, tarımsal sürdürülebilirliğin temel taşlarından biri olan ürün rotasyonu (münavebe) uygulamalarını doğrudan tehdit etmektedir. Münavebe, toprağın verimliliğini korumak, hastalık ve zararlı döngülerini kırmak ve toprak yapısını iyileştirmek için farklı bitki ailelerine ait ürünlerin belirli bir sıra ile art arda ekilmesi

pratiğidir. Ancak, bir önceki üründe kullanılan kalıcı bir herbicide hassas olan bir sonraki ürün, tarlaya ekildiğinde çimlenme sorunları, gelişim bozuklukları, sararma, bodurluk ve sonuç olarak ciddi verim kayıpları yaşayabilir (Gunsolus & Curran, 2016). Bu durum, çiftçinin sadece o yılki ürününü değil, aynı zamanda gelecek yıllardaki ekim planlarını da riske atar.

Bu sorunun merkezinde, herbisitlerin çevresel akıbetini tanımlayan en önemli parametrelerden biri olan **yarılanma ömrü (half-life, DT₅₀)** kavramı bulunmaktadır. Yarılanma ömrü, bir kimyasalın başlangıçtaki miktarının yarısının çevresel koşullar altında (genellikle mikrobiyal ve kimyasal yollarla) parçalanması için geçen süreyi ifade eder. Kısa yarılanma ömrüne sahip herbisitler hızla parçalanarak çevre için daha az risk oluştururken, uzun yarılanma ömrüne sahip olanlar (örneğin, sülfonilüre ve imazolinon grubu herbisitler) aylarca, hatta yıllarca toprakta aktif kalabilir (Zimdahl, 2018). Bu kalıcılık süresi sabit bir değer olmayıp; toprağın pH'sı, organik madde miktarı, nem içeriği, sıcaklık ve herbisit kimyasal yapısı gibi sayısız faktörün karmaşık etkileşimiyle belirlenir. Örneğin, kurak geçen bir yılın ardından toprakta herbisit parçalanması yavaşlayacağı için kalıcılık riski önemli ölçüde artar. Bu derlemenin amacı, modern tarımın bu "görünmez tehlikesi" olan herbisit kalıcılığı sorununu, yarılanma ömrü kavramı ekseninde ele almaktır. Bu kapsamda, herbisitlerin toprakta kalıcılığını etkileyen faktörler, münavebe bitkileri üzerindeki fitotoksik etkileri, risk yönetimi stratejileri ve bu sorunun çözümünde teknoloji ve biyoteknolojinin sunduğu yenilikçi yaklaşımlar detaylı bir şekilde incelenecektir.

2. HERBİSİT KALICILIĞININ (CARRYOVER) MEKANİZMASI VE YÖNETİMİ

Herbisit kalıcılığı, uygulandığı hedef kültür bitkisi ve yabancı otlar dışındaki organizmalar ve bir sonraki ürün üzerinde istenmeyen etkilere yol açabilen karmaşık bir süreçtir. Bu sürecin anlaşılması ve yönetilmesi, sürdürülebilir tarım ve gıda güvenliği için hayati önem taşır. Bu bölümde,

kalıcılığın temelini oluşturan yarılanma ömrü kavramı, bu süreci etkileyen faktörler, münavebe bitkileri üzerindeki sonuçları ve risk yönetimi stratejileri ele alınacaktır.

2.1. Herbisit Yarılanma Ömrü (DT_{50} ve DT_{90}) Kavramı ve Önemi

Bir herbisitın çevresel akıbetini ve kalıcılık potansiyelini tanımlamak için kullanılan en temel metrik, **yarılanma ömrüdür (Half-life)**. Bilimsel literatürde bu kavram genellikle DT_{50} ve DT_{90} olarak ifade edilir:

- **DT_{50} (Disappearance Time 50%):** Bir herbisitın uygulandığı başlangıç konsantrasyonunun %50'sinin toprakta veya suda parçalanması, taşınması veya bitkiler tarafından alınması gibi süreçler sonucunda yok olması için geçen süredir. Genellikle "gün" veya "hafta" cinsinden ifade edilir. DT_{50} , bir herbisitın kalıcılığı hakkında hızlı ve pratik bir gösterge sunar.
- **DT_{90} (Disappearance Time 90%):** Herbisit konsantrasyonunun %90'ının yok olması için geçen süredir. Bu değer, herbisitın neredeyse tamamen etkisiz hale gelmesi için gereken zamanı gösterdiği için, özellikle hassas münavebe bitkileri açısından daha gerçekçi bir risk değerlendirmesi sunar. Matematiksel olarak, birinci dereceden kinetik varsayımı altında DT_{90} , yaklaşık olarak DT_{50} 'nin 3.32 katıdır.

Önemli bir nokta, DT_{50} 'nin sabit bir biyolojik veya kimyasal sabit olmadığıdır. Bu değer, herbisitın uygulandığı spesifik çevre koşullarına (tarla, toprak tipi, iklim) bağılı olarak büyük ölçüde değişen **dinamik bir parametredir**. Bir herbisitın laboratuvarında ölçülen DT_{50} değeri ile aynı herbisitın farklı pH ve organik maddeye sahip bir tarladaki DT_{50} değeri arasında önemli farklar olabilir. Bu nedenle, herbisit etiketlerinde belirtilen DT_{50} değerleri ve münavebe kısıtlamaları, "ortalama" veya "tipik" koşullar için bir rehber olarak kabul edilmelidir. **Gerçek tarla koşullarında bu süreler, özellikle ekstrem iklim olaylarında (örneğin kuraklık) uzayabilir veya**

kısalabilir. Herbisitlerin kalıcılık potansiyelleri, DT_{50} değerlerine göre genel olarak aşağıdaki gibi sınıflandırılabilir:

Tablo 1. Herbisitlerin toprakta kalıcılık potansiyellerinin sınıflandırılması

Kalıcılık Sınıfı	DT_{50} (Yarılanma Ömrü) Süresi	Tanım ve Risk Durumu	Örnek Herbisit Grupları
Kalıcı Olmayan	< 30 gün	Hızla parçalanır. Münavebe bitkileri için genellikle düşük risk taşır. Bir sonraki sezona kalıcılık riski çok azdır.	Glyhosate, Glufosinate, Bentazon
Orta Derecede Kalıcı	30 - 100 gün	Normal koşullar altında bir sonraki sezona düşük riskle taşınabilir. Kuraklık gibi anormal koşullar riski artırır.	Atrazine, Metolachlor, Trifluralin
Kalıcı (Persistent)	> 100 gün	Yüksek kalıcılık (carryover) riski taşır. Bir sonraki sezonda ekilecek hassas bitkiler için ciddi tehdit oluşturur.	Imazapic, Chlorsulfuron, Picloram
Çok Kalıcı	> 365 gün	Toprakta bir yıldan uzun süre aktif kalabilir. Münavebe seçeneklerini ciddi şekilde kısıtlar. Çevresel birikim riski vardır.	Bazı Picloram ve Triazine türevleri

Kaynak: Yazar tarafından Zimdahl (2018) ve PPDB (Pesticide Properties Database) verileri temel alınarak oluşturulmuştur.

2.2. Herbisit Yarılanma Ömrünü Etkileyen Çevresel ve Kimyasal Faktörler

Bir herbisitinin toprakta ne kadar süre kalacağını belirleyen süreç, karmaşık bir faktörler ağı tarafından yönetilir. Bu faktörler temel olarak üç ana başlık altında incelenebilir: toprak özellikleri, iklim koşulları ve herbisitinin kendi kimyasal yapısı.

- **Toprak Özellikleri:**

- **Mikrobiyal Aktivite:** Herbisitlerin parçalanmasındaki **en önemli yol** biyodegradasyondur. Toprak mikroorganizmaları (bakteriler, mantarlar) herbisitleri kendileri için bir karbon veya enerji kaynağı olarak kullanır ve onları daha basit, zararsız bileşiklere ayırır. Dolayısıyla, mikrobiyal aktiviteyi teşvik eden her koşul (yeterli nem, ılık sıcaklıklar, iyi havalanma, nötr pH) herbisit parçalanmasını hızlandırır ve DT_{50} 'yi kısaltır.
- **Toprak pH'sı:** Toprak pH'sı, hem kimyasal hidrolizi hem de mikrobiyal aktiviteyi etkileyerek herbisit kalıcılığında kilit rol oynar. Örneğin, **sülfonilüre ve imazolinon grubu herbisitler, yüksek pH'lı (alkali) topraklarda daha yavaş parçalanır ve daha kalıcı hale gelir.** Buna karşın, triazin grubu herbisitler asidik topraklarda kimyasal hidroliz yoluyla daha hızlı parçalanır.
- **Organik Madde ve Kil İçeriği:** Toprak organik maddesi ve kil mineralleri, negatif yüklü yüzeylere sahiptir ve pozitif yüklü herbisit moleküllerini bir mıknatıs gibi çeker. Bu sürece **adsorpsiyon** denir. Adsorbe olan herbisit, bitki tarafından alınamaz ve mikroplar tarafından parçalanamaz hale gelir ("bağlı kalıntı"). Yüksek organik madde, bir yandan herbisiti bağlayarak fitotoksik etkisini azaltırken, diğer yandan onu parçalanmaktan koruyarak yarılanma ömrünü uzatabilir. Bu ikili etki, yönetimini karmaşıklaştırır.

- **İklim Koşulları:**

- **Toprak Nemi:** Su, kimyasal hidroliz reaksiyonları ve mikroorganizmaların yaşamı için vazgeçilmezdir. **Kurak geçen bir büyüme sezonu, herbisit parçalanmasını önemli**

ölçüde yavaşlatır ve bir sonraki ürün için kalıcılık riskini ciddi şekilde artırır. Bu, çiftçilerin en çok dikkat etmesi gereken faktörlerden biridir.

- **Sıcaklık:** Genel olarak, sıcaklığın artması kimyasal reaksiyonları ve mikrobiyal aktiviteyi hızlandırır. Bu nedenle, ılık iklimlerde herbisitler soğuk iklimlere göre daha hızlı parçalanır.

- **Herbisitin Kimyasal Yapısı:**

- **Suda Çözünürlük:** Yüksek suda çözünürlüğe sahip herbisitler toprak solüsyonunda daha serbest hareket eder, bu da onları hem bitki alımına hem de mikrobiyal parçalanmaya daha açık hale getirir. Ancak aynı zamanda toprağın alt katmanlarına yıkanma (leaching) riskleri de daha yüksektir.
- **Adsorpsiyon Katsayısı (Koc):** Bu değer, bir herbisit suya kıyasla toprak organik karbonuna ne kadar sıkı bağlandığını gösterir. Yüksek Koc değerine sahip herbisitler toprağa sıkıca bağlanır, daha az hareket eder ve genellikle daha kalıcıdır.

Bu faktörlerin etkileşimi aşağıdaki tabloda özetlenmiştir.

Tablo 2. Herbisit yarılanma ömrünü (dt_{50}) etkileyen başlıca faktörler

Faktör Kategorisi	Faktör	Faktördeki Değişimin Etkisi	Yarılanma Ömrü (DT_{50}) Üzerindeki Sonuç
Toprak	Mikrobiyal Aktivite	Artış (Ilık, nemli, iyi havalandan toprak)	Kısalır (Hızlı parçalanma)
	Toprak pH'sı	Yükselme (Alkaliye doğru)	Sülfonilüre ve İmidazolinonlar için Uzar
	Organik Madde	Artış	Uzar (Adsorpsiyon artar, herbisit korunur)
	Kil İçeriği	Artış	Uzar (Adsorpsiyon artar)
İklim	Toprak Nemi	Artış (Yeterli yağış)	Kısalır (Mikrobiyal ve kimyasal parçalanma artar)

	Sıcaklık	Artış	Kısılır (Reaksiyon hızları artar)
Herbisit	Adsorpsiyon (Koc)	Yüksek değer	Uzar (Toprağa sıkı bağlanır)
	Suda Çözünürlük	Yüksek değer	Kısılır (Parçalanmaya daha açıktır)

Kaynak: Yazar tarafından Gunsolus & Curran (2016) ve Zimdahl (2018) temel alınarak oluşturulmuştur.

2.3. Münavebe Bitkilerinde Görülen Fitotoksiste ve Hassas Türler

Toprakta kalan herbisit kalıntıları, hassas bir münavebe bitkisi tarafından kökleri aracılığıyla alındığında, bitkinin normal fizyolojik süreçlerini bozarak fitotoksik belirtilere yol açar. Bu belirtiler, herbisitinin etki mekanizmasına ve bitkinin hassasiyet düzeyine göre değişir.

• Yaygın Fitotoksiste Belirtileri:

- **Kloroz:** Yapraklarda sararma. Genellikle damarlar arasında veya tüm yaprak yüzeyinde görülür.
- **Nekroz:** Doku ölümü, yapraklarda kahverengi veya siyah lekeler, kenarlarda kuruma.
- **Bodurluk (Stunting):** Bitkinin normal gelişimini tamamlayamaması, cüce kalması.
- **Deformasyonlar:** Yapraklarda ve gövdede bükülme, kıvrılma, anormal şekiller (epinasti).
- **Kök Gelişiminin Engellenmesi:** Zayıf, kısa ve kahverengileşmiş kökler.

Herbisit kalıcılığı açısından en riskli gruplar ve bu gruplara hassas münavebe bitkileri Tablo 3'te özetlenmiştir. Bu alandaki temel bilgiler, **Stephen O. Duke** gibi herbisit fizyolojisi üzerine çalışan araştırmacıların çalışmaları ve **Pesticide Properties Database (PPDB)** gibi kapsamlı veri tabanları sayesinde elde edilmektedir. PPDB, Hertfordshire Üniversitesi tarafından yönetilen ve yüzlerce pestisitinin çevresel akıbeti hakkında detaylı bilgi sunan paha biçilmez bir online kaynaktır.

Tablo 3. Kalıcı herbisit grupları ve hassas münavebe bitkileri

Herbisit Grubu	Etki Mekanizması (WSSA Grubu)	Örnek Aktif Maddeler	Genellikle Kullanıldığı Ürünler	Kalıcılığa Hassas Münavebe Bitkileri
Sülfonilüreler	ALS İnhibitörleri (Grup 2)	Chlorsulfuron, Metsulfuron-methyl	Buğday, Arpa	Pancar, Mercimek, Nohut, Kanola, Ayçiçeği, Patates
İmidazolinonlar	ALS İnhibitörleri (Grup 2)	Imazapic, Imazethapyr, Imazamox	Baklagiller (Mercimek, Nohut), Ayçiçeği	Buğday, Arpa, Mısır, Pancar, Kanola
Triazinler	Fotosistem II İnhibitörleri (Grup 5)	Atrazine, Simazine, Terbutylazine	Mısır, Sorgum	Buğday, Yulaf, Soya Fasulyesi, Sebzeler
Dinitroanilinler	Mikrotübül İnhibitörleri (Grup 3)	Trifluralin, Pendimethalin	Pamuk, Soya, Ayçiçeği	Mısır, Sorgum, Buğday, Pancar
Picloram ve Türevleri	Sentetik Oksinler (Grup 4)	Picloram, Clopyralid, Aminopyralid	Meralar, Tahıllar, Kanola	Geniş yapraklı bitkilerin çoğu (Baklagiller, Domates)

Kaynak: Yazar tarafından WSSA (Weed Science Society of America) sınıflandırması ve çeşitli üniversitelerin yayım kılavuzları temel alınarak oluşturulmuştur.

2.4. Kalıcılık Riskini Yönetme Stratejileri

Herbisit kalıcılığının neden olacağı ekonomik kayıpları önlemek için çiftçilerin proaktif bir risk yönetimi yaklaşımı benimsemesi gerekmektedir.

1. **Etiketi Oku ve Uy ("The Label is the Law"):** Her herbisit etiketinde, uygulamadan sonra hangi ürünlerin ne kadar süre sonra güvenle ekilebileceğini belirten bir **"Rotasyonel Kısıtlamalar" (Rotational Restrictions veya Plant-back Intervals)** bölümü bulunur. Bu sürelere uymak, risk yönetiminin ilk ve en önemli adımındır.
2. **Doğru Kayıt Tutma:** Hangi tarlaya, hangi tarihte, hangi dozda, hangi herbisit uygulandığının doğru bir şekilde kaydedilmesi, gelecek yıllardaki ekim planlaması için kritik öneme sahiptir.

3. **Biyolojik Testler (Bioassay):** Şüpheli durumlarda, bir sonraki ürünü tarlanın tamamına ekmeden önce basit bir biyolojik test yapılabilir. Tarlanın farklı yerlerinden alınan toprak örnekleri saksılara doldurulur ve ekilmesi planlanan hassas bitkinin tohumları bu saksılara ekilir. Aynı zamanda, herbisit uygulanmamış temiz bir toprağa da ekim yapılarak kontrol grubu oluşturulur. Birkaç hafta içinde kontrol saksısındaki bitkiler ile tarla toprağındaki bitkiler arasında gelişim farkı olup olmadığı gözlemlenir.
4. **Toprak İşleme:** Toprak işleme, herbisit kalıntılarının toprakta seyreltilmesine ve yüzeye daha yakın olan mikroorganizmalarla temasının artırılmasına yardımcı olarak parçalanmayı bir miktar hızlandırabilir.
5. **Karar Destek Sistemleri (KDS):** Modern tarımda, herbisit kalıcılığını tahmin eden bilgisayar tabanlı modeller ve KDS'ler geliştirilmektedir. Bu sistemler; uygulanan herbisit, toprak tipi, organik madde, pH ve geçmiş iklim verilerini analiz ederek tarlaya özgü bir kalıcılık riski tahmini sunar.

3. SONUÇ ve ÖNERİLER

3.1. Sonuçlar

Herbisitler, modern tarımın verimlilik ve gıda arzı güvenliği üzerindeki olumlu etkileri yadsınamaz olan güçlü araçlardır. Ancak bu gücün sorumlu bir şekilde yönetilmesi gerekmektedir. Bu çalışmada incelenen herbisit kalıcılığı (carryover) sorunu, bu sorumluluğun en kritik halkalarından birini oluşturmaktadır. Bir sezonda fayda sağlayan bir kimyasalın, bir sonraki sezonda ekilen hassas bir münavebe bitkisi için "zehir" haline gelmesi, hem ekonomik hem de ekolojik sürdürülebilirlik açısından ciddi bir tehdittir.

Bu derleme, herbisit kalıcılığının temel belirleyicisinin yarılanma ömrü (DT_{50}) olduğunu, ancak bu değerin statik bir sayıdan ziyade son derece dinamik bir parametre olduğunu ortaya koymuştur. Bir herbisit in toprakta ne kadar süre

aktif kalacağı; toprağın pH'sı, organik madde miktarı, mikrobiyal popülasyonun sağlığı gibi edafik faktörler ile büyüme sezonundaki yağış ve sıcaklık gibi iklimsel faktörlerin karmaşık bir etkileşimine bağlıdır. Özellikle kurak geçen yılların, herbisit parçalanmasını yavaşlatarak kalıcılık riskini dramatik bir şekilde artırdığı unutulmamalıdır. Sülfonilüre ve imazolinon gibi modern ve etkili herbisit gruplarının, özellikle alkali topraklarda uzun süre kalıcı olabildiği ve kendilerinden sonra ekilen pancar, mercimek, kanola gibi ekonomik değeri yüksek ürünlerde ciddi fitotoksisteye ve verim kayıplarına yol açabildiği net bir şekilde gösterilmiştir.

Risk yönetiminde en temel ve vazgeçilmez kuralın, herbisit etiketlerinde belirtilen münavebe kısıtlamalarına harfiyen uymak olduğu bir kez daha vurgulanmıştır. Bununla birlikte, etiketlerdeki sürelerin "ortalama" koşullar için geçerli olduğu ve ekstrem iklim koşullarında bu sürelerin yetersiz kalabileceği gerçeği, çiftçileri ve tarım danışmanlarını daha proaktif olmaya itmektedir. Biyolojik testler gibi geleneksel yöntemler hala geçerliliğini korusa da, büyük ölçekli tarımda daha verimli, hassas ve öngörüye dayalı araçlara ihtiyaç duyulmaktadır. Sonuç olarak, herbisit kalıcılığı sorunu, tek bir faktöre indirgenemeyecek kadar çok boyutlu olup, çözümü de tek bir yöntemle dayandırılmaz. Başarılı bir yönetim, bilgi, dikkatli planlama ve modern teknolojilerin entegrasyonunu gerektiren bütüncül bir yaklaşım ile mümkündür.

3.2. Öneriler

Herbisit kalıcılığı riskinin etkin bir şekilde yönetilmesi ve gelecekte bu sorunun en aza indirilmesi için geleneksel yaklaşımların ötesine geçen, teknoloji ve biyoteknoloji odaklı stratejilerin benimsenmesi zorunludur. Bu doğrultuda aşağıdaki öneriler sunulmaktadır:

1. Yapay Zekâ (AI) Tabanlı Dinamik Risk Tahmin Modelleri: Statik

"bekleme süreleri" yerine, tarlaya özgü dinamik risk haritaları

oluşturan Karar Destek Sistemleri (KDS) geliştirilmelidir. Bu sistemler;

- **Büyük Veri Analizi:** Çiftçinin girdiği herbisit bilgisi, dozu ve uygulama tarihini; ulusal toprak veri tabanlarından alınan parsel bazlı pH ve organik madde verileriyle; meteoroloji servislerinden alınan geçmiş yağış/sıcaklık verileri ve gelecek hava tahminleriyle birleştirmelidir.
- **Makine Öğrenmesi:** Bu büyük veriyi işleyen yapay zekâ algoritmaları, belirli bir tarla için o yıla özgü bir DT₅₀ değeri ve kalıcılık riski skoru hesaplamalıdır. Sistem, çiftçiye "Bu yılki kuraklık nedeniyle, normalde 10 ay olan bekleme süresi sizin tarlanızda 14 aya çıkmıştır. Pancar yerine buğday ekmeniz önerilir." gibi somut ve eyleme geçirilebilir tavsiyeler sunmalıdır.

2. Biyoteknolojik Çözümler ve Biyoremediasyon:

- **Hassas Gen Düzenleme (CRISPR vb.):** Ekonomik değeri yüksek münavebe bitkilerinin (örneğin mercimek, kanola), yaygın olarak kullanılan kalıcı herbisitlere karşı toleranslı hale getirilmesi için modern gen düzenleme teknolojilerinden yararlanılmalıdır. Bu, çiftçilere münavebe planlamasında daha önce sahip olmadıkları bir esneklik kazandıracaktır.
- **Biyoremediasyon:** Toprakta belirli herbisitleri parçalama yeteneği yüksek olan spesifik bakteri veya mantar suşları izole edilerek, bu mikroorganizmaları içeren "biyolojik aşılardan" geliştirilmesi hedeflenmelidir. Yüksek riskli tarlalara uygulanacak bu ürünler, herbisit parçalanmasını hızlandırarak toprağı bir sonraki ürün için "temizleyebilir".

○

3. Hassas Tarım ve Sensör Teknolojileri:

- **Değişken Oranlı Uygulama (VRA):** Herbisitlerin tüm tarlaya aynı dozda uygulanması yerine, sadece yabancı otların yoğun olduğu bölgelere uygulanması, toplam herbisit yükünü ve dolayısıyla kalıcılık riskini başlangıçta azaltacaktır.
- **Uzaktan Algılama:** Drone veya uydulara takılı hiperspektral kameralar, münavebe bitkilerinde gözle görülemeyen erken stres (fitotoksisite) belirtilerini tespit edebilir. Bu erken uyarı sistemi, çiftçinin hasar büyümeden besin takviyesi gibi hafifletici önlemler almasına olanak tanıyabilir.

4. Veri Altyapısı ve Eğitim:

Bu teknolojik çözümlerin temelini oluşturan güvenilir veriye erişim sağlanmalıdır. Tarım ve Orman Bakanlığı, üniversiteler ve özel sektör iş birliği ile ulusal, parsel bazlı, dijital bir toprak veri tabanı (pH, organik madde vb.) oluşturulmalı ve bu veri, geliştirilecek KDS'ler için bir altyapı sunmalıdır.

Aynı zamanda, çiftçiler ve ziraat mühendisleri bu yeni teknolojilerin kullanımı konusunda sürekli olarak eğitilmelidir. Bu çok yönlü ve teknoloji odaklı yaklaşım, herbisit kalıcılığı sorununu bir kader olmaktan çıkarıp, yönetilebilir ve öngörülebilir bir risk haline getirecektir.

EK-1: Yaygın Herbisitlerin Yarılanma Ömrü (DT₅₀) Ve Münavebe Kısıtlamaları

Aşağıdaki tablo, bilimsel literatürden derlenmiş **genel bir rehberdir**. Tablodaki değerler (hem yarılanma ömrü hem de münavebe süresi) **sabit ve evrensel sayılar DEĞİLDİR**. Bu değerler, her bir tarlanın kendine özgü koşullarına bağlı olarak **önemli ölçüde değişebilir**. Lütfen aşağıdaki faktörleri dikkate alın:

1. **Toprak pH'sı:** Alkali (yüksek pH) topraklar, sülfonilüre ve imazolinon gibi herbisitlerin parçalanmasını yavaşlatarak kalıcılığı artırır.
2. **Toprak Organik Maddesi ve Tekstürü:** Yüksek organik madde ve kil içeriği, herbisitleri toprağa bağlayarak (adsorpsiyon) kalıcılıklarını artırabilir.
3. **İklim Koşulları:** Kurak ve soğuk geçen bir yıl, mikrobiyal aktiviteyi ve kimyasal parçalanmayı yavaşlatarak herbisitlerin toprakta çok daha uzun süre kalmasına neden olur. Bu, kalıcılık riskini artıran en önemli faktörlerden biridir.
4. **Uygulama Dozu:** Tavsiye edilen dozdan daha yüksek dozda yapılan uygulamalar, kalıcılık süresini uzatır.
5. **Münavebe Bitkisinin Hassasiyeti:** Bir herbicide hassasiyet, bitki türleri arasında büyük farklılık gösterir.

Aşağıdaki tablo, farklı herbisitlerin göreceli risklerini karşılaştırmak için kullanılmalıdır. Tarlanızda ekim kararı verirken TEK BAŞINA referans alınmamalıdır. Her zaman öncelikli olarak ürünün orijinal etiketinde ("The Label is the Law" - Etiket Kanundur) belirtilen münavebe kısıtlamalarına ve yerel tarım danışmanınızın önerilerine uyunuz.

Tablo 4. Seçilmiş herbisitlerin alfabetik sıraya göre etki mekanizması, yaklaşık toprak yarılanma ömrü (DT₅₀) ve tipik münavebe kısıtlamaları

No	Aktif Madde	WSSA Grubu (Etki Mekanizması)	Toprak Yarılanma Ömrü (DT ₅₀)	Tipik Münavebe Kısıtlamaları ve Notlar
1	2,4-D	4 (Sentetik Oksinler)	7-20 gün	1-2 ay. Genellikle kısa süreli. Hassas geniş yapraklılar için dikkat edilmelidir.
2	Acetochlor	15 (Uzun Zinc. Yağ As. İnh.)	8-30 gün	Sonraki sezon. Çoğu ürün için sorun yaratmaz.
3	Acifluorfen	14 (PPO İnhibitörleri)	30-60 gün	2-4 ay. Mısır ve küçük taneli tahıllar için dikkat.
4	Alachlor	15 (Uzun Zinc. Yağ As. İnh.)	15-40 gün	Sonraki sezon. Genellikle düşük risk.
5	Ametryn	5 (Fotosistem II İnh.)	40-90 gün	4-8 ay. Hassas geniş yapraklılar ve tahıllar için riskli.
6	Aminopyralid	4 (Sentetik Oksinler)	30-350+ gün	12-36+ ay. Çok kalıcı. Baklagiller, patates, domates çok hassas.
7	Amitrole	11 (Karotenoid Biyosentez İnh.)	10-30 gün	2-4 ay. Toprakta hızla parçalanır.
8	Asulam	18 (DHP Sentez İnh.)	7-40 gün	2-6 ay. Münavebe seçeneklerini genellikle kısıtlamaz.
9	Atrazine	5 (Fotosistem II İnh.)	30-120 gün	Sonraki sezon. Kurak yıllarda buğday, yulaf, pancar için risklidir.
10	Beflubutamid	12 (Fitoen Desatüراز İnh.)	20-50 gün	3-6 ay.
11	Benazolin	4 (Sentetik Oksinler)	< 15 gün	1-2 ay. Çok kısa ömürlü.
12	Benefin (Benfluralin)	3 (Mikrotübül İnh.)	40-120 gün	10-12 ay. Mısır ve sorgum gibi dar yapraklılar hassastır.
13	Bensulfuron-methyl	2 (ALS İnhibitörleri)	30-90 gün	4-12 ay. Çeltik sonrası ekilecek geniş yapraklılar için riskli.
14	Bensulide	8 (Lipid Sentez İnh.)	120-180 gün	12-18 ay. Dar yapraklı ürünler hassastır.
15	Bentazon	6 (Fotosistem II İnh.)	15-40 gün	1-2 ay. Kalıcılık riski çok düşüktür.

16	Bicyclopyrone	27 (HPPD İnhibitörleri)	5-20 gün	1-3 ay. Kısa ömürlü.
17	Bispyribac-sodium	2 (ALS İnhibitörleri)	15-60 gün	3-9 ay. Dar ve geniş yapraklı birçok ürüne hassasiyet riski.
18	Bromacil	5 (Fotosistem II İn.)	60-240 gün	12-24 ay. Kalıcıdır, ürün rotasyonunu ciddi kısıtlar.
19	Bromoxynil	6 (Fotosistem II İn.)	< 10 gün	Kısıtlama yok. Toprakta aktivitesi yoktur.
20	Butachlor	15 (Uzun Zinc. Yağ As. İn.)	10-40 gün	Sonraki sezon.
21	Carfentrazone-ethyl	14 (PPO İnhibitörleri)	< 5 gün	1 ay. Çok hızlı parçalanır, kalıcılık riski yok.
22	Chlorimuron-ethyl	2 (ALS İnhibitörleri)	15-90 gün	4-15 ay. pH > 7 olan topraklarda ve kuraklıkta risk artar. Pancar hassas.
23	Chlorsulfuron	2 (ALS İnhibitörleri)	30-180+ gün	10-36 ay. Çok kalıcı. Alkali topraklarda risk çok yüksek. Mercimek, pancar, ayçiçeği çok hassas.
24	Clethodim	1 (ACCase İnhibitörleri)	< 5 gün	1-2 ay. Toprakta aktivitesi çok düşüktür.
25	Clodinafop-propargyl	1 (ACCase İnhibitörleri)	< 5 gün	1-2 ay. Kalıcılık riski çok düşüktür.
26	Clomazone	13 (DOXP Sentez İn.)	20-90 gün	9-12 ay. Buğday gibi hassas ürünler için bekleme süresi önemlidir.
27	Clopyralid	4 (Sentetik Oksinler)	10-120 gün	10-18 ay. Baklagiller, domates, patates gibi ürünler çok hassastır.
28	Cycloxydim	1 (ACCase İnhibitörleri)	< 10 gün	1-2 ay. Kalıcılık riski çok düşüktür.
29	Cyhalofop-butyl	1 (ACCase İnhibitörleri)	< 10 gün	1-2 ay. Çeltik sonrası münavebede genellikle sorunsuzdur.
30	Dicamba	4 (Sentetik Oksinler)	10-40 gün	2-4 ay. Normalde kısa süreli, ancak hassas ürünler için dikkat.

31	Dichlobenil	20 (Selüloz Biyosentez İnhi.)	30-180 gün	12-24 ay. Kalıcıdır.
32	Dichlormid	27 (Güvenli Hale Getirici)	5-20 gün	Herbisit değil, güvenli hale getiricidir.
33	Diclofop-methyl	1 (ACCase İnhibitörleri)	10-30 gün	2-3 ay.
34	Diclosulam	2 (ALS İnhibitörleri)	20-80 gün	4-12 ay.
35	Diethatyl-ethyl	15 (Uzun Zinc. Yağ As. İnhi.)	30-100 gün	9-12 ay.
36	Diflufenican	12 (Fitoen Desatüraz İnhi.)	100-300 gün	12-24 ay. Kalıcıdır, birçok geniş yapraklı ürün hassastır.
37	Dimethenamid-P	15 (Uzun Zinc. Yağ As. İnhi.)	10-40 gün	Sonraki sezon. Genellikle düşük risk.
38	Diquat	22 (Fotosistem I İnhi.)	> 1000 gün (bağlı)	Kısıtlama yok. Toprağa çok sıkı bağlanır, biyolojik aktivitesi kalmaz.
39	Dithiopyr	3 (Mikrotübül İnhi.)	30-90 gün	4-10 ay.
40	Diuron	7 (Fotosistem II İnhi.)	90-360 gün	12-24 ay. Kalıcıdır, ürün rotasyonunu ciddi kısıtlar.
41	DSMA	17 (Bilinmiyor)	10-20 gün	Arsenik içerir, kullanımı kısıtlıdır.
42	Endothall	8 (Lipid Sentez İnhi.)	5-15 gün	1-2 ay. Genellikle suda kullanılır, toprakta hızla parçalanır.
43	EPTC	8 (Lipid Sentez İnhi.)	10-30 gün	2-4 ay. Uçucudur, toprağa karıştırılmalıdır.
44	Ethofumesate	16 (Lipid Sentez İnhi.)	60-150 gün	10-18 ay. Buğday ve mısır hassastır.
45	Fenoxaprop-P-ethyl	1 (ACCase İnhibitörleri)	< 5 gün	1 ay. Kalıcılık riski çok düşüktür.
46	Flazasulfuron	2 (ALS İnhibitörleri)	15-60 gün	3-9 ay.
47	Florasulam	2 (ALS İnhibitörleri)	5-30 gün	1-3 ay. ALS grubunun en kısa ömürlülerinden biridir.
48	Fluazifop-P-butyl	1 (ACCase İnhibitörleri)	15-40 gün	2-4 ay.
49	Flucarbazone-sodium	2 (ALS İnhibitörleri)	10-60 gün	3-9 ay. Alkali topraklarda risk artar.

50	Flufenacet	15 (Uzun Zinc. Yağ As. İnh.)	20-90 gün	4-9 ay.
51	Flumetsulam	2 (ALS İnhibitörleri)	10-60 gün	4-12 ay. Alkali topraklarda risk artar.
52	Flumioxazin	14 (PPO İnhibitörleri)	15-40 gün	2-8 ay. Uygulama dozu ve zamana bağlı olarak kısıtlamalar değişir.
53	Fluometuron	7 (Fotosistem II İnh.)	60-120 gün	9-15 ay. Pamuk sonrası ekilecek tahıllar için riskli.
54	Fluroxypyr	4 (Sentetik Oksinler)	10-50 gün	2-4 ay.
55	Flurtamone	12 (Fitoen Desatüraz İnh.)	20-60 gün	4-9 ay.
56	Fomesafen	14 (PPO İnhibitörleri)	60-150 gün	10-18 ay. Mısır ve sorgum hassastır. Kuraklık riski artırır.
57	Foramsulfuron	2 (ALS İnhibitörleri)	10-40 gün	3-9 ay. Pancar gibi hassas ürünler için dikkat.
58	Glufosinate-ammonium	10 (Glutamin Sentetaz İnh.)	5-20 gün	Kısıtlama yok. Toprakta hızla parçalanır, kalıcılık riski yoktur.
59	Glyphosate	9 (EPSP Sentaz İnh.)	7-60 gün	Kısıtlama yok. Toprağa sıkıca bağlanır, toprak aktivitesi yoktur.
60	Halosulfuron-methyl	2 (ALS İnhibitörleri)	10-50 gün	3-9 ay. Alkali topraklarda risk artar. Pancar hassastır.
61	Haloxypyr-methyl	1 (ACCase İnhibitörleri)	10-30 gün	2-3 ay.
62	Hexazinone	5 (Fotosistem II İnh.)	90-270 gün	12-24 ay. Kalıcıdır.
63	Imazamox	2 (ALS İnhibitörleri)	20-60 gün	4-12 ay. Alkali topraklarda ve kuraklıkta risk artar. Pancar, kanola hassas.
64	Imazapic	2 (ALS İnhibitörleri)	90-360+ gün	12-40 ay. Çok kalıcı. Mısır, buğday, pamuk gibi birçok ürün hassastır.
65	Imazapyr	2 (ALS İnhibitörleri)	90-360+ gün	12-48 ay. Çok kalıcı. Tarım dışı alanlarda kullanılır.

66	Imazaquin	2 (ALS İnhibitörleri)	60-180 gün	10-18 ay. Alkali topraklarda risk yüksektir. Mısır, buğday hassas.
67	Imazethapyr	2 (ALS İnhibitörleri)	60-150 gün	10-24 ay. Çok kalıcı. Pancar, kanola ve birçok sebze çok hassas.
68	Indaziflam	29 (Selüloz Biyosentez İn.)	150-360+ gün	24-48 ay. Çok kalıcı.
69	Iodosulfuron-methyl-sodium	2 (ALS İnhibitörleri)	< 10 gün	1-3 ay. Çok hızlı parçalanır, grubunun en kısa ömürlülerinden.
70	Isoxaflutole	27 (HPPD İnhibitörleri)	30-90 gün	4-9 ay. Aktif metaboliti daha kalıcı olabilir.
71	Lactofen	14 (PPO İnhibitörleri)	5-20 gün	1-3 ay.
72	Linuron	7 (Fotosistem II İn.)	60-120 gün	4-9 ay.
73	MCPA	4 (Sentetik Oksinler)	10-30 gün	1-2 ay. Kısa ömürlü.
74	Mesosulfuron-methyl	2 (ALS İnhibitörleri)	10-30 gün	2-4 ay. Grubunun kısa ömürlülerinden.
75	Mesotrione	27 (HPPD İnhibitörleri)	10-40 gün	2-6 ay. Hassas geniş yapraklılar için dikkatli olunmalıdır.
76	Metamitron	5 (Fotosistem II İn.)	30-90 gün	4-9 ay.
77	Metazachlor	15 (Uzun Zinc. Yağ As. İn.)	10-50 gün	2-4 ay.
78	Metolachlor (S-metolachlor)	15 (Uzun Zinc. Yağ As. İn.)	30-90 gün	Sonraki sezon. Genellikle düşük risk.
79	Metribuzin	5 (Fotosistem II İn.)	30-120 gün	4-12 ay. Kaba tekstürlü, düşük OM'li topraklarda risk artar.
80	Metsulfuron-methyl	2 (ALS İnhibitörleri)	30-150+ gün	10-30 ay. Çok kalıcı. Alkali topraklarda risk çok yüksek. Mercimek, pancar, kanola çok hassas.
81	Molinate	8 (Lipid Sentez İn.)	5-20 gün	1-2 ay. Çeltikte kullanılır, hızla parçalanır.
82	MSMA	17 (Bilinmiyor)	10-20 gün	Arsenik içerir, kullanımı kısıtlıdır.

83	Napropamide	15 (Uzun Zinc. Yağ As. İnh.)	60-120 gün	9-12 ay. Mısır ve tahıllar hassastır.
84	Nicosulfuron	2 (ALS İnhibitörleri)	10-40 gün	3-9 ay. Pancar gibi hassas ürünler için dikkat.
85	Norflurazon	12 (Fitoen Desatüraz İnh.)	120-360 gün	12-24 ay. Kalıcıdır.
86	Oryzalin	3 (Mikrotübül İnh.)	20-90 gün	4-9 ay.
87	Oxadiazon	14 (PPO İnhibitörleri)	90-180 gün	10-18 ay. Kalıcıdır.
88	Oxyfluorfen	14 (PPO İnhibitörleri)	30-90 gün	4-9 ay. Toprağa sıkıca bağlanır.
89	Paraquat	22 (Fotosistem I İnh.)	> 1000 gün (bağlı)	Kısıtlama yok. Toprağa çok sıkı bağlanır, biyolojik aktivitesi kalmaz.
90	Pendimethalin	3 (Mikrotübül İnh.)	90-180 gün	10-15 ay. Mısır, buğday, pancar gibi ürünler hassastır.
91	Picloram	4 (Sentetik Oksinler)	90-360+ gün	12-48+ ay. Çok kalıcı. Neredeyse tüm geniş yapraklı ürünler hassastır.
92	Propanil	7 (Fotosistem II İnh.)	< 5 gün	1 ay. Çok hızlı parçalanır.
93	Propisochlor	15 (Uzun Zinc. Yağ As. İnh.)	10-30 gün	Sonraki sezon.
94	Prosulfuron	2 (ALS İnhibitörleri)	15-60 gün	4-12 ay. Alkali topraklarda risk artar.
95	Pyroxasulfone	15 (Uzun Zinc. Yağ As. İnh.)	30-100 gün	Sonraki sezon.
96	Quizalofop-P-ethyl	1 (ACCCase İnhibitörleri)	< 10 gün	1-2 ay. Kalıcılık riski çok düşüktür.
97	Rimsulfuron	2 (ALS İnhibitörleri)	10-30 gün	2-6 ay. Grubunun kısa ömürlülerinden.
98	Sethoxydim	1 (ACCCase İnhibitörleri)	< 10 gün	1-2 ay. Kalıcılık riski çok düşüktür.
99	Simazine	5 (Fotosistem II İnh.)	60-150 gün	10-18 ay. Atrazine benzer, kalıcıdır.
100	Trifluralin	3 (Mikrotübül İnh.)	60-150 gün	10-15 ay. Mısır, buğday ve sorgum gibi ürünler hassastır.

Not: Bu tablo, aşağıda listelenen kaynaklardaki veriler ve genel prensipler temel alınarak, karşılaştırmalı bir rehber olarak yazar tarafından derlenmiştir. DT₅₀ değerleri, farklı çevre koşullarında büyük değişkenlik gösterebilir. Kesin

münavebe süreleri için daima ürün etiketini kontrol ediniz (Shaner, 2014; University of Hertfordshire, 2023; Zimdahl, 2018).

KAYNAKLAR

- Gunsolus, J. L., & Curran, W. S. (Eds.). (2016). *Weed science and management: An applied approach*. University of Minnesota Libraries Publishing. <https://open.lib.umn.edu/weedscience/>
- Oerke, E.-C. (2006). Crop losses to pests. *The Journal of Agricultural Science*, 144(1), 31–43. <https://doi.org/10.1017/S0021859605005708>
- PPDB: Pesticide Properties DataBase. (2023). *Agriculture & Environment Research Unit (AERU)*. University of Hertfordshire. <https://sitem.herts.ac.uk/aeru/ppdb/en/index.htm>
- Shaner, D. L. (2014). *Herbicide handbook* (10th ed.). Weed Science Society of America.
- University of Hertfordshire. (2023). *PPDB: Pesticide Properties DataBase*. Agriculture & Environment Research Unit (AERU). <https://sitem.herts.ac.uk/aeru/ppdb/en/index.htm>
- Zimdahl, R. L. (2018). *Fundamentals of weed science* (5th ed.). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/C2016-0-04225-3>

BÖLÜM 6

SÜRDÜRÜLEBİLİR TOPRAK YÖNETİMİ İÇİN ARAZİ BOZULUMUNUN DENGELENMESİ YAKLAŞIMI

Prof. Dr. Mesut BUDAK¹⁰

Prof. Dr. Hikmet GÜNAL¹¹

DOI: <https://www.doi.org/10.5281/zenodo.18108971>

¹⁰ Siirt Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Toprak Bilimi ve Bitki Besleme Bölümü, Siirt

¹¹ Harran Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Toprak Bilimi ve Bitki Besleme Bölümü,
Şanlıurfa

1. GİRİŞ

Günümüzde hızla artan nüfus, gıda güvenliği ve ekonomik kalkınma gereksinimleri, arazi kaynaklarına olan talebi artırırken; bu kaynakların sağlığı ve üretkenliğinin sürekli olarak gerilemesine ve küresel anlamda arazi bozulmasının ortaya çıkmasına neden olmaktadır. Bu küresel sorun karşısında, sürdürülebilir arazi yönetimi anlayışına dayanan arazi tahribatının dengelenmesi (ATD), yaklaşımı, bozulmuş arazilerin yeniden kazanımını ve mevcut arazilerin korunmasını hedefleyen temel bir strateji olarak öne çıkmaktadır (Cowie ve ark., 2018; Feng ve ark., 2022; Gunawardena ve ark., 2024). Arazi Tahribatının Dengelenmesine yönelik bilimsel kavramsal çerçeve, ATD'nin planlanması, uygulanması ve izlenmesine bilimsel bir temel sağlamak amacıyla geliştirilmiştir. Bu çerçeve, Birleşmiş Milletler Çölleşme ile Mücadele Sözleşmesi'nin (UNCCD) Bilim-Politika Arayüzü tarafından, farklı disiplinlerden uzmanların katkılarıyla oluşturulmuş bilim temelli bir yaklaşımdır. Bu yaklaşımda araziye dayalı doğal sermayenin ve buna bağlı ekosistem hizmetlerinin korunması veya iyileştirilmesi amaçlanmaktadır (Cowie ve ark., 2018). Bu yaklaşımın ortaya çıkmasının en önemli nedenlerinden biri arazi bozulmasından kaynaklanan ekonomik kayıplardır. Zira Nkonya ve ark. (2016) tarafından yayınlanan bir çalışmada arazi bozulmasından kaynaklanan ekonomik kaybın yıllık 300 milyar dolar olduğu bildirilmiştir. Arazi bozulmasına karşı önlem alınmanın maliyetinin, hiçbir önlem almamanın maliyetinden çok daha düşüktür. Bozulmuş arazilerin restorasyonuna yapılan her 1 ABD dolarlık yatırımın yaklaşık 5 ile 12 ABD doları arasında bir kazanç sağladığını farklı araştırmacılar rapor etmiştir (Nkonya ve ark., 2016; Laamouri ve Khattabi, 2025). Bu durum, arazi bozulmasının dengelenmesi yaklaşımını daha fazla ön plana çıkarmaktadır.

2. ARAZİ BOZULMASI VE KÜRESEL DÜZEYDE OLUŞTURDUĞU EKONOMİK KAYIP

Arazi bozulması, farklı disiplinlerde çeşitli teorik ve metodolojik yaklaşımlarla ele alınan çok boyutlu bir kavramdır. Disiplinler arası bu çeşitlilik, kavramın kapsamı ve bileşenleri konusunda literatürde farklı görüşlerin oluşmasına yol açsa da, çoğu çalışma arazi bozulmasının genel doğası konusunda ortak bir anlayışa sahiptir (AbdelRahman, 2023). Zira ekolojik açıdan arazi bozulması; bir ekosistemin biyolojik üretkenliğinde, tür çeşitliliğinde ve ekolojik işlevlerinde meydana gelen azalmayı (Ekka ve ark., 2024) ifade ederken, tarımsal üretim perspektifinden bakıldığında, iklimsel değişim ve insan baskısı sonucu toprağın verimliliğini ve sürdürülebilir üretim kapasitesini azaltan süreçler olarak değerlendirilmektedir (Henry ve ark., 2007; Sivakumar, ve Stefanski, 2007). Bu bağlamda, genel bir tanım olarak arazi bozulması, iklim değişikliği, insan kaynaklı baskılar ve doğal süreçlerin etkisiyle arazilerin biyolojik üretkenlik ve ekonomik kapasitesinde meydana gelen uzun vadeli azalma olarak tanımlanmaktadır (Hermans-Neumann ve ark., 2017; Farshad ve ark., 2018; Talukder ve ark., 2021; Feng ve ark., 2024; Mandal and Roy, 2024).

Doğal kaynakların sürdürülebilir kullanımını tehdit eden bu süreç, çevresel, ekonomik ve sosyal boyutlarıyla karmaşık bir yapıya sahiptir (Gunawardena ve ark., 2024). Arazi bozulması, tarımsal üretkenlik, çevre, gıda güvenliği ve yaşam kalitesi üzerindeki olumsuz etkileri nedeniyle 21. yüzyılın önemli küresel sorunlarından biri olmaya devam etmektedir (Eswaran ve ark., 2019). Arazi bozulmasının en bilenen nedenleri, kuraklık (Hermans ve McLeman, 202), toprak erozyonu (Weeraratna, 2022), aşırı toprak işleme (Çelik ve ark., 2021), yanlış sulama uygulamaları (Hillel ve ark., 2008; Alsamarrai ve ark., 2023), aşırı otlatma (Kairis ve ark., 2015; Slayi ve ark., 2024), ormansızlaşma (Mahata ve Sharma, 2021; Kumar ve ark., 2024), aşırı pestisit kullanımı (Nath ve ark., 2023) ve madencilik ve kentleşmedir (Pandey

ev ark., 2022; Ekka ve ark., 2023; Du ve ark., 2024). Bu faktörlerin ortak etkisi, toprağın fiziksel, kimyasal ve biyolojik özelliklerinde bozulmalara yol açarak ekosistemlerin sürdürülebilirliği ve insan refahı için gerekli olan hizmetlerinin sunumunun aksamasına neden olmaktadır. Arazi bozulması yalnızca ekolojik dengeyi değil, aynı zamanda tarımsal üretkenliği ve ekonomik kalkınmayı da olumsuz yönde etkilemektedir. Birçok araştırma, toprak verimliliğindeki azalmanın özellikle erozyon ve çölleşme süreçleriyle doğrudan ilişkili olduğunu ortaya koymaktadır. Weeraratna (2022), dünya genelinde, özellikle kırsal topluluklarda yaşayan yaklaşık 3,2 milyar insanın arazi bozulmasından dolaylı veya direk olarak etkilendiğini bildirmiştir. Eswaran ve ark. (2019) tarafından yapılan bir çalışmada, toprak erozyonu ve çölleşme nedeniyle bazı toprakların verimliliğinin %50 oranında azaldığı bildirilmiştir. Araştırmacılar, Afrika’da toprak erozyonu nedeniyle verim kaybının %2 ile %40 arasında değiştiğini, kıta genelinde ise verim kaybının % 8.2 olduğunu rapor etmiştir. Güney Asya’da ise su erozyonu nedeniyle yıllık verim kaybının yaklaşık 36 milyon ton tahıl eşdeğerine, rüzgar erozyonu nedeniyle oluşan ekonomik kaybın ise 5.4 milyar ABD doları civarında olduğu bildirilmiştir. Aynı çalışmada, ABD’de tarımsal faaliyetlerden kaynaklanan erozyonun toplam yıllık maliyetinin yaklaşık 44 milyar ABD doları, yani hektar başına yaklaşık 247 ABD doları olduğu bildirilmiştir. Küresel ölçekte ise yılda yaklaşık 75 milyar ton toprak kaybı olduğu ve bunun dünya ekonomisine yaklaşık 400 milyar ABD doları maliyet getirdiği rapor edilmiştir.

Mirzabaev ve von Braun (2022) tarafından yayımlanan “Gıda ve Arazi Bozulmasının Gerçek Maliyeti” adlı çalışmada, 2001–2009 yılları arasında küresel ölçekte tarım alanlarının genişlemesine bağlı olarak meydana gelen ekosistem bozulmalarının çevresel maliyetleri incelenmiştir. Araştırmacılar, artan gıda talebinin etkisiyle tarım alanlarının genişlediğini ve bunun sonucunda dünya genelinde yaklaşık 511 milyon hektar yüksek değerli orman, çalılık, fundalık ve otlak ekosisteminin bozulduğunu bildirmiştir. Bu arazi

kullanım değişimlerinin toplam ekonomik maliyeti 435 milyar ABD doları olarak hesaplanmış; bu da yalnızca tarım alanlarının genişlemesinden kaynaklanan dışsallık maliyetlerinin her yıl küresel ölçekte yaklaşık 54 milyar ABD doları olduğunu göstermektedir. Başka bir çalışmada, arazi bozulmasından kaynaklanan üretkenlik kayıpları, biyolojik çeşitliliğin azalması ve su kirliliği nedeniyle yıllık 10 trilyon ABD dolarını aşan küresel ekonomik maliyetler oluşturduğu bildirilmiştir. Aynı çalışmada Mali’de arazi bozulmasının görüldüğü alanlarda restorasyon girişimi gibi sürdürülebilir yönetim projeleri sonucunda, yatırılan her 1 ABD doları için 12 ABD doları getiri sağlandığı bildirilmiştir (Laamouri ve Khattabi, 2025). Benzer şekilde Nkonya ve ark. (2016), bozulmuş arazilerin restorasyonuna yapılan her 1 ABD doları için 5 ABD doları getiri sağlandığını bildirmiştir.

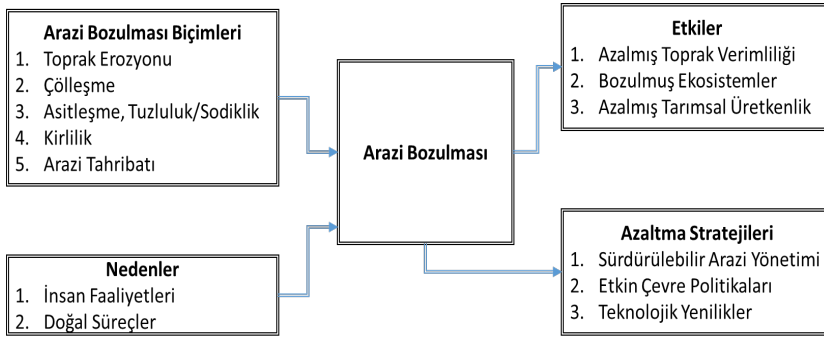
UNCCD tarafından yayımlanan “Turkey Land Degradation Neutrality Target Setting Report” (2019) verilerine göre, Türkiye’de 2000–2010 yılları arasında yaklaşık 10.140 km² alanda arazi bozulmasının görüldüğü bildirilmiştir. Aynı raporda arazi bozulması konusunda önlem almak isteyen Türkiye’nin, arazi bozulmasının dengelenmesi kapsamında 2030 yılına kadar toplam 274.558 km² alanı rehabilitasyonunu hedeflediği bildirilmiştir. Bu hedef doğrultusunda; ağaçlandırma, toprak koruma, mera ıslahı, arazi toplulaştırması, sulama alanlarının genişletilmesi ve maden sahalarının rehabilitasyonu gibi faaliyetler planlanmıştır. Arazi tahribatının dengelenmesi kapsamında öngörülen toplam yatırım miktarı 18.78 milyar ABD doları olup, bu rakam güncel döviz kuru üzerinden yaklaşık 788 milyar TL düzeyindedir. Bu bütçe ile Türkiye, 2030 yılına kadar bozulmuş alanların üretkenliğini geri kazanarak, ekosistem hizmetlerinin sürdürülebilirliğini sağlamayı amaçlamaktadır (UNCDD, 2016). Ayrıca yapılacak her 1 dolara karşılık minimum 5 dolar kazanç (Nkonya ve ark., 2016) göz önüne alındığında Türkiye’nin rehabilitasyon sonucu sağlayacağı kazancın yaklaşık 3.94 trilyon olacağı tahmin edilmektedir.

Yapılan bilimsel çalışmalar, arazi bozulmasından kaynaklanan ekonomik kayıpların, doğal sermaye stoklarını tükettiği ve ekosistemlerin sunduğu hizmetleri ciddi ölçüde zayıflattığını ortaya koymaktadır. Zira bu durum, sürdürülebilir kalkınma amaçlarına ulaşmayı da önemli ölçüde tehlikeye atmaktadır. Bu nedenle arazi varlıklarının etkili bir şekilde yönetilmesi, toprağın üretkenliğinin muhafaza edilmesi ve sürdürülebilirliğinin sağlanması ve ekolojik faydaların kesintisiz sürmesi için sürdürülebilir arazi yönetim stratejilerini benimsenmesi zorunluluk haline gelmiştir.

3. ARAZİ BOZULMASINI AZALTMA STRATEJİLERİ

Arazi bozulması hem doğal süreçlerin hem de insan faaliyetlerinin etkisiyle toprak üretkenliğinin azalmasına, ekosistem dengesinin bozulmasına ve tarımsal verimliliğin düşmesine yol açan karmaşık bir süreçtir (Şekil 1). Bu bozulma genellikle; toprak erozyonu ile oluşan yetersiz toprak derinliği, çölleşme, asitlenme, tuzlanma, sodyum birikimi, kirlilik ve fiziksel arazi tahribatı gibi farklı şekillerde kendini göstermektedir. Bu olumsuz koşullar, sadece toprakların verimliliğini düşürmekle kalmayıp, ekosistem hizmetlerinin sunumunun zayıflamasına ve küresel gıda üretim potansiyelinin tehlikeye girmesine yol açmaktadır (Jayaraman ve ark, 2024).

Arazi bozulmasının önüne geçilmesi ve ortaya çıkan etkilerin minimize edilmesi adına; sürdürülebilir arazi yönetim tekniklerinin benimsenmesi, etkin çevre politikalarının oluşturulması ve teknolojik gelişmelerin tarım ile çevre yönetimi süreçlerine dâhil edilmesi kritik bir öneme sahiptir. Bu yaklaşımlar, mevcut doğal kaynakların muhafaza edilmesini ve gelecek nesiller için arazi kullanımının kalıcı olarak sürdürülebilirliğini sağlamayı hedeflemektedir (Rao ve ark., 2023; Jayaraman ve ark, 2024; Yan ve ark., 2024).



Şekil 1. Arazi bozulması biçimleri ve azaltma stratejileri (Jayaraman ve ark., 2024).

Arazi bozulmasıyla mücadele, gıda ve beslenme güvenliğinin, çevre kalitesinin ve sosyo-ekonomik ilerlemenin iyileştirilmesi açısından hayati öneme sahiptir. Arazi bozulmasıyla mücadele çalışmaları 20. yüzyılın ortalarında başlamıştır. İlk çalışmalar daha çok erozyon kontrolü ve toprak koruma önlemleri üzerine yoğunlaşırken (Mermut ve ark., 2001), günümüzde bu çalışmalar ekosistem temelli yaklaşımlar, sürdürülebilir arazi yönetimi, biyolojik çeşitliliğin korunması ve iklim değişikliğine uyum stratejilerini de kapsayacak şekilde genişlemiştir (Kust ve ark., 2017; Mahata ve ark., 2021; Lanfredi ve ark., 2022). 1970’li yıllardan itibaren artan çevresel farkındalık rehabilitasyon, yeniden ağaçlandırma ve sürdürülebilir tarım uygulamalarının öne çıkmasını sağlamıştır. Daha sonra Birleşmiş Milletler Çölleşmeyle Mücadele Sözleşmesi (UNCCD) ile arazi bozulması 1990’lı yıllarda küresel bir politika konusu hâline gelmiş, bu dönemden sonra sadece önleme değil, bozulmuş alanların iyileştirilmesi ve ekosistem hizmetlerinin yeniden kazandırılması da hedeflenmiştir (Mani ve ark., 2021; Chaudhuri ve ark., 2023). Günümüzde ise bu yaklaşımlar “Arazi Tahribatının Dengelenmesi (ATD)” kavramı altında bütünleştirilmiştir. ATD, mevcut arazi kaynaklarının sürdürülebilir biçimde kullanılması, bozulmanın önlenmesi ve kaçınılmaz bozulmaların restorasyon çalışmalarıyla dengeye getirilmesi esasına dayanır. Böylece, net arazi kaybının sıfırlandığı, üretkenliğin korunduğu ve ekosistem

fonksiyonlarının sürdürülebilir şekilde devam ettiği bir denge hedeflenmektedir (Mani ve ark., 2021; Mikhailova ve ark., 2024)

4. ARAZİ TAHRİBATININ DENGELENMESİ (ATD)

Doğal kaynakların aşırı ve yanlış kullanımı sonucu ortaya çıkan arazi bozulmasının, biyoçeşitlilik, ekosistem üretkenliği ve iklim stabilitesi üzerindeki olumsuz etkileri 1992 yılında Rio zirvesinde Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi (UNFCCC), Biyolojik Çeşitlilik Sözleşmesi (CBD) ve UNCCD kapsamında gündeme gelmiştir. Bu sözleşmeler toprak, iklim ve biyolojik çeşitlilik arasındaki karmaşık etkileşimleri dikkate alarak, arazi bozulmasının yalnızca ekolojik değil, aynı zamanda sosyo-ekonomik boyutları olan çok yönlü bir süreç olduğu vurgulamaktadır ve arazi bozulması ile mücadelenin kaçınılmaz olduğu belirtilmektedir (Kust ve ark., 2017). Bu bağlamda arazi bozulması ile mücadelede, Sürdürülebilir Arazi Yönetimi (SAY), arazi bozulmasını önlemenin, azaltmanın ve tersine çevirmenin en etkili yolu olarak kabul edilmiştir. Ancak, ülkeler arasındaki farklı sosyo-ekonomik koşullar, kurumsal kapasite eksiklikleri ve politika uygulama yetersizlikleri nedeni ile, sürdürülebilir arazi yönetimi uygulamaları beklenen düzeyde yaygınlaşamamıştır. Bu durum, arazi bozulmasına karşı küresel düzeyde daha kapsamlı ve ölçülebilir bir yaklaşım geliştirilmesini gerekli kılmıştır (Kust ve ark., 2017; Haregeweyn ve ark., 2019; Lingier ve ark., 2019; Mishra ve ark., 2024).

Bu bağlamda, öncelikle “sıfır net arazi bozulması (zero net land degradation)” kavramı 2012 yılında Birleşmiş Milletler Sürdürülebilir Kalkınma Konferansı’nda (Rio+20) gündeme getirilmiştir (UNCCD, 2012). Daha sonra Ekim 2015’te, UNCCD’nin 12. Taraflar Konferansı (COP12) “sıfır net arazi bozulması” kavramına dayanarak ATD ilkesi benimsenmiştir (UNCCD, 2015; Feng ve ark., 2022). ATD ilkesinde, arazi bozulmasının tamamen ortadan kaldırılması değil, bozulan alanların restorasyonu veya

rehabilitasyonu yoluyla arazi sermayesindeki net kaybın önlenmesi amaçlanmıştır. Başka bir ifade ile belirli bir lokasyonda meydana gelen arazi sermayesi kayıplarının, eşdeğer iyileştirme veya rehabilitasyon müdahaleleri ile nötralize edilmesi temel alınmıştır (Kust ve ark., 2017; Feng ve ark., 2022). Böylece UNCCD, ATD yaklaşımını benimseyerek arazi kaynaklarının sürdürülebilir yönetimini teşvik eden, bozulmuş ekosistemlerin onarımını destekleyen ve arazi, iklim ile biyolojik çeşitlilik arasındaki bütünlük ilişkisini güçlendiren küresel bir politika çerçevesine dönüşmüştür.

ATD, arazi üretkenliği, toprak karbon stoğu ve arazi örtüsü gibi göstergeler temelinde, bozulmuş ve iyileştirme arasındaki dengeyi sağlamayı da amaçlamaktadır. Cowie ve ark. (2018), ATD kavramını, ekosistem işlevlerini ve hizmetlerini desteklemek, gıda güvenliğini artırmak ve arazi kaynaklarının niceliğini ve kalitesini belirli mekânsal ve zamansal ölçeklerde sabit tutmak veya artırmak hedefi üzerine kurulu bir yaklaşım olarak rapor etmiştir. ATD, hem arazi bozulmasını önlemeyi hem de bozulmuş alanların iyileştirilmesine yönelik eylemleri bir arada değerlendirmektedir. Kavramın temelinde yer alan “denge” yaklaşımı, bir referans duruma kıyasla doğal sermayede net bir kaybın olmaması anlamına gelmektedir. Bu yaklaşım, bozulan alanların restorasyonu veya iyileştirilmesiyle sağlanan kazanımların, yeni arazi bozulumu süreçlerinden kaynaklanan kayıpları dengelemesini esas alır (Kust ve ark., 2017).

4.1.1. ATD Kavramsal Çerçevesi

ATD kavramsal çerçevesi, uygulama sürecini yönlendiren beş modülden oluşmaktadır. Bunlar; **ATD Vizyonu:** Kara temelli doğal sermayenin insan refahını destekleyecek şekilde korunabileceği veya artırılabilirliği düşüncesine dayanır. **Referans Çerçevesi:** ATD’nin başlangıç düzeyini veya temel çizgisini belirler. Bu çizgi genellikle SDG 15.3 hedefinden önceki 15 yıllık dönemin ortalaması olarak kabul edilmekle birlikte, bazı araştırmacılar bu yaklaşımın sınırlı olduğunu ve “optimal durum” kavramının kullanılmasının

daha uygun olacağını savunmaktadır. **Denge Mekanizması:** Bozulmuş ve restore edilmiş alanlar arasındaki dinamik dengeyi açıklar. “Benzer ile benzerin değiştirilmesi” ilkesi gereğince, dengeleme işlemi benzer arazi türleri arasında yapılmalıdır. **Dengeye Ulaşma:** ATD’nin gerçekleştirilebilmesi için sürdürülebilir arazi yönetimi uygulamaları, topluluk katılımı, kurumsal iş birliği ve entegre planlama süreçlerini içerir. **Dengenin İzlenmesi:** ATD göstergelerinin takibini kapsar. Bu göstergeler; arazi örtüsü, arazi üretkenliği (NPP) ve toprak organik karbon stokları (TOKS) olmak üzere üç temel bileşenden oluşur (Cowie ve ark., 2018; Chasek ve ark., 2019; Briassoulis, 2025).

4.1.2. ATD Kavramsal Çerçevesinin Uygulama İlkeleri

Arazi Tahribatının Dengelenmesi (ATD) ilkeleri, ATD uygulama sürecini yönlendiren 19 temel prensipten oluşmaktadır. Birleşmiş Milletler Çölleşme ile Mücadele Sözleşmesi (UNCCD) tarafından belirlenen bu ilkeler, ATD’nin olumlu sonuçlar doğurmasını sağlamak ve uygulama sürecinde ortaya çıkabilecek istenmeyen ya da olumsuz etkileri önlemek veya en aza indirmek amacıyla geliştirilmiştir (UNCCD, 2025).

Bu ilkeler:

1. **Araziye dayalı doğal sermayeyi korumak veya artırmak:** LDN, küresel çevresel değişimin etkilerine rağmen araziye dayalı doğal sermayenin miktarı ve kalitesi sabit kaldığında veya arttığında başarılmış olur.
2. **İnsan haklarını korumak ve insan refahını artırmak:** LDN kapsamında alınan önlemler, arazi kullanıcılarının (özellikle küçük ölçekli çiftçiler ve yerli halkların) haklarını zedelememelidir. Bu önlemler geçim kaynaklarını desteklemeli, arazinin üretim kapasitesini veya kültürel değerini azaltmamalıdır.

3. **Ulusal egemenliğe saygı göstermek:** Hükümetler, küresel düzeydeki hedefler doğrultusunda ancak ulusal koşulları dikkate alarak kendi ulusal hedeflerini belirler. LDN hedeflerinin ulusal planlama süreçlerine, politikalara ve stratejilere nasıl dahil edileceğine yine hükümetler karar verir.
4. **LDN hedefi, başlangıç çizgisine eşittir:** Dengeyi koruyabilmek için, başlangıç durumu (LDN kavramsal çerçevesinin uygulamaya konduğu zamandaki, küresel olarak kabul edilen göstergelere göre ölçülen araziye dayalı doğal sermaye) hedef olarak alınır.
5. **Nötrlük genellikle asgari hedeftir:** Ülkeler, başlangıç çizgisinin üzerinde bir hedef belirleyebilirler. Bu durumda amaç, doğal sermayeyi artırmak ve sağlıklı, verimli arazi miktarını çoğaltmaktır. Nadir durumlarda, geçmişteki kararlar nedeniyle önlenemeyen bozulma süreçlerini kabul ederek kayıpların kazanımlardan fazla olacağı bir hedef de belirlenebilir.
6. **Entegre arazi kullanım planlaması ilkesi:** Nötrlük mekanizması, arazi kullanım kararlarını “net kayıp yok” hedefiyle ilişkilendiren entegre bir planlama çerçevesine dayanmalıdır.
7. **Doğal sermayedeki öngörülen kayıplar aynı zaman diliminde kazanımlarla dengelenmelidir:** LDN, bir alandaki kayıpların aynı arazi tipinde başka bir yerde planlı kazanımlarla dengelenmesiyle sağlanabilir.
8. **Dengeleme, arazi kullanım planlamasıyla aynı ölçekte yürütülmelidir:** Dengeleme süreci, kararların alındığı biyofiziksel veya idari düzeyde, ulusal ya da alt ulusal sınırlar içinde gerçekleştirilmelidir.
9. **“Benzerle benzer” dengelemesi yapılmalıdır:** Dengeleme, mümkün olduğunca aynı ekosistem tipi içinde yapılmalıdır. Farklı ekosistemler arasında dengeleme ancak araziye dayalı doğal

sermayede net kazanç varsa kabul edilebilir. Bu konuda açık kurallar belirlenmelidir.

10. Ekonomik, sosyal ve çevresel sürdürülebilirlik dengelenmelidir:

LDN, tüm ekosistem hizmetlerinin kalitesini korumayı veya artırmayı amaçlar. Çevresel, ekonomik ve sosyal çıktılar arasında denge kurarak sürdürülebilir kalkınmaya katkıda bulunur.

11. Arazi kullanım kararları çok değişkenli değerlendirmelere dayanmalıdır: Arazi potansiyeli, arazi durumu, direnç, sosyal, kültürel ve ekonomik faktörler (cinsiyet dahil) dikkate alınmalıdır. Müdahalelerden önce yerel düzeyde doğrulanmalıdır.

12. Müdahale hiyerarşisini uygulamak: LDN planlamasında “Önle > Azalt > Geri çevir” hiyerarşisi izlenmelidir. Önleme ve azaltma, geçmiş bozulmaları tersine çevirmeye göre önceliklidir.

13. Katılımcı süreçleri uygulamak: LDN planlama ve uygulama süreçleri, özellikle arazi kullanıcılarının dahil olduğu, yerel, geleneksel ve bilimsel bilginin harmanlandığı katılımcı süreçlere dayanmalıdır. Süreç cinsiyet duyarlı olmalı ve bilgiye eşit erişimi sağlamalıdır.

14. İyi yönetim ilkelerini uygulamak: LDN’nin temeli iyi yönetişimdir. Bu kapsamda: **a.** Kötü arazi yönetimine yol açan politika unsurları kaldırılmalıdır. **b.** Mülkiyet ve kullanım haklarının güvenceye alınması için gönüllü iyi yönetim rehberleri uygulanmalıdır. **c.** İnsan ve ekonomik kaynakların etkin kullanımı sağlanmalıdır. **d.** Uygulamanın izlenmesi ve raporlanması için mekanizmalar oluşturulmalıdır. **e.** Arazi kullanım planlamasında sektörler arası koordinasyon ve hesap verebilirlik sağlanmalıdır.

15. Üç temel arazi göstergesini kullanmak: LDN’nin küresel düzeyde kabul edilen asgari göstergeleri şunlardır: **a.** Arazi örtüsü değişimi, **b.**

Arazi üretkenliği (Net Birincil Üretim - NPP) c. Toprak Organik Karbonu - TOK).

16.Üç göstergenin bütünleştirilmesi “tek olumsuz, hepsi olumsuz”

yaklaşımına dayanır: Bu üç göstergeden herhangi biri olumsuz bir değişim gösterirse kayıp kabul edilir. Hiçbiri olumsuz değişim göstermiyorsa ve en az biri olumlu değişim gösteriyorsa kazanç kabul edilir.

17.Ulusal ve alt ulusal düzeyde ek göstergeler kullanılmalıdır: Bu göstergeler, ekosistem hizmetlerinin daha kapsamlı değerlendirilmesine yardımcı olur.

18.Yerel bilgilerin kullanımı: Yerel paydaş platformları aracılığıyla elde edilen yerel bilgiler, izleme verilerinin yerel bağlamda yorumlanmasına yardımcı olmalıdır.

19.İzleme, bir öğrenme süreci olarak görülmelidir: İzleme, kapasite geliştirme, uygulama sonuçlarının değerlendirilmesi ve adaptif yönetim için bilgi üretme işlevi görür.

4.2. Arazi Tahribatının Dengelemesi Kapsamında Restorasyon

Maliyetleri

Arazi restorasyonu arazi bozulmasının önlenmesi, iklim değişikliğinin azaltılması ve biyolojik çeşitliliğin korunmasında kilit bir rol oynamaktadır. Birleşmiş Milletler Ekosistem Restorasyonu On Yılı (2021–2030) kapsamında dünya genelinde 765 milyon ila 1 milyar hektarlık alanın restorasyonu hedeflenmiştir. FAO ve UNCCD’ye göre 2030 yılına kadar bunun gerçekleşebilmesi için yıllık 36–49 milyar ABD doları, arazi bozulmasının nötr hale getirilmesi içinde 15 yıl boyunca yıllık 318 milyar ABD doları yatırım gerektiği bildirilmiştir (Verhoeven ve ark., 2024). Birçok araştırma, restorasyon çalışmalarının maliyetlerinin, her bir hektar arazi için uygulanan restorasyon süreci ve yöntemle bağlı olarak önemli ölçüde farklılık gösterdiğini ortaya koymuştur. Bu farklılıkların temel nedeni, restorasyon yaklaşımlarının

bölgesel koşullara, ekolojik özelliklere ve arazi kullanım biçimlerine göre değişkenlik göstermesidir. Dolayısıyla, restorasyon maliyetleri; uygulanan teknik, arazi tipolojisi, iklimsel faktörler ve yerel sosyoekonomik koşullar gibi unsurlardan güçlü bir şekilde etkilenmektedir (Verdone ve Seidl, 2017; Brancalion ve ark., 2019; Knight ve Overbeck, 2021; Verhoeven ve ark., 2024). Verhoeven ve ark. (2024), 243 restorasyon projesine ait analiz sonuçlarını göz önünde bulundurarak ortalama restorasyon maliyetlerini belirlemiştir. Araştırmacılar restorasyon maliyetinin arazi kullanımı ve mücadele yöntemine göre 185 ABD doları/ha (**orman yönetimi**) ile 3012 ABD doları/ha (**silvopastur -sürdürülebilir tarım ile ormancılığı birleştiren entegre bir sistem-uygulamaları**) arasında değiştiğini bildirmiştir. Türkiye, Arazi Bozulmasının Nötr Hale Getirilmesi Ulusal Raporu'na göre 2030 yılında kadar yaklaşık 27.5 milyon hektar arazinin restore edileceği ve bunun için yaklaşık 18.78 milyar dolar harcanacağı bildirilmiştir. Bu rapora göre restorasyon maliyeti hektar başına ortalama 682.91 dolar olarak belirlenmiştir. Restorasyon çalışmalarının yürütüleceği alanlar arasında ormanlık alanları (660 dolar/ha), madencilik alanları (10 bin dolar/ha ve mera alanları (200 dolar/ha) yer almaktadır. Ayrıca ülke genelinde büyük tarımsal potansiyele sahip ovaların belirlenmesi ve tarım arazisi olarak tescil edilmesi (0.05 dolar/ha) çalışmalarının da tamamlanacağı bildirilmiştir. (UNCCD, 2016).

5. SONUÇ

Arazi Tahribatının Dengelenmesi, Birleşmiş Milletler Çölleşme ile Mücadele Sözleşmesi kapsamında, Sürdürülebilir Kalkınma Hedefi (SKH) 15.3'ün gerçekleştirilmesine kritik katkı sağlayan, küresel düzeyde gönüllü olarak benimsenmiş temel bir araçtır. Bu mekanizma, ülkeleri kara ekosistemlerini korumaya, bozulmuş arazileri restore etmeye, sürdürülebilir arazi kullanımını teşvik etmeye ve biyolojik çeşitliliği korumaya yönlendirmektedir. ATD'nin etkin bir şekilde uygulanabilmesi için sadece bozulmuş alanların restorasyonu yeterli değildir. Aynı zamanda arazi

bozulmasına neden olan fiziksel, kimyasal ve biyolojik etmenlerin belirlenmesi ve hedeflenmesi şarttır. Bu süreç, arazi bozulmasının kısa ve uzun vadeli etkilerini anlamak, izlemek ve maliyet-etkin önlemler geliştirmek amacıyla modellerin ve nicel ekonomik analizlerin entegrasyonunu zorunlu kılmaktadır.

ATD uygulamaları, karbon nötrlüğü hedefleri ve diğer çevresel ve ekonomik sektörlerle güçlü sinerjiler oluşturma potansiyeline sahiptir. Bu sinerjiler sayesinde, tarımsal üretim, ekosistem hizmetleri ve geçim kaynakları üzerinde çok boyutlu faydalar sağlanabilmektedir. 2030 yılı itibarıyla dünya genelinde birçok ülke, ATD (LDN) hedeflerini gönüllü olarak belirlemiş ve uygulamaya yönelik ulusal stratejiler geliştirmiştir. Ancak, veri eksiklikleri, finansman sınırlamaları ve uygulama kapasitesi farklılıkları hedeflere ulaşmayı önemli ölçüde zorlaştıran temel engeller olarak durmaktadır. Bu nedenle, ATD'nin başarısı; kapsamlı durum analizleri, politika ve izleme sistemlerinin güçlendirilmesi, yerel ve küresel ölçekte koordineli ve sinerji odaklı eylemlerle sağlanabilir. Bu yaklaşım, arazi bozulmasını önlerken üretken toprakların sürdürülebilirliğini güvence altına alacak, böylece karbon nötrlüğü ve biyolojik çeşitlilik koruma gibi uluslararası hedefleri de destekleyecektir.

KAYNAKLAR

- AbdelRahman, M. A. (2023). An overview of land degradation, desertification and sustainable land management using GIS and remote sensing applications. *Rendiconti Lincei. Scienze Fisiche e Naturali*, 34(3), 767-808.
- Alsamarrai, H. R. A., & Al-Ajeeli, S. A. Y. (2023, December). The Wrong Agriculture Practices of Field Crop Farmers Leading to Land Agricultural Deterioration in Samarra District-Salah Al-Din Governorate. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 1262, No. 8, p. 082031). IOP Publishing.
- Brancalion, P. H., Niamir, A., Broadbent, E., Crouzeilles, R., Barros, F. S., Almeyda Zambrano, A. M., ... & Chazdon, R. L. (2019). Global restoration opportunities in tropical rainforest landscapes. *Science advances*, 5(7), eaav3223.
- Briassoulis, H. (2025). Land Use Planning for Land Degradation Neutrality: Reflections and Critical Challenges. *Land Degradation & Development*, 36(3), 975-1001.
- Chaudhuri, S., Roy, M., McDonald, L. M., & Emendack, Y. (2023). Land degradation–desertification in relation to farming practices in India: An overview of current practices and agro-policy perspectives. *Sustainability*, 15(8), 6383.
- Chasek, P., Akhtar-Schuster, M., Orr, B. J., Luise, A., Ratsimba, H. R., & Safriel, U. (2019). Land degradation neutrality: The science-policy interface from the UNCCD to national implementation. *Environmental Science & Policy*, 92, 182-190.
- Cowie, A. L., Orr, B. J., Sanchez, V. M. C., Chasek, P., Crossman, N. D., Erlewein, A., ... & Welton, S. (2018). Land in balance: The scientific conceptual framework for Land Degradation Neutrality. *Environmental science & policy*, 79, 25-35.

- Celik, I., Günal, H., Acir, N., Barut, Z. B., & Budak, M. (2021). Soil quality assessment to compare tillage systems in Cukurova Plain, Turkey. *Soil and Tillage Research*, 208, 104892.
- Du, Z., Yu, L., Chen, X., Gao, B., Yang, J., Fu, H., & Gong, P. (2024). Land use/cover and land degradation across the Eurasian steppe: Dynamics, patterns and driving factors. *Science of the Total Environment*, 909, 168593.
- Ekka, P., Patra, S., Upreti, M., Kumar, G., Kumar, A., & Saikia, P. (2023). Land degradation and its impacts on biodiversity and ecosystem services. *Land and environmental management through forestry*, 77-101.
- Eswaran, H., Lal, R., & Reich, P. F. (2019). Land degradation: an overview. *Response to land degradation*, 20-35.
- Feng, S., Zhao, W., Zhan, T., Yan, Y., & Pereira, P. (2022). Land degradation neutrality: A review of progress and perspectives. *Ecological Indicators*, 144, 109530.
- Farshad, A., Pazira, E., & Noroozi, A. A. (2018). Human-induced land degradation. In *The Soils of Iran* (pp. 213-227). Cham: Springer International Publishing.
- Feng, S., Zhao, W., Yan, J., Xia, F., & Pereira, P. (2024). Land degradation neutrality assessment and factors influencing it in China's arid and semiarid regions. *Science of the Total Environment*, 925, 171735.
- Gunawardena, M. A., Lokupitiya, E., & Gunawardena, P. (2024). Land degradation neutrality and carbon neutrality: approaches, synergies, and challenges. *Frontiers in Forests and Global Change*, 7, 1398864.
- Haregeweyn, N., Tsunekawa, A., Tsubo, M., Fenta, AA, Gelaw, KE, Kebede, B., ... ve Yibeltal, M. (2019, Aralık). Küresel SLM'ye genel bakış: dağılımı, başarıları ve başarısızlıkları ve LDN dünyasına ulaşma yönündeki etkileri üzerine bir inceleme. AGU Sonbahar Toplantısı Özetleri'nde (Cilt 2019, s. GC23C-11).

- Hermans-Neumann, K., Priess, J., & Herold, M. (2017). Human migration, climate variability, and land degradation: hotspots of socio-ecological pressure in Ethiopia. *Regional Environmental Change*, 17(5), 1479-1492.
- Hermans, K., & McLeman, R. (2021). Climate change, drought, land degradation and migration: exploring the linkages. *Current opinion in environmental sustainability*, 50, 236-244.
- Hillel, D., Braimoh, A. K., & Vlek, P. L. (2008). Soil degradation under irrigation. In *Land use and soil resources* (pp. 101-119). Dordrecht: Springer Netherlands.
- Jayaraman, S., Naorem, A., Sinha, N. K., Madhu, M., & Dalal, R. C. (2024). Combating land degradation: Global challenge, local solutions. *Indian Journal of Soil Conservation*, 52, 74-84.
- Kairis, O., Karavitis, C., Salvati, L., Kounalaki, A., & Kosmas, K. (2015). Exploring the impact of overgrazing on soil erosion and land degradation in a dry Mediterranean agro-forest landscape (Crete, Greece). *Arid land research and management*, 29(3), 360-374.
- Knight, M. L., & Overbeck, G. E. (2021). How much does it cost to restore a grassland?. *Restoration Ecology*, 29(8), e13463.
- Kumar, R., Kumar, A., & Saikia, P. (2022). Deforestation and forests degradation impacts on the environment. In *Environmental degradation: Challenges and strategies for mitigation* (pp. 19-46). Cham: Springer International Publishing.
- Kust, G., Andreeva, O., & Cowie, A. (2017). Land Degradation Neutrality: Concept development, practical applications and assessment. *Journal of environmental management*, 195, 16-24.
- Laamouri, A., & Khattabi, A. (2025). Estimating the Economic Cost of Land Degradation and Desertification in Morocco. *Land*, 14(4), 837.

- Lanfredi, M., Egidi, G., Bianchini, L., & Salvati, L. (2022). One size does not fit all: A tale of polycentric development and land degradation in Italy. *Ecological Economics*, 192, 107256.
- Liniger, H., Harari, N., van Lynden, G., Fleiner, R., de Leeuw, J., Bai, Z., & Critchley, W. (2019). Achieving land degradation neutrality: The role of SLM knowledge in evidence-based decision-making. *Environmental Science & Policy*, 94, 123-134.
- Mahata, S., & Sharma, V. N. (2021). The global problem of land degradation: A review. *National Geographical Journal of India*, 67(2), 216-231.
- Mandal, D., & Roy, T. (2024). Climate change impact on soil erosion and land degradation. In *Climate change impacts on soil-plant-atmosphere continuum* (pp. 139-161). Singapore: Springer Nature Singapore.
- Mani, S., Osborne, C. P., & Cleaver, F. (2021). Land degradation in South Africa: Justice and climate change in tension. *People and Nature*, 3(5), 978-989.
- Mermut, A. R., & Eswaran, H. (2001). Some major developments in soil science since the mid-1960s. *Geoderma*, 100(3-4), 403-426.
- Mikhailova, E. A., Zurqani, H. A., Lin, L., Hao, Z., Post, C. J., Schlautman, M. A., & Shepherd, G. B. (2024). Possible integration of soil information into land degradation analysis for the United Nations (UN) Land Degradation Neutrality (LDN) Concept: A case study of the contiguous United States of America (USA). *Soil Systems*, 8(1), 27.
- Mirzabaev, A., & Braun, J. V. (2022). True cost of food and land degradation. *Russian Journal of Economics*, 8(1), 1-6.
- Mishra, G., Giri, K., Singh, S., Pangtey, D., & Kumar, M. (2024). Sustainable Land Management: Opportunities and Challenges. *Sustainable Land Management in India*, 1-17.
- Nath, A., Bhuyan, P., Gogoi, N., & Deka, P. (2023). Pesticides and chemical fertilizers: Role in soil degradation, groundwater contamination, and

- human health. In *Xenobiotics in urban ecosystems: Sources, distribution and health impacts* (pp. 131-160). Cham: Springer International Publishing.
- Nkonya, E., Mirzabaev, A., & von Braun, J. (2016). Economics of land degradation and improvement: an introduction and overview. In *Economics of land degradation and improvement—a global assessment for sustainable development* (pp. 1-14). Cham: Springer.
- Pandey, M., Mishra, A., Swamy, S. L., Thakur, T. K., & Pandey, V. C. (2022). Impact of coal mining on land use dynamics and soil quality: Assessment of land degradation vulnerability through conjunctive use of analytical hierarchy process and geospatial techniques. *Land Degradation & Development*, 33(16), 3310-3324.
- Rao, M. C. S., Udayana, S. K., & Swami, D. V. (2023). Achieving land degradation neutrality to combat the impacts of climate change. In *Enhancing resilience of dryland agriculture under changing climate: Interdisciplinary and convergence approaches* (pp. 77-96). Singapore: Springer Nature Singapore.
- Taddese, G. (2001). Land degradation: a challenge to Ethiopia. *Environmental management*, 27(6), 815-824.
- Talukder, B., Ganguli, N., Matthew, R., VanLoon, G. W., Hipel, K. W., & Orbinski, J. (2021). Climate change-triggered land degradation and planetary health: A review. *Land Degradation & Development*, 32(16), 4509-4522.
- Sivakumar, M. V., & Stefanski, R. (2007). Climate and land degradation—an overview. *Climate and land degradation*, 105-135.
- Slayi, M., Zhou, L., Dzvene, A. R., & Mpanyaro, Z. (2024). Drivers and consequences of land degradation on livestock productivity in Sub-saharan Africa: a systematic literature review. *Land*, 13(9), 1402.

- UNCCD, 2012. Zero Net Land Degradation. A Sustainable Development Goal for Rio+20. Erişim Tarihi: 09.11.2025
https://catalogue.unccd.int/58_Zero_Net_Land_Degradation.pdf
- UNCCD, 2016. TURKEY Land Degradation Neutrality National Report 2016-2023. pp:12. Erişim tarihi: 08.11.2025.
https://www.unccd.int/sites/default/files/ldn_targets/turkey-ldn-country-report.pdf
- UNCCD, 2025. Land Degradation Neutrality principles. Erişim Tarihi: 09.11.2025
<https://www.unccd.int/land-and-life/land-degradation-neutrality/ldn-principles>
- Verdone, M., & Seidl, A. (2017). Time, space, place, and the Bonn Challenge global forest restoration target. *Restoration ecology*, 25(6), 903-911.
- Verhoeven, D., Berkhout, E., Sewell, A., & van der Esch, S. (2024). The global cost of international commitments on land restoration. *Land Degradation & Development*, 35(16), 4864-4874.
- Weeraratna, S. (2022). Factors causing land degradation. In *Understanding land degradation: an overview* (pp. 5-22). Cham: Springer International Publishing.
- Yan, Z., Guo, Y., Sun, B., Gao, Z., Qin, P., Li, Y., ... & Cui, H. (2024). Combating land degradation through human efforts: Ongoing challenges for sustainable development of global drylands. *Journal of Environmental Management*, 354, 120254.

BÖLÜM 7

KEKİK ÖZÜTÜ ARACILI ZNO-NANOPARTİKÜLLERİN HİDROJELE ENTEGRASYONU VE TARIMSAL ETKİNLİĞİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ

Prof. Dr. Yağmur UYSAL¹²

Doç. Dr. Zeynep Gökem DOĞAROĞLU^{13*}

DOI: <https://www.doi.org/10.5281/zenodo.18109028>

¹² Mersin Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, Mersin, TÜRKİYE.

¹³ Mersin Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, Mersin, TÜRKİYE.

*gorkemgulmez@mersin.edu.tr, ORCID: 0002-6566-5244

GİRİŞ

Kütle formundaki malzemelerin fiziksel ve kimyasal özelliklerinin değiştirilmesine olanak vermesi nedeniyle nanoteknolojik malzemelerin üretim stratejileri son yıllarda artarak araştırılan bir konudur. Yaşamın hemen her alanına entegre olan nanopartiküllerin (NP) üretim yöntemleri kimyasal (geleneksel) ve biyojenik yöntemler olmak üzere temelde ikiye ayrılmaktadır. Biyojenik nanopartiküller, laboratuvarlarda biyolojik kökenli olarak üretilen malzemeleri nedeniyle ekosistem dostu malzemeler olarak dikkat çekmektedir. Bu nanopartiküllerin biyosentezi kimyasal (geleneksel) yöntemlere kıyasla toksik kimyasalların kullanılmaması, enerji tasarruflu ve ekonomik bir üretim stratejisi olmasıyla avantajlı bir üretim alternatifi olarak öne çıkmaktadır (Chimbekujwo ve ark., 2024).

Bitki özlerinin kullanıldığı yeşil sentez (biyojenik) metodu, bitkilerin bol miktarda bulunabilmesi ve kolay erişilebilirliği nedeniyle sürdürülebilir, ucuz ve çevre dostu bir nanopartikül üretim metodu sunmaktadır. Sentezde kullanılan bitki özlerinde bulunan fitokimyasallar, kütle formundaki metal iyonunu indirgemekte ve üretilen metal iyonunun stabilitesini arttırmaktadır (Ovais ve ark., 2018). Bu alanda yapılmış birçok çalışmada, özellikle çinko oksit (ZnO) nanopartiküllerinin farklı bitki özleri ile üretiminin en temel unsurunun seçilen bitkiye bağlı olarak elde edilen nanopartikül özelliğinin değişim gösterdiği bildirmiştir (Pakzad ve ark., 2019; Potbhare ve ark., 2019; Sone ve ark., 2020). Çinko oksit nanopartikülleri (ZnO-NP), kozmetikten tekstile, ilaç endüstrisinden çevresel iyileştirme uygulamalarına kadar birçok alanda hizmet veren en önemli nanopartiküllerden biridir. Özellikle bitki büyüme ve gelişimini destekleyici bir metal olan çinkonun (Dimpka ve ark., 2012), tarım sektöründe de etkili bir besin elementi ve nano-gübre olarak kullanımı da günümüzde yaygınlaşmaktadır. Bu amaçla üretilen ZnO-NP'ler bitkinin kök bölgesine topraktan uygulama ya da yapraktan spreyleme yolu ile verilebilmektedir. Ancak günümüzde özellikle tarım sektörünün karşı karşıya

kaldığı en önemli problemlerden olan iklim değişikliğine bağlı tarımsal kuraklıkla mücadele kapsamında yeni araştırmalar yapılmakta ve su kıtlığına karşı yeni malzemeler üretilmeye çalışılmaktadır (Sharma ve ark., 2023). Bu amaçla nanopartiküller, besin eksikliklerini gidermek ve özellikle iklim değişikliği nedeniyle su kıtlığı stresine karşı artan direnci desteklemek için hidrojelere entegre edilerek kullanılabilir. Hidrojeller, 3 boyutlu bir ağ yapısına sahip polimerik yapılardır ve son zamanlarda ilgi çekici bir konu haline gelmiştir. Bu hidrofilik maddeler, yüksek biyoyumlulukları ve ayarlanabilir fizikokimyasal özellikleri nedeniyle birçok alanda büyük ilgi görmektedir (Cao ve ark., 2021).

Nanokompozit hidrojel, geliştirilmiş malzeme performansı için her iki bileşenin avantajlarından yararlanarak benzersiz bir hidrojel ve nanomalzeme özellikleri karışımı sunmaktadır (Vashist ve ark., 2018; Dannert ve ark., 2019). Hidrojellerdeki nanopartiküller, çok işlevli bir çapraz bağlayıcı görevi görerek hidrojel oluşumunu kolaylaştırırken, geleneksel hidrojel tipik olarak birden fazla polimerize edilebilir işlevsel gruba sahip bir çapraz bağlayıcının eklenmesini gerektirir (Chakraborty ve ark., 2021; Gholamali ve Yadollahi, 2021; Barrett-Catton ve ark., 2021). Özellikle, farklı boyutlara, şekillere ve işlevselliklere sahip çok çeşitli nanopartikülleri üretilen polimerik ağa doğrudan dahil etmek, hidrojellerin çeşitli morfolojiler almasını ve çoklu aktiviteye sahip olmasını desteklemektedir (Rahman ve ark., 2019; Arno ve ark., 2020). Dolayısı ile nanokompozit hidrojel tarım sektörü başta olmak üzere birçok alanda uygulama potansiyeline sahiptir.

Biyojenik olarak üretilen ZnO nanopartiküllerini içeren hidrojellerin tarımsal üretime etkisinin araştırıldığı bu çalışmada, çevre dostu üretim stratejisi kapsamında yeşil sentez yönteminde kekik bitki özütü kullanılmış ve çinko oksit (ZnO) nanopartikülleri sentezlenmiştir. Bu çalışmada, polivinil alkol/sodyum aljinat (PVA/SA) polimerleri ile oluşturulan polimerik matrise sentezlenen ZnO-NP'ler katkılanarak hidrojel boncukları oluşturulmuştur.

Çinko oksit nanopartiküllü katkılı hidrojellerin, buğday tohumu (*Triticum aestivum* - Adana 99) çimlenmesi, bitki büyüme ve gelişimi üzerindeki etkileri incelenmiştir. Bu çalışma, sürdürülebilir tarım uygulamaları ve iklim değişikliğiyle mücadele kapsamında yeni çözümler üretmeyi amaçlamaktadır.

1. MATERYAL VE YÖNTEM

1.1. Materyal

ZnO-NP sentezinde kullanılan çinko asetat dihidrat ($\text{Zn}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, >%98) ve sodyum hidroksit (NaOH) Sigma-Aldrich firmasından satın alınmıştır. Hidrojel sentezinde kullanılan polivinil alkol (PVA, %92,0-94,0 hidrolize, mw: ~89000-98000) ve sodyum aljinat (SA) analitik saflıkta kullanılmıştır. Kekik (*Thymus vulgaris* L.) bitkisi ve buğday tohumları (*Triticum aestivum* - Adana 99) Mersin İli'nden yerel firmalardan temin edilmiştir.

1.2. Bitki Özütü Hazırlama

Bitki özütünün hazırlanması Abdullah ve ark. (2021) tarafından özetlenen metodolojiden uyarlanarak gerçekleştirilmiştir. Kekik (*Thymus vulgaris* L.) özütü elde etmek için bitkiler ilk olarak musluk suyu ve distile su ile yıkanarak yüzeydeki safsızlıklardan arındırılmış ve kurutulmuştur. 30 g bitki, 450 mL distile su içerisine bırakılarak 80°C'de 30 dakika ısıtılmıştır. Elde edilen bitki özütü oda sıcaklığına kadar soğutulduktan filtr kağıdı kullanılarak iki kez süzölmüştür. Elde edilen bitki özleri daha sonra kullanılmak üzere 4°C'de saklanmıştır.

1.3. ZnO Nanopartiküllerinin Yeşil Sentezi

ZnO-NP'lerin yeşil sentezi Abdullah ve ark. (2020) tarafından bildirilen metoda göre gerçekleştirilmiştir. Buna göre, ilk olarak bir çinko asetat dihidrat (33,33 g/L) stok çözeltisi hazırlanmış ve bu çözeltiden 150 mL alınarak 90 mL bitki özütü (yukarıda belirtilen) ile karıştırılarak 10 dakika boyunca 100 rpm'de

kariştirilmiştir. Elde edilen çözelti pH'sını 12.0'a yükseltmek için 1 M NaOH kullanılmıştır. Çözelti oda sıcaklığında 2 saat boyunca çalkalanmış ve çökelmenin tamamlanması için bir süre bekletilmiştir. Çözelti içerisinde oluşan çökelti filtre kağıdı ile süzülerek birkaç kez distile su ile yıkanmıştır. Elde edilen çökelti 60°C etüvde bir gece bekletilerek kurutulmuştur. Üretilen kekik özütü ZnO-NP'leri (K-ZnO-NP) hidrojel üretiminde kullanılmak üzere saklanmıştır.

1.4. ZnO Katkılı Hidrojellerin Üretimi (K-ZnO-HG)

Bitki denemelerinde kullanılmak üzere, yeşil sentez metodu ile üretilen K-ZnO-NP tozları SA ve PVA içeren hidrojel (HG) matrisine eklenerek K-ZnO-HG üretimi gerçekleştirilmiştir. Bunun için öncelikle 3 g PVA ve 2 g SA 100 mL distile suda çözülerek 95 °C'de 1 saat su banyosunda bekletilmiştir. Elde edilen karışım oda sıcaklığına gelene kadar soğutulmuş ve 120 rpm'de karıştırılan çözelti içerisinde farklı konsantrasyonlarda (0,1%-0,5%) K-ZnO-NP tozu eklenmiştir. Elde edilen çözelti, bir şırınga ile %5'lik CaCl₂ çözeltisine damlatılarak hidrojel boncukları oluşturulmuş ve gece boyunca CaCl₂ çözeltisinde bekletilmiştir. Elde edilen K-ZnO-NP katkılanmış hidrojel boncukları (K-ZnO-HG), CaCl₂'den arındırmak için distile su ile birkaç kez yıkanmış ve bitki denemelerinde kullanılmıştır.

1.5. Karakterizasyon Çalışmaları

K-ZnO-NP'lerin ve üretilen K-ZnO-HG boncuklarının morfolojik karakterizasyonu taramalı elektron mikroskobu (SEM), bağ yapıları fourier dönüşümlü kızılötesi spektroskopisi (FTIR) ve kristografik yapıları X-ışını kırınımı (XRD) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. K-ZnO-NP'lerin ortalama boyutları Debye-Scherer denkleminde (Denklem 1) göre hesaplanmıştır.

$$D = 0.9\lambda / \beta \cos\theta \quad (1)$$

Burada, D kristal taneciklerin boyutunu, β (rad cinsinden) XRD pik noktasının yarı maksimumdaki tam genişliğini (FWHM), λ X ışınlarının dalga boyunu, θ açının gözlenen tepe noktasını ve k sabit değeri ($k=0,9$) ifade eder (Zakirov ve ark., 2018).

1.6. Saksı Deneyleri

Saksı deneyleri, torfla (pH 6.0-7.0, organik madde: %76.4, nem eşdeğeri: %107) doldurulmuş plastik saksılar kullanılarak yürütülmüştür. Her saksıya 5'er adet buğday tohumu ekilmiş ve farklı konsantrasyonlarda K-ZnO-NP içeren hidrojel boncukları (2 g) eklenmiştir. Her işlem üç tekrarlı yürütülmüştür. Bitkiler laboratuvar ortamında 28 gün boyunca büyütülmüştür. 28 gün sonunda bitki boyları ölçülmüş ve klorofil içerikleri (SPAD-502 klorofil metre, Konica–Minolta, Japonya) ölçüldükten sonra sakıs yüzeyinden 1 cm yukarıdan hasat edilmiş ve yaş ve kuru ağırlıkları gravimetrik olarak belirlenmiştir.

1.7. Çinko Alımının Belirlenmesi

Bitkiler hasat edilip etüvde kurutulduktan (65 °C'de 48 saat) sonra tartılmış ve 220 °C'de hot-plate üzerinde 5 mL 12 M HNO₃ içerisinde çözünürleştirilmiştir (Doğaroğlu ve Köleli, 2017). Bitkilerdeki Zn²⁺ konsantrasyonu indüktif olarak eşleştirilmiş plazma (ICP-MS, Agilent 7500ce Model) ile belirlenmiştir.

1.8. İstatistiksel Analiz

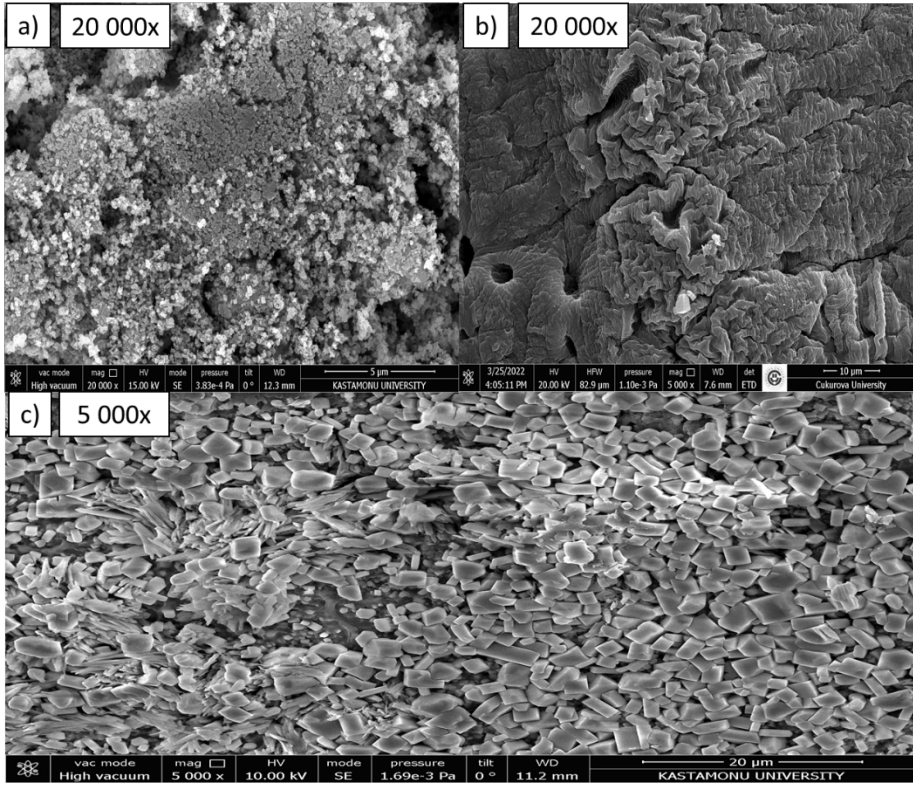
Deneylerden elde edilen veriler, konsantrasyonlar arasındaki anlamlı farklılıkları belirlemek için varyans analizi (ANOVA) ve ardından Post Hoc en az anlamlı fark (LSD) testi kullanılarak istatistiksel olarak analiz edildi. $p<0,05$ istatistiksel olarak anlamlı kabul edildi.

2. BULGULAR VE TARTIŞMA

2.1. K-ZnO-NP Toz ve Hidrojel Karakterizasyonu

Şekil 1(a, b ve c), kekik özütüyle üretilen ZnO-NP (K-ZnO-NP), saf-HG ve K-ZnO-HG'lerin yüzey morfolojisini göstermektedir. SEM görüntüleri, yeşil yöntemle sentezlenen nanopartiküllerde yaygın olarak gözlenen topaklaşma eğilimini göstermektedir. Bu özellik biyojenik nanopartiküllerin yüksek yüzey alanı ve stabilitesinden kaynaklanırken (Vidya ve ark., 2013), nanoparçacıkların polaritesinden ve elektrostatik çekiminden etkilenmektedir (Aminuzzaman ve ark., 2018). Bununla birlikte SEM analizleri (Şekil 1b ve c), saf HG ve K-ZnO-HG malzemelerinin kıvrımlı kompozit gövdelerle karakterize edilen karnabahar benzeri morfolojik yapılar oluşturduğunu ortaya koymaktadır. Bu görüntülerde ortaya çıkan kıvrımlı ve kompakt yapı, ZnO nanopartiküllerinin polimerik malzeme kaplamasıyla çevrili bir çekirdek yapı oluşturduğunu göstermektedir (Şekil 1c).

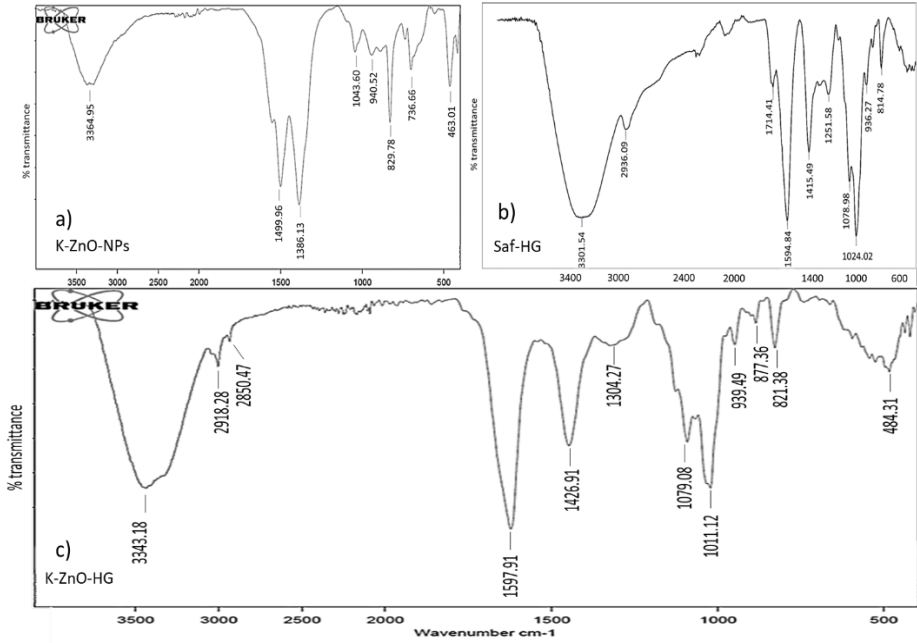
Üretilen nanopartiküllerle ilişkili fonksiyonel grupları belirlemek için ZnO-NP'lerin FTIR analizi gerçekleştirilmiştir. K-ZnO-NP, K-ZnO-HG ve saf HG üretiminden sorumlu biyomoleküller, 4000 ile 400 cm^{-1} arasındaki FTIR analizi ile tanımlanmıştır (Şekil 2). Çinko asetat kaynaklı Zn^{2+} iyonları, bitki özütünde bulunan polifenollerle bağ yaparak Zn^{+} iyonuna indirgendiğinden, reaksiyon çözeltisinde Zn^{+} -polifenol üretiminin olduğu bilinmektedir. Bu karmaşık olaylar, K-ZnO-NP'lerin FTIR spektrumlarındaki piklerle belirlenmiştir (Şekil 2a). K-ZnO-NP'lerin FTIR spektrumunda gözlenen (Şekil 2a) 3357, 1572, 1496, 1403, 854, 676, 544, 468 ve 415 cm^{-1} pikler emilim bantlarını göstermektedir.



Şekil 1: a) K-ZnO-NPs, b) Saf-HG, ve c) K-ZnO-HG malzemelerine ait SEM görüntüleri

3357 cm^{-1} 'deki geniş ve çok güçlü bant ise hidroksil fonksiyonel gruplarından kaynaklanmaktadır. 1572 cm^{-1} 'deki pik polifenolik maddelerin aromatik halkalarındaki C=C gerilme titreşimleriyle ilişkilidir. Asitlerin simetrik COO-gerilme modu, 1496 ve 1403 cm^{-1} 'deki piklerde tespit edilmiştir (Matinise ve ark., 2017). Kekik özütünden kaynaklanan 1048 ve 1020 cm^{-1} 'deki pikler doymuş esterler, alkoller, fenoller, sikloalkanlar ve asit anhidritlerden kaynaklanan C-O, C-C ve C-O-C bağlarının gerilmesine sebep olabilmektedir (Gabriela ve ark., 2017; Arumugam ve ark., 2021). Ishwarya ve ark. (2018) ve Rathnasamy ve ark. (2019)'na göre, ZnO'nun birincil emilim bandı 400 ile 600 cm^{-1} arasında gözlenir ve 544 cm^{-1} 'deki geniş ve güçlü bant

Zn-O titreşiminden kaynaklanır (Tantiwatcharothai ve ark., 2019). 854, 676 ve 622 cm^{-1} 'deki pikler, alkanlar ve alkenlerin ($\text{C}=\text{C}$ bükülmesi) bükülme titreşimlerinden kaynaklanır (Larkin, 2017; Bharathi ve Bhuvaneshwari, 2019; Abdullah ve ark., 2020).



Şekil 2: a) K-ZnO-NPs, b) Saf-HG ve c) K-ZnO-HG malzemelerine ait FTIR spectrumu

FTIR analizi, sentezlenen K-ZnO-NP'ler ve üretilen hidrojel boncuklarındaki fonksiyonel grupların moleküller arası etkileşimlerini göstermektedir (Şekil 2). -OH gerilmesinin titreşim bantları, 3343 cm^{-1} 'deki pikte tespit edilmiştir (Coates, 2006; Siipola ve ark., 2018; Sánchez-Borrego 2022). $\text{C}=\text{O}$ germe bandı olarak bilinen 1426 cm^{-1} 'deki orta yoğunluklu pik, hem PVA hem de SA'nın karakteristik özelliklerinden kaynaklanmaktadır (Korbag ve Saleh, 2016). Bu, gerilim bantlarının SA eklenmesiyle genişlediğini ve özellikle ham hidrojellerde de gözlemlenebileceği gibi PVA ve SA'daki

hidroksil grupları arasında bir hidrojen bağı oluşabileceğini göstermektedir (Şekil 2b ve c). Yaklaşık 1011 cm^{-1} 'deki pik noktası, hidrojeldeki sodyum aljinat kaynaklı C-O-C gerilme bağından kaynaklanmaktadır (Isawi, 2020). Aromatik C-H gerilme titreşimlerinin ve hidrojen bağlayıcı C-OH gruplarının gerilme titreşimleri ise sırasıyla 1079 cm^{-1} ve 821 cm^{-1} 'deki piklerde görülmektedir (Thayumanavan ve ark., 2014; Coates, 2000; Ray ve ark., 2020). Ayrıca, yaklaşık 484 cm^{-1} 'de, sodyum aljinattan türetilen C=O gerilme bağları gözlenmiştir (Isawi, 2020). Ek olarak, Tablo 1, K-ZnO-NP'lerin, saf HG'nin ve K-ZnO-HG'nin fonksiyonel gruplarının karşılaştırması verilmektedir.

Tablo 1: K-ZnO, saf HG ve K-ZnO-HG'deki fonksiyonel gruplar

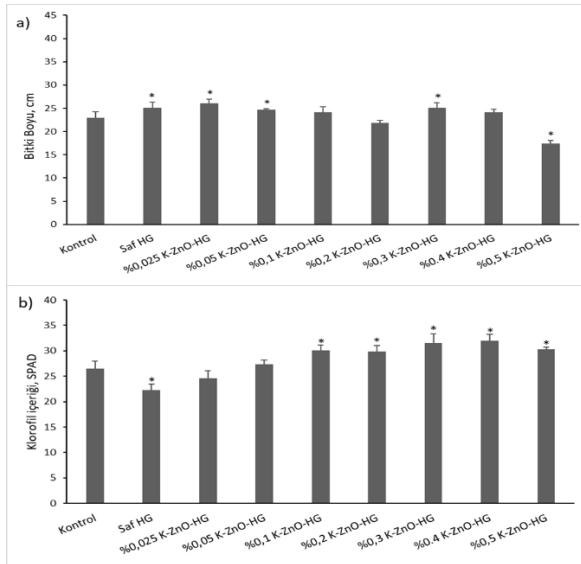
K-ZnO-NP	Saf HG	K-ZnO-HG	Fonksiyonel Gruplar	Kaynak
3357	3301	3343	-OH germe titreşim bandı	Coates, 2006; Armynah ve ark., 2019; Sánchez-Borrego ve ark., 2022
	2936	2918	C-H alifatik grupların gerilme titreşimleri	Kang ve ark., 2012; Shivakumara ve Demappa, 2019
	1714		C=O germe bandı	IR Spectrum Chart, 2024
1572		-	C=C polifenolik bileşiklerin aromatik halkalarındaki gerilme	Korbag ve Saleh, 2016; Helmiyati ve Aprilliza, 2017
	1594	1597	COO- gruplarının asimetric gerilme titreşimi PVA'nın C=O gerilmesi	Helmiyati ve Aprilliza, 2017; Ray ve ark., 2020
1496			C-H alkanların bükülmesi	IR Spectrum Chart, 2024
	1415	1426	C=O germe bandı	Korbag ve Saleh, 2016
1403			O-C=O'nun simetric gerilme titreşimi	Siipola ve ark., 2018

		1304	C-H bükülmesi	IR Spectrum Chart, 2024
	1251		C=O germe bandı	Coates, 2006
	1078	1079	C-O gerilmesi (birincil alkol) PVA varlığını gösteren pik	Thayumanavan ve ark., 2014; Shivakumara ve Demappa, 2019
1048			Çeşitli bağ gerilmeleri (C-O, C-ve C-O-C)	Sethi ve ark., 2023
1020	1024	1011	Sodyum aljinattan C-O-C germe bağı	Isawi, 2020
-	936	939	C=C bükülmesi	IR Spectrum Chart, 2024
854		877	C-H bükülmesi	Coates, 2006
-	814	821	Aromatik C-H germe titreşimi	Ray ve ark., 2020
736			C-H bükülme titreşimleri	IR Spectrum Chart, 2024
		484	Sodyum aljinattın C=O germe bağları	Isawi, 2020
463		438	Karakteristik ZnO emilim bandı	Kumar ve ark., 2019; Abdullah ve ark., 2021

Ortalama parçacık boyutlarını hesaplamak için Debye-Scherrer denklemi kullanılmıştır. Sonuçlar, sentezlenen K-ZnO-NP'lerin 19,72 nm boyutunda olduğunu göstermektedir. Yüksek sıcaklıkların kullanıldığı önceki literatür çalışmalarının aksine (Anbuvaran ve ark., 2015; Karnan ve Selvakumar, 2016), bu çalışma oda sıcaklığında yürütülmüştür. Bu nedenle yapılan bu çalışma, yüksek kristalli nanomalzemeler oluşturmak için hızlı, kolay ve çevre açısından güvenli bir sentez yönteminin kullanılabileceğini göstermektedir. Bu nedenle, enerji verimliliği ve uygulanabilirliği açısından, bu çalışma ZnO-NP'leri sentezlemek için diğer yöntemlere kıyasla sürdürülebilir bir alternatif olarak ortaya çıkmaktadır.

2.2. Sakı Denemeleri

Toprak bitki kök bölgesine yapılan hidrojel uygulamasında, artan konsantrasyonlarda K-ZnO-NP içeren hidrojel uygulamalarının, kontrol bitkilerine kıyasla 0,5% K-ZnO-HG uygulaması ($p<0.05$) hariç hemen hemen tüm K-ZnO-HG uygulamasında buğdayın bitki boylarında artışlara yol açtığı gözlemlenmiştir (Şekil 3a). Maksimum ve minimum bitki boyu sırasıyla 250 ve 5000 mg/L K-ZnO-NP içeren hidrojel uygulamalarında 26,09 ve 17,42 cm olarak ölçülmüştür. Literatürde, tarımda hidrojel uygulamaları üzerine yapılan çalışmalar, hidrojin su tutma kapasitesi ve gübre rezervuarı özellikleri nedeniyle uygun bir gelişmiş malzeme olduğunu göstermiştir (Calcagnile ve ark., 2019; Sasmal ve Patra, 2022). Hidrojellerdeki katkı maddelerinin (kitosan, biyokömür, selüloz, yeşil sentezlenmiş malzemeler, vb.) miktarı, sağlıklı bitki büyümesi için önemli bir faktör olarak ortaya çıkmaktadır (Palanivelu ve ark., 2022; Doğaroğlu ve ark., 2023).



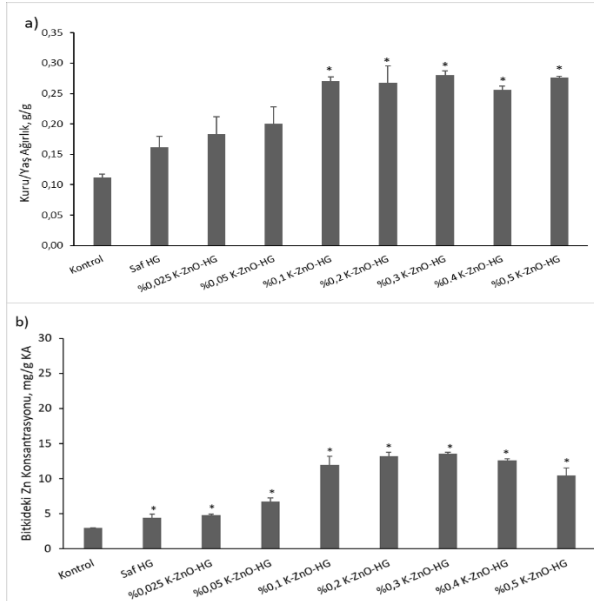
Şekil 3: Sentezlenen saf ve K-ZnO-HG katkılı hidrojellerin buğday bitkisinin a) bitki boyuna ve b) klorofil içeriklerine etkisi (*kontrol ile karşılaştırıldığında önemli bir etki olduğu anlamına gelir, $p<0,05$)

Toprakta K-ZnO-HG uygulaması, hidrojellerdeki K-ZnO-NP konsantrasyonunun artmasıyla klorofil içeriğinde önemli artışlara sebep olmuştur (Şekil 3b) ($p<0,05$), bu da süper emici polimer uygulamasıyla genç kahve ağaçlarında klorofil içeriğinin arttığını bildiren Liu ve ark. (2016) tarafından elde edilen bulgularla tutarlıdır. Ayrıca, Adhikari ve ark. (2016), ZnO-NP uygulanmasının hem bitki büyüme performansını hem de klorofil içeriğini artırabileceğini göstermiştir. Maksimum klorofil içeriği K-ZnO-NP katkılı hidrojel uygulamasında 31,96 SPAD değeri (%0,4) olarak belirlenmiştir.

Bu araştırmada ayrıca buğday bitkilerinde kuru-yaş ağırlık oranının kritik büyüme parametresi de incelenmiştir. Toprağa uygulanan hidrojellerin bitki kuru/yaş ağırlık oranında iyi bir performans gösterdiği ve belirgin bir kuru/yaş ağırlık oranını farkının olduğu tespit edilmiştir (Şekil 4). Şekil 4a'da gözlenen eğilim, %0,1 K-ZnO-HG uygulamasına kadar hidrojellerde artan K-ZnO-NP içeriğiyle kuru-taze ağırlık oranının belirgin bir şekilde arttığı ($p>0,05$) ve daha yüksek K-ZnO-NP konsantrasyonlarında kuru/yaş ağırlık oranının sabitlendiği belirlenmiştir ($p<0,05$). Geçmişteki çalışmalar genellikle yaş ve kuru ağırlıkları ayrı ayrı veya yaprak kuru ağırlığının taze ağırlığa oranı olarak bildirirken, bu çalışmada tüm bitkinin oranına odaklanılmış ve dolayısı ile büyüme dinamikleri hakkında daha kapsamlı bir anlayış benimsenmiştir (Solanki ve Laura, 2018; Huang ve ark., 2019; Rani ve ark., 2020; Rai-Kalal ve Jajoo, 2021). K-ZnO-NP katkılı hidrojel uygulamasında gözlemlenen orantılı artış, bitki beslenmesinin iyileştiğini veya kekikten elde edilen çinko ve fitokimyasallar gibi temel elementlerin daha iyi alındığını göstermektedir. Bitkiler için en temel elementlerden biri olan çinko, bitkilerde enzimatik ve hormonal aktiviteyi destekler (Asmat-Campos ve ark., 2022). Sahoo ve ark. (2021), tahıl bitkisi veriminde kuru maddenin önemini vurgularken, Rai-Kalal ve Jajoo (2021), ZnO-NP'lerle muamele edilen buğday fidelerinde yaş ve kuru ağırlıkların arttığını bildirmiştir. Yapılan bir çalışmada, Pusa HG +

Vermikompostlama ile gübrelenen bitkilerin yaprak sayısı ve uzunluğu, kök sayısı, bitki kuru ağırlığı, çiçek sayısı vb. gibi bitki büyüme ve gelişme parametrelerinin arttığı bildirilmiştir (Verma ve ark., 2019).

Çinko, protein sentezi, gen ekspresyonu, metabolik işlevler, su alımı/taşınması ve enzim aktivitesi dahil olmak üzere bitki yaşamının birçok farklı yönünü etkileyen temel bir mineraldir (Hafez ve ark., 2013). Bu çalışmada, bitkideki Zn konsantrasyonundaki artışın bitkilere fayda sağladığı ve büyümelerini artırdığı belirlenmiştir. Topraktaki hidrojel içerisinde bulunan K-ZnO-NP konsantrasyonundaki artışa bağlı olarak, bitkilerde Zn^{2+} konsantrasyonun arttığı belirlenmiştir (Şekil 4b). En yüksek Zn^{2+} konsantrasyonu, %0,3 K-ZnO-HG uygulamasında 13,51 mg /g kuru kütle olarak belirlenirken ($p<0,05$), kontrol bitkilerinde 2,97 mg/g kuru kütle olarak ölçülmüştür (Şekil 4b). Topraktaki hidrojel uygulamasında bitkilerin yaş/kuru ağırlık oranı ve Zn^{2+} konsantrasyonu arasında benzer bir eğilim gözlenmiştir.



Şekil 4: Sentezlenen saf ve K-ZnO-HG katkıli hidrojellerin buğday bitkisinin a) kuru/yaş ağırlık oranına ve b) çinko alımına etkisi (*kontrol ile karşılaştırıldığında önemli bir etki olduğu anlamına gelir, $p<0,05$)

3. SONUÇ

Bu çalışmada, toprağa hidrojel uygulamasında kekik özütü kullanılarak sentezlenen ZnO-NP'lerinin buğday bitkisinin büyümesi üzerindeki etkileri kapsamlı bir şekilde incelenmiştir. Sonuçlardaki olumlu etki, tarımda farklı uygulama tekniklerinin göreceli değerlendirmesine ilişkin literatürdeki mevcut boşluğa dikkat çekmektedir. Çalışmamız, yeşil sentez metodu ile üretilen ZnO-NP'lerin hidrojele entegrasyonu ile buğday bitkilerinin geliştirilmesi ve sürdürülebilir kullanımı açısından potansiyelini vurgulamakta ve aydınlatıcı bilgiler sunmaktadır. K-ZnO katkılı hidrojel uygulamalarının özellikle kuruya yaş ağırlık oranını artırması, bitki beslenmesi ve büyüme dinamiklerindeki önemini vurgulamaktadır. Ancak, K-ZnO-NP katkılı hidrojeller içerisindeki ZnO konsantrasyonunun yüksek konsantrasyonlarda zararlı olabileceği gözlenmiştir. Bu nedenle, tarımsal uygulamalarda üretilen malzemelerin konsantrasyonlarının dikkatli bir şekilde ayarlanması önem arz etmektedir. Bu sonuç, dikkatli doz hesaplamaları ve olası çevresel etkilerin değerlendirilmesi üzerine gelecekteki çalışmalara ışık tutmakta ve bu sürecin gerekliliğini vurgulamaktadır. Özetle, çalışmamız K-ZnO-NP içeren hidrojellerin buğday bitkilerinin büyüme performansı üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir.

Çevre dostu sentez sürecinde kekik özütünün kullanımı, yeşil sentezin sürdürülebilir bir seçenek olma olasılığını artırmaktadır. Bu çalışma, tarımsal faaliyetlerde daha kapsamlı bir değerlendirme sağlamak için saha denemelerine ihtiyaç olduğunu göstermektedir. Bulgular, nanoözelliklere sahip bileşiklerin ve bu malzemeleri içeren polimer yapıları hidrojel matrislerinin bitki büyümesini nasıl etkilediğini anlamak ve tarımdaki potansiyel uygulamalarını değerlendirmek için gelecekteki araştırmaları yönlendirmeye yardımcı olabilir.

Yazar Katkısı

Zeynep Görkem Doğaroğlu: Bitki yetiştirme, nanopartikül üretimi, analizler ve yorumlama, kavramsallaştırma, yazım ve düzenleme; Yağmur Uysal: Nanopartikül retimi, nanomalzemelerin karakterizasyonu ve yorumları, kavramsallaştırma, yazım ve dzenleme. Tm yazarlar makaleyi incelemiştir.

KAYNAKÇA

- Abdullah, F. H., Abu Bakar, N. H. H., and Abu Bakar, M. (2021). Comparative study of chemically synthesized and low temperature bio-inspired *Musa acuminata* peel extract mediated zinc oxide nanoparticles for enhanced visible-photocatalytic degradation of organic contaminants in wastewater treatment. *Journal of Hazardous Materials*, 406, 124779.
- Abdullah, F. H., Abu-Bakar, N. H. H., Abu Bakar, M. (2020). Low temperature biosynthesis of crystalline zinc oxide nanoparticles from *Musa acuminata* peel extract for visible-light degradation of methylene blue. *Optik - International Journal for Light and Electron Optics*, 206, 164279.
- Adhikari, T., Kundu, S., Rao, S. A. (2016). Zinc delivery to plants through seed coating with nano-zinc oxide particles. *Journal of Plant Nutrition*, 39(1), 136-146. DOI: 10.1080/01904167.2015.1087562
- Aminuzzaman, M., Ying, L. P., Goh, W.-S., Watanabe, A. (2018). Green synthesis of zinc oxide nanoparticles using aqueous extract of *Garcinia mangostana* fruit pericarp and their photocatalytic activity. *Bulletin of Materials Science*, 41. Doi:10.1007/s12034-018-1568-4.
- Anbuvaran, M., Ramesh, M., Viruthagiri, G., Shanmugam, N., Kannadasan, N. (2015). *Anisochilus carnosus* leaf extract mediated synthesis of zinc oxide nanoparticles for antibacterial and photocatalytic activities. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 39, 621–628.
- Armynah, B., Tahir, D., Tandilayuk, M., Djafar, Z., Piarah, W. H. (2019). Potentials of biochars derived from bamboo leaf biomass as energy sources: Effect of temperature and time of heating. *International Journal of Biomaterials*, 3526145. <https://doi.org/10.1155/2019/3526145>.
- Arno, M. C., Inam, M., Weems, A. C., Li, Z., Binch, A. L. A., Platt, C. I., Richardson, S. M., Hoyland, J. A., Dove, A. P., O'Reilly, R. K. (2020). Exploiting the role of nanoparticle shape in enhancing hydrogel adhesive

- and mechanical properties. *Nature Communications*, 11, 1420.
<https://doi.org/10.1038/s41467-020-15206-y>
- Arumugam, M., Manikandan, D. B., Dhandapani, E., Sridhar, A., Balakrishnan, K., Markandan, M., Ramasamy, T. (2021). Green synthesis of zinc oxide nanoparticles (ZnO NPs) using *Syzygium cumini*: Potential multifaceted applications on antioxidants, cytotoxic and as nanonutrient for the growth of *Sesamum indicum*. *Environmental Technology & Innovation*, 23, 101653.
<https://doi.org/10.1016/j.eti.2021.101653>.
- Asmat-Campos, D., López-Medina, E., Montes de Oca-Vásquez, G., Gil-Rivero, E., Delfín-Narciso, D., Juárez-Cortijo, L., Villena-Zapata, L., Gurreonero-Fernández, J., Rafael-Amaya, R. (2022). ZnO Nanoparticles obtained by green synthesis as an alternative to improve the germination characteristics of *L. esculentum*. *Molecules*, 27, 2343.
<https://doi.org/10.3390/molecules27072343>.
- Barrett-Catton, E., Ross, M.L., Asuri, P. (2021). Multifunctional hydrogel nanocomposites for biomedical applications. *Polymers*, 13, 856.
<https://doi.org/10.3390/polym13060856>
- Bharathi, D., Bhuvaneshwari, V. (2019). Synthesis of zinc oxide nanoparticles (ZnO NPs) using pure bioflavonoid rutin and their biomedical applications: antibacterial, antioxidant and cytotoxic activities. *Research on Chemical Intermediates*, 45(4), 2065–2078.
<http://dx.doi.org/10.1007/s11164-018-03717-9>.
- Calcagnile, P., Sibillano, T., Giannini, C., Sannino, A., Demitri, C. (2019). Biodegradable poly(lactic acid)/cellulose-based superabsorbent hydrogel composite material as water and fertilizer reservoir in agricultural applications. *Journal of Applied Polymer Science*, 136, 47546. doi: <https://doi.org/10.1002/app.47546>

- Cao, H., Duan, L., Zhang, Y., Cao, J., Zhang, K. (2021). Current hydrogel advances in physicochemical and biological response-driven biomedical application diversity. *Signal Transduction and Targeted Therapy*, 6, 426. <https://doi.org/10.1038/s41392-021-00830-x>
- Chakraborty, S., Sagarika, P., Rai, S., Sahi, C., Mukherjee, S. (2021). Tyrosine-templated dual-component silver nanomaterials exhibit photoluminescence and versatile antimicrobial properties through ROS generation. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 13(31), 36938-36947. <https://doi.org/10.1021/acsami.1c10520>
- Chimbekujwo, K.I., Sani, A.R., Oyewole, O.A., Isibor, P.O. (2024). Sources of Nanoparticles. In: Isibor, P.O., Devi, G., Enuneku, A.A. (eds) *Environmental Nanotoxicology*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-54154-4_3.
- Coates, J. (2000). Interpretation of infrared spectra, a practical approach. *Encyclopedia of Analytic Chemistry*, 12 10815-10837.
- Coates, J. (2006). Interpretation of infrared spectra, a practical approach. In R. A. Meyers and M.L. McKelvy (Eds.), *Encyclopedia of Analytical Chemistry*. <https://doi.org/10.1002/9780470027318.a5606>
- Dannert, C., Stokke, B. T., Dias, R. S. (2019). Nanoparticle-hydrogel composites: from molecular interactions to macroscopic behavior. *Polymers (Basel)*, 11(2), 275. doi: 10.3390/polym11020275.
- Dimpka, C. O., McLean, J. E., Latta, D. E., Manangon, E., Britt, D. W., Johnson, W.P., et al. (2012). CuO and ZnO nanoparticles: phytotoxicity, metal speciation, and induction of oxidative stress in sand-grown wheat. *Journal of Nanoparticle Research*, 14,1125. doi:10.1007/s11051-012-1125-9.
- Doğaroğlu, Z. G., Köleli, N. (2017). TiO₂ and ZnO nanoparticles toxicity in barley (*Hordeum vulgare* L.). *Clean – Soil, Air, Water*, 45, 1700096. Doi: 10.1002/clen.201700096

- Doğaroğlu, Z. G., Uysal, Y., Çaylalı, Z., Karakulak, D. S. (2023). Green nanotechnology advances: green manufacturing of zinc nanoparticles, characterization, and foliar application on wheat and antibacterial characteristics using *Mentha spicata* (mint) and *Ocimum basilicum* (basil) leaf extracts. *Environmental Science and Pollution Research*, 30, 60820–60837. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-26827-3>
- Gabriela, Á.-M., Gabriela, M. O.-V., Luis A.-M., Reinaldo, P.-R., Michael, H.-M., Rodolfo, G.-P., Roberto, V.-B. J. (2017). Biosynthesis of silver nanoparticles using mint leaf extract (*Mentha piperita*) and their antibacterial activity advanced science. *Engineering and Medicine*, 9, 1–10.
- Gholamali, I., Yadollahi, M. (2021). Bio-nanocomposite polymer hydrogels containing nanoparticles for drug delivery: a Review. *Regenerative Engineering and Translational Medicine*, 7, 129–146. <https://doi.org/10.1007/s40883-021-00207-0>
- Hafeez, B. M., Khanif, Y. M., Saleem, M. (2013). Role of zinc in plant nutrition-a review. *Am. J. Exp. Agric*, 3, 374–391. doi: 10.9734/AJEA/2013/2746.
- Helmiyati, Aprilliza, M. (2017). Characterization and properties of sodium alginate from brown algae used as an ecofriendly superabsorbent. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 188, 012019. doi:10.1088/1757-899X/188/1/012019
- Huang, W., Ratkowsky, D. A., Hui, C., Wang, P., Su, J., Shi, P. (2019). Leaf fresh weight versus dry weight: which is better for describing the scaling relationship between leaf biomass and leaf area for broad-leaved plants?. *Forests*, 10(3), 256. <https://doi.org/10.3390/f10030256>
- IR Spectrum Table and Chart (2024). [https:// www. sigma aldri ch. com/TR/ en/ techn ical- docum ents/ techn ical- artic le/ analy tical- chemi](https://www.sigmaaldrich.com/TR/en/technical-documents/technical-article/analytical-chemistry)

- stry/photo metry- and- refle ctome try/ ir- spect rum- table. Accessed 15 January 2024
- Isawi, H. (2020). Using zeolite/polyvinyl alcohol/sodium alginate nanocomposite beads for removal of some heavy metals from wastewater. *Arabian Journal of Chemistry*, 13, 5691–5716. doi:10.1016/j.arabjc.2020.04.009.
- Ishwarya, R., Vaseeharan, B., Subbaiah, S., Nazar, A. K., Govindarajan, M., Alharbi, N. S., Kadaikunnan, S., Khaled, J. M., Al-anbr, M. N. (2018). *Sargassum wightii*-synthesized ZnO nanoparticles – from antibacterial and insecticidal activity to immunostimulatory effects on the green tiger shrimp *Penaeus semisulcatus*. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, 183, 318-330. <https://doi.org/10.1016/j.jphotobiol.2018.04.049>.
- Kang, S., Xiao, L., Meng, L., Zhang, X., Sun, R. (2012). Isolation and structural characterization of lignin from cotton stalk treated in an ammonia hydrothermal system. *International Journal of Molecular Sciences*, 13(11), 15209–15226.
- Karnan, T., Selvakumar, S. A. S. (2016). Biosynthesis of ZnO nanoparticles using rambutan (*Nephelium lappaceum* L.) peel extract and their photocatalytic activity on methyl orange dye. *Journal of Molecular Structure*, 1125, 358–365.
- Korbag, I., Saleh, S. M. (2016). Studies on the formation of intermolecular interactions and structural characterization of polyvinyl alcohol/lignin film. *International Journal of Environmental Studies*, 73(2), 226-235. doi:10.1080/00207233.2016.1143700.
- Kumar, R. S., Rajendran, D., Balaraman, H. B., Viswanathan, G. (2019). Functional deep eutectic solvent-based chaotic extraction of phycobiliprotein using microwave-assisted liquid-liquid micro-

- extraction from *Spirulina (Arthrospira platensis)* and its biological activity determination. *Algal Research*, 44, 101709.
- Larkin, P. (2017). Infrared and Raman spectroscopy: principles and spectral interpretation. Elsevier, 2017.
- Liu, X., Li, F., Yang, Q., Wang, X. (2016). Effects of alternate drip irrigation and superabsorbent polymers on growth and water use of young coffee tree. *Journal of Environmental Biology*, 37(4), 485-491.
- Matinise, N., Fuku, X. G., Kaviyarasu, K., Mayedwa, N., Maaza, M. (2017). ZnO nanoparticles via *Moringa oleifera* green synthesis: Physical properties & mechanism of formation. *Applied Surface Science*, 406, 339-347. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2017.01.219>.
- Ovais, M., Khalil, A. T., Islam, N. U., Ahmad, I., Ayaz, M., Saravanan, M., et al. (2018). Role of plant phytochemicals and microbia enzymes in biosynthesis of metallic nanoparticles. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 102(16), 6799-6814. DOI: 10.1007/s00253-018-9146-7.
- Pakzad, K., Alinezhad, H., Nasrollahzadeh, M. (2019). Green synthesis of Ni@Fe₃O₄ and CuO nanoparticles using *Euphorbia maculata* extract as photocatalysts for the degradation of organic pollutants under UV-irradiation. *Ceramics International*, 45(14), 17173-17182. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2019.05.272>.
- Palanivelu, S. D., Armir, N. A. Z., Zulkifli, A., Hair, A. H. A., Salleh, K. M., Lindsey, K., Che-Othman, M. H., Zakaria, S. (2022). Hydrogel application in urban farming: potentials and limitations—a review. *Polymers*, 14, 2590. <https://doi.org/10.3390/polym14132590>
- Potbhare, K. A., Chaudhary, R. G., Chouke, P. B., Yerpude, S., Mondal, A., Sonkusare, V.N., et al. (2019). Phytosynthesis of nearly monodisperse CuO nanospheres using *Phyllanthus reticulatus/Conyza bonariensis* and its antioxidant/antibacterial assays. *Materials Science and Engineering: C*, 99, 783-793.

- Rahman, M. S., Islam, M. M., Islam, M. S., Zaman, A., Ahmed, T., Biswas, S., Sharmeen, S., Rashid, T. U., Rahman, M. M. (2019). Morphological characterization of hydrogels. In M. Mondal (Eds.), *Cellulose-based superabsorbent hydrogels. Polymers and polymeric composites: A reference series*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-77830-3_28
- Rai-Kalal, P., Jajoo, A. (2021). Priming with zinc oxide nanoparticles improve germination and photosynthetic performance in wheat. *Plant Physiology and Biochemistry*, 160, 341-351. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2021.01.032>.
- Rani, P., Kaur, G., Rao, K. V., Singh J., Rawat M. (2020). Impact of green synthesized metal oxide nanoparticles on seed germination and seedling growth of *Vigna radiata* (mung bean) and *Cajanus cajan* (red gram). *Journal of Inorganic and Organometallic Polymers*, 30, 4053–4062. <https://doi.org/10.1007/s10904-020-01551-4>.
- Rathnasamy, S. K., Rajendran, D., Balaraman, H. B., Viswanathan, G. (2019). Functional deep eutectic solvent-based chaotic extraction of phycobiliprotein using microwave-assisted liquid-liquid micro-extraction from *Spirulina (Arthrospira platensis)* and its biological activity determination. *Algal Research*, 44, 101709. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2019.101709>.
- Ray, A., Banerjee, A., Dubey, A. (2020). Characterization of biochars from various agricultural by-products using FTIR spectroscopy, SEM focused with image processing. *IJAEB*, 13, 423–430. <https://doi.org/10.30954/0974-1712.04.2020.6>.
- Sahoo, S. K., Dwivedi, G. K., Dey, P., Praharaj, S. (2021). Green synthesized ZnO nanoparticles for sustainable production and nutritional biofortification of green gram. *Environmental Technology & Innovation*, 24, 101957. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2021.101957>.

- Sánchez-Borrego, F. J., Barea de Hoyos-Limón, T. J., García-Martín, J. F., Álvarez-Mateos, P. (2022). Production of bio-oils and biochars from olive stones: application of biochars to the esterification of oleic acid. *Plants*, 11, 70. doi: 10.3390/plants11010070.
- Sasmal, P. K., Patra, S. (2022). Effect in growth of corn plant from cellulose-based hydrogel derived from wheat straw. *Journal of The Institution of Engineers (India): Series E*, 103, 41–46. <https://doi.org/10.1007/s40034-020-00180-3>.
- Sethi, S., Medha, Thakur, S., Singh, A., Kaith, B. S. (2023). Nanogels and nanocomposite hydrogels for sensing applications. In U. Shanker, C.M. Hussain, M. Rani (Eds.) *Handbook of Green and Sustainable Nanotechnology*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-16101-8_108.
- Sharma, B., Tiwari, S., Kumawat, K. C., Cardinale, M. (2023). Nano-biofertilizers as bio-emerging strategies for sustainable agriculture development: Potentiality and their limitations. *Science of the Total Environment*, 860, 160476. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.160476>
- Shivakumara, L. R., Demappa, T. (2019). Synthesis and swelling behavior of sodium alginate/poly(vinyl alcohol) hydrogels. *Turkish Journal of Pharmaceutical Sciences*, 16(3), 252-260. doi: 10.4274/tjps.galenos.2018.92408.
- Siipola, V., Tamminen, T., Källi, A., Lahti, R., Romar, H., Rasa, K., Keskinen, R., Hyväluoma, J., Hannula, M., Wikberg, H. (2018). Effects of biomass type, carbonization process, and activation method on the properties of bio-based activated carbons. *Biological Research*, 13(3), 5976-6002.
- Solanki, P., Laura, J. S. (2018). Effect of ZnO nanoparticles on seed germination and seedling growth in wheat (*Triticum aestivum*). *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*, 7(5), 2048-2052.

- Sone, B. T., Diallo, A., Fuku, X. G., Gurib-Fakim, A., Maaza, M. (2020). Biosynthesized CuO nano-platelets: physical properties & enhanced thermal conductivity nanofluidics. *Arabian Journal of Chemistry*, 13, 160-170.
- Tantiwatcharothai, S., Prachayawarakorn, J. (2019). Characterization of an antibacterial wound dressing from basil seed (*Ocimum basilicum* L.) mucilage-ZnO nanocomposite. *International Journal of Biological Macromolecules*, 135, 133-140. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2019.05.118>
- Thayumanavan, N., Tambe, P., Joshi, G., Shukla, M. (2014). Effect of sodium alginate modification of graphene (by ‘anion- π ’ type of interaction) on the mechanical and thermal properties of polyvinyl alcohol (PVA) nanocomposites. *Composite Interfaces*, 21(6), 487-506. doi: 10.1080/15685543.2014.879512.
- Vashist, A., Kaushik, A., Ghosal, A., Bala, J., Nikkhah-Moshaie, R., Wani, A. W., Manickam, P., Nair, M. (2018). Nanocomposite hydrogels: Advances in nanofillers used for nanomedicine. *Gels*, 4, 75. <https://doi.org/10.3390/gels4030075>.
- Verma, A. K., Sindhu, S. S., Singh, A., Kumar, A., Singh, A., Chauhan, V. B. S. (2019). Conditioning effects of biodegradable superabsorbent polymer and vermiproducs on media properties and growth of gerbera. *Ecological Engineering*, 132, 23–30. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2019.03.012>.
- Vidya, C., Hiremath, S., Chandrababha, M. N., Antonyraj, M. L., Gopal, I. V., Jain, A., Bansal, K. (2013). Green synthesis of ZnO nanoparticles by *Calotropis gigantea*. *International Journal of Current Engineering and Technology*, 1, 118–120.
- Zakirov, M. I., Semen'ko, M. P., Korotchenkov, O. A. (2018). A simple sonochemical synthesis of nanosized ZnO from zinc acetate and sodium

hydroxide. Journal of Nano- and Electronic Physics, 10(5), 05023. doi: 10.21272/jnep.10(5).05023.

BÖLÜM 8

AYÇİÇEĞİNİN AĞIR METAL STRESİNE YANITI: FİZYOLOJİK ETKİLER, VERİM PERFORMANSI VE FİTOREMEDİASYON YETENEĞİ

Prof. Dr. Tamer ERYİĞİT¹⁴

Turgay BAŞDİNÇ¹⁵

Ali UÇAR¹⁶

DOI: <https://www.doi.org/10.5281/zenodo.18109094>

¹⁴ Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Gevaş Meslek Yüksekokulu, Bitkisel ve Hayvansal Üretim Bölümü, Van-Türkiye, Orcid ID: 0000-0001-5069-8206, e-mail: tamereryigit@yyu.edu.tr

¹⁵ Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi Ziraat Fakültesi Tarla Bitkileri Bölümü
Orcid ID: 0000-0002-3654-3096, e-mail: turgaybsdnc@gmail.com

¹⁶ Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi Ziraat Fakültesi Tarla Bitkileri Bölümü
Orcid ID: 0009-0002-9060-5080, e-mail: aliucar6565@gmail.com

1. GİRİŞ

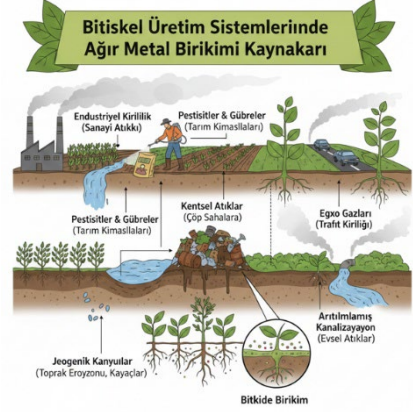
Ağır metal kirliliği, çevresel ve tarımsal açıdan giderek artan bir endişe kaynağıdır. Kadmiyum, kurşun, cıva ve arsenik gibi ağır metaller, kalıcılıkları, toksisiteleri ve biyoakümülatif yapıları nedeniyle ekosistemler ve insan sağlığı için ciddi riskler oluşturmaktadır (Mohamed ve ark., 2025). Bu kirleticiler genellikle endüstriyel atıklar, madencilik faaliyetleri ve tarım kimyasalları aracılığıyla toprağa karışır, toprağın sağlığını, ürün verimliliğini ve gıda güvenliğini olumsuz etkiler (Mohamed ve ark., 2025; Srivastava ve ark., 2017). Yoğun tarım uygulamaları ve teknolojik gelişmeler de toprakta ağır metal birikimini hızlandırmaktadır (Srivastava ve ark., 2017).

Bitkiler ağır metal kirliliğine maruz kaldıklarında, büyüme ve gelişmelerinde ciddi bozulmalar yaşarlar. Ağır metaller, bitkinin morfolojik ve fizyolojik özelliklerini değiştirerek verimlilik kaybına ve ürün kalitesinde düşüşe yol açar (Sevgi ve Leblebici, 2022). Bu metaller, hücre homeostazını bozabilir, fotosentezi engelleyebilir, oksidatif stres oluşturabilir ve besin alımını aksatabilir, bu da önemli verim kayıplarına neden olur (Mohamed ve ark., 2025). Örneğin, kadmiyum ve kurşun, ozmotik stres ve hücre zarı hasarı nedeniyle tohum çimlenmesini ve kök uzamasını engeller. Ayrıca klorofil biyosentezini ve kloroplastların yapısını etkileyerek fotosentezi bozarlar, bu da büyümenin duraklamasına ve biyokütle azalmasına yol açar (Mohamed ve ark., 2025). Bitkiler, bu streslere karşı antioksidan enzimlerin aktivasyonu, metal taşıyıcıların yukarı regülasyonu ve metal şelatlayıcı moleküllerin üretimi gibi karmaşık moleküler mekanizmalar geliştirmişlerdir (Mohamed ve ark., 2025).

1.1. Bitkisel Üretim Sistemlerinde Ağır Metal Birikimi Kaynakları

Bitkisel üretim sistemlerinde ağır metal birikimi, hem doğal hem de insan kaynaklı faaliyetlerden (antropojenik) kaynaklanmaktadır (Vácha, 2021). Özellikle tarım alanlarındaki ağır metal kirliliğinin büyük bir kısmı antropojenik kökenlidir ve arsenik, kadmiyum, bakır, kurşun ve çinko gibi metallerin emisyonlarından sorumludur (Radočaj ve ark., 2020).

Başlıca ağır metal birikimi kaynakları aşağıdaki gibi özetlenebilir:



- **Endüstriyel faaliyetler:** Madencilik, eritme, fosil yakıtların yakılması, elektro kaplama sanayisi, atık bertarafı ve genel endüstriyel gelişmeler, ağır metallerin çevreye salınımının önemli kaynaklarıdır (Angon ve ark., 2024). Bu tür faaliyetler sonucunda toprağa karışan ağır metaller, bitkisel üretim sistemlerinde birikime yol açar. Örneğin, çimento ve elektrokaplama fabrikalarının yakınındaki topraklar ağır metal kirliliğinden önemli ölçüde etkilenir (Alengebawy ve ark., 2021).
- **Tarımsal uygulamalar:** Tarımsal faaliyetler, ağır metal birikiminin başlıca antropojenik kaynaklarından biridir (Ersoy, 2021).
 - **Gübreler:** Özellikle fosfatlı gübreler, toprağa kadmiyum, kurşun, arsenik, cıva ve nikel gibi ağır metalleri ekleyebilir (Bhardwaj ve ark., 2023; Kaparwan ve ark., 2020). Sürekli ve yoğun gübre kullanımı, toprağın fizikokimyasal ve biyolojik özelliklerinin bozulmasına neden olarak ağır metal birikimini artırır (Kaparwan ve ark., 2020).

- **Pestisitler:** Geçmişte ve günümüzde kullanılan pestisitler, içlerinde çinko, kurşun, cıva, manganez, bakır, arsenik ve krom gibi metalleri barındırabilir (Bawa ve ark., 2020; Bhardwaj ve ark., 2023). Bu kimyasalların yoğun kullanımı, özellikle bakır ve krom konsantrasyonlarının artmasına yol açar (Bhardwaj ve ark., 2023).
- **Atık sular ve biyokatılar:** Kanalizasyon suları ile yapılan sulama, hayvancılık faaliyetlerinden kaynaklanan biyokatılar (kümes hayvanı, sığır ve domuz gübresi gibi) ve çamur uygulaması, cıva, çinko, kurşun, arsenik, molibden ve kadmiyum gibi ağır metalleri tarım topraklarına taşıyabilir (Bhardwaj ve ark., 2023; Kaparwan ve ark., 2020). Kanalizasyon çamuru, bitki besin maddeleri ve organik madde kaynağı olmasına rağmen ağır metaller gibi zararlı maddeler de içerir.
- **Ulaşım:** Trafik emisyonları da ağır metal (özellikle kurşun) kirliliğine katkıda bulunabilir (Vácha, 2021).
- **Atık yönetimi:** Belediyelerin katı atık bertarafı ve genel atık yönetimi uygulamaları da ağır metallerin tarım topraklarına yayılmasına neden olabilir (Angon ve ark., 2024).

Bu kaynaklar aracılığıyla toprağa giren ağır metaller, bitkiler tarafından alınarak hem bitkisel ürünlerin kalitesini düşürmekte hem de besin zinciri yoluyla insan ve hayvan sağlığı için risk oluşturmaktadır (Bawa ve ark., 2020).

1.2. Ayçiçeğinin (*Helianthus annuus* L.) Tarımsal Önemi ve Yaygın Yetiştirilme Alanları

Ayçiçeği (*Helianthus annuus* L.), Asteraceae familyasına ait, dünya genelinde büyük tarımsal ve ekonomik öneme sahip bir yağlı tohum bitkisidir

(Meral, 2019). Yüksek oleik asit içeriği ve ekonomik değeri nedeniyle küresel gıda güvenliği açısından kritik bir role sahiptir (Pouryazdankhah ve ark., 2024). Dünya genelinde dördüncü sırada yer alan bitkisel yağ ve üçüncü sırada yer alan yağlı tohum küspesi kaynağıdır (Pilorgé, 2020).

Tarımsal Önemi

- **Yağ Üretimi:** Ayçiçeği, esas olarak yenilebilir yağ üretimi için yetiştirilir (Debaeke ve ark., 2021). Ayçiçeği yağı, yüksek pişirme sıcaklıklarında stabil olması, diğer bitkisel yağlardan daha fazla E vitamini içermesi ve yüksek oleik yağ çeşitlerinin düşük doymuş yağ seviyeleri sunması nedeniyle gıda işleme endüstrisi tarafından tercih edilmektedir (Long ve ark., 2019). Dünya vejetatif ham petrol üretiminin yaklaşık %9.52'sini ayçiçeği karşılamaktadır (Aydın ve ark., 2023).
- **Gıda ve Yem Sanayii:** Ayçiçeği tohumları, atıştırılabilir olarak doğrudan tüketilebildiği gibi, yağ çıkarıldıktan sonra kalan küspe hayvan yemi olarak da kullanılır (Aydın ve ark., 2023; Debaeke ve ark., 2021). Ayçiçeği tohumları %35-55 yağ ve %15-30 protein içermektedir (Aydın ve ark., 2023). Ayrıca, küçük tohumlu yağlık tipler kuş yemi pazarı için de önemlidir (Long ve ark., 2019).
- **Biyoyakıt Potansiyeli:** Ayçiçeği, biyoyakıt üretimi için potansiyel bir kaynak olarak görülmektedir (Meral, 2019).
- **Çevresel Faydalar:** Çiftçiler tarafından ürün rotasyonlarında yabani ot ve hastalıkların uzun vadeli yönetiminde yardımcı olduğu için tercih edilir (Long ve ark., 2019). Sürdürülebilir tarım sistemlerinde önemli bir varlık olarak kabul edilir ve çevre dostu bir enerji kaynağıdır (Meral, 2019).
- **Ekonomik Değer:** Ayçiçeği, 1980-2005 yılları arasında küresel gıda güvenliği sıralamasında en baskın 13 ürün arasında beşinci sırada yer almıştır ve yıllık ekonomik değeri 267-384 milyon dolar

olarak tahmin edilmektedir (Pouryazdankhah ve ark., 2024). Dikim tohumunun değeri, ticari yağ veya şekerleme tohumu mahsulünün yaklaşık beş ila on katıdır (Long ve ark., 2019).

Yaygın Yetiştirilme Alanları

Ayçiçeği, dünya genelinde 73'ten fazla ülkede yetiştirilmekle birlikte (Drummond ve ark., 2023), üretimin büyük bir kısmı belirli bölgelerde yoğunlaşmıştır. 2021 yılında dünya genelinde 58 milyon tonu aşan ayçiçeği üretimi gerçekleştirilmiştir (Fomych ve ark., 2024). 2013-2022 yılları arasında dünya genelinde yıllık ortalama 26 milyon hektar alanda ayçiçeği yetiştirildiği belirtilmektedir (Đerčan ve ark., 2023).

Başlıca ayçiçeği üreten ülkeler ve bölgeler

- **Doğu Avrupa ve Rusya:** Ukrayna ve Rusya, dünya ayçiçeği üretiminin %54'ünden fazlasını oluşturmaktadır (Miklić, 2022). Avrupa kıtası, dünya genelindeki ayçiçeği ekim alanının %67'sini ve tohum üretiminin %71'ini karşılamaktadır (Debaeke ve ark., 2021).
 - Ukrayna, 2021 yılında 6.6 milyon hektar ekim alanıyla en büyük ayçiçeği üreticisi konumundadır (Fomych ve ark., 2024).
 - Rusya da önemli bir üretici konumundadır ve Ukrayna ile birlikte küresel ayçiçeği pazarında kritik bir rol oynamaktadır (Đerčan ve ark., 2023).
- **Diğer önemli ülkeler:** Çin, Hindistan, Fransa, Amerika Birleşik Devletleri ve Arjantin de önde gelen ayçiçeği üreticisi ülkelerdendir (Fomych ve ark., 2024).
 - Çin'in 2021'de 940 bin hektar, Fransa'nın 698 bin hektar, ABD'nin 503 bin hektar ve Hindistan'ın 255 bin hektar ekim alanı bulunmaktaydı (Fomych ve ark., 2024).

- Son yıllarda Türkiye’de ayçiçeği üretim alanlarında düzenli bir artış dikkat çekmektedir. Tarımsal Ekonomi ve Politika Geliştirme Enstitüsü (TEPGE) verilerine göre, 2021 yılında yaklaşık 0.9 milyon hektar olan ayçiçeği ekim alanı, 2023/24 sezonunda 952 bin hektara, 2024/25 sezonunda ise 974 bin hektara yükselmiştir. Bu değerler, Türkiye’nin dünya ayçiçeği üretiminde önemli bir paya sahip olduğunu ve ekim alanlarını istikrarlı biçimde genişlettiğini göstermektedir.

Ayçiçeği, kuzey yarım kürede genellikle 30° ile 55° kuzey enlemleri arasında, güney yarım kürede ise 10° ile 40° güney enlemleri arasında yetiştirilir (Derčan ve ark., 2023). Küresel ısınma senaryolarında, ayçiçeği ekim alanlarının daha yüksek enlemlere doğru kayabileceği de öngörülmektedir (Andrianasolo ve ark., 2016).

Bölümün amacı ve kapsamı

Bu bölümün amacı, ayçiçeği (*Helianthus annuus* L.) bitkisinin ağır metal stresine karşı gösterdiği fizyolojik tepkileri, bu stresin bitkinin büyüme ve verim performansı üzerindeki etkilerini ve ayçiçeğinin fitoremediasyon potansiyelini bütüncül bir bakış açısıyla ortaya koymaktır. Bölümde öncelikle ağır metal toksisitesinin bitki metabolizmasını nasıl etkilediği; fotosentez, su dengesi, besin elementi alımı ve oksidatif stres gibi temel fizyolojik süreçlerde oluşan bozulmalar ayrıntılı şekilde ele alınmaktadır. Ardından, ağır metal birikiminin ayçiçeğinin verim bileşenleri, yağ oranı ve genel tarımsal performansı üzerindeki sonuçları değerlendirilmekte; bitkinin stres koşullarına karşı geliştirdiği savunma ve tolerans mekanizmaları açıklanmaktadır. Son olarak, ayçiçeğinin yüksek biyokütlesi ve metal biriktirme yeteneği nedeniyle fitoremediasyon uygulamalarındaki rolü bilimsel bulgular ışığında tartışılmaktadır. Böylece bölüm hem çevresel kirlilikle mücadelede hem de

sürdürülebilir ayçiçeği üretiminde temel alınabilecek güncel ve kapsamlı bir bilgi kaynağı sunmayı hedeflemektedir.

2. AĞIR METALLER VE TOPRAK-BİTKİ ETKİLEŞİMİ

Ağır metaller, doğada düşük konsantrasyonlarda bulunmalarına rağmen, endüstriyel faaliyetler, madencilik, yoğun gübre ve pestisit kullanımı gibi antropojenik kaynaklar nedeniyle tarım topraklarında hızla birikerek ekosistem sağlığını tehdit eden en kritik kirleticilerden biri hâline gelmiştir. Toprakta çözünürlük, pH, organik madde ve kil mineralojisi gibi faktörlere bağlı olarak yüksek mobilite gösterebilen bu metaller, rizosferde bitki kökleriyle doğrudan etkileşime girerek hem alım süreçlerini hem de bitkinin fizyolojik işleyişini önemli ölçüde etkiler. Bitkiler, ağır metal iyonlarını ihtiyaç duydukları besin elementleriyle karıştırarak pasif veya aktif taşıma mekanizmalarıyla bünyelerine alabilmekte; bu durum hücrel metabolizmayı bozarak büyüme, gelişme ve verim üzerinde zararlı sonuçlar doğurabilmektedir. Bu etkileşimlerin derinlemesine incelenmesi, özellikle ayçiçeği gibi çevresel streslere duyarlı fakat aynı zamanda fitoremediasyon potansiyeli yüksek türlerde, kirliliğin etkilerini doğru değerlendirmek açısından vazgeçilmezdir.

2.1. Başlıca Ağır Metaller (Cd, Pb, Ni, Cr, Hg, As, Zn, Cu vb.).

Ağır metaller çevresel kirlilik açısından önemli bir tehdit oluşturan ve genel olarak 5 g/cm³'ten daha yüksek yoğunluğa sahip metaller olarak tanımlanmakta olup, biyolojik olarak parçalanamadıkları ve bazı durumlarda doğal yollarla çevreden temizlenemedikleri için kalıcı kirleticiler grubunda yer alırlar (Sevgi ve Leblebici, 2022). Bu metallerin bitkiler tarafından alınması, morfolojik, fizyolojik ve biyokimyasal bozulmalara neden olabilir (Sevgi ve Leblebici, 2022), besin zinciri aracılığıyla da insan ve hayvan sağlığı için risk oluşturur (Bawa ve ark., 2020).

Başlıca Ağır Metallerin Bitkiler Üzerindeki Etkileri:

Kadmiyum (Cd)

Kadmiyum, bitkiler için esansiyel olmayan, oldukça toksik bir ağır metaldir (Nungula ve ark., 2024). Doğal olarak atmosferde, tortul kayaçlarda ve topraklarda bulunsa da, fosfatlı gübrelerin yoğun kullanımı, madencilik faaliyetleri, atık sular, kanalizasyon çamuru, fosil yakıtların yakılması ve endüstriyel süreçler (çinko eritme, elektrokaplama) gibi antropojenik kaynaklar nedeniyle tarım topraklarında birikimi artar (Zulfiqar ve ark., 2021). Cd, topraktaki yüksek hareketliliği ve su çözünürlüğü nedeniyle bitkiler tarafından kolayca alınır ve esansiyel elementlerin alımını, taşınmasını ve fizyolojik işlevlerini bozar. Bitkilerde tohum çimlenmesinden verime kadar birçok aşamada zarara yol açabilir, özellikle de fotosentez, su alımı ve mineral besin emilimini etkiler (Zulfiqar ve ark., 2021, 2022).

Kurşun (Pb)

Kurşun ağır metaller arasında en yaygın kirleticilerden biri olup, bitki bünyesine girdiğinde klorofil üretimini azaltarak fotosentez oranını düşürür ve aktif oksijen türlerinin oluşumunu tetikleyerek oksidatif strese neden olan (Ekinci ve ark., 2018) ve bitkiler için esansiyel olmayan ve yüksek derecede toksik bir ağır metaldir (Ali ve Nas, 2018; Kumar ve ark., 2020). Başlıca kaynakları arasında madencilik, endüstriyel faaliyetler, agrokimyasallar, boyalar, fosil yakıtlar (geçmişte kurşunlu benzin kullanımı) ve akü üretimi yer alır (Kumar ve ark., 2020; Singh ve ark., 2017). Pb, toprakta yüksek oranda hareketsizdir ve sülfatlar ve fosfatlar halinde çökelti oluşturarak uzun süre kalıcılığını sürdürür (Singh ve ark., 2017). Bitkiler tarafından alındığında metabolik fonksiyonları, büyümeyi ve fotosentetik aktiviteyi olumsuz etkiler (Collin ve ark., 2022). Köklerde birikimi %42'ye varan oranlarda büyümeyi azaltabilir ve yaprak yüzeyinde kloroz, nekrotik lezyonlar ve cüceleşme gibi

zararlı belirtilere neden olabilir (Singh ve ark., 2017). Ayrıca, fotosentetik pigmentlerin, şeker ve protein içeriğinin değişmesine yol açarak bitki verimliliğini düşürür (Rahman ve ark., 2024; Singh ve ark., 2017).

Nikel (Ni)

Nikel, düşük konsantrasyonlarda bitkiler için esansiyel bir mikro besin elementi olmasına rağmen, yüksek konsantrasyonlarda toksik hale gelebilir (Hassan ve ark., 2019; Khan ve ark., 2024; Kumar ve ark., 2025). Endüstriyel faaliyetler, gübreler, kimyasallar, kanalizasyon çamuru ve nikel içeren ürünlerin kullanımı Ni kirliliğinin başlıca antropojenik kaynaklarıdır (Hassan ve ark., 2019). Ni, üre metabolizması ve üreaz enziminin aktivasyonu için gereklidir, ancak fazlası bitkilerde kloroz, büyüme inhibisyonu, fotosentez ve solunumun azalması, mineral beslenme bozuklukları, şeker taşınımı ve su ilişkilerinde sorunlara neden olur (Yu ve ark., 2024). Bitki yapraklarında 50 ila 100 ppm arasındaki Ni seviyeleri, ürün veriminde %25'e varan düşüşlere yol açabilir (Khan ve ark., 2024).

Krom (Cr)

Krom, bitkilerde fizyolojik bir rolü kanıtlanmamış, oldukça toksik bir ağır metaldir (Wani ve ark., 2022). Tarım topraklarındaki en yaygın toksik iz metallerden biridir ve antropojenik faaliyetler, yetersiz arıtma ve düzensiz atık bertarafı nedeniyle çevrede bol miktarda bulunur (Ali ve ark., 2023). Cr, toprakta Cr ve Cr olmak üzere farklı formlarda bulunur; Cr formu biyota için en yaygın ve tehlikeli formdur (Ali ve ark., 2023). Yüksek konsantrasyonlarda Cr, çimlenmeyi engeller, kök ve sürgün büyümesini kısıtlar, kloroz, fotosentetik bozukluklar, klorofil üretimi ve protein sentezinde azalma ve sonuç olarak bitki ölümüne neden olabilir (Saud ve ark., 2022). Cr, bitki hücrelerinde hücre zarlarını ve iç bileşenlerini tahrip edebilir, enzim aktivitesini değiştirebilir ve gen ekspresyonunu etkileyebilir (Saud ve ark., 2022).

Cıva (Hg)

Cıva, esansiyel olmayan, son derece tehlikeli bir kirleticidir ve küresel ölçekte canlı organizmalar için büyük bir tehdit oluşturur (Gworek ve ark., 2020; Natasha ve ark., 2019). Madencilik, endüstriyel süreçler ve fosil yakıtların yakılması gibi çeşitli antropojenik faaliyetler sonucu çevreye salınır (Natasha ve ark., 2019). Hg, çevrede bozulmadan kalır ve uçuculuğu nedeniyle hareketlidir (Gworek ve ark., 2020). Toprakta bitkilere, oradan da gıda zincirine kolayca geçebilir (Natasha ve ark., 2019). Hg toksisitesi, hücre zarı geçirgenliğinde değişiklikler, sülfhidril gruplarıyla reaksiyonlar ve esansiyel iyonların yer değiştirmesi gibi mekanizmalarla bitkileri etkiler. İnorganik formları genellikle organik formlardan bitkiler için daha fazla biyoyararlanıma sahiptir (Patra ve Sharma, 2000).

Arsenik (As)

Arsenik jeolojik oluşumlar, volkanik patlamalar, madencilik faaliyetleri, herbisitler ve böcek ilaçları gibi çeşitli doğal ve antropojenik kaynaklar aracılığıyla toprağa ve suya karışan, bitkiler için esansiyel olmayan oldukça zehirli bir elementtir (Murillo-Tovar ve ark., 2019; Sevgi ve Leblebici, 2022). Toprakta arsenat ($As(V)$) ve arsenit (As) formlarında bulunur. Arsenat, fosfata benzerliği nedeniyle bitki köklerindeki fosfat taşıyıcılarıyla rekabet eder ve metabolik süreçleri bozar (Murillo-Tovar ve ark., 2019; Sinha ve ark., 2023). Arsenik toksisitesi, tohum çimlenmesinin inhibisyonu, bitki boyunda azalma, kök büyümesinin gerilemesi, klorofil ve protein içeriğinde düşüş, fotosentetik kapasitede azalma ve hatta bitki ölümüne neden olabilir (Murillo-Tovar ve ark., 2019; Zhang ve ark., 2021). Bitkiler, arsenik zehirlenmesine karşı oldukça hassastır ve verim kaybına yol açar (Sinha ve ark., 2023).

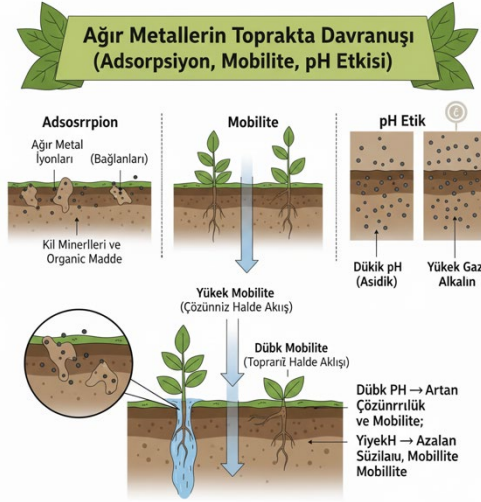
Çinko (Zn) ve Bakır (Cu)

Çinko ve bakır, bitki büyümesi ve gelişimi için esansiyel mikro besinlerdir, ancak yüksek konsantrasyonlarda toksik hale gelebilirler (Butt ve ark., 2020; Palmer ve Guerinot, 2009).

- **Çinko:** Zn, birçok enzimin proteini olarak görev yapar ve önemli biyokimyasal yollarda rol oynar (Butt ve ark., 2020). Yüksek konsantrasyonlarda reaktif oksijen türleri üretir, genç yapraklarda kloroz oluşumuna neden olur, doku su içeriğini azaltır ve magnezyum ile fosfor (P) konsantrasyonlarını değiştirir (Butt ve ark., 2020; Cuchiara ve ark., 2017). Zn eksikliği ise görsel semptomlar olmadan mahsul büyümesinde %50'ye varan azalmalara ve protein sentezinde düşüşe yol açabilir (Butt ve ark., 2020).
- **Bakır:** Cu, insan, hayvan ve bitkiler için esansiyel bir mikro besindir ve fotosentez, solunum, antioksidan sistemi ve sinyal iletimi gibi çeşitli morfolojik, fizyolojik ve biyokimyasal süreçlerde rol oynar (Chen ve ark., 2022; Kumar ve ark., 2020; Palmer ve Guerinot, 2009; Xu ve ark., 2024). Ancak aşırı Cu, hücre zarlarında bulunan sülfhidril gruplarına bağlanarak metabolik değişikliklere neden olabilir, lipid peroksidasyon oranını etkileyebilir, esansiyel elementlerin alımını bozabilir, klorofil sentezini ve elektron taşınımını etkileyebilir (Cuchiara ve ark., 2017). Ayrıca, serbest radikal ve reaktif oksijen türlerinin oluşumunu teşvik ederek oksidatif strese yol açar (Chen ve ark., 2022; Cuchiara ve ark., 2017).

2.2. Ağır Metallerin Toprakta Davranışı (adsorpsiyon, mobilite, pH etkisi)

Ağır metallerin toprak sistemlerindeki davranışı, çözünürlükleri, hareketlilikleri (mobilite) ve bitkiler tarafından biyoyararlanımları açısından kritik öneme sahiptir. Bu davranışlar, büyük ölçüde adsorpsiyon, desorpsiyon ve toprak pH'sı gibi karmaşık fiziksel ve kimyasal etkileşimler tarafından kontrol edilir (Violante ve ark., 2010). Ağır metaller, biyolojik olarak parçalanamadıkları ve doğal yollarla çevreden temizlenemedikleri için kalıcı kirleticiler grubunda yer alır.



Adsorpsiyon

Adsorpsiyon, ağır metallerin toprak kolloidleri, yani kil mineralleri, metal (hidr)oksitler ve toprak organik maddesi gibi katı faz bileşenlerinin yüzeylerine bağlanma sürecidir (Bradl, 2004; Merzougui ve ark., 2023; Yu ve ark., 2023). Bu süreç, metallerin çözelti fazından uzaklaştırılması ve toprak matrisinde tutulması yoluyla onların hareketliliğini ve biyoyararlanımını sınırlar (Merzougui ve ark., 2023; Yu ve ark., 2023). Toprağın katyon değişim kapasitesi, organik madde içeriği ve kil miktarı, adsorpsiyon kapasitesini etkileyen temel faktörlerdir (Merzougui ve ark., 2023; Yu ve ark., 2023). Organik madde, özellikle yüzey kompleksleşmesi, iyon değişimi ve yüzey çökeltmesi yoluyla ağır metalleri tutmada önemli bir rol oynar ve çeşitli fonksiyonel gruplara ve yüksek KDK'ye sahiptir (Merzougui ve ark., 2023).

Genel olarak, ince taneli topraklardaki ağır metal adsorpsiyonu, iri taneli topraklara göre daha yüksek bir eğilim gösterir (Merzougui ve ark., 2023).

Mobilite

Ağır metallerin toprak içindeki hareketliliği, topraktan bitkilere transferleri ve yeraltı sularına sızma riskleri açısından hayati bir parametredir (Violante ve ark., 2010). Metalin türü, toprak pH'sı, sorbentin yapısı (kil mineralleri, organik madde), organik ve inorganik ligandların varlığı ve konsantrasyonu (hümkik ve fülvik asitler, kök eksüdatları ve besinler) gibi birçok faktör hareketliliği etkiler (Violante ve ark., 2010). Redoks reaksiyonları da, metal türüne ve mikro çevreye bağlı olarak metalleri mobilize edebilir veya immobilize edebilir (Violante ve ark., 2010). Yüksek mobilite faktörü değeri, ağır metallerin toprakta nispeten yüksek reaktivitesini, kararsızlığını ve biyolojik olarak yüksek kullanılabilirliğini gösterir (Al-Hamdani ve ark., 2016). Örneğin, kadmiyum diğer metallere kıyasla en yüksek hareketliliğe sahipken, kurşun ikinci en mobil metal olarak kaydedilmiştir (Al-Hamdani ve ark., 2016). Topraktaki yüksek ağır metal konsantrasyonlarının olumsuz etkisi, metallerin hareketliliğine ve çözünürlüğüne bağlıdır. Metaller toprak bileşenleriyle sıkıca bağlı olduğunda, bitkiler için erişilemez hale gelir ve dikey hareketleri zayıf bir şekilde ifade edilir (Chernikova ve ark., 2020).

pH Etkisi

Toprak pH'sı, ağır metallerin topraktaki çözünürlüğünü, hareketliliğini ve bitkiler tarafından biyoyararlanımını kontrol eden en önemli faktörlerden biridir (Sun ve ark., 2022; Violante ve ark., 2010).

- **Düşük pH:** Hafif asidik ve asidik pH değerlerinde ağır metaller, toprak çözeltisinde biyoyararlanımı artan formların konsantrasyonunda bir artış gösterir (Sitarz-Palczak ve ark., 2018). Bunun nedeni, bu metallerin kimyasal bileşiklerinin

çözünürlüğünün artması ve toprak kolloidleri üzerindeki adsorpsiyonlarının azalmasıdır (Sitarz-Palczak ve ark., 2018). Genel olarak, asidik ve indirgeyici koşullar metal çözünürlüğü için en elverişli olup, pH'ın etkisi redoks potansiyelinden daha belirgindir (Chuan ve ark., 1996). Asidik koşullar altında ağır metallerin hareketliliği artar, bu da bitkiler tarafından daha kolay alınabilir olmalarına ve yeraltı sularına sızma risklerinin yükselmesine neden olur (Kicińska ve ark., 2021).

- **Yüksek pH:** Yüksek toprak pH'sında genellikle daha fazla metal tutulumu ve daha düşük çözünürlük meydana gelir (Bradl, 2004). Alkalın koşullar altında metaller seyrek çözünürlük gösterirler (Chuan ve ark., 1996). Toprak pH'sının artması, toprakta ağır metal iyonlarının adsorpsiyonunu artırabilir ve Pb'nin biyoyararlanımını önemli ölçüde azaltabilir (Sun ve ark., 2022).

Ağır metallerin toprakta farklı katı faz formlarında bulunması nedeniyle, toplam metal konsantrasyonları tek başına biyoyararlanım ve toksisite açısından iyi bir gösterge değildir (Violante ve ark., 2010). Bu nedenle, toprakta ağır metal davranışını anlamak için hem kimyasal ve fiziksel mekanizmalar hem de pH, Eh (redoks potansiyeli) ve iyonik güç gibi parametrelerin etkisi dikkate alınmalıdır (Bradl, 2004).

2.3. Bitkilerde Ağır Metal Alım Mekanizmaları

Bitkiler, çevrelerinde bulunan ağır metalleri, hem esansiyel besin maddesi olarak ihtiyaç duydukları elementlerin alım mekanizmalarıyla hem de özelleşmiş taşıyıcı proteinler aracılığıyla bünyelerine alırlar (Ejaz ve ark., 2023). Bu süreç, ağır metalin türü, konsantrasyonu, toprak özellikleri ve bitkinin fizyolojik durumu gibi birçok faktöre bağlı olarak karmaşık bir şekilde işler (Almotairy, 2024). Bitkiler, ağır metal birikimini ve dağılımını sıkı bir şekilde düzenlemek için bir dizi mekanizma geliştirmiştir (Chen ve ark., 2023).

Ağır metallerin bitkilere alımı ve taşınması genellikle şu aşamaları içerir:

1. **Rizosferde mobilizasyon:** Toprakta ağır metaller genellikle çözünmez formlarda bulunur ve bitkiler için biyoyararlanıma sahip değildir (An ve ark., 2020). Bitkiler, köklerinden çeşitli salgılar (kök eksüdatları) çıkararak rizosfer pH'sını değiştirebilir ve ağır metallerin çözünürlüğünü artırabilirler (An ve ark., 2020; Mohamed ve ark., 2025). Bu kök salgıları, organik asitler ve şelatlayıcı bileşikler içerebilir ve metallerin toprak partikülleriyle olan bağlarını kopararak hareketliliklerini ve biyoyararlanımlarını artırır (An ve ark., 2020; Seeda ve ark., 2022). Rizosferdeki mikroorganizmalar da siderofor üretimi gibi yollarla nikel gibi ağır metallerin bitki tarafından alınabilirliğini artırabilir (Seraj ve Rahman, 2018).
2. **Kök alımı:** Biyoyararlanımı artan metaller, kök yüzeyine tutunur ve daha sonra hücresel zardan kök hücrelerine geçer (An ve ark., 2020). Ağır metallerin köklere alımı başlıca iki yolla gerçekleşir:
 - **Apoplastik Yol:** Bu yolda, çözeltideki metaller hücre duvarı ve hücrelerarası boşluklar gibi düzenlenmemiş bölgelerden pasif olarak difüzyonla ilerler (Almotairy, 2024; Haque ve ark., 2020). Bu süreç enerji gerektirmez ve metalin topraktaki konsantrasyon gradientiyle ilişkilidir (Almotairy, 2024). Endodermis hücre duvarındaki Casparian şeridi, apoplastik akışa engel teşkil ederek metallerin vasküler silindire doğrudan geçişini sınırlar ve metallerin symplastik yola yönlendirilmesini sağlar (Almotairy, 2024; Haque ve ark., 2020).
 - **Simplastik yol:** Bu, ağır metallerin elektrokimyasal potansiyel gradyanlarına ve konsantrasyonlarına karşı aktif olarak

taşınmasını gerektiren enerji bağımlı bir yoldur (An ve ark., 2020; Islam ve ark., 2024). Bu yol, metal iyon taşıyıcıları veya kompleksleştirici araçlar aracılığıyla kolaylaştırılır (Islam ve ark., 2024). Bitki kök hücrelerinin plazma membranında bulunan özelleşmiş taşıyıcı proteinler (kanal proteinleri), belirli metallerin hücre zarları boyunca taşınmasında ve metallerin köklerden sürgünlere translokasyonunda önemli rol oynar (An ve ark., 2020). Esansiyel olmayan ağır metaller, esansiyel besin metallerini taşıyan transmembran taşıyıcılarla rekabet edebilir, bu da seçicilik eksikliğini ve toksik metallerin hücrelere girmesini açıklar (Ghosh, 2005).

3. **Hücre içi taşınım ve kofullarda depolama:** Kök hücrelerine girdikten sonra, ağır metal iyonları çeşitli şelatörlerle (organik asitler gibi) kompleksler oluşturabilir (Islam ve ark., 2024). Bu kompleksler daha sonra hücre dışı alanda (apoplastik hücre duvarları) veya hücre içi boşlukta (koful gibi simplastik bölgeler) hareketsiz hale getirilebilir (Islam ve ark., 2024). Kofullarda depolanan metal iyonları, ksileme doğru hareket edebilir ve kök simplastında ksilem akımı tarafından emilir (Islam ve ark., 2024).
4. **Köklerden sürgünlere translokasyon:** Ağır metaller, ksilem aracılığıyla köklerden bitkinin hava kısımlarına taşınır. Bu taşıma genellikle terleme (transpirasyon) tarafından yönlendirilir (Shahid ve ark., 2016). Metal taşıyıcı proteinler, bu uzun mesafeli taşınımında önemli bir role sahiptir (Ghuge ve ark., 2023; Mohamed ve ark., 2025). Hiperakümülatör bitkiler, köklerinde tuttukları ağır metalleri, ksilem aracılığıyla sürgünlerine taşıma eğilimindedir (Mohamed ve ark., 2025).
5. **Hücresel kompartmanlaşma ve uzaklaştırma:** Bitkiler, ağır metal stresine karşı koymak için çeşitli detoksifikasyon

mekanizmaları geliştirmiştir. Bu mekanizmalar arasında, metal iyonlarının hareketsiz hale getirilmesi (immobilizasyon), dışlama (exclusion), şelatlama (chelation) ve metal iyonlarının hücresel organellere (özellikle kofullere) bölmelenmesi (compartmentalization) yer alır (Ghughe ve ark., 2023). ATP-bağlayıcı kaset taşıyıcıları, doğal dirençle ilişkili makrofaj proteinleri ve ağır metal ATPazları gibi taşıyıcılar, metallerin kofullere veya apoplastlara sekestrasyonunu kolaylaştırır (Ghughe ve ark., 2023).

Taşıyıcı Proteinler

Bitkilerde ağır metal alımında rol oynayan taşıyıcı proteinler, genellikle esansiyel besin elementlerinin taşınımından sorumlu olanlarla benzerlik gösterir. Bu taşıyıcılar arasında ZIP, NRAMP, HMA ve MTP ailelerine ait proteinler bulunur (An ve ark., 2020, p. 2; Ghughe ve ark., 2023).

- **ZIP** (ZRT/IRT-like Protein): Bu proteinler, çinko, demir ve manganez gibi birçok katyonun bitki tarafından alımında ve hücre içi taşınımında görev alır. Özellikle çinko hiperakümülatörü *Thlaspi caerulescens* gibi bitkilerde, köklerden sürgünlere Zn alımını ve taşınımını artırdığı bilinmektedir (An ve ark., 2020).
- **NRAMP** (Natural Resistance-Associated Macrophage Protein): NRAMP taşıyıcıları, metal alımı, metallerin kofullerde sekestrasyonu (depolanması), ksileme yüklenmesi ve bitki içinde metallerin artırılmış translokasyonu gibi süreçlerde rol oynar (Khalid ve ark., 2016).
- **HMA** (Heavy Metal ATPase): HMA'lar, P-tipi ATPaz süper ailesinin üyeleridir. Çinko, kadmiyum ve kurşun gibi ağır metallerin hücre zarları boyunca, özellikle de kofullere yüklenmesinde ve

köklerden sürgünlere taşınmasında (translokasyon) etkilidirler (Seeda ve ark., 2022).

- **MTP (Metal Tolerance Protein):** Bu proteinler, metal iyonlarının hücre içi kompartmanlara, özellikle de kofullere taşınmasında rol oynayarak metal detoksifikasyonuna katkıda bulunur (Ghuge ve ark., 2023).

Arsenik gibi bazı toksik metalloidler, fosfat ve silikon taşıyıcıları gibi esansiyel besin veya faydalı besin taşıyıcıları aracılığıyla alınır. Kadmiyum, manganez, çinko ve demir taşıyıcıları tarafından taşınabilir (Zhao ve ark., 2021). Bu taşıma süreçleri, besinlerle etkileşimlere ve transkripsiyonel ve post-translasyonel düzeylerde düzenlemelere tabidir (Zhao ve ark., 2021).

Bitkilerin ağır metal alım mekanizmalarını anlamak, hem tarımsal üretimi artırmak hem de ağır metal kirliliğinin azaltılmasına yönelik fitoremediasyon stratejileri geliştirmek için hayati öneme sahiptir (An ve ark., 2020).

3. AĞIR METALLERİN AYÇİÇEĞİ BİTKİSİNİN FİZYOLOJİSİ ÜZERİNE ETKİLER

Ağır metaller, bitki metabolizmasını bozarak fotosentez, su dengesi ve besin elementi alımı gibi temel fizyolojik süreçlerde bozulmalara neden olur. Ayçiçeği (*Helianthus annuus* L.) gibi bitkiler, bu çevresel stres faktörlerine maruz kaldıklarında hem morfolojik hem de fizyolojik düzeyde çeşitli tepkiler gösterirler. Bu etkiler, bitkinin büyüme, gelişme ve verim performansını doğrudan etkiler.

3.1. Morfolojik Etkiler

Ağır metaller, ayçiçeği bitkisinin genel büyüme ve gelişmesini olumsuz etkileyerek çeşitli morfolojik değişikliklere yol açar (Hu ve ark., 2023).

- **Bitki Boyu:** Ağır metal toksisitesi, bitki boyunda önemli azalmalarla karakterizedir (Nofal ve ark., 2022). Metaller, hücre bölünmesini ve uzamasını inhibe ederek bitki büyümesini engeller (Mohamed ve ark., 2025). Özellikle kadmiyum, kurşun ve nikel gibi metaller, bitkilerin boy uzamasını ciddi şekilde baskılar (Zaib ve ark., 2024).
- **Kök gelişimi:** Kökler, ağır metallere maruz kalan ilk organlar olduğundan, morfolojik tepkiler en belirgin şekilde burada görülür (Hu ve ark., 2023). Ağır metaller, kök uzamasını, kök biyokütlesini ve kök hacmini azaltabilir (Fulekar, 2016; Zaib ve ark., 2024). Köklerdeki bu bozulmalar, bitkinin su ve besin alım kapasitesini düşürerek genel büyümesini olumsuz etkiler (Nofal ve ark., 2022). Kadmiyum ve kurşun, ozmotik stres ve hücre zarı hasarı nedeniyle tohum çimlenmesini ve kök uzamasını engeller. Yüksek konsantrasyonlarda Pb, Cd ve Cu, ayçiçeğinin kök gelişimini olumsuz etkileyebilir (Nofal ve ark., 2022).
- **Yaprak alanı ve biyokütle:** Ağır metaller, yaprak gelişimini ve dolayısıyla yaprak alanını kısıtlar (Kaonda ve Chileshe, 2023). Azalan yaprak alanı, fotosentez kapasitesinin düşmesine ve sonuç olarak bitki biyokütlesinin azalmasına yol açar (Mohamed ve ark., 2025). Cd, Pb, Zn gibi ağır metallerin yüksek konsantrasyonları biyokütle verimini azaltır (Fulekar, 2016). Örneğin, hidroponik bir çalışmada, artan Cd konsantrasyonları ayçiçeği bitki biyokütlesini %40'a kadar azaltmıştır (Miria ve ark., 2016). Genel olarak, yüksek dozda ağır metaller fizyolojyi etkileyerek bitki büyümesini ve kuru biyokütle verimini düşürür (Fulekar, 2016).

3.2. Fotosentez ve Pigment Yapısı

Fotosentez, bitki büyümesinin temelini oluşturan kritik bir süreçtir ve ağır metal stresi altında ciddi şekilde etkilenir (Hu ve ark., 2023; Rizwan ve ark., 2016).

- **Klorofil a/b içeriğinde değişim:** Ağır metaller, klorofil biyosentezini inhibe ederek ve klorofil pigmentlerinin parçalanmasını hızlandırarak klorofil a ve b içeriklerini düşürür (Çıkılı ve ark., 2020; Mohamed ve ark., 2025). Özellikle kurşun, klorofil üretimini azaltarak fotosentez oranını düşürür. Kadmiyum ve çinko gibi metallerin uygulamaları da ayçiçeği bitkisinde fotosentetik pigmentleri olumsuz etkileyerek önemli azalmalara neden olmuştur (Butt ve ark., 2020). Cd konsantrasyonu ile genç yapraklardaki klorofil konsantrasyonu arasında negatif ve anlamlı bir ilişki bulunmuştur (Maria ve ark., 2013).
- **Stoma iletkenliği ve CO₂ alımı:** Ağır metal stresi, stomaların kapanmasına neden olarak yaprakların CO₂ alımını kısıtlar (Guo ve ark., 2023). Azalan stoma iletkenliği, fotosentez için gerekli olan karbon dioksitin mevcudiyetini azaltır ve fotosentetik oranı düşürür (Mohamed ve ark., 2025). Stomalar üzerindeki ağır metal etkileri, stoma işlev bozukluğuna yol açarak fotosentez ve enerji metabolizması bozukluklarına neden olabilir (Guo ve ark., 2023).
- **Fotosentetik verimlilik:** Ağır metaller, kloroplastların yapısını ve fonksiyonunu bozarak fotosentetik verimliliği düşürür (Hu ve ark., 2023; Mohamed ve ark., 2025). Bu, ışık toplama komplekslerinin hasar görmesi, elektron taşıma zincirinin bozulması ve fotosentetik enzimlerin inhibisyonu gibi çeşitli mekanizmalar aracılığıyla gerçekleşir (Sperdoui, 2022). Kromun yüksek konsantrasyonları da fotosentetik bozukluklara ve klorofil üretiminde azalmaya neden olabilir. Ağır metaller, ışık ve karanlık reaksiyonları etkileyerek gaz

değişim parametrelerini doğrudan veya dolaylı olarak etkiler (Sadiq ve ark., 2017).

3.3. Su Dengesi ve Transpirasyon

Ağır metaller, ayçiçeği bitkisinin su dengesini ve transpirasyon oranını değiştirerek su stresi belirtilerine yol açabilir (Rucińska-Sobkowiak, 2016).

- **Hücre su potansiyeli:** Ağır metal toksisitesi, bitki hücrelerinin su potansiyelini düşürebilir (Burkhardt ve ark., 2023). Özellikle Cd, stomatal iletkenlik, su taşınımı ve hücre duvarı elastikiyeti üzerindeki etkileri nedeniyle su dengesi bozukluklarına yol açabilir (Çıkılı ve ark., 2020; Maria ve ark., 2013). Cd'nin ozmotik potansiyel üzerindeki etkisi, Ca'nın hücre yüzeyinden Cd ile yer değiştirmesi nedeniyle membran bütünlüğünün bozulmasından kaynaklanabilir (Çıkılı ve ark., 2020).
- **Su kullanım etkinliği:** Ağır metaller, bitkinin suyu kullanma verimliliğini azaltır (Malabad, 2022). Azalan su potansiyeli ve stoma iletkenliğindeki değişiklikler, bitkinin belirli bir miktar su tüketimi karşılığında ne kadar biyokütle üretebileceğini olumsuz etkiler (Mohamed ve ark., 2025). Nikel fazlası, bitkilerde şeker taşınımı ve su ilişkilerinde sorunlara neden olabilir. Köklerdeki su alımı, metaller tarafından bozulan kök emilim alanı, kök uzamasının azalması, ikincil büyümenin bozulması veya kök tüylerinin azalması gibi faktörlerden dolayı olarak etkilenebilir (Rucińska-Sobkowiak, 2016).

3.4. Besin Elementi Dengesizliği

Ağır metaller, bitkinin esansiyel besin elementlerini alımını ve dağılımını bozarak besin dengesizliklerine yol açar (Júnior ve ark., 2014;

Sperdoui, 2022). Bu durum, bitkinin genel sağlığı ve verimi üzerinde ciddi etkilere sahiptir.

- **N, P, K, Ca, Mg gibi makro besinlerde bozulmalar:** Ağır metaller, bu makro besin elementlerinin kökler tarafından alımını ve bitki içinde taşınmasını inhibe edebilir. Bu durum, besin elementleri arasındaki rekabet veya taşıyıcı proteinlerin inhibisyonu yoluyla meydana gelebilir (Mohamed ve ark., 2025). Örneğin, kadmiyumun esansiyel elementlerin alımını, taşınmasını ve fizyolojik işlevlerini bozduğu bilinmektedir. Pb stresi, ayçiçeği bitkilerinde azot (N), fosfor (P) ve potasyum (K) seviyelerini önemli ölçüde azaltmazken, kalsiyum ve magnezyum içeriklerini düşürmüştür (Abreu ve ark., 2016). Bu durum, Pb'nin neden olduğu büyüme gerilemesini kısmen açıklayabilir (Abreu ve ark., 2016). Nikel fazlası da mineral beslenme bozukluklarına neden olur.
- **Mikro besin etkileşimleri:** Ağır metaller, demir, manganez, çinko ve bakır gibi mikro besinlerin alımını ve kullanımını da etkiler (Madejón ve ark., 2003). Toksik ağır metaller, esansiyel mikro besinleri taşıyan taşıyıcı proteinlerle rekabet edebilir, bu da bu elementlerin eksikliğine veya aşırı birikimine yol açabilir (Júnior ve ark., 2014). Örneğin, aşırı bakır konsantrasyonu esansiyel elementlerin alımını bozabilir. Cd, Cu ve Zn uygulamaları, ayçiçeği bitkisindeki sodyum, kalsiyum, potasyum ve fosfor seviyelerini bozmuştur (Butt ve ark., 2020). Aşırı miktarda Cd, ayçiçeğinde bakır ve çinko homeostazı ile demir, fosfor, magnezyum ve manganez gibi fotosentez için gerekli elementleri dengesizleştirir (Júnior ve ark., 2014).

3.5. Oksidatif Stres ve Antioksidan Mekanizmalar

Ağır metaller, bitki hücrelerinde reaktif oksijen türlerinin üretimini artırarak oksidatif strese neden olur (Ansari ve ark., 2024; Mansoor ve ark., 2023; Rizwan ve ark., 2016). Bitkiler, bu zararlı etkilere karşı çeşitli antioksidan savunma mekanizmaları geliştirmiştir (Ansari ve ark., 2024).

- **Reaktif oksijen türlerinin artışı:** Ağır metaller, mitokondri ve kloroplastlarda elektron taşıma zincirlerini bozarak süperoksit radikali (O_2^-), hidrojen peroksit (H_2O_2) ve hidroksil radikali ($OH^\cdot$) gibi reaktif oksijen türleri (ROS) üretimini artırır (Mansoor ve ark., 2023; Mohamed ve ark., 2025). Bu ROS'lar, hücre zarları, proteinler, nükleik asitler ve klorofil gibi hücresel bileşenlere zarar verir (Mohamed ve ark., 2025). Kurşun, aktif oksijen türlerinin oluşumunu tetikleyerek oksidatif strese neden olur.
- **Lipid peroksidasyonu:** ROS'ların artışı, hücre zarlarının ana bileşenleri olan doymamış yağ asitlerinin peroksidasyonuna yol açar. Malondialdehit, lipid peroksidasyonunun bir göstergesi olarak kullanılır ve ağır metal stresi altındaki bitkilerde MDA seviyelerinde artış gözlenir (Abeed ve ark., 2022; Fedorova ve ark., 2025). Bu durum, hücre zarı bütünlüğünün bozulmasına ve işlevselliğinin azalmasına neden olur (Mohamed ve ark., 2025).
- **Enzimatik savunma:** Bitkiler, oksidatif stresle mücadele etmek için enzimatik antioksidan sistemleri aktive ederler (Rizwan ve ark., 2016). Bu enzimler şunları içerir:
 - **Süperoksit dismutaz:** Süperoksit radikallerini hidrojen peroksite dönüştürür (Mohamed ve ark., 2025). Ağır metaller SOD aktivitesini artırabileceği gibi, bazı durumlarda azaltabilir de (Gooneratne ve ark., 2019).

- **Katalaz:** Hidrojen peroksiti su ve oksijene parçalar (Mohamed ve ark., 2025). Ağır metaller CAT aktivitesini artırabilir (Gooneratne ve ark., 2019).
- **Peroksidaz:** Hidrojen peroksiti detoksifiye eden diğer bir enzimdir ve ağır metal stresine yanıt olarak aktivitesi artabilir (Mohamed ve ark., 2025).
- **Enzim dışı antioksidanlar:** Bitkiler, enzimatik sistemlere ek olarak, glutatyon, askorbik asit ve fenolik bileşikler gibi enzim dışı antioksidanları da sentezler (Abeed ve ark., 2022; Goncharuk ve Загоскина, 2023). Bu moleküller, ROS'ları doğrudan temizleyerek veya indirgeyerek hücreleri oksidatif hasardan korur (Mohamed ve ark., 2025). Fenolik bileşiklerin, ağır metal stresine karşı bitki tepkilerinde önemli bir rol oynadığı vurgulanmaktadır (Goncharuk ve Загоскина, 2023). Bitkiler, bu streslere karşı antioksidan enzimlerin aktivasyonu ve metal şelatlayıcı moleküllerin üretimi gibi karmaşık moleküler mekanizmalar geliştirmişlerdir.

Bu mekanizmalar, ayçiçeğinin ağır metal kirliliğine karşı toleransını anlamak ve fitoremediasyon potansiyelini değerlendirmek için hayati öneme sahiptir.

4. AĞIR METALLERİN AYÇİÇEĞİ BİTKİSİNİN TARIMSAL PERFORMANSI ÜZERİNE ETKİLER

Ağır metal kirliliği, küresel tarım için ciddi bir tehdit oluşturmakta ve ayçiçeği (*Helianthus annuus* L.) gibi ekonomik değeri yüksek bitkilerin tarımsal performansını olumsuz etkilemektedir. Topraktaki ağır metaller, bitkinin farklı büyüme ve gelişme aşamalarında, çimlenmeden verime kadar geniş bir yelpazede zararlı etkilere yol açar (Zaib ve ark., 2024). Ayçiçeğinin ağır metallere verdiği tepkiler, çeşit/varyete, toprak tipi, metalin türü, dozu ve

maruz kalma süresi gibi faktörlere bağlı olarak farklılık gösterebilir (Rizwan ve ark., 2016).

4.1. Çimlenme ve Çıkış Oranı

Tohum çimlenmesi ve fide çıkışı, bitkinin yaşam döngüsünün ilk ve en kritik evreleridir. Ağır metaller, bu evreleri doğrudan etkileyerek tarımsal performansta düşüslere neden olabilir. Nikel, kadmiyum ve kurşun gibi ağır metaller, ayçiçeği tohumlarının çimlenme oranlarını önemli ölçüde azaltır (Sadiq ve ark., 2019; Zaib ve ark., 2024). Örneğin, yapılan bir çalışmada, Hysun-33 ayçiçeği varyetesinde 0 mM'den 200 mM'ye çıkan Ni, Cd ve Pb konsantrasyonları altında çimlenme oranları %79'dan %0'a düşerken, FH-533 varyetesinde bu oran %75'ten %5'e gerilemiştir (Zaib ve ark., 2024). Düşük konsantrasyonlarda Cd, Pb ve Ni'nin kök ve sürgün uzamasını uyardığı, ancak yüksek konsantrasyonlarda çimlenmeyi ve uzamayı engellediği de belirtilmiştir (Gul ve Kul, 2021). Bu durum, topraktaki ağır metal kontaminasyonunun başlangıçtaki bitki popülasyonunu ve dolayısıyla nihai verimi doğrudan etkilediğini göstermektedir (Zaib ve ark., 2024).

4.2. Vejetatif Gelişme Performansı

Ağır metaller, ayçiçeği bitkisinin vejetatif gelişimini, özellikle bitki boyu, sürgün ve kök uzunluğu ile kuru biyokütle gibi parametreler üzerinde olumsuz etkiler (Butt ve ark., 2020, p. 8). Ağır metal stresi altındaki ayçiçekleri genellikle bodur büyüme gösterir (Kaonda ve Chileshe, 2023). Örneğin, nikelin 150 mM konsantrasyonunda sürgün uzunluklarında %47'lik bir azalma gözlemlenirken, 200 mM Cd uygulamasında her iki ayçiçeği varyetesinde de kök biyokütlesi %62 oranında azalmıştır (Zaib ve ark., 2024). Çinko ve bakırın yüksek konsantrasyonları da büyüme hızını ve diğer parametreleri olumsuz etkilemekte, özellikle metal kombinasyonları bu etkiyi daha belirgin hale getirmektedir (Butt ve ark., 2020). Bu durum, ağır metallerin hücre

bölünmesini ve uzamasını inhibe etmesiyle ve genel metabolik süreçleri bozmasıyla ilişkilidir (Agnello ve ark., 2018).

4.3. Çiçeklenme ve Generatif Gelişme

Ağır metallerin ayçiçeğinde çiçeklenme ve generatif gelişme üzerindeki doğrudan etkileri genellikle verim parametrelerindeki düşüşlerle dolaylı olarak anlaşılır. Fotosentetik kapasitedeki azalma ve besin dengesizlikleri gibi fizyolojik bozukluklar (Rizwan ve ark., 2016), bitkinin üreme organlarının gelişimini ve çiçeklenme zamanlamasını etkileyebilir. Çiçeklenme oranları ve generatif organların oluşumu, ağır metal stresine maruz kalan bitkilerde olumsuz yönde etkilenebilir, bu da daha sonra tohum oluşumunda ve verimde düşüşlere yol açar.

4.4. Tohum Verimi ve Verim Bileşenleri (baş çapı, bin dane ağırlığı vb.)

Ağır metaller, ayçiçeğinin tohum verimi ve verim bileşenleri üzerinde belirgin negatif etkiler gösterir. Araştırmalar, ağır metal uygulamalarının ayçiçeği baş çapını (kapitulum çapı), tohum sayısını ve 1000-dane ağırlığını önemli ölçüde azalttığını ortaya koymuştur (Butt ve ark., 2020; Yazdani ve ark., 2018). Örneğin, bir çalışmada, Cu ve Zn uygulamaları baş çapında kontrol grubuna göre anlamlı düşüşlere neden olmuş, 100-dane ağırlığında ise anlamlı olmayan düşüşler kaydedilmiştir (Butt ve ark., 2020). Tedavi edilmiş bitkilerde genel olarak tohum verimi de önemli ölçüde azalmıştır (Butt ve ark., 2020). Özellikle kombine metal uygulamaları, tekli metal uygulamalarına kıyasla tohum veriminde maksimum %35'lik bir azalmaya yol açmıştır (Butt ve ark., 2020). Ağır metallerin verim ve verim bileşenleri üzerindeki bu olumsuz etkisi, bitkinin genel gelişimindeki aksaklıkların bir sonucu olarak kabul edilir (Gul ve Kul, 2021).

4.5. Yağ Oranı ve Yağ Bileşimi Üzerine Etkiler

Ayçiçeği, yüksek yağ içeriği nedeniyle önemli bir yağ bitkisidir ve ağır metallerin bitki bünyesindeki varlığı hem yağ oranını hem de yağın kalitesini etkileyebilir. Ağır metallerin aşırı birikimi, ayçiçeği tohumlarında yağ verimini düşürebilir (Gul ve Kul, 2021). Kadmiyum ve cıva gibi ağır metallere maruz kalma, soya fasulyesi gibi diğer bitkilerde yağ içeriğini azaltırken, ana ve ikincil yağ asitlerinin profillerinde de değişikliklere neden olabilir (Farooq ve ark., 2018). Ayçiçeği yağı genellikle yüksek linoleik ve oleik asit içeriğiyle bilinir (Machate ve ark., 2022). Ağır metal stresi altında, bu esansiyel yağ asitlerinin oranlarında değişiklikler meydana gelebilir, bu da yağın besinsel ve endüstriyel kalitesini etkileyebilir.

4.6. Bitkisel Kalite Parametrelerinde Değişim

Ağır metaller, ayçiçeği bitkisinin genel bitkisel kalite parametrelerinde çeşitli değişikliklere neden olur. Bu değişiklikler, bitkinin besin değerini, raf ömrünü ve insan veya hayvan tüketimi için uygunluğunu etkileyebilir. Ağır metal stresi, bitkinin besin durumunu (Rizwan ve ark., 2016), yani temel makro ve mikro besin elementlerinin dengesini bozabilir. Bitkilerde vitamin E ve linoleik asit gibi değerli besin maddelerinin içeriği ağır metallerden olumsuz etkilenebilir (Gul ve Kul, 2021). Özellikle Ni, Cd ve Pb gibi metallerin ayçiçeği tarafından alımı, bitki sağlığını tehdit ederek gıda güvenliği açısından risk oluşturabilir (Gul ve Kul, 2021).

5. AYÇİÇEĞİNİN AĞIR METALLERE KARŞI TOLERANS MEKANİZMALARI

Ayçiçeği (*Helianthus annuus* L.), ağır metal kirliliğinin olduğu topraklarda varlığını sürdürebilmek için, alımını sınırlamaktan, bünyesine aldığı metalleri etkisiz hale getirip güvenli bölgelerde depolamaya kadar uzanan çeşitli karmaşık tolerans mekanizmaları geliştirmiştir. Bitkiler, ağır

metal stresine karşı koymak amacıyla metal iyonlarını hareketsiz hale getirme, dışlama, şelatlama ve metal iyonlarının hücresel organellere bölümlere ayırma gibi detoksifikasyon mekanizmalarını kullanır (Ghuge ve ark., 2023).

5.1. Köklerde Biyosorpsiyon ve Metal Bağlama

Ayçiçeği bitkileri, ağır metallerin toksik etkilerini azaltmak için kök seviyesinde çeşitli stratejiler kullanır. Bu stratejilerden biri, metal iyonlarını kök yüzeyinde veya kök hücre duvarlarında bağlama, yani biyosorpsiyon yeteneğidir. Kök hücre duvarları, pektinler ve hemiselülozlar gibi negatif yüklü bileşenler aracılığıyla metal iyonlarını elektrostatik olarak adsorbe edebilir (Ghuge ve ark., 2023). Bu mekanizma, metallerin ksileme ulaşmadan köklerde tutulmasına yardımcı olarak bitkinin geri kalanına yayılmasını sınırlar. Nitekim, bazı ayçiçeği çeşitleri, ağır metallerin köklerden sürgünlere taşınmasını sınırlayarak, metalleri köklerinde tutma kapasitesi göstermektedir (Rizwan ve ark., 2016).

5.2. Metal Şelasyonu

Hücresel düzeyde, ayçiçeği, bünyesine aldığı ağır metalleri etkisiz hale getirmek için şelatlama adı verilen bir strateji kullanır. Bu süreçte, bitki, metal iyonlarına sıkıca bağlanan ve onları biyolojik olarak zararsız komplekslere dönüştüren küçük molekülü peptid ve proteinler sentezler. Bu şelatörler arasında özellikle fitokelatinler ve metallotioneinler önemli rol oynar.

- **Fitokelatinler:** Bitkiler tarafından ağır metal stresine yanıt olarak sentezlenen glutasyon türevi peptitlerdir (Ghuge ve ark., 2023). PC'ler, özellikle kadmiyum gibi metallerle güçlü bir şekilde bağlanarak onları detoksifiye eder (Mohamed ve ark., 2025). Bu PC-metal kompleksleri daha sonra kofullere taşınarak hücre sitoplazmasından uzaklaştırılır ve toksik etkileri minimize edilir.

- **Metallotioneinler (MT):** Sistince zengin, düşük molekül ağırlıklı proteinlerdir ve hem esansiyel hem de esansiyel olmayan ağır metalleri bağlayabilirler (Ghugre ve ark., 2023). MT'ler, özellikle çinko ve bakır gibi mikro besinlerin homeostazisinde ve ayrıca Cd gibi toksik metallerin detoksifikasyonunda rol oynar (Ghugre ve ark., 2023). Ayçiçeği bitkisinde bu proteinlerin ekspresyonu, ağır metal varlığında artabilir, bu da bitkinin metal toleransını desteklediğini gösterir (Mohamed ve ark., 2025).

5.3. Hücresel detoksifikasyon

Ayçiçeği, ağır metal toksisitesini azaltmak için çeşitli hücresel detoksifikasyon mekanizmalarını devreye sokar. Bu mekanizmalar, genellikle oksidatif stresi yönetmeye ve metal iyonlarının zararlı etkilerini doğrudan azaltmaya odaklanır.

- **Antioksidan savunma sistemleri:** Ağır metaller genellikle reaktif oksijen türlerinin üretimini artırarak oksidatif strese yol açar (Mansoor ve ark., 2023). Ayçiçeği, bu ROS'ları temizlemek için hem enzimatik (Süperoksit Dismutaz, Katalaz, Peroksidaz) hem de enzimatik olmayan (glutatyon, askorbik asit, fenolik bileşikler) antioksidan sistemleri aktive eder (Mohamed ve ark., 2025; Rizwan ve ark., 2016). Bu sistemler, hücresel hasarı önleyerek veya onararak bitkinin ağır metal toleransını artırır (Ansari ve ark., 2024).
- **Enzim aktivitesinin düzenlenmesi:** Bitkiler, ağır metal stresine yanıt olarak, metal iyonlarının doğrudan etkilediği veya oksidatif stres nedeniyle işlevi bozulan enzimlerin aktivitesini değiştirebilir (Mohamed ve ark., 2025).

5.4. Kompartmantalizasyon

Kompartmantalizasyon, bitkilerin ağır metalleri hücre içinde toksik olmayan bir alanda depolayarak toleranslarını artıran temel bir mekanizmadır. Bu mekanizmada, metaller genellikle hücrelerin büyük merkezi kofullerine taşınır.

- **Kofuler depolama:** Ağır metal şelat kompleksleri (örn. PC-metal kompleksleri) veya serbest metal iyonları, spesifik taşıyıcı proteinler (ATP-bağlayıcı kaset taşıyıcıları, NRAMP'ler ve HMA'lar gibi) aracılığıyla sitoplazmadan kofule taşınır (Ghughe ve ark., 2023). Koful, bu metallerin hücrenin metabolik olarak aktif bölgelerinden izole edilmesini sağlayarak toksik etkilerini en aza indirir. Ayçiçeği gibi hiperakümülatör bitkiler, köklerinde tutulan ağır metalleri ksilem aracılığıyla sürgünlerine taşıma eğilimindedir (Mohamed ve ark., 2025). Bu, bitkinin metalleri toprak üstü kısımlarda biriktirerek fitoremediasyon (fitoekstraksiyon) uygulamaları için uygun hale gelmesini sağlar (Marathe, 2019; Pérez-Hernández ve ark., 2023; Waseem ve ark., 2023). Nitekim, ayçiçeği yapraklarında Cd, Pb ve Zn gibi ağır metallerin önemli oranlarda biriktiği gözlemlenmiştir (Pérez-Hernández ve ark., 2023).

5.5. Morfolojik Adaptasyonlar

Ağır metal stresine karşı ayçiçeği bitkileri, morfolojik düzeyde de çeşitli adaptasyonlar gösterebilir. Bu adaptasyonlar, genellikle metal alımını sınırlamaya veya stresin etkilerine karşı direnci artırmaya yöneliktir.

- **Kök sistemi değişiklikleri:** Ağır metal stresine maruz kalan bitkiler, kök morfolojilerinde değişiklikler gösterebilir. Örneğin, kök uzamasının azalması veya kök tüylerinin gelişiminin değişmesi, bitkinin topraktan metal alımını azaltmaya yönelik bir strateji olabilir (Rucińska-Sobkowiak, 2016). Bazı çalışmalar,

kurşuna maruz kalmış ayçiçeği fidelerinde ikincil kök sisteminin, metal alımını ve oksidatif stresi azaltmada rol oynadığını göstermiştir (Strubińska ve Hanaka, 2011). Yine de, ağır metal stresi genel olarak kök gelişimini, dolayısıyla biyokütleyi olumsuz etkileyebilir (Vadivel ve Senthilvalavan, 2019; Zaib ve ark., 2024).

- **Sürgün büyümesinde değişiklikler ve biyokütle:** Ağır metal stresine toleranslı ayçiçeği çeşitleri, sürgün biyokütlesini koruma veya stres altında belirli bir seviyede büyümeyi sürdürme yeteneği gösterebilir (Rizwan ve ark., 2016). Bu durum, bitkinin genel sağlığını ve fitoremediasyon potansiyelini destekler. Öte yandan, bazı ağır metaller, özellikle yüksek konsantrasyonlarda, bitki boyunu ve genel biyokütleyi ciddi şekilde azaltabilir (Fedorova ve ark., 2025).

Bu tolerans mekanizmaları, ayçiçeğinin ağır metal kirliliğinin olduğu topraklarda büyüme yeteneğini ve potansiyel fitoremediasyon uygulamalarında kullanımını destekleyen temel faktörlerdir (Rizwan ve ark., 2016).

6. FİTOREMEDİASYONDA AYÇİÇEĞİ KULLANIMI

Ayçiçeği (*Helianthus annuus* L.), yüksek biyokütlesi, hızlı büyüme hızı ve çeşitli ağır metalleri topraktan alma ve biriktirme yeteneği nedeniyle fitoremediasyon uygulamalarında önemli bir potansiyele sahip bitki türlerinden biridir (Fulekar, 2016; Waseem ve ark., 2023). Bu özellikler, ayçiçeğini geleneksel temizleme yöntemlerine kıyasla çevre dostu, düşük maliyetli ve estetik bir alternatif haline getirmektedir (Fulekar, 2016; Meral, 2019).

6.1. Ayçiçeğinin Fitoekstraksiyon Potansiyeli

Fitoekstraksiyon, bitkilerin ağır metalleri topraktan veya sudan alarak biyokütlelerinde biriktirmesi ve ardından bu bitkilerin hasat edilmesiyle kirleticilerin ortamdan uzaklaştırılması prensibine dayanır (Niu ve ark., 2023;

Pérez-Hernández ve ark., 2023). Ayçiçeği, bu teknikte öne çıkan bir türdür. Özellikle kadmiyum, kurşun, çinko ve nikel gibi metallerin giderilmesinde etkili olduğu gösterilmiştir (Fulekar, 2016; Meral, 2019; Pérez-Hernández ve ark., 2023). Ayçiçeği, stresli koşullar altında büyüyebilme kapasitesinin yanı sıra, önemli miktarda metalik kirlletici biriktirebilmesi ve bu metalleri köklerden sürgünlere taşıyabilmesi nedeniyle fitoekstraksiyon için uygun bir bitki olarak kabul edilir (Niu ve ark., 2023). Yapılan çalışmalar, ayçiçeğinin sulu ortamlarda %79-90 Cd, %77-89 Pb ve %81-92 Zn oranında temizleme kapasitesine sahip olduğunu göstermektedir (Fulekar, 2016). Ayçiçeği ayrıca ağır metal kontamine alanların ıslahı için uygun bir bitki olarak değerlendirilmektedir (Sorour ve ark., 2022).

6.2. Ağır Metal Birikim Kapasitesi

Ayçiçeğinin ağır metal birikim kapasitesi, metal türüne ve konsantrasyonuna göre değişiklik göstermekle birlikte, bitkinin farklı kısımlarında önemli düzeylerde birikim gözlemlenir (Fulekar, 2016; Geçgel, 2014; Gul ve Kul, 2021). Genel olarak, Zn, Cd ve Pb gibi metallerin en yüksek seviyeleri köklerde, ardından sürgünlerde (gövde ve yapraklar) tespit edilmiştir (Fulekar, 2016). Ayçiçeği yapraklarının ve gövdelerinin ağır metal içeriğinin sırasıyla %55 ve %45 oranında olduğu belirtilmiş, Ni'nin en çok biriken metal olduğu (15.71 mg/kg) rapor edilmiştir (Pérez-Hernández ve ark., 2023). Angelova ve ark. tarafından yapılan bir çalışmada, ayçiçeği yapraklarının Cd'nin %79'unu, Pb'nin %56'sını ve Zn'nin %47'sini topladığı bulunmuştur (Pérez-Hernández ve ark., 2023). Ayrıca, *Helianthus annuus* L.'nin Cd ve Pb için sırasıyla 2.233 mg/kg ve 166 mg/kg'a kadar konsantrasyonlarda hayatta kalabildiği ve bu düzeylerde metal biriktirme yeteneği nedeniyle hiperakümülatör olarak değerlendirilebileceği belirtilmiştir (Nirwisaya ve Titah, 2023). Bu yüksek biyokütle üretim yeteneği, ayçiçeğinin ağır metal alımını artırmasına olanak tanır (Çıkkılı ve ark., 2020; Fulekar, 2016).

6.3. Saha Çalışmaları ve Uygulama Örnekleri

Ayçiçeğinin fitoremediasyon amaçlı kullanımı, hem kontrollü koşullarda hem de saha düzeyinde birçok çalışmayla desteklenmektedir (Goicochea-Trelles ve García-López, 2022; Hamutoğlu ve ark., 2012; Özkan ve ark., 2015, 2016). Eski bir madende ayçiçeği yetiştirilerek toprağın iyileşme potansiyeli, kirlenmemiş bölgelerle karşılaştırmalı olarak incelenmiştir (Hamutoğlu ve ark., 2012). Çinko kirliliğine sahip topraklarda ayçiçeği kullanılarak gerçekleştirilen fitoremediasyon çalışmalarında %79 gibi yüksek bir fitoremediasyon verimi elde edilmiştir (Özkan ve ark., 2015). Benzer şekilde, kadmiyumla kirlenmiş topraklarda farklı bitkilerle (ayçiçeği, mısır ve kanola) fitoremediasyon çalışması yapılmış, bitki türleri metal alım kapasitesi yüksek ve piroliz için değerli olabilecek yağ içeriği yüksek türlerden seçilmiştir (Özkan ve ark., 2016). Kurşun ve kadmiyumla kontamine edilmiş saksı deneylerinde ayçiçeğinin, bu metalleri sürgünlerinde ve köklerinde biriktirme yeteneği doğrulanmıştır (Goicochea-Trelles ve García-López, 2022). Bu tür gerçek dünya ve deneysel uygulamalar, ayçiçeğinin ağır metal kirliliğinin giderilmesinde pratik ve uygulanabilir bir çözüm olduğunu ortaya koymaktadır (Goicochea-Trelles ve García-López, 2022; Özyiğit, 2021).

6.4. Fitoremediasyon Etkinliğini Artıran Uygulamalar (şelatörler, organik madde, mikoriza vb.)

Ayçiçeği ile fitoremediasyon etkinliğini artırmak için çeşitli toprak düzenleyicileri ve biyolojik uygulamalar kullanılmaktadır.

- **Şelatörler:** Ethylenediaminetetraacetic Asit (EDTA) ve sitrik asit gibi şelatörlerin kullanımı, ağır metallerin topraktan çözünürlüğünü ve bitki tarafından alımını artırabilir (Capuana, 2020; Kalyvas ve ark., 2022). EDTA'nın, ayçiçeğinde Cd, Cr ve Ni alımını ve translokasyonunu artırmada etkili olduğu gösterilmiştir (Capuana,

2020). Ancak yüksek konsantrasyonlarda sitrik asidin fitotoksik etkiye sahip olduğu belirtilmiştir (Capuana, 2020).

- **Organik madde:** Biyokatılar ve gübre gibi organik ilavelerin eş zamanlı kullanımı, ayçiçeği gibi ornamental bitkilerin ağır metal biriktirme kapasitesini önemli ölçüde artırabilir (Cerrón ve ark., 2020). Organik maddeler, toprağın fizikokimyasal özelliklerini iyileştirerek ve metallerin biyoyararlanımını etkileyerek fitoremediasyon süreçlerine katkıda bulunur (Kalyvas ve ark., 2022). Zeytinyağı değirmeni atık suyu gibi organik maddelerin EDTA ile kombinasyon halinde kullanımı, As, Pb ve Zn'nin ayçiçeği tarafından alımını artırmıştır (Kalyvas ve ark., 2022).
- **Mikoriza ve diğer mikrobiyal uygulamalar:** Mikorizal mantarlar ve bitki büyümesini teşvik eden diğer mikroorganizmalar, ayçiçeğinin ağır metal toleransını ve alımını artırmada önemli rol oynar (Paulo ve ark., 2023; Sorour ve ark., 2022; Tütüncü, 2024). Özellikle arbusküler mikorizal mantarlar ile kök kolonizasyon oranlarının yüksek olduğu durumlarda, Zn ve Cd ile kirlenmiş topraklarda ayçiçeğinin metal remediasyon yetenekleri artmaktadır (Paulo ve ark., 2023). Mikoriza, vermikompost ve hümik asit uygulamalarının süs ayçiçeği büyüme parametreleri üzerindeki etkileri de incelenmiştir (Tütüncü, 2024). Mikrobiyal-bitki etkileşimleri, ağır metal kirliliğine maruz kalmış alanların temizlenmesi için sürdürülebilir bir araç olarak değerlendirilmektedir (Sorour ve ark., 2022).

Bu entegre yaklaşımlar, ayçiçeğinin fitoremediasyon potansiyelini optimize ederek, ağır metal kirliliğiyle mücadelede daha etkili ve sürdürülebilir çözümler sunmaktadır (Cerrón ve ark., 2020; Kalyvas ve ark., 2022; Paulo ve ark., 2023; Sorour ve ark., 2022).

7. AĞIR METAL KİRLİLİĞİNİN AZALTILMASINDA TARIMSAL YÖNETİM STRATEJİLERİ

Ağır metal kirliliğinin tarım alanları üzerindeki olumsuz etkileriyle mücadele etmek, gıda güvenliğini sağlamak ve ekosistem sağlığını korumak için çeşitli tarımsal yönetim stratejileri geliştirilmiştir. Bu stratejiler, metallerin toprakta hareketliliğini azaltmaya, bitkiler tarafından alımını kısıtlamaya veya bitkilerin strese karşı toleransını artırmaya odaklanır. Ayçiçeği gibi bitkisel üretimde önemli olan türler için bu yaklaşımlar büyük önem taşır.

7.1. Toprak İyileştirme Uygulamaları (kireçleme, organik madde, biyokömür)

Toprak iyileştirme uygulamaları, ağır metallerin toprak matrisindeki davranışını değiştirerek biyoyararlanımlarını ve hareketliliklerini azaltmayı hedefler.

- **Kireçleme:** Toprak pH'sının yükseltilmesi, çoğu ağır metalin (özellikle Cd, Pb, Zn) çözünürlüğünü ve hareketliliğini azaltan en yaygın ve etkili yöntemlerden biridir (Neu ve ark., 2017; Sönmez ve Kılıç, 2021). Kireç ilavesiyle Cd, Cu, Pb ve Zn'nin biyoyararlanımında önemli azalmalar belirlenmiştir (Sönmez ve Kılıç, 2021). Kireçleme ile toprak pH'sı yükseltildiğinde, metaller toprak partiküllerine daha sıkı bağlanır veya çözünmez hidroksit ve karbonat formlarına dönüşür. Bu durum, ayçiçeği gibi bitkilerin ağır metal alımını sınırlar ve toksisiteyi hafifletir (Vadivel ve Senthilvalavan, 2019).
- **Organik madde ilavesi:** Kompost, gübre veya bitki kalıntıları gibi organik maddelerin toprağa eklenmesi, ağır metallerle kompleks oluşturarak veya şelatlar yaparak onların çözünürlüğünü azaltır (Cerrón ve ark., 2020; Kalyvas ve ark.,

2022). Organik madde, toprağın katyon değişim kapasitesini artırarak metal iyonlarını adsorbe edebilir ve bitkiler tarafından alınmasını engelleyebilir. Ayrıca, mikrobiyal aktiviteyi teşvik ederek toprağın genel sağlığını iyileştirir ve metal mobilizasyonunu dolaylı olarak etkileyebilir (Kolbas ve ark., 2012).

- **Biyokömür:** Biyokömür, organik maddelerin oksijensiz ortamda piroliziyle elde edilen karbonca zengin bir malzemedir. Yüksek yüzey alanı, gözenekli yapısı ve iyon değişim kapasitesi sayesinde ağır metalleri güçlü bir şekilde adsorbe edebilir (Kaya ve ark., 2019). Biyokömür uygulamaları, fasulye ve mısır bitkilerinde N, P, K, Ca, Fe, Zn, Cu ve Mn konsantrasyonlarını artırırken, ağır metallerin toprakta immobilizasyonuna katkıda bulunur (Mounirou ve ark., 2020).

7.2. Mikrobiyal Uygulamalar

Mikrobiyal uygulamalar, bitkilerin ağır metal stresine karşı direncini artıran ve fitoremediasyon potansiyelini destekleyen biyolojik yaklaşımlardır.

- **Bitki büyümesini teşvik eden rizobakteriler:** PGPR'ler, bitki kökleriyle simbiyotik veya serbest yaşam tarzı sürdüren bakterilerdir. Ağır metal kirliliğinin olduğu topraklarda ayçiçeği gibi bitkilerin büyümesini teşvik edebilirler (Sorour ve ark., 2022; Waseem ve ark., 2023). Bu bakteriler, bitki hormonu üretimi, besin elementlerinin çözünürlüğünü artırma (örn. fosfat çözme), siderofor salgılama ve bitki patojenlerine karşı koruma sağlama gibi mekanizmalarla bitkilerin strese toleransını artırır (Kaushal ve Pati, 2025; Rahman ve Seraj, 2018). Bazı PGPR'ler, ayçiçeğinin çinko alımını artırarak kadmiyum alımını azaltmada etkili olabilir (Aimen ve ark., 2024). Ayrıca, kurşuna toleranslı rizobakterilerin

aşılması, ayçiçeğinde kurşun kontaminasyonunun toksik etkilerini azaltarak büyümeyi ve fizyolojik özellikleri iyileştirmiştir (Saleem ve ark., 2019).

- **Mikorizal mantarlar:** Arbusküler mikorizal mantarlar, bitki kökleriyle mutualist bir ilişki kurarak, bitkilerin su ve besin elementi alımını (özellikle P) artırır ve ağır metal stresine karşı toleranslarını güçlendirir (Atakan ve ark., 2018). AMF, hifleri aracılığıyla topraktaki ağır metalleri bağlayabilir, şelatlayabilir veya kofullerinde depolayarak bitkiye metal translokasyonunu azaltabilir (Ali ve ark., 2024; Cartaya-Rubio ve ark., 2024). Bu sayede ayçiçeği gibi bitkilerin kontamine topraklarda daha sağlıklı büyümesi ve gelişmesi sağlanır (Fulekar, 2016; Tütüncü, 2024). Mikorizal mantarlar, metal-bağlama yoluyla bitki biyokütlesini artırabilir ve ağır metal biyoyararlanımını azaltabilir (Fulekar, 2016).

7.3. Gübreleme Stratejileri

Dengeli ve optimize edilmiş gübreleme stratejileri, ağır metal kirliliğinin olduğu topraklarda ayçiçeğinin besin alımını iyileştirerek ve metal toksisitesini azaltarak tarımsal performansını artırabilir.

- **Esansiyel besin elementlerinin yeterli sağlanması:** Ağır metaller, esansiyel besin elementlerinin alımını ve kullanımını bozabilir. Bu nedenle, bitkinin ihtiyaç duyduğu makro ve mikro besin elementlerinin yeterli düzeyde sağlanması, metal toksisitesinin olumsuz etkilerini hafifletebilir (Erbaş ve Şenates, 2020; Öner ve Demirkıran, 2023). Özellikle, çinko ve bakır gibi mikro besinler, uygun konsantrasyonlarda uygulandığında bitkilerin metal direncini artırabilir, ancak aşırı miktarlarda kendileri toksik hale gelebilir (Gul ve Kul, 2021).

- **Silikon uygulaması:** Silikon, bitkilerde ağır metal toksisitesini azaltan faydalı bir element olarak kabul edilir (Sevgi ve Leblebici, 2022). Si uygulamaları, ayçiçeği de dahil olmak üzere birçok bitkide ağır metal alımını azaltabilir, oksidatif stresi hafifletebilir ve büyüme parametrelerini iyileştirebilir (Fujita ve Hasanuzzaman, 2022).

7.4. Fizyolojik Düzenleyiciler (humik asit, amino asitler, antistres ajanları)

Fizyolojik düzenleyiciler, bitkilerin ağır metal stresine karşı doğal savunma mekanizmalarını destekleyerek veya stresin etkilerini doğrudan azaltarak bitkinin direncini artırır.

- **Humik asitler:** Humik asitler, toprak organik maddesinin önemli bileşenleridir ve bitki büyümesini teşvik eden özelliklere sahiptir. Ağır metallerle şelatlar oluşturarak onların hareketliliğini ve biyoyararlanımını azaltabilirler (Bulut, 2020). Ayrıca, humik asitler bitkilerin besin alımını iyileştirebilir ve stres koşulları altında bitki metabolizmasını düzenleyebilir (Tütüncü, 2024).
- **Amino asitler:** Amino asitler, bitkilerde protein sentezinin temel yapı taşlarıdır ve stres koşullarında önemli rol oynarlar. Dışarıdan uygulanan amino asitler, bitkilerin ağır metal stresine karşı toleransını artırabilir (Abreu ve ark., 2016). Özellikle prolin, ozmotik düzenleyici olarak görev yaparak hücreleri oksidatif hasardan koruyabilir (Yılmaz ve ark., 2017).
- **Antistres ajanları:** Salisilik asit ve diğer bitki büyüme düzenleyicileri, ayçiçeği bitkisinde ağır metal stresinin olumsuz etkilerini hafifletebilir ve iyileştirme verimliliğini artırabilir (Sanjana ve ark., 2024; Yavaş ve ark., 2022). SA, antioksidan savunma sistemini düzenleyerek bitkinin toleransını güçlendirir

(Yavaş ve ark., 2022). Brassinosteroidler gibi dışsal bitki büyüme düzenleyicileri de ayçiçeğinde uranyum ve kadmiyum stresinin olumsuz etkilerini azaltarak iyileştirme etkinliğini artırabilir (Fujita ve Hasanuzzaman, 2022).

7.5. Uygulamalı Risk Yönetimi

Ağır metal kirliliğinin olduğu tarım arazilerinde sürdürülebilir ayçiçeği üretimi için kapsamlı bir risk yönetimi yaklaşımı benimsemek esastır.

- **Toprak analizi ve izleme:** Kontamine alanlarda düzenli toprak analizi yapmak, metal konsantrasyonlarını ve toprak özelliklerini (pH, organik madde içeriği vb.) belirlemek için kritik öneme sahiptir (Özyiğit, 2021). Bu veriler, uygun yönetim stratejilerinin seçilmesi ve uygulama etkinliğinin değerlendirilmesi için bir temel oluşturur.
- **Bitki seçimi ve çeşit geliştirme:** Ağır metallere karşı daha toleranslı veya daha az metal biriktiren ayçiçeği çeşitlerinin seçimi, risk yönetiminin önemli bir parçasıdır (Debaeke ve ark., 2021; Rizwan ve ark., 2016). Genetik ıslah çalışmaları, düşük metal translokasyonuna sahip veya daha yüksek detoksifikasyon kapasitesine sahip çeşitlerin geliştirilmesine odaklanabilir.
- **Hasat ve biyokütle yönetimi:** Ağır metalleri biriktiren bitkilerin hasat edilmesi ve güvenli bir şekilde imha edilmesi, kontamine alanların temizlenmesinde önemli bir adımdır (Meral, 2019). Hasat sonrası biyokütlenin enerji üretimi (biyokütle yakma) veya piroliz gibi yöntemlerle işlenmesi, metallerin daha konsantre bir formda geri kazanılmasını veya stabilize edilmesini sağlayabilir (Hamutoğlu ve ark., 2012; Özkan ve ark., 2015, 2016).
- **Yasal düzenlemeler ve halkın bilinçlendirilmesi:** Ağır metal kirliliğini önlemek ve yönetmek için ulusal ve uluslararası düzeyde

yasal düzenlemelerin uygulanması büyük önem taşır (Nguyen ve ark., 2023). Aynı zamanda çiftçilerin ve tüketicilerin ağır metal riskleri ve uygulanabilecek yönetim stratejileri konusunda bilinçlendirilmesi, gıda güvenliğinin sağlanmasına katkıda bulunur. Bu entegre yaklaşım, ayçiçeği üretimini ağır metal kirliliğine karşı daha dirençli hale getirerek hem çevresel sürdürülebilirliği hem de tarımsal verimliliği destekler (Geçgel, 2014).

8. GELECEK PERSPEKTİFLERİ

Ağır metal kirliliğinin tarım ekosistemleri üzerindeki artan tehdidi, sürdürülebilir tarım uygulamaları ve gıda güvenliği için acil çözümler gerektirmektedir (Almotairy, 2024; Raza ve ark., 2024). Bu bağlamda, ayçiçeği gibi bitkilerin ağır metallere karşı toleransını ve fitoremediasyon potansiyelini artırmaya yönelik araştırmalar ve uygulamalar, gelecekteki tarımsal stratejilerin merkezinde yer alacaktır.

8.1. Genetik İslah ve Ağır Metal Toleranslı Ayçiçeği Çeşitleri

Genetik ıslah, ağır metal toleransı yüksek ve biriktirme kapasitesi optimize edilmiş ayçiçeği çeşitleri geliştirilmesi için kritik bir araçtır (Moreira ve ark., 2021).

- **Mevcut çeşitlerin değerlendirilmesi:** Ayçiçeği çeşitleri arasında ağır metal birikim kapasitesi ve tolerans açısından önemli farklılıklar bulunmaktadır (Debaeke ve ark., 2021; Rizwan ve ark., 2016). Bazı çeşitlerin kadmiyum ve çinko konsantrasyonlarına karşı farklı tepkiler gösterdiği ve alım/taşıyım modellerinin çeşitler arasında değiştiği belirlenmiştir (Moreira ve ark., 2021). Bu durum, doğal olarak var olan genetik varyasyonun kullanılarak yeni çeşitlerin geliştirilmesi için bir temel oluşturmaktadır. Örneğin, bazı

ayçiçeği mutantlarının Cd, Zn ve Pb birikimini kontrole göre 7.5 ila 9.2 kat artırdığı gözlemlenmiştir (An ve ark., 2020).

- **Hedefe yönelik ıslah stratejileri:** Geleneksel ıslah yöntemlerinin yanı sıra, kimyasal mutagenез (örneğin, EMS ile) ve genetik mühendisliği gibi modern teknikler, ağır metal toleransı yüksek veya fitoekstraksiyon yeteneği gelişmiş ayçiçeği varyantlarının geliştirilmesinde önemli potansiyel sunmaktadır (An ve ark., 2020; Moreira ve ark., 2021). Genetik mühendisliği, istenen özellikleri çok daha kısa sürede elde etme avantajına sahiptir ve hiperakümülatör bitkilerden genlerin aktarılmasına olanak tanır (An ve ark., 2020). Ayrıca, kuraklık ve tuz toleransı gibi abiyotik streslere karşı direnci artırmaya yönelik ıslah programları, ağır metal kirliliğine maruz kalan topraklarda bitki performansını iyileştirebilir (Moreira ve ark., 2021).

8.2. Omik Teknolojiler (transkriptomik, proteomik, metabolomik)

Omik teknolojiler, bitkilerin ağır metal stresine verdiği moleküler düzeydeki yanıtları anlamak ve bu yanıtları manipüle ederek toleranslı çeşitler geliştirmek için devrim niteliğinde fırsatlar sunmaktadır (Raza ve ark., 2024; Singh ve ark., 2016).

- **Transkriptomik:** Transkriptomik analizler, ağır metal stresi altında gen ekspresyonundaki değişiklikleri ortaya koyar (Fu ve ark., 2022). Bu sayede, ağır metal alımı, taşınımı, detoksifikasyonu ve tolerans mekanizmalarında rol oynayan genler (örn. ABC ve ZIP genleri) tanımlanabilir (Fu ve ark., 2022). Örneğin, farklı Cd birikim seviyelerine sahip ayçiçeği çeşitlerinde yapılan transkriptomik karşılaştırmalar, Cd toleransı mekanizmalarına dair önemli bilgiler sağlamıştır (Fu ve ark., 2022).

- **Proteomik:** Proteomik çalışmalar, bitkilerin ağır metal stresine karşı sentezlediği proteinleri ve bu proteinlerin fonksiyonel rollerini inceleyerek hücresel düzeydeki yanıtları aydınlatır (Raza ve ark., 2024; Singh ve ark., 2016). Stresle ilişkili proteinlerin tanımlanması, bitkinin savunma mekanizmalarını anlamamıza yardımcı olur.
- **Metabolomik:** Metabolomik, ağır metal stresi altındaki bitkilerde metabolit profilindeki değişiklikleri analiz ederek, bitkinin biyokimyasal adaptasyon stratejilerini ortaya koyar (Raza ve ark., 2024; Singh ve ark., 2016). Bu, bitkinin stresle mücadele etmek için ürettiği antioksidanlar, şelatörler ve ozmolitler gibi bileşiklerin belirlenmesini sağlar.

Bu omik verilerin yapay zeka ve yüksek verimli fenotipleme ile entegrasyonu, genotip-fenotip ilişkilerinin haritalandırılmasına yardımcı olacak ve metaloid toksisitesine karşı sürdürülebilir ve dirençli bitki çeşitleri oluşturma kapasitesini artıracaktır (Raza ve ark., 2024).

8.3. Sürdürülebilir Tarım ve Çevresel Yönetim Politikaları

Ağır metal kirliliğiyle mücadelede sadece teknolojik çözümler değil, aynı zamanda kapsamlı sürdürülebilir tarım uygulamaları ve etkin çevresel yönetim politikaları da hayati öneme sahiptir (Almotairy, 2024; Pande ve ark., 2022).

- **Politika oluşturma ve uygulama:** Hükümetlerin ve sivil toplum kuruluşlarının, toprak iyileştirme, kirlilik kaynaklarının kontrolü ve bitkisel üretimde sürdürülebilir yaklaşımların teşvik edilmesi yoluyla toprak remediasyonuna yönelik sürdürülebilir yönetim mekanizmaları oluşturmaları gerekmektedir (Swain, 2024). Bu politikalar, tarımsal faaliyetlerden kaynaklanan ağır metal

emisyonlarını azaltmayı, organik tarımı desteklemeyi ve kirlilik riskleri konusunda farkındalığı artırmayı içermelidir (Swain, 2024).

- **Entegre yönetim yaklaşımları:** Kimyasal kirliliği azaltmak için pestisit ve gübre kullanımının azaltılması, organik gübre uygulamalarının artırılması, az veya sıfır toprak işleme, ekim nöbeti gibi tarımsal kontrol önlemleri teşvik edilmelidir (Song ve ark., 2022). Bu tür uygulamalar, toprak sağlığını iyileştirerek ve ağır metallerin bitkilere geçişini önleyerek veya azaltarak genel çevresel sürdürülebilirliğe katkıda bulunur (Song ve ark., 2022).
- **Toprak ve ürün izlemesi:** Tarım ürünlerinin kalitesini düzenli olarak izlemek ve ağır metal içeriklerini değerlendirmek, gıda zincirine potansiyel risklerin erken tespitini sağlar ve uygun agronomi kontrol önlemlerinin zamanında ayarlanmasına olanak tanır (Song ve ark., 2022).
- **Sektörlerarası işbirliği:** Çevresel kirliliğin önlenmesi ve sürdürülebilir kalkınmanın sağlanması için tüm ekonomik aktörlerin (hükümet, endüstri, çiftçiler ve tüketiciler) politika oluşturma süreçlerine katılımı ve hedeflere ulaşmak için ortak katkı sağlaması önemlidir (Swain, 2024).

Bu gelecek perspektifleri, ayçiçeğinin sadece bir yağ bitkisi olmanın ötesinde, çevresel kirlilikle mücadelede aktif bir oyuncu olarak konumlandırılmasına olanak sağlayacaktır (Prasad, 2024).

SONUÇ VE ÖNERİLER

Ağır metal kirliliği, küresel ölçekte tarımsal üretimi ve gıda güvenliğini tehdit eden ciddi bir çevresel sorun olarak öne çıkmaktadır. Ayçiçeği (*Helianthus annuus* L.) gibi ekonomik değeri yüksek bitkiler, bu tür kirleticilere maruz kaldıklarında hem morfolojik hem de fizyolojik düzeyde önemli olumsuz etkilerle karşılaşır.

Ağır Metal Kirliliğinin Ayçiçeği Fizyolojisi ve Verimi Üzerindeki Genel Etkileri

Ağır metaller, ayçiçeği bitkisinin yaşam döngüsünün her aşamasında, çimlenmeden tohum oluşumuna kadar zararlı etkilere yol açar. Morfolojik olarak, bitki boyunda, kök gelişiminde ve yaprak alanında azalmalar gözlemlenirken, genel biyokütle veriminde düşüşler meydana gelir. Fizyolojik düzeyde ise, fotosentetik pigmentlerin (klorofil a/b) içeriği azalır, stoma iletkenliği ve dolayısıyla CO₂ alımı kısıtlanır, bu da fotosentetik verimliliğin düşmesine neden olur. Bitkinin su dengesi bozulur, hücre su potansiyeli düşer ve su kullanım etkinliği azalır. En önemlisi, ağır metaller esansiyel besin elementlerinin alımını ve dengesini bozarak, makro ve mikro besin elementlerinde dengesizliklere yol açar. Bu durum, reaktif oksijen türlerinin artışıyla birlikte oksidatif strese neden olur ve hücre zarlarında lipid peroksidasyonu gibi hasarlar meydana gelir. Tüm bu faktörler birleştiğinde, ayçiçeğinin tohum verimi ve verim bileşenleri (baş çapı, bin dane ağırlığı vb.) ile yağ oranı ve yağ bileşimi gibi tarımsal performans parametrelerinde belirgin düşüşler yaşanır. Bitkisel kalite parametreleri de olumsuz etkilenir ve gıda zinciri için potansiyel riskler oluşur.

Hem Tehditler hem de Fitoremediasyon Açısından Fırsatlar

Ağır metal kirliliği, ayçiçeği tarımı için büyük bir tehdit oluşturmakla birlikte, ayçiçeği bitkisi bu kirlilikle mücadelede önemli bir fırsat da

sunmaktadır. Ayçiçeği, ağır metallere karşı bir dizi tolerans mekanizması geliştirmiştir. Bu mekanizmalar arasında köklerde biyosorpsiyon ve metal bağlama, fitokelatinler ve metallothioneinler aracılığıyla metal şelasyonu, hücrel detoksifikasyon ve metallerin kofullerde kompartmantalizasyonu yer alır. Bu mekanizmalar, ayçiçeğinin yüksek biyokütlesi ve hızlı büyüme hızı ile birleştiğinde, onu fitoekstraksiyon gibi fitoremediasyon uygulamaları için ideal bir bitki haline getirmektedir. Ayçiçeği, özellikle Cd, Pb ve Zn gibi birçok ağır metali topraktan alıp biyokütlesinde biriktirme kapasitesine sahiptir ve bu, kontamine toprakların temizlenmesinde çevre dostu ve maliyet etkin bir çözüm sunar.

Sürdürülebilir Üretim İçin Öneriler

Ağır metal kirliliğinin etkilerini azaltmak ve ayçiçeği üretiminin sürdürülebilirliğini sağlamak için entegre tarımsal yönetim stratejileri ve geleceğe yönelik yaklaşımlar büyük önem taşımaktadır:

- **Toprak iyileştirme uygulamaları:** Kireçleme ile toprak pH'sını optimize etmek, organik madde ve biyokömür ilavesiyle metallerin biyoyararlanımını azaltmak kritik öneme sahiptir.
- **Mikrobiyal ve biyolojik destekler:** Bitki büyümesini teşvik eden rizobakterilerin ve mikorizal mantarların kullanımı, bitkinin ağır metal toleransını ve besin alımını artırabilir.
- **Optimizasyonlu gübreleme:** Esansiyel besin elementlerinin yeterli düzeyde sağlanması ve silikon gibi faydalı elementlerin uygulanması, ağır metal toksisitesini hafifletebilir.
- **Fizyolojik düzenleyiciler:** Humik asitler, amino asitler ve antistres ajanları gibi fizyolojik düzenleyicilerin kullanımı, bitkinin strese karşı direncini artırabilir.
- **Uygulamalı risk yönetimi:** Düzenli toprak analizi, metal toleranslı ayçiçeği çeşitlerinin seçimi, hasat sonrası biyokütlenin güvenli

yönetimi ve yasal düzenlemelerle halkın bilinçlendirilmesi, ağır metal kirliliğiyle mücadelede bütüncül bir yaklaşım sunar.

- **Genetik ıslah ve omik teknolojiler:** Gelecekte, genetik ıslah çalışmalarıyla ağır metal toleransı yüksek ve fitoremediasyon potansiyeli optimize edilmiş ayçiçeği çeşitlerinin geliştirilmesi hız kazanacaktır. Transkriptomik, proteomik ve metabolomik gibi omik teknolojiler, bitkilerin ağır metal stresine verdiği moleküler yanıtları anlamamızı sağlayarak, hedefe yönelik ıslah stratejilerine rehberlik edecektir.
- **Sürdürülebilir politikalar:** Tarımsal faaliyetlerden kaynaklanan ağır metal emisyonlarını azaltmaya, organik tarımı desteklemeye ve kirlilik riskleri konusunda farkındalığı artırmaya yönelik sürdürülebilir tarım ve çevresel yönetim politikaları hayati öneme sahiptir.

Bu entegre yaklaşımlar sayesinde, ayçiçeği tarımı ağır metal kirliliğinin tehditlerinden korunurken, aynı zamanda bu kirliliğin giderilmesinde aktif bir rol oynayarak daha sürdürülebilir ve sağlıklı bir çevreye katkıda bulunacaktır.

KAYNAKÇA

- Abeed, A. H. A., Mahdy, R. E., Alshehri, D., Hammami, I., Eissa, M. A., Latef, A. A. H. A., ve Mahmoud, G. A. (2022). Induction of resilience strategies against biochemical deteriorations prompted by severe cadmium stress in sunflower plant when *Trichoderma* and bacterial inoculation were used as biofertilizers. *Frontiers in Plant Science*, 13. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.1004173>
- Abreu, C. B. de, Sacramento, B. L. do, Alves, A. T., Moura, S. C., Pinelli, M. S., ve Neto, A. D. de A. (2016). Nutritional and biochemical changes induced by lead in sunflower (*Helianthus annuus* L.). *Semina Ciências Agrárias*, 37(3), 1229. <https://doi.org/10.5433/1679-0359.2016v37n3p1229>
- Agnello, A. C., Potysz, A., Fourdrin, C., Huguenot, D., ve Chauhan, P. S. (2018). Impact of pyrometallurgical slags on sunflower growth, metal accumulation and rhizosphere microbial communities. *Chemosphere*, 208, 626. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.06.038>
- Aimen, A., Hussain, A., Ahmad, M., Dar, A., Jamil, M., Iqbal, R., Farraj, D. A. A., ve Abdelgawwad, M. (2024). Enhancing sunflower resilience: Zinc-solubilizing bacteria mitigate cadmium uptake and translocation. *Global NEST Journal*, 26(4), 1. <https://doi.org/10.30955/gnj.005820>
- Alengebawy, A., Abdelkhalek, S. T., Qureshi, S. R., ve Wang, M. (2021). Heavy Metals and Pesticides Toxicity in Agricultural Soil and Plants: Ecological Risks and Human Health Implications. *Toxics*, 9(3), 42. Multidisciplinary Digital Publishing Institute. <https://doi.org/10.3390/toxics9030042>
- Al-Hamdani, J. A. J. M. Z., Awadh, S. M., ve Ibrahim, O. S. (2016). Geochemical Partitioning of Heavy Metals in the Urban Soil, Kirkuk, Iraq. *Iraqi Geological Journal*, 1, 1. <https://doi.org/10.46717/igj.39-49.1.1ms-2016-06-23>

- Ali, A., Gomathy, M., Premalakshmi, V., Sabarinatha, K. G., ve Sheela, J. (2024). Influence of Arbuscular Mycorrhizal Fungi and Plant Growth Promoting Yeast on Growth and Yield of Crops For Sustainable Agriculture. *Applied Ecology and Environmental Research*, 22(6), 5669. https://doi.org/10.15666/aeer/2206_56695691
- Ali, M., ve Nas, F. S. (2018). The effect of lead on plants in terms of growing and biochemical parameters: a review. *MOJ Ecology ve Environmental Sciences*, 3(4). MedCrave Group. <https://doi.org/10.15406/mojes.2018.03.00098>
- Ali, S., Mir, R. A., Tyagi, A., Manzar, N., Kashyap, A. S., Mushtaq, M., Raina, A., Park, S., Sharma, S., Mir, Z. A., Lone, S. A., Bhat, A. A., Baba, U. Ali, Mahmoudi, H., ve Bae, H. (2023). Chromium Toxicity in Plants: Signaling, Mitigation, and Future Perspectives. *Plants*, 12(7), 1502. Multidisciplinary Digital Publishing Institute. <https://doi.org/10.3390/plants12071502>
- Almotairy, H. M. (2024). Heavy Metal Contamination in Soil: Implications for Crop Resilience and Abiotic Stress Management. In *IntechOpen eBooks*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.114978>
- An, Y., Wang, Y., Tan, S. N., Yusof, M. L. M., Ghosh, S., ve Chen, Z. (2020). Phytoremediation: A Promising Approach for Revegetation of Heavy Metal-Polluted Land. *Frontiers in Plant Science*, 11. Frontiers Media. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.00359>
- Andrianasolo, F. N., Debaeke, P., Champolivier, L., ve Maury, P. (2016). Analysis and modelling of the factors controlling seed oil concentration in sunflower: a review. *OCL*, 23(2). EDP Sciences. <https://doi.org/10.1051/ocl/2016004>
- Angon, P. B., Islam, Md. S., KC, S., Das, A., Anjum, N., Poudel, A., ve Suchi, S. A. (2024). Sources, effects and present perspectives of heavy metals

- contamination: Soil, plants and human food chain. *Heliyon*, 10(7).
<https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e28357>
- Ansari, M. K. A., Iqbal, M. S., Ahmad, M., Munir, M., Gaffar, S. A., ve Chaachouay, N. (2024). Heavy Metal Stress and Cellular Antioxidant Systems of Plants: A Review. *Agricultural Reviews*.
<https://doi.org/10.18805/ag.rf-321>
- Atakan, A., Özkaya, H. Ö., ve Erdoğan, O. (2018). Effects of Arbuscular Mycorrhizal Fungi (AMF) on Heavy Metal and Salt Stress. *Turkish Journal of Agriculture - Food Science and Technology*, 6(11), 1569.
<https://doi.org/10.24925/turjaf.v6i11.1569-1574.1992>
- Aydın, B., Özkan, E., Kayalı, E., ve Atav, V. (2023). The Effect of Soil Analysis-Based Fertilization and Soil Analysis Subsidies on Sunflower Production and Cost in Tekirdağ Province. *DergiPark (Istanbul University)*.
<https://dergipark.org.tr/tr/pub/ijemar/issue/80830/1274384>
- Bawa, U., Abdulhameed, A., Jibrin, N. A., Gaya, E. A., ve Jibrin, M. (2020). Bioaccumulation and Human Health Risk of Heavy Metals from Pesticides in Some Crops Grown in Plateau State, Nigeria. 12.
<https://doi.org/10.3390/iecps2020-08737>
- Bhardwaj, S. K., Patle, T. K., Jha, A. C., ve Patle, A. (2023). Analytical Approaches for the Detection of Heavy Metals and Agrochemicals in the Environment Samples and their Recent Technologies. *Asian Journal of Chemistry*, 35(11), 2579.
<https://doi.org/10.14233/ajchem.2023.28333>
- Bradl, H. (2004). Adsorption of heavy metal ions on soils and soils constituents. *Journal of Colloid and Interface Science*, 277(1), 1.
<https://doi.org/10.1016/j.jcis.2004.04.005>

- Bulut, H. (2020). Mısır (*Zea mays* L.)’ da Tuz Stresine Karşı Humik Asidin Etkisi. *DergiPark* (Istanbul University). <https://dergipark.org.tr/tr/pub/mjavl/issue/54531/696158>
- Burkhardt, J., Zinsmeister, D., Roth-Nebelsick, A., Hüging, H., ve Pariyar, S. (2023). Ambient aerosols increase stomatal transpiration and conductance of hydroponic sunflowers by extending the hydraulic system to the leaf surface. *Frontiers in Plant Science*, 14, 1275358. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1275358>
- Butt, A., Umer, S., ve Altaf, R. (2020). Performance of Two Hybrids of *Helianthus Annuus* L. (Sunflower) Under the Stress of Heavy Metals İ.E. Zinc And Copper. *Journal CleanWAS*, 4(1), 8. <https://doi.org/10.26480/jcleanwas.01.2020.08.11>
- Capuana, M. (2020). A review of the performance of woody and herbaceous ornamental plants for phytoremediation in urban areas. *iForest - Biogeosciences and Forestry*, 13(1), 139. <https://doi.org/10.3832/ifor3242-013>
- Cartaya-Rubio, O. E., Pérez, Y. M., ve Blanco, Y. (2024). Influencia de hongos micorrícicos en el crecimiento y la adsorción de cadmio en girasol (*Helianthus annuus* L.). *Agronomía Mesoamericana*, 57500. <https://doi.org/10.15517/am.2024.57500>
- Cerrón, R. M., Gamarra, G., Munive, Y., Puertas, F., Valdiviezo-Gonzáles, L., ve Cabello, R. (2020). Lead and cadmium uptake by sunflower from contaminated soil and remediated with organic amendments in the form of compost and vermicompost. *Scientia Agropecuaria*, 11(2), 177. <https://doi.org/10.17268/sci.agropecu.2020.02.04>
- Chen, G., Li, J., Han, H., Du, R., ve Wang, X. (2022). Physiological and Molecular Mechanisms of Plant Responses to Copper Stress. *International Journal of Molecular Sciences*, 23(21), 12950.

- Multidisciplinary Digital Publishing Institute.
<https://doi.org/10.3390/ijms232112950>
- Chen, X., Zhao, Y., Zhong, Y., Chen, J., ve Qi, X. (2023). Deciphering the functional roles of transporter proteins in subcellular metal transportation of plants. *Planta*, 258(1), 17. Springer Science+Business Media. <https://doi.org/10.1007/s00425-023-04170-8>
- Chernikova, O., Mazhaysky, Y., Buryak, S., ve Seregina, T. (2020). Translocation of heavy metals and methods of their detoxification in podzolized chernozem. *E3S Web of Conferences*, 212, 1002. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202021201002>
- Chuan, M. C., Shu, G., ve Liu, J. (1996). Solubility of heavy metals in a contaminated soil: Effects of redox potential and pH. *Water Air ve Soil Pollution*, 90, 543. <https://doi.org/10.1007/bf00282668>
- Çıkılı, Y., Samet, H., ve Çiçek, N. (2020). Response of sunflower (*Helianthus annuus* L.) at early growth stage to cadmium exposure. *Türk Tarım ve Doğa Bilimleri Dergisi*, 7(4), 1098. <https://doi.org/10.30910/turkjans.682480>
- Collin, S., Baskar, A., Geevarghese, D. M., Ali, M. N. V. S., Bahubali, P., Choudhary, R., Lvov, V., Tovar, G. I., Senatov, F., Koppala, S., ve Swamiappan, S. (2022). Bioaccumulation of lead (Pb) and its effects in plants: A review. *Journal of Hazardous Materials Letters*, 3, 100064. Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.hazl.2022.100064>
- Cuchiara, C. C., Larré, C. F., ve Peters, J. A. (2017). Copper and zinc interactions: morphophysiological responses in sweet potato plants (*Ipomoea batatas* L.). *Iheringia Série Botânica*, 72(1), 142. <https://doi.org/10.21826/2446-8231201772113>
- Debaeke, P., Casadebaig, P., ve Langlade, N. (2021). New Challenges for Sunflower Ideotyping in Changing Environments and More Ecological Cropping Systems. *OCL*, 28, 29. <https://doi.org/10.1051/ocl/2021016>

- Derčan, B., Vujašinović, V., Bjelajac, D., Radivojević, G., Vukić, M., ve Vujašinović, D. (2023). Sunflower production in Vojvodina province (Serbia): Trends, challenges, and opportunities. *Zbornik Radova Departmana Za Geografiju Turizam i Hotelijerstvo*, 98. <https://doi.org/10.5937/zbdght2302098d>
- Drummond, E., Bramel, P., Lohwasser, U., ve Giovannini, P. (2023). Global strategy for the conservation and use of sunflower (*Helianthus annuus*) genetic resources. In *Zenodo (CERN European Organization for Nuclear Research)*. European Organization for Nuclear Research. <https://doi.org/10.5281/zenodo.8192536>
- Ejaz, U., Khan, S. M., Khalid, N., Ahmad, Z., Jehangir, S., Rizvi, Z. F., Lho, L. H., Han, H., ve Raposo, A. (2023). Detoxifying the heavy metals: a multipronged study of tolerance strategies against heavy metals toxicity in plants. *Frontiers in Plant Science*, 14. Frontiers Media. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1154571>
- Ekinci, M., Örs, S., Turan, M., ve Yıldırım, E. (2018). Effects of Nitric Oxide Applications on Tolerance of Plants in Abiotic Stress Conditions. *Yuzuncu Yıl University Journal of Agricultural Sciences*, 28(2), 254. <https://doi.org/10.29133/yyutbd.427960>
- Erbaş, S., ve Şenates, A. (2020). Ayçiçeği (*Helianthus annuus* L.)'nde Azot ve Kükürt Gübrelemesinin Verim ve Kaliteye Etkileri. *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 24(1), 217. <https://doi.org/10.19113/sdufenbed.678524>
- Ersoy, A. F. (2021). Critical Review of the Environmental Investigation On Soil Heavy Metal Contamination. *Applied Ecology and Environmental Research*, 19(5), 3853. https://doi.org/10.15666/aeer/1905_38533878
- Farooq, M., Hussain, M., Usman, M., Farooq, S., Alghamdi, S. S., ve Siddique, K. H. M. (2018). Impact of Abiotic Stresses on Grain Composition and Quality in Food Legumes. *Journal of Agricultural*

- and Food Chemistry*, 66(34), 8887. American Chemical Society.
<https://doi.org/10.1021/acs.jafc.8b02924>
- Fedorova D.G., Nazarova N.M., Gvozdikova A.M., Ukenov B.S.
Comprehensive assessment of morphophysiological characteristics in
Helianthus annuus L. seedlings under combined stress. *Uchenye*
Zapiski Kazanskogo Universiteta Seriya Estestvennye Nauki.
2025;167(3):458-481. <https://doi.org/10.26907/2542-064X.2025.3.458-481>
- Fomych, M., Rechun, O., ve Yaheliuk, S. (2024). Global market trends of
grain and industrial crops. *Товарознавчий Вісник*, 17(1), 134.
<https://doi.org/10.62763/ef/1.2024.134>
- Fujita, M., ve Hasanuzzaman, M. (2022). Approaches in Enhancing
Antioxidant Defense in Plants. In *MDPI eBooks*.
<https://doi.org/10.3390/books978-3-0365-4185-3>
- Fulekar, M. H. (2016). Phytoremediation of Heavy Metals by *Helianthus*
annuus in Aquatic and Soil environment. *International Journal of*
Current Microbiology and Applied Sciences, 5(7), 392.
<https://doi.org/10.20546/ijcmas.2016.507.043>
- Geçgel, Y. Ü. M. T. Ü. (2014). Determination of Copper, Iron, Cadmium and
Lead Contents of the Oils from Sunflower Seeds (*Helianthus annuus* L.)
Grown Trakya Region, Turkey. *DergiPark (Istanbul University)*.
<https://dergipark.org.tr/en/pub/jotaf/issue/19049/201471>
- Ghosh, M. (2005). A Review on Phytoremediation of Heavy Metals And
Utilization of its Byproducts. *Applied Ecology and Environmental*
Research, 3(1), 1. Hungarian University of Agriculture and Life
Sciences. https://doi.org/10.15666/aeer/0301_001018
- Ghughe, S. A., Nikalje, G. C., Kadam, U. S., Suprasanna, P., ve Hong, J. C.
(2023). Comprehensive mechanisms of heavy metal toxicity in plants,

- detoxification, and remediation. *Journal of Hazardous Materials*, 450, 131039. Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2023.131039>
- Goicochea-Trelles, P. A., ve García-López, Y. J. (2022). Phytoremediation to recover soils contaminated by heavy metals: systematic review discussion. *Agroindustrial Science*, 12(3), 293. <https://doi.org/10.17268/agroind.sci.2022.03.08>
- Goncharuk, E. A., ve Загоскина, Н. В. (2023). Heavy Metals, Their Phytotoxicity, and the Role of Phenolic Antioxidants in Plant Stress Responses with Focus on Cadmium: Review. *Molecules*, 28(9), 3921. Multidisciplinary Digital Publishing Institute. <https://doi.org/10.3390/molecules28093921>
- Gooneratne, R., Saleeb, N., Robinson, B., Cavanagh, J., ve Hossain, A. (2019). Biochemical changes in sunflower plant exposed to silver nanoparticles / silver ions. *SDRP Journal of Food Science ve Technology*, 4(2), 629. <https://doi.org/10.25177/jfst.4.2.ra.469>
- Gul, V. Ye., ve Kul, S. (2021). Determination of Some Heavy Metals in Oil Sunflower Seeds Grown in The North of Turkey. *European Journal of Science and Technology*. <https://doi.org/10.31590/ejosat.873311>
- Guo, Z., Gao, Y., Yuan, X., Yuan, M., Huang, L., Wang, S., Liu, C., ve Duan, C. (2023). Effects of Heavy Metals on Stomata in Plants: A Review. *International Journal of Molecular Sciences*, 24(11), 9302. Multidisciplinary Digital Publishing Institute. <https://doi.org/10.3390/ijms24119302>
- Gworek, B., Dmuchowski, W., ve Baczewska-Dąbrowska, A. H. (2020). Mercury in the terrestrial environment: a review. *Environmental Sciences Europe*, 32(1). Springer Science+Business Media. <https://doi.org/10.1186/s12302-020-00401-x>

- Hamutoğlu, R., Dinçsoy, A. B., Cansaran-Duman, D., ve Aras, S. (2012). *Turkish Bulletin of Hygiene and Experimental Biology*, 69(4), 235. <https://doi.org/10.5505/turkhijyen.2012.94914>
- Haque, M., Biswas, K. F., ve Sinha, S. N. (2020). Phytoremediation Strategies of Some Plants under Heavy Metal Stress. In *IntechOpen eBooks*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.94406>
- Hassan, M., Chattha, M. U., Khan, İ., Chattha, M. B., Aamer, M., Nawaz, M., Ali, A., Khan, M. A., ve Khan, T. A. (2019). Nickel toxicity in plants: reasons, toxic effects, tolerance mechanisms, and remediation possibilities—a review. *Environmental Science and Pollution Research*, 26(13), 12673. Springer Science+Business Media. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-04892-x>
- Hu, Z., Zhao, C., Li, Q., Feng, Y., Zhang, X., Lu, Y., Ying, R., Yin, A., ve Ji, W. (2023). Heavy Metals Can Affect Plant Morphology and Limit Plant Growth and Photosynthesis Processes. *Agronomy*, 13(10), 2601. <https://doi.org/10.3390/agronomy13102601>
- Islam, Md. M., Saxena, N., ve Sharma, D. (2024). Phytoremediation as a green and sustainable prospective method for heavy metal contamination: a review. *RSC Sustainability*, 2(5), 1269. Royal Society of Chemistry. <https://doi.org/10.1039/d3su00440f>
- Júnior, C. A. L., Mazzafera, P., ve Arruda, M. A. Z. (2014). A comparative ionomic approach focusing on cadmium effects in sunflowers (*Helianthus annuus* L.). *Environmental and Experimental Botany*, 107, 180. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2014.06.002>
- Kalyvas, G., Biliadis, F., Gasparatos, D., Zafeiriou, I., Eissa, R., Karamountzou, E., ve Massas, I. (2022). Enhanced As, Pb and Zn Uptake by *Helianthus annuus* from a Heavily Contaminated Mining Soil Amended with EDTA and Olive Mill Wastewater Due to Increased

- Element Mobilization, as Verified by Sequential Extraction Schemes. *Environments*, 9(5), 61. <https://doi.org/10.3390/environments9050061>
- Kaonda, M. K. M., ve Chileshe, K. (2023). Assessment of Sunflower (vegt;Helianthus annuusvegt; L.) for Phytoremediation of Heavy Metal Polluted Mine Tailings—A Case Study of Nampundwe Mine Tailings Dam, Zambia. *Journal of Environmental Protection*, 14(7), 481. <https://doi.org/10.4236/jep.2023.147028>
- Kaparwan, D., Rana, N. S., ve Dhyani, B. P. (2020). Heavy Metals Toxicity in Agricultural Soils– Critical Review of Possible Sources, Influence on Soil Health and Remedial Measures to Remove, Reduce and Stabilize Contaminants in Soil. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 9(6), 1467. <https://doi.org/10.20546/ijcmas.2020.906.182>
- Kaushal, P., ve Pati, A. M. (2025). Unleashing rhizobacteria for sustainable soil remediation: PGPR roles in heavy metal tolerance, detoxification, and plant productivity. *Frontiers in Microbiology*, 16. Frontiers Media. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2025.1662000>
- Kaya, E. C., Akça, H., Taşkın, M. B., Mounirou, M. M., ve Kaya, T. (2019). Biyokömür ve Fosfor Uygulamalarının Mısır ve Çeltik Bitkilerinin Gelişimi ve Mineral Element Konsantrasyonlarına Etkileri. *Soil Studies*, 46. <https://doi.org/10.21657/topraksu.544679>
- Khan, Z. I., Raza, H., Ahmad, K., Ashfaq, A., Nadeem, M., Ashraf, M. A., Riaz, N., Zubair, F., Alrefaei, A. F., Almutairi, M. H., Mehmood, N., Batool, A. I., Memona, H., Noorka, I. R., ve Uğulu, İ. (2024). Pollution indices as useful tools for comparative potential health risks of nickel in water-soil-fodder-animals food chain in relation to spatial and temporal fluctuations. *Research Square (Research Square)*. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-3899140/v1>

- Kicińska, A., Pomykała, R., ve Izquierdo-Díaz, M. (2021). Changes in soil pH and mobility of heavy metals in contaminated soils. *European Journal of Soil Science*, 73(1). <https://doi.org/10.1111/ejss.13203>
- Kolbas, A., Mench, M., Kolbas, N., Marchand, L., ve Herzig, R. (2012). Structural and functional responses of sunflower and tobacco grown on a Cu-contaminated soil series. *HAL (Le Centre Pour La Communication Scientifique Directe)*. <https://hal.inrae.fr/hal-02748876>
- Kumar, A., Kumar, A., Cabral-Pinto, M. M. S., Chaturvedi, A. K., Shabnam, A. A., Subrahmanyam, G., Mondal, R., Gupta, D. K., Malyan, S. K., Kumar, S. S., Khan, S. A., ve Yadav, K. K. (2020). Lead Toxicity: Health Hazards, Influence on Food Chain, and Sustainable Remediation Approaches. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(7), 2179. Multidisciplinary Digital Publishing Institute. <https://doi.org/10.3390/ijerph17072179>
- Kumar, U., Kumar, I., Singh, P. K., Dwivedi, A., Singh, P., Mishra, S., Seth, C. S., ve Sharma, R. K. (2025). Nickel Contamination in Terrestrial Ecosystems: Insights into Impacts, Phytotoxicity Mechanisms, and Remediation Technologies. *Reviews of Environmental Contamination and Toxicology*, 263(1). <https://doi.org/10.1007/s44169-024-00075-z>
- Kumar, V., Pandita, S., Sidhu, G. P. S., Sharma, A., Khanna, K., Kaur, P., Bali, A. S., ve Setia, R. (2020). Copper bioavailability, uptake, toxicity and tolerance in plants: A comprehensive review. *Chemosphere*, 262, 127810. Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.127810>
- Long, R., Gulya, T. J., Light, S. E., Bali, K. M., Mathesius, K., ve Meyer, R. D. (2019). *Sunflower Hybrid Seed Production in California*. <https://doi.org/10.3733/ucanr.8638>

- Machate, D. J., Melo, E. S. P., Oliveira, R. C. de, Bogo, D., Michels, F. S., Pott, A., Cavalheiro, L. F., Guimarães, R. de C. A., Freitas, K. de C., Hiane, P. A., Caires, A. R. L., Vilela, M. L. B., Oliveira, R. J., ve Nascimento, V. A. do. (2022). Oxidative stability and elemental analysis of sunflower (*Helianthus annuus*) edible oil produced in Brazil using a domestic extraction machine. *Frontiers in Nutrition*, 9, 977813. <https://doi.org/10.3389/fnut.2022.977813>
- Madejón, P., Carpio, J. M. M., Marañón, T., Cabrera, F., ve Soriano, M. (2003). Trace element and nutrient accumulation in sunflower plants two years after the Aznalcóllar mine spill. *The Science of The Total Environment*, 307, 239. [https://doi.org/10.1016/s0048-9697\(02\)00609-5](https://doi.org/10.1016/s0048-9697(02)00609-5)
- Malabad, A. M. (2022). Revegetation and biodynamisation of an industrial by-product landfill by phytomanagement. *HAL (Le Centre Pour La Communication Scientifique Directe)*. <https://theses.hal.science/tel-04047041>
- Mansoor, S., Ali, A., Kour, N., Bornhorst, J., Alharbi, K., Rinklebe, J., El-Moneim, D. A., Ahmad, P., ve Chung, Y. S. (2023). Heavy Metal Induced Oxidative Stress Mitigation and ROS Scavenging in Plants. *Plants*, 12(16), 3003. Multidisciplinary Digital Publishing Institute. <https://doi.org/10.3390/plants12163003>
- Marathe, S. (2019). Potential of Sunflower to Extract Heavy Metals from Leachate. *International Journal of Geosciences*, 10(12), 1115. <https://doi.org/10.4236/ijg.2019.1012063>
- Maria, S. D., Puschenreiter, M., ve Rivelli, A. R. (2013). Cadmium accumulation and physiological response of sunflower plants to Cd during the vegetative growing cycle. *Plant Soil and Environment*, 59(6), 254. <https://doi.org/10.17221/788/2012-pse>

- Meral, Ü. B. (2019). Ayçiçeği (*Helianthus annuus* L.) Bitkisinin Önemi ve Üretimine Genel Bir Bakış. *International Journal of Life Sciences and Biotechnology*, 2(2), 58. <https://doi.org/10.38001/ijlsb.535889>
- Merzougui, S., Mahdi, Y., Yeddou, A. R., ve Nadjemi, B. (2023). Zn (II) and Pb (II) Adsorption on to Agricultural Soils From East of Algeria. *Journal of Microbiology Biotechnology and Food Sciences*. <https://doi.org/10.55251/jmbfs.8257>
- Miklič, V. (2022). Introduction to the Special Issue Sunflower. *OCL*, 29, 16. <https://doi.org/10.1051/ocl/2022013>
- Miria, A. de A. S. F., Jorge, A. G. S., Silvany, C. M., Claudia, B. de A., Marcela, R. B., ve André, D. de A. N. (2016). Cadmium effects on sunflower growth and mineral nutrition. *African Journal of Agricultural Research*, 11(37), 3488. <https://doi.org/10.5897/ajar2016.11199>
- Mohamed, H. I., Ullah, I., Toor, M. D., Tanveer, N. A., Din, M. M. U., Basit, A., Sultan, Y., Muhammad, M., ve Rehman, M. U. (2025). Heavy metals toxicity in plants: understanding mechanisms and developing coping strategies for remediation: a review. *Bioresources and Bioprocessing*, 12(1). Springer Science+Business Media. <https://doi.org/10.1186/s40643-025-00930-4>
- Moreira, H., Pereira, S. I. A., Mench, M., Garbisu, C., Kidd, P., ve Castro, P. M. L. (2021). Phytomanagement of Metal(loid)-Contaminated Soils: Options, Efficiency and Value. *Frontiers in Environmental Science*, 9. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2021.661423>
- Mounirou, M. M., Kaya, E. C., Ouedraogo, A., Demir, K., Güneş, A., ve İnal, A. (2020). Biyokömür ve organik gübre uygulamalarının soğan bitkisinin gelişimi ve kimyasal gübreden yararlanma oranına etkileri. *Toprak Bilimi ve Bitki Besleme Dergisi*, 8(1), 36. <https://doi.org/10.33409/tbbbd.757008>

- Murillo-Tovar, M. A., Saldarriaga-Noreña, H., Saeid, A., Hato, M. J., Kwen, D., Gobeng, R., Monama, K., Ramohlola, A., Maity, M., Makhafole, T., Maponya, L., Katata-Seru, T., Somo, B., Mueller, E., Salinas, J., Hernández, E., Cerecedo, M., Reyes, V. E. D. L., Rodríguez, E. H., ... Mavumengwana, V. (2019). Trace Metals in the Environment - New Approaches and Recent Advances. In *IntechOpen eBooks*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.83504>
- Natasha, N., Shahid, M., Khalid, S., Bibi, I., Bundschuh, J., Niazi, N. K., ve Dumat, C. (2019). A critical review of mercury speciation, bioavailability, toxicity and detoxification in soil-plant environment: Ecotoxicology and health risk assessment. *The Science of The Total Environment*, 711, 134749. Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134749>
- Neu, S., Müller, I., Brackhage, C., Gałazka, R., Siebielec, G., Puschenreiter, M., ve Dudel, E. G. (2017). Trace elements bioavailability to *Triticum aestivum* and *Dendrobaena veneta* in a multielement-contaminated agricultural soil amended with drinking water treatment residues. *Journal of Soils and Sediments*, 18(6), 2259. <https://doi.org/10.1007/s11368-017-1741-1>
- Nguyen, C., Loison, J.-P., Motard, C., ve Danguet, S. (2023). Cadmium partitioning between hulls and kernels in three sunflower varieties: consequences for food/feed chain safety. *Environmental Science and Pollution Research*. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-31631-0>
- Nirwisaya, P. M., ve Titah, H. S. (2023). Phytotoxicity test of cadmium and lead on Sunflower (*Helianthus annuus* L.) as first step in phytoremediation. *IOP Conference Series Earth and Environmental Science*, 1250(1), 12008. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1250/1/012008>

- Niu, Z., Li, X., ve Mahamood, M. (2023). Accumulation Potential Cadmium and Lead by Sunflower (*Helianthus annuus* L.) under Citric and Glutaric Acid-Assisted Phytoextraction. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 20(5), 4107. <https://doi.org/10.3390/ijerph20054107>
- Nofal, E. M. S., Shahin, S. M., El-Tarawy, A., ve Omar, S. H. M. (2022). The Effect of Some Heavy Metal Combinations on Growth and Chemical Composition of Some Ornamental Shrubs Common in Egypt No1. – Hop Bush (*Dodonaea viscosa* L.). *Applied Ecology and Environmental Research*, 20(5), 4339. https://doi.org/10.15666/aeer/2005_43394350
- Nungula, E. Z., Raza, M. A., Nasar, J., Maitra, S., Seleiman, M. F., Ranjan, S., Padhan, S. R., Sow, S., Gaikwad, D. J., ve Gitari, H. I. (2024). Cadmium in Soil and Plants: A Review. *Springer Water*, 21. Springer Nature. https://doi.org/10.1007/978-3-031-54005-9_2
- Öner, N., ve Demirkıran, A. R. (2023). The Effect of Decreasing or Increasing of the Fertilizer Amount on Sunflower Yield, Nutrient Contents and Fertilizer Costs. *Journal of Agriculture*, 6(2), 155. <https://doi.org/10.46876/ja.1400564>
- Özkan, A., Banar, M., Günkaya, Z., Kulaç, A., Yalçın, G., Taşpınar, K., ve Altay, A. (2016). Cadmium stabilization via sequential application of phytoremediation and pyrolysis. *Pamukkale University Journal of Engineering Sciences*, 22(6), 497. <https://doi.org/10.5505/pajes.2015.93546>
- Özkan, A., Günkaya, Z., Banar, M., Kulaç, A., Yalçın, G., Taşpınar, K., ve Altay, A. (2015). Pyrolysis of zinc contaminated biomass from phytoremediation. *Anadolu University Journal of Science and Technology- a - Applied Sciences and Engineering*, 16(3). <https://doi.org/10.18038/btda.70683>

- Özyiğit, İ. İ. (2021). Tarım Topraklarında Ağır Metaller; Kökenleri, Yayılışları ve Etkileri. *Ereğli Tarım Bilimleri Dergisi*. <https://doi.org/10.54498/etbd.2021.5>
- Palmer, C. M., ve Guerinot, M. L. (2009). Facing the challenges of Cu, Fe and Zn homeostasis in plants. *Nature Chemical Biology*, 5(5), 333. Nature Portfolio. <https://doi.org/10.1038/nchembio.166>
- Pande, V., Pandey, S. C., Sati, D., Bhatt, P., ve Samant, M. (2022). Microbial Interventions in Bioremediation of Heavy Metal Contaminants in Agroecosystem. *Frontiers in Microbiology*, 13, 824084. Frontiers Media. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.824084>
- Patra, M., ve Sharma, A. (2000). Mercury toxicity in plants. *The Botanical Review*, 66(3), 379. <https://doi.org/10.1007/bf02868923>
- Paulo, A. M. S., Caetano, N. S., Castro, P. M. L., ve Marques, A. P. G. C. (2023). Phytomanagement of Zn- and Cd-Contaminated Soil: *Helianthus annuus* Biomass Production and Metal Remediation Abilities with Plant-Growth-Promoting Microbiota Assistance. *Soil Systems*, 7(3), 69. <https://doi.org/10.3390/soilsystems7030069>
- Pérez-Hernández, H., Pérez-Moreno, A. Y., Méndez-López, A., ve Fernández-Luqueño, F. (2023). Effect of ZnO Nanoparticles During the Process of Phytoremediation of Soil Contaminated with As and Pb Cultivated with Sunflower (*Helianthus annuus* L.). *International Journal of Environmental Research*, 18(1). <https://doi.org/10.1007/s41742-023-00556-4>
- Pilorgé, É. (2020). Sunflower in the global vegetable oil system: situation, specificities and perspectives. *OCL*, 27, 34. <https://doi.org/10.1051/ocl/2020028>
- Pouryazdankhah, H., Shahnazari, A., Ahmadi, M. Z., Khaledian, M., ve Andersen, M. N. (2024). Development and validation of a sunflower

- crop growth module for the Daisy model. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 8. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2024.1370063>
- Prasad, M. N. V. (2024). Bioremediation and bioeconomy potential of sunflower (*Helianthus annuus* L.). In *Elsevier eBooks* (p. 367). Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/b978-0-443-16120-9.00020-0>
- Radočaj, D., Velić, N., Jurišić, M., ve Merdić, E. (2020). The Remediation of Agricultural Land Contaminated by Heavy Metals. *Poljoprivreda*, 26(2), 30. <https://doi.org/10.18047/poljo.26.2.4>
- Rahman, S. U., Qin, A., Zain, M., Mushtaq, Z., Mehmood, F., Riaz, L., Naveed, S., Ansari, M. J., Saeed, M., Ahmad, I., ve Shehzad, M. A. (2024). Pb uptake, accumulation, and translocation in plants: Plant physiological, biochemical, and molecular response: A review. *Heliyon*, 10(6). Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e27724>
- Rahman, T., ve Seraj, M. F. (2018). Available Approaches of Remediation and Stabilisation of Metal Contamination in Soil: A Review. *American Journal of Plant Sciences*, 9(10), 2033. Scientific Research Publishing. <https://doi.org/10.4236/ajps.2018.910148>
- Raza, A., Salehi, H., Bashir, S., Tabassum, J., Jamla, M., Charagh, S., Barmukh, R., Mir, R. A., Bhat, B., Javed, M. A., Guan, D., Mir, R. R., Siddique, K. H. M., ve Varshney, R. K. (2024). Transcriptomics, proteomics, and metabolomics interventions prompt crop improvement against metal(loid) toxicity. *Plant Cell Reports*, 43(3). <https://doi.org/10.1007/s00299-024-03153-7>
- Rizwan, M., Ali, S., Rizvi, H., Rinklebe, J., Tsang, D. C. W., Meers, E., Ok, Y. S., ve Ishaque, W. (2016). Phytomanagement of heavy metals in contaminated soils using sunflower: A review. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 46(18), 1498. Taylor ve Francis. <https://doi.org/10.1080/10643389.2016.1248199>

- Rucińska-Sobkowiak, R. (2016). Water relations in plants subjected to heavy metal stresses. *Acta Physiologiae Plantarum*, 38(11). <https://doi.org/10.1007/s11738-016-2277-5>
- Sadiq, R., Maqbool, N., ensp, B.-U.-N., Parveen, K., ve Hussain, M. (2019). Vulnerability of Sunflower Germination and Metal Translocation under Heavy Metals Contamination. *American Journal of Plant Sciences*, 10(5), 738. <https://doi.org/10.4236/ajps.2019.105054>
- Sadiq, R., Maqbool, N., ve Haseeb, M. (2017). Ameliorative Effect of Chelating Agents on Photosynthetic Attributes of Cd Stressed Sunflower. *Agricultural Sciences*, 8(2), 149. <https://doi.org/10.4236/as.2016.82010>
- Saleem, M. F., Asghar, H. N., Zahir, Z. A., ve Shahid, M. (2019). Evaluation of Lead Tolerant Plant Growth Promoting Rhizobacteria For Plant Growth and Phytoremediation in Lead Contamination. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 35(4), 999. <https://doi.org/10.20937/rica.2019.35.04.18>
- Sanjana, S., Jazeel, K., Janeeshma, E., Nair, S. G., ve Shackira, A. M. (2024). Synergistic interactions of assorted ameliorating agents to enhance the potential of heavy metal phytoremediation. *Stress Biology*, 4(1). <https://doi.org/10.1007/s44154-024-00153-1>
- Saud, S., Wang, D., Fahad, S., Javed, T., Jaremko, M., Abdelsalam, N. R., ve Ghareeb, R. Y. (2022). The impact of chromium ion stress on plant growth, developmental physiology, and molecular regulation. *Frontiers in Plant Science*, 13. Frontiers Media. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.994785>
- Seeda, A., El-Nour, E.-Z. A. A. A., Abdallah, M. M., ve Bassiouny, H. E.-. (2022). Impacts of Metal, Metalloid and Their Effects in Plant Physiology: A Review. *Middle East Journal of Agriculture Research*. <https://doi.org/10.36632/mejar/2022.11.3.56>

- Seraj, F., ve Rahman, T. (2018). Heavy Metals, Metalloids, Their Toxic Effect and Living Systems. *American Journal of Plant Sciences*, 9(13), 2626. <https://doi.org/10.4236/ajps.2018.913191>
- Sevgi, K., ve Leblebici, S. (2022). Physiological and Molecular Response to Heavy Metal Stress in Plants. *Journal of Anatolian Environmental and Animal Sciences*, 7(4), 528. <https://doi.org/10.35229/jaes.1160228>
- Shahid, M., Dumat, C., Khalid, S., Schreck, E., Xiong, T., ve Niazi, N. K. (2016). Foliar heavy metal uptake, toxicity and detoxification in plants: A comparison of foliar and root metal uptake. *Journal of Hazardous Materials*, 325, 36. Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2016.11.063>
- Singh, H., Singh, N. B., Singh, A., Hussain, I., ve Yadav, V. (2017). Oxidative stress induced by lead in *Vigna radiata* L. seedling attenuated by exogenous nitric oxide. *Tropical Plant Research*, 4(2), 225. <https://doi.org/10.22271/tpr.2017.v4.i2.031>
- Singh, S., Parihar, P., Singh, R., Singh, V. P., ve Prasad, S. M. (2016). Heavy Metal Tolerance in Plants: Role of Transcriptomics, Proteomics, Metabolomics, and Ionomics. *Frontiers in Plant Science*, 6, 1143. Frontiers Media. <https://doi.org/10.3389/fpls.2015.01143>
- Sinha, D., Datta, S., Mishra, R., Agarwal, P., Kumari, T., Adeyemi, S. B., Maurya, A. K., Ganguly, S., Atique, U., Seal, S., Gupta, L. K., Chowdhury, S., ve Chen, J. (2023). Negative Impacts of Arsenic on Plants and Mitigation Strategies. *Plants*, 12(9), 1815. Multidisciplinary Digital Publishing Institute. <https://doi.org/10.3390/plants12091815>
- Song, W., Zhang, H., Li, X., Song, H., Niu, B., Shi, X., ve Li, J. (2022). Safe utilization of cultivated land in high-risk areas of soil heavy metal pollution based on soil resilience. *Frontiers in Environmental Science*, 10. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.889069>

- Sönmez, O., ve Kılıç, F. N. (2021). Heavy Metal Pollution in Soil and Removal Methods. *DergiPark (Istanbul University)*.
<https://dergipark.org.tr/tr/pub/turkager/issue/66160/991886>
- Sorour, A., Khairy, H., Zaghloul, E. H., ve Zaghloul, H. A. H. (2022). Microbe- plant interaction as a sustainable tool for mopping up heavy metal contaminated sites. *BMC Microbiology*, 22(1).
<https://doi.org/10.1186/s12866-022-02587-x>
- Sperdoui, I. (2022). Heavy Metal Toxicity Effects on Plants. *Toxics*, 10(12), 715. <https://doi.org/10.3390/toxics10120715>
- Srivastava, V., Sarkar, A., Singh, S., Singh, P., Araújo, A. S. F. de, ve Singh, R. P. (2017). Agroecological Responses of Heavy Metal Pollution with Special Emphasis on Soil Health and Plant Performances. *Frontiers in Environmental Science*, 5. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2017.00064>
- Strubińska, J., ve Hanaka, A. (2011). Adventitious root system reduces lead uptake and oxidative stress in sunflower seedlings. *Biologia Plantarum*, 55(4). <https://doi.org/10.1007/s10535-011-0185-5>
- Sun, Y., Jones, K. C., Sun, Z., Shen, J., Ma, F., ve Gu, Q. (2022). Does freeze-thaw action affect the extractability and bioavailability of Pb and As in contaminated soils? *The Science of The Total Environment*, 854, 158453. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.158453>
- Swain, C. K. (2024). Environmental pollution indices: a review on concentration of heavy metals in air, water, and soil near industrialization and urbanisation. *Discover Environment*, 2(1). Springer Science+Business Media. <https://doi.org/10.1007/s44274-024-00030-8>
- Tütüncü, M. (2024). The effects of the combination of mycorrhizae, vermicompost and humic acid applications on ornamental sunflower growth parameters. *Anadolu Journal of Agricultural Sciences*.
<https://doi.org/10.7161/omuanajas.1415885>

- Vácha, R. (2021). Heavy Metal Pollution and Its Effects on Agriculture. *Agronomy*, 11(9), 1719. <https://doi.org/10.3390/agronomy11091719>
- Vadivel, V., ve Senthilvalavan, P. (2019). Accumulation efficiency of sunflower for lead and cadmium along with sustainable crop productivity under soil stress. *Journal of Applied and Natural Science*, 11(3), 636. <https://doi.org/10.31018/jans.v11i3.2134>
- Violante, A., Cozzolino, V., Perelomov, L., Caporale, A. G., ve Pigna, M. (2010). Mobility and Bioavailability of Heavy Metals And Metalloids in Soil Environments. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 10(3). <https://doi.org/10.4067/s0718-95162010000100005>
- Wani, K. I., Naeem, M., ve Aftab, T. (2022). Chromium in plant-soil nexus: Speciation, uptake, transport and sustainable remediation techniques. *Environmental Pollution*, 315, 120350. Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.120350>
- Waseem, M., Khilji, S. A., Tariq, S., Jamal, A., Alomrani, S. O., ve Javed, T. (2023). Phytoremediation of heavy metals from industrially contaminated soil using sunflower (*Helianthus annuus* L.) by inoculation of two indigenous bacteria. *Plant Stress*, 11, 100297. <https://doi.org/10.1016/j.stress.2023.100297>
- Xu, E., Liu, Y., Gu, D., Zhan, X., Li, J., Zhou, K., Zhang, P., ve Zou, Y. (2024). Molecular Mechanisms of Plant Responses to Copper: From Deficiency to Excess. *International Journal of Molecular Sciences*, 25(13), 6993. Multidisciplinary Digital Publishing Institute. <https://doi.org/10.3390/ijms25136993>
- Yavaş, İ., Ali, S., Abbas, Z., ve Hussain, S. (2022). Heavy Metal Toxicity in Plants: An Overview on Tolerance Mechanisms and Management Strategies. *Turkish Journal of Agriculture - Food Science and Technology*, 10(8), 1468. <https://doi.org/10.24925/turjaf.v10i8.1468-1481.5220>

- Yazdani, A. A., Saffari, M., ve Ranjbar, G. H. (2018). Application of treated wastewater on yield and heavy metals content of seeds in sunflower cultivars. *Australian Journal of Crop Science*, 12(5), 731. <https://doi.org/10.21475/ajcs.18.12.05.pne859>
- Yilmaz, S. H., Kaplan, M., Temizgül, R., ve Yılmaz, S. (2017). Antioxidant enzyme response of sorghum plant upon exposure to Aluminum, Chromium and Lead heavy metals. *Turkish Journal of Biochemistry*, 42(4), 503. <https://doi.org/10.1515/tjb-2016-0112>
- Yu, H., Li, C., Jin, Y., Ma, Y., Zhou, X., Yu, W., Kan, H., Meng, Q., Xie, R., ve Dong, P. (2023). A review on adsorption characteristics and influencing mechanism of heavy metals in farmland soil. *RSC Advances*, 13(6), 3505. Royal Society of Chemistry. <https://doi.org/10.1039/d2ra07095b>
- Yu, H., Li, W., Liu, X., Song, Q., Li, J., ve Xu, J. (2024). Physiological and molecular bases of the nickel toxicity responses in tomato. *Stress Biology*, 4(1). <https://doi.org/10.1007/s44154-024-00162-0>
- Zaib, M., Imanullah, H., Rasheed, D., Munir, S., Fatima, H., ve Um-e-Rubab. (2024). Heavy Metal Contamination and Risk of Sunflower Germination and Heavy Metal Translocation. *Journal of Health and Rehabilitation Research*, 4(3), 1. <https://doi.org/10.61919/jhrr.v4i3.1484>
- Zhang, J., Hamza, A., Xie, Z., Hussain, S., Brestič, M., Tahir, M. A., Ulhassan, Z., Yu, M., Allakhverdiev, S. I., ve Shabala, S. (2021). Arsenic transport and interaction with plant metabolism: Clues for improving agricultural productivity and food safety. *Environmental Pollution*, 290, 117987. Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.117987>
- Zhao, F., Tang, Z., Song, J., Huang, X., ve Wang, P. (2021). Toxic metals and metalloids: Uptake, transport, detoxification, phytoremediation, and

- crop improvement for safer food. *Molecular Plant*, 15(1), 27. Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.molp.2021.09.016>
- Zulfiqar, U., Ayub, A., Hussain, S., Waraich, E. A., El-Esawi, M. A., Ishfaq, M., Ahmad, M., Ali, N., ve Maqsood, M. F. (2021). Cadmium Toxicity in Plants: Recent Progress on Morpho-physiological Effects and Remediation Strategies. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 22(1), 212. <https://doi.org/10.1007/s42729-021-00645-3>
- Zulfiqar, U., Jiang, W., Wang, X., Hussain, S., Ahmad, M., Maqsood, M. F., Ali, N., Ishfaq, M., Kaleem, M., Haider, F. U., Farooq, N., Naveed, M., Kučerík, J., Brtnický, M., ve Mustafa, A. (2022). Cadmium Phytotoxicity, Tolerance, and Advanced Remediation Approaches in Agricultural Soils; A Comprehensive Review. *Frontiers in Plant Science*, 13, 773815. Frontiers Media. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.773815>

BÖLÜM 9

BİTKİLERDE TUZLULUK STRESİ ve ETKİLERİ

Dr. Gülcan KAYMAK BAYRAM¹⁷

Prof. Dr. Zeki ACAR¹⁸

DOI: <https://www.doi.org/10.5281/zenodo.18109333>

¹⁷ Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Tarla Bitkileri Bölümü Samsun, Türkiye. gulcan.kaymak@omu.edu.tr, Orcid ID: 0000-0002-0915-0529

¹⁸ Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Tarla Bitkileri Bölümü Samsun, Türkiye. zekiacar@omu.edu.tr , Orcid ID:0000-0002-0484-1961

1. GİRİŞ

Artan dünya nüfusunun gıda ihtiyacını karşılamak için kullanılan tarım alanlarının önemli bir bölümü tehdit altındadır. Dünya üzerindeki tarım alanları; çevre ve atmosfer kirliliği, yanlış sulama ve gübreleme gibi insan kaynaklı uygulamalar sonucu ortaya çıkan kuraklık, don ve tuzlanma gibi pek çok olumsuz etmenin etkisi altında bulunmaktadır. Bu alanlar, küresel ısınmanın olumsuz etkileri ile yanlış kullanım ve uygulamalar nedeniyle üretim dışı kalma ya da verimlerini kaybetme tehlikesiyle karşı karşıyadır.

Bitkiler, en iyi gelişimi kendileri için en uygun olan koşullarda gösterirler. Ancak metabolizmanın esnekliğine bağlı olarak, bitkiler günlük ve mevsimlik değişimlere uyum göstererek büyümelerini devam ettirebilirler. Beklenmedik (bitkiler için çok uygun olmayan) koşullarda bitkilerin gelişimlerini ve hayatta kalmalarını etkileyecek hastalıklar, hasarlar veya fizyolojik değişimler meydana gelebilir (Shao ve ark., 2008). Bu elverişsiz koşullara neden olan faktörlere “stres” denir. Bu stres faktörlerinden birisi de tuzluluktur.

Toprak tuzluluğu, bitki yaşamını olumsuz etkileyen başlıca çevresel stres etmenlerinden biridir. Kibria ve Hoque (2019)’a göre, dünya genelindeki arazilerin yaklaşık %7’si, ekilebilir tarım alanlarının %20’si ve sulanan arazilerin neredeyse yarısı toprak tuzluluğundan etkilenmektedir.

Tuzluluk; özellikle kurak ve yarı kurak iklim bölgelerinde yıkanarak yeraltı suyuna karışan çözünebilir tuzların yüksek taban suyuyla birlikte kapilarite yoluyla toprak yüzeyine çıkması ve buharlaşma sonucu suyun topraktan ayrılarak tuzun toprak yüzeyinde ve yüzeye yakın bölümünde birikmesi olayıdır (Kara, 2002). Toprakta veya suda tuzluluk, bitki büyümesini ve verimliliğini olumsuz etkileyen önemli abiyotik stres faktörlerinden birisidir (Kaymak ve Acar, 2020).

Bitkilerde tuz stresinin erken evresi osmotik stres olarak görülmektedir. Osmotik stres; su ve besin alımını, tohum çimlenmesini, yaprak ve tomurcuk

gelişimini, dallanmayı, fotosentez hızını, hücre büyümesini ve meristem bölgelerine karbonhidrat ulaşımını olumsuz yönde etkileyerek bitki gelişimine büyük ölçüde zarar vermektedir (Mishra ve ark., 2021). Tuz iyonlarının birikimi, yaşlı yaprakların dökülmesine, genç yapraklarda toksinlerin birikimine ve erken yaşlanmaya neden olmaktadır. Aynı zamanda, yaprak alanının küçülmesine yol açarak fotosentez reaksiyonlarının azalmasına da neden olmaktadır (Munns, 2002). Uzun süre yüksek yoğunluklu tuza maruz kalan bitkilerin sürgün ve köklerinde yaş ve kuru ağırlığın azaldığı yapılan çalışmalarla gösterilmiştir (Liu ve ark., 2019; Kaymak ve Acar, 2020; Zhang ve ark., 2020).

2. TOPRAKLARDA TUZ BİRİKİMİ

Toprak tuzluluğu, toprakta çözünmüş tuzların (özellikle Na^+ , Cl^- , Mg^{2+} , Ca^{2+} , SO_4^{2-}) normal seviyelerin üzerine çıkarak bitki gelişimini olumsuz etkileyecek düzeye ulaşmasıdır. Toprak tuzluluğu, diğer bir ifade ile elektriksel geçirgenlik (EC); toprakta bulunan eriyebilir tuzların bir göstergesidir. Kurak ve yarı kurak bölgelerde minerallerden toprağa intikal eden tuzların yetersiz yıkanma, uygun olmayan topoğrafya, yüksek derecede buharlaşma gibi nedenlerle topraktan uzaklaşmasına imkan yoktur. Böylece tuzların toprakta birikmesi söz konusu olmaktadır (Yılmaz, 2010).

Tuzluluk, oluşum nedenlerine göre birincil ve ikincil olarak ikiye ayrılmaktadır. Birincil tuzluluğun asıl oluşum sebeplerinin ana kayaların ayrışması, tuz deposu olan göller, denizler ve okyanuslar ile iklimsel etmenler olduğu belirtilmektedir (Munns ve Tester, 2008). İkincil tuzluluğun oluşma sebepleri; tarım arazilerinde yoğun sulama nedeniyle tuz bakımından zengin yer altı suyunun yüzeye kadar yükselmesidir. Ayrıca bölgenin doğal vejetasyonunun yok edilerek tarıma açılması ve toprağın tuzluluğa neden olan kimyasallarla bulaşması da bu süreci hızlandırmaktadır (Pessarakli ve Szabolcs, 1999).

Toprak tuzluluğu, bitkinin topraktan su almasını engelleyerek hücresel suyun azalmasına etki etmektedir. Bu durum bitkinin fotosentetik aktivitesini olumsuz etkileyerek ve reaktif oksijen türlerinin (ROS) üretimini teşvik ederek bitki büyümesini azaltmaktadır (Diouf ve ark., 2018).

Toprak tuzluluğunun oluşum süreçleri ve bitki–toprak etkileşimi birlikte değerlendirildiğinde, tuzluluğun su alımını azaltarak, iyon dengesini bozarak ve oksidatif stresi artırarak bitkilerin temel fizyolojik işlevlerini önemli ölçüde sınırlayan bir abiyotik stres faktörü olduğu anlaşılmaktadır.

3. TUZLULUĞUN BİTKİLERE ETKİSİ

Tuzluluk, bitkiler üzerinde birincil olarak osmotik ve iyon stresi oluşturarak etkili olurken, ikincil etkilerini ise bu streslerin tetiklediği yapısal bozulmalar ve toksik bileşiklerin sentezlenmesi yoluyla göstermektedir. Bu nedenle tuz stresi, osmotik ve iyon stresine bağlı olarak bitkilerde büyüme ve gelişmeyi önemli ölçüde engellemektedir (Parida ve Das, 2005). NaCl fazlalığının neden olduğu başlıca birincil etkiler; DNA, protein, klorofil ve zar metabolizmalarına zarar veren aktif oksijen türlerinin sentezi; fotosentezin engellenmesi, metabolik toksisite; K^+ alımının engellenmesi ve hücre ölümü olarak sayılabilir (Botella ve ark., 2005; Hong ve ark., 2009). Aşırı tuz yoğunluğunun, yeşil aksam ve kök gelişimi ile kök/gövde oranı, su kullanım etkinliği gibi özellikleri olumsuz etkilediği, tuza toleranslı bitki türlerinde K/Na ve Ca/Na oranlarının daha yüksek bulunduğu ifade edilmektedir (Grewal, 2010).

Bitkilerin tuza tolerans düzeyleri büyüme ve gelişim evrelerinin farklı dönemlerinde değişiklik gösterebilmektedir. Örneğin çimlenme döneminde tuza duyarlı olan bir bitki, gelişim aşamasında tuza görece daha toleranslı olabilmektedir. Diğer taraftan bunun tersi durumlar da görülebilmektedir. Kültür bitkilerinin tuza tolerans seviyelerinin belirlenmesi tuzlu veya tuzlanma

potansiyeli olan topraklarda tarımsal faaliyetlerin sürdürülebilirliği açısından oldukça önemlidir (Atış, 2011).

Bitkilerde tuza tolerans bakımından familya, cins ve türler arasında önemli farklılıklar bulunmakta, hatta aynı tür içindeki çeşitler bile tuzluluktan farklı etkilenmektedir (Kaymak ve Acar, 2020). Tuz stresinin bitkiler üzerindeki etkileri; bitkinin çeşidine, maruz kalınan tuz çeşidi ile miktarına ve maruz kalma süresine bağlı olarak değişmektedir. Tuzlu ortamlarda bitkiler genotipik farklılıklara bağlı olarak çok farklı tepkiler verebilmektedir (Dajic, 2006).

Birçok araştırmada tuzluluğun, verim ve verim unsurları üzerinde olumsuz etkiler yaptığı belirlenmiştir (Houshmand ve ark., 2005; Ashraf, 1989). Tuz stresi bitkinin bütün gelişim evrelerini etkilemesine rağmen, en çok üretken çiçek sayısında azalma ve çiçeklenme sürecinde değişimlere sebep olmaktadır (Munns, 2002).

3.1. İyon Dengesine Etkisi

Bitkiler, tuzluluğun olumsuz etkileriyle başa çıkmak için çeşitli fizyolojik, biyokimyasal ve moleküler düzenlemeler gerçekleştirmektedir. Bu düzenlemeler arasında iyon alımı ve taşınımının kontrolü, antioksidan bileşiklerin artırılması ve ozmokoruyucu/uyumlu çözünen maddelerin biyosentezi bulunmaktadır (Abobatta, 2020). Tuz stresinin bitkiler üzerindeki etkileri erken ve geç evrede ortaya çıkmakta olup, erken evre kök bölgesi çevresindeki yüksek tuzluluğun neden olduğu ozmotik baskıyla ilişkilidir; bu durum bitkilerin topraktan su alımını zorlaştırarak büyümenin yavaşlamasına ve verimin düşmesine yol açmaktadır (Muchate et al., 2016). Geç evrede ise bitki dokularında Na^+ ve Cl^- iyonlarının birikimi sitotoksisteye neden olmakta, yaprak yanıklığı, büyüme geriliği ve bitki ölümüne kadar ilerleyen zararlar oluşmaktadır.

Tuz stresine verilen yanıtların merkezinde iyon homeostazı (iç dengeyi koruma) yer almaktadır. Bitkiler, hücresel işlevlerini sürdürülebilirlik için sodyumun (Na^+) aşırı birikimi ile potasyumun (K^+) kaybı arasındaki dengeyi hassas biçimde düzenlemek zorundadır. Dokularda yüksek K^+/Na^+ oranının korunması, tuz toleransının temel belirteçlerinden biri olarak kabul edilmektedir. Bu dengenin sürdürülmesi, aşırı Na^+ 'nın hücre dışına taşınması veya vakuol gibi daha az duyarlı bölmelere yönlendirilerek depolanması ve K^+ 'un seçici biçimde alınarak hücre içinde tutulması ile sağlanmaktadır (Ketehouli et al., 2019; Kumari et al., 2021).

Ortamda artan Na^+ ve Cl^- iyonları yalnızca Na^+/K^+ dengesini bozmakla kalmayıp, K^+ , Ca^{2+} ve Mg^{2+} gibi temel besin elementleriyle rekabete girerek bitkilerde beslenme bozukluklarına yol açmaktadır (Hu ve Schmidhalter, 2005). Yüksek Na^+ seviyeleri, iyon kanallarının işleyişini bozmakta ve besin alımı–taşıyımında aksamalara neden olmaktadır. Bu durum, K^+ kaybının artması ve dokulardaki Na^+/K^+ oranının yükselmesiyle sonuçlanmaktadır. Tuz stresinin besin alımı üzerindeki olumsuz etkileri pek çok çalışmada ortaya konmuştur. Örneğin çeltikte yapılan bir araştırmada tuz stresine maruz kalan bitkilerde Fe, K, Mn, Mg, P ve Zn gibi elementlerin hem kök hem de sürgünlerde belirgin şekilde azaldığı bildirilmiştir. Benzer şekilde, tuzluluk koşulları kök tüyü yoğunluğu ve uzunluğunu azaltmakta, kök yüzey alanını düşürmekte, bu da Ca^{2+} , Mg^{2+} , Fe^{2+} ve Zn^{2+} gibi elementlerin alımını daha da zorlaştırmaktadır (Robin et al., 2016; Arif et al., 2019; EL Sabagh et al., 2021).

Genel olarak, tuzluluğun neden olduğu ozmotik baskı, iyon toksisitesi ve besin dengesizliği birlikte değerlendirildiğinde, bu faktörler bitkilerde büyüme geriliği, metabolik bozulmalar ve verim kaybının temel nedenlerini oluşturmaktadır

3.2. Organel Düzeyinde Etkisi

Tuz stresinde en belirgin değişimlerin meydana geldiği organel, kloroplasttır (Koyro, 2002). Tuzun kloroplastta tetiklediği en önemli değişim tilakoidlerin ve stromanın şişmesidir. Kloroplast tilakoidleri, hücre içi aktif oksijen türleri (AOT)'nin üretiminde önemli bir role sahiptir. NaCl'ün bulunduğu koşullarda kloroplastların ürettiği AOT'lar oksidatif stres oluşumunu tetikler (Miyake ve ark., 2006).

Tuz stresi sonucunda yüksek düzeylere ulaşan AOT'leri zararsız bileşiklere dönüştüren antioksidant madde miktarları ile antioksidant enzim aktiviteleri, bitkilerde oksidatif strese karşı etkili olan en önemli dayanım mekanizmaları olarak görev yapmaktadır. Süper oksit dismutaz (SOD), askorbat peroksidaz (APX), glutatyon redüktaz (GR), katalaz (CAT) gibi enzimler etkin antioksidatif enzimler arasında yer almaktadır. Bu maddeler, enzimler üzerinde pozitif bir etki oluşturulması dışında, zar (hücre zarı) bütünlüğünün sağlanarak ozmotik dengenin yapılandırılmasında önemli rol oynamaktadır. Bu maddeler arasında yer alan prolin ve glisinbetain, strese toleransın sağlanmasında önemli etki yapan ozmotik düzenleyicilerdir (Asraf ve Foolad, 2007; Molazem ve ark., 2010; Yan ve ark., 2011; Deivanai ve ark., 2011). Amino asit yapısındaki prolin, tuz stresi altında ozmotik düzenlemede rol oynadığı gibi, stres koşullarında hücrelerde C ve N kaynağı olarak da fayda sağlamaktadır (Sanchez ve ark., 2007). Prolin, yalnızca hücreler arası yapının korunması ve sitozolik pH'nın düzenlenmesinde değil, aynı zamanda protein bütünlüğünün sürdürülmesinde ve enzim aktivitelerinin düzenlenip harekete geçirilmesinde de önemli rol oynamaktadır (Matysik ve ark., 2002; Büyük ve ark., 2012). Stres koşullarında serbest oksijen radikallerinin oluşmasındaki temel etken, NADP^{+} 'nin sınırlı hale gelmesi nedeniyle ferrodoksinin NADP^{+} yerine oksijeni indirgemesidir. Bu süreç, zar (hücre zarı) bütünlüğüne zarar verebilen reaktif O_2^{-} radikallerinin oluşumuna neden olmaktadır. Stres süresince kloroplastlarda prolin biyosentezinin artması, $\text{NADPH}/\text{NADP}^{+}$

oranının düşmesini sağlayarak hücreye zarar veren bu reaktif O_2^- radikallerinin oluşumunu azaltmaktadır (Szabados ve Savouré, 2009; Lehman ve ark., 2010; Miller ve ark., 2010). Farklı türlerde gerçekleştirilen çok sayıda çalışma, diğer stres koşullarında olduğu gibi tuz stresi altında da prolin düzeyinin arttığını göstermiştir (Ashraf ve Foolad, 2007; Cha-um ve ark., 2013; Kaymak ve Acar, 2020; Kaymak Bayram ve ark., 2025). Bu artışın özellikle stres toleransı yüksek bitkilerde daha belirgin olduğu bildirilmiştir (Jaarsma ve ark., 2013).

AOT'lerin bitkiler üzerindeki en belirgin etkisi, hücre zarında ciddi yapısal bozulmalara neden olan lipid peroksidasyonunun tetiklenmesidir (Koyro, 2006). Bitkilerde stres koşullarının olumsuz etkilerinin ilk ortaya çıktığı yer olan hücre zarında gerçekleşen lipid peroksidasyonu sonucunda oluşan MDA (malondialdehit) düzeyleri, önemli bir stres göstergesi olarak kabul edilmektedir. MDA'nın artması, hücre zarının iyon alışverişini bozarak Ca^{2+} ve Na^+ geçirgenliğinin yükselmesine, enzimatik faaliyetlerde değişimlere ve zar bütünlüğünün zayıflamasına neden olmaktadır (Montillet et al., 2005). Yapılan birçok araştırmada tuzluluk stresine bağlı olarak bitkilerde MDA içeriğinin arttığı belirlenmiştir (Shahid ve ark., 2012; Wang ve ark., 2017; Kaymak ve Acar, 2020; Kaymak Bayram ve ark., 2025).

Kloroplastlarda nişasta miktarı da tuz stresine bağlı olarak artar (Rahman ve ark., 2000). Tuz stresi altında translokasyonun (parça değişimi) azalması nişastanın birikmesine neden olabilecek etmenlerden birisidir (Koyro, 2002).

Tuz stresi hücrelerde lipid damlacıkları birikimini de tetikler. Bu damlacıklar hücre zarındaki lipidlerle ilişkili olabileceği gibi, tuzluluğu tolere edebilmek için artan metabolik enerji ihtiyacının karşılanması amacıyla enerji kaynağı olarak da birikebilir (Rahman ve ark., 2000).

Tuz stresinden önemli düzeyde etkilenen bir diğer organel ise mitokondridir ve mitokondride tuz stresi sonucu ortaya çıkan değişimler; yapısal olarak parçalanma, şişme, kristalarda azalma, vakuol oluşumunda artış ve elektron iletiminin azalmasıdır (Koyro, 2002).

Tuz stresi, hücrenin diğer organellerini de etkilemektedir. Tuz stresinde çekirdek boyutunda değişimler, parçalanma ve yıkımlar, endoplazmik retikulumda kısmi şişmeler ve vakuolizasyon; tonoplastta kese oluşumu ve parçalanma ile golgi aygıtında hipertrofi (aşırı büyüme) gözlenir (Rahman ve ark., 2000).

3.3. Fotosentez ve Solunum Mekanizmasına Etkisi

Bitkilerin kloroplastlarında gerçekleşen fotosentez, canlılığın sürdürülebilmesi için temel bir metabolik süreçtir. Toprak çözeltisindeki tuz yoğunluğunun artması ve su potansiyelinin azalması durumunda bitki hücrelerinin ozmotik potansiyeli düşmekte; buna bağlı olarak hücre bölünmesi ve uzaması belirgin biçimde yavaşlamaktadır. Bu stres koşulları altında stomalar kapanmakta ve bunun bir sonucu olarak fotosentez hızı azalmaktadır. Stresin devam ettiği durumlarda ise bitki büyümesi tamamen durabilmektedir (Ashraf, 1994). Öte yandan, tuzdan etkilenen bitkilerde fotosentez oranı azalırken solunum oranının arttığı bildirilmektedir (Shannon, 1979).

Tuz stresi, bitkileri kısa ve uzun dönemlerde farklı mekanizmalar aracılığıyla etkilemektedir. Kısa süreli etkiler, tuz uygulamasını takip eden birkaç saat veya birkaç gün içerisinde ortaya çıkmakta ve stomaların kapanması sonucu karbon asimilasyonunun yavaşlamasıyla karakterize edilmektedir. Tuzluluğun karbon asimilasyon hızını uzun vadede azaltmasının temel nedeni ise tuz iyonlarının yapraklarda birikerek sodyum ve klor toksisitesine yol açmasıdır (Munns ve Termaat, 1986).

Tuz stresi sırasında hücre içerisine Na^+ iyonu ile birlikte Cl^- iyonunun da girişi gerçekleşmektedir. Normal koşullar altında Cl^- iyonu, fotosentez ve stoma faaliyetlerinin düzenlenmesi ile çeşitli hücresel aktivitelerin sürdürülmesinde önemli bir besin elementi konumundadır. Ancak yüksek tuz yoğunluğu altında hücre içinde aşırı düzeyde biriken Cl^- iyonu toksik etki

oluşturarak hücrel faaliyetlerin yavaşlamasına neden olabilmektedir (Franco-Navarro ve ark., 2019).

4. Tuzluluğa Tolerans Mekanizmaları

Bitkilerde tuzluluğa karşı tolerans temelde iki şekilde olmaktadır. Birinci gruptaki bitkiler, tuzluluk etmeni iyonları dışarıda tutarak (dışlayarak), ikinci gruptaki bitkiler ise tuzu bünyelerine alarak (içleyerek) tolerans gösterebilmektedirler.

Tuzu dışlayan bitkiler, tuzluluğa uyum sağlayabilmek için bünyelerinde su eksikliğini giderici mekanizmalara ihtiyaç duyarlar. Tuzu bünyelerine alarak uyum sağlayan bitkilerde ise dokuların yüksek düzeyde sodyum (Na) ve klora (Cl) toleranslı olmaları veya dokularında biriken yüksek tuz yoğunluğunun bir şekilde giderilmesi gerekmektedir (Marschner, 1995; Glenn ve ark., 1999; Güneş ve Alpaslan, 2000).

Bitkiler tuzluluğa karşı değişik morfolojik ayarlamalar yapmaktadırlar. Tuzlu şartlarda yaprak sayısı, yaprak büyüklüğü ve stoma sayısı azalmakta veya dağılımı değişmekte ve yaprağın kütikula tabakası kalınlaşmaktadır. Tuzluluk genelde kök gelişmesini daha az oranda etkilediğinden dolayı tuzlu şartlarda genelde sürgün/kök oranı azalmaktadır. Bu özellikler seleksiyon kriteri olarak kullanılmaktadır (Shannon, 1979).

KAYNAKÇA

- Abobatta, W. F. (2020). Plant responses and tolerance to combined salt and drought stress. In *Salt and drought stress tolerance in plants: signaling networks and adaptive mechanisms* (pp. 17-52). Cham: Springer International Publishing.
- Abobatta, W. F. (2020). Plant responses and tolerance to extreme salinity: learning from halophyte tolerance to extreme salinity. In *Salt and Drought Stress Tolerance in Plants* (pp. 177-210). Springer, Cham.
- Arif, M. R., Islam, M. T., and Robin, A. H. K. (2019). Salinity stress alters root morphology and root hair traits in *Brassica napus*. *Plants*. 8 (7), 192. doi: 10.3390/plants8070192
- Ashraf, M. (1994). Genetic variation for salinity tolerance in spring wheat. *Hereditas*, 120(2), 99-104.
- Ashraf, M., (1989). The effect of NaCl on water relations, chlorophyll, and protein and proline contents of two cultivars of blackgram (*Vigna mungo* L.), *Plant and soil*, 119(2): 205-10pp.
- Ashraf, M., and Foolad, M.R., (2007). Roles of Glycine Betaine and Proline in Improving Plant Abiotic Stress Resistance. *Environmental and Experimental Botany*, 59: 206-216.
- Atış, İ., (2011). Bazı Silajlık Sorgum (*Sorghum bicolor* L. Moench) Çeşitlerinin Çimlenmesi ve Fide Gelişimi Üzerine Tuz Stresinin Etkileri. Süleyman Demirel Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi 6 (2):58-67, 2011
- Botella, M.A., Rosado, A., Bressan, R.A. and Hasegawa, P.M., (2005). Plant adaptive responses to salinity stress, *Plant Abiotic Stress*, 37-70pp.
- Büyük İ., Aydın, S. S., Aras, S., (2012). Bitkilerin stres koşullarında verdiği moleküler cevaplar. *Türk Hijyen ve Deneysel Biyoloji Dergisi*, 69 (2), 97-110
- Cha-um S, Batin CB, Samphumphung T, Kidmanee C. (2013). Physio-morphological changes of cowpea (*Vigna unguiculata* Walp.) and jack

- bean (*Canavalia ensiformis* (L.) DC.) in responses to soil salinity. *Australian Journal of Crop Science*. 7(13):2128-35.;
- Dajic, Z. (2006). Salt Stress, Physiology and Molecular Biology of Stress Tolerance in Plants, ISBN-13 978-1-4020-4224-9, Dordrecht, The Netherlands, 345 p.
- Deivanai, S., Xavier, R., Vinod, V., Timalata, K., Lim, O. F., (2011). Role of exogenous proline in ameliorating salt stress at early stage in two rice cultivars. *Journal of Stress Physiology & Biochemistry* 7 (4), 157-174.
- Diouf, I. A., Derivot, L., Bitton, F., Pascual, L., & Causse, M. (2018). Water deficit and salinity stress reveal many specific QTL for plant growth and fruit quality traits in tomato. *Frontiers in plant science*, 9, 279.
- El Sabagh, A., Islam, M. S., Skalicky, M., Ali Raza, M., Singh, K., Anwar Hossain, M., ... & Arshad, A. (2021). Salinity stress in wheat (*Triticum aestivum* L.) in the changing climate: Adaptation and management strategies. *Frontiers in Agronomy*, 3, 661932.
- Franco-Navarro, J. D., Rosales, M. A., Cubero-Font, P., Calvo, P., Alvarez, R., Diaz- Espejo, A., & Colmenero-Flores, J. M. (2019). Chloride as a macronutrient increases water-use efficiency by anatomically driven reduced stomatal conductance and increased mesophyll diffusion to CO₂. *The Plant Journal*, 99(5), 815-831.
- Glenn, E. P., Brown, J. J. and Blumwald, E. (1999). Salt Tolerance and crop potential of Halophytes. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 18 (2); 227-255 p.
- Grewal, H.S. (2010). Water uptake, water use efficiency, plant growth and ionic balance of wheat, barley, canola and chickpea plants on a sodic vertosol with variable subsoil NaCl salinity, *Agricultural Water Management*, 97(1): 148- 56pp.

- Güneş, A. and Alpaslan, M. (2000). Boron uptake and toxicity in maize genotypes in relation to boron and phosphorus supply. *J. Plant Nutr.* 23 (4); 541-550 p.
- Hong, C.Y., Chao, Y.Y., Yang, M.Y., Cheng, S.Y., Cho, S.C. and Kao, C.H., (2009). NaCl-induced expression of glutathione reductase in roots of rice (*Oryza sativa L.*) Seedlings is mediated through hydrogen peroxide but not abscisic acid, *Plant and soil*, 320(1-2): 103-15pp.
- Houshmand, S., Arzani, A., Maibody, S.A.M. and Feizi, M., (2005). Evaluation of salt-tolerant genotypes of durum wheat derived from in vitro and field experiments, *Field Crops Research*, 91(2): 345-54pp.
- Hu, Y., & Schmidhalter, U. (2005). Drought and salinity: a comparison of their effects on mineral nutrition of plants. *Journal of plant nutrition and soil science*, 168(4), 541-549.
- Jaarsma, R., Vries, R. S. M., Boe, A. H., (2013). Effect of salt stress on growth, Na⁺ accumulation and proline metabolism in potato (*Solanum tuberosum*) cultivars. *Plos One* 8 (3), 1-10.
- Kara, T. (2002). Irrigation Scheduling to Prevent Soil Salinization from a Shallow Water Table, *Acta Horticulture*, Number 573, pp. 139-151.
- Kaymak Bayram, G.; Can, M.; Tunalı, U.; Acar, Z.; Ayan, 'I. (2025). Growth and Physiological Responses and Selection of Tecera (*Bituminaria bituminosa L.*) Genotypes Under Salt Stress Conditions. *Plants* 2025, 14, 3618. <https://doi.org/10.3390/plants14233618>
- Kaymak G, Acar Z (2020). Determination of salinity tolerance levels of tecera (*Bituminaria bituminosa L.*) genotypes. *Anadolu Journal of Agricultural Sciences* 35 (1): 51-58. doi: 10.7161/omuanajas.608600
- Ketehouli, T., Idrice Carther, K. F., Noman, M., Wang, F. W., Li, X. W., and Li, H. Y. (2019). Adaptation of plants to salt stress: characterization of Na⁺ and K⁺ transporters and role of CBL gene family in regulating salt stress response. *Agronomy*. 9 (11), 687. doi: 10.3390/agronomy9110687

- Koyro, H. W. (2006). Effect of salinity on growth, photosynthesis, water relations and solute composition of the potential cash crop halophyte *Plantago coronopus* (L.). *Environmental and experimental botany*, 56(2), 136-146.
- Koyro, H-W. (2002). Ultrastructural Effects of Salinity in Higher Plants, *Salinity: Environment-PlantsMolecules*, Published by Kluwer Academic Publishers, ISBN 1-4020-0492-3, Dordrecht, The Netherlands, 522p.
- Kumari, S., Chhillar, H., Chopra, P., Khanna, R. R., and Khan, M. I. R. (2021). Potassium: A track to develop salinity tolerant plants. *Plant Physiol. Biochem.* 167, 1011–1023. doi: 10.1016/j.plaphy.2021.09.031
- Lehmann, S., Funck, D., Szabados, L., Rentsch, D. (2010). Proline metabolism and transport in plant development. *Amino Acids* 39, 949- 962.
- Liu, C., Zhao, X., Yan, J., Yuan, Z., & Gu, M. (2019). Effects of salt stress on growth, photosynthesis, and mineral nutrients of 18 pomegranate (*Punica granatum*) cultivars. *Agronomy*, 10(1), 27.
- Marschener, H. (1995). Mineral nutrition of higher plants. Academic Press, 657-668 p
- Matysik, J., Bhalu, B., Mohanty, P., (2002). Molecular mechanism of quenching of reactive oxygen species by proline under stress in plants. *Current Science Association*, 82: 525–532.
- Miller, G., Suzuki, N., Yılmaz, S. C., Mittler, R., (2010). Reactive oxygen species homeostasis and signalling during drought and salinity stresses. *Plant, Cell and Environment*, 33: 453–467.
- Mishra, P., Mishra, J., & Arora, N. K. (2021). Plant growth promoting bacteria for combating salinity stress in plants–recent developments and prospects: a review. *Microbiological Research*, 252, 126861.
- Miyake, H., Mitsuya, S. ve Rahman, M.S., (2006). Ultrastructural Effects of Salinity Stress in Higher Plants, *Abiotic Stress Tolerance in Plants: Toward the Improvement of Global Environment and Food*, Published

- by Springer, ISBN-10 1-4020-4388-0, Dordrecht, The Netherlands, 275p.
- Molazem, D., Qurbanov, E. M., Dunyamaliyev, S. A., (2010). Role of proline, Na and chlorophyll content in salt tolerance of corn (*Zea mays* L.). American-Eurasian Journal Agriculture Environment Science 9 (3), 319-324.
- Montillet, J.L., Chamnongpol, S., Rusterucci, C., Dat, J., Van de Cotte, B., Agnel, J.P., Battesti, C., Inze, D., Van Breusegem, F., Triantaphylides, C., (2005), Fatty acid hydroperoxides and H₂O₂ in the execution of hypersensitive cell death in tobacco leaves, *Plant Physiol.*, 138, 1516-1526.
- Muchate, N. S., Nikalje, G. C., Rajurkar, N. S., Suprasanna, P., & Nikam, T. D. (2016). Plant salt stress: adaptive responses, tolerance mechanism and bioengineering for salt tolerance. *The Botanical Review*, 82(4), 371-406.
- Munns, R. and A. Termatt, (1986). "Whole plant responses to salinity", *Aust. J. Plant Physiol.*, 13, 143-160, 1986.
- Munns, R. and Tester, M., (2008). "Mechanisms of Salinity Tolerance," *Annu. Rev. Plant Biol.* 59, 651-81pp.
- Munns, R., (2002). Comparative physiology of salt and water stress, *Plant, Cell & Environment*, 25(2): 239-50pp
- Parida, A.K. and Das, A.B., (2005). Salt tolerance and salinity effects on plants: A review, *Ecotoxicology and environmental safety*, 60(3): 324-49pp
- Pessarakli, M. and Szabolcs, I., (1999). Soil Salinity and sodicity as particular plant/crop stress factors, *Handbook of plant and crop stress*. Marcel Dekker, New York, 1-15pp
- Rahman, Md.S., Matsumuro, T., Miyake, H. ve Takeoka, Y., (2000). Salinity-induced Ultrastructural Alterations in Leaf Cells of Rice (*Oryza sativa* L.), *Plant Production Science*, 3(4), 422-429

- Robin, A. H. K., Matthew, C., Uddin, M. J., and Bayazid, K. N. (2016). Salinity induced reduction in root surface area and changes in major root and shoot traits at the phytomer level in wheat. *J. Exp. Bot.* 67, 3719–3729. doi: 10.1093/jxb/erw064
- Sanchez, E., Avila-Quezada, G., Gardea, A. A., Ruiz, J. M., Romero, L. (2007). Biosynthesis of proline in fruits of green bean plants: deficiency versus toxicity of nitrogen. Deficiency versus toxicity of nitrogen. *Phyton* 76, 143–152.
- Shahid, M. A., Balal, R. M., Pervez, M. A., Abbas, T., Ashfaq, M., Ghazanfar, U., Afzal, M., Rashid, A., Garc'ia-Sanchez, F., and Mattson, N. S. (2012). Differential response of pea (*Pisum sativum* L.) genotypes to salt stress in relation to the growth, physiological attributes antioxidant activity and organic solutes. *Aust. J. Crop Sci.* 6: 828–838.
- Shannon, M.C., (1979). In quest rapid screening techniques for plant salt tolerance. *Hortsci.* 14, 587-589.
- Shao, H-B., Chu, L-Y., Jaleel, C.A. ve Zhao, C-X., (2008). Water-deficit Stress-induced Anatomical Changes in Higher Plants, *Comptes Rendus Biologies*, 331(3), 215-225
- Szabados, L., Savoure, A., (2009). Proline: a multifunctional amino acid. *Trends in Plant Science*, 15 (2): 89-97.
- Wang, J.J., Lin, W.H., Zhao, Y.T., Meng, C., Ma, A.W., Xue, L.H., Tian, P., (2017). Physiological and biochemical responses of *Festuca sinensis* seedlings to temperature and soil moisture stress. *Functional Plant Biology*, 44(10): 1007-1015.
- Yan, Z., Guo, S., Shu, S., Sun, J., Tezuka, T., (2011). Effects of proline on photosynthesis, root reactive oxygen species (ROS) metabolism in two melon cultivars (*Cucumis melo* L.) under NaCl stress. *African Journal of Biotechnology*, 10 (80): 18381-18390.

Yılmaz, A. M., (2010). Sulama Suyu Kalitesi Ve Tuzluluk Ders Notları, Selçuk Üniversitesi, Konya

BÖLÜM 10

PAMUK TARIMINDA SU AYAK İZİNİN ÖNEMİ VE İZLENMESİ

Prof. Dr. Mesut BUDAK¹⁹

Prof. Dr. Hikmet GÜNAL²⁰

Prof. Dr. İsmail ÇELİK²¹

DOI: <https://www.doi.org/10.5281/zenodo.18109285>

¹⁹ Siirt Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Toprak Bilimi ve Bitki Besleme Bölümü, Siirt

²⁰ Harran Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Toprak Bilimi ve Bitki Besleme Bölümü, Şanlıurfa

²¹ Çukurova Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Toprak Bilimi ve Bitki Besleme Bölümü, Adana

1. GİRİŞ

Su kaynaklarının aşırı kullanımı ve su kalitesindeki bozulmalar, küresel ölçekte tatlı su kaynaklarının hızla azalmasına neden olmaktadır (Chapagain ve ark., 2006). Tatlı su kaynaklarında yaşanan bu azalma, 21. yüzyılda tarımsal kalkınmanın önündeki en önemli kısıtlayıcı faktörlerden biri haline gelmiştir (Li ve ark., 2023). Tarımsal verimlilik, doğrudan mevcut su kaynaklarının miktarı ve yönetim biçimiyle ilişkilidir. Küresel nüfusun artışıyla birlikte, gıda, giyim ve ev dekorasyonu gibi çeşitli uygulamalarda kullanılan liflere ve tarımsal ürünlere artan bir talep bulunmaktadır. Bu talebi karşılayabilmek için suya olan ihtiyaç da buna paralel olarak önemli ölçüde artmaktadır (Li ve ark., 2023; Demeke ve ark., 2024). Bu durum, tarımsal su kaynaklarının etkin yönetimini zorlaştırmakta ve sürdürülebilir su kullanımı ile yönetimine yönelik yenilikçi teknolojilerin ve stratejik planlamaların geliştirilmesini zorunlu kılmaktadır (Li ve ark., 2023).

Doğal lif üretiminin temel kaynağı olması nedeniyle pamuk küresel ölçekte stratejik bir tarımsal ürün konumundadır. Ancak diğer birçok tarla ürününe (buğday ve mısır) göre daha yüksek bir tarımsal kimyasal ve su kaynağı tüketim yoğunluğuna sahip olması nedeniyle su yönetimi tartışmalarının merkezinde yer alan stratejik bir tarımsal ürün olma özelliği de taşımaktadır (Zhang ve ark., 2021; Wang ve ark., 2023). Zhang ve ark. (2021), pamuk yetiştiriciliğinin, sürdürülemez su tüketiminin %67'sini oluşturduğunu ve su kaynakları üzerindeki çevresel baskı bakımından en kritik ürün gruplarından biri olduğunu rapor etmiştir. Dünya genelinde düşük sulama suyu verimliliği, yüksek atık su oluşumu ve aşırı gübre kullanımı pamuk tarımının çevresel etkilerini önemli ölçüde artırmaktadır. Özellikle küresel iklim değişikliğinin etkilerinin belirginleşmesiyle birlikte kuraklığın daha yoğun yaşandığı bölgelerde bu olumsuz etkiler çok daha şiddetli şekilde ortaya çıkmaktadır. Dolayısıyla pamuk üretiminde su kullanımının nicel ve nitel

boyutlarının bütüncül bir çerçevede değerlendirilmesi, sürdürülebilir üretim politikalarının geliştirilmesi için temel bir gerekliliktir.

Birçok araştırmacı, tarımsal üretimde su kullanımına ilişkin geleneksel değerlendirme yaklaşımlarının, küresel su kıtlığının karmaşık dinamiklerini açıklamada yetersiz kaldığını ortaya koymuştur (Sturdy ve ark., 2008; Aldaya ve ark., 2012; Hoekstra, 2016; Cao ve ark., 2021; Mallareddy ve ark., 2023; Yan ve ark., 2023; Rafiei ve ark., 2024; Si ve ark., 2025). Bu yetersizlik, ürünlerin üretim süreçleri boyunca ortaya çıkan doğrudan ve dolaylı su girdilerinin bütüncül biçimde ele alınmasına yönelik bir talebi gündeme getirmiş ve bu doğrultuda daha kapsamlı bir metodolojik çerçevenin geliştirilmesini gerekli kılmıştır. Üretim-tüketim zincirinin tamamını dikkate alan bu yeni değerlendirme ihtiyacı, su kullanımının mekânsal ve zamansal boyutlarını entegre eden analitik yaklaşımların oluşturulmasını zorunlu hale getirmiştir (Xinchun ve ark., 2017).

2. SU AYAK İZİ KAVRAMI VE TARIMSAL UYGULAMALARI

Tarımsal üretim ile su kaynakları arasındaki etkileşimin kapsamlı biçimde değerlendirilmesi amacıyla farklı yöntemler geliştirilmiştir. Bunlar; su kullanım verimliliği, su kıtlığı ve su ayak izi gibi analitik değerlendirme yaklaşımlarıdır (Xinchun ve ark., 2017). ***Su kullanım verimliliği***, birim ürün üretimi için tüketilen su miktarının minimize edilmesini ve suyun fiziksel, ekonomik ve çevresel açıdan en etkin biçimde kullanılmasını ifade eder. Su kaynaklarının etkin kullanım oranı veya üretim kapasitesi, su kullanım verimliliğini ortaya koyar ve sulama verimliliği ile su üretkenliği göstergeleri üzerinden değerlendirilir (Evans ve Sadler, 2008; Martínez ve Reca, 2014; Xinchun ve ark., 2017; Mallareddy ve ark., 2023). ***Su kıtlığı***, üretim ihtiyaçlarını karşılamak için su kullanım verimliliği yerine kullanılan bir yöntemdir ve mevcut su kaynaklarının ekosistemlerin sürdürülebilirliği ile birlikte tarım, sanayi ve içme suyu taleplerini karşılamakta yetersiz kaldığı hidrolojik ve sosyo-ekonomik stres durumunu ifade etmektedir. Su kıtlığı

değerlendirmesinde Falkenmark Endeksi, su stresi endeksi Uluslararası Su Yönetim Enstitüsü göstergesi ve mavi su kıtlığı en yaygın kullanılan göstergelerdir (Mancosu ve ark., 2015; Liu ve ark., 2017; Xinchun ve ark., 2017; Ingrao ve ark., 2023). **Su ayak izi** ise, bir ürün veya sürecin üretimi boyunca doğrudan ve dolaylı olarak tüketilen toplam tatlı su miktarını yeşil, mavi ve gri su bileşenleri temelinde nicel olarak değerlendiren bütüncül bir çevresel göstergedir.

Tarımsal üretim ve ticaret süreçlerindeki su kullanımının su kıtlığı ve kirliliği üzerinde yarattığı baskının giderek daha fazla araştırılması, Su Ayak İzi kavramının ortaya çıkmasına zemin hazırlamıştır (Hoekstra, 2017). **Su ayak izi**; bireyler veya ülkeler tarafından tüketilen mal ve hizmetlerin üretiminde kullanılan toplam su miktarını ölçen bir göstergedir. Bu kavram ilk olarak 2002 yılında Hoekstra tarafından ortaya atılmış ve özellikle sanal su ticareti bağlamında su kıtlığının etkilerini anlamada önemli bir araç olarak geliştirilmiştir. İlk eleştirilere rağmen, su ayak izi, sanal su ithalatının su kaynakları üzerindeki etkilerini açıklayan sanal su ticareti yaklaşımıyla desteklenmiş ve aynı yıl uluslararası ticaretteki ilk küresel sanal su akışları nicel olarak ortaya konmuştur (Hoekstra ve Hung, 2002). Su ayak izi metodolojisi zamanla gelişmiş; yüksek çözünürlüklü hesaplamalar, yıllık değişkenlik analizleri, mahsul kıyaslamaları, mavi ve gri su analizleri, uzaktan algılama ve geleceğe yönelik senaryolar geliştirilmiştir. Günümüzde su ayak izi, ürün ve sektör analizlerinden diyet ve havza çalışmalarına kadar geniş bir uygulama alanına sahiptir (Hoekstra, 2017).

3. SU AYAK İZİNİN ÜÇ RENGİ: HİDROLOJİK VE ÇEVRESEL TEMELLER

Bu bölümün temel amacı, suyu sadece "musluktan akan bir miktar" olarak değil, doğal döngüdeki farklı formları (Mavi/Yeşil) ve ekosistemin kirlilik yükünü tolere etme kapasitesi (Gri) olarak sınıflandırmaktır. Ziraat

mühendisleri için kritik olan, bu üç rengin birbirine dönüştürülemez ancak birbirini tamamlayan kaynaklar olduğunu kavramaktır.

3.1. Mavi Su Ayak İzi: Yüzey ve Yeraltı Suyu Kaynaklarının Tüketimi

Mavi Su, Ziraat mühendislerinin sahada en çok müdahale ettiği (sulama), yönetimi en kritik olan ve diğer sektörlerle (sanayi, içme suyu) "rekabet edilen" kaynaktır. Mavi Su, bir mal veya hizmet üretmek için yüzey (nehirler, göller, barajlar) veya yeraltı (akiferler, kuyular) su kaynaklarından çekilen ve buharlaşma (evaporasyon) yoluyla havzadan uzaklaşan su hacmidir. Mavi su ayak izi sadece tarlaya verilen su değil; bitki tarafından kullanılıp atmosfere karışan, ürünün bünyesine giren veya başka bir havzaya transfer edilen "tüketilmiş" sudur (Hoekstra ve ark., 2011). Tarımsal sulamada tarlaya verilen suyun bir kısmı sızarak yeraltına döner (bu kayıp değildir), ancak bitki tarafından kullanılıp atmosfere karışan kısım (Evapotranspirasyon) "Mavi Su Ayak İzi"dir. Geleneksel sulamada buharlaşma kayıpları bu yüzden ayak izini gereksiz yere büyütür (Hoekstra, 2019).

Mavi su, insan kullanımı için rekabet edilen (içme, sanayi, enerji, sulama) en kıt kaynaktır. Son 50 yılda küresel mavi su tüketiminin yaklaşık iki katına çıkması, bu kaynağın üzerindeki baskıyı artırmıştır. Tarımsal su yönetiminde "Su Çekimi" ile "Su Tüketimi" karıştırılmamalıdır. Örneğin, hidroelektrik santralleri suyu çeker ama tüketmeden nehre geri verir; ancak tarımsal sulamada suyun büyük kısmı buharlaşarak havzayı terk eder. Küresel su çekimlerinin yaklaşık %69-70'i tarım sektörü tarafından yapılmaktadır ve bu oran düşük gelirli ülkelerde %90'lara kadar çıkabilmektedir (FAO, 2023). Küresel ölçekte mavi su ayak izinin en büyük payı buğday (%27) ve pirinç (%17) üretimine aittir; bu iki ürün tek başına küresel mavi su tüketiminin neredeyse yarısını oluşturur (Mekonnen ve Hoekstra, 2011). Son yüzyılda küresel su çekimi, dünya nüfus artış hızından 1.7 kat daha hızlı artmıştır, bu da mavi su üzerindeki baskının nüfustan daha hızlı büyüdüğünü gösterir (UNESCO, 2021).

3.2. Yeşil Su Ayak İzi: Toprak Nemi ve "Görünmez" Üretim Gücü

Genellikle "yağmur yağdı bitti" algısıyla ihmal edilen, ancak küresel gıda güvenliğinin belkemiği olan su kaynağıdır. Doğrudan yağışlarla toprağa düşen, yüzeyden akıp gitmeyen, yeraltına sızmayan ve kök bölgesinde "toprak nemi" olarak tutulup bitkiler tarafından terleme yoluyla kullanılan sudur (Hoekstra ve ark., 2011). Bu su borularla taşınmaz, satılamaz ve başka bir yere transfer edilemez; sadece yerinde yönetilebilir.

Küresel bitkisel üretimin toplam su ayak izinin yaklaşık %78'i Yeşil Su kaynaklıdır. Yani dünya gıdasının büyük çoğunluğu sulama kanallarıyla değil, toprakta tutulan yağmur suyuyla üretilir (Mekonnen ve Hoekstra, 2011). Dünya genelindeki ekilebilir arazilerin %80'i sadece yağmura dayalı (kuru tarım) tarım yapar ve bu alanlar küresel gıdanın %60'ını üretir (Rockström ve ark., 2010).

Yeşil su, artık bilim dünyasında insanlığın güvenli yaşam alanı için bir "Gezegensel Sınır" olarak kabul edilmektedir. Son araştırmalar, insan faaliyetlerinin (ormansızlaşma, toprak bozulumu) yeşil su döngüsünü bozarak bu sınırı aştığını göstermektedir. Yeşil su, borularla taşınmaz; sadece yerinde yönetilebilir. Toprağın organik madde miktarını artırmak veya malçlama yapmak, toprağın su tutma kapasitesini artırarak yağın yağmurun "Yeşil Su"ya dönüşme oranını maksimize eder (Falkenmark ve Rockström, 2006).

3.3. Gri Su Ayak İzi: Doğanın "Özümseme Kapasitesi"

Bu, kullanılan fiziksel bir su miktarı değil, kirletilen suyun temizlenmesi için ekosistemden "rezerve edilmesi gereken" sanal bir hacimdir. Gri su ayak izi, mevcut su kalitesi standartlarına (örn: AB Su Çerçeve Direktifi veya ABD EPA standartları) göre, oluşan kirlilik yükünü (gübre, pestisit vb.) doğal konsantrasyon seviyesine kadar seyreltmek için gereken tatlı su miktarıdır (Hoekstra ve ark., 2011). Gri Su Ayak İzi (GSAİ), şu formül ile ifade edilir:

$GSAİ = (L) / (C_{max} - C_{nat})$ Bu eşitlikte; L, su kaynağına ulaşan kirletici yükünü (kg/yıl) (Örn: Yıkanan Azot) temsil etmektedir. C_{max} , su kalite standartlarına göre izin verilen maksimum konsantrasyon (Mevzuat limiti) ve C_{nat} ise o su kaynağının doğal (kirlenmemiş) halindeki konsantrasyonunu ifade eder. Formüldeki C_{max} (standartlar) ne kadar sıkılaşır, yani izin verilen kirlilik limiti ne kadar düşerse, Gri Su Ayak İzi o kadar büyür (Franke ve ark., 2013). Bu, çevre mevzuatlarının tarımsal üretim üzerindeki baskısını gösteren önemli bir parametredir.

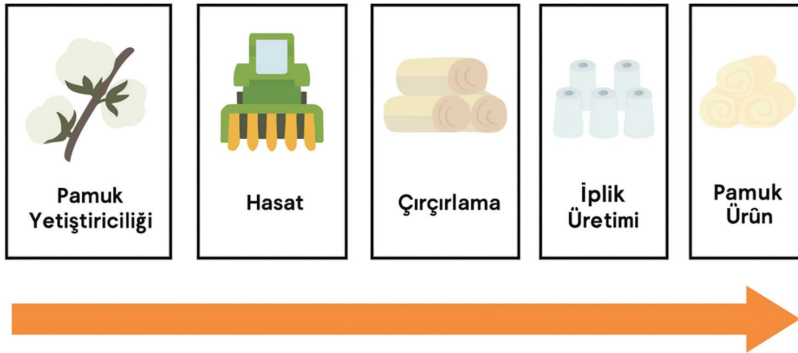
Literatürdeki çalışmalar, tarımsal üretimde azotlu gübre kullanımının kritik bir eşik değeri aşması durumunda, kirlilik yükü ve buna bağlı Gri Su Ayak İzinin lineer bir artıştan ziyade, üstel bir artış eğilimi gösterdiğini ortaya koymaktadır (Liu ve ark., 2012). Tarımsal ve endüstriyel alanlardan yeterli arıtma prosesi uygulanmadan alıcı ortamlara deşarj edilen atık sular, gri su ayak izi oluşumunun sahadaki en belirgin parametresidir. Nitekim Şanlıurfa Organize Sanayi Bölgesi'nden dere yatağına kontrolsüz biçimde deşarj edilen atık su, su kaynağının kirlilik yükünü artırmakta ve ekosistemin asimilasyon (seyreltme) kapasitesi üzerinde ciddi bir baskı oluşturmaktadır (Şekil 1).



Şekil 1. Şanlıurfa Organize Sanayisinden bırakılan atık su

4. PAMUK TARIMINDA SU AYAK İZİNİN ÖNEMİ VE KÜRESEL DURUMU

Pamuk, tarıma dayalı ekonomilerin ekonomik refahı için hayati öneme sahip başlıca bir ticari üründür. Tekstil endüstrisi, küresel doğal lif üretiminin yaklaşık %80'ini oluşturan pamuğa yüksek düzeyde bağımlıdır ve bu sektörün yıllık ekonomik büyüklüğü 600 milyar ABD doları düzeyine ulaşmaktadır (Khan ve ark., 2020). Bununla birlikte pamuk üretimi, önemli çevresel etkiler barındırmaktadır. Bitmiş pamuklu bir kumaş üretimi için, sentetik liflere ve diğer doğal liflere kıyasla daha yüksek düzeyde su tüketimi söz konusudur (Demeke ve ark., 2024). Su ayak izinin oluşum süreci ham madde üretimiyle sınırlı kalmamaktadır. Süreç, yoğun sulama ve gübreleme gerektiren 'pamuk yetiştiriciliği' aşamasıyla başlamakta, ardından 'hasat' ve lifin çekirdekten ayrıldığı 'çıırçılama' işlemleriyle devam etmektedir. Endüstriyel su kullanımının ve kirlilik yükünün (gri su ayak izi) arttığı 'iplik üretimi' aşaması ise, 'pamuklu ürün' haline gelmeden önceki en kritik işlem basamağını oluşturmaktadır. Dolayısıyla nihai ürünün su ayak izi, bu beş aşamalı yaşam döngüsünün toplam bileşkesidir.



Şekil 2. Pamuklu Bir Ürünün Üretim Süreçlerinde Su Ayak İzi Aşamaları

Pamuk üretiminin, küresel tarımsal üretimin mavi su ayak izinin yaklaşık %8.3'ünü oluşturduğu, toplam sürdürülemez mavi su ayak izinin ise %10'unu oluşturduğunu bildirmiştir (Mekonnen ve Hoekstra, 2020). Küresel

olarak 1 kilogram pamuk ipliği üretmek için ortalama 10.000 litreye kadar su kullanılacağı ifade edilmektedir (Water Footprint Network, 2023). Pakistan için yaptıkları çalışmalarında Khan ve Ali (2024), 1 ton bitmiş pamuklu kumaş üretmek için 22.596 m^3 su tüketilmesi gerektiğini rapor etmişlerdir. Araştırmacılar, mavi ve gri su ayak izi değerlerinin, yeşil su ayak izinden daha yüksek olduğunu ifade etmişlerdir. En yüksek su ayak izinin ise pamuk yetiştiriciliği ve çırçırılama aşamalarında ortaya çıktığı belirtilmiştir. Bu rakam, bir bireyin ortalama 10 yıllık içme suyu ihtiyacına eşittir. Bu durum, özellikle su kaynaklarının kısıtlı olduğu birçok bölgede, doğal akış rejimlerinin bozulmasına yol açabilmektedir. Ayrıca iklim değişikliğine bağlı olarak artan sıcaklıkların, gelecekte pamuğun su ayak izini daha da yükseltmesi öngörülmektedir (Demeke ve ark., 2024).

Pamuk, küresel su tüketiminin en yoğun olduğu ürünlerden biridir. Mekonnen ve Hoekstra (2011), çeşitli tarla bitkilerinin küresel ölçekte su ayak izi değerlerini karşılaştırdıkları çalışmalarında, buğday, silajlık mısır, patates, şekerpancarı ve pamuk bitkileri arasında en yüksek su ayak izinin pamukta görüldüğünü rapor etmişlerdir. Araştırmaya göre pamuk bitkisinin yıllık toplam su ayak izi $4028 \text{ m}^3 \text{ ton}^{-1}$ ile en yüksek değere sahipken, en düşük su ayak izi ise $133 \text{ m}^3 \text{ ton}^{-1}$ ile şeker pancarında olduğu belirlenmiştir. Pamuk bitkisinin toplam su ayak izi bileşenleri incelendiğinde, yıllık ortalama $2282 \text{ m}^3 \text{ ton}^{-1}$ 'ün yeşil su, $1306 \text{ m}^3 \text{ ton}^{-1}$ 'ün mavi su ve $440 \text{ m}^3 \text{ ton}^{-1}$ 'ün gri su kaynaklı olduğu bildirilmektedir. Bu sonuçlar, pamuk üretiminin özellikle yağışa bağlı toprak nemi ve sulama suyu tüketimi açısından diğer birçok bitkiye kıyasla çok daha yüksek bir su talebine sahip olduğunu göstermektedir. Chapagain ve ark. (2006) dünya genelinde pamuk tüketiminin su ayak izini kapsamlı bir şekilde incelemiştir. Yapılan incelemede dünya genelinde pamuk üretiminin yıllık yaklaşık $256 \times 10^9 \text{ m}^3$ su gerektirdiği ve pamuk başına düşen su ayak izinin yaklaşık %42'sinin mavi su, %39'unun yeşil su ve geriye kalan %19'unun ise gri su kaynaklarından oluştuğu bildirilmiştir. Fu ve ark. (2019) ise pamuk

üretiminin buğday ve mısır gibi temel tarla ürünlerine kıyasla çok daha yüksek bir su ayak izine sahip olduğunu bildirmiştir. Araştırmacı, pamuk üretim sürecinde ortaya çıkan toplam su tüketiminin yaklaşık %67'sinin sürdürülemez kaynaklardan karşılandığını ve bu nedenle pamuğun sürdürülemez su talebi en yüksek üçüncü tarımsal ürün grubunda yer aldığını belirtmiştir. Bu çalışmalar, pamuk tarımının su kaynakları üzerindeki baskısını net bir şekilde ortaya koymaktadır ve kaynak verimliliğini esas alan sürdürülebilir üretim modellerine duyulan ihtiyacı açıkça göstermektedir. Özellikle pamuk bitkisinde mavi ve gri su bileşenlerinin büyüklüğü, hem su yönetimi hem de çevresel kalite açısından iyileştirilmiş uygulamalara duyulan ihtiyacı artırmaktadır.

4.1. Pamuk Üretim Süreçlerinde Su Ayak İzini Etkileyen Faktörler

Pamukta su ayak izi yönetiminde başarı; sulama verimliliğini artıran teknolojilerin (damla sulama, planlı sulama), toprak ve yüzey yönetiminin, ve suyun hem miktar hem kalite açısından sürdürülebilir kullanımını gözetken kapsamlı stratejilerin bir arada uygulanmasına bağlıdır. Bu yaklaşım, kurak ve su stresi yaşayan bölgeler açısından hem su kaynaklarının korunması hem de pamuk üretiminin sürdürülebilirliği açısından kritik önemdedir.

Pamuk üretiminde su ayak izi; yağışla gelen yeşil su, yüzey ve yeraltı sularından sağlanan mavi su ve tarımsal kirliliği seyrelten gri su bileşenlerinden oluşur. Bu bileşenlerin büyüklüğü büyük ölçüde iklim koşulları, toprak özellikleri ve üretim sistemi (kuru/sulu, verim düzeyi vb.) tarafından belirlenir. Mekonnen ve Hoekstra (2011 ve 2014)'nın küresel ölçekte yaptığı hesaplamalara göre, pamuk için ortalama toplam su ayak izi 1 ton kütlü pamuk başına birkaç bin metreküp düzeyindedir ve bu suyun önemli bir kısmı yeşil sudan, su stresi yüksek bölgelerde ise mavi sudan gelmektedir. Bu durum, yarı kurak iklimlerde pamuk üretiminin bölgesel su kıtlığı ve ekosistemler

üzerindeki baskıyı artırma potansiyeline sahip olduğunu göstermektedir (Jans ve ark., 2021).

Pamuk üretim süreçlerinde mavi su ayak izini en çok etkileyen değişkenlerin başında sulama yöntemi, sulama zamanlaması ve sulama suyu miktarı gelmektedir. Yüzey sulama yöntemlerinin kullanıldığı sistemlerde, buharlaşma ve sızma kayıpları nedeniyle hem sulama suyu tüketimi hem de mavi su ayak izi yükselmekte, buna karşılık damla ve özellikle gömülü damla sulama sistemlerinde birim ürün başına tüketilen mavi su önemli ölçüde azaltılabilmektedir. Türkiye ve Akdeniz koşullarında yürütülen çalışmalar, damla sulamanın pamukta su kullanım verimliliğini artırırken toplam su ayak izini düşürdüğünü, yüzey sulamaya göre aynı veya daha yüksek verimi daha düşük sulama suyu ile sağlayabildiğini ortaya koymaktadır (Dağdelen ve ark., 2009; Çetin ve ark., 2021). Benzer biçimde, Yunanistan koşullarında AquaCrop ve CROPWAT modelleriyle yapılan bir değerlendirmede damla sulamanın yağmurlama sulamaya kıyasla toplam su ayak izini yaklaşık %5, kontrollü eksik sulama stratejilerinin ise tam sulamaya göre yaklaşık %12 azaltabildiği gösterilmiştir (Tsakmakis ve ark., 2018).

Sulama stratejisinin (tam sulama, eksik sulama, yağış aralarını köprüleyecek destek sulama vb.) seçimi de pamuk su ayak izi üzerinde belirleyici bir etkene sahiptir. Eksik sulama uygulamalarının, uygun iklim ve toprak koşullarında verimi kabul edilebilir düzeyde korurken mavi su kullanımını anlamlı ölçüde azaltabildiği; buna karşılık aşırı ve geç dönem sulamaların hem verimi hem de lif kalitesini olumsuz etkileyerek birim ürün başına su ayak izini büyüttüğü bildirilmektedir (Bhargavi ve ark., 2025). Uzun süreli iklim verilerine dayalı modellemeler, örneğin Çukurova Bölgesi için CROPWAT kullanılarak yapılan çalışmalarda, su ihtiyacının yıl içindeki dağılımı ve uygun sulama programlarının belirlenmesinin hem su kaynaklarının korunması hem de pamuk üretiminde su ayak izinin azaltılması açısından kritik olduğunu ortaya koymaktadır (Umar ve ark., 2025).

Su ayak izini etkileyen bir diğer temel faktör verim düzeyidir. Su ayak izi hesaplamalarında paydada ürün verimi yer aldığı için, birim alandan elde edilen kütlü pamuk verimi arttıkça birim ürün başına düşen hem yeşil hem mavi su ayak izi azalmaktadır. Küresel ölçekte pamuk üretimi için elde edilen su ayak izi serilerinde, düşük verimli sistemlerin aynı ya da daha fazla suyu kullanarak ton başına çok daha yüksek su ayak izine sahip olduğu; yüksek verimli, iyi yönetilen alanların ise toplam tüketim benzer kalsa dahi birim ürün su ayak izini düşürebildiği gösterilmiştir (Mekonnen ve Hoekstra, 2014; Esetlili ve ark., 2022). Bu nedenle, uygun çeşit seçimi, dengeli gübreleme, zararlılarla entegre mücadele ve iyi tarım uygulamaları gibi verimi artıran tüm unsurlar dolaylı olarak pamuk su ayak izinin azaltılmasına katkı sağlamaktadır. WWF ve paydaşları tarafından yürütülen projeler, özellikle Türkiye ve benzeri yarı kurak bölgelerde rejeneratif ve iyi tarım uygulamalarının hem su kullanımını hem de üretici gelirini iyileştirebildiğini göstermektedir (WWF, 2025a; WWF, 2019a).

Gri su ayak izi ise pamuk üretiminde kullanılan azotlu gübreler ve pestisitler kaynaklı kirliliği seyretebilmek için gerekli su miktarını ifade eder ve gübreleme–ilaçlama pratiği, toprak özellikleri ve drenaj koşullarından güçlü şekilde etkilenir. Su ayak izi değerlendirmeleri, birçok tarımsal havzada mavi su kadar gri su bileşeninin de kritik seviyelere ulaşabildiğini ve yeraltı/yerüstü su kalitesi üzerinde baskı oluşturduğunu ortaya koymuştur (Hoekstra ve ark., 2011). Azotlu gübre miktarının azaltılması, zamanlama ve uygulama tekniğinin optimize edilmesi, damla sulama ile gübrelemenin birleştirildiği fertigasyon sistemleri ve toprakta su tutma kapasitesini artıran organik madde/malç uygulamaları hem verimi koruyup hem de gri su ayak izini düşürmeye yönelik başlıca yönetim seçenekleri arasında gösterilmektedir (Khan ve Ali, 2024).

Son olarak, bölgesel su kıtlığı ve hidrolojik koşullar pamuk üretiminin su ayak izinin “sürdürülebilirlik” boyutunu belirler. Aynı miktarda mavi su kullanımının, su stresi düşük bir havzada nispeten sınırlı etkiye sahipken, su

stresi yüksek Aral Havzası gibi bölgelerde ciddi ekolojik ve sosyal sonuçlar doğurduğu bilinmektedir (EJF, 2012; WWF, 2019b). Küresel analizler, pamuk için mavi su ayak izinin önemli bir kısmının “sürdürülemez” düzeyde olduğunu ve bu suyun büyük bölümünün uluslararası ticaret yoluyla “sanal su” olarak ihraç edildiğini göstermektedir (Demeke ve ark., 2024). Bu nedenle, pamuk üretiminde su ayak izini değerlendirirken yalnızca kullanılan su miktarına değil, bu kullanımın gerçekleştiği havzadaki su stresi düzeyine, ekosistem gereksinimlerine ve diğer sektörlerin su talebine de bakmak gerekmektedir.

4.2. Pamukta Su Ayak İzinin Azaltılması

Türkiye, kişi başına düşen yıllık kullanılabilir su miktarı 1.340 metreküp ile su stresi çeken bir ülkedir. Bu rakam, 2030'a kadar su fakiri (kişi başı $< 1.000 \text{ m}^3$) ülkeler seviyesine inme riski taşımaktadır (WWF, 2025b; DSİ, 2025). Ulusal ölçekteki bu kısıtlara rağmen, Şanlıurfa bölgesindeki pamuk üretimi yüksek sulama gereksinimi nedeniyle su bütçesi üzerinde yoğun bir baskı oluşturmaktadır. Bu bağlamda, pamuğun toplam su ayak izini oluşturan en baskın ve çevresel açıdan en riskli bileşen, Fırat Nehri ve yeraltı sularından temin edilen 'Mavi Su'dur (Şekil 3).



Şekil 3. Atatürk Barajından tüneller ile Harran Ovası ve Mardin Ovalarına Mavi Suyun taşındığı kanal

Pamuk üretiminde su ayak izini azaltmanın en etkili yollarından biri, *sulama verimliliğini* artırmaktır. Bu bağlamda geleneksel yüzey sulama yöntemleri yerine damla sulama sistemlerinin kullanımı kritik öneme sahiptir. Örneğin, Türkiye’de yapılan bir alan denemesinde damla sulama kullanılarak yapılan pamuk sulamasında, yüzey sulamaya kıyasla su kullanımı azalırken su kullanım verimliliği artmıştır (Dağdelen ve ark., 2009; Hussein ve ark., 2011). Ayrıca başka bir çalışmada, damla sulama ile farklı sulama düzeylerinin uygulanması sonucunda hem su tasarrufu elde edilmiş hem de lif verimi ve kalite parametrelerinde yeterli değerler sağlanmıştır (Dağdelen ve ark., 2019). Bu bulgular, sulama suyunun bitkinin sadece kök bölgesine yönlendirilmesinin, buharlaşma ve yüzey kayıplarını minimize ederek, su ayak izini küçültilebileceğini göstermektedir.

Sulama planlaması ve su uygulama zamanlaması da diğer önemli stratejilerdir. Sulamanın rastgele takvime göre değil, bitkinin gerçek su ihtiyacına göre yapılması, israfa neden olan gereksiz sulamaları önler. Bu noktada, sulama suyu yönetimini optimize eden sistemlerin devreye alınması, örneğin sulama karar destek sistemleri ya da nem/evapotranspirasyon temelli programlama, su kullanımını minimize edebilir. Literatürde, kurak ve yarı-kurak bölgelerde pamuk için bu tür optimize sulama rejimlerinin, su tüketimini ciddi şekilde azaltırken verim ve su kullanım verimliliğini koruduğu ya da artırdığı gösterilmiştir (Ramamurthy ve ark., 2009; Tunalı ve ark., 2021).

Toprak işleme uygulamaları ve yüzey yönetimi, özellikle kurak ve yarı kurak iklimlerde su tasarrufu sağlamak açısından temel öneme sahiptir. Toprak yüzeyinin malçlama ile kaplanması veya minimum toprak işleme yöntemlerinin uygulanması, yüzeyden gerçekleşen buharlaşma kayıplarını azaltarak toprağın mevcut nemini daha uzun süre korumasına yardımcı olmaktadır. Bu konuda yapılan geniş kapsamlı bir derleme çalışması, malç kullanılan topraklarda buharlaşmanın, malç uygulanmamış yüzeylere kıyasla sezon boyunca %17 ile %79 arasında azaldığını ortaya koymuştur (Ramos ve

ark., 2024). Benzer şekilde, malçlamanın toprak neminin korunmasına, sulama ihtiyacının düşmesine ve su kullanım verimliliğinin artmasına katkı sağladığı başka çalışmalarla da doğrulanmıştır. Örneğin, tarımsal üretimde su ve toprak tasarrufu üzerine yapılan bir incelemede, malçlama uygulamalarının hem toprak su tutma kapasitesini artırdığı hem de aşırı buharlaşmayı engelleyerek sulama sıklığını azalttığı bildirilmektedir (El-Beltagi ve ark., 2022). Ayrıca yapılan deneysel araştırmalar, malç uygulanmış alanlarda sulama sonrası toprak neminin daha uzun süre korunduğunu, yüzey buharlaşmasının azaldığını ve bitkinin kullandığı toplam su miktarının daha verimli hale geldiğini göstermektedir (Onwuka ve Uzoma, 2018). Tüm bu bulgular, sıcak ve kurak iklim koşullarının hâkim olduğu bölgelerde, örneğin Güneydoğu Anadolu ve Şanlıurfa gibi alanlarda, malçlama ve minimum toprak işleme gibi yüzey yönetimi stratejilerinin sulama suyu gereksinimini azaltmada etkili, bilimsel olarak kanıtlanmış yöntemler olduğunu göstermektedir.

Su kaynaklarının sürdürülebilirliği açısından su ayak izi, miktar kadar kalite parametrelerini de kapsamaktadır. Yanlış arazi yönetimi ve yoğun kimyasal kullanımı, tarımsal drenaj sularının kalitesini düşüren temel faktörlerdir. Bu süreçte oluşan yüzeysel akışlar, tarım topraklarını erozyonla taşıırken, bünyesindeki gübre ve ilaç kalıntılarını da alıcı ortamlara iletmektedir. Şekil 4'te sunulan örnekte, tahliye kanalındaki suyun rengi ve partikül yoğunluğu, tarımsal kirleticilerin ve sedimentin su kütlesine nasıl entegre olduğunu ve Gri Su Ayak İzini nasıl yükselttiğini açıkça belgelemektedir.



Şekil 4. Harran Ovasında yer alan Havşanlı Köyü tahliye kanalında oluşan sediment taşınımı

Bu nedenle, besin maddelerinin dengeli ve gereksinime dayalı uygulanmasını esas alan Entegre Besin Yönetimi ile kimyasal girdilerin azaltılmasını, biyolojik ve kültürel mücadele yöntemlerinin öncelenmesini hedefleyen Entegre Zararlı Yönetimi yaklaşımları, su kalitesinin korunmasında kritik rol oynamaktadır. Nitekim literatürde, entegre besin yönetimi stratejilerinin nitrat yıkanmasını azalttığı ve gübre kullanım verimliliğini artırdığı; böylece yeraltı sularındaki nitrat kirliliği riskini düşürdüğü gösterilmiştir (Zhang ve ark., 2020). Benzer şekilde, entegre zararlı yönetimi uygulamalarının kimyasal pestisit kullanımını %30-70 oranında azaltabildiği ve bunun da tarımsal kaynaklı su kirliliğinin azalmasına doğrudan katkı sağladığı bildirilmektedir (Pretty ve Bharucha, 2015). Bu kapsamda, hem gübre hem pestisit yönetiminin bilimsel temelli entegre yaklaşımlarla yürütülmesi, pamuk üretiminde gri su ayak izinin azaltılmasında etkili ve kanıtlanmış yöntemlerdir.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Pamuk üretimi, yeşil-mavi-gri su bileşenlerinin tamamı üzerinde yüksek bir baskı oluşturan stratejik bir tarımsal faaliyettir. Özellikle yarı kurak bölgelerde sulama suyu talebinin yüksek olması, pamuğun mavi su ayak izini büyütme; yanlış gübreleme ve pestisit uygulamaları ise gri su ayak izini artırarak çevresel riskleri derinleştirmektedir. Su ayak izinin büyüklüğü yalnızca kullanılan su miktarına değil, üretim sistemi, sulama yöntemi, toprak yönetimi, besin maddesi uygulamaları ve bölgesel su kıtlığı koşullarına bağlı olarak değişmektedir. Bu nedenle pamuk tarımında su ayak izi, ekolojik sürdürülebilirlik, ekonomik verimlilik ve su kaynaklarının uzun vadeli korunması açısından kritik bir göstergedir.

Pamukta su ayak izinin azaltılmasına yönelik en etkili adımların başında sulama verimliliğinin artırılması gelmektedir. Damla sulama sistemleri, eksik sulama stratejileri ve evapotranspirasyona dayalı sulama planlaması, mavi su tüketimini önemli ölçüde azaltabilmektedir. Toprak yüzeyinin korunması, organik madde takviyesi ve malçlama gibi uygulamalar, buharlaşma kayıplarını düşürerek yeşil suyun daha etkin kullanılmasını sağlamaktadır. Bunun yanında, dengeli gübreleme, entegre besin yönetimi ve entegre zararlı yönetimi gibi uygulamalar, hem verimliliği artırmakta hem de gri su ayak izini düşürerek su kalitesi üzerindeki baskıyı azaltmaktadır. Bölgesel su stresi dikkate alınarak yapılacak üretim planlaması ve drenaj yönetimi ise su kaynaklarının sürdürülebilir kullanımında destekleyici rol oynamaktadır.

Tüm bu değerlendirmeler ışığında, pamuk üretiminde su ayak izinin azaltılması; modern sulama teknolojileri, toprak-su koruma uygulamaları, doğru girdi yönetimi ve bölgesel su planlamasının birlikte ele alındığı bütüncül bir yaklaşım gerektirir. Bu stratejilerin yaygınlaştırılması, hem üretici gelirlerinin korunmasına hem de su kaynaklarının gelecek kuşaklara sürdürülebilir biçimde aktarılmasına katkı sağlayacaktır.

KAYNAKLAR

- Aldaya, M. M., Chapagain, A. K., Hoekstra, A. Y., & Mekonnen, M. M. (2012). The water footprint assessment manual: Setting the global standard. Routledge.
- Bhargavi, B., Blaise, D., & Nalayini, P. (2025). Water footprint, runoff and soil loss assessment of cotton production in central India. *Cleaner Water*, 100119.
- Cao, X., Zeng, W., Wu, M., Li, T., Chen, S., & Wang, W. (2021). Water resources efficiency assessment in crop production from the perspective of water footprint. *Journal of Cleaner Production*, 309, 127371.
- Chapagain, A. K., Hoekstra, A. Y., Savenije, H. H., & Gautam, R. (2006). The water footprint of cotton consumption: An assessment of the impact of worldwide consumption of cotton products on the water resources in the cotton producing countries. *Ecological economics*, 60(1), 186-203.
- Çetin, Ö., Üzen, N., Temiz, M. G., & Altunten, H. (2021). Improving cotton yield, water use and net income in different drip irrigation systems using real-time crop evapotranspiration. *Polish Journal of Environmental Studies*, 30(5), 4463-4474.
- 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.
- Dağdelen, N., Gürbüz, T., & Tunalı, S. P. (2019). Response of different cotton cultivars to water stress on water-yield relations under drip irrigation conditions in Aydın plain. *Derim*, 36:1, 64-72.
- Demeke, B. W., Rathore, L. S., Mekonnen, M. M., & Liu, W. (2024). Spatiotemporal dynamics of the water footprint and virtual water trade in global cotton production and trade. *Cleaner Production Letters*, 7, 100074.

- Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü. DSI (2025). Toprak ve su kaynakları. Erişim adresi: <https://www.dsi.gov.tr/Sayfa/Detay/754>
- EJF (2012) The true costs of cotton: cotton production and water insecurity. Environmental Justice Foundation, London. https://ejfoundation.org/resources/downloads/EJF_Aral_report_cotton_net_ok.pdf?utm
- El-Beltagi, H. S., Basit, A., Mohamed, H. I., Ali, I., Ullah, S., Kamel, E. A., ... & Ghazzawy, H. S. (2022). Mulching as a sustainable water and soil saving practice in agriculture: A review. *Agronomy*, 12(8), 1881.
- Esetlili, M. T., Serbeş, Z. A., Çolak Esetlili, B., Kurucu, Y., & Delibacak, S. (2022). Determination of water footprint for the cotton and maize production in the Küçük Menderes Basin. *Water*, 14(21), 3427.
- Evans, R. G., & Sadler, E. J. (2008). Methods and technologies to improve efficiency of water use. *Water resources research*, 44(7).
- Falkenmark, M., & Rockström, J. (2006). The new blue and green water paradigm: Breaking new ground for water resources planning and management. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 132(3), 129-132.
- FAO (Food and Agriculture Organization). (2023). AQUASTAT - Global Information System on Water and Agriculture. Rome. [Erişilebilir: <https://www.fao.org/aquastat/>]
- Franke, N. A., Boyacioglu, H., & Hoekstra, A. Y. (2013). Grey Water Footprint Accounting: Tier 1 Supporting Guidelines. Water Footprint Network.
- Fu, M., Guo, B., Wang, W., Wang, J., Zhao, L., & Wang, J. (2019). Comprehensive assessment of water footprints and water scarcity pressure for main crops in Shandong Province, China. *Sustainability*, 11(7), 1856.
- Hoekstra, A. Y., Chapagain, A. K., Aldaya, M. M., & Mekonnen, M. M. (2011). *The Water Footprint Assessment Manual: Setting the Global Standard*.

- Earthscan, London.
<https://www.hydrology.nl/images/docs/dutch/key/TheWaterFootprintAssessmentManual.pdf>
- Hoekstra, A. Y. (2016). A critique on the water-scarcity weighted water footprint in LCA. *Ecological indicators*, 66, 564-573.
- Hoekstra, A. Y. (2017). Water footprint assessment: evolvement of a new research field. *Water Resources Management*, 31(10), 3061-3081.
- Hoekstra, A. Y. (2019). *The Water Footprint of Modern Consumer Society*. Routledge.
- Hussein, F., Janat, M., & Yakoub, A. (2011). Assessment of yield and water use efficiency of drip-irrigated cotton (*Gossypium hirsutum* L.) as affected by deficit irrigation. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, 35(6), 611-621.
- Jans, Y., von Bloh, W., Schaphoff, S., & Müller, C. (2021). Global cotton production under climate change—Implications for yield and water consumption. *Hydrology and earth system sciences*, 25(4), 2027-2044.
- Khan, M. A., Wahid, A., Ahmad, M., Tahir, M. T., Ahmed, M., Ahmad, S., & Hasanuzzaman, M. (2020). World cotton production and consumption: An overview. *Cotton production and uses: Agronomy, crop protection, and postharvest technologies*, 1-7.
- Khan, Y., & Ali, Y. (2024). Analysis of water footprint and sustainability of the cotton supply chain in Pakistan. *Water Conservation Science and Engineering*, 9(1), 18.
- Ingrao, C., Strippoli, R., Lagioia, G., & Huisingsh, D. (2023). Water scarcity in agriculture: An overview of causes, impacts and approaches for reducing the risks. *Heliyon*, 9(8).
- Li, Q., Huang, W., Wang, J., Zhang, Z., Li, Y., Han, Y., ... & Wang, Z. (2023). Quantitative evaluation of variation and driving factors of the regional

- water footprint for cotton production in China. *Sustainable Production and Consumption*, 35, 684-696.
- Liu, C., Kroeze, C., Hoekstra, A. Y., & Gerbens-Leenes, W. (2012). Past and future trends in grey water footprints of anthropogenic nitrogen and phosphorus inputs to major world rivers. *Ecological Indicators*, 18, 42-49.
- Liu, J., Yang, H., Gosling, S. N., Kummu, M., Flörke, M., Pfister, S., ... & Oki, T. (2017). Water scarcity assessments in the past, present, and future. *Earth's future*, 5(6), 545-559.
- Mekonnen, M. M., & Hoekstra, A. Y. (2011). The green, blue and grey water footprint of crops and derived crop products. *Hydrology and Earth System Sciences*, 15(5), 1577-1600.
- Mekonnen, M. M., & Hoekstra, A. Y. (2014). Water footprint benchmarks for crop production: A first global assessment. *Ecological indicators*, 46, 214-223.
- Mallareddy, M., Thirumalaikumar, R., Balasubramanian, P., Naseeruddin, R., Nithya, N., Mariadoss, A., ... & Vijayakumar, S. (2023). Maximizing water use efficiency in rice farming: A comprehensive review of innovative irrigation management technologies. *Water*, 15(10), 1802.
- Mancosu, N., Snyder, R. L., Kyriakakis, G., & Spano, D. (2015). Water scarcity and future challenges for food production. *Water*, 7(3), 975-992.
- 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.
- Onwuka, B. M., & Uzoma, K. C. (2018). Effects of organic mulch materials on soil surface evaporation. *Notulae Scientia Biologicae*, 10(3), 387-391.
- Pretty, J., & Bharucha, P. Z. (2015). Integrated pest management for sustainable intensification of agriculture in Asia and Africa. *Insects*, 6(1), 152-182.

- Rafiei Sardooi, E., Bazrafshan, O., & Jamshidi, S. (2024). Modeling the water security in a watershed using the water footprint concept and water scarcity indicators. *Water Supply*, 24(1), 235-253.
- Ramamurthy, V., Patil, N. G., Venugopalan, M. V., & Challa, O. (2009). Effect of drip irrigation on productivity and water-use efficiency of hybrid cotton (*Gossypium hirsutum*) in Typic Haplusterts. *Indian Journal of Agricultural Sciences*, 79(2), 118.
- Ramos, T. B., Darouich, H., & Pereira, L. S. (2024). Mulching effects on soil evaporation, crop evapotranspiration and crop coefficients: a review aimed at improved irrigation management. *Irrigation Science*, 42(3), 525-539.
- Rockström, J., Karlberg, L., Wani, S. P., Barron, J., Hatibu, N., Oweis, T., ... & Qiang, Z. (2010). Managing water in rainfed agriculture—The need for a paradigm shift. *Agricultural Water Management*, 97(4), 543-550.
- Si, J., Chen, Y., Cheng, L., Tang, Z., & Zhang, Y. (2025). The application of wat
- Sturdy, J. D., Jewitt, G. P., & Lorentz, S. A. (2008). Building an understanding of water use innovation adoption processes through farmer-driven experimentation. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 33(8-13), 859-872.
- Tsakmakis, I. D., Zoidou, M., Gikas, G. D., & Sylaios, G. K. (2018). Impact of irrigation technologies and strategies on cotton water footprint using AquaCrop and CROPWAT models. *Environ Process* 5: 181–199.
- Tunalı, S. P., Gürbüz, T., Dağdelen, N., & Akçay, S. M. (2021). The effects of different irrigation scheduling approaches on seed yield and water use efficiencies of cotton. *Turkish Journal of Agriculture-Food Science and Technology*, 9(8), 1530-1536.
- Umar, U. M., Şen, B., & Ünal, Z. (2025). Determination of Evapotranspiration and Optimum Irrigation Schedule For Cotton in Çukurova Region Using

- CROPWAT Model. Turkish Journal of Agriculture-Food Science and Technology, 13(5), 1146-1151.
- UNESCO World Water Assessment Programme. (2021). The United Nations World Water Development Report 2021: Valuing Water. Paris, UNESCO.
- Xinchun, C., Mengyang, W., Xiangping, G., Yalian, Z., Yan, G., Nan, W., & Weiguang, W. (2017). Assessing water scarcity in agricultural production system based on the generalized water resources and water footprint framework. Science of the Total Environment, 609, 587-597.
- Wang, Q., Huang, K., Liu, H., & Yu, Y. (2023). Factors affecting crop production water footprint: A review and meta-analysis. Sustainable Production and Consumption, 36, 207-216.
- Water Footprint Network. (2023). A guide to reducing the water footprint of cotton cultivation. https://waterfootprint.org/resources/A_guide_to_reduce_water_footprint_of_cotton_cultivation.pdf
- WWF. (2019a). Transforming the textile sector's approach to water. <https://www.wwfguianas.org/?352012%2FTransforming-the-textile-sectors-approach-to-water=&utm>
- WWF. (2019b). The impact of cotton on fresh water resources and ecosystems. https://d2ouvy59p0dg6k.cloudfront.net/downloads/impact_long.pdf
- WWF. (2025a). Drop by Drop: Solving the textile industry's water crisis. <https://www.worldwildlife.org/news/sustainability-works/drop-by-drop-solving-the-textile-industrys-water-crisis>
- WWF. (2025b). Türkiye'de su kaynaklarının güncel durumu. Erişim adresi: https://www.wwf.org.tr/kesfet/tatli_su/turkiyede_su_kaynaklarinin_guncel_durumu/

- Yan, Y., Wang, R., Chen, S., Zhang, Y., & Sun, Q. (2023). Three-dimensional agricultural water scarcity assessment based on water footprint: A study from a humid agricultural area in China. *Science of the total environment*, 857, 159407.
- Zhang, X., Davidson, E. A., Mauzerall, D. L., Searchinger, T. D., Dumas, P., & Shen, Y. (2020). Managing nitrogen for sustainable development. *Nature*, 528, 51–59. <https://www.nature.com/articles/nature15743>
- Zhang, T., Zhai, Y., Ma, X., Shen, X., Bai, Y., Zhang, R., ... & Hong, J. (2021). Towards environmental sustainability: Life cycle assessment-based water footprint analysis on China's cotton production. *Journal of Cleaner Production*, 313, 127925.

BÖLÜM 11

TARIMDA HERBİSİTLERİN KULLANIMI VE İSG UYGULAMALARI

Dr. Öğr. Üyesi Barış KARTAL²²

²² Adıyaman Üniversitesi, Gölbaşı Meslek Yüksekokulu, Mülkiyet Koruma ve Güvenlik Bölümü, İş Sağlığı ve Güvenliği Programı, Adıyaman, Türkiye. bkartal@adiyaman.edu.tr, orcid id: 0000-0002-7227-4647

GİRİŞ

Tarım; dünya genelinde gıda üretiminin sürdürülebilirliğini sağlamasının yanı sıra sanayi sektörüne hammadde temin etmesi, ihracata katkı sunması ve geniş istihdam olanakları yaratması açısından temel sektörlerden biridir. Küresel nüfusun 2050 yılına kadar 9,20 milyara ulaşmasının öngörülmesi, gıda güvenliğinin sağlanabilmesi için tarımsal verimlilikte yaklaşık %70 oranında bir artışı zorunlu kılmaktadır (Kagan, 2016). Bu nüfus artışı, gıda talebini önemli ölçüde artırarak tarımsal üretim ve tarım ürünlerine olan ihtiyacı daha da yükseltmektedir. Bu ekilebilir arazide çiftçiler, yabani otlar, böcekler ve mantar istilaları da dahil olmak üzere çeşitli zorluklarla karşılaşılıyor; bunlardan yabani otlar tarımsal verimlilik için önemli bir engel teşkil ediyor. Tarım arazilerindeki yabani otlar, tarladaki sürelerine bağlı olarak üretimde bir azalmaya yol açıyor. Yabancı otları kontrol etmek için manuel, mekanik ve kimyasal yaklaşımlar gibi farklı yöntemler kullanılmaktadır (Rose vd. 2016). Yabancı otların kontrolü, tarımsal verimliliğin artırılmasında önemli bir rol oynamakta olup, buna bağlı olarak herbisit kullanımında gün geçtikçe artış gözlenmektedir. Şu anda dünya genelinde 4,1 milyon tondan fazla pestisit tüketiliyor; bunun %47,50'si herbisitlere, %29,50'si insektisitlere, %17,50'si fungusitlere ve %5,50'si diğerlerine aittir (Sharma vd.,2019). Tarım kimyasalları üretimindeki ve tüketimindeki bu artış, özellikle 19. yüzyılın sonlarında tarım ve sanayi sektörleri de dahil olmak üzere güçlü ekonomik genişlemeden kaynaklanmaktadır. Herbisitler, mahsul verimini artırmada ve gıda güvenliğini sağlamada önemli rol oynamalarına rağmen, bu tehlikeli bileşiklerin çeşitli çevresel ortamlarda bulunması nedeniyle insan ve çevre sağlığı için önemli riskler oluşturmaktadır (Fernandes vd.,2020).

Tarımsal faaliyetler kapsamında kullanılan kimyasal maddeler, özellikle pestisitler ve gübreler, çalışanlar açısından önemli iş sağlığı ve güvenliği riskleri oluşturmaktadır. Tarım sektöründe iş yeri ile yaşam alanının iç içe olması, kimyasallara yalnızca çalışanların değil, aile bireylerinin de

maruz kalmasına neden olmaktadır. Kimyasal uygulamaların büyük ölçüde açık alanlarda ve çoğu zaman kişisel koruyucu donanım kullanılmadan gerçekleştirilmesi, maruziyet riskini artırmaktadır. Mevsimlik ve kayıt dışı istihdamın yaygınlığı, çalışanların sağlık gözetimi ve eğitim hizmetlerine erişimini sınırlamaktadır. Pestisitlerin satış ve kullanımının yeterince denetlenememesi, uygunsuz dozlama ve bilinçsiz uygulamaları beraberinde getirmektedir. Temiz su, elektrik ve hijyen koşullarına erişimde yaşanan güçlükler, kimyasal maruziyetin etkilerini daha da ağırlaştırmaktadır (Yurdulu vd.,2015). Ayrıca, tarımda iş sağlığı ve güvenliği mevzuatının yetersizliği veya uygulamadaki aksaklıklar, risklerin etkin biçimde yönetilmesini zorlaştırmaktadır. Tüm bu unsurlar, tarımsal kimyasalların güvenli kullanımına yönelik bütüncül ve sürdürülebilir İSG politikalarının gerekliliğini ortaya koymaktadır (Donham ve Thelin, 2006).

Tarımda Kullanılan Pestisitler

Pestisit kavramı, Birleşmiş Milletler Gıda ve Tarım Örgütü (FAO) tarafından geniş bir çerçevede tanımlanmış olup, bu tanım pestisitlerin tarımsal üretimden depolama ve taşımaya kadar uzanan çok yönlü kullanım alanlarını kapsamaktadır. FAO'nun tanımına göre pestisitler; “insan veya hayvanlarda oluşabilecek hastalıkları taşıyıcı; gıdaların, tarımsal ürünlerin, ahşap ve ahşap ürünlerinin veya hayvan yemlerinin üretimi, işlenmesi, taşınması, depolanması ve/veya pazarlanması sırasında bu uygulamaları olumsuz etkileyecek her türlü zararlıların önlenmesi, yok edilmesi veya kontrol altına alınması amacıyla veya hayvanlar üzerinde veya vücutlarında bulunabilecek zararlıların kontrol altına alınması amacıyla kullanılan maddelerdir. Bu tanım, ayrıca bitki büyümesini düzenleyici, yaprak dökücü, kurutucu veya meyve seyreltici veya ham meyvelerin dökülmesini önleyici etkenleri ve depolanma ve taşınma sırasında ticari malların bozulmasını önlemek amacıyla hasat öncesi ve sonrası ürüne uygulanan maddeleri de kapsamaktadır.” (FAO, 2002).

Pestisit, kimyasal bir madde, virüs ya da bakteri gibi biyolojik bir ajan, antimikrobik, dezenfektan veya herhangi bir araç olabilir (Altıkat vd.,2009). Pestisit deyimi, algisit (alg öldürücü), avisit (kuş öldürücü), bakterisit (bakteri öldürücü), fungusit (mantar öldürücü), herbisit (yabancı ot öldürücü), insektisit (böcek öldürücü; ovisit (yumurta öldürücü), larvisit (larva öldürücü), adultisit (erişkin öldürücü)), akarisit (akar öldürücü), molluskisit (sümüklüböcek ve salyangoz öldürücü), nematisit (nematod öldürücü), rodentisit (kemirgen öldürücü) ve virüsit (virüs öldürücü) şeklinde sıralanabilecek kimyasalların tümünü kapsamaktadır (EPA, 2009).

Tablo 1: Tarım alanlarında en sık kullanılan herbisitler (Pervan ve vd.,2025)

Kimyasal Sınıf	Herbisitler	Tarım Ürünleri
Organofosfor	Glifosat	Mısır, soya fasulyesi, buğday, pamuk
Fenoksi Asit	2,4-D, MCPA	Pirinç, buğday, keten tohumu
Triazin	Atrazin, Simazin	Buğday, mısır, kanola, patates, fasulye
Bipiridilyumlar	Paraquat, Diquat	Kanola, patates, baklagiller
Üre	Diuron	Pamuk, şeker kamışı, yonca, buğday
Kloroasetamid	Dimetenamid-P, Propanil, Asetoklor, S- Metolaklor, Alachlor, Metazaklor	Pirinç, soya fasulyesi, kanola, pamuk, mısır, bezelye
Dinitroanilin	Pendimethalin, Trifluralin	Pirinç, buğday, kanola, bezelye, lahana, havuç

Benzoik asit	Dicamba	Mısır, soya fasulyesi, küçük taneli tahıllar
Sülfonilüre	Metsülfuron metil, Klorsülfuron, Tifensülfuron	Buğday, pirinç, mısır
Pirazol	Piroksasülfon	Mısır, bezelye, ayçiçeği, soya fasulyesi
Tiyokarbamat	Prosülfokarb, EPTC	Buğday, arpa, patates

Türkiye’de Pestisitlerin Yönetimine İlişkin Yasal ve İdari Düzenlemeler

FAO tarafından 2023 yılında yayımlanan verilere göre, Türkiye’de birim tarım alanı başına düşen pestisit kullanım miktarının dünya ortalamasına yakın olduğu, ancak Avrupa Birliği ülkeleri için bildirilen ortalama değerlerin bir miktar altında kaldığı görülmektedir. Buna karşılık, kişi başına düşen pestisit kullanımının dünya ortalamasının üzerinde olduğu ve Avrupa Birliği ülkeleriyle benzer seviyelerde seyrettiği anlaşılmaktadır (Hanedar vd.,2023).

Türkiye’de bitki koruma ürünleri (BKÜ), zirai mücadele alet ve makineleri ile bunların üretim tesislerine yönelik onay ve denetim faaliyetleri; söz konusu ürünlerin depolanması, satışı, ithalatı ve dağıtımına ilişkin düzenlemelerin hazırlanması ve uygulanması; piyasaya arz süreçlerine dair usul ve esasların belirlenmesi; ilgili istatistiksel verilerin toplanması ve analiz edilmesi; eğitim faaliyetlerinin yürütülmesi; mevzuatın hazırlanması; üretime yönelik planlamaların yapılması ve BKÜ denemelerini gerçekleştirecek kişi ve kuruluşlara yetkilendirme belgelerinin verilmesi, Tarım ve Orman Bakanlığı Gıda ve Kontrol Genel Müdürlüğü bünyesindeki Bitki Koruma Ürünleri Daire Başkanlığı tarafından yürütülmektedir (Tarım ve Orman Bakanlığı, 2023).

Tablo 2: Ülkemizde pestisit yönetimiyle ilgili mevzuat (Hanedar vd.,2023).

Mevzuat Adı	Tarih Bilgisi	Kapsam/Amaç
Bitki Koruma Ürünlerinin Sınıflandırılması, Ambalajlanması ve Etiketlenmesi Hakkında Yönetmelik	(Resmî Gazete: 2 5.03.2011-27885)	Bitki koruma ürünlerinin sınıflandırılması, ambalajlanması ve etiketlenmesi ile insan sağlığı ve çevrenin korunması
Bitki Koruma Ürünleri Kontrol Yönetmeliği	(Resmî Gazete: 20.05.2011- 27939)	Ruhsatlı bitki koruma ürünlerinin üretim, ithalat ve kullanım aşamalarında kontrolü
Bitki Koruma Ürünü Üretim Yerleri Usul ve Esasları Hakkında Yönetmelik	(Resmî Gazete: 06.07.2011- 27986)	Bitki koruma ürünü ve teknik madde üreten tesislerin izin, denetim ve teknik şartları
Bitki Koruma Ürünlerinin Önerilmesi, Uygulanması ve Kayıt İşlemleri Hakkında Yönetmelik	(Resmî Gazete: 03.12.2014- 29194)	Zirai mücadelede ürünlerin önerilmesi, uygulanması ve kayıt altına alınması
Bitki Koruma Ürünlerinin Ruhsatlandırılması ve Piyasaya Arzı Hakkında Yönetmelik	(Resmî Gazete: 09.11.2017- 30235)	Bitki koruma ürünlerinin ruhsatlandırılması ve piyasaya sunulması

Bitki Koruma Ürünleri ile İlgili Yapılacak Denemeler Hakkında Yönetmelik	(Resmî Gazete: 09.11.2017-30235)	Biyolojik etkinlik, kalıntı, toksikolojik ve ekotoksikolojik denemeler
Bitki Koruma Ürünleri ile Bitki Koruma Ürünü Hammaddelerinin İthalatı Hakkında Yönetmelik	(Resmî Gazete: 14.12.2018-30625)	Bitki koruma ürünleri ve hammaddelerinin ithalat izinleri ve kontrolleri
Bitki Koruma Ürünlerinin Toptan ve Perakende Satılması ile Depolanması Hakkında Yönetmelik	(Resmî Gazete: 13.02.2019-30685)	Bitki koruma ürünlerinin satış ve depolama esasları
İnsansız Hava Aracı Sistemlerinin Zirai Mücadelede Kullanılmasına İlişkin Yönerge	(Yönerge No: 3841017)	İHA'ların zirai mücadelede bitki koruma ürünü uygulamalarında kullanımı
Bitki Koruma Ürünü ile Hammaddelerinin İthalat İznine Esas Kontrollerine İlişkin Uygulama Talimatı	(Talimat No: 7360368)	İthalatta numune alma, analiz ve fiziksel kontroller

Bitki	Koruma Ürünü	(Talimat No:	Biyolojik mücadele
Olarak Kullanılan		137477)	etmenlerinin ithalat
Biyolojik			usul ve esasları
Mücadele			
Etmenlerinin			
İthalatı Hakkında			
Talimat			

HERBİSİTLERİN SAĞLIK VE ÇEVRE ÜZERİNE ETKİLERİ

Herbisitlerin İnsan Sağlığı Üzerindeki Akut ve Kronik Etkileri

Herbisit maruziyetinin insan sağlığı üzerindeki etkisi, herbisit türü, dozaj, maruz kalma yolları ve maruz kalma süresi gibi faktörlerden etkilenir (Marin vd.,2013). Herbisitlere maruz kalma, tarım alanlarında doğrudan temas ve solunum yoluyla veya dolaylı olarak kirlenmiş yiyecek ve su tüketimi yoluyla gerçekleşebilir (Anderson ve Meade.,2014), bu da akut ve kronik sağlık etkilerine yol açar (Tablo 3). Herbisitlere uzun süreli maruz kalma, farklı kanser türlerine, nörodejeneratif bozukluklara, gelişimsel ve üreme değişikliklerine ve solunum sistemi etkilerine neden olabilir. Örneğin, glifosat bazlı herbisitlerin endokrin bozukluğu, karaciğer ve böbrek hasarı, DNA hasarı, üreme sorunları ve çeşitli nörodejeneratif bozukluklarla ilişkilendirildiği görülmüştür (Thongprakaisang vd.,2013). Su ve tarım ürünlerinde bulunan glifosat ve metaboliti AMPA kalıntıları insanlar tarafından tüketilir ve idrar yoluyla atılır (Maheswari ve Ramesh.,2019). Benzer şekilde, içme suyundaki atrazin herbisit kirliliğinin kadınlarda meme kanseri riskinin artması, kırsal kesimdeki erkeklerde sperm sayısının azalması ve çocuklarda doğum ağırlığının düşmesiyle bağlantılı olduğu görülmüştür (Sankhla vd.,2018).

Tablo 3: Herbisitlere maruz kalma sonucu insanlarda ortaya çıkan kronik hastalıklar (Pervan vd.,2025)

Herbisit	Kronik Hastalıklar	Belirtiler ve Semptomlar
2,4-D	Solunum yolu kanserleri, safra kesesi kanseri ve pankreas kanseri	Kronik öksürük, göğüs ağrısı, ateş, kilo kaybı ve yorgunluk, burun ve göğüste his, nefes darlığı, iştahsızlık, karın ağrısı ve krampları, kilo kaybı, kaşıntılı cilt, sarılık, karında kitle, koyu renkli idrar, kan pıhtıları
Glifosat	Meme kanseri	Meme kitlesi, meme ağrısı, meme ucu anormallikleri, meme derisi anormallikleri, meme şişmesi, meme enfeksiyonu veya iltihabı, memenin boyutunda veya şeklinde değişiklik
Pendimetalin	Rektum kanseri, pankreas kanseri ve akciğer kanseri	Karın ağrısı, dışkıda koyu bordo veya parlak kırmızı kan, kabızlık, ishal, ince dışkı gibi bağırsak alışkanlıklarında değişiklik, açıklanamayan kilo kaybı, koyu renkli idrar, kan pıhtıları, kronik öksürük, göğüs ağrısı, ateş, kilo kaybı ve yorgunluk, nazofarenks ve göğüste his, nefes darlığı

EPTC	Lösemi, kolon kanseri	Ateş, yorgunluk, halsizlik, şişmiş lenf bezleri, kanama, kas-iskelet ağrısı veya fonksiyon bozukluğu, sık veya şiddetli enfeksiyonlar, karın ağrısı, ishal, kabızlık gibi bağırsak alışkanlıklarında değişiklik, dışkıda koyu bordo veya parlak kırmızı kan, dar dışkı, açıklanamayan kilo kaybı, halsizlik veya yorgunluk
Trifluralin	Kolon kanseri	Karın ağrısı, dışkıda parlak kırmızı kan, kabızlık, ishal, ince dışkı gibi bağırsak alışkanlıklarında değişiklik, açıklanamayan kilo kaybı, halsizlik veya yorgunluk
Simazin	Prostat kanseri	Sık idrara çıkma, idrar yapmada zorluk, idrarda kan, idrar akışında bozukluk, ateş, baş ağrısı, karında kitle, alt karın ağrısı, bağırsak alışkanlıklarında değişiklik, yorgunluk, sırt, kalça, uyluk, omuz veya diğer kemiklerde ağrı, açıklanamayan kilo kaybı

Dicamba	Kolon kanseri ve akciğer kanseri	Karın ağrısı, ishal, kabızlık, dışkıda parlak kırmızı kan, ince dışkı, açıklanamayan kilo kaybı, halsizlik veya yorgunluk gibi bağırsak alışkanlıklarında değişiklik; kronik öksürük, göğüs ağrısı, ateş, nazofarenks ve göğüste his, nefes darlığı
Metolachlor	Akciğer kanseri	Kronik öksürük, göğüs ağrısı, ateş, kilo kaybı ve yorgunluk, nazofarenks ve göğüste his kaybı, nefes darlığı, bulantı, kusma, kanlı balgam.
Paraquat	Safra kesesi kanseri, akciğer kanseri ve mide kanseri	İştahsızlık, karın ağrısı ve krampları, kilo kaybı, kaşıntılı cilt, sarılık, karında kitle; kronik öksürük, göğüs ağrısı, ateş, yorgunluk, nazofarenks ve göğüste his, nefes darlığı, hazımsızlık veya küçük öğünlerden sonra tokluk hissi, mide ekşimesi veya hazımsızlık, kanlı veya kansız kusma
İmidazolinon	Mesane kanseri	İştahsızlık, karın ağrısı ve krampları, kilo kaybı, kaşıntılı cilt, sarılık, karında şişlik

Herbisit Kullanımının Çevresel Etkileri

Herbisitlerin sık kullanımı çevrede kalıcı kombinasyonların oluşmasına da katkıda bulunarak bitkilerde, hayvanlarda, insanlarda ve çevresel olarak birden çok yan etkilere yol açabilir (Şekil 1). Herbisitlerin uzun süreli ve yetersiz kullanımının, özellikle toprak ve su ekosistemlerinde olmak üzere, çevrede birikmelerinin sıklıkla nedeni olduğunu bildirmektedir (Bacmaga vd.,2024). Su, toprak ve hava üzerindeki etkileri aşağıdaki gibidir:

Su Üzerindeki Etkisi

Herbisit kullanımı dâhil olmak üzere insan kaynaklı faaliyetler, su ekosistemlerinin bütünlüğü ve biyoçeşitliliği için önemli bir tehdit oluşturmaktadır. Yabancı ot kontrolünde kullanılan herbisitler doğrudan yüzey sularına uygulanabildiği gibi, tarım alanlarından kaynaklanan yüzey akışı ve drenaj yoluyla da sucul ortamlara taşınabilmektedir. *Phragmites australis*, *Hydrilla verticillata*, *Eichornia crassipes* ve *Myriophyllum spicatum* gibi istilacı sucul türlerin kontrolünde glifosat, 2,4-D, pikloram, dikuat ve triklopir yaygın olarak kullanılmaktadır (Hussner vd.,2017). Ormanlık alanlarda yapılan aşırı veya uygunsuz püskürtme uygulamaları, kentsel atıksu arıtma tesisleri, yağmur suyu kanalları ve kentsel yüzey akışları da herbisit kaynaklı su kirliliğine katkıda bulunmaktadır (Kleinhenz vd.,2016). Herbisitler, noktasal ve yaygın kaynaklar aracılığıyla yüzey sularına ulaşmakta ve zamanla yeraltı sularına sızabilmektedir. Sularda en sık tespit edilen herbisit grupları amidler, fenoksi asitler, bipiridiller, üre türevleri, dinitroanilinler, karbamatlar, sülfonilüreler ve urasillerdir.

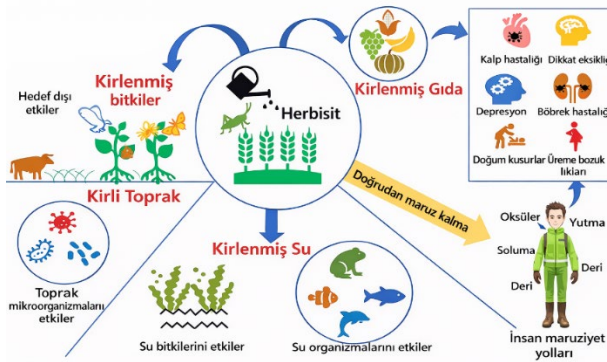
Toprak Üzerindeki Etkisi

Herbisit kullanımındaki artış, ekim alanlarının genişlemesi ve yabancı ot direncinin yaygınlaşmasıyla ilişkilidir ve bu durum daha yüksek dozların veya yeni aktif maddelerin kullanılmasına yol açmaktadır (Bai vd.,2016).

Toprak, herbisit kirliliği açısından en hassas çevresel ortam olup, kimyasal ve biyokimyasal süreçlerin gerçekleştiği temel bir depodur. Toprağa ulaşan herbisitler, canlı organizmaları doğrudan veya dolaylı olarak etkileyebilmekte ve ağır metaller ile birlikte en yaygın toprak kirleticileri arasında yer almaktadır (Wollejko vd,2022). Uygunsuz kullanım ve yetersiz bertaraf uygulamaları, toprakta kalıntı oluşumuna ve biyolojik birikime neden olmaktadır. Ayrıca, toprak ortamında genellikle tek bir aktif madde değil, etkileşim hâlindeki çeşitli herbisit karışımları bulunmaktadır.

Hava Üzerindeki Etkisi

Herbisitlerin havaya karışması, çevresel yayılımın önemli yollarından biridir. Bu durum çoğunlukla püskürtme sırasında oluşan sürüklenme, buharlaşma ve rüzgârla taşınma sonucu meydana gelmektedir. Havadaki herbisit kirliliği, uygulama alanının büyüklüğü ve kullanılan püskürtme teknikleriyle yakından ilişkilidir (Gibbs vd.,2017). Damlacık boyutu, herbisitlerin havadaki hareketini belirleyen temel faktörlerden biridir; küçük damlacıklar daha hızlı buharlaşarak daha geniş alanlara taşınabilmektedir (Zaller vd.,2022).



Şekil 1: Herbisit maruziyetinin insanlarda ve diğer hedef olmayan organizmalarda yol açabileceği potansiyel zararlı etkileri (Pervan vd.,2025).

Herbisit Kullanımının İş Sağlığı ve Güvenliği Açısından Proaktif Yaklaşımla Değerlendirilmesi

Herbisit kalıntılarının insan sağlığı ve çevre üzerindeki olası olumsuz etkilerine ilişkin endişelerin artması, tarım sektöründe daha güvenli ve sürdürülebilir herbisitlerin geliştirilmesini zorunlu kılmaktadır. Özellikle tarımsal üretimde çalışanların herbisitlere doğrudan ve dolaylı maruziyeti, iş sağlığı ve güvenliği açısından önemli bir risk alanı oluşturmaktadır. Bu bağlamda, yalnızca zararın ortaya çıkmasından sonra alınan önlemlere dayalı reaktif yaklaşımlar yerine, riskleri önceden tanımlayan, azaltan ve ortadan kaldırmayı hedefleyen proaktif İSG yaklaşımlarının benimsenmesi büyük önem taşımaktadır.

Güncel araştırmalar, hedef olmayan organizmalara verilen zararı en aza indirirken yabancı otlara özgü etki gösteren herbisitlerin geliştirilmesine odaklanmaktadır. Bu yaklaşım, yabancı ot büyümesinin moleküler ve fizyolojik mekanizmalarının ayrıntılı biçimde anlaşılmasını ve bu süreçleri seçici olarak baskılayan etki mekanizmalarına sahip herbisitlerin tasarlanmasını gerektirmektedir. Enzim inhibitörleri ve reseptör bazlı herbisitler, daha hassas ve kontrollü yabancı ot mücadelesi sunarak çevresel yayılımı ve çalışan maruziyetini azaltma potansiyeline sahiptir. Aynı zamanda, hızla biyolojik olarak parçalanabilen veya toprak partiküllerine güçlü şekilde bağlanarak yeraltı ve yüzey sularına taşınımı sınırlanan herbisitlerin geliştirilmesi, hem çevresel güvenlik hem de mesleki maruziyetin azaltılması açısından kritik bir proaktif önlem olarak değerlendirilmektedir.

İş sağlığı ve güvenliği perspektifinden bakıldığında, seçici herbisitlerin geliştirilmesi yalnızca tarımsal verimlilik açısından değil, aynı zamanda çalışanların kimyasal maruziyetini azaltmak bakımından da stratejik bir öneme sahiptir. Ürünlere zarar vermeden yabancı otları kontrol edebilen yüksek seçiciliğe sahip herbisitler, uygulama sıklığını ve kullanılan kimyasal miktarını düşürerek risk maruziyetinin kaynağında kontrol edilmesine katkı

sağlamaktadır. Bu doğrultuda, herbisitlere dayanıklı bitki çeşitlerinin geliştirilmesi veya ekinler ile yabancı otlar arasındaki biyolojik ve fizyolojik farklılıklardan yararlanan uygulamaların yaygınlaştırılması, proaktif risk yönetiminin önemli bileşenleri arasında yer almaktadır.

Herbisit direnci, hem tarımsal üretim hem de İSG açısından giderek büyüyen bir sorun olarak öne çıkmaktadır. Yenilikçi etki mekanizmalarına sahip herbisitlerin geliştirilmesi, direnç gelişimini önlemek ve kontrol altına almak açısından kritik bir gerekliliktir. Güncel araştırmalar, yabancı otlarda yeni hedef bölgelerin belirlenmesi, temel metabolik ve hücrel süreçleri bozan bileşiklerin geliştirilmesi ve bu kapsamda doğal ürünler, biyolojik bazlı herbisitler ve bitki özütlerinin değerlendirilmesi üzerine yoğunlaşmaktadır. Bu tür alternatiflerin geliştirilmesi, sentetik kimyasallara bağımlılığı azaltarak çalışanlar ve çevre için daha güvenli bir üretim ortamı oluşturma potansiyeli taşımaktadır.

Bununla birlikte, farklı etki mekanizmalarına sahip herbisitlerin birlikte kullanılması, direnç yönetimi açısından avantaj sağlasa da, hedef olmayan organizmalar ve ekosistemler üzerindeki olası sinerjik veya katkısız etkilerin dikkatle değerlendirilmesini zorunlu kılmaktadır. Proaktif İSG yaklaşımı, bu tür risklerin piyasaya sunum öncesinde kapsamlı biçimde analiz edilmesini, çevresel ve mesleki etkilerin bütüncül bir risk değerlendirme çerçevesinde ele alınmasını gerektirir. Toprak sağlığı, su kalitesi, faydalı organizmalar ve ekosistem hizmetleri üzerindeki etkilerin sistematik biçimde izlenmesi, güvenli kullanımın temelini oluşturmaktadır.

Yeni herbisitlerin geliştirilmesinin ötesinde, sürdürülebilir yabancı ot yönetimi stratejilerinin benimsenmesi, iş sağlığı ve güvenliği açısından uzun vadeli ve kalıcı çözümler sunmaktadır. Entegre Yabancı Ot Yönetimi (IWM) yaklaşımları; kültürel, mekanik, biyolojik ve kimyasal yöntemlerin bir arada ve dengeli biçimde kullanılmasını öngörerek herbisit kullanımını optimize etmekte ve gereksiz maruziyetleri azaltmaktadır. Uzaktan algılama

teknolojileri, dronlar, karar destek sistemleri ve değişken oranlı uygulamalar gibi dijital tarım araçları, hedefli ve kontrollü herbisit uygulamalarını mümkün kılarak hem çevresel yükü hem de çalışan risklerini azaltmaktadır.

İSG açısından proaktif yaklaşımın bir diğer temel bileşeni, eğitim ve farkındalık faaliyetleridir. Herbisitlerin güvenli kullanımı, doğru dozlama, uygun kişisel koruyucu donanım kullanımı ve atık yönetimi konularında çiftçilerin ve tarım çalışanlarının bilinçlendirilmesi, risklerin önlenmesinde hayati rol oynamaktadır. Kamu kurumları, düzenleyici otoriteler, tarım örgütleri ve halk sağlığı kuruluşları arasındaki iş birliği, güvenilir ve erişilebilir bilginin yaygınlaştırılmasını sağlayarak güvenli uygulamaların benimsenmesini desteklemektedir.

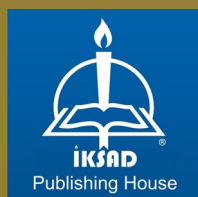
Sonuç olarak, herbisit kullanımına ilişkin iş sağlığı ve güvenliği sorunları, yalnızca mevzuat ve denetim mekanizmalarıyla değil; bilimsel araştırmalar, teknolojik yenilikler, eğitim ve sürdürülebilir tarım politikalarının entegrasyonu ile ele alınmalıdır. Proaktif İSG yaklaşımı, risklerin kaynağında kontrol edilmesini, maruziyetin azaltılmasını ve uzun vadede hem çalışan sağlığını hem de çevresel sürdürülebilirliği güvence altına almayı amaçlayan bütüncül bir strateji sunmaktadır.

KAYNAKÇA

- Altıkat, A., Turan, T., Torun, F. E., & Bingöl, Z. (2009). Türkiye’de pestisit kullanımı ve çevreye olan etkileri. Atatürk Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi, 40(2), 87–92.
- Anderson, S. E., & Meade, B. J. (2014). Potential health effects associated with dermal exposure to occupational chemicals. Environmental Health Insights, 8, S15258.
- Baémaga, M., Wyszowska, J., & Kucharski, J. (2024). Environmental implication of herbicide use. Molecules, 29(24), 5965.
- Bai, S. H., & Ogbourne, S. M. (2016). Glyphosate: Environmental contamination, toxicity and potential risks to human health via food contamination. Environmental Science and Pollution Research, 23, 18988–19001.
- Donham, K. J., & Thelin, A. (2006). Agricultural medicine: Occupational and environmental health for the health professions. Blackwell Publishing.
- EPA (Environmental Protection Agency). (2009). Types of pesticides. Washington, DC, USA. <http://www.epa.gov/pesticides/about/types.htm>
- FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations). (2002). International code of conduct on the distribution and use of pesticides. Fernandes, C. L. F., Volcão, L. M., Ramires, P. F., De Moura, R. R., & Júnior,
- F. M. R. D. S. (2020). Distribution of pesticides in agricultural and urban soils of Brazil: A critical review. Environmental Science: Processes & Impacts, 22, 256–270.
- Gibbs, J. L., Yost, M. G., Negrete, M., & Fenske, R. A. (2017). Passive sampling for indoor and outdoor exposures to chlorpyrifos, azinphos methyl, and oxygen analogs in a rural agricultural community. Environmental Health Perspectives, 125, 333–341.

- Hanedar, A., Tanık, A., & Girgin, E. (2023). Yeşil Mutabakat kapsamında pestisit yönetimi ve Türkiye. *Çevre İklim ve Sürdürülebilirlik*, 24(2), 87–96.
- Hussner, A., Stiers, I., Verhofstad, M. J. J. M., Bakker, E. S., Grutters, B. M. C., Haury, J., van Valkenburg, J. L. C. H., Brundu, G., Newman, J., & Clayton, J. S. (2017). Management and control methods of invasive alien freshwater aquatic plants: A review. *Aquatic Botany*, 136, 112–137.
- Kagan, C. R. (2016). At the nexus of food security and safety: Opportunities for nanoscience and nanotechnology. *ACS Nano*, 10, 2985–2986.
- Kleinhenz, L. S., Nugegoda, D., Verspaandonk, E. R., Coombes, D. C., Howe, S., & Shimeta, J. (2016). Toxicity of an herbicide and adjuvant to saltmarsh invertebrates in the management of invasive grass: Comparative laboratory and field tests. *Marine Pollution Bulletin*, 109, 334–343.
- Maheswari, S., & Ramesh, A. (2019). Fate and persistence of herbicide residues in India. In *Herbicide residue research in India* (pp. 1–27). Springer.
- Marin-Morales, M. A., Ventura-Camargo, B., & Hoshina, M. M. (2013). Toxicity of herbicides: Impact on aquatic and soil biota and human health. In *Herbicides* (pp. 399–443). InTech.
- Parven, A., Meftaul, I. M., Venkateswarlu, K., & Megharaj, M. (2025). Herbicides in modern sustainable agriculture: Environmental fate, ecological implications, and human health concerns. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 22(2), 1181–1202.
- Sankhla, M. S., Kumari, M., Sharma, K., Kushwah, R. S., & Kumar, R. (2018). Water contamination through pesticide and their toxic effect on human health. *International Journal of Research in Applied Science & Engineering Technology*, 6, 967–970.

- Sharma, A., Kumar, V., Shahzad, B., Tanveer, M., Sidhu, G. P. S., Handa, N., Kohli, S. K., Yadav, P., Bali, A. S., & Parihar, R. D. (2019a). Worldwide pesticide usage and its impacts on ecosystem. *SN Applied Sciences*, 1, 1–16.
- Tarım ve Orman Bakanlığı. (2023). Gıda ve Kontrol Genel Müdürlüğü. <https://www.tarimorman.gov.tr/GKGM>
- Thongprakaisang, S., Thiantanawat, A., Rangkadilok, N., Suriyo, T., & Satayavivad, J. (2013). Glyphosate induces human breast cancer cells growth via estrogen receptors. *Food and Chemical Toxicology*, 59, 129–136.
- Wolejko, E., Wydro, U., Odziejewicz, J. I., Koronkiewicz, A., & Jabłońska-Trypuć, A. (2022). Biomonitoring of soil contaminated with herbicides. *Water*, 14, 1534.
- Yurtlu, Y. B., Öz, E., Alayunt, F. N., Çakmak, B., & Şimşek, Z. (2015). Tarımda iş güvenliği ve sağlığı. *Türkiye Ziraat Mühendisliği VIII. Teknik Kongresi Bildiriler Kitabı* (Cilt 2, ss. 1435–1454).
- Zaller, J. G., Kruse-Plaß, M., Schlechtriemen, U., Gruber, E., Peer, M., Nadeem, I., Formayer, H., Hutter, H.-P., & Landler, L.



ISBN: 978-625-378-550-5