

TARIMSAL VERİMLİLİĞİ KISITLAYAN SORUNLARLA MÜCADELE YÖNTEMLERİ-1



EDİTÖRLER

DOÇ. DR. ABDURRAHİM YILMAZ

ÖĞR. GÖR. DR. HİLAL YILMAZ

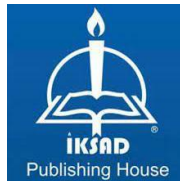
TARIMSAL VERİMLİLİĞİ KISITLAYAN SORUNLARLA MÜCADELE YÖNTEMLERİ 1

EDİTÖRLER

Doç. Dr. Abdurrahim YILMAZ
Öğr. Gör. Dr. Hilal YILMAZ

YAZARLAR

Prof. Dr. Ferhad MURADOĞLU
Prof. Dr. Mevlüt KARAOĞLU
Prof. Dr. Müttalip GÜNDOĞDU
Prof. Dr. Turan KARADENİZ
Prof. Dr. Vahdettin ÇİFTÇİ
Doç. Dr. Abdurrahim YILMAZ
Doç. Dr. Adnan AYDIN
Doç. Dr. Emrah GÜLER
Dr. Öğr. Üyesi Elif COŞKUN DAĞGEÇEN
Dr. Öğr. Üyesi Fatih DEMİREL
Dr. Öğr. Üyesi Metin KOÇAK
Dr. Öğr. Üyesi Sibel BOYSAN CANAL
Öğr. Gör. Dr. Hilal YILMAZ
Dr. Alaaddin ÖZDEMİR
Dr. Esra BULUNUZ PALAZ
Dr. Sümeyye ADALI
Araş. Gör. Leyla KURGAN
Araş. Gör. Sibel TURAN SİRKE
Arş. Gör. Yusuf Talha İÇOĞLU
Doktora Öğrencisi Nida BAYHAN



Copyright © 2024 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 – 2024©

ISBN: 978-625-378-030-2

Cover Design: Abdurrahim YILMAZ

December / 2024

Ankara / Türkiye

Size: 16x24cm

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ.....1

BÖLÜM 1

ALKALİ TOPRAK KOŞULLARINDA DEMİR VE ÇİNKO BİYİYARARLANIMINI ARTIRMAYA YÖNELİK YAPRAK GÜBRELEMESİ UYGULAMA STRATEJİLERİ

Öğr. Gör. Dr. Hilal YILMAZ

Prof. Dr. Vahdettin ÇİFTÇİ.....3

BÖLÜM 2

BİTKİLERDE BAZI ABİYOTİK STRES FAKTÖRLERİ İLE MÜCADELEDE *İN VİTRO* SELEKSİYON

Dr. Sümeyye ADALI

Dr. Alaaddin ÖZDEMİR

Dr. Esra BULUNUZ PALAZ.....21

BÖLÜM 3

BİYOSTİMÜLANTLAR VE ABİYOTİK STRES KOŞULLARINDAKİ ETKİLERİ

Dr. Öğr. Üyesi Sibel BOYSAN CANAL.....43

BÖLÜM 4

TOPRAK MİKROBİYOMUNUN TARIMSAL SÜRDÜRÜLEBİLİRLİKTEKİ GÜCÜ: EKOSİSTEM DESTEĞİ VE İKLİM DEĞİŞİKLİĞİNE KARŞI DAYANIKLILIK

Dr. Öğr. Üyesi Elif COŞKUN DAĞGEÇEN.....61

BÖLÜM 5

SERT KABUKLU MEYVELERDE VERİMLİĞİ SINIRLAYAN FAKTÖRLER

Doç. Dr. Emrah GÜLER

Prof. Dr. Turan KARADENİZ

Prof. Dr. Ferhad MURADOĞLU.....93

BÖLÜM 6

TIBBİ VE AROMATİK BİTKİLERDE SÜRDÜRÜLEBİLİR ÜRETİM İÇİN AMF VE PGPR UYGULAMALARI

Doç. Dr. Abdurrahim YILMAZ

Prof. Dr. Vahdettin ÇİFTÇİ.....167

BÖLÜM 7
İNSEKTİSİT ÖZELLİĞİ GÖSTEREN
SEKONDER METABOLİTLER

Araş. Gör. Sibel TURAN SİRKE
Dr. Öğr. Üyesi Metin KOÇAK.....189

BÖLÜM 8
BİTKİ TRANSPOSABLE ELEMENTLERİNİN
EPİGENİK İLE İLİŞKİSİ

Araş. Gör. Leyla KURGAN
Dr. Öğr. Üyesi Fatih DEMİREL
Doç. Dr. Adnan AYDIN.....205

BÖLÜM 9
DOKU KÜLTÜRÜ İLE MEYVE FİDANI ÜRETİMİNDE
FİZYOLOJİK PROBLEM:
VİTRİFİKASYON VE OLASI NEDENLERİ

Doktora Öğrencisi Nida BAYHAN
Prof. Dr. Müttalip GÜNDOĞDU.....231

BÖLÜM 10
KANATLILARIN BESLENMESİNDE VERİMİ KISITLAYAN
YEM ÖGELERİ: ANTİNUTRİSYONEL FAKTÖRLER

Arş. Gör. Yusuf Talha İÇOĞLU
Prof. Dr. Mevlüt KARAOĞLU.....265

ÖNSÖZ

Tarım sektörü, insanlık tarihinin en temel ve hayati faaliyetlerinden biri olarak, güvenli gıda arzı ve ekonomik kalkınma için kritik bir öneme sahiptir. Ancak, tarımsal verimliliği sınırlayan çok sayıda sorun, sektörün sürekliliği ve geleceği için çözüm arayışlarını zaruri hale getirmektedir. *Tarımsal Verimliliği Kısıtlayan Sorunlarla Mücadele Yöntemleri - 1*, bu sorunlara bilimsel bir perspektiften yaklaşan, yenilikçi ve çözüm odaklı bir eser olarak hayata geçirilmiştir.

Bu kitap, alkalilik koşullarında demir ve çinko biyoyararlanımını artırmaya yönelik yaprak gübrelemesi stratejileri, abiyotik streslerle mücadelede biyostimülant uygulamaları ve *in vitro* seleksiyon yöntemleri gibi başlıkların yanı sıra, sert kabuklu meyvelerde verimliliği sınırlayan faktörler ile doku kültürüyle fidan üretiminde karşılaşılan fizyolojik problemleri ele almaktadır. Toprak mikrobiyomunun ekosistem desteği, iklim değişikliğine dayanıklılık ve tarımsal sürdürülebilirlikteki gücüne odaklanırken, tıbbi ve aromatik bitkilerde sürdürülebilir üretim yaklaşımları ile sekonder metabolitlerin insektisit potansiyelleri de kapsamlı bir şekilde incelenmiştir. Ayrıca, bitki transposable elementlerinin epigenetik ile ilişkisi ve kanatlı hayvanların beslenmesinde verimi kısıtlayan antinutrisyonel faktörler gibi konular da kitapta yer almaktadır.

Alanlarında uzman akademisyenlerin katkılarıyla hazırlanan bu bölümler, teorik bilginin uygulamayla buluştuğu çalışmalar olarak öne çıkmaktadır. Bunun yanı sıra, tarımsal sürekliliğin güvence altına

alınması ve gelecek nesillere daha verimli bir tarımsal altyapının devredilmesi için çok disiplinli bir yaklaşım benimsenmiştir.

Bilimsel literatüre önemli bir katkı sağlayacağına inandığımız bu çalışmanın, araştırmacılardan çiftçilere kadar geniş bir kitleye yol göstereceğini umut ediyoruz. Kitabın hazırlanmasında emeği geçen tüm yazarları ve destekçileri tebrik eder, okuyucularımıza faydalı olmasını dileriz.

Doç. Dr. Abdurrahim YILMAZ¹

Öğr. Gör. Dr. Hilal YILMAZ²

¹ Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Tarla Bitkileri Bölümü, Bolu, Türkiye. abdurrahimyilmaz@ibu.edu.tr
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9991-1792>

² Kocaeli Üniversitesi, İzmit Meslek Yüksekokulu, Bitkisel ve Hayvansal Üretim Programı, Kocaeli, Türkiye. hilal.yilmaz@kocaeli.edu.tr
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9138-3382>

B¼L¼M 1

ALKALİ TOPRAK KOŞULLARINDA DEMİR VE ÇİNKO BİYOYARARLANIMINI ARTIRMAYA YÖNELİK YAPRAK GÜBRELEMESİ UYGULAMA STRATEJİLERİ

Öğr. Gör. Dr. Hilal YILMAZ^{1*}
Prof. Dr. Vahdettin ÇİFTÇİ²

DOI: <https://dx.doi.org/10.5281/zenodo.14541781>

^{1*} Kocaeli Üniversitesi, İzmit Meslek Yüksekokulu, Bitkisel ve Hayvansal Üretim Programı, Kocaeli, Türkiye. hilal.yilmaz@kocaeli.edu.tr

² Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi, Ziraat Fakóltesi Tarla Bitkileri Bölümü, Bolu, Türkiye. vahdettinciftci@ibu.edu.tr

GİRİŞ

D¼nya n¼fusunun hızla artması ve değişen iklim koşulları, tarımsal üretimin sürdürülebilirliği açısından yeni bir küresel tarımsal devrimin gerekliliğini gün yüzüne çıkarmaktadır (Rockström ve ark., 2017). Artan gıda talebi, toprak ve su kaynaklarının hızla tükenmesi ve tarımsal faaliyetlerin çevresel etkileri, üretimin geleneksel yöntemlerle sürdürülebilirliğini zorlaştırmaktadır (Wang, 2022; Gomiero, 2017). Bu nedenle, tarımsal üretim süreçlerinde hem çevresel hem de ekonomik sürdürülebilirliği sağlayacak yenilikçi yaklaşımlara olan ihtiyaç hiç olmadığı kadar önem kazanmıştır.

Ürün verimliliğini artırmak için tarımda mikro besinlerin doğru ve etkin bir şekilde bitki bünyesine alınması, sağlıklı büyüme ve kaliteli ürün elde edilmesi açısından büyük önem taşır (Rahman ve ark., 2020). Bir mikro besin, tüm bitkiler için mutlak gerekli olan, gereksinimi ve birikimi düşük düzeyde seyreden temel bir element olarak tanımlanır ve genellikle toprak veya biyokütle kilogramı başına miligram ya da hektar başına gram cinsinden ölçülür (Zewide ve Sherefu, 2021).

Bu nedenle, bitki beslenmesinde her bir mikro besinin dengeli bir şekilde bulunabilirliği, diğer gerekli elementlerle uyum içinde işlev görmesine olanak tanır. Bu uyum, bitki sağlığının desteklenmesiyle sınırlı kalmayıp, aynı zamanda ürün verimi ve besin kalitesini de önemli ölçüde artırır. Böylece, mikro besin desteğiyle zenginleştirilen bitkisel ürünler hem insan hem de hayvan sağlığı için değerli bir besin kaynağı haline gelmektedir (Ram ve ark., 2017).

"Yeşil Devrim" ile uygulanan yoğun tarım sistemleri, yüksek verimli genotiplerin yetiştirilmesi, gelişmiş tarımsal mekanizasyon, iz elementlerden arındırılmış makro besin gübrelere üretilmesi ve modern sulama sistemlerinin kullanımı, birim alan başına ürün verimini artırmıştır; ancak bu süreçler, toprağın bitki tarafından alınabilir mikro besin içeriğinin daha hızlı tükenmesine neden olmuştur (Khoshgoftarmanesh ve ark., 2010; Pingali, 2023). Erozyon, yıkanma, asidik toprakların kireçlenmesi, kimyasal gübrelere kıyasla ahır gübresinin azalması ve marjinal arazilerin tarım için kullanılması gibi faktörler de dünya genelinde tarımsal topraklarda mikro besin eksikliklerinin artmasına yol açan diğer etkenlerdir (Falgaria ve ark., 2008). Bu nedenle son yıllarda mikro besin eksikliği birçok tarımsal toprakta ürün verimliliği için sınırlayıcı bir faktör haline gelmiştir. Bitkilerde mikro besin yetersizliği, özellikle demir (Fe) ve çinko (Zn) eksiklikleri, bitkinin büyüme, gelişim dönemlerini etkileyerek ürün kalitesini olumsuz etkilemektedir (Abdoli, 2020).

1. BİTKİLER İÇİN DEMİR ELEMENTİNİN ÖNEMİ

Dünya'da en bol bulunan dördüncü element olan demir, jeolojik olarak zengin olmasına rağmen, bitkiler tarafından doğrudan alınabilir biyolojik bir formda bulunmamaktadır (Huang ve ark., 2021). Bitkilerin ihtiyaç duyduğu biyoyararlanabilir demir formu (Fe^{2+} ya da ferroz form) yalnızca küçük bir miktarda mevcutken, demirin büyük bir kısmı çözünmez bir yapıda (Fe^{3+} ya da ferrik form) bulunmaktadır ve bu form bitkiler için biyokimyasal faaliyetlerde kullanılamaz (Bhat ve ark., 2024). Üstelik, dünya genelinde ekili alanların üçte birini kaplayan

kireçli topraklarda demirin çözünürlüğü ve dolayısıyla bitkiler tarafından alınabilirliği daha da düşük seviyelerdedir; bu durum, bitki verimliliğini ciddi ölçüde sınırlayan önemli bir faktör olarak öne çıkmaktadır (Kobayashi ve ark., 2016).

Demir (Fe), hücreyel süreçler için hayati önem taşıyan bir mikrobesein olup, bitkilerde solunum ve fotosentez gibi temel işlevlerin düzenlenmesinde kritik bir rol oynar. Solunum sürecinde elektron taşıma zinciri enzimleri gibi oksidoredüktazlar ve oksijenazların kofaktörü olarak görev yapar (Kobayashi ve ark., 2014; Kobayashi ve ark., 2019; Bhat ve ark., 2024). Demir, bitkilerde çeşitli hayati işlevlere sahiptir: (1) fotosentez sırasında klorofil sentezine katkıda bulunur (Kar ve Panda, 2020); (2) fenilpropanoidler, oksilipinler ve diğer birincil ve ikincil metabolitlerin sentezi için gerekli olan demir-kükürt ve hem proteinleri ile etkileşim halinde çalışır ve gibberellinler ile brassinosteroidler gibi hormonların sentezinde rol oynar; (3) nitrit ve nitrat redüktaz gibi enzimlerin bir parçası olarak besinlerin bitki bünyesine alınmasını destekler (Bhat ve ark., 2024).

Bitkiler, klorofil sentezi ve diğer metabolik faaliyetler için gerekli proteinlerin temel bir bileşeni olan demire büyük ölçüde ihtiyaç duyar ve bu gereksinimlerini genellikle topraktaki demir içeriğinden karşılar (Rout ve ark., 2015). Ancak, alkali toprak koşulları demirin suda çözünürlüğünü ve dolayısıyla bitkiler tarafından alınımını sınırlandırır. Toprakta pH 7,5'in üzerine çıktığında, demir iyonları (Fe^{2+}), bitki kökleri tarafından alınabilir formdan (Fe^{3+}) okside olarak alınamaz hale gelir (Riaz ve ark., 2020). Nötrden alkaliye kadar olan topraklarda,

demir normal koşullarda genellikle kullanılamaz durumda olup, bolluğuna rağmen bitkilerde demir eksikliğine neden olur. Demir, klorofil sentezinde bir katalizör görevi görür ve fotosentez ile solunum sırasında redoks reaksiyonlarında önemli bir rol oynar (McGrath ve ark., 2014). Fotosentez kapasitesinin düşmesi, bitkilerin enerji üretimini sınırlar ve bu da büyümenin yavaşlamasına neden olur (Larbi ve ark., 2006). Fotosentezdeki bu düşüş, bitkilerde verim kayıplarını doğrudan etkiler; örneğin, demir eksikliği olan bitkilerde ürün boyutu, biyokütle ve besin değeri azalır (Briat ve ark., 2015). Bu eksiklik, öncelikle genç yaprakları etkileyen kloroz olarak ortaya çıkar ve derhal ele alınmazsa bodur büyümeye ve ürün kalitesinin düşmesine yol açar (Singh, 2023; El-Jendoubi ve ark., 2014).

Demir eksikliği, dünya genelinde birçok tarla bitkisinin verimini sınırlayan önemli bir faktördür ve genellikle topraktaki Fe'nin düşük biyoyararlanımı ile duyarlı genotiplerin yetiştirilmesi arasındaki etkileşimden kaynaklanır. Demir eksikliği, dünya genelinde soya fasulyesi, yer fıstığı, kuru fasulye, sorgum ve pirinçte yaygın olarak görülmektedir (Hansen ve ark., 2006).

2. BİTKİLER İÇİN ÇİNKO ELEMENTİNİN ÖNEMİ

Çinko (Zn) eksikliği, tarla bitkilerinin verimliliğini ve besin kalitesini dünya genelinde etkileyen önemli bir sorundur. Bu mikro besin elementi, bitkilerde klorofil sentezi, protein metabolizması ve genel büyüme düzenlemesi gibi çeşitli fizyolojik süreçler için hayati öneme sahiptir (Sharma ve ark., 2013; Yadav ve ark., 2020). Zn, birçok

enzimin yapısal bir bileşeni ve kofaktörü olarak görev yaparak karbonhidrat ve protein metabolizması gibi metabolik yolları etkiler (Vaid ve ark., 2014; Hosamani ve ark., 2020). Örneğin, hücre uzaması ve bölünmesini etkileyen önemli bir bitki büyüme düzenleyicisi olan indol-3-asetik asit (IAA) biyosentezinde rol oynar (Wang ve Yang, 2021).

Özellikle kireçli toprakların bulunduğu bölgelerde, birçok tarımsal sistemde Zn biyoyararlanımı önemli ölçüde azalmakta ve bu durum ürün verimi ve kalitesi üzerinde olumsuz etkiler yaratmaktadır (Wang ve Jin, 2005; Rezaeiniko ve ark., 2019). Araştırmalar, Zn eksikliğinin bodur büyüme, kloroz ve bitkilerde azalmış verimlilikle sonuçlanan kısırlığa yol açabileceğini ve nihayetinde tarımsal verimliliği düşürdüğünü göstermiştir (Hosamani ve ark., 2020). Örneğin, yapılan çalışmalar Zn eksikliğinin kuru madde üretiminde ve genel bitki canlılığında belirgin bir azalmaya yol açabileceğini ve şiddetli durumlarda verim kayıplarının %80'e kadar çıkabileceğini göstermiştir (Cakmak, 2008). Ayrıca eksikliği bitki fotosentezinin azalmasına ve RNA'nın bozulmasına neden olur; bu durum çözünebilir karbonhidratların miktarını ve protein sentezini azaltır ve dolayısıyla ürünlerin verimi ve kalitesi düşer (Hosamani ve ark., 2020).

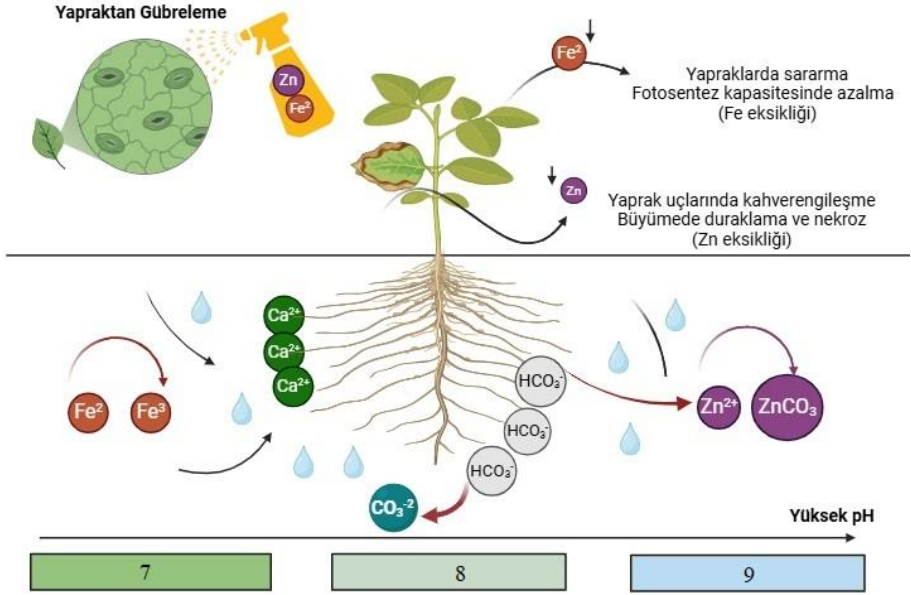
Topraktaki Zn'nin biyoyararlanımı, toprak pH'ı, organik madde içeriği ve rekabet eden iyonların varlığı gibi çeşitli faktörlerden etkilenmektedir. Örneğin, yüksek toprak pH'ı Zn'nin çözünürlüğünü azaltarak, bitki tarafından alınımı zorlaştırabilir (Rutkowska ve ark., 2015). Ayrıca, organik maddenin varlığı Zn'yi bağlayarak

hareketliliğini ve biyoyararlanımını etkileyebilir (Rutkowska ve ark., 2015). Yapılan çalışmalar, özellikle Zn sülfat formunda uygulanan Zn gübrelerinin, bitkiler tarafından Zn alımını artırarak büyüme ve verimi iyileştirebileceğini göstermiştir (Recena ve ark., 2021). Bunun yanı sıra, topraktaki Zn ve fosfor arasındaki etkileşim de Zn biyoyararlanımını etkileyebilir; çünkü yüksek fosfor seviyeleri Zn alımını engelleyebilir (Recena ve ark., 2021; Kuziemska ve ark., 2022). Sonuç olarak, tarla bitkilerinde Fe ve Zn eksikliğinin giderilmesi, tarımsal verimliliğin artırılması ve gıda güvenliğinin sağlanması için kritik öneme sahiptir. Agronomik uygulamaları, genetik iyileştirmeleri ve biyoteknolojik müdahaleleri içeren çok yönlü bir yaklaşım, bitkilerde Fe ve Zn'nin biyoyararlanımını ve alımını artırmak için gereklidir. Bu yaklaşım yalnızca ürün verimine fayda sağlamakla kalmayacak, aynı zamanda temel gıdaların besin kalitesini iyileştirerek insan sağlığına da katkıda bulunacaktır.

3. YAPRAK GÜBRELEME STRATEJİLERİ

Alkalin topraklar, dünya yüzeyinin yaklaşık %25'ini kaplayan kurak ve yarı kurak iklimlerde yaygın bir sorundur. Bu topraklar, kalsiyum karbonat (CaCO_3) ile doymuş, yüksek derecede gözenekli ve serbestçe su geçirebilir yapıdadır (López-Bucio ve ark., 2000). Alkali koşullar, özellikle demir (Fe) ve çinko (Zn) eksikliğine neden olarak bitki büyümesini ve gelişimini sınırlar (Şekil 1). Demir eksikliği, yapraklarda kloroz, fotosentez kapasitesinde azalma ve genel bitki stresinde artışla sonuçlanırken (Rajniak ve ark., 2018), çinko eksikliği ise bodur büyüme, yaprak kıvrılması ve azalmış yaprak alanı gibi

belirtilerle kendini gösterir (Zeng ve ark., 2021). Bu durumlar, tarımsal üretimde verim ve kalite kayıplarına yol açarak hem çiftçilerin ekonomik durumunu olumsuz etkilemekte hem de gıda güvenliğini tehlikeye atmaktadır.



Şekil 1. Alkali toprak koşullarında demir (Fe) ve çinko (Zn) biyoyararlanımını sınırlayan faktörler

Yüksek pH nedeniyle HCO_3^- iyonları, Fe^{2+} 'yi oksitleyerek çözünmeyen Fe^{3+} formuna dönüştürür ve Zn^{2+} ile reaksiyona girerek ZnCO_3 oluşumuna neden olur. Bu süreçler Fe ve Zn'nin bitki kökleri tarafından alınımını sınırlar. Bitkilerde Fe eksikliği yapraklarda sararma ve fotosentez kapasitesinde azalma ile, Zn eksikliği ise yaprak uçlarında kahverengileşme ve büyümede duraklama ile kendini gösterir.

Yapraktan gübreleme uygulaması, Fe ve Zn'nin doğrudan alımını artırarak bu eksikliklerin giderilmesine katkı sağlar.

Alkali topraklarda Fe ve Zn'nin düşük çözünürlüğü, bu mikro elementlerin bitki tarafından alımını ciddi şekilde sınırlar. Yüksek pH, Fe'nin bitkiler için alınabilir Fe^{2+} formuna dönüşümünü engellerken, Zn genellikle karbonatlar, fosfatlar ve oksitlerle bağlanarak çözünmeyen kompleksler oluşturur. Bu nedenle, toprak uygulamaları yerine alternatif yöntemlere ihtiyaç duyulmaktadır (Rengel, 2015). Yapraktan gübreleme, bu alternatiflerin başında gelir. Yaprak gübrelemesi, bir veya daha fazla temel bitki mineral besin maddesinin, gübrelerin geleneksel toprak uygulamalarını tamamlamak amacıyla bitkilerin toprak üstü kısımlarına püskürtülmesi veya uygulanması olarak tanımlanır (Alshaal ve El-Ramady, 2017). Bu yöntem, besin maddelerinin doğrudan yaprak yüzeyinden bitkiye alınmasını sağlayarak köklerin toprakla sınırlı olan iletişiminin ötesine geçer ve Fe ile Zn gibi mikro besinlerin bitki bünyesine alınmasını hızlandırır (Hao ve ark., 2021). Yaprak uygulamalarının başarısı; besin maddelerinin yaprak yüzeyine tutunması, yaprak dokusuna nüfuz etmesi ve bitki içerisinde taşınımına bağlıdır (Fernández ve Brown, 2013). Ayrıca, yaprak yüzey yapısı, çevresel koşullar (pH, ışık, sıcaklık) ve uygulama sıklığı gibi faktörler de yaprak gübrelemesinin etkinliğini belirleyen temel unsurlar arasında yer alır (Hong ve ark., 2021).

Yapraktan gübreleme yöntemi, Fe ve Zn gibi mikro besin eksikliklerini gidermek için sıklıkla tercih edilmektedir. Demir eksikliğinin giderilmesinde kullanılan Fe şelatları, özellikle alkali topraklarda

fotosentez kapasitesini artıran önemli bir strateji olarak öne çıkmaktadır. %0,4 FeSO₄ uygulaması pamukta verimi %20,53'e kadar artırırken, klorofil içeriğini %98,68'e kadar yükseltmiştir. Ayrıca, toprak enzim aktivitelerini iyileştirerek sürdürülebilir tarımda önemli bir rol oynamıştır (Beyyavas ve ark., 2023). Bunun yanı sıra, yapraktan uygulanan EDTA-Fe-Na ve sitrik asit/demir sülfat kombinasyonu, fotosentetik pigmentlerin sentezini artırmış, alkali topraklardaki Fe eksikliğini gidermiş ve patates yumru veriminde %50,74'e varan iyileşme sağlamıştır (Zhang ve ark., 2022).

Çinko uygulamaları da alkali topraklarda önemli faydalar sağlamaktadır. Topraktan 7,5 kg ha⁻¹ Zn ve yapraktan 2,5 kg ha⁻¹ Zn kombinasyonu, buğdayda tane verimi, biyolojik verim, protein içeriği ve Zn konsantrasyonunda belirgin artışlar sağlamış; tahıl kalitesini iyileştirmiştir (Khan ve ark., 2023). Çinko uygulaması ayrıca kadmiyum (Cd) kirliliğini azaltmada etkili bir yöntemdir. ZnSO₄ yapraktan uygulaması, kahverengi pirinçte Cd konsantrasyonlarını düşürmüş ve Cd ile kirlenmiş çeltik tarlalarının iyileştirilmesinde düşük maliyetli bir strateji olarak hizmet etmiştir (Duan ve ark., 2018). Nanoteknoloji, mikrobelerin yapraktan alımını artırma potansiyeline sahiptir. Humik maddelerle stabilize edilmiş demir hidroksit nanoparçacıkları, Fe-EDTA'ya kıyasla demir alımını %70–75 oranında artırmıştır. Humik maddeler, nanoparçacıkların yapraklara nüfuzunu artıran yüzey aktif maddeler olarak işlev görmektedir (Zimbovskaya ve ark., 2020). Benzer şekilde, Zn oksit nanopartikül uygulaması, buğdayda, yaprak ve kökte Zn konsantrasyonlarını artırmış ve

geleneksel $ZnSO_4$ gübresine kıyasla daha az miktarda nano çinko ile yüksek verim elde edilmesini mümkün kılmıştır (Ahmad ve ark., 2023). Yaprak gübrelemesi, bitki büyümesini ve gelişimini çeşitli şekillerde iyileştirebilmektedir. *Vicia faba* bitkilerinde $FeSO_4$ ve $ZnSO_4$ uygulamaları; vegetatif büyüme, fotosentetik pigmentler, çözünebilir şeker ve protein içeriğini artırmış; antioksidan enzim aktivitelerini (APX, CAT) iyileştirerek bitki metabolizmasını güçlendirmiştir (Mohamed ve ark., 2016). Alkali karstik kireçli topraklarda, yapraktan 200 mg L^{-1} Fe uygulaması, *B. chinensis*'in biyokütlesini ve klorofil içeriğini (SPAD değerleri) artırmış; kök metabolizmasını iyileştirerek rizosfer mikrobiyal topluluğunda olumlu değişiklikler sağlamıştır (Zou ve ark., 2024).

SONUÇ

Alkali toprak koşulları, demir (Fe) ve çinko (Zn) biyoyararlanımını sınırlandırarak bitki büyümesini, verimliliğini ve ürün kalitesini olumsuz etkilemektedir. Bu çalışmada, Fe ve Zn eksikliklerini gidermeye yönelik yaprak gübresi uygulama stratejileri detaylı bir şekilde incelenmiş ve etkili yöntemler ortaya konmuştur.

Yapraktan uygulanan $FeSO_4$, $ZnSO_4$ ve şelatlı mikrobesein gübrelere, alkali topraklarda bu mikro elementlerin alımını artırmış, bitkilerde klorofil sentezini ve fotosentez kapasitesini iyileştirerek verim artışına katkı sağlamıştır. Bununla birlikte, nanoteknoloji destekli nano-Fe ve nano-Zn uygulamaları, düşük dozlarda dahi yüksek biyoyararlanım sağlayarak geleneksel yöntemlere kıyasla önemli avantajlar sunmuştur.

Biyostimülanlarla kombine edilen yapraktan gübreleme uygulamaları ve yapışkan ajanların kullanımı, mikrobelerin yaprak yüzeyine tutunma ve dokulara nüfuz etme etkinliğini artırarak alkali toprak koşullarında başarılı bir çözüm olarak öne çıkmıştır.

Sonuç olarak, bu stratejiler, Türkiye gibi alkali topraklara sahip bölgelerde sürdürülebilir tarımsal üretimi desteklemek için önemli bir potansiyel taşımaktadır. Gelecekte, nanoteknoloji ve biyostimülanlarla desteklenen yenilikçi yapraktan gübreleme uygulama yöntemlerinin daha yaygın uygulanması hem bitki verimliliğini artırmada hem de çevresel sürdürülebilirliği sağlamada kritik bir role sahip olacaktır.

KAYNAKÇA

- Abdoli, M. (2020). Effects of micronutrient fertilization on the overall quality of crops. *Plant Micronutrients: Deficiency and Toxicity Management*, 31-71.
- Ahmad, W., Zou, Z., Awais, M., Munsif, F., Khan, A., Nepal, J., ... & Khan, H. (2023). Seed-primed and foliar oxozinc nanofiber application increased wheat production and zn biofortification in calcareous-alkaline soil. *Agronomy*, 13(2), 400.
- Alshaal, T., & El-Ramady, H. (2017). Foliar application: from plant nutrition to biofortification. *Environment, Biodiversity and Soil Security*, 1(2017), 71-83.
- Beyyavas, V., Ramazanoglu, E., Sakin, E., Cevheri, C. İ., & Seyrek, A. (2023). Responses of some soil enzymes and cotton plant to foliar application of ferrous sulfate in a calcareous alkaline soil. *Journal of Plant Nutrition*, 46(14), 3421-3434.
- Bhat, M. A., Mishra, A. K., Shah, S. N., Bhat, M. A., Jan, S., Rahman, S., ... & Jan, A. T. (2024). Soil and Mineral Nutrients in Plant Health: A Prospective Study of Iron and Phosphorus in the Growth and Development of Plants. *Current Issues in Molecular Biology*, 46(6), 5194-5222.
- Briat, J. F., Dubos, C., & Gaymard, F. (2015). Iron nutrition, biomass production, and plant product quality. *Trends in plant science*, 20(1), 33-40.
- Cakmak, I. (2008). Enrichment of cereal grains with zinc: agronomic or genetic biofortification?. *Plant and soil*, 302, 1-17.
- Duan, M. M., Wang, S., Huang, D. Y., Zhu, Q. H., Liu, S. L., Zhang, Q., ... & Xu, C. (2018). Effectiveness of simultaneous applications of lime and zinc/iron foliar sprays to minimize cadmium accumulation in rice. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 165, 510-515.
- El-Jendoubi, H., Vázquez, S., Calatayud, Á., Vavpetič, P., Vogel-Mikuš, K., Pelicon, P., ... & Morales, F. (2014). The effects of foliar fertilization with iron sulfate in chlorotic leaves are limited to the treated area. A study with peach trees (*Prunus persica* L. Batsch) grown in the field and sugar beet (*Beta vulgaris* L.) grown in hydroponics. *Frontiers in Plant Science*, 5, 2.

- Fageria, N. K., Baligar, V. C., & Li, Y. C. (2008). The role of nutrient efficient plants in improving crop yields in the twenty first century. *Journal of plant nutrition*, 31(6), 1121-1157.
- Fernández, V., & Brown, P. H. (2013). From plant surface to plant metabolism: the uncertain fate of foliar-applied nutrients. *Frontiers in plant science*, 4, 289.
- Gomiero, T. (2016). Soil degradation, land scarcity and food security: Reviewing a complex challenge. *Sustainability*, 8(3), 281.
- Hansen, N. C., Hopkins, B. G., Ellsworth, J. W., & Jolley, V. D. (2006). Iron nutrition in field crops. In *Iron nutrition in plants and rhizospheric microorganisms* (pp. 23-59). Dordrecht: Springer Netherlands.
- Hao, B., Ma, J., Jiang, L., Wang, X., Bai, Y., Zhou, C., ... & Wang, Z. (2021). Effects of foliar application of micronutrients on concentration and bioavailability of zinc and iron in wheat landraces and cultivars. *Scientific Reports*, 11(1), 22782.
- Hong, J., Wang, C., Wagner, D. C., Gardea-Torresdey, J. L., He, F., & Rico, C. M. (2021). Foliar application of nanoparticles: mechanisms of absorption, transfer, and multiple impacts. *Environmental Science: Nano*, 8(5), 1196-1210.
- Hosamani, V., Yalagi, M., Sasvihalli, P., Hosamani, V., Nair, K. S., Harlapur, V. K., ... & Mishra, R. K. (2020). Importance of micronutrients (Zinc) in crop production: A review. *International Journal of Chemical Studies*, 8(1), 1060-1064.
- Huang, J., Jones, A., Waite, T. D., Chen, Y., Huang, X., Rosso, K. M., ... & Zhang, H. (2021). Fe (II) redox chemistry in the environment. *Chemical Reviews*, 121(13), 8161-8233.
- Kar, S., & Panda, S. K. (2020). Iron homeostasis in rice: Deficit and excess. *Proceedings of the National Academy of Sciences, India Section B: Biological Sciences*, 90, 227-235.
- Khan, F. U., Khan, A. A., Qu, Y., Zhang, Q., Adnan, M., Fahad, S., ... & Xu, X. (2023). Enhancing wheat production and quality in alkaline soil: a study on the effectiveness of foliar and soil applied zinc. *PeerJ*, 11.

- Khoshgoftarmanesh, A. H., Schulin, R., Chaney, R. L., Daneshbakhsh, B., & Afyuni, M. (2010). Micronutrient-efficient genotypes for crop yield and nutritional quality in sustainable agriculture. A review. *Agronomy for sustainable development*, 30(1), 83-107.
- Kobayashi, T., Itai, R. N., Senoura, T., Oikawa, T., Ishimaru, Y., Ueda, M., ... & Nishizawa, N. K. (2016). Jasmonate signaling is activated in the very early stages of iron deficiency responses in rice roots. *Plant Molecular Biology*, 91, 533-547.
- Kobayashi, T., Nakanishi Itai, R., & Nishizawa, N. K. (2014). Iron deficiency responses in rice roots. *Rice*, 7, 1-11.
- Kobayashi, T., Nozoye, T., & Nishizawa, N. K. (2019). Iron transport and its regulation in plants. *Free Radical Biology and Medicine*, 133, 11-20.
- Kuziemska, B., Klej, P., Wysokinski, A., & Rudziński, R. (2022). Effect of zinc along with organic fertilizers on phosphorus uptake and use efficiency by cocksfoot (*Dactylis glomerata* L.). *Agriculture*, 12(9), 1424.
- Larbi, A., Abadía, A., Abadía, J., & Morales, F. (2006). Down co-regulation of light absorption, photochemistry, and carboxylation in Fe-deficient plants growing in different environments. *Photosynthesis Research*, 89(2), 113-126.
- López-Bucio, J., Guevara-García, A., Ramírez-Rodríguez, V., Nieto, M. F., de la Fuente, J. M., & Herrera-Estrella, L. (2000). Agriculture for marginal lands: transgenic plants towards the third millennium. *Developments in plant genetics and breeding*, 5, 159-165.
- McGrath JM, Spargo J, Penn CJ (2014) Soil fertility and plant nutrition. *Encycl Agric Food Syst* 5:166–184.
- Mohamed, H. I., Elsherbiny, E. A., & Abdelhamid, M. T. (2016). Physiological and biochemical responses of *Vicia faba* plants to foliar application with zinc and iron. *Gesunde Pflanzen*, 68(4), 201-212.
- Pingali, P. (2023). Are the lessons from the Green Revolution relevant for agricultural growth and food security in the twenty-first century. *Agricultural Development in Asia and Africa*, 21-32.

- Rahman, R., Sofi, J. A., Javeed, I., Malik, T. H., & Nisar, S. (2020). Role of micronutrients in crop production. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 8, 2265-2287.
- Rajniak, J., Giehl, R. F., Chang, E., Murgia, I., von Wirén, N., & Sattely, E. S. (2018). Biosynthesis of redox-active metabolites in response to iron deficiency in plants. *Nature chemical biology*, 14(5), 442-450.
- Ram, D., Ali, T., Mehraj, S., Wani, S. A., Jan, R., Jan, R., ... & Bhat, S. J. A. (2017). Strategy for optimization of higher productivity and quality in field crops through micronutrients: A review. *Economic Affairs*, 62(1), 139-147.
- Recena, R., García-López, A. M., & Delgado, A. (2021). Zinc uptake by plants as affected by fertilization with Zn sulfate, phosphorus availability, and soil properties. *Agronomy*, 11(2), 390.
- Rengel, Z. (2015). Availability of Mn, Zn and Fe in the rhizosphere. *Journal of soil science and plant nutrition*, 15(2), 397-409.
- Rezaeiniko, B., Enayatizamir, N., & Masir, M. N. (2019). The effect of zinc solubilizing bacteria on zinc uptake and some properties of wheat in the greenhouse.
- Riaz, M. U., Ayub, M. A., Khalid, H., ul Haq, M. A., Rasul, A., ur Rehman, M. Z., & Ali, S. (2020). Fate of micronutrients in alkaline soils. *Resources use efficiency in agriculture*, 577-613.
- Rockström, J., Williams, J., Daily, G., Noble, A., Matthews, N., Gordon, L., ... & Smith, J. (2017). Sustainable intensification of agriculture for human prosperity and global sustainability. *Ambio*, 46, 4-17.
- Rout, G. R., & Sahoo, S. (2015). Role of iron in plant growth and metabolism. *Reviews in Agricultural Science*, 3, 1-24.
- Rutkowska, B., Szulc, W., Bomze, K., Gozdowski, D., & Szychaj-Fabisiak, E. (2015). Soil factors affecting solubility and mobility of zinc in contaminated soils. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 12, 1687-1694.

- Sharma, A., Patni, B., Shankhdhar, D., & Shankhdhar, S. C. (2013). Zinc—an indispensable micronutrient. *Physiology and Molecular Biology of Plants*, 19, 11-20.
- Singh, A., Pankaczi, F., Rana, D., May, Z., Tolnai, G., & Fodor, F. (2023). Coated hematite nanoparticles alleviate iron deficiency in cucumber in acidic nutrient solution and as foliar spray. *Plants*, 12(17), 3104.
- Vaid, S. K., Kumar, B., Sharma, A., Shukla, A. K., & Srivastava, P. C. (2014). Effect of Zn solubilizing bacteria on growth promotion and Zn nutrition of rice. *Journal of soil science and plant nutrition*, 14(4), 889-910.
- Wang, H., & Jin, J. Y. (2005). Photosynthetic rate, chlorophyll fluorescence parameters, and lipid peroxidation of maize leaves as affected by zinc deficiency. *Photosynthetica*, 43, 591-596.
- Wang, J., & Yang, S. (2021). Dose-dependent responses of *Arabidopsis thaliana* to zinc are mediated by auxin homeostasis and transport. *Environmental and Experimental Botany*, 189, 104554.
- Wang, X. (2022). Managing land carrying capacity: Key to achieving sustainable production systems for food security. *Land*, 11(4), 484.
- Yadav, S. K., Dudwal, B. L., Yadav, V. L., Yadav, K. C., & Yadav, J. K. (2021). Effect of Moisture Conservation Practices and Zinc Fertilization on Nutrient Status and Quality of Pearl millet *Pennisetum glaucum* (L.) under Rainfed Condition. *Indian Journal of Agricultural Research*, 55(5), 629-633.
- Zeng, H., Wu, H., Yan, F., Yi, K., & Zhu, Y. (2021). Molecular regulation of zinc deficiency responses in plants. *Journal of Plant Physiology*, 261, 153419.
- Zewide, I., & Sherefu, A. (2021). Review paper on effect of micronutrients for crop production. *J. Nutr. Food Process*, 4(7), 1-8.
- Zhang, R., Zhang, W., Kang, Y., Shi, M., Yang, X., Li, H., ... & Qin, S. (2022). Application of different foliar iron fertilizers for improving the photosynthesis and tuber quality of potato (*Solanum tuberosum* L.) and enhancing iron biofortification. *Chemical and Biological Technologies in Agriculture*, 9(1), 79.

- Zimbovskaya, M. M., Polyakov, A. Y., Volkov, D. S., Kulikova, N. A., Lebedev, V. A., Pankratov, D. A., ... & Perminova, I. V. (2020). Foliar application of humic-stabilized nanoferrihydrate resulted in an increase in the content of iron in wheat leaves. *Agronomy*, 10(12), 1891.
- Zou, T., Feng, M., & Li, Z. (2024). Foliar Application of Iron Nutrition Not Only Improves Root Activity but Also Significantly Affects Rhizosphere Microbial Community of Brassica Chinensis on Karst Calcareous Soil. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 1-11.

B¼L¼M 2

BİTKİLERDE BAZI ABİYOTİK STRES FAKT¼RLERİ İLE M¼CADELEDE *İN VİTRO* SELEKSİYON

Dr. S¼meyye ADALI^{1*}
Dr. Alaaddin ZDEMİR²
Dr. Esra BULUNUZ PALAZ³

DOI: <https://dx.doi.org/10.5281/zenodo.14541783>

^{1*} Doğu Akdeniz Geçit Kuşaağı Tarımsal Araştırma Enstit¼s¼, Kahramanmaraş, T¼rkiye. *sumeyye_babaoglu@hotmail.com

² Doğu Akdeniz Geçit Kuşaağı Tarımsal Araştırma Enstit¼s¼, Kahramanmaraş, T¼rkiye. bulunuzesra@hotmail.com

³ Doğu Akdeniz Geçit Kuşaağı Tarımsal Araştırma Enstit¼s¼, Kahramanmaraş, T¼rkiye.

GİRİŞ

Günümüzde dünya nüfusunun 8 milyarı aşmasıyla birlikte, temelde bitkisel kaynaklı gıda talebi giderek artmakta, aynı zamanda iklim değişikliğinin de tarım sistemleri üzerindeki baskısı her geçen gün kuvvetlenmektedir. Küresel ısınmanın doğrudan bir sonucu olarak, kuraklık, aşırı sıcaklıklar, seller ve tuzluluk gibi olumsuz çevresel koşullar, tarım üretimini ciddi şekilde tehdit etmektedir (Yapa ve Pathirana, 2022). Bu durum, gıda güvenliği sorununu daha da derinleştirmekte ve tarım arazilerinin verimliliğini azaltmaktadır. Antropojenik faaliyetlerin doğal bir sonucu olan çevre kirliliği de toprağın kalitesini düşürerek, bitki büyümesini olumsuz yönde etkilemektedir. Bu bağlamda, artan nüfus ve değişen iklim koşulları, sürdürülebilir tarım uygulamalarının geliştirilmesi ve uygulanması gerekliliğini kesin bir şekilde ortaya koymaktadır. Bitkilerin yaşamları boyunca karşılaştıkları hem biyotik hem de abiyotik stres faktörleri, bitki gelişimini ve verimini önemli ölçüde azaltarak tarımsal verimliliği olumsuz etkilemektedir. Bu stresler, dünya çapında çok büyük ekonomik kayıplara neden olmaktadır. Geleneksel ıslah teknikleri, bitki ıslahında uzun yıllardır kullanılan ve stres toleransı gibi önemli özelliklerin geliştirilmesinde başarılı sonuçlar veren yöntemler olmasına rağmen geleneksel ıslah yöntemlerinin uzun süreli bir süreç olması, düşük verimlilik ve beklenen tüm özelliklerin aynı anda elde edilememesi gibi dezavantajları da bulunmaktadır. Bu durum, özellikle iklim değişikliği ve artan nüfus gibi küresel sorunların gıda üretimi üzerindeki baskısı göz önünde bulundurulduğunda sürdürülebilir tarım için daha hızlı ve etkili çözümlere olan ihtiyacı ortaya çıkarmaktadır.

Bu nedenle, bitki ıslahında biyoteknolojik araçların kullanımı, geleneksel yöntemlerin sınırlamalarını aşarak daha kısa sürede istenilen özelliklerin elde edilmesini sağlamaktadır. Doğal koşullarında yapılan geleneksel seleksiyon yöntemlerini tamamlayıcı nitelikte olan *in vitro* seleksiyon, bitkilerin streslere karşı tepkilerini daha detaylı bir şekilde inceleme olanağı tanır. Böylece, tarla koşullarında yapılacak olan çalışmalarda hangi genotiplere öncelik tanınması konusunda araştırmacıya yön verebilmektedir.

In vitro seleksiyon yöntemi, stres faktörleri ile mücadelede sürdürülebilir ve uygun maliyetli olması bakımından oldukça umut verici bir araç olarak ortaya çıkmaktadır. Bu yöntemde, *in vitro* kültür ortamlarına seçici ajanlar eklenerek, stres toleransı bakımından üstün performans gösteren bitki hücreleri veya rejenere edilmiş bitkiler seçilir. Tuz toleransı için NaCl, kuraklık toleransı için PEG, mannitol, prolin ve askorbik asit, hastalık direnci için ise patojen kültür filtratı, fitotoksin veya patojenin kendisi bu seçici ajanlar arasında yer alır. Bu bölümde, bitkilerdeki tarımsal verimliliği kısıtlayan temel sorunlardan birisi olan abiyotik stres durumları ve bu durumlar ile mücadelede *in vitro* seçime dayalı bitki doku kültürü yoluyla dayanıklı hatların geliştirilmesine yönelik çalışmalardan bahsedilmiştir. Bu stres faktörleriyle mücadelede *in vitro* seleksiyon teknikleri, bitkilerin dayanıklılık mekanizmalarını anlamak ve stres koşullarına toleranslı genotipler geliştirmek için önemli bir araç olarak öne çıkmaktadır.

1. KURAKLIK STRESİNİN TARIMSAL VERİMLİLİĞE ETKİSİ İLE MÜCADELEDE *İN VİTRO* SELEKSİYON TEKNİĞİ

Kuraklık, su yoksunluğu nedeniyle bitki büyümesini, verimini ve gelişimini etkilediği bilinmektedir (Khan ve ark., 2015). Genellikle kurak alanların yanı sıra özellikle yarı kurak bölgelerde de kritik tarımsal kayıplara neden olmaktadır (Anjum ve ark., 2017a, 2017b). Kuraklık stresi; Fotosentezi, biyokütle üretimini ve hücre büyümesini bozar, reaktif oksijen türlerinin birikimini artırır ve ürün verimini azaltmaktadır (Farooq ve ark., 2010; Iseki ve ark., 2014; Swain ve ark., 2014; Sohag ve ark., 2020).

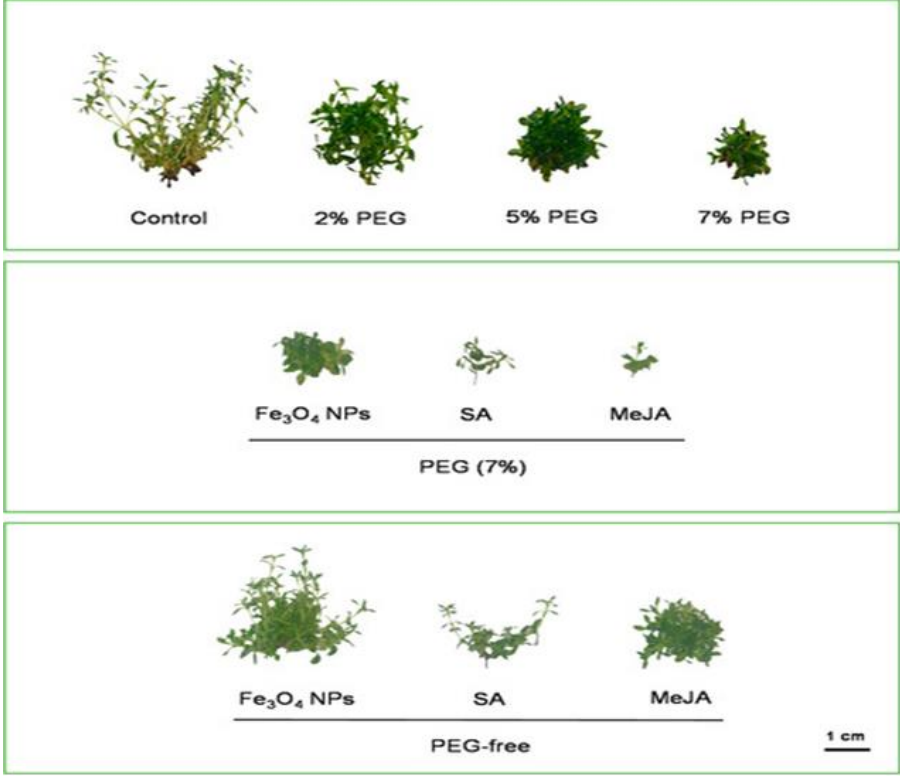
Bitki ıslah çalışmalarında, biyotik ve abiyotik streslere karşı dayanıklılık özelliklerinin belirlenmesi ve bu özelliklere sahip üstün genotiplerin seçilmesi için yürütülen denemeler, ıslah sürecinin kritik bir aşamasıdır. Bu denemelerin büyük bir kısmı, bitkilerin doğal yetişme koşullarına en yakın ortamı sunmak amacıyla doğal koşullarda gerçekleştirilmektedir. Ancak doğal koşullarında yürütülen bu denemeler; değişken ve kontrol edilemeyen çevresel faktörler nedeniyle deneysel hatanın artmasına, maliyetlerin yükselmesine ve beklenmeyen sonuçların ortaya çıkmasına yol açabilmektedir. Bitkilerin *in vitro* kültüründe, belirli bir kültür ortamı bileşimi içerisinde, dışarıdan gelen çevresel faktörlerin etkisi en aza indirgenerek, farklı büyüme koşulları ve stres faktörleri oluşturulabilir. Bu sayede, istenen özelliklere sahip bitki genotiplerinin seçilimi için daha hızlı ve etkin bir seleksiyon süreci gerçekleştirilebilir. Bu durum, hem seleksiyon süresini kısaltır hem de maliyeti düşürür. Kuraklık

stresine dayanıklı bitkilerin geliştirilmesi için uygulanan *in vitro* seleksiyon teknikleri, laboratuvar ortamında çeşitli kimyasallar kullanılarak bitkilerin su kıtlığına dayanıklılık mekanizmalarının incelenmesini sağlar. Bu teknikler, tarımsal üretimin sürdürülebilirliğini artırmak için dayanıklı bitki türlerinin seçimini hızlandırır ve genişletir (Turner, 2004).

İn vitro kültürlerde ozmotik potansiyeli düşürerek su stresini simüle eden ve yaygın olarak kullanılan kimyasallardan biri, polietilen glikol (PEG) olup, bitki hücrelerinin kuraklık koşullarında hayatta kalma kapasitesini belirlemek için kullanılır. PEG, hücre kültürlerinde suyun serbest dolaşımını engelleyerek, bitkilerde su stresi benzeri koşullar oluşturur ve dayanıklı hücrelerin seçimini mümkün kılar (Verslues ve ark., 2006). PEG'in bu işlevi sayesinde bitkilerin su tutma kapasitesi ve ozmotik düzenleme yetenekleri analiz edilmektedir.

İn vitro bitki doku kültürlerinde kuraklık stresi simülasyonunda kullanılan bir diğer önemli kimyasal ise mannitoldür. Mannitol, bitkilerde ozmotik stres oluşturarak hücrelerdeki su kaybını azaltır ve dayanıklılığı teşvik eder. Bu kimyasal, hücrelerin ozmotik basıncını düzenleyerek bitkilerin su tutma yeteneğini artırır ve kuraklık stresi altında dayanıklılığı destekler (Sairam ve Tyagi, 2004). Mannitol kullanımı, bitkilerin su kıtlığına karşı geliştirdiği adaptasyon mekanizmalarının daha iyi anlaşılmasını sağlar. Son yıllarda yapılan bazı çalışmalarda mısır, sardunya, muz, sorgum, fıstık, soya fasulyesi, kekik, patates ve pirinç bitkilerinde kuraklık stresine dayanıklı tiplerin tanımlanmasında *in vitro* kültürlerde PEG ve mannitol kullanımı

bildirilmiştir (Gopal ve ark., 2007; Matheka ve ark., 2008; Hassanein ve ark., 2010; Raia ve ark., 2011; Bidabadi ve ark., 2012; Tsago ve ark., 2014; Rayahu ve Sudarsono, 2015; Sunaryo ve ark., 2017; Mansinhos ve ark., 2022).



Şekil 1. *Thymus lotocephalus* türünün besi ortamlarında 7 haftalık kültürden sonraki *in vitro* sürgünleri, sırasıyla 0 (kontrol), %2, %5 veya %7 PEG, Fe₃O₄ nanoparçacıkları (NPs), salisilik asit (SA), metil jasmonat (MeJA), %7 PEG + Fe₃O₄ NPs, %7 PEG + SA veya %7 PEG + MeJA içeren besi ortamlarında 7 haftalık kültürden sonraki görünümü (Mansinhos ve ark., 2022).

Kuraklık stresine karşı dayanıklılık sağlamak amacıyla *in vitro* seleksiyonda kullanılan bir başka önemli kimyasal prolindir. Prolin, kuraklık stresi altında birikerek hücrelerin su dengesini korumasına yardımcı olur ve hücre zarlarının stabilitesini sağlar. Ayrıca, prolin,

hücre içi proteinleri ve enzimleri koruyarak kuraklık koşullarında bitkilerin yaşamsal fonksiyonlarını sürdürmesini destekler (Szabados ve Savouré, 2010). Antioksidan savunmayı desteklemek amacıyla *in vitro* seleksiyon süreçlerinde kullanılan askorbik asit (C vitamini) gibi antioksidanlar da kuraklık stresine karşı bitkilerin dayanıklılığını artırır. Kuraklık stresi altında reaktif oksijen türleri (ROS) birikimi artarak hücrelere zarar verir. Askorbik asit, ROS seviyesini azaltarak hücrelerde oksidatif stresi hafifletir ve dayanıklılık mekanizmalarını güçlendirir (Mittler, 2002). Sonuç olarak, *in vitro* seleksiyon tekniğinde kullanılan PEG, mannitol, prolin ve askorbik asit gibi kimyasallar, kuraklık stresi altında bitkilerin savunma mekanizmalarını anlamamıza ve dayanıklı türlerin seçilmesine olanak tanır. Bu kimyasalların kullanımı, tarımsal verimliliği artırmak için dayanıklı bitkilerin geliştirilmesinde önemli bir rol oynamaktadır.

2. TUZLULUK STRESİNİN TARIMSAL VERİMLİLİĞE ETKİSİ İLE MÜCADELEDE *İN VİTRO* SELEKSİYON TEKNİĞİ

Tarımda karşılaşılan en önemli abiyotik stres faktörlerinden biri olan tuzluluk stresi, bitkilerde ciddi fizyolojik ve biyokimyasal değişimlere yol açarak tarımsal verimliliği önemli ölçüde düşürmektedir (Munns ve Tester, 2008). Dünyada yaklaşık %20 oranında sulanan tarım arazisinin tuzluluk sorunu yaşadığı ve yılda yaklaşık 1.5 milyon hektar tarım arazisinin tuzlanma sebebiyle verimden düştüğü tahmin edilmektedir (Ashraf ve Foolad, 2007). Tuzluluk stresinin bitki gelişimi üzerindeki zararlı etkilerini azaltmak amacıyla kullanılan *in vitro* seleksiyon tekniği, dayanıklı genotiplerin hızlı bir şekilde seçilmesine olanak

sağlar. Bu teknikte, laboratuvar ortamında çeşitli kimyasallar kullanılarak bitki hücrelerinin tuzlu ortamlarda nasıl tepki verdikleri değerlendirilir. Böylece, tuzluluk stresine dayanıklı bireylerin seçimi mümkün hale gelir (Ashraf ve Foolad, 2007). Tuz stresine dayanıklı veya tolerant bitkilerin elde edilmesinde *in vitro* seleksiyon tekniği, bitki doku veya hücrelerinin steril bir ortamda, tuz stresine maruz bırakılarak yetiştirilmesini ve bu stres koşullarında hayatta kalan bireylerin seçilmesini içerir. Bu seçilen bireyler daha sonra rejenerasyon kabiliyetlerini kullanarak tüm bitkilere dönüştürülür, böylece tuza dayanıklı çeşitler hızlı bir şekilde geliştirilir.

Tuzluluğa dayanıklılığın en yaygın incelenen mekanizmalarından biri, iyon homeostazının sağlanabilmesidir. Tuz stresi altında, bitki dokularında sodyum (Na^+) ve klor (Cl^-) iyonlarının birikimi toksik etkilere neden olabilir. *In vitro* seleksiyon, bu iyonları etkin bir şekilde dışarıda tutabilen veya aşırı iyonları depolayarak sitotoksik etkilerini azaltabilen genotiplerin seçilmesine olanak tanır (Borsani ve ark., 2001). *In vitro* seleksiyon çalışmalarında yaygın olarak kullanılan kimyasallardan biri sodyum klorür (NaCl) olup, bu bileşik kültür ortamında tuzluluk stresi oluşturmak için tercih edilir. NaCl konsantrasyonları artırılarak bitki hücreleri, doku veya kallus kültürleri tuz stresine maruz bırakılır ve bu ortamda hayatta kalabilen veya gelişimini sürdürebilen hücreler dayanıklılık açısından seçilir (Flowers, 2004). Muchate ve ark., 2019 *Spinacia oleracea* (ıspanak) *in vitro* sürgün kültürlerinin farklı tuz stres seviyelerine (0 (kontrol), 100, 200 ve 300 mM NaCl) verdiği tepkiyi ve tuz stresi altında 20-

hidroksiiekdison (20E) birikimini araştırmışlardır. Çalışmaları, düşük ve orta seviyedeki tuz stresinin (100-200 mM NaCl), yüksek tuz seviyelerine (300 mM) kıyasla sürgün kültürlerinin büyümesi ve doku su içeriği üzerinde daha az etkili olduğunu göstermiştir. Tuzla muamele edilen sürgün kültürleri, uyumlu çözünenlerin önemli birikimi, toplam çözünür şekerler ve artan antioksidan enzim aktivitesi ile belirtildiği gibi, daha iyi ozmotik uyum göstermiştir. NaCl stresi arttıkça, Na⁺ birikiminde doğrusal bir artış gözlenirken, K⁺ ve Ca²⁺ içerikleri önemli ölçüde azalmıştır. Ek olarak, biyoaktif bileşik 20E'nin birikimi incelenmiş ve sonuçlar, 200 mM NaCl ile muamele edilen sürgün kültürlerinin, muamele edilmeyen kültürlere göre 2,9 kat daha fazla 20E biriktirdiğini göstermiştir. Bu sonuçlar, *Spinacia oleracea*'nın önemli bir tuz toleransı ve üstün ozmotik ayarlama yetenekleri sergilediğini ve biyoaktif ikincil metabolit üretimi için uygun bir aday olabileceğini göstermiştir.



Şekil 2. *Spinacia oleracea* türüne ait in vitro sürgünlerin, MS besin ortamına 20 µM 2ip [6-(γ,γ-Dimetilallilamino) pürin] ve farklı konsantrasyonlarda sodyum klorür (NaCl) (0, 100, 200 ve 300 mM) eklenerek kültüre edilmesi ve sodyum klorürün (NaCl) in vitro sürgün büyümesi üzerine etkisi (Muchate ve ark., 2019).

NaCl kullanımı, tuz stresi koşullarında bitki hücrelerinin iyon dengesini koruma ve ozmotik denge sağlama yeteneklerinin değerlendirilmesine olanak tanır. Pirinç, buğday ve domates gibi ekonomik olarak önemli bitkilerde yapılan çalışmalar, *in vitro* seleksiyonun tuzluluk stresine karşı direnç geliştirmede etkili bir yöntem olduğunu ortaya koymaktadır. Örneğin, sodyum klorür (NaCl) stresine maruz bırakılan pirinç kallus dokuları kullanılarak geliştirilen dayanıklı hatlar, tuzlu tarla koşullarında daha yüksek büyüme ve verim göstermiştir (Lutts ve ark., 1996). Benzer şekilde, *in vitro* seleksiyon yöntemiyle seçilen buğday ve domates bitkilerinde de tuz stresinin neden olduğu oksidatif zararı azaltan antioksidan enzim aktivitelerinin arttığı gözlemlenmiştir (Borsani ve ark., 2001). Ayrıca *Foeniculum vulgare*'nin tuzluluğa toleranslı varyantlarını araştırılan bir çalışmada *in vitro* kültürdeki hücresel tepkiler ile stres koşulları altında *in vivo* bitki performansı arasında güçlü bir ilişki olduğunu gösterilmiştir (Khorami ve Safarnejad, 2011). Benzer şekilde, *Ficus carica* ile yapılan bir çalışmada *in vitro* seleksiyonun farklı NaCl konsantrasyonlarını tolere edebilen genotiplerin tanımlanabileceği ve böylece tuza toleranslı genotipler geliştirmek için *in vitro* seleksiyon tekniğinin hızlı ve etkili bir yöntem olduğu belirtilmiştir (Granata, 2023). Bu örnekler, *in vitro* seleksiyon tekniğinin geleneksel ıslah ve genetik mühendisliği yöntemlerine tamamlayıcı bir çözüm olarak tuza dayanıklı çeşitlerin geliştirilmesinde önemli bir rol oynadığını göstermektedir. *In vitro* seleksiyon tekniği, tarımsal üretkenliği düşüren tuzluluk stresinin olumsuz etkileriyle mücadelede etkili bir mücadele tekniği olarak

karşımıza çıkmaktadır. Hızlı bir seçim ortamı sağlayarak tuza dayanıklı bitki çeşitlerinin geliştirilmesini hızlandıran bu tekniğin, özellikle tuzlanmaya eğilimli bölgelerde sürdürülebilir tarımı destekleyeceği düşünülmektedir. Gelecekte, *in vitro* seleksiyonun moleküler ıslah ve genetik mühendisliği yaklaşımlarıyla entegre edilmesi, çevresel streslere dayanıklı bitki çeşitlerinin daha verimli ve hassas bir şekilde geliştirilmesine katkı sunacaktır.

3. AĞIR METAL STRESİNİN TARIMSAL VERİMLİLİĞE ETKİSİ İLE MÜCADELEDE *İN VİTRO* SELEKSİYON TEKNİĞİ

Ağır metal stresi, sanayileşme ve yanlış tarımsal uygulamalar nedeniyle toprakta ve su kaynaklarında biriken toksik metallerin bitki fizyolojisi üzerinde yarattığı olumsuz etkilerdir. Özellikle kurşun (Pb), kadmiyum (Cd), cıva (Hg) ve bakır (Cu) gibi ağır metaller, bitkilerin büyüme ve gelişme süreçlerini engelleyerek tarımsal verimliliği ciddi biçimde azaltmaktadır (Sharma ve Dubey, 2005). Bu stres faktörleri, bitkilerin su ve besin alımını, fotosentetik etkinliklerini ve oksidatif dengeyi bozarak ciddi fizyolojik zararlara neden olmaktadır. Ağır metallerin neden olduğu verim kayıplarını azaltmaya yönelik olarak, *in vitro* seleksiyon tekniği, dayanıklı genotiplerin hızlı ve etkili bir şekilde seçilmesi için önemli bir araç olarak değerlendirilmektedir (Rout ve Das, 2003).

In vitro seleksiyon, bitki hücrelerinin veya dokularının laboratuvar ortamında, ağır metal içeren besi ortamlarına maruz bırakılması ve bu ortamlarda yaşayabilen bireylerin seçilmesi temeline dayanır. Bu

yöntem, kontrollü koşullarda toksik metallerin yüksek konsantrasyonları altında yaşama yeteneği gösteren genotiplerin hızla seçilmesine olanak tanır. Seçilen dayanıklı hücreler, yeniden bitki haline getirilerek tarımsal kullanıma uygun dayanıklı çeşitler oluşturulabilir (Pilon-Smits ve Freeman, 2006). Bu süreçte, ağır metallere karşı dayanıklılığı arttıran spesifik özelliklerin belirlenmesi, geleneksel ıslah yöntemlerinden daha hızlı gerçekleşir ve dayanıklı çeşitlerin geliştirilme süreci kısalmaktadır.

Ağır metallere karşı dayanıklılıkta öne çıkan en önemli mekanizmalardan biri, hücre içi detoksifikasyon sistemleridir. Bitkiler, ağır metal iyonlarını şelatlayarak veya onları hücre içindeki belirli organellerde, özellikle vakuoller içerisinde izole ederek sitotoksik etkilerden korunur. Bu tür metal şelatlayıcı moleküllerin başında fitokelatinler ve metalotiyoneinler gelmektedir. In vitro seleksiyon, ağır metal stresine karşı bu şelatlayıcı molekülleri yüksek düzeyde üretebilen hücrelerin seçilmesine olanak tanır ve ağır metallerin toksik etkisini azaltmak için doğal bir savunma mekanizması sağlar (Clemens, 2006).

Ayrıca, ağır metallerin neden olduğu oksidatif stresle başa çıkmak için bitkilerde antioksidan enzim sistemlerinin güçlendirilmesi de önemlidir. In vitro seleksiyon tekniği, süperoksit dismutaz (SOD), katalaz (CAT) ve peroksidaz (POD) gibi antioksidan enzim aktivitesini yüksek düzeyde tutabilen genotiplerin seçimini sağlar. Bu enzimler, ağır metal birikiminin neden olduğu reaktif oksijen türlerinin (ROS) etkisini azaltarak bitkilerin hayatta kalma oranlarını artırır (Gratão ve

ark., 2005). Dolayısıyla, in vitro seleksiyon ile oksidatif stresle başa çıkabilen dayanıklı bitki çeşitleri geliştirilebilir.

In vitro seleksiyon çalışmalarında kullanılan başlıca kimyasallardan biri kadmiyum klorür ($CdCl_2$) olup, bu kimyasal kadmiyum (Cd) stresi oluşturarak bitkilerin bu metale karşı dayanıklılığını test etmek amacıyla kullanılır. Kadmiyum, bitki kökleri tarafından kolayca emilen ve bitkinin metabolik süreçlerinde olumsuz etkilere yol açan bir ağır metaldir. Kadmiyumun neden olduğu stres altında, dayanıklılık gösteren hücreler ve dokular, $CdCl_2$ ile yapılan seleksiyon çalışmalarında kolayca tespit edilebilir ve seçilebilir (Sanità di Toppi ve Gabbrielli, 1999). Özellikle pirinç, domates ve ayçiçeği gibi bitkilerde yapılan çalışmalar, in vitro seleksiyonun ağır metal stresiyle mücadelede etkili olduğunu göstermektedir. Kadmiyum ve bakır stresine maruz bırakılan pirinç dokularında yapılan in vitro seleksiyon, seçilen hatların ağır metal birikimini azaltıcı mekanizmalar geliştirdiğini ortaya koymuştur (Rout ve Das, 2003).

Kurşun (Pb) gibi ağır metallerin neden olduğu stres koşullarını oluşturmak için ise kurşun nitrat ($Pb(NO_3)_2$) kimyasalı kullanılmaktadır. Pb, bitkilerde büyüme engellemeleri ve oksidatif strese yol açarak ciddi zararlara sebep olur. In vitro ortamda $Pb(NO_3)_2$ kullanılarak yapılan seleksiyon çalışmaları, kurşun stresine dayanıklı genotiplerin belirlenmesi ve seçilmesi için önemlidir. Bu tip kimyasallar, bitkilerin metal iyonlarını tutma, şelatlama veya bu metallerin birikimini azaltma gibi mekanizmalarla nasıl başa çıktığını gözlemlemeye olanak tanır (Sharma ve Dubey, 2005).

Bu durum, in vitro seleksiyon tekniğinin, ağır metal stresine dayanıklı bitkilerin geliştirilmesinde geleneksel yöntemlere destek sağlayan önemli bir araç olduğunu göstermektedir.

Bitkiler, ağır metal stresine karşı oluşturdukları savunma mekanizmalarını desteklemek amacıyla antioksidan enzim aktivitelerini artıran kimyasallar kullanılmaktadır. Örneğin, glisin betain ve prolin gibi uyumlu çözeltiliklerin in vitro seleksiyonda uygulanması, ağır metallerin sebep olduğu oksidatif strese karşı bitkilerin savunma kapasitesini artırabilir. Bu kimyasallar, süperoksit dismutaz (SOD) ve katalaz (CAT) gibi antioksidan enzimlerin aktivitesini artırarak, ağır metal stresinin yarattığı reaktif oksijen türlerinin (ROS) etkisini hafifletir (Gratão ve ark., 2005).

Bununla birlikte, metallerin hücre içi birikimini azaltmak için kullanılan etilen diamin tetraasetik asit (EDTA) gibi şelatlayıcı kimyasallar da ağır metal seleksiyon çalışmalarında yer almaktadır. EDTA, metal iyonları ile güçlü bağlar kurarak bunların bitki hücrelerinde serbest kalmasını önler. EDTA gibi şelatlayıcıların kullanımı, ağır metallerin toksik etkilerini azaltırken, bitkilerin stres altında gösterdiği büyüme ve gelişme performansını destekler (Márquez-García ve ark., 2013).

Sonuç olarak, in vitro seleksiyon tekniğinde ağır metal stresine karşı dayanıklılık geliştirmek için kadmiyum klorür, kurşun nitrat, glisin betain, prolin ve EDTA gibi kimyasallar kullanılmaktadır. Bu kimyasallar sayesinde bitkilerin ağır metallere karşı direnç

mekanizmaları etkili bir şekilde incelenebilmekte ve dayanıklı genotipler seçilerek tarımsal verimliliği artırma hedefi doğrultusunda önemli adımlar atılabilmektedir.

Tüm deneysel çalışmalarda olduğu gibi bitkilerde strese toleranslı genotip elde etme konusunda in vitro seleksiyon yönteminin de kendine has bazı dezavantajları bulunmaktadır. Bu konudaki en büyük dezavantaj, farklı bitki türleri için standardize edilmiş protokollerin henüz yeterince yaygınlaşmamış olmasıdır. Diğer bir risk ise kültür ortamında yetiştirilen bitki hücreleri ve dokularında gözlemlenen tolerans mekanizmalarının, bütün bir bitkinin gösterdiği tolerans mekanizmalarıyla her zaman örtüşmeyebilme durumudur. Bu durumun sebebi ise epigenetik faktörlerdir. Çünkü in vitro kültür koşullarında, tolerans gösteremeyen hücrelerin bazıları epigenetik değişikliklere uğrayarak sonradan tolerans kazanabilir. Bu nedenle, epigenetik adaptasyonun etkilerini minimize etmek için daha kapsamlı ve uzun süreli in vitro seleksiyon protokollerinin kullanılması gerekmektedir (Smýkal ve ark., 2007; Miguel ve ark., 2011).

SONUÇ

İklim değişikliği ve dünya nüfusundaki hızlı artış, tarımsal üretimi sürdürülebilir bir şekilde artırmayı gerektiren başlıca etkenlerdir. Tarımsal verimliliği tehdit eden abiyotik stres faktörleri, bitkilerde büyüme, gelişim ve verim kayıplarına yol açarak gıda güvenliğini ciddi biçimde tehlikeye sokmaktadır. Bu bağlamda, in vitro seleksiyon teknikleri, geleneksel ıslah yöntemlerini tamamlayıcı bir araç olarak,

stres toleransı yüksek bitki türlerinin hızlı bir şekilde geliştirilmesi için yenilikçi ve umut vadeden bir yöntem olarak dikkat çekmektedir.

Kuraklık stresi gibi su yetersizliğinden kaynaklanan sorunlar, bitkilerin ozmotik düzenleme mekanizmalarını hedef alan polietilen glikol (PEG) ve mannitol gibi kimyasallarla in vitro ortamda simüle edilebilmektedir. Bu yöntem, bitki türlerinin su tutma kapasitesini artırmaya yönelik stratejiler geliştirilmesini sağlamaktadır. Benzer şekilde, tuzluluk stresine yönelik çalışmalarda, NaCl kullanılarak bitki hücrelerinin iyon homeostazını koruma yeteneği değerlendirilmekte ve bu sayede tuzlanmaya eğilimli tarım alanları için dayanıklı türler seçilmektedir. Ağır metal stresine karşı ise kadmiyum klorür ve kurşun nitrat gibi kimyasallar kullanılarak bitkilerde detoksifikasyon mekanizmaları incelenmekte ve ağır metallerin toksik etkilerine dirençli genotipler geliştirilmektedir.

İn vitro seleksiyonun bu avantajlarına rağmen, bazı sınırlamalar da göz önünde bulundurulmalıdır. Farklı bitki türleri için standardize protokollerin yetersizliği, bu tekniğin geniş ölçekli uygulanabilirliğini sınırlayan başlıca faktörlerden biridir. Ayrıca, in vitro ortamda gözlemlenen stres toleransı mekanizmalarının doğal tarla koşullarında her zaman aynı etkiyi göstermemesi, epigenetik adaptasyonların önemini ortaya koymaktadır. Bu durum, daha kapsamlı ve uzun süreli in vitro seleksiyon çalışmalarını gerekli kılmaktadır.

Tarımsal verimliliği artırmak ve gıda güvenliğini sağlamak amacıyla in vitro seleksiyonun etkinliğini artırmak için bazı stratejik adımlar

atılmalıdır. Öncelikle, bu teknik için farklı bitki türlerine uygun standart protokoller oluşturulmalı ve epigenetik değişimlerin etkilerini minimize eden yöntemler geliştirilmelidir. In vitro seleksiyon, modern gen düzenleme araçlarıyla entegre edilerek stres toleransına yönelik çalışmalar daha hızlı ve etkili hale getirilebilir. Laboratuvar ortamında elde edilen dayanıklı genotiplerin tarla koşullarında test edilerek ticari çeşitler haline getirilmesi, bu yöntemin tarımsal üretimde yaygın olarak kullanılmasını sağlayacaktır. Ayrıca, çiftçilere ve tarım uzmanlarına yönelik farkındalık eğitimleri ile bu tekniklerin yaygınlaştırılması, sürdürülebilir tarım uygulamalarının gelecekteki başarısı için kritik öneme sahiptir.

Sonuç olarak, in vitro seleksiyon teknikleri, abiyotik stres faktörleriyle mücadelede önemli bir çözüm yolu sunmakta ve tarımsal üretimde sürdürülebilirliğin sağlanmasında kilit bir rol oynamaktadır. Gelecekte bu tekniklerin moleküler ıslah ve agroekolojik yaklaşımlarla entegre edilmesi, çevresel zorluklara dayanıklı yeni bitki çeşitlerinin geliştirilmesine büyük katkı sağlayacaktır.

KAYNAKÇA

- Anjum, S. A., Ashraf, U., Tanveer, M., Khan, I., Hussain, S., Shahzad, B., & Wang, L. C. (2017a). Drought induced changes in growth, osmolyte accumulation and antioxidant metabolism of three maize hybrids. *Frontiers in Plant Science*, 8, 69.
- Anjum, S. A., Ashraf, U., Zohaib, A., Tanveer, M., Naeem, M., Ali, I., & Nazir, U. (2017b). Growth and development responses of crop plants under drought stress: A review. *Zemdirbyste*, 104, 267–276.
- Ashraf, M., & Foolad, M. R. (2007). Roles of glycine betaine and proline in improving plant abiotic stress resistance. *Environmental and Experimental Botany*, 59(2), 206-216.
- Bidabadi, S.S.; Meon, Z.; Wahab, S.; Subramaniam, M.M. In vitro selection and characterization of water stress tolerant lines among ethyl methane sulphonate (EMS) induced variants of banana (*Musa* spp., with AAA genome). *Aust. J. Crop Sci.* 2012, 6, 567–575.
- Borsani, O., Valpuesta, V., & Botella, M. A. (2001). Evidence for a role of salicylic acid in the oxidative damage generated by NaCl and osmotic stress in *Arabidopsis* seedlings. *Plant Physiology*, 126(3), 1024-1030.
- Clemens, S. (2006). Toxic metal accumulation, responses to exposure and mechanisms of tolerance in plants. *Biochimie*, 88(11), 1707-1719. <https://doi.org/10.1016/j.biochi.2006.07.003>
- Farooq, M., Kobayashi, N., Ito, O., Wahid, A., & Serraj, R. (2010). Broader leaves result in better performance of *indica* rice under drought stress. *Journal of Plant Physiology*, 167, 1066–1075.
- Flowers, T. J. (2004). Improving crop salt tolerance. *Journal of Experimental Botany*, 55(396), 307-319.
- Gopal, J.; Iwama, K. (2007). In vitro screening of potato against water stress mediated through sorbitol and polyethylene glycol. *Plant Cell Rep.* 26, 693–700.
- Gratão, P. L., Polle, A., Lea, P. J., & Azevedo, R. A. (2005). Making the life of heavy metal-stressed plants a little easier. *Functional Plant Biology*, 32(6), 481-494.

- Hasegawa, P. M., Bressan, R. A., Zhu, J. K., & Bohnert, H. J. (2000). Plant cellular and molecular responses to high salinity. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*, 51(1), 463-499.
- Hassanein, A.M. (2010). Establishment of efficient in vitro methods for drought tolerance evaluation in *Pelargonium*. *J. Hortic. Sci. Ornam. Plants*, 2, 8–15.
- Hoque, M. A., Okuma, E., Banu, M. N. A., Nakamura, Y., Shimoishi, Y., & Murata, Y. (2007). Exogenous proline and glycinebetaine increase NaCl-induced ascorbate–glutathione cycle enzyme activities and proline improves salt tolerance more than glycinebetaine in tobacco *Bright Yellow-2* suspension-cultured cells. *Journal of Plant Physiology*, 164(11), 1457-1468.
- Iseki, K., Homma, K., Shiraiwa, T., Jongdee, B., & Mekwatanakarn, P. (2014). The effects of cross tolerance to oxidative stress and drought stress on rice dry matter production under aerobic conditions. *Field Crops Research*, 163, 18–23.
- Khan, M. B., Hussain, M., Raza, A., Farooq, S., & Jabran, K. (2015). Seed priming with CaCl₂ and ridge planting for improved drought resistance in maize. *Turkish Journal of Agriculture- Food Science and Technology*, 39, 193–203.
- Lutts, S., Kinet, J. M., & Bouharmont, J. (1996). NaCl-induced senescence in leaves of rice (*Oryza sativa* L.) cultivars differing in salinity resistance. *Annals of Botany*, 78(3), 389-398.
- Mansinhos, I., Gonçalves, S., Rodríguez-Solana, R., Duarte, H., Ordóñez-Díaz, J. L., Moreno-Rojas, J. M., & Romano, A. (2022). Response of *Thymus lotocephalus* in vitro cultures to drought stress and role of green extracts in cosmetics. *Antioxidants*, 11(8), 1475.
- Márquez-García, B., Sánchez, J., Llinares, J. V., & Sevilla, F. (2013). Changes in antioxidant and metal chelating capacity of tolerance in *Pisum sativum* L. cv. Sparkle under copper stress. *Environmental and Experimental Botany*, 95, 72-79. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2013.05.003>.
- Matheka, J.M.; Magiri, E.; Rasha, A.O.; Machuka, J. (2008). In vitro selection and characterization of drought tolerant somaclones of tropical maize (*Zea mays* L.). *Biotechnology*, 7, 641–650.

- Miguel, C.; Marum, L. An (2011). Epigenetic View of Plant Cells Cultured in Vitro: Somaclonal Variation and Beyond. *J. Exp. Bot.*,62, 3713–3725.
- Mittler, R. (2002). Oxidative stress, antioxidants and stress tolerance. *Trends in Plant Science*, 7(9), 405-410.
- Muchate, N. S., Rajurkar, N. S., Suprasanna, P., & Nikam, T. D. (2019). NaCl induced salt adaptive changes and enhanced accumulation of 20-hydroxyecdysone in the in vitro shoot cultures of *Spinacia oleracea* (L.). *Scientific reports*, 9(1), 12522.
- Munns, R., & Tester, M. (2008). Mechanisms of salinity tolerance. *Annual Review of Plant Biology*, 59, 651-681.
- Murashige, T., Skoog, F. (1962). A revised medium for rapid growth and bio assays with tobacco tissue cultures. *Physiologia Plantarum*, 15(3), 473-497.
- Pilon-Smits, E. A. H., & Freeman, J. L. (2006). Environmental cleanup using plants: Biotechnological advances and ecological considerations. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 4(4), 203-210.
- Rahayu, E.S.; Sudarsono, S. (2015). In vitro selection of drought tolerant peanut embryogenic calli on medium containing polyethylene glycol and regeneration of drought tolerant plants. *Emir. J. Food Agric*, 27, 475–487.
- Raia, M.K.; Kalia, R.K.; Singh, R.; Gangola, M.P.; Dhawan, A.K. (2011). Developing stress tolerant plants through in vitro selection An overview of the recent progress. *Environ. Exp. Bot.* 2011, 71, 89–98.
- Rout, G. R., & Das, P. (2003). Effect of metal toxicity on plant growth and metabolism: I. Zinc. *Agronomie*, 23(1), 3-11. <https://doi.org/10.1051/agro:2002074>
- Sairam, R. K., & Tyagi, A. (2004). Physiology and molecular biology of salinity stress tolerance in plants. *Current Science*, 86(3), 407-421.
- Sanità di Toppi, L., & Gabbrielli, R. (1999). Response to cadmium in higher plants. *Environmental and Experimental Botany*, 41(2), 105-130.
- Sharma, P., Dubey, R. S. (2005). Lead toxicity in plants. *Brazilian Journal of Plant Physiology*, 17(1), 35-52.

- Smýkal, P.; Valledor, L.; Rodriguez, R.; Griga, M. (2007). Assessment of Genetic and Epigenetic Stability in Long-Term in Vitro Shoot Culture of Pea (*Pisum Sativum* L.). *Plant Cell Rep.*, 26, 1985–1998.
- Sohag, A. A. M., Tahjib-Ul-Arif, M., Brestic, M., Afrin, S., Sakil, M. A., Hossain, M. T., Hossain, M. A., & Hossain, M. A. (2020). Exogenous salicylic acid and hydrogen peroxide attenuate drought stress in rice. *Plant, Soil and Environment*, 66, 7–13.
- Sunaryo, W.; Wahyu, W.; Nurhasanah, S. (2017). Drought tolerance selection of soybean lines generated from somatic embryogenesis using osmotic stress simulation of poly-ethylene glycol (PEG). *Nusantara Biosci.* 2017
- Swain, P., Anumalla, M., Prusty, S., Marndi, B. C., & Rao, G. J. N. (2014). Characterization of some Indian native land race rice accessions for drought tolerance at seedling stage. *Australian Journal of Crop Sciences*, 8, 324–331.
- Szabados, L., & Savouré, A. (2010). Proline: A multifunctional amino acid. *Trends in Plant Science*, 15(2), 89-97.
- Tsago, Y.; Andargie, M.; Takele, A. (2014). PEG induced drought stress. *Plant Sci. Today*.
- Turner, N. C. (2004). Sustainable production of crops and pastures under drought in a Mediterranean environment. *Annals of Applied Biology*, 144(2), 139-147.
- Verbruggen, N., & Hermans, C. (2008). Proline accumulation in plants: A review. *Amino Acids*, 35(4), 753-759.
- Verslues, P. E., Agarwal, M., Katiyar-Agarwal, S., Zhu, J., & Zhu, J. K. (2006). Methods and concepts in quantifying resistance to drought, salt and freezing, abiotic stresses that affect plant water status. *Plant Journal*, 45(4), 523-539.
- Wijerathna-Yapa, A., & Pathirana, R. (2022). Sustainable Agro-Food Systems for Addressing Climate Change and Food Security. *Agriculture*, 12, 1554.

BÖLÜM 3

BİYOSTİMÜLANTLAR VE ABİYOTİK STRES KOŞULLARINDAKİ ETKİLERİ

Dr. Öğr. Üyesi Sibel BOYSAN CANAL^{1*}

DOI: <https://dx.doi.org/10.5281/zenodo.14541785>

^{1*} Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Ziraat Fakültesi Toprak Bilimi ve Bitki Besleme Bölümü, Van, Türkiye. *sibelboysan@hotmail.com

GİRİŞ

Biyostimülantların 1997'de yapılan ilk tanımı; çok küçük miktarlarda büyümeyi teşvik eden malzemelerdir. Biyostimülantların bu şekildeki tanımı genellikle büyük miktarlarda uygulanan ve büyümeyi teşvik edici toprak iyileştirmelerinden ve içinde besin elementi bulunan gübrelerden onu ayırır (Zhang ve Schmidt, 1997). Biyostimülantlar, aynı zamanda bitki büyümesini, besin alımı ve çiçeklenmeyi ürün verimini ve meyve gelişimini teşvik eden aynı zamanda bitkinin abiyotik ve biyotik stres koşullarına karşı toleransını artıran çevre dostu bioaktif bileşikler içeren gübreleme ürünleridir (Bulgari ve ark., 2015; Yakhin ve ark., 2017).

Biyostimülantlar, genel sağlığı ve canlılığı iyileştiren doğal preparatlar arasındadır. Bitkilerin büyümesinin yanında enfeksiyona karşı korunmasını da sağlar. Doğal toprak uyarıcıları faydalı toprak organizmalarının gelişimini teşvik edebilir. Üretimi yapılan mahsullerin hem verimi hem de kalitesi üzerinde etkisi vardır (Drobek ve ark., 2019). Biyostimülantlar sürdürülebilir tarımda ilgi görmektedir. Çünkü bunların uygulanması, besin kullanım verimliliğini artıran, bitki gelişimini teşvik eden ve gübre tüketiminin azaltılmasına olanak tanıyan çeşitli fizyolojik süreçleri etkinleştirir (Bulgari ve ark., 2015). Bitkiler yaşamları boyunca abiyotik ve biyotik kaynaklı streslere maruz kalmaktadır. Bitkilerin yaşamlarında stres etkilerini yenebilmesi için, biyostimülant ve bitki hormonları gibi dışarıdan yapılan uygulamalar tarımsal ürün verimi ve kalitesi için gereklidir. Bu amaçla bu bölümde, tuz, sıcaklık ağır metal ve kuraklık gibi abiyotik stres koşullarında,

biyostimülantların bitkideki etkinliğinin ortaya konması ürün verimi ve kalitesi üzerindeki etkinlikleri ele alınacaktır.

1. BİYOSTİMÜLANTLARIN SINIFLANDIRILMASI

Bitki gelişim ve büyümesi üzerinde geniş etkinliğe sahip olan biyostimülantlar sırası ile, Protein hidrolizatları, hümik asitler ve fulvik asitler, deniz yosunu makroalg ekstraktı, arbüsküler mikorizal mantarlar ve bitki büyümesini teşvik eden bakteriler (PCPR) olarak sınıflandırmak mümkündür (Regulation (EU) 2019).

1.1. Bitkisel ve hayvansal protein hidrolizatları

Farklı hayvan ve bitkilerden elde edilen proteinlerin kısmi hidrolizi ile üretilen serbest amino asitler, polipeptitler ve oligopeptitlerin karışımlarıdır. Protein hidrolizatlarının üretimi için bitki kaynakları, yonca samanı, baklagil tohumları, sebzelerin yan ürünleri ve mısırın ıslak öğütülmesidir. Hayvansal kaynak ise kan unları, deri, balık yan ürünleri, tavuk tüyleri ve kazein dahil olmak üzere bağ veya epitel dokuları yer alır (Cristiano ve ark., 2018).

1.2. Hümik ve fulvik asit

Hümik asit, organik maddelerin mikrobiyal ayrışması ve kimyasal bozunması sonucu oluşan, toprakta bulunan doğal organik moleküllerdir. Toprak organik maddesinin ana bileşenlerinden biridir ve bitki büyümesi, besin alımı ve stres toleransı üzerinde önemli etkileri vardır (Nardi ve ark., 2002). Fulvik asit, hem alkali hem de asidik ortamlarda çözünebilen, yüksek toplam asitlik ve karboksil grupları

içeren bileşiklerdir. Fulvik asitler, humik asitlere kıyasla daha küçük moleküler yapıya sahiptir ve bu nedenle biyolojik membranlardan geçebilirler (Nardi ve ark., 2009).

1.3. Makro alg deniz yosunu özleri

Makro algler kırmızı (*Rhodophyta*), kahverengi (*Phaeophyta*) ve yeşil (*Chlorophyta*) makro alglere bölünmüş yaklaşık 10.000 türden oluşur. Makro alg deniz yosunu özleri, yağ asitleri, polisakkaritler, mineraller ve fitohormonlardan oluşan karışımlardır ve biyostimülant olarak yaygın şekilde kullanılmaktadır. Okyanuslardan ve denizlerden toplanan, deniz yosunlarının kalitesinde ve kimyasal bileşiminde değişikliklere neden olan, dolayısıyla standardizasyon ve tutarlı performansla ilgili zorluklara neden olan organik biyostimülantlardır. Bu amaçla kullanılan bazı yaygın makro alg türleri *Acutodesmus dimorphus*, *Chlorella ellipsoidea*, *Chlorella vulgaris*, *S.platensis*, *Dunaliella salina*, *Scenedesmus quadricauda*, *Calothrix elenkinii* ve *Spirulina maxima*'dır. Bu biyostimülantlar toprağın iyileştirilmesinde, mikroflora üzerinde olumlu etkiler oluşturur, besin kaynağı olarak kullanılabilir ve bitkiler üzerindeki hormonal etkileri gösterir (El Boukhari ve ark., 2020). Fukoidanlar ve aljinatlar gibi poliuronidler kahverengi alglerde bulunur ve metal iyonlarıyla şelat oluşturarak toprağın iyileştirilmesine katkıda bulunur ve böylece yüksek moleküler ağırlıklı polimerler oluşturur. Bu tür çapraz bağlanma nedeniyle oluşan polimerik ağ, toprağın su tutma kapasitesini artırır ve böylece köklerin büyümesini ve toprağın mikrobiyal aktivitesini geliştirir (Khan ve ark., 2009).

1.4. Arbüsküler mikorizal mantarlar

Mikrobiyel biostimulantlar gurubu içinde yer alan arbüsküler mikorizal mantarlar ve bu mantarlar kendi arasında 11 aile olarak yer alır. Bunlar sırası ile şunlardır: *Ambisporaceae*, *Acaulosporaceae*, *Archaeosporaceae*, *Diversisporaceae*, *Claroidoglomeraceae*, *Glomeraceae*, *Gigasporaceae*, *Pacisporaceae*, *Sacculosporaceae* ve *Paraglomeraceae* dir. Bitkiler ile toprak mikroflorasındaki en yaygın simbiyotik yaşam ilişkilerinden biri arbüsküler mikorhizal yaşam biçimidir. Rhizosferde en yaygın ve tarım açısından en önemlisi *Glomeromycota* şubesine ait arbüsküler mikorhizal mantarlar (AMF)'dir (Brundrett ve Ashwath, 2013). Yaşamsal devamlılığını sürdürüebilmek için konukçusu tarafından sağlanan %20'lik karbonlu bileşiklere ihtiyaç duyar. Buna karşılık arbüsküler mikorhizal mantarlar'da hücre içi ve hücreler arası hifler, arbüsküler ve kök apoplastları yoluyla konukçu bitkiye gerekli olan yaşamsal öneme sahip su ve makro besin elementlerinden fosfor ve azot sağlarlar (Diagne ve ark., 2020).

1.5. Bakteriyel biyostimülantlar

Bakteriler, yeryüzünde bulunan mikroorganizmaların en fazla çeşit kapsayan kategorisidir. Toprakta sayısız bakteri bulunur. Bunlar toprak kalitesi üzerine ve yetişen bitki çeşitleri üzerine etki etmektedirler (du Jardin, 2015). Bakteriler, besin maddelerinin sağlanması, biyo-jeokimyasal döngüleri ve besin maddelerinin alım verimliliğini, hastalıklara karşı direncin tetiklenmesini, strese toleransı etkileyerek bitkinin yaşamını etkilemede önemli rol oynarlar (Choudhary ve ark.,

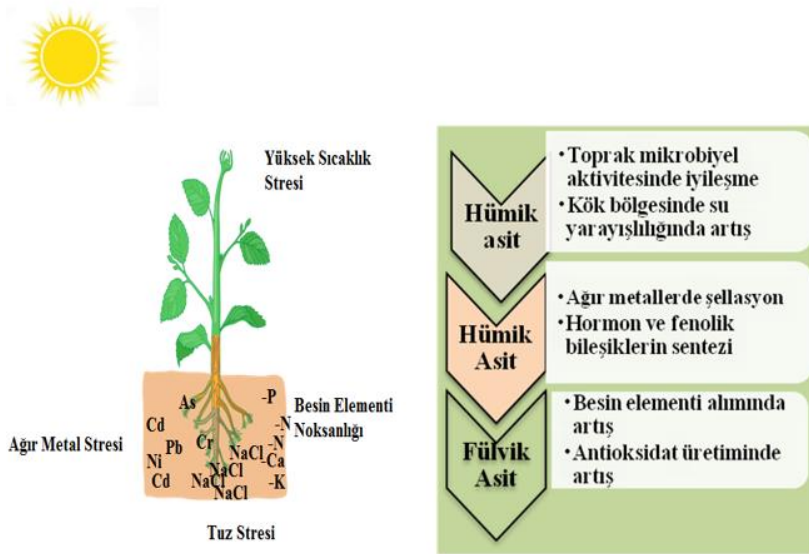
2016). *Enterobakter spp.*, *Ochrobactrum spp.*, *Pseudomonas spp.*, bakteri türleri bitki büyüme ve gelişimi üzerinde olumlu bir etkiye sahiptir. Ayrıca patojenlere karşı düşmanca hareket ettikleri bulunmuştur (Zhao ve ark., 2018). Endofitik bakterilerin soya fasulyesi köklerini *Phytophthora sojae*'nin neden olduğu mantar enfeksiyonlarına karşı korumuştur (Lamont ve ark., 2017). Mısır rizosferinden bir bakteri izolatu, moleküler ve elektronik mikroskop analizlerine göre *Micrococcus luteus* olarak tiplendirildi. Köklerin aşılınması, bu, kök tüyleriyle yoğun bir şekilde kaplanan çok daha fazla yan kök elde edilmesi bitkilerin besin ve su alma verimliliğini artırmıştır (García-Cardenas ve ark., 2022). Mikroorganizmalar tarafından yayılan biyoaktif moleküller arasında oksinler, sitokininler ve uçucu bileşikler gibi hormonal etkilere sahip metabolitler bulunur. Trichoderma mantarları probiyotik özelliklerini göstermek için bitki kökleri ile şeker salgılamaya dayanır (Esparza-Reynoso ve ark., 2021). Trichoderma atroviride'den elde edilen uçucu 6-PP, oksin sinyalini etkileyerek kök büyümesini ve dallanmayı önemli düzeyde artırır. Strese duyarlı önemli bir fitohormon olan etilen fonksiyonunu da düzenleyen *Etilen-İnsensitif 2* genini aktif hale getirir (Garnica-Vergara ve ark., 2016).

2. ABİYOTİK STRES KOŞULLARINDA BİYOSTİMÜLANTLAR

2.1. Hümik asit ve fülvik asit'in etkisi

Hümik maddeler sadece toprak organik karbonunun temel bir bileşeni olarak kabul edilmez, aynı zamanda besin alımını artırmak için fitohormon benzeri aktiviteler gerçekleştirebilen bir biyostimülant

olarak da bilinir. Hümik asitlerin kökenine uygulama yöntemi ve bitki gelişim aşaması bağlı olarak abiyotik stres koşullarına bitkilerin tepkileri farklılık gösterir (Jindo ve ark., 2020). Jindo ve ark., (2020) tarafından belirtildiği gibi, hümik maddeler tarafından uyarılan kök sistemindeki anatomik ve biyokimyasal değişiklikler, şellasyon yoluyla besin mevcudiyetindeki artışla birlikte artan besin alımından sorumlu ana faktörlerdir. Abiyotik stres koşullarında, hümik asitler ve fülvik asitler, bitki köklerinin besin elementlerini daha etkin bir şekilde almasını sağlar. Kök büyümesini ve yan kök oluşumunu teşvik eder. Bu, bitkilerin su ve besin maddelerine erişimini artırarak stres koşullarında daha iyi performans göstermelerini sağlar. Bitki hormonlarına benzer etkiler göstererek hücre bölünmesi ve uzamasını teşvik ederler. Bu, bitkilerin büyüme ve gelişimini destekler (Calvo ve ark., 2014; Şekil 1).



Şekil 1. Hümik ve fülvik asitin abiyotik stres koşullarına etkisi

Hümik asitler, bitkilerdeki reaktif oksijen türlerinin (ROS) seviyelerini düzenleyerek oksidatif stresi azaltır. Bu, hücre zarlarının ve diğer hücresel yapıların korunmasına yardımcı olur. Fulvik asitler, bitkilerde antioksidan enzimlerin aktivitesini artırarak oksidatif stresi azaltır (Calvo ve ark., 2014). Belirli humik maddelerin yapısal özellikleri, yüksek sayıda oksijenli ve fenollerini içeren fonksiyonel grupları (CO₂H₂, OH fenollerini ve C=O) dahil olmak üzere, metal iyonlarıyla etkileşime girerler. Bu etkileşimlerden bazıları, humik maddelerin metalik elementlerle kompleksler oluşturmasını içerir ve böylece metal stres koşullarında bu durum bitkinin beslenmesini etkiler (Berbara and García 2014; Canal ve ark., 2022).

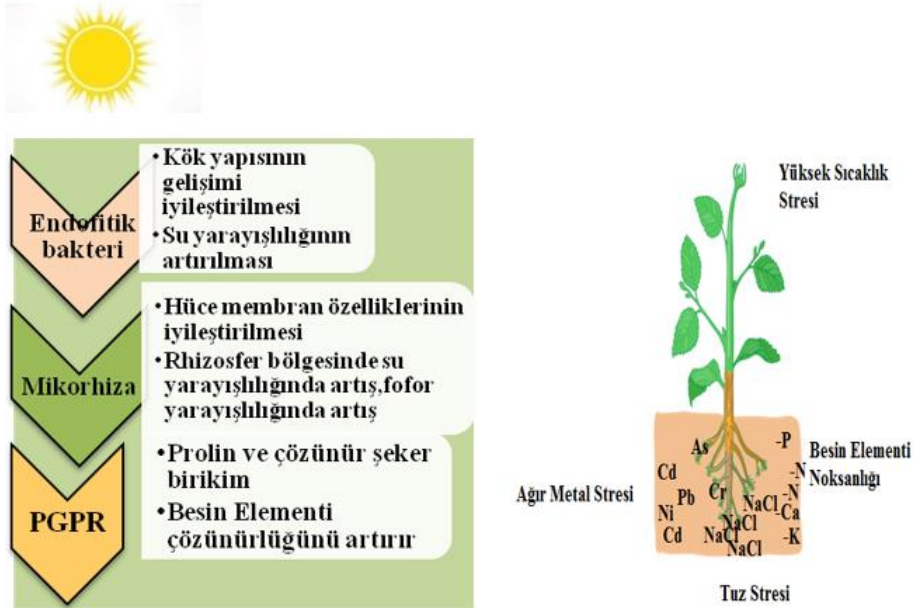
2.2. Arbüsküler mikorizal mantarların etkisi

Arbüsküler mikorizal (AMF) mantarlar gibi simbiyotik mikorizal mantarlar, mikrobiyal popülasyonların temel bir bileşeni oluşturur ve bitkilerin büyümesini ve besin alımını etkiler. Bu simbiyotik mantarların hücreleri, diğer mikroorganizmalarla etkileşimler için daha geniş bir alan sağlar, ayrıca konakçı bitki kök sistemlerinin emici yüzey alanını artırır ve enerji açısından zengin bitki kısımlarının toprağa taşınımı için özel bir yol sağlar. Arbüsküler mikorizal mantarlar (AMF), birçok mahsul de dahil olmak üzere çoğu karasal bitkinin kökleriyle karşılıklı ilişkiler oluşturur (Choi ve ark., 2018; Campo ve ark., 2020). AMF tarafından kök kolonizasyonu süreci konakçı bitkideki mineral besin maddelerinin, özellikle fosfor ve azot alımını artırır (Şekil 2). AM simbiyozu sorgum, mısır, yulaf, darı ve buğday

gibi baklagil bitkileri tarafından etkili bir şekilde kullanılmıştır (Watts-Williams ve ark., 2019; Campo ve ark., 2020).

2.3. Bakteriye biyostimülanların etkisi

Bakteriyel biyostimülanlar, kök bölgesine uygulandıkları zaman kimyasal gübreler ve pestisitlerden bağımsız olarak, abiyotik stres koşullarına toleransı artırabilir, besin alımında artışa neden olur, mahsul kalitesinde geliştirmek için doğal süreçleri teşvik etmektedir (Jack ve ark., 2020). Bakteriye biyostimülanların, yararlı etkisi strese karşı bitkinin gerekli hormonal dengesinin korunması için kökler tarafından alınabilecek gerekli hormonların salgılanmasına yardımcı olur. Köklerin büyüme ve gelişmesinde önemli etkiye sahip IAA PGPR bakterileri tarafından üretilir (Şekil 2; Çakmakçı, 2020).



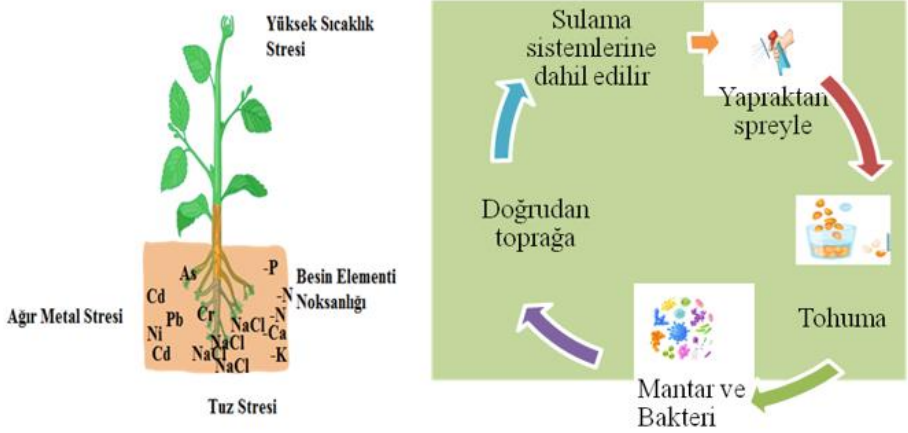
Şekil 2. Bakteriye biyostimülanların abiyotik stres koşullarına etkisi

Bazı çeşit bakteriler, büyüme hormonlarının üretilmesini sağlar ve bu hormonlar bitkide sürgünlerin büyümesini artırır. Etilen stres koşullarında salgılandığı zaman kök ve sürgün büyümesinde azalmaya neden olur. PGPR bakterilerinin ACC (deaminaz) enzim aktivitesini artırması bitkinin etilen üretimini azaltır. Hormonlar dışında bakteriler tarafından salgılanan bazı ikincil metabolitlerde strese karşı toleransı artırır (Tiwari ve ark., 2018). Bakteriyel biyostimülantlar, ağır metal toksisitesi koşullarında bitkilerin toleransı artırmada önemli etkiye sahiptir. Bunun için polisakkaritler, glikoproteinler, lipopolisakkaritler ve peptidler, sideroforlar dahil olmak üzere mikrop kökenli hücre dışı polimerik maddeler ağır metallerle şelat oluşturabilir. Bu hücre dışı polimerik maddelerle ağır metallerin şelat oluşturması ağır metallerin hareketliliğini değiştirerek, toksisiteye engel olur (Ansari ve ark., 2023).

2.4. Abiyotik stres koşullarında biyostimülantların uygulanması

Biyostimülantlar, ürünün büyümesi ve gelişmesinin yanı sıra, mahsülün kalitesini teşvik etmek için, tohumlara, bitkilere ve yaprağa, doğrudan toprağa veya sulama sistemlerine dahil edilerek uygulanan doğal veya sentetik maddelerdir (Van Oosten ve ark. 2017; Wozniak ve ark. 2020). Biyostimülantların, genel olarak bitkilerin büyümesini teşvik etmek için, çözelti, granül ve toz olarak toprağa veya sprey olarak yaprağa ve tohumların ıslatılması ile uygulanabilir (Şekil3). Ancak bazı çalışmalara göre, biyostimülantların yapraktan püskürtülerek uygulanması ürünü nasıl etkileyeceğini kesin olmadığı için sorun yaratabilmektedir. Yaprakların yapısı ve biyostimülantların içeriği bu

açından önem arz etmektedir (Johnson ve ark., 2023). Olası zararları engellemek için yaprakların yapısı dış etkenlere erişime engel oluşturacak şekildedir. Ancak Profesör Gold-Bach'ın Dünya Biyostimülanlar kongresinde “Foliar Application of Bio-stimulants: How to make them reach the apoplast” başlıklı sunumuna göre, biyostimülanlar yaprakların koruyucu bariyerlerini aşabiliyor. Deniz yosunu özlerinden elde edilen biyostimülanlar yapraklara sprej şeklinde uygulanırken, hümik maddeler, azot bazlı olanlar, doğrudan toprağa uygulanırlar. Sulama sistemine eklenen biyostimülanlar su ile birlikte doğrudan absorbe edilebilir (Şekil 3). Goni ve ark., (2018) biyostimülanları uygularken, bitkilerin sirkadiyen döngüsü dikkate alınmalıdır. Bitkilerin stomaları açık ve emilimin yüksek olması nedeniyle, uygulamak için en iyi zaman sabah saatleri olduğunu rapor etmişlerdir.



Şekil 3. Abiyotik stres koşullarında biyostimülanların uygulama şekilleri

SONUÇ

Tarımsal verimliliği kısıtlayan etkenlerden bazıları yetiştirilen ürünün birçok abiyotik stres ile karşı karşıya kalmasıdır. Bitki hücrelerine, fizyolojisine, morfolojisine ve sonuçta önemli verim kayıplarına yol açmaktadır. Bitki verimliliğinin korunması ve iyileştirilmesi amacı ile ziraat biliminin elverdiği birçok uygulamalara başvurulmaktadır. Bu bölümde biyostimülantların neler olduğu ve abiyotik stres koşullarında biyostimülantların bitkiler üzerindeki etkileri ve nasıl uygulanması gerektiği ortaya koymaya çalışılmıştır. Üreticilerin biyostimülantları nasıl kullanacaklarını ve etki şekillerini anlamaları, hem üretime hemde verimliliğe olumlu katkı yapacağı düşünülmektedir. Biyostimülantlar aynı zamanda mikrobiyal (PGPR, AMF) inokulantlardır. Özellikle mikrobiyal biyostimülantlar bitkilerin verimliliğini farklı mekanizmalar yoluyla etkileyebilen oldukça umut verici ajanlardır. Abiyotik stres koşullarında bitki verimliliğinin sürdürülmesinde yardımcı ve çevre dostu mikrobiyal biyostimülantların etkileri üzerinde önemli araştırmalar yapılmalıdır. Mikrobiyal biyostimülantların bitki de abiyotik stres etkilerinin giderilmesinde özellikle genetik ve moleküler düzeyde araştırmalar yapılmalıdır.

KAYNAKÇA

- Ansari, M., Devi, B. M., Sarkar, A., Chattopadhyay, A., Satnami, L., Balu, P....& Jailani, A. A. K. (2023). Microbial exudates as biostimulants: role in plant growth promotion and stress mitigation. *J. Xenobiot* 13, 572–603.
- Barbara RLL, García, A.C. (2014). Humic substances and plant defense metabolism. In: Ahmad P, Wani MR (eds) Physiological mechanisms and adaptation strategies in plants under changing environment: volume 1. Springer Science+Business Media, New York, pp 297–319
- Bulgari, R., Cocetta, G., Trivellini, A., Vernieri, P. A. O. L. O., & Ferrante, A. (2015). Biostimulants and crop responses: a review. *Biological Agriculture & Horticulture*, 31(1), 1-17.
- Brundrett, M. C., & Ashwath, N. (2013). Glomeromycotan mycorrhizal fungi from tropical Australia III. Measuring diversity in natural and disturbed habitats. *Plant and Soil*, 370, 419-433.
- Canal, S. B., Bozkurt, M. A., & Yilmaz, H. (2022). Effects of Humic Acid and EDTA on Phytoremediation, Growth and Antioxidant Activity in Rapeseed (*Brassica napus* L.) Grown under Heavy Metal Stress. *Polish Journal of Environmental Studies*, 31(5) 4051-4060.
- Campo, S., Martín-Cardoso, H., Olivé, M., Pla, E., Catala-Forner, M., Martínez-Eixarch, M., & San Segundo, B. (2020). Effect of root colonization by arbuscular mycorrhizal fungi on growth, productivity and blast resistance in rice. *Rice*, 13(1), 42.
- Cristiano, G., Pallozzi, E., Conversa, G., Tufarelli, V., & De Lucia, B. (2018). Effects of an animal-derived biostimulant on the growth and physiological parameters of potted snapdragon (*Antirrhinum majus* L.). *Frontiers in plant science*, 9, 861.
- Choudhary, D. K., Kasotia, A., Jain, S., Vaishnav, A., Kumari, S., Sharma, K. P., & Varma, A. (2016). Bacterial-mediated tolerance and resistance to plants under abiotic and biotic stresses. *Journal of plant growth regulation*, 35, 276-300.

- Choi, J., Summers, W., & Paszkowski, U. (2018). Mechanisms underlying establishment of arbuscular mycorrhizal symbioses. *Annual Review of Phytopathology*, 56(1), 135-160.
- Calvo, P., Nelson, L., & Kloepper, J. W. (2014). Agricultural uses of plant biostimulants. *Plant and soil*, 383, 3-41.
- Çakmakçı, R., Mosber, G., Milton, A. H., Alatürk, F., & Ali, B. (2020). The effect of auxin and auxin-producing bacteria on the growth, essential oil yield, and composition in medicinal and aromatic plants. *Current Microbiology*, 77, 564-577.
- Diagne, N., Ngom, M., Djighaly, P. I., Fall, D., Hocher, V., & Svistoonoff, S. (2020). Roles of arbuscular mycorrhizal fungi on plant growth and performance: Importance in biotic and abiotic stressed regulation. *Diversity*, 12(10), 370.
- Drobek, M., Frąc, M., & Cybulska, J. (2019). Plant biostimulants: Importance of the quality and yield of horticultural crops and the improvement of plant tolerance to abiotic stress—A review. *Agronomy*, 9(6), 335.
- du Jardin, P. (2015). Plant biostimulants: Definition, concept, main categories and regulation. *Scientia horticultrae*, 196, 3-14.
- El Boukhari, M. E. M., Barakate, M., Bouhia, Y., & Lyamlouli, K. (2020). Trends in seaweed extract based biostimulants: Manufacturing process and beneficial effect on soil-plant systems. *Plants*, 9(3), 359.
- Esparza-Reynoso, S., Ruíz-Herrera, L. F., Pelagio-Flores, R., Macías-Rodríguez, L. I., Martínez-Trujillo, M., López-Coria, M., ... & López-Bucio, J. (2021). Trichoderma atroviride-emitted volatiles improve growth of Arabidopsis seedlings through modulation of sucrose transport and metabolism. *Plant, Cell & Environment*, 44(6), 1961-1976.
- García-Cárdenas, E., Ortiz-Castro, R., Ruiz-Herrera, L. F., Valencia-Cantero, E., & López-Bucio, J. (2022). Micrococcus luteus LS570 promotes root branching in Arabidopsis via decreasing apical dominance of the primary root and an enhanced auxin response. *Protoplasma*, 259(5), 1139-1155.

- Goñi, O., Quille, P., & O'Connell, S. (2018). Ascophyllum nodosum extract biostimulants and their role in enhancing tolerance to drought stress in tomato plants. *Plant Physiology and Biochemistry*, 126, 63-73.
- Jack, C. N., Petipas, R. H., Cheeke, T. E., Rowland, J. L., & Friesen, M. L. (2021). Microbial inoculants: silver bullet or microbial Jurassic Park?. *Trends in Microbiology*, 29(4), 299-308.
- Jindo, K., Canellas, L. P., Albacete, A., Figueiredo dos Santos, L., Frinhani Rocha, R. L., Carvalho Baia, D., ... & Olivares, F. L. (2020). Interaction between humic substances and plant hormones for phosphorous acquisition. *Agronomy*, 10(5), 640.
- Jindo, K., Olivares, F. L., Malcher, D. J. D. P., Sánchez-Monedero, M. A., Kempenaar, C., & Canellas, L. P. (2020). From lab to field: role of humic substances under open-field and greenhouse conditions as biostimulant and biocontrol agent. *Frontiers in plant science*, 11, 426.
- Johnson, R., Joel, J. M., & Puthur, J. T. (2024). Biostimulants: The futuristic sustainable approach for alleviating crop productivity and abiotic stress tolerance. *Journal of Plant Growth Regulation*, 43(3), 659-674.
- Khan, W., Rayirath, U. P., Subramanian, S., Jithesh, M. N., Rayorath, P., Hodges, D. M., ... & Prithiviraj, B. (2009). Seaweed extracts as biostimulants of plant growth and development. *Journal of plant growth regulation*, 28, 386-399.
- Lamont, J. R., Wilkins, O., Bywater-Ekegård, M., & Smith, D. L. (2017). From yogurt to yield: Potential applications of lactic acid bacteria in plant production. *Soil Biology and Biochemistry*, 111, 1-9.
- Nardi, S., Pizzeghello, D., Muscolo, A., & Vianello, A. (2002). Physiological effects of humic substances on higher plants. *Soil Biology and Biochemistry*, 34(11), 1527-1536.
- Nardi, S., Carletti, P., Pizzeghello, D., & Muscolo, A. (2009). Biological activities of humic substances. In: Senesi N, Xing B, Huang PM (eds) Biophysico-chemical processes involving natural nonliving organic matter in environmental systems. Wiley, Hoboken, pp 305–339

- Regulation (EU) 2019/1009 of the European Parliament and of the Council of 5 June (2019) laying down rules on the making available on the market of EU fertilising products and amending Regulations (EC) No 1069/2009 and (EC) No 1107/2009 and repealing Regulation (EC) No 2003/2003 (Text with EEA relevance) PE/76/2018/REV/1, OJ L 170, 25.6.2019, p. 1–114. <http://data.europa.eu/eli/reg/2019/1009/oj>.
- Tiwari, G., Duraivadivel, P., & Sharma, S., P, H. (2018). 1-Aminocyclopropane-1-carboxylic acid deaminase producing beneficial rhizobacteria ameliorate the biomass characters of *Panicum maximum* Jacq. by mitigating drought and salt stress. *Scientific Reports*, 8(1), 1–12.
- Van Oosten, M. J., Pepe, O., De Pascale, S., Silletti, S., & Maggio, A. (2017). The role of biostimulants and bioeffectors as alleviators of abiotic stress in crop plants. *Chemical and Biological Technologies in Agriculture*, 4, 1-12.
- Watts-Williams, S. J., Emmett, B. D., Levesque-Tremblay, V., MacLean, A. M., Sun, X., Satterlee, J. W., ... & Harrison, M. J. (2019). Diverse *Sorghum bicolor* accessions show marked variation in growth and transcriptional responses to arbuscular mycorrhizal fungi. *Plant, Cell & Environment*, 42(5), 1758-1774.
- Wozniak, E., Blaszcak, A., Wiatrak, P., & Canady, M. (2020). Biostimulant mode of action: impact of biostimulant on whole-plant level. *The chemical biology of plant biostimulants*, 205-227.
- Yakhin, O. I., Lubyantsev, A. A., Yakhin, I. A., & Brown, P. H. (2017). Biostimulants in plant science: a global perspective. *Frontiers in plant science*, 7, 2049.
- Zhang, X., & Schmidt, R. E. (1997). The impact of growth regulators on alpha-tocopherol status of water-stressed *Poa pratensis* L. *Int. Turfgrass Society Research Journal*, 8, 1364–2137.
- Zhao, L.F., Xu, Y.J., & Lai, X.H., 2018. Antagonistic endophytic bacteria associated with nodules of soybean (*Glycine max* L.) and plant growth-promoting properties. *Braz. J. Microbiol.* 49, 269–278.

BÖLÜM 4

TOPRAK MİKROBİYOMUNUN TARIMSAL SÜRDÜRÜLEBİLİRLİKTEKİ GÜCÜ: EKOSİSTEM DESTEğİ VE İKLİM DEğİŞİKLİğİNE KARŞI DAYANIKLILIK

Dr. Öğr. Üyesi Elif COŞKUN DAĞGEÇEN^{1*}

DOI: <https://dx.doi.org/10.5281/zenodo.14541789>

^{1*} Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Tarımsal Biyoteknoloji Bölümü, Kahramanmaraş, Türkiye. *elifcoskun@ksu.edu.tr

GİRİŞ

Toprak oldukça karmaşık bir karasal ortamdır ve farklı mikrobiyal popülasyonların ana kaynağı olup tarımsal açıdan yararlı birçok mikroorganizmanın temelini oluşturur. Bu mikroorganizmalar toprak kalitesini iyileştirmek ve ürün verimliliğini artırmak için hem birbirleriyle hem de bitkilerle etkileşime girer. Bu nedenle mikroorganizmalar, tarımsal sürdürülebilirliği olumlu yönde etkileme potansiyeline sahiptir. Sürdürülebilir ve yenilikçi tarım, zirai üretimde kullanılan doğal kaynakların korunması ve tarımsal açıdan faydalı temel mikroorganizmaların işlevlerinin belirlenmesiyle ilgili küresel zorluklara çözüm sağlamayı amaçlamaktadır (Nam ve ark., 2023). Tarım, çevresel sürdürülebilirlik ve sosyal sistemlerle iç içe olan karmaşık bir yapıya sahiptir; bu durum, tarımdaki gelişmelerin yeşil teknolojiler, biyolojik çeşitliliğin korunması, bitki ve hayvan sağlığı, kültürel kabul, kirlilik yönetimi, ekonomi, siyasi istikrar ve kentsel tarım gibi birçok etkenle ilişkili olduğunu göstermektedir (Joshi ve ark., 2023).

Tahminlere göre dünya nüfusu 2050 yılına kadar 10 milyara ulaşacak ve bu hızlı artışla birlikte sürdürülebilir tarım ve gıda güvenliği için bitkisel üretimin iyileştirilmesi bir zorunluluk haline gelecektir (Sands ve Suttles, 2022). 2015 yılında Birleşmiş Milletler, dünya genelinde insan yaşam standartlarını iyileştirmek için 17 Sürdürülebilir Kalkınma Hedefi (SKH) belirlemiştir. Bunlardan 'Sıfır Açlık' olarak adlandırılan ikinci hedef, küresel gıda güvenliğini sağlamak ve sürdürülebilir tarımı teşvik ederek açlık sorununu çözmeyi amaçlamaktadır (Grafton ve ark.,

2015). SKH'lerin hedefi, dünya çapında herkesin kaliteli gıdaya ve sağlıklı bir yaşama erişimini sağlamaktır.

Son yıllarda, gelişmekte olan ülkelerde ileri teknolojilerin tarım uygulamalarına entegrasyonu nedeniyle açlığa karşı mücadelede bazı ilerlemeler kaydedilmiştir. Ancak, son 15-20 yılda yetersiz beslenen kişi sayısında küresel bir azalma olsa da, hâlâ 790 milyondan fazla insan yeterli gıdaya ulaşamamaktadır (Grafton ve ark., 2015). Mevcut durum böyle devam ederse, sıfır açlık hedefine 2030 yılına kadar ulaşamayacaktır. Bu nedenle, üretim stratejilerinin iyileştirilmesi büyük önem taşımaktadır. Besinlerin bulunabilirliğini öncelikli hale getirmek ve çevresel değişikliklere daha toleranslı bitkilerin yetiştirilmesine önem vermek gereklidir (Brader ve ark., 2017).

Araştırmalar, toprak sağlığının iyileştirilmesinin ürün verimliliğini %10-50 oranında artırabildiğini ve bitki büyümesini teşvik eden mikroorganizmalar kullanıldığında bu artışın %50-60'a çıkabileceğini göstermektedir (Abram, 2015). Bu yaklaşım, kimyasal gübre kullanımını ve bağımlılığını azaltmak için etkili bir yol olabilir ve sürdürülebilir tarım hedeflerine ulaşmada kimyasal gübrelerin yerine kullanılacak birçok mikroorganizma türü vardır. Bazı toprak mikroorganizmaları, gübre veya insektisit işlevi görerek bitki büyümesini destekler ve sentetik kimyasallara olan bağımlılığı azaltır. Aynı zamanda, bu mikroorganizmalar tuzlu, alkali veya kuraklık dönemlerinde bitki verimliliğini artırmada düzenleyici rol üstlenebilir (Naylor ve ark., 2020). Ayrıca, topraktaki organik ve ağır metal

kirleticilerin ıslahında da mikroorganizmalar önemli bir role sahiptir (Gong ve ark., 2018).

Toprak, mikroorganizmalar aracılığıyla karbon döngüsü ve karbon tutulumunun bir parçası olarak yeraltında atmosferik karbonu yakalama ve depolama potansiyeline sahiptir (Sokol ve ark., 2022). Topraktaki mikrobiyal varlık geniş bir taksonomik çeşitliliğe sahiptir; bir gram toprakta milyarlarca mikroorganizma ve binlerce tür bulunduğu tahmin edilmektedir (Torsvik ve Øvreås, 2002). Toprak mikroorganizmalar arasında bakteriler, arke, mantarlar, protistler ve bunların ilgili virüs gruplarını içermektedir (Bar-On ve ark., 2018). Mikrobiyal türlerin çeşitliliği ve topluluk yapısı farklı toprak türleri ve coğrafi bölgeler arasında büyük farklılıklar gösterir (Thompson ve ark., 2023). Bu çeşitlilik, toprak ekosisteminin biyolojik çeşitliliğini ve çevresel değişimlere adaptasyon kabiliyetini artırarak sürdürülebilir tarım uygulamaları için önemli bir temel sunar. Ayrıca, mikrobiyal popülasyonlardaki etkileşimler, toprak ekosisteminin bütünlüğünün korunması, besin geri dönüşümü, doğal yaşam alanlarının korunması ve besin zincirlerinin dengelenmesi gibi birçok fayda sağlar.

1. TOPRAK MİKROBİYOMU VE ÇEVRESEL ETKİLEŞİMİ

Toprak mikrobiyomunun zenginliği ve çeşitliliği, ekosistemlerin işleyişi ile koordine edilerek toprağın kimyasal ve fiziksel özellikleri ile bunları etkileyen antropojenik faktörlere bağlıdır (Wang ve ark., 2023). Örneğin, killi toprak yapısı, kil moleküllerindeki mikro gözenekler nedeniyle mezofaunanın gelişimini etkileyerek mikroorganizmaların

hayatsal aktivitelerini kısıtlamaktadır. Benzer şekilde, asidik toprakların kireçlenmesi, bakteriler, mantarlar, arkeler, nematodlar ve mikroeklembacaklılar dahil olmak üzere toprak mikrobiyomunun bileşiminde ve miktarında değişikliklere neden olmakta, toprağın pH seviyesinde ve besin konsantrasyonlarında önemli bir artışa yol açmaktadır (Holland ve ark., 2018).

Actinobacteria, Gemmatimonadetes, β - ve δ -Proteobakteriler, Chloroflexi ve Nitrospirae gibi bakteri filumları, toprak pH'sı ile güçlü bir korelasyona sahiptir ve bu durum diğer faktörlerle birlikte topraktaki mikrobiyal çeşitliliği şekillendirmektedir (Bahram ve ark., 2018). Toprak pH'sı ve besin konsantrasyonları, bakterilerin besin maddelerine erişim kolaylığını artırarak taksonomik çeşitlilik ve bileşim üzerinde etkili olmaktadır. pH'ın artışıyla birlikte topraktaki bakteri-fungus oranı ve nematod miktarı da artmaktadır (Van der Wal ve ark., 2009). Toprak mikrobiyomundaki protistler ise toprak pH'sından daha az etkilenmektedir (Bates ve ark., 2013).

Toprak nemi, mikrobiyal yaşamın sürdürülmesi için çok önemlidir; mikroorganizmaların hareketliliğini artırarak besinlerin çözünmesine ve gazların yayılmasına yardımcı olur (Philippot ve ark., 2023). Aynı zamanda, protist topluluk kompozisyonunu şekillendirmede de büyük bir rol oynamaktadır. Toprak tipi ve yapısı, mikrobiyal topluluğun bileşimini etkileyerek daha hafif toprak yapılarının bakterilerin büyümesini desteklemesine olanak tanır (Furtak ve Gałazka, 2019). Topraktaki karbon içeriği, C/N oranı ve besin konsantrasyonu, mikrobiyal çeşitlilik ve yapının düzenlenmesinde önemli bir rol

oynamaktadır (Prasad ve ark., 2021). Ayrıca, güneş ışığı (UV), iklim, coğrafi konum, ekilen bitki türü, şehirleşme ve çevre kirliliği gibi faktörler de toprak mikrobiyal dinamiğini büyük ölçüde etkilemektedir. Toprak mikrobiyomunun karasal ekosistemlerdeki rolü incelendiğinde, organik maddelerin ayrışması (Dlamini ve ark., 2023); azot, karbon, fosfor, kükürt ve oksijen döngüsü (Kour ve ark., 2023); minerallerin alınabilir hale getirilmesi (Kour ve ark., 2023); petrol kirliliği, pestisitler ve diğer kirleticilerin giderilmesi (Hermanns ve ark., 2023); enerji üretimi (Thiele-Bruhn ve ark., 2023) gibi süreçlerde aktif olarak yer aldığı görülmektedir. Tarımsal üretimde ise atmosferik azot fikse edilmesi (Zhu ve ark., 2023); organik atıkların parçalanması (Pant ve ark., 2023); ağır metal iyonlarının bitkilerce alınmasını azaltmak için bağlanması (Joshi ve ark., 2023); toprak agregasyonunu artırmak için polisakkarit üretilmesi (Sharma ve Sharma, 2023); fosfat çözünürlüğünün artırılması (Jindo ve ark., 2023); pestisitlerin zararlı etkilerinin yok edilmesi (Walder ve ark., 2022) ve doğrudan bitki gelişimini teşvik eden biyoaktif maddelerin üretilmesi (Kumar ve ark., 2022) gibi birçok önemli işlevde yer almaktadır.

Yararlı toprak mikroorganizmaları, bitki sağlığını ve mahsul verimini artırmak için sürdürülebilir tarım uygulamalarında büyük bir potansiyele sahiptir (Singh ve ark., 2019). Özellikle zararlıların ve hastalıkların biyolojik kontrolü, kimyasal pestisitlerin yerine etkili bir alternatif olarak ortaya çıkmaktadır (Rahman ve ark., 2022). Toprakta yaşayan protozoanlar ve nematodlar, organik maddenin mineralizasyonunda ve besin salınımında rol oynayarak mikrobiyal

solunumu artırır ve besin mineralizasyonunu uyarır (Johnston ve Sibly, 2018). Bitki çeşitliliği ile zenginleşen mikrobiyomlar, karbon depolama ve tutulmasına katkı sağlayarak toprak ekosisteminde kritik bir rol oynamaktadır (Zhang ve ark., 2023).

Toprak ekosisteminde besinler, mikroorganizmalar tarafından gerçekleştirilen sayısız kimyasal ve biyokimyasal reaksiyona katılmaktadır. Toprak mikrobiyomunun karbon döngüsünde de önemli bir rol oynadığı, fototrofik mikroorganizmaların Calvin Döngüsü ile atmosferik karbonu sabitlediği bilinmektedir (Videmšek ve ark., 2009). Nitrojeni amonyak formuna dönüştüren amonifikasyon ve nitrifikasyon süreçlerinde ise amonyak oksitleyen bakteriler ve arkeler kritik rol oynar (Pajares ve Bohannan, 2016). Bunun yanında, az sayıda prokaryotta bulunan diazotroflar dinitrojenaz enzimi ile inorganik ve organik nitrojeni amonyak ve nitrata dönüştürerek topraktaki azot döngüsüne katkıda bulunur (Feng ve ark., 2018).

2. TOPRAĞIN KİMYASAL VE BİYOLOJİK DİNAMİKLERİ

2.1. Toprak pH'ı

pH, toprak kimyasal ve biyolojik süreçlerini etkilediği için genellikle ana toprak değişkeni olarak tanımlanır (Husson, 2013). Karbon, nitrojen ve kükürtün biyojeokimyasal döngüleriyle ilişkili mikrobiyal aktiviteler, proton ve hidroksil iyonları üreterek toprak pH'ını etkileyen en önemli mikrobiyal süreçlerdir (Bolan ve Hedley, 2003). Karbon döngüsünde, mikrobiyal solunumla üretilen CO₂'in toprak çözeltisinde karbonik asit (H₂CO₃) oluşturarak çözünmesi bir proton kaynağıdır ve

bu, toprağın asitleşmesine yol açar. Toprak solunumuyla üretilen CO₂'in yalnızca üçte biri doğrudan atmosfere yayılırken geri kalanı toprak çözeltisinde çözünerek biyolojik aktiviteler ve kimyasal reaksiyonlar tarafından tüketilmektedir (Sánchez-Cañete ve ark., 2018). Siyanobakteriler ve diğer fotosentetik ototroflar, proton pompalanmasını gerektiren CO₂ sabitleme aktiviteleri nedeniyle mikro ortamlarını alkalileştirirler (Mergelov ve ark., 2018). Hem serbest yaşayan hem de simbiyotik fungusların yanı sıra bakteriler de toprağın asitleşmesine katkıda bulunabilecek organik asitler (örneğin, oksalat veya sitrat) üretmektedirler (Gadd ve ark., 2014). Ayrıca, bu bakteriler tarafından gerçekleştirilen oksalat katabolizması ile toprak pH'ında 2,5 birime kadar güçlü bir artış meydana gelebilir (Syed ve ark., 2020). Nitrojen döngüsünde, nitrifikasyon sırasında amonyumun bakteri ve arkeler tarafından nitrat oksidasyonu ile proton üretilir. Özellikle nitrojen gübrelemesi, ekilebilir topraklarda asitleşmeye yol açmaktadır (Norton ve Ouyang, 2020).

Funguslar tarafından gerçekleştirilen çevresel alkalileştirme, sıklıkla gözlemlenen ancak tam olarak anlaşılmamış bir olgudur (Palmieri ve ark., 2020). Genellikle bu sürece, protein ve amino asit katabolizmasının bir yan ürünü olarak üretilen ve hiflerden salgılanan oldukça bazik bir bileşik olan amonyak aracılık eder (Vylkova, 2017). Toprak yüzeyindeki nitrojen kükürt oranı 8-12:1 aralığında olduğundan, kükürt döngüsünün proton ve hidroksil iyonlarının oluşumuna katkısı, nitrojen döngüsünün onda biri kadardır. İyi havalandırılmış topraklarda, kükürdün %90'ından fazlası organik

formda bulunur ve organik kükürdün mineralizasyonu asit oluşumuna neden olur (Howarth ve ark., 1992). Aynı şekilde inorganik kükürt bileşiklerinin bakteri ve funguslar tarafından oksidasyonu da toprağın asitlenmesine yol açmaktadır (Linder, 2018). Bakteriler ve funguslar, toprağın pH'ını aktif şekilde değiştirerek toprağın mikrobiyal topluluklarını yapılandıran birincil faktörlerdir.

2.2. Toprak mineralleri

Bakteriler ve arkeler, indirgeyici eşdeğerleri toplamak ve enerji üretmek amacıyla çeşitli metal iyonlarını kullanmalarını sağlayan enzimatik yollar geliştirmiştir. Yerkabuğunda en çok bulunan dördüncü element olan demirin bu süreçte önemli bir rolü vardır. Oksitlenmiş demir, yani Fe(III), anoksik koşullar altında O₂'ye alternatif bir elektron alıcısı olarak solunum için kullanılabilirken, indirgenmiş Fe türleri, yani Fe(II), enzimatik oksijene bağlı bir elektron donörü olarak işlev görmektedir (Yang ve ark., 2021). Örneğin, çeltik yetiştirilen topraklarda ve su basmış ormanlarda arkeler tarafından gerçekleştirilen metanın anaerobik oksidasyonu sırasında elektron alıcısı rolünü üstlenen Fe(III) ile Fe(II) birikimi rapor edilmiştir (Gabriel ve ark., 2020). Benzer şekilde, manganez, kromat ve hatta uranyum gibi toksik metaller de oksitlenebilir ve indirgenebilir. Bu metallerin çözünürlükleri redoks durumlarına bağlı olarak değişiklik gösterdiğinden (örneğin çözülmüş Mn(II), Cr(VI), U(VI) ve çökelmiş MnO₂, Cr₂O₃, UO₂), mikrobiyal redoks dönüşümleri çözünürlüklerini ve biyoyararlılıklarını belirler. Sonuç olarak, bu metallerin toksisitesi ve elektron alıcısı ya da vericisi olarak bulunabilirliği, toprak

mikroorganizmalarının ekolojik tepkilerini etkilemektedir (Borch ve ark., 2010). Bu tür reaktif ve meta-kararlı minerallerin mikrobiyal oluşumu, toprağın redoks ve adsorpsiyon süreçlerini de etkilemektedir. Enerji üretiminin yanı sıra, minerallerde bulunan metal iyon bileşenleri, fosfor (P), çinko (Zn), molibden (Mo), kobalt (Co) gibi iz elementler, toprak mikroorganizmaları ve bitkiler için gereklidir. Bu temel metal iyonlarının çoğu az çözünen mineraller, yüzeylere adsorbe olmuş iyonlar veya minerallerle birlikte çökelmiş halde bulunduğu için, toprak mikroorganizmaları bu metallerin çözünürlüğünü ve biyoyararlılığını artırmak için çeşitli stratejiler geliştirmiştir. Bu stratejiler arasında toprak ortamının asitleştirilmesi yoluyla metal çözünürlüğünün artırılması (Gadd ve ark., 2014) veya metal kompleks yapıcı maddelerin sentezi ve salgılanması yer almaktadır (Johnstone ve Nolan, 2015). Özellikle, organik asitlerin (örneğin sitrat veya oksalat) ya da siderofor gibi metal kompleksleştirici bileşiklerin mikrobiyal salınımı, granitik ana kaya ve silikat minerallerinin biyolojik aşınmasına neden olmaktadır (Uroz ve ark., 2009). Kaya ve mineral aşınmasından kaynaklanan element salınımı, çevredeki toprak ortamındaki jeokimyasal ve mineralojik koşulları da etkilemektedir.

Bakteriler ve funguslar yalnızca metal iyonlarının redoks dönüşümleri yoluyla mineral çözünmesi ve oluşumunda rol almakla kalmaz, aynı zamanda CO₂ ve bikarbonat konsantrasyonlarını (metabolik yan ürünler) ve toprak pH'ını değiştirerek karbonat minerallerinin çökmesini de tetikleyebilir. Mikrobiyal kaynaklı karbonat çökmesi (MICP), toprağın birçok fiziksel ve mekanik özelliğini etkileyerek

hidrolik iletkenliği azaltır ve kayma mukavemetini artırır (Vaksmaa ve ark., 2017). MICP'de rol oynayan ilgili mikrobiyal metabolizmalardan bazıları üreoliz, denitrifikasyon ve fotosentezdir. Örneğin, üreoliz sürecinde üre, mikroorganizmalar tarafından amonyak ve karbamik asit oluşumuna hidrolize edilir; bu yan ürünler karbonat çökmesini teşvik eder (Zhu ve Dittrich, 2016). Sonuç olarak, mikroorganizmaların metal iyonları ile etkileşimleri, toprak ekosistemlerinin kimyasal ve fiziksel özelliklerini düzenleyerek biyolojik döngülere ve çevresel sürdürülebilirliğe önemli katkılar sağlar.

2.3. Toprak yapısı

Toprak yapısı, toprak parçacıklarının üç boyutlu düzeni ve buna bağlı olarak oluşan gözenek boşlukları, toprak mikrobiyomu tarafından en çok etkilenen parametrelerden biridir (Six ve ark., 2004). Bu mikrobiyal etki, toprağın statik özelliklerini şekillendirir. Toprak, ayrıca agregatlar, yani çevredeki diğer parçacıklardan daha güçlü bir bağla bir arada tutulan birincil toprak parçacıklarını da içerir. Agregatlar, toprak yapısının temel bileşenleridir ve sürekli olarak oluşur, stabilize olur ve yeniden parçalanır. Bu süreçler, mikrobiyom gibi çeşitli faktörlerin etkisi altındadır; mikroorganizmalar, toprak parçacıklarının mekansal düzenlenmesini etkileyebilir, hücreleri ve metabolik ürünleri aracılığıyla bu yapıyı stabilize edebilir veya toprak parçacıklarını bir arada tutan bağlayıcı maddeleri katabolize ederek agregat parçalanmasına neden olabilir (Ritz ve Young, 2004). Ayrıca toprak mikrobiyomu, mikorizal mantarlar, kökle ilişkili diğer mantarlar, virüsler veya bakterilerin bitkiler ve bitki toplulukları üzerindeki etkisi

yoluyla toprak toplanması üzerinde dolaylı bir etkiye sahiptir (Rillig ve Mummey, 2006).

Deneyisel araştırmalar, toprak mikroorganizmalarının toprak toplanmasında kritik bir rol oynadığını ve bakteriler ile fungusların toprak faunasından daha büyük bir etkiye sahip olduğunu göstermiştir (Lehmann ve ark., 2017). Bakteriler makro ve mikro agregatların oluşumunda önemli bir yere sahipken, funguslar özellikle makroagregat oluşumunda kritik rol oynamaktadır (Totsche ve ark., 2018). Fungusların filamentli yapıları, bağlayıcı ajanları ve yüzey polaritesini modüle edebilen amfifilik proteinlerin üretimi, parçacık ağları ve hidrofobinlerin fiziksel dolaşımında etkili olması nedeniyle toprak agregasyonu çalışmalarında önemli bir odak haline gelmiştir (Lehmann ve ark., 2017). Özellikle Leifheit ve ark. (2014) tarafından yapılan bir meta-analiz, çoğu kara bitkisi ile simbiyotik olan arbusküler mikorizal fungusların toprak toplanması üzerinde güçlü ve olumlu bir etkiye sahip olduğunu ortaya koymuştur.

Polisakkaritler, proteinler ve lipitler gibi hücre dışı polimerik maddeler (EPS'ler), agregatlar için bağlayıcı ajanlar olarak görev yapar; bu durum bakteriler için de geçerlidir (Guhra ve ark., 2019). Ayrıca, toprak yüzeyinde biyokabuk topluluklarının bir parçası olan siyanobakteriler, EPS üretimi yoluyla toprağın stabilizasyonuna katkıda bulunabilir (Chamizo ve ark., 2018). Toprak agregatlarının daha küçük ölçeklerine inildikçe, kil mineralleri ile mikrobiyal etkileşimler önem kazanmaktadır (Cuadros, 2017). Bakteriler ve funguslar, mineral ve organik yüzeylerde biyofilmler oluşturarak hava koşulları nedeniyle

minerallerin özelliklerini değiştirmektedir. Bu parçacıklara yapışan ve adsorbe edilen mikrobiyal hücreler veya hücre ürünleri, mikro agregatların oluşumu için uygun koşulları sağlayabilmektedir (Krause ve ark., 2019). Böylece, çeşitli mikrobiyal gruplar toprak agregasyonunu en küçük ölçekten (örneğin, mineral modifikasyonu ve etkileşim), orta ölçeklere (örneğin, fungus hifaları yoluyla toprak agregatının stabilizasyonu) ve büyük ölçeklere (örneğin, arbusküler mikorizal fungusların bitki topluluğu bileşiminde yarattığı değişikliklerin toprak yapısına etkileri) kadar etkileyebilir. Toprak mikrobiyomunun toprak yapısının stabilizasyonundaki bu çok yönlü rolü, sürdürülebilir tarım ve ekosistem yönetimi için önemli fırsatlar sunmakta ve mikrobiyal etkileşimlerin toprak sağlığı üzerindeki kritik etkisini vurgulamaktadır.

2.4. Toprak nemi

Mikroorganizmalar yalnızca toprağın nem seviyelerine pasif olarak tepki vermekle kalmaz, aynı zamanda suyun toprağa sızması, tutulması ve buharlaşması gibi suyla ilgili özellikleri de aktif bir şekilde değiştirebilir (Schimel, 2018). Mikroorganizmaların toprak hidrolojisini değiştirebildiğine dair en az üç geniş kapsamlı mekanizma bulunmaktadır. Birincisi, bakteri ve mantarlar toprağın su dinamiklerini doğrudan etkileyen bileşikler salgılar. Bu bileşikler arasında ekzopolisakkaritler (EPS) yer alır; bu bileşikler, toprağın ve kumun su tutma kapasitesini artırır, makro gözenekleri tıkayarak hidrolik iletkenliği azaltır (Benard ve ark., 2019) ve buharlaşma hızını yavaşlatır (Adessi ve ark., 2018). Ayrıca, hidrofobiklik gelişimi nedeniyle

yeniden ıslanma oranlarını azaltır ve daha küçük gözenek boyutları sayesinde kurak ortamlarda sıvı fazın sürekliliğini korur. Böylece, besinlerin ve metabolik ürünlerin difüzyonu mümkün hale gelir (Colica ve ark., 2014). Örneğin, funguslar amfifilik bileşikler üreterek, toprak parçacıklarının yüzeylerini kaplar ve bu sayede su iticiliğinin büyüklüğünü ve yönünü değiştirir (Buchmann ve ark., 2024). İkincisi, mikroorganizmalar toprak parçacıklarının dizilimini, gözenek organizasyonunu ve toprak yapısının uyumunu değiştirerek, toprağın su tutma ve infiltrasyon oranlarını etkileyebilir (Rabot ve ark., 2018). Üçüncüsü, mikroorganizmalar toprak içinde suyun hareketini kolaylaştırabilir. Örneğin, mikorizal funguslar, hiphaları boyunca bitkiler arasında suyun pasif olarak taşınmasını sağlayarak bitki köklerinin su alımını artırabilir ve suyun toprak profili boyunca yeniden dağılımını sağlar (Bahadur ve ark., 2019). Mikorizal hifler boyunca taşınan su, konukçu bitkiler tarafından aktarılan toplam suyun yaklaşık %35'ini oluşturabilir (Kakouridis ve ark., 2022). Özetle, mikroorganizmalar, toprak hidrolojisi üzerinde sadece pasif bir etki göstermekle kalmaz, aynı zamanda salgıladıkları bileşikler, toprak yapısında meydana getirdikleri değişiklikler ve mikorizal ilişkiler aracılığıyla suyun toprağa nüfuz etmesi, tutulması ve bitkiler tarafından etkin bir şekilde alınması süreçlerinde aktif bir rol oynarlar. Bu özellikleri sayesinde mikroorganizmalar, toprak ekosistemlerinin sürdürülebilirliğini ve tarımsal verimliliği destekleyen önemli bir bileşen olarak karşımıza çıkmaktadır.

2.5. Toprak besini

Toprak besin maddelerinin bitki büyümesi ve verim üzerindeki etkilerinin önemi küresel ölçekte kabul edilmektedir (Jang ve ark., 2017). Tarım arazileri arasında üretkenliği kısıtlayan en önemli faktör, verimsiz topraklardır. Belirli bir toprağın verimliliği, öncelikle nitrojen (N), karbon (C) ve fosfor (P) konsantrasyonları ile ölçülür (Tiemann ve Grandy, 2015). Besin kısıtlamaları, çevre, insan ve hayvan sağlığı üzerinde olumsuz etkilere neden olmakta olup, bu durum sentetik gübrelerin kullanımı ile yönetilebilir. Toprak verimliliği, organik madde ayrışmasında ve bitkiler için besin döngüsünde anahtar rol oynayan mikroorganizmaların da dahil olduğu abiyotik ve biyotik etkileşimlerin sonucudur. Buna karşılık, bitki büyümesinin artırılması, köklerin daha fazla besin almasına yardımcı olarak, çeşitli mikrobiyal türlerin köklerde ve rizosferde yaşamasını kolaylaştırır. Dolayısıyla topraktaki besin maddeleri ve bunların biyoyararlılığı, doğrudan ve dolaylı olarak rizosfer mikrobiyomunun çeşitliliğini ve zenginliğini etkilemektedir (Pérez-Jaramillo ve ark., 2016).

Topraktaki besin miktarındaki herhangi bir dengesizlik, biyoçeşitliliği etkileyerek özelliklerinde değişikliklere yol açabilir. Deneysel nitrojen zenginleştirilmesi, mikrobiyal bolluğu ve bitki üretkenliğini etkileyerek bitki ve bakteri topluluğu bolluğu ve çeşitliliğinin azalmasına neden olmaktadır (Im ve ark., 2015). Karbon ise topraktaki mikrobiyal toplulukların yapısını ve işlevini belirlemektedir (Sun ve ark., 2014). Bazı toprak uygulamaları, topraktaki organik karbon stoklarını azaltarak mikrobiyal katabolik çeşitliliği düşürmekte, bu da arazi

kullanımının mikrobiyal katabolizma ile önemli ölçüde ilişkili olduğunu göstermektedir. Benzer şekilde, fosfor da rizosfer mikrobiyomu için düzenleyici bir faktördür. Fosfor uygulaması, fungus ve bakteri topluluklarının yapılarını değiştirmekte, ancak tür zenginliğini etkilememektedir (Beauregard ve ark., 2010). Bu nedenle, toprak besin maddelerinin dengeli bir şekilde yönetimi hem bitki sağlığı hem de mikrobiyal çeşitliliğin sürdürülebilirliği açısından kritik öneme sahiptir.

2.6. İklim faktörleri

İklimdeki ani ve şiddetli değişiklikler, sıcaklık artışları, kuraklık, ozon tabakasının incilmesi, UV radyasyonu, atmosferdeki CO₂ seviyelerinin yükselmesi ve dünyanın çeşitli bölgelerinde düzensiz yağışlara yol açmaktadır. İklim değişikliklerinin nedenleri farklı olsa da bu değişikliklerin Dünya'daki yaşamı ve buna bağlı biyolojik süreçleri etkilediği açıktır. Özellikle iklim değişiklikleri, mikroorganizmaları ve bitki biyolojisini büyük ölçüde etkileyerek rizosfer mikrobiyomunun yapısını değiştirmektedir.

UV Işınımı

Kloroflorokarbon ve CO₂ birikimi nedeniyle ozon tabakasının incilmesi, UV radyasyonuna (UVR) maruz kalmayı artırmıştır (Prasad ve ark., 2016). UV-B radyasyonu, pigment içeriğindeki değişiklikler, büyüme ve karbon asimilasyonunu tetikleme gibi etkilerle toprak mikroorganizmalarını doğrudan etkiler (Formánek ve ark., 2014). Rizosfer, öncelikle karbon kaynaklarından ve besin döngüsünden

etkilenir. Bitkiler, stres durumlarında korunmak amacıyla kök hücre metabolizmasını değiştirerek farklı mikrobiyal toplulukları seçmeye yardımcı olur. Kök sızıntıları, mantar ve bakteriler için birincil enerji ve karbon kaynağıdır, bu yüzden rizosferdeki mikrobiyal topluluklar bitkilerden önemli ölçüde etkilenmektedir (Berendsen ve ark., 2012). Filosfer topluluğu ise toprak veya rizosfer topluluklarına kıyasla UV'ye karşı daha savunmasızdır ve bu nedenle, filofosfer mikrobiyomu, kök bölgesine kıyasla daha az çeşitli birkaç takson tarafından baskındır (Laforest-Lapointe ve ark., 2016). Filosfer ortamındaki sıcaklık, bağıl nem ve güneş radyasyonundaki değişiklikler bu çeşitliliğin azalmasına neden olmaktadır (Hassani ve ark., 2018). Toprak mikrobiyal topluluklarının aksine, UV-B gibi çevresel faktörlere karşı daha hassastırlar (Engel ve ark., 2013). Mikroorganizmaların UV-B radyasyonuna duyarlılıkları farklılık gösterse de UVR toleransına yönelik çeşitli mekanizmalar geliştirmişlerdir (Norris ve ark., 2009). Örneğin, *Pseudomonas syringae*'de UVR toleransı, DNA onarımında yer alan *ruvAB* operonu tarafından sağlanır (Cazorla ve ark., 2008). Filosfer mikrobiyom izolatları UVR'ye karşı koruma ve hayatta kalmak için pigmentler üretmektedir. *Erwinia herbicola*'daki karotenoid, UV-A radyasyonuna karşı hücresel korumada önemli bir role sahiptir (Whipps ve ark., 2008). Benzer şekilde Antarktika topraklarından izole edilen gram-pozitif bakterilerdeki melanin sentezi UVR toleransından sorumludur (Khan ve Ball, 2024). UV radyasyonundaki artış, toprak ve bitki mikrobiyomlarında belirgin yapısal değişikliklere yol açmakta ve mikroorganizmaların bu çevresel baskıya uyum sağlamak için çeşitli koruyucu pigmentler ve genetik mekanizmalar geliştirmesine neden

olmaktadır. Bu süreçlerin anlaşılması, ekosistemlerin UV stresine verdiği tepkilerin biyolojik çeşitlilik üzerindeki etkilerini daha iyi değerlendirebilmek için kritik bir adımdır.

CO₂ Seviyesi

Sanayi devrimi ve fosil yakıt emisyonlarındaki hızlı artış, atmosferdeki CO₂'in (aCO₂) hızla artmasına, dolayısıyla küresel ısınmaya ve yağış azalmasına yol açmıştır. Bu durum kara ekosistemlerini ve yer altı karbon döngüsünü etkileyerek fotosentez yoluyla değişen organik karbon dinamiğinin bozulmasına sebep olmaktadır (Nazir ve ark., 2024). CO₂ seviyelerindeki artış, bitki büyümesindeki artış ve mikroorganizmaların parçalanma kapasitesinin azalması nedeniyle mikroorganizmalar için mevcut nitrojen miktarını azaltabilir (Gilliam ve ark., 2024). Yüksek CO₂, topraktaki organik madde dinamiklerini etkileyerek toprak yapısında dolaylı etkilere neden olmaktadır. aCO₂, topraktaki karbon varlığıyla ilişkilidir, ancak bu karbonun akıbeti ve toprak mikrobiyomu üzerindeki etkisi belirsizdir. Toprak mikrobiyomundaki aCO₂'nin etkisi, kök sızıntıları ve bitki üretimine bağlı olarak değişkenlik göstermektedir (Williams ve ark., 2018).

Sıcaklık

Yükselen sıcaklıklar, toprağın su içeriğini azaltarak mikroorganizmaların toprak içinde yayılma, hayatta kalma ve kolonileşme yeteneklerini sınırlandırır (Carson ve ark., 2010). Artan ortam sıcaklıkları toprak ısınısını yükselterek rizosfer mikrobiyomunun yapısını değiştirir. Ayrıca, toprak mikroorganizmalarının solunum kinetiği ve topluluk yapısı sıcaklığa göre farklılık göstermektedir.

Sorensen ve ark. (2019), kış iklimi-yükseklik eğimi boyunca kök büyümesini ve dışlama çekirdeklerini inceleyerek kışın artan hava sıcaklığının kuzey ormanlarındaki toprak bakteri ve fungus toplulukları üzerindeki etkisini araştırmış ve bakteriyel filogenetik çeşitlilik ve zenginlikte artış gözlemlemiştir; fungus toplulukları ise sıcaklık değişimine anlamlı bir yanıt vermemiştir. Uzun vadeli bir çalışmada, Johnston ve ark. (2019), kuzey tundra topraklarını yaklaşık 1,1 °C daha sıcak bir ortamda gözlemlemiş ve bazı arke topluluklarının belirli derinliklerde arttığını açıklamıştır. Nottingham ve ark. (2019) ise mikrobiyal toplulukların sıcaklık duyarlılığını karşılaştırmış ve topraktaki bakteri ve mantar topluluklarının -7,3 ila 35 °C arası sıcaklıklarda büyüme trendi gösterdiğini belirtmiştir. Ancak, sürekli yüksek sıcaklık maruziyeti mikrobiyal çeşitliliğini azaltmıştır. Elimizdeki veriler, artan sıcaklıkların toprak mikrobiyal toplulukları üzerinde karmaşık ve uzun vadeli etkiler yarattığını, sürdürülebilir tarım açısından bu toplulukların işlevselliğini belirli sıcaklık aralıklarında desteklerken, uzun süreli yüksek sıcaklık maruziyetinin özellikle bakteri çeşitliliğini azaltarak toprak sağlığını olumsuz etkileyebileceğini göstermektedir. Bu bulgular, iklim değişikliğinin sürdürülebilir tarım uygulamaları üzerindeki potansiyel etkilerini anlamada kritik bir öneme sahiptir; çünkü mikroorganizmalar, bitki büyümesini destekleyen ve toprak verimliliğini artıran süreçlerde merkezi bir rol oynamaktadır.

SONUÇ

Toprak mikrobiyomu, tarımsal s¼rd¼r¼lebilirlik ve gıda g¼venliđi için kritik bir biyolojik kaynak olarak ¼ne çıkmaktadır. Bu mikrobiyal ekosistem, yalnızca toprak sağlığını ve verimliliğini iyileştirmekle kalmaz, aynı zamanda çevresel değişikliklere karşı direnç oluşturarak bitki b¼y¼mesini destekler. Bu canlı ekosistem, topraktaki besinlerin d¼ng¼s¼, karbon depolama kapasitesi ve zararlı kimyasalların ayrışmasını sağlayarak çevreye doğrudan katkı sunar. Toprak mikrobiyomunun biyolojik çeşitliliğini koruma ve destekleme y¼n¼ndeki bilimsel çalışmalar, s¼rd¼r¼lebilir tarım için alternatif g¼bre ve pestisit y¼ntemleri geliştirilmesine de katkı sağlayacaktır. Dolayısıyla, toprak mikrobiyomunun ekosistem ¼zerindeki işlevsel etkileri, iklim değişikliğiyle m¼cadelede ve gıda g¼venliđinin sağlanmasında umut verici ¼z¼mler sunmaktadır.

KAYNAKÇA

- Abram, F. (2015). Systems-based approaches to unravel multi-species microbial community functioning. *Computational and structural biotechnology journal*, 13, 24-32.
- Adessi, A., de Carvalho, R. C., De Philippis, R., Branquinho, C., & da Silva, J. M. (2018). Microbial extracellular polymeric substances improve water retention in dryland biological soil crusts. *Soil Biology and Biochemistry*, 116, 67-69.
- Bahadur, A., Jin, Z., Long, X., Jiang, S., Zhang, Q., Pan, J., ... & Feng, H. (2019). Arbuscular mycorrhizal fungi alter plant interspecific interaction under nitrogen fertilization. *European Journal of Soil Biology*, 93, 103094.
- Bahram, M., Hildebrand, F., Forslund, S. K., Anderson, J. L., Soudzilovskaia, N. A., Bodegom, P. M., ... & Bork, P. (2018). Structure and function of the global topsoil microbiome. *Nature*, 560(7717), 233-237.
- Bar-On, Y. M., Phillips, R., & Milo, R. (2018). The biomass distribution on Earth. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 115(25), 6506-6511.
- Bates, S. T., Clemente, J. C., Flores, G. E., Walters, W. A., Parfrey, L. W., Knight, R., & Fierer, N. (2013). Global biogeography of highly diverse protistan communities in soil. *The ISME journal*, 7(3), 652-659.
- Beauregard, M. S., Hamel, C., & St-Arnaud, M. (2010). Long-term phosphorus fertilization impacts soil fungal and bacterial diversity but not AM fungal community in alfalfa. *Microbial ecology*, 59(2), 379-389.
- Benard, P., Zarebanadkouki, M., Brax, M., Kaltenbach, R., Jerjen, I., Marone, F., ... & Carminati, A. (2019). Microhydrological niches in soils: How mucilage and EPS alter the biophysical properties of the rhizosphere and other biological hotspots. *Vadose Zone Journal*, 18(1), 1-10.
- Berendsen, R. L., Pieterse, C. M., & Bakker, P. A. (2012). The rhizosphere microbiome and plant health. *Trends in plant science*, 17(8), 478-486.
- Bolan, N. S., & Hedley, M. J. (2003). Role of carbon, nitrogen, and sulfur cycles in soil acidification. In *Handbook of soil acidity* (pp. 43-70). Crc Press.

- Borch, T., Kretzschmar, R., Kappler, A., Cappellen, P. V., Ginder-Vogel, M., Voegelin, A., & Campbell, K. (2010). Biogeochemical redox processes and their impact on contaminant dynamics. *Environmental science & technology*, 44(1), 15-23.
- Bölscher, T., Vogel, C., Olagoke, F. K., Meurer, K. H., Herrmann, A. M., Colombi, T., ... & Domeignoz-Horta, L. A. (2023). Beyond Growth: The Significance of Non-Growth Anabolism for Microbial Carbon-Use Efficiency in the Light of Soil Carbon Stabilisation. Available at SSRN 4596729.
- Brader, G., Compant, S., Vescio, K., Mitter, B., Trognitz, F., Ma, L. J., & Sessitsch, A. (2017). Ecology and genomic insights into plant-pathogenic and plant-nonpathogenic endophytes. *Annual Review of Phytopathology*, 55, 61-83
- Buchmann, C., Neff, J., Meyer, M., Bundschuh, M., & Steinmetz, Z. (2024). Superabsorbent polymers in soil: The new microplastics?. *Cambridge Prisms: Plastics*, 2, e3.
- Carson, J. K., Gonzalez-Quinones, V., Murphy, D. V., Hinz, C., Shaw, J. A., & Gleeson, D. B. (2010). Low pore connectivity increases bacterial diversity in soil. *Applied and environmental microbiology*, 76(12), 3936-3942.
- Cazorla, F. M., Codina, J. C., Abad, C., Arrebola, E., Torés, J. A., Murillo, J., ... & de Vicente, A. (2008). 62-kb plasmids harboring *ruAB* homologues confer UV-tolerance and epiphytic fitness to *Pseudomonas syringae* pv. *syringae* mango isolates. *Microbial ecology*, 56, 283-291.
- Chamizo, S., Adessi, A., Mugnai, G., Simiani, A., & De Philippis, R. (2019). Soil type and cyanobacteria species influence the macromolecular and chemical characteristics of the polysaccharidic matrix in induced biocrusts. *Microbial Ecology*, 78, 482-493.
- Colica, G., Li, H., Rossi, F., Li, D., Liu, Y., & De Philippis, R. (2014). Microbial secreted exopolysaccharides affect the hydrological behavior of induced biological soil crusts in desert sandy soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 68, 62-70.
- Cuadros, J. (2017). Clay minerals interaction with microorganisms: a review. *Clay Minerals*, 52(2), 235-261.

- Dlamini, P., Sekhohola-Dlamini, L. M., & Cowan, A. K. (2023). Soil-microbial interactions. *Frontiers in Microbiology*, 14, 1213834.
- Engel, R. E., Williams, E., Wallander, R., & Hilmer, J. (2013). Apparent persistence of N-(n-butyl) thiophosphoric triamide is greater in alkaline soils. *Soil Science Society of America Journal*, 77(4), 1424-1429.
- Feng, M., Adams, J. M., Fan, K., Shi, Y., Sun, R., Wang, D., ... & Chu, H. (2018). Long-term fertilization influences community assembly processes of soil diazotrophs. *Soil Biology and Biochemistry*, 126, 151-158.
- Formánek, P., Rejšek, K., & Vranová, V. (2014). Effect of elevated CO₂, O₃, and UV radiation on soils. *The Scientific World Journal*, 2014(1), 730149.
- Furtak, K., & Gałazka, A. (2019). Edaphic factors and their influence on the microbiological biodiversity of the soil environment. *Postępy Mikrobiologii-Advancements of Microbiology*, 58(4), 375-384.
- Howarth, R. B. (1992). Intergenerational justice and the chain of obligation. *Environmental Values*, 1(2), 133-140.
- Jang, J. H., Woo, S. Y., Kim, S. H., Khaine, I., Kwak, M. J., Lee, H. K., ... & Lee, W. Y. (2017). Effects of increased soil fertility and plant growth-promoting rhizobacteria inoculation on biomass yield, energy value, and physiological response of poplar in short-rotation coppices in a reclaimed tideland: A case study in the Saemangeum area of Korea. *Biomass and Bioenergy*, 107, 29-38.
- Jindo, K., Audette, Y., Olivares, F. L., Canellas, L. P., Smith, D. S., & Paul Voroney, R. (2023). Biotic and abiotic effects of soil organic matter on the phytoavailable phosphorus in soils: A review. *Chemical and Biological Technologies in Agriculture*, 10(1), 1-12.
- Johnstone, T. C., & Nolan, E. M. (2015). Beyond iron: non-classical biological functions of bacterial siderophores. *Dalton Transactions*, 44(14), 6320-6339.
- Johnston, E. R., Hatt, J. K., He, Z., Wu, L., Guo, X., Luo, Y., ... & Konstantinidis, K. T. (2019). Responses of tundra soil microbial communities to half a decade of experimental warming at two critical depths. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 116(30), 15096-15105.

- Joshi, N., Ruparelia, J. A., Saraf, M., & Jha, C. K. (2023). Techniques to Study Plant–Microbe Interactions that Lead to Efficient Sustainable Agriculture. In *Plant Microbiome for Plant Productivity and Sustainable Agriculture* (pp. 401-421). Singapore: Springer Nature Singapore.
- Gabriel, G. V., Oliveira, L. C., Barros, D. J., Bento, M. S., Neu, V., Toppa, R. H., ... & Navarrete, A. A. (2020). Methane emission suppression in flooded soil from Amazonia. *Chemosphere*, 250, 126263.
- Gadd, G. M. (2017). Geomicrobiology of the built environment. *Nature microbiology*, 2(4), 1-9.
- Gilliam, F. S., Burns, D. A., Driscoll, C. T., Frey, S. D., Lovett, G. M., & Watmough, S. A. (2024). Responses of forest ecosystems to decreasing nitrogen deposition in eastern North America. In *Atmospheric nitrogen deposition to global forests* (pp. 205-225). Academic Press.
- Gong, X., Jiang, Y., Zheng, Y., Chen, X., Li, H., Hu, F., ... & Scheu, S. (2018). Earthworms differentially modify the microbiome of arable soils varying in residue management. *Soil Biology and Biochemistry*, 121, 120-129.
- Grafton, R. Q., Daughjerg, C., & Qureshi, M. E. (2015). Towards food security by 2050. *Food Security*, 7, 179-183.
- Guhra, T., Ritschel, T., & Totsche, K. U. (2019). Formation of mineral–mineral and organo–mineral composite building units from microaggregate-forming materials including microbially produced extracellular polymeric substances. *European Journal of Soil Science*, 70(3), 604-615.
- Hassani, M. A., Durán, P., & Hacquard, S. (2018). Microbial interactions within the plant holobiont. *Microbiome*, 6, 1-17.
- Hermans, S. M., Lear, G., Case, B. S., & Buckley, H. L. (2023). The soil microbiome: An essential, but neglected, component of regenerative agroecosystems. *Iscience*.
- Holland, J. E., Bennett, A. E., Newton, A. C., White, P. J., McKenzie, B. M., George, T. S., ... & Hayes, R. C. (2018). Liming impacts on soils, crops and biodiversity in the UK: A review. *Science of the Total Environment*, 610, 316-332.

- Husson, O. (2013). Redox potential (Eh) and pH as drivers of soil/plant/microorganism systems: a transdisciplinary overview pointing to integrative opportunities for agronomy. *Plant and soil*, 362, 389-417.
- Johnston, A. S., & Sibly, R. M. (2018). The influence of soil communities on the temperature sensitivity of soil respiration. *Nature ecology & evolution*, 2(10), 1597-1602.
- Im, J., Yang, K., Jho, E. H., & Nam, K. (2015). Effect of different soil washing solutions on bioavailability of residual arsenic in soils and soil properties. *Chemosphere*, 138, 253-258.
- Khan, A., & Ball, B. A. (2024). Soil microbial responses to simulated climate change across polar ecosystems. *Science of the Total Environment*, 909, 168556.
- Kour, S., Gupta, M., Gupta, V., & Kour, K. (2023). 1 Soil physicochemical and biological. *Soil Microbiome of the Cold Habitats: Trends and Applications*, 1.
- Kumar, M., Ahmad, S., & Singh, R. P. (2022). Plant growth promoting microbes: Diverse roles for sustainable and ecofriendly agriculture. *Energy Nexus*, 100133.
- Krause, A., Sandmann, D., Bluhm, S. L., Ermilov, S., Widyastuti, R., Haneda, N. F., ... & Maraun, M. (2019). Shift in trophic niches of soil microarthropods with conversion of tropical rainforest into plantations as indicated by stable isotopes (15N, 13C). *PLoS One*, 14(10), e0224520.
- Laforest-Lapointe, I., Messier, C., & Kembel, S. W. (2016). Tree phyllosphere bacterial communities: exploring the magnitude of intra-and inter-individual variation among host species. *PeerJ*, 4, e2367.
- Lange, M., Eisenhauer, N., Sierra, C. A., Bessler, H., Engels, C., Griffiths, R. I., ... & Gleixner, G. (2015). Plant diversity increases soil microbial activity and soil carbon storage. *Nature communications*, 6(1), 6707.
- Lehmann, A., Zheng, W., & Rillig, M. C. (2017). Soil biota contributions to soil aggregation. *Nature ecology & evolution*, 1(12), 1828-1835.

- Leifheit, E. F., Verbruggen, E., & Rillig, M. C. (2014). Rotation of hyphal in-growth cores has no confounding effects on soil abiotic properties. *Soil Biology and Biochemistry*, 79, 78-80.
- Li, C., Cui, C., Zhang, J., Shen, J., He, B., Long, Y., & Ye, J. (2023). Biodegradation of petroleum hydrocarbons based pollutants in contaminated soil by exogenous effective microorganisms and indigenous microbiome. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 253, 114673.
- Linder, H. P., Lehmann, C. E., Archibald, S., Osborne, C. P., & Richardson, D. M. (2018). Global grass (P oaceae) success underpinned by traits facilitating colonization, persistence and habitat transformation. *Biological Reviews*, 93(2), 1125-1144.
- Mergelov, N., Mueller, C. W., Prater, I., Shorkunov, I., Dolgikh, A., Zazovskaya, E., ... & Goryachkin, S. (2018). Alteration of rocks by endolithic organisms is one of the pathways for the beginning of soils on Earth. *Scientific Reports*, 8(1), 3367.
- Nam, N. N., Do, H. D. K., Loan Trinh, K. T., & Lee, N. Y. (2023). Metagenomics: An Effective Approach for Exploring Microbial Diversity and Functions. *Foods*, 12(11), 2140.
- Naylor, D., Sadler, N., Bhattacharjee, A., Graham, E. B., Anderton, C. R., McClure, R., ... & Jansson, J. K. (2020). Soil microbiomes under climate change and implications for carbon cycling. *Annual Review of Environment and Resources*, 45(1), 29-59.
- Nazir, M. J., Li, G., Nazir, M. M., Zulfiqar, F., Siddique, K. H., Iqbal, B., & Du, D. (2024). Harnessing soil carbon sequestration to address climate change challenges in agriculture. *Soil and Tillage Research*, 237, 105959.
- Nottingham, A. T., Bååth, E., Reischke, S., Salinas, N., & Meir, P. (2019). Adaptation of soil microbial growth to temperature: using a tropical elevation gradient to predict future changes. *Global change biology*, 25(3), 827-838.
- O'Brien, P. A., Webster, N. S., Miller, D. J., & Bourne, D. G. (2019). Host-microbe coevolution: applying evidence from model systems to complex marine invertebrate holobionts. *MBio*, 10(1), 10-1128.

- Ouyang, Y., & Norton, J. M. (2020). Short-term nitrogen fertilization affects microbial community composition and nitrogen mineralization functions in an agricultural soil. *Applied and Environmental Microbiology*, 86(5), e02278-19.
- Pajares, S., & Bohannan, B. J. (2016). Ecology of nitrogen fixing, nitrifying, and denitrifying microorganisms in tropical forest soils. *Frontiers in microbiology*, 7, 1045.
- Palmieri, D., Vitale, S., Lima, G., Di Pietro, A., & Turrà, D. (2020). A bacterial endophyte exploits chemotropism of a fungal pathogen for plant colonization. *Nature communications*, 11(1), 5264.
- Pant, R., Gupta, A., Singh, A., Srivastava, S., & Patrick, N. (2023). A Summary of the Role of Microorganisms in Waste Management. In *Microbial Technology for Sustainable E-waste Management* (pp. 337-352). Cham: Springer International Publishing.
- Pérez-Jaramillo, J. E., Mendes, R., & Raaijmakers, J. M. (2016). Impact of plant domestication on rhizosphere microbiome assembly and functions. *Plant molecular biology*, 90, 635-644.
- Philippot, L., Chenu, C., Kappler, A., Rillig, M. C., & Fierer, N. (2023). The interplay between microbial communities and soil properties. *Nature Reviews Microbiology*, 1-14
- Prasad, R., Dhyani, S. K., Newaj, R., Kumar, S. U. D. H. I. R., & Tripathi, V. D. (2016). Contribution of advanced agroforestry research in sustaining soil quality for increased food production and food security. *Journal of Soil and Water Conservation*, 15(1), 31-39.
- Prasad, S., Malav, L. C., Choudhary, J., Kannojiya, S., Kundu, M., Kumar, S., & Yadav, A. N. (2021). Soil microbiomes for healthy nutrient recycling. Current trends in microbial biotechnology for sustainable agriculture, 1-21.
- Rabot, E., Wiesmeier, M., Schlüter, S., & Vogel, H. J. (2018). Soil structure as an indicator of soil functions: A review. *Geoderma*, 314, 122-137.
- Rahman, S. M., Kranthi, P., Ravi, G., & Srinivas, K. (2022). Chapter-6 Endosymbionts and Its Role in Insect Pest Management. *ENTOMOLOGY*, 27, 97.

- Rillig, M. C., & Mummey, D. L. (2006). Mycorrhizas and soil structure. *New phytologist*, 171(1), 41-53.
- Ritz, K., & Young, I. M. (2004). Interactions between soil structure and fungi. *Mycologist*, 18(2), 52-59.
- Sánchez-Cañete, E. P., Barron-Gafford, G. A., & Chorover, J. (2018). A considerable fraction of soil-respired CO₂ is not emitted directly to the atmosphere. *Scientific Reports*, 8(1), 13518.
- Sands, R. D., & Suttles, S. A. (2022). World agricultural baseline scenarios through 2050. *Applied Economic Perspectives and Policy*, 44(4), 2034-2048.
- Schimel, J. P. (2018). Life in dry soils: effects of drought on soil microbial communities and processes. *Annual review of ecology, evolution, and systematics*, 49(1), 409-432.
- Sharma, S. R., & Sharma, R. (2023). Orchestration of the Plant Microbiome for Enhanced Agriculture. In *Sustainable Agriculture Reviews 60: Microbial Processes in Agriculture* (pp. 23-46). Cham: Springer Nature Switzerland.
- Singh, D., Slik, J. W. F., Jeon, Y. S., Tomlinson, K. W., Yang, X. D., Wang, J., ... & Adams, J. M. (2019). Tropical forest conversion to rubber plantation affects soil micro and mesofaunal community and diversity, *Sci. Rep.*, 9, 5893.
- Six, J., Bossuyt, H., Degryze, S., & Deneff, K. (2004). A history of research on the link between (micro) aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics. *Soil and tillage research*, 79(1), 7-31.
- Sokol, N. W., Slessarev, E., Marschmann, G. L., Nicolas, A., Blazewicz, S. J., Brodie, E. L., ... & Pett-Ridge, J. (2022). Life and death in the soil microbiome: how ecological processes influence biogeochemistry. *Nature Reviews Microbiology*, 20(7), 415-430.
- Sorenson, P. T., Quideau, S. A., Rivard, B., & Dyck, M. (2020). Distribution mapping of soil profile carbon and nitrogen with laboratory imaging spectroscopy. *Geoderma*, 359, 113982.
- Stein, L. Y., & Klotz, M. G. (2016). The nitrogen cycle. *Current Biology*, 26(3), R94-R98.

- Sun, F., & Lu, S. (2014). Biochars improve aggregate stability, water retention, and pore-space properties of clayey soil. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 177(1), 26-33.
- Syed, A., Sarwar, G., Shah, S. H., & Muhammad, S. (2021). Soil salinity research in 21st century in Pakistan: its impact on availability of plant nutrients, growth and yield of crops. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 52(3), 183-200.
- Thakur, M. P., & Geisen, S. (2019). Trophic regulations of the soil microbiome. *Trends in microbiology*, 27(9), 771-780.
- Thiele-Bruhn, S., Kästner, M., Miltner, A., Maskow, T., & Lorenz, M. (2023). SoilSystems, a research program on systems ecology of soils–energy discharge modulated by microbiome and boundary conditions (No. EGU23-16304). Copernicus Meetings.
- Thompson, G. L., Bray, N., Groffman, P. M., & Kao-Kniffin, J. (2023). Soil microbiomes in lawns reveal land-use legacy impacts on urban landscapes. *Oecologia*, 1-15.
- Tiemann, L. K., & Grandy, A. S. (2015). Mechanisms of soil carbon accrual and storage in bioenergy cropping systems. *Gcb Bioenergy*, 7(2), 161-174.
- Torsvik, V., & Øvreås, L. (2002). Microbial diversity and function in soil: from genes to ecosystems. *Current opinion in microbiology*, 5(3), 240-245.
- Totsche, K. U., Amelung, W., Gerzabek, M. H., Guggenberger, G., Klumpp, E., Knief, C., ... & Kögel-Knabner, I. (2018). Microaggregates in soils. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 181(1), 104-136.
- Uroz, S., Calvaruso, C., Turpault, M. P., Sarniguet, A., de Boer, W., Leveau, J. H. J., & Frey-Klett, P. (2009). Efficient mineral weathering is a distinctive functional trait of the bacterial genus *Collimonas*. *Soil Biology and Biochemistry*, 41(10), 2178-2186.
- Vaksmaa, A., Van Alen, T. A., Ettwig, K. F., Lupotto, E., Valè, G., Jetten, M. S., & Lüke, C. (2017). Stratification of diversity and activity of methanogenic and methanotrophic microorganisms in a nitrogen-fertilized Italian paddy soil. *Frontiers in microbiology*, 8, 2127.

- Van der Wal, A., Geerts, R. H. E. M., Korevaar, H., Schouten, A. J., op Akkerhuis, G. J., Rutgers, M., & Mulder, C. (2009). Dissimilar response of plant and soil biota communities to long-term nutrient addition in grasslands. *Biology and fertility of soils*, 45, 663-667.
- Videmšek, U., Hagn, A., Suhadolc, M., Radl, V., Knicker, H., Schloter, M., & Vodnik, D. (2009). Abundance and diversity of CO₂-fixing bacteria in grassland soils close to natural carbon dioxide springs. *Microbial ecology*, 58, 1-9.
- Vylkova, S. (2017). Environmental pH modulation by pathogenic fungi as a strategy to conquer the host. *PLoS pathogens*, 13(2), e1006149.
- Walder, F., Schmid, M. W., Riedo, J., Valzano-Held, A. Y., Banerjee, S., Büchi, L., ... & van Der Heijden, M. G. (2022). Soil microbiome signatures are associated with pesticide residues in arable landscapes. *Soil Biology and Biochemistry*, 174, 108830.
- Whipps, J., Hand, P., Pink, D., & Bending, G. D. (2008). Phyllosphere microbiology with special reference to diversity and plant genotype. *Journal of applied microbiology*, 105(6), 1744-1755.
- Wiesmeier, M., Urbanski, L., Hobbey, E., Lang, B., von Lützw, M., Marin-Spiotta, E., ... & Kögel-Knabner, I. (2019). Soil organic carbon storage as a key function of soils-A review of drivers and indicators at various scales. *Geoderma*, 333, 149-162.
- Williams, A., Jordan, N. R., Smith, R. G., Hunter, M. C., Kammerer, M., Kane, D. A., ... & Davis, A. S. (2018). A regionally-adapted implementation of conservation agriculture delivers rapid improvements to soil properties associated with crop yield stability. *Scientific reports*, 8(1), 8467.
- Yang, Z., Sun, T., Kleindienst, S., Straub, D., Kretzschmar, R., Angenent, L. T., & Kappler, A. (2021). A coupled function of biochar as geobattery and geoconductor leads to stimulation of microbial Fe (III) reduction and methanogenesis in a paddy soil enrichment culture. *Soil Biology and Biochemistry*, 163, 108446.

- Zhang, H. Y., Goncalves, P., Copeland, E., Qi, S. S., Dai, Z. C., Li, G. L., ... & Thomas, T. (2020). Invasion by the weed *Conyza canadensis* alters soil nutrient supply and shifts microbiota structure. *Soil Biology and Biochemistry*, 143, 107739.
- Zhu, T., & Dittrich, M. (2016). Carbonate precipitation through microbial activities in natural environment, and their potential in biotechnology: a review. *Frontiers in bioengineering and biotechnology*, 4, 4.
- Zhu, Y. G., Peng, J., Chen, C., Xiong, C., Li, S., Ge, A., ... & Liesack, W. (2023). Harnessing biological nitrogen fixation in plant leaves. *Trends in Plant Science*.

BÖLÜM 5

SERT KABUKLU MEYVELERDE VERİMLİĞİ SINIRLAYAN FAKTÖRLER

Doç. Dr. Emrah GÜLER^{1*}
Prof. Dr. Turan KARADENİZ²
Prof. Dr. Ferhad MURADOĐLU³

DOI: <https://dx.doi.org/10.5281/zenodo.14541793>

^{1*} Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Bahçe Bitkileri Bölümü, Bolu, Türkiye. *emrahguler@ibu.edu.tr

² Pamukkale Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Bahçe Bitkileri Bölümü, Denizli, Türkiye. turankaradeniz@hotmail.com

³ Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi, Ziraat Fakültesi Bahçe Bitkileri Bölümü, Bolu, Türkiye. muradogluf@ibu.edu.tr

GİRİŞ

Tarım sektör¼, pek çok farklı fakt¼r¼n bir araya gelerek Őekillendirdiđi dinamik bir alandır. Bu bağlamda, iklim ve çevresel fakt¼rler tarımsal üretimini temelini oluşturur. İklim değişikliği, aşırı hava olayları, kuraklık ve toprak erozyonu gibi sorunlar bitki büyümesini ve verimliliği doğrudan etkilerken, sürdürülebilir tarım uygulamalarına olan ihtiyacı artırmaktadır. Aynı zamanda, çevresel kirlilik ve biyolojik çeşitliliğin azalması gibi unsurlar da üretim süreçlerini karmaşık hale getirmektedir.

Bu çevresel dinamiklerin yanı sıra, bitki sağlığı problemleri de üretim üzerinde büyük bir baskı yaratmaktadır. Zararlılar, hastalıklar ve yabancı otlar, verim kayıplarına yol açmakta ve pestisit kullanımını artırmaktadır. Ancak, bu gibi müdahalelerin çevreye olan olumsuz etkileri, daha yenilikçi ve çevre dostu yöntemlerin geliştirilmesini zorunlu kılmaktadır. Bu süreçte, genetik ve çeşit seçimi, yerel koşullara uyum sağlayan ve çevresel streslere dayanıklı çeşitlerin geliştirilmesini gerekli kılmaktadır.

Tarımın sürdürülebilirliği, yalnızca bu unsurlara değil, aynı zamanda tarımsal uygulamalar, ekonomik ve sosyal fakt¼rler, teknolojik ve mekanik fakt¼rler gibi etkenlere de bağlıdır. Modern tarım yöntemlerinin entegrasyonu, maliyetlerin düşür¼lmesi ve sosyal adaletin sağlanması, sektör¼n geleceği açısından kritik önem taşır. Bununla birlikte, sürdürülebilirlik ve çevre dostu üretim yaklaşımları, doğal kaynakların korunmasını ve gelecek nesillere sağlıklı bir çevre

bırakmayı hedefler. Tüm bu alanlarda, araştırma ve geliştirme eksiklikleri ise çözümlerin uygulanabilirliğini sınırlayan başlıca engeller arasında yer almaktadır. Bu nedenle, multidisipliner bir yaklaşımla, bilimsel yeniliklerin pratiğe aktarılması ve yaygınlaştırılması gereklidir.

1. İKLİM VE ÇEVRESEL FAKTÖRLER

1.1. İklim Değişikliği

İklim değişikliği, sıcaklık dalgalanmaları, kuraklık, don olayları ve aşırı yağış gibi faktörler yoluyla sert kabuklu meyve üretimini derinden etkilemekte ve bu durum bitki büyümesi ile ürün kalitesini doğrudan şekillendirmektedir (Karadeniz, 2005). Bu değişiklikler, bitkilerin fizyolojik süreçlerini, ürün verimlerini ve hastalık ile zararlıların yaygınlığını kapsamlı bir şekilde etkilemektedir. Özellikle kuraklık, sert kabuklu meyve üretimini tehdit eden en kritik çevresel stres faktörlerinden biri olarak öne çıkmaktadır (Gülsoy ve ark., 2023). Kuraklık, hücre genişlemesini engellemekte, stoma açıklığını azaltmakta ve karbonhidrat tedarikini sınırlayarak bitki büyümesini ve verimliliğini ciddi şekilde düşürmektedir (Yuan ve ark., 2016).

Bazı sert kabuklu meyve türleri, kuraklık koşullarına karşı daha dirençli özellikler sergilemektedir. Örneğin, badem ağacı (*Prunus amygdalus*), dikkate değer bir kuraklık direnci göstererek farklı pedoklimatik koşullarda gelişim gösterebilmektedir (Melhaoui ve ark., 2018). Ancak, şiddetli kuraklıklar sırasında hikori meyvesi gibi diğer sert kabuklu meyve türlerinde verim kayıpları yaşandığı gözlemlenmiştir (Xi ve ark.,

2016). Kuraklık stresi, bitkilerde absisik asit (ABA) birikimi gibi fizyolojik tepkileri tetiklemekte ve bu tepkiler, bitkilerin kuraklık koşullarına toleransını artırmada hayati bir rol oynamaktadır (Muradoğlu ve ark., 2010; Mu ve ark., 2022). Bu fizyolojik mekanizmalar, sınırlı su kaynakları altında büyüme ve üretkenliği sürdürebilmek için kritik öneme sahiptir. Ancak, kuraklık gibi çevresel stres faktörlerinin etkilerini hafifletmek için yerel koşullara uygun tarımsal uygulamaların ve dayanıklı çeşitlerin geliştirilmesi gerekmektedir.

Sıcaklık dalgalanmaları ve aşırı yağış, sert kabuklu meyve üretimi için ciddi zorluklar oluşturmaktadır. Küresel ısınma, sıcaklık değişkenliğini ve yağış modellerini değiştirmekte, bu durum özellikle Akdeniz Havzası gibi bölgelerde fıstıklarda aflatoksin kontaminasyonu riskini artırmaktadır (Leggieri ve ark., 2020). Aflatoksin üretimi ile sıcaklık arasındaki ilişki kritik bir öneme sahiptir, çünkü yüksek sıcaklıklar, aflatoksin kontaminasyonundan sorumlu olan *Aspergillus flavus* türünün çoğalmasını ve toksin üretimini teşvik etmektedir (Baazeem ve ark., 2021). Bu durum, özellikle sıcaklıkların artmasıyla birlikte gıda güvenliği ve ürün kalitesi açısından önemli bir tehdit oluşturmaktadır.

Aşırı yağış ise su baskınlarına yol açarak kök sağlığını ve besin alımını olumsuz etkilemekte, bu da sert kabuklu meyvelerin verimini ve kalitesini tehlikeye atmaktadır. Su baskınları, köklerin oksijen alımını sınırlayarak bitki büyümesini engellemekte ve hastalık riskini artırmaktadır. Bunun yanı sıra, don olayları da sert kabuklu meyve

üretimi için önemli bir risk faktörüdür. Özellikle çiçeklenme ve meyve tutumu aşamalarında meydana gelen don olayları, çiçeklere ve genç meyvelere zarar vererek verim kaybına ve ürün kalitesinin düşmesine neden olmaktadır. İklim değişikliği nedeniyle don olaylarının zamanlaması giderek daha öngörülemez hale gelmekte, bu da üreticilerin mahsullerini koruma stratejilerini zorlaştırmaktadır.

Bu zorluklar, sert kabuklu meyve üretiminde iklim değişikliğine uyum sağlayacak yenilikçi ve yerel koşullara uygun yönetim stratejilerinin geliştirilmesini zorunlu kılmaktadır. Sıcaklık dalgalanmaları, aşırı yağış ve don olaylarının etkilerini hafifletmek için dayanıklı çeşitlerin geliştirilmesi, uygun tarımsal uygulamaların benimsenmesi ve erken uyarı sistemlerinin kullanılması büyük önem taşımaktadır.

1.2. Toprak Koşulları

Toprağın besin içeriği, pH durumu ve su tutma kapasitesi gibi özellikler, sert kabuklu meyve ürünlerinin büyümesi ve verimliliği üzerinde kritik bir etkiye sahiptir. Bu özelliklerin anlaşılması, yetiştirme uygulamalarını optimize etmek ve verimi artırmak için temel bir gerekliliktir. Toprak besin içeriği, bitki sağlığı ve verimliliğinin birincil belirleyicisi olarak öne çıkmaktadır. Örneğin, areka fıncığı plantasyonlarında yapılan çalışmalar, uzun vadeli tarımsal uygulamaların toprak inorganik azot tedarikinde düşüşe yol açabileceğini ve bunun ürün verimi ile besin döngüsünü olumsuz etkileyebileceğini göstermiştir (Zhu ve ark., 2022).

Benzer şekilde, mikro besinlerin mevcudiyeti de sert kabuklu meyve üretiminde büyük bir öneme sahiptir. Mikro besin eksiklikleri, toprak yönetimi ve ekim sistemleri gibi faktörlerden etkilenerek optimum olmayan bitki verimliliğine ve düşük kaliteli ürünlere neden olabilmektedir (Choudhury ve ark., 2021). Bu durum, mikro besinlerin düzenli izlenmesi ve uygun gübreleme stratejilerinin uygulanmasının gerekliliğini ortaya koymaktadır. Ayrıca, organik madde uygulamalarının, özellikle badem bahçelerinde, toprak besin tutulmasını ve mevcudiyetini artırarak toprak verimliliğini önemli ölçüde iyileştirdiği belirlenmiştir (Villa ve ark., 2021). Organik madde, toprak yapısını iyileştirerek su tutma kapasitesini artırmakta ve bitkilerin ihtiyaç duyduğu besin maddelerinin daha uzun süre toprakta kalmasını sağlamaktadır.

Bu bulgular, sert kabuklu meyve üretiminde uygun toprak yönetimi uygulamalarının önemini vurgulamaktadır. Toprak besin seviyelerinin korunması, organik madde uygulamalarının teşvik edilmesi ve mikro besin eksikliklerinin giderilmesi, hem verimliliği artırmak hem de ürün kalitesini iyileştirmek için kritik öneme sahiptir. Toprak özelliklerinin düzenli analizi ve buna uygun yönetim stratejilerinin uygulanması, sürdürülebilir sert kabuklu meyve üretimi için temel bir gerekliliktir.

Toprağın pH durumu, sert kabuklu meyve ağaçlarının büyümesi ve verimliliği üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Toprak pH'ı, besin maddelerinin çözünürlüğünü ve bitkiler tarafından alınımını doğrudan etkileyerek ürün sağlığı ve üretkenliği üzerinde belirleyici bir rol oynar. Örneğin, areka fıncığı yetiştiriciliği, besinlerin bitkiler tarafından daha

kolay alınmasını sağlayan hafif asidik ila nötr pH seviyelerine sahip topraklarda başarılı bir şekilde gelişmektedir (Ghimire ve Dhungana, 2020). Bu durum, areka fındığının optimum büyüme koşulları için belirli pH aralıklarına ihtiyaç duyduğunu göstermektedir.

Buna karşılık, Brezilya fındığı (*Bertholletia excelsa*) ağaçları, oksitsiz toprakları tercih etmekte olup, bu durum pH ve toprak tipinin belirli sert kabuklu meyve türleri için bir bölgenin uygunluğunu belirlemede kritik bir faktör olduğunu ortaya koymaktadır (Spera ve ark., 2020). Örneğin, düşük pH seviyelerine sahip asidik topraklar, bazı mikro besinlerin (örneğin, demir ve alüminyum) toksik seviyelere ulaşmasına neden olabilirken, yüksek pH seviyeleri ise fosfor, çinko ve mangan gibi besin maddelerinin bitkiler tarafından alınımı sınırlayabilir. Bu nedenle, toprak pH'nının düzenlenmesi, sert kabuklu meyve ağaçlarının sağlıklı büyümesi ve yüksek verim elde edilmesi için kritik bir öneme sahiptir.

Su tutma kapasitesi (STK), sert kabuklu meyve üretimini etkileyen kritik bir toprak özelliği olarak öne çıkmaktadır. Daha yüksek organik madde içeriğine sahip topraklar, kurak dönemlerde bitki büyümesini sürdürmek için hayati önem taşıyan gelişmiş bir STK sergilemektedir (Williams ve ark., 2016). Organik madde, toprak yapısını iyileştirerek suyun toprakta daha uzun süre tutulmasını sağlamakta ve bitkilerin ihtiyaç duyduğu suya erişimini kolaylaştırmaktadır. Araştırmalar, toprak organik maddesinin artırılmasının STK'yi iyileştirerek ürünlerin su talebi yönetimini daha verimli hale getirdiğini göstermektedir (Wood ve ark., 2016).

Ek olarak, kumlu topraklara biyokömür eklenmesinin nem tutulmasını artırdığı, besin maddelerini bitkiler için daha ulaşılabilir hale getirdiği ve sonuç olarak ürün verimliliğini yükselttiği belirlenmiştir (Uzoma ve ark., 2011). Biyokömür, toprak gözenekliliğini artırarak suyun toprakta tutulmasını desteklerken aynı zamanda besin maddelerinin yıkanmasını önlemekte ve bitkilerin büyümesi için daha elverişli bir ortam sağlamaktadır. Bu durum, özellikle su bulunabilirliğinin tarımsal başarı için sınırlayıcı bir faktör olduğu kurak ve yarı kurak bölgelerde büyük önem taşımaktadır.

STK'nin artırılması, sert kabuklu meyve üretiminde su yönetimini optimize etmek ve kuraklık gibi çevresel stres faktörlerinin etkilerini hafifletmek için kritik bir stratejidir. Organik madde uygulamaları, biyokömür kullanımı ve diğer toprak iyileştirme yöntemleri, suyun daha verimli kullanılmasını sağlayarak hem ürün verimliliğini hem de sürdürülebilir tarımı desteklemektedir. Bu tür uygulamalar, özellikle su kaynaklarının sınırlı olduğu bölgelerde sert kabuklu meyve üretiminin geleceği için hayati bir rol oynamaktadır

1.3. Su Kısıtı

Su kıtlığı ve sulama suyunun kalitesi, su bulunabilirliğine ve kalitesine karşı oldukça hassas olan sert kabuklu meyve üretimini önemli ölçüde etkilemektedir. Badem, antep fıstığı ve macadamia gibi sert kabuklu meyve türleri, optimum büyüme ve verim için genellikle önemli miktarda suya ihtiyaç duymaktadır. Örneğin, Kaliforniya'nın Orta Vadisi'ndeki sert kabuklu meyve bahçeleri, ticari olarak uygulanabilir

verim elde etmek için yılda 60 ila 110 cm su gereksinimi duymaktadır (Mall ve Herman, 2019). Bu durum, su kaynaklarının sınırlı olduğu bölgelerde sert kabuklu meyve üretiminin sürdürülebilirliği açısından ciddi bir zorluk oluşturmaktadır.

İklim değişikliği, artan tarımsal talepler ve su kaynaklarının azalması, su kıtlığını daha da şiddetlendirmekte ve bu durum, üreticilerin açık sulama gibi verimsiz sulama yöntemlerine yönelmesine neden olabilmektedir (Mall ve Herman, 2019). Ancak, bu tür stratejiler, suyun israfına ve toprak tuzluluğunun artmasına yol açarak uzun vadede ürün verimliliğini ve toprak sağlığını olumsuz etkileyebilmektedir. Ayrıca, sulama suyunun kalitesi de sert kabuklu meyve üretimi üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Tuzlu veya düşük kaliteli sulama suyu, toprak tuzluluğunu artırarak bitki köklerinin su alımını zorlaştırmakta ve ürün veriminde düşüslere neden olmaktadır.

Su kıtlığının etkileri, sert kabuklu meyve tarımının yoğun olarak yapıldığı bölgelerde özellikle belirgin hale gelmektedir. Kaliforniya'da, sert kabuklu meyveler gibi çok yıllık bitkilerin yetiştirilmesine yönelik artan eğilim, devam eden kuraklık koşulları altında su talebini önemli ölçüde artırmıştır (Mall ve Herman, 2019). Bu durum, genellikle aşırı çıkarılan yeraltı suyuna olan bağımlılığın artmasına yol açmış ve uzun vadeli sürdürülebilirlik açısından ciddi endişeler doğurmuştur (Arellano-González ve Moore, 2020). Yeraltı suyunun aşırı kullanımı, su seviyelerinin düşmesine, toprak tuzluluğunun artmasına ve ekosistem dengesinin bozulmasına neden olarak tarımsal üretimi tehdit etmektedir.

Ayrıca, düşük kaliteli su kaynaklarının, özellikle tuzlu veya kirli suların kullanımı, sert kabuklu meyve ağaçları üzerinde daha fazla strese yol açmaktadır. Bu durum, büyümeyi, verimi ve ürün kalitesini olumsuz yönde etkileyerek ekonomik kayıplara neden olmaktadır (Carr, 2012). Örneğin, macadamia ağaçlarının değişen su mevcudiyetine verdiği fizyolojik tepkiler, bu türlerin su stresine karşı hassasiyetini ortaya koymakta ve mahsul sağlığını korumak için sulamanın etkili bir şekilde yönetilmesinin önemini vurgulamaktadır (Bhattarai ve ark., 2021). Yetersiz veya düşük kaliteli sulama, bitkilerde fizyolojik stresin artmasına, fotosentez oranlarının düşmesine ve dolayısıyla ürün veriminde azalmaya yol açmaktadır.

Damla sulama gibi gelişmiş sulama teknolojilerinin benimsenmesi, sert kabuklu meyve bahçelerinde su kullanım verimliliğini artırmada etkili bir yöntem olarak öne çıkmaktadır (Rudnick ve ark., 2021). Bu sistemler, suyu doğrudan bitki köklerine ulaştırarak su kaybını en aza indirirken, aynı zamanda bitkilerin ihtiyaç duyduğu suyu daha hassas bir şekilde sağlamaktadır. Ancak, bu sistemlerin etkinliği, toprak türü, mahsul çeşidi ve yerel çevresel koşullara bağlı olarak değişiklik gösterebilmektedir. Örneğin, kumlu topraklarda suyun hızla sızması nedeniyle damla sulamanın etkinliği azalabilirken, killi topraklarda suyun daha uzun süre tutulması bu yöntemin avantajlarını artırabilir. Bu durum, su kullanımını optimize etmek ve bitkiler üzerindeki stresi en aza indirmek için mahsule ve bölgeye özgü sulama stratejilerinin geliştirilmesini gerektirmektedir (Bhattarai ve ark., 2021).

Sert kabuklu meyve verimlerinin döngüsel doğası, sulama uygulamaları ile ürün sonuçları arasında net neden-sonuç ilişkilerinin kurulmasını zorlaştırmaktadır. Örneğin, bir yıl yüksek verim alınan bir bahçede, sonraki yıl bitkinin fizyolojik yorgunluğu nedeniyle verim düşebilir. Bu durum, evrensel olarak uygulanabilir sulama kılavuzlarının geliştirilmesini güçleştirmekte ve üreticilerin yerel koşullara uygun, esnek sulama stratejileri benimsemesini zorunlu kılmaktadır (Carr, 2012).

Tüm bu bilgiler ışığında, su bulunabilirliği, sulama uygulamaları ve sert kabuklu meyve sağlığı arasındaki etkileşim oldukça karmaşık ve çok yönlüdür. Artan su kıtlığı ve düşük kaliteli su kaynakları karşısında sert kabuklu meyve üretimini sürdürülebilir kılmak için etkili su yönetimi stratejileri kritik bir öneme sahiptir. Yenilikçi sulama tekniklerinin entegrasyonu, toprak ve mahsul özelliklerine uygun sulama planlarının geliştirilmesi ve ürüne özgü su ihtiyaçlarının kapsamlı bir şekilde anlaşılması, hem verimliliği optimize etmek hem de su kısıtlı ortamlarda sert kabuklu meyve tarımının uzun vadeli sürdürülebilirliğini sağlamak için elzemdir. Bu yaklaşımlar, su kaynaklarının daha verimli kullanılmasını sağlayarak çevresel ve ekonomik sürdürülebilirliği destekleyecektir.

1.4. Rüzgâr ve Fırtına

Rüzgâr ve fırtınaların sert kabuklu meyve türlerinin tozlaşma süreci üzerindeki etkileri, çevresel ve biyolojik faktörlerin karmaşık bir etkileşimini yansıtmaktadır. Rüzgâr, badem ve macadamia gibi çapraz

tozlaşmaya bağımlı sert kabuklu meyve türlerinde polen yayılımını kolaylaştırarak tozlaşma sürecine olumlu katkı sağlayabilir. Ancak, fırtına gibi aşırı hava olayları bu süreci bozarak polen yayılımını sınırlayabilir, çiçeklere zarar verebilir ve tozlaşma verimliliğini azaltarak üretimde düşüslere yol açabilir. Örneğin, macadamia yetiştiricileri, fırtına hasarını üretimi sınırlayan önemli bir faktör olarak vurgulamakta ve bu etkilerin azaltılması için etkili bahçe yönetimi stratejilerinin gerekliliğini belirtmektedir (Kämper ve ark., 2021). Ayrıca, bahçe tasarımı unsurları, örneğin sıra yönü ve doğal yaşam alanlarına yakınlık, tozlaşma hizmetlerini artırabilir ve rüzgar ile fırtınaların olumsuz etkilerine karşı tampon görevi görebilir (Anders ve ark., 2023).

Ceviz ağaçlarında ise fiziksel yapı, çiçek morfolojisi ve ağaç düzeni, tozlaşma sürecini ve verimi önemli ölçüde etkilemektedir. Çapraz tozlaşma, cevizlerde verimi artırabilirken, kullanılan polen türü cevizlerin kabuklanma yüzdesini etkileyebilmektedir (Majid ve ark., 2020). Ayrıca, tozlaşma başarısının bitki içi kaynak tahsisini etkilediği ve bunun meyve tutumu ile genel verim üzerinde önemli bir etkisi olduğu gösterilmiştir (Howlett ve ark., 2019). Bu durum, cevizlerin fiziksel yapısı ile tozlaşma dinamikleri arasındaki etkileşimin kritik olduğunu ortaya koymaktadır. Meyve bahçelerinin, ağaçların uygun konfigürasyonlarda dikilmesi gibi tozlaşma hizmetlerini optimize edecek şekilde tasarlanması, ceviz setinde önemli artışlar sağlayabilir (Anders ve ark., 2023).

Böcek polinatörleri de sert kabuklu meyve türlerinin tozlaşmasında hayati bir rol oynamaktadır. Polinatör popülasyonlarının azalması, ürün veriminde ve kalitesinde ciddi düşürlere yol açabilmektedir (Devkota, 2023; Smith ve ark., 2022). Örneğin, Eyles ve ark. (2022), böcek popülasyonlarının azalması bağlamında mekanik polinasyon sistemlerinin sert kabuklu meyve tarımında verimliliği artırma potansiyelini tartışmaktadır. Hem yabancı hem de yönetilen polinatörlere güvenmek, özellikle doğal polinatör popülasyonlarının yetersiz olduğu yoğun tarım arazilerinde kritik öneme sahiptir. Çeşitli polinatör toplulukları, daha iyi polinasyon hizmetleri sunarak ürün verimliliğini artırabilir (Melin ve ark., 2014).

Bu çevresel faktörlerin etkileri genel olarak değerlendirildiğinde, rüzgar ve fırtına gibi çevresel faktörler, sert kabuklu meyvelerin fiziksel yapısı ve polinatörlerin rolü ile karmaşık bir etkileşim içindedir. Bu etkileşimlerin yönetimi, tozlaşmayı optimize etmek ve sürdürülebilir üretimi sağlamak için entegre stratejiler gerektirmektedir. Etkili meyve bahçesi tasarımı, biyolojik etkileşimlerin derinlemesine anlaşılması ve mekanik tozlaşma yöntemlerinin dahil edilmesi, çevresel değişkenlik ve polinatör azalmasının oluşturduğu riskleri azaltmak için önemli adımlardır. Bu yaklaşımlar, sert kabuklu meyve üretiminin uzun vadeli sürdürülebilirliğini destekleyecektir.

2. BİTKİ SAĞLIĞI PROBLEMLERİ

2.1. Hastalıklar

Mantar, bakteri ve vir¼s enfeksiyonları gibi hastalıklar, sert kabuklu meyve üretimini ciddi Şekilde etkileyerek hem verim kayıplarına hem de ekonomik zararlara yol açmaktadır. Özellikle badem (*Prunus dulcis*) ve ceviz gibi ekonomik açıdan önemli t¼rler, bu hastalıkların etkilerine karşı oldukça hassastır. Bu r¼nleri etkileyen en yıkıcı mantar hastalıklarından biri, toprak kaynaklı mantar *Verticillium dahliae* tarafından meydana getirilen *Verticillium* solgunluğudur. Bu patojen, badem ve ceviz de dahil olmak üzere 200'den fazla konakçıyı enfekte etme yeteneğiyle bilinmekte ve Şiddetli damar solgunluğuna neden olarak hem verim kayıplarına hem de r¼n kalitesinin d¼Őmesine yol açmaktadır (Calvo-PeŐa ve ark., 2023; Snchez-Hernndez ve ark., 2023; Ahmad ve ark., 2022).

Verticillium solgunluğu, topraktaki dinlenme yapılarının (mikrosklerotlar) uzun m¼rl¼ olmasđ nedeniyle yönetimi zor bir hastalıktır. Bu yapılar, toprakta yıllarca canlı kalabilmekte ve hastalığın s¼rekli bir tehdit oluŐturmasına neden olmaktadır (Calvo-PeŐa ve ark., 2023). Hastalığın belirtileri arasında ağaç canlılığında azalma, yaprakların sararması, erken dk¼lmesi ve dallarda kuruma yer almakta olup, bu belirtiler sert kabuklu meyve veriminin ve kalitesinin azalmasına doğrudan katkıda bulunmaktadır (Ahmad ve ark., 2022; Keykhasaber ve ark., 2017). Ayrıca, badem anaçlarının farklı derecelerde duyarlılığı, hastalığın yaygınlığını artırmakta ve d¼nya

çapında badem yetiştiricileri için önemli bir sorun oluşturmaktadır (Ahmad ve ark., 2022; Nouri ve ark., 2012).

Mantar patojenlerinin yanı sıra, bakteriyel ve viral hastalıklar da sert kabuklu meyve üretimi için ciddi tehditler oluşturmaktadır. Bakteriyel enfeksiyonlar, yanıklık ve çürüklük gibi sorunlara yol açarken, viral patojenler bodurluk, beneklenme ve yaprak deformasyonlarına neden olarak mahsul verimini ve kalitesini düşürmektedir. Bu hastalıkların kümülatif etkisi, önemli ekonomik kayıplara yol açmakta ve yönetim maliyetleri sıklıkla etkilenen ürünlerden elde edilen getiriye aşmaktadır (Sánchez-Hernández ve ark., 2023).

Hastalıkların yönetimi, genellikle kültürel uygulamaların, dirençli çeşitlerin ve biyolojik kontrol ajanlarının bir kombinasyonunu içermektedir. Örneğin, biyolojik kontrol stratejileri üzerine yapılan araştırmalar, *Verticillium dahliae* gibi patojenleri baskılamak ve bitki sağlığını iyileştirmek için belirli mikrobiyal ajanların kullanımının umut verici sonuçlar verdiğini göstermektedir (Deketelaere ve ark., 2017). Ayrıca, ıslah programları aracılığıyla hastalıklara dayanıklı çeşitlerin geliştirilmesi, bu hastalıkların etkisini azaltmak için kritik bir strateji olarak öne çıkmaktadır (Vahdati ve ark., 2021).

Özetleyecek olursak, *Verticillium* solgunluğu gibi hastalıklar, badem ve ceviz gibi sert kabuklu meyve türleri üzerinde ciddi etkiler yaratmakta ve yetiştiriciler için önemli verim kayıplarına neden olmaktadır. Ancak, dayanıklı çeşitlerin geliştirilmesi, biyolojik kontrol yöntemlerinin uygulanması ve entegre hastalık yönetimi stratejilerinin benimsenmesi,

bu zorlukların üstesinden gelmek ve sert kabuklu meyve üretiminin s¼rd¼r¼lebilirliđini sağlamak için hayati öneme sahiptir. Bu yaklaşımlar, hem ekonomik kayıpları azaltmak hem de çevresel s¼rd¼r¼lebilirliđi desteklemek için kritik bir rol oynamaktadır.

2.2. Zararlılar

Böcekler ve kemirgenler gibi zararlılar, sert kabuklu meyve mahsulleri üzerinde önemli tehditler oluşturarak hem verim kaybına hem de r¼n kalitesinin d¼řmesine yol açmaktadır. Özellikle badem ve fıstık gibi ekonomik değer i y¼ksek sert kabuklu meyve t¼rleri, zararlılar nedeniyle ciddi risk altındadır. Ceviz unlu biti (*Pseudococcus elaeagnifolii*) ve badem yaprak biti (*Aphis amygdali*) gibi zararlılar, bu r¼nlerde yaygın olarak gr¼len t¼rler arasındadır. Örneğin, badem yaprak biti, badem ağaçlarının zsuyuyla beslenerek ağacın sağlığını ve canlılığını azaltmakta, aynı zamanda önemli miktarda verim kaybına neden olmaktadır (Gmez ve ark., 2021). Benzer şekilde, ceviz unlu biti doğrudan beslenme yoluyla hasar verirken, isli k¼f gelişimine zemin hazırlayarak fotosentez s¼recini olumsuz etkileyen dolaylı zararlara da yol açmaktadır (Daane ve ark., 2019). Bu zararlıların etkilerinin genel olarak sert kabuklu meyve t¼rlerinde %15 ila %25 arasında verim kaybına neden olduğu tahmin edilmektedir (Chander, 2023).

Ayrıca, yaprak ayaklı böcek (*Leptoglossus zonatus*) ve kahverengi marmoratl¼ kokuşmuş böcek (*Halyomorpha halys*) gibi zararlılar, mevsimsel dinamikleri nedeniyle mahsul üzerinde ciddi hasar bırakabilmektedir. Özellikle bu böcek t¼rleri kış döneminde meyve

bahçelerinin çevresinde barınmakta ve büyüme mevsiminde istilalar gerçekleştiirerek ürün kaybına neden olmaktadır (Daane ve ark., 2019). Araştırmalar, bu zararlıların gelişimlerinin ileri aşamalarında daha zararlı hale geldiklerini ve bu durumun zamanında izleme ve müdahale ihtiyacını kritik hale getirdiğini göstermektedir (Silva ve Daane, 2014). Dolayısıyla, zararlıları gelişim ve yayılma dinamiklerine göre izlemek, erken müdahale için hayati bir stratejidir.

Zararlılar, doğrudan verdiği fiziksel hasarların yanı sıra, diğer zararlı organizmaların istilasına uygun ortam hazırlayarak dolaylı etkiler de yaratmaktadır. Örneğin, *Aceria guerreronis* akarlarının badem ve ceviz gibi sert kabuklu meyvelerdeki varlığı, meyve düşüşünde artışa ve ardından tırtıllar gibi diğer zararlıların istilasına yol açmakta, bu da nihai ekonomik kayıpları önemli ölçüde artırmaktadır (Paz-Neto ve ark., 2022). Bu tür zararlı dinamiklerindeki etkileşim, zararlı popülasyonlarını kontrol etmenin karmaşıklığını ortaya koymaktadır.

Ekonomik açıdan bakıldığında, zararlılar mahsul üretimi üzerinde ciddi kayıplara neden olmaktadır. Zararlı istilalarının, özellikle gelişmekte olan bölgelerde tarla ve depolama zararlarıyla birlikte potansiyel mahsul üretiminin %43'e varan bir kısmını yok edebildiği tahmin edilmektedir (Obeten, 2022). Bu durum, sadece çiftçilerin ekonomik kayıplarına değil, aynı zamanda gıda güvenliği sorunlarına da yol açarak küresel tarımsal üretimde çok yönlü tehditler oluşturmaktadır.

Bu sorunlarla başa çıkmak için Entegre Zararlı Yönetimi (IPM) stratejileri kritik bir öneme sahiptir. IPM, zararlı popülasyonlarını

ekonomik zarar seviyesinin altında tutmayı hedefleyen, biyolojik kontrol, habitat manipülasyonu, fiziksel önlemler ve pestisitlerin dikkatli bir şekilde entegrasyonunu içeren kapsamlı bir yöntemdir (Chander, 2023). Örneğin, doğal düşmanların kullanımı gibi biyolojik kontrol uygulamaları, pestisit kullanımını azaltabilirken, habitat manipülasyonu zararlıların konak alanlarını sınırlayarak zarar potansiyelini azaltmaktadır.

Zararlıların sert kabuklu meyve mahsulleri üzerinde hem doğrudan hem de dolaylı etkileri büyüktür ve bu etkiler, hem ürün veriminin azalmasına hem de üretim maliyetlerinin artmasına neden olmaktadır. Zararlıların dinamiklerini anlamaya, zamanında izleme çalışmalarına ve entegre yönetim yaklaşımlarına dayalı kapsamlı stratejiler, bu kayıpları azaltmak ve sert kabuklu meyve üretiminin sürdürülebilirliğini sağlamak için hayati önem taşımaktadır. Etkili IPM uygulamaları, yalnızca ürün verimliliğini artırmakla kalmaz, aynı zamanda çevresel sürdürülebilirliği destekleyen alternatif ve kalıcı çözümler sunar.

2.3. Mikrobiyal Aktivite

Kök bölgesindeki patojenik mikroorganizmaların sert kabuklu meyve ürünleri üzerindeki etkisi, tarımsal sürdürülebilirlik ve gıda güvenliği açısından ciddi bir sorun oluşturmaktadır. Bu mikroorganizmalar, bitkilerin fizyolojik ve yapısal bütünlüğünü bozarak büyüme, verim ve uzun dönemli meyve bahçesi sağlığı üzerinde olumsuz sonuçlara yol açmaktadır. Özellikle mantar patojenleri, kök çürümesi ve gövde ile dal

kanseri gibi ciddi hastalıklara neden olmakta, ürün verimliliğinde düşüöşlere ve ekonomik kayıplara yol açmaktadır.

Botryosphaeriaceae familyasına ait mantar patojenleri, sert kabuklu meyve türlerini etkileyen en önemli patojenler arasında yer almaktadır. Badem ve antep fıstığı gibi ekonomik öneme sahip ürünlerde gövde ve dal kanserlerine neden olan bu patojenler, enfekte bitkilerde odunsu dokuyu tahrip ederek verimde ciddi kayıplara neden olmaktadır (Sohrabi ve ark., 2020; Moral ve ark., 2019). Bu tür hastalıklar genellikle yaralanmış dokular aracılığıyla yayılmakta, bu yaralar çevresel faktörler veya tarımsal uygulamalar sırasında oluşmakta ve patojenlerin bitkiye girişini kolaylaştırmaktadır (Guarnaccia ve ark., 2023). Bu durum, sadece ürün kaybına değil, aynı zamanda meyve bahçelerinin uzun ömürlülüğünü de büyük ölçüde tehlikeye atmaktadır (Gramaje ve ark., 2016).

Kök bölgesi, patojenlerin etkilerinin en yoğun bir şekilde görüldüğü kritik bir alandır. Toprak kökenli mantarlar, bitki köklerini enfekte ederek su ve besin maddelerinin alınmasını engelleyen kök çürümesine neden olmaktadır. Örneğın, *Fusarium* türlerinin kök enfeksiyonları, bitkilerin canlılığını azaltmakta ve çevresel stres faktörlerine duyarlıklarını artırmaktadır (Naseri ve ark., 2015). Toprak sağlığı ile patojenlerin yaygınlığı arasındaki ilişki oldukça karmaşıktır. Yanlış toprak yönetimi uygulamaları, toprak mikrobiyal dengesini bozarak patojenlerin yayılmasını teşvik etmekte, bu da ürün verimliliği üzerinde olumsuz etkilere neden olmaktadır (Yang ve ark., 2023).

Patojenik mikroorganizmaların yanı sıra, kök bölgesindeki mikrobiyal toplulukların etkileşimleri bitki sağlığını önemli ölçüde etkileyebilmektedir. Faydalı mikroorganizmalar, özellikle arbusküler mikorizal mantarlar, köklerle simbiyotik ilişkiler kurarak bitkilerin besin alımını artırırken patojenlere karşı koruma sağlayabilmektedir. Ancak, patojenik mantarların kök bölgesindeki varlığı, bu yararlı etkileşimleri zayıflatarak bitki sağlığını daha da bozmaktadır (Zasada ve ark., 2010). Bu durum, kök bölgesindeki mikrobiyal dinamiklerin daha iyi anlaşılmasının ve bu dengeyi koruyacak tarımsal stratejilerin geliştirilmesinin önemini vurgulamaktadır.

Çevresel faktörler, kök patojenlerinin enfeksiyon şiddetini ve ürün üzerindeki etkilerini artırabilir. Örneğin, yüksek sıcaklıklar ve kuraklık, bitki köklerinde strese neden olarak patojenlere karşı duyarlılığı artırmaktadır (García-González, 2023). Bu tür zorlukların üstesinden gelmek için dirençli bitki çeşitlerinin geliştirilmesi, entegre zararlı yönetimi (IPM) stratejilerinin uygulanması ve uygun tarımsal uygulamaların benimsenmesi hayati öneme sahiptir (Pérez-Méndez ve ark., 2021; Sakamoto ve Suzuki, 2015).

Kök bölgesindeki patojenik mikroorganizmaların sert kabuklu meyve ürünlerine olan etkisi, hem verim hem de meyve bahçelerinin sağlığı açısından ciddi zorluklar yaratmaktadır. Ancak, kök sağlığını destekleyecek stratejilerin benimsenmesi, hastalıklara dayanıklı çeşitlerin kullanımı, biyolojik kontrol uygulamaları ve doğru toprak yönetimi, bu zorlukların üstesinden gelmek için etkili çözümler sunmaktadır. Bu yaklaşımlar, sert kabuklu meyve tarımının

sürdürülebilirliğini ve üretim kapasitesini korumak adına kritik bir rol oynamaktadır.

3. GENETİK VE ÇEŞİT SEÇİMİ

3.1. Adaptasyon Sorunları

Sert kabuklu meyvelerin bölgesel çevresel koşullara uyumu, hem yüksek verimli bir üretim hem de uzun vadeli sürdürülebilirlik için hayati bir faktördür. Uygun olmayan iklim ve toprak koşullarına adapte olamayan çeşitlerin kullanımı, hem kısa hem de uzun vadede ciddi verim kayıplarına yol açarak üretim sistemlerinin dayanıklılığını tehdit etmektedir. Çeşitlerin çevresel gerekliliklere uygunluğu, sıcaklık, yağış, kuraklık gibi abiyotik stres faktörleri kadar zararlılar ve hastalıklar gibi biyotik streslere karşı toleransı artırmak için de kritik öneme sahiptir.

Örneğin, kaju (*Anacardium occidentale*) çeşitleri üzerinde yapılan araştırmalar, bu tür için dar genetik varyasyonun düzensiz yağışlar ve uzun süreli kuraklık gibi iklim değişikliği unsurlarına karşı hassasiyeti artırdığını göstermiştir. İklimsel streslerin sonucu olarak tane verimlerinde düşüşler ve ürün ağırlığında azalmalar gözlenmiştir (Adu-Gyamfi ve ark., 2020; Bello ve ark., 2017). Bu durum, genetik çeşitliliğin ve adaptasyon yeteneğinin sert kabuklu meyve üretimi açısından neden kritik olduğunu açıkça ortaya koymaktadır.

Genetik çeşitlilik ve bölgeye uyumlu çeşit seçimi: Sert kabuklu meyve türlerinde genetik çeşitliliğin artırılması ve fenotipik kararlılık gösteren

genotiplerin seçilmesi, verimliliği artırmada stratejik bir öneme sahiptir. Araştırmalar, fenotipik kararlılığı yüksek olan çeşitlerin (örneğin, düşük çevresel değişkenlikten etkilenenler) daha iyi ürün performansı sunduğunu göstermektedir. Özellikle, ağaç başına meyve sayısı, tozlaşma etkinliği ve tane ağırlığı gibi verim parametreleri, fenotipik kararlılık ile yakından ilişkilidir ve bu faktörlerin çeşit seçiminde dikkate alınması üretimi önemli ölçüde desteklemektedir (Aliyu ve ark., 2014; Bak ve Karadeniz, 2021; Bak ve ark., 2024).

Yerel anaç ve kalem kullanımı: Yerel koşullara uyum sağlayan anaç ve kalemlerin kullanımı, sert kabuklu meyve üretiminde hem verim hem de kaliteyi artırmak için en etkili stratejilerden biridir. Örneğin, belirli iklim ve toprak koşullarına adapte olmuş anaçlar, kök sağlığını desteklerken bitkilerin biyotik (hastalık ve zararlılar) ve abiyotik (kuraklık, tuzluluk, sıcaklık) streslere karşı toleransını artırır. Bu bağlamda, bölgesel koşullara uygun anaçların seçimi sürdürülebilir üretim için kritik bir adım olarak kabul edilmektedir (Vahdati ve ark., 2021).

Uygun olmayan çeşit ve anaçların kullanımı ise yalnızca kısa vadede verimi düşürmekle kalmaz; aynı zamanda bitkilerin enfeksiyonlara, zararlılara ve çevresel değişkenlere karşı hassasiyetini artırarak uzun vadeli sert kabuklu meyve üretiminin sürdürülebilirliğini tehdit eder. Örneğin, bölgesel koşullara uyum sağlayamayan çeşitler hastalık ve zararlılara karşı daha savunmasız hale gelebilir. Bu durum, pestisit kullanımının artırılmasına neden olarak hem ekonomik kayıplara hem

de çevresel sorunlara yol açabilir (Bello ve ark., 2017; Chandrasekhar ve ark., 2018).

Adaptasyona yönelik stratejiler: Bu sorunların önüne geçmek için genetik çeşitliliğin artırılması ve iklim değişikliklerine dayanıklı türlerin geliştirilmesi gerekir. Çevresel çeşitliliği dikkate alan stratejik planlamalar, örneğin bölgesel iklim koşullarına en uygun çeşitlerin veya anaçların tanımlanması, hem verimliliği hem de çevresel dayanıklılığı artırabilir. Özellikle, toprak yapısı, sıcaklık dalgalanmaları, yağış rejimi gibi faktörleri dikkate alan çeşit seçimi ve ıslah çalışmaları, sert kabuklu meyvelerin iklim değişikliğiyle ilişkili zorlu ortamlarda daha başarılı olmasını sağlamaktadır (Pérez-Méndez ve ark., 2021).

Bu bağlamda, sert kabuklu meyve üretiminde bölgesel iklim ve toprak koşullarına uyum, yalnızca yüksek verim sağlamak için değil, aynı zamanda uzun vadeli tarımsal sürdürülebilirliği desteklemek için kritik bir gerekliliktir. Genetik çeşitliliğin artırılması, fenotipik istikrarın teşvik edilmesi ve yerel anaçların kullanımı, adaptasyon sürecinin önemli unsurlarıdır. Bölgeye özgü koşulları merkeze alan bu tür stratejik yaklaşımlar, sert kabuklu meyve üretimini hem ekonomik hem de çevresel açıdan sürdürülebilir hale getirmek için temel oluşturacaktır.

3.2. Düşük Genetik Çeşitlilik

Monokültür tarımı uygulanan alanlarda sert kabuklu meyvelerde genetik çeşitliliğin azalması, hem verimlilik hem de türlerin çevresel ve

biyolojik streslere karşı dayanıklılığı açısından ciddi olumsuz etkiler yaratmaktadır. Geniş alanlarda yalnızca tek bir türün veya çeşidin yetiştirilmesiyle karakterize edilen monokültür tarım sistemleri, genetik çeşitlilikte önemli bir azalmaya neden olmaktadır. Bu azalma, çevresel stres faktörlerine uyum kabiliyetinin düşmesine, hastalık ve zararlılara karşı artan hassasiyete, dolayısıyla da daha düşük verimlere yol açmaktadır. Khoury ve ark. (2014), küresel gıda sistemlerindeki artan genetik homojenliğin, iklim değişiklikleri ve hastalık tehdidi karşısında daha dayanıklı tarım yapıları oluşturmak adına genetik çeşitliliğe sahip ürünlerin yetiştirilmesinin gerekliliğini vurgulamıştır. Sert kabuklu meyveler gibi genetik tabanı dar olan bitki türleri, bu durumdan özellikle olumsuz etkilenmektedir. Örneğin, Batı Afrika kaju gen havuzlarında gözlemlenen dar genetik çeşitlilik, kuraklık veya zararlılar gibi çevresel stres faktörlerinin etkisiyle zayıf üretkenliğe ve düşük meyve kalitesine neden olmaktadır (Babatunde ve ark., 2023).

Genetik çeşitliliğin kaybı, yalnızca verim kayıplarına değil, aynı zamanda çevresel değişkenlerle mücadele edebilme yeteneğinin azalmasına da neden olmaktadır. Abiyotik stres koşulları (örneğin kuraklık, sıcaklık değişimleri) veya biyotik etkenler (örneğin hastalık ve zararlılar), genetik çeşitliliği kısıtlanmış olan tarım sistemlerinde çok daha yıkıcı etkiler yaratabilmektedir. Kaju gibi istihdam ve ihracat açısından kritik öneme sahip sert kabuklu meyveler üzerinde yapılan araştırmalar, dar bir genetik varyasyonun düzensiz yağış veya uzun süreli kuraklık gibi durumlarda tane veriminde düşüşe yol açtığını ortaya koymuştur (Adu-Gyamfi ve ark., 2020; Bello ve ark., 2017).

Genetik tabanın daralması, tarım sistemlerini sadece küresel iklim değişikliğinin etkilerine karşı savunmasız hale getirmekle kalmayıp, aynı zamanda hastalıkların ve zararlıların yayılmasını da kolaylaştırarak tarımsal üretim sistemlerinin sürdürülebilirliğini tehdit etmektedir.

Bilimsel araştırmalar, genetik çeşitliliğin yalnızca tarımsal verimlilik açısından değil, aynı zamanda üretim istikrarı ve hastalıklara dayanıklılık açısından da kritik bir unsur olduğunu göstermektedir. Schöb ve ark. (2014), tür içindeki genetik çeşitliliğin artırılmasının, çevresel dalgalanmalara karşı mahsullerin daha istikrarlı bir şekilde performans göstermesini sağladığını tespit etmiştir. Benzer şekilde, Reiss ve Drinkwater (2017) tarafından yapılan bir meta-analiz, genetik varyanta sahip kültür karışımlarının, hastalık baskısı ve abiyotik stres koşullarında monokültür tarım sistemlerine kıyasla sürekli olarak daha yüksek verim sunduğunu ortaya koymuştur. Bu durum, farklı genetik çeşitlerin sert kabuklu meyve üretim sistemlerine entegrasyonunun, monokültür çiftçiliğiyle ilişkili riskleri azaltabileceğini göstermektedir. Ayrıca, genetik çeşitlilik yalnızca verim istikrarını değil, aynı zamanda mahsullerin hastalık ve zararlılara karşı direncini artırarak salgınların ve abiyotik streslerin etkilerini hafifletebilir. Koricheva ve Hayes (2018), mahsullerde genetik çeşitliliğin hastalık salgınlarını önlemede oynadığı hayati rolü vurgulamıştır. Crawford ve Rudgers (2012) ise genetik çeşitlilik ile tür çeşitliliği arasındaki pozitif etkileşimlerin bitki biyokütlesi ve üretkenliği artırabileceğini bildirmiştir. Bu bulgular, sert

kabuklu meyve üretim sistemlerinde genetik çeşitliliğin önemini daha da güçlendirmektedir.

Sert kabuklu meyve üretimi bağlamında, genetik çeşitliliğin azalmasının etkileri özellikle ciddi sonuçlar doğurabilmektedir. Dar genetik taban nedeniyle çevresel streslere ve biyolojik tehditlere karşı dayanıklılığı azalan sert kabuklu meyve türleri, hem düşük verim hem de daha düşük ürün kalitesi göstermektedir. Örneğin, Batı Afrika'da kaju çeşitliliği üzerine yapılan çalışmalar, dar genetik varyasyon nedeniyle bu türün çevresel ve biyolojik tehditlere karşı savunmasız hale geldiğini ve bu durumun üretim performansını ciddi ölçüde olumsuz etkilediğini ortaya koymuştur (Babatunde ve ark., 2023). Bu tür olumsuz sonuçları önlemek için genetik tabanı genişletmeye odaklanan ıslah programları büyük önem taşımaktadır. Genetik çeşitliliğin artırılması yalnızca kısa vadede ürün performansını artırmakla kalmaz, aynı zamanda uzun vadede tarımsal sürdürülebilirlik için sağlam bir temel oluşturur. Bununla birlikte, yerel koşullara uyumlu genotiplerin ve çeşitlerin geliştirilmesi, sert kabuklu meyve üretiminde genetik çeşitliliğin korunması ve artırılması için etkili bir yol sunmaktadır. Çeşitli genetik materyallerin tarımsal üretim sistemlerine entegrasyonu, yüksek verimli, hastalıklara dayanıklı ve çevresel streslerle başa çıkabilen mahsullerin yetiştirilmesini sağlayarak monokültür tarımın olumsuz etkilerini önemli ölçüde azaltabilir. Genetik çeşitliliğin sert kabuklu meyve üretimi sistemlerine dahil edilmesi, tarımın geleceği için kritik bir gereklilik olup, gıda

güvenliğini ve tarımın sürdürülebilirliğini sağlamak adına stratejik bir öncelik haline gelmelidir.

3.3. Tozlaşma Problemleri

Tozlaşma, sert kabuklu meyveler için verimlilik açısından kritik bir süreçtir ve yetersiz tozlaşma veya polinatör eksikliği, ürün verimini ve kalitesini önemli ölçüde sınırlayabilir. Polinatör hizmetlerine olan bu güçlü bağımlılık, özellikle macadamia ve badem gibi meyvelerde belirgindir. Araştırmalar, macadamia ağaçlarının etkili tozlaşma için yüksek sıklıkta böcek ziyaretine ihtiyaç duyduğunu göstermektedir. Öyle ki, bu çiçeklerin her gün yaklaşık elli arı ziyareti gerektirdiği ve her ziyaretin bir çiçeğin uygun şekilde tozlaşması için yaklaşık altı saat sürdüğü tespit edilmiştir (Njue, 2023). Polinatörlere olan bu ihtiyaç, yetersiz tozlaşma durumunda sert kabuklu meyve üretiminde ciddi verim kayıplarını göstermektedir. Araştırmalara göre, polinatör eksikliği düşük gelirli ülkelerde sert kabuklu meyve üretiminin %8'ine kadarının kaybedilmesine yol açabilmektedir (Smith ve ark., 2022). Yetersiz tozlaşma sorununun etkileri yalnızca verim kayıplarıyla sınırlı kalmaz; aynı zamanda üretilen meyvelerin besin değerini ve fiziksel kalitesini de olumsuz etkileyebilir.

Özellikle badem gibi bazı sert kabuklu meyve ürünlerinde, yetersiz veya kendi kendine tozlaşmanın meyve kalitesini düşürdüğü bilimsel olarak kanıtlanmıştır. Bu çerçevede yürütülen çalışmalar, kendi kendine tozlaşan bademlerin besin kompozisyonlarında değişiklik gözlemlendiğini ve çapraz tozlaşma yoluyla üretilen meyvelere kıyasla

daha düşük kalitede olduğunu ortaya koymuştur (Brittain ve ark., 2014). Bu durum, yalnızca verimi artırmakla kalmayıp, aynı zamanda sert kabuklu meyvelerin besin değerini ve pazarlanabilirliğini iyileştirmek için etkili bir çapraz tozlaşmayı kolaylaştıracak çeşitli polinatör popülasyonlarının sağlanmasının önemini bir kez daha ortaya koymaktadır (Klatt ve ark., 2014).

Polinatör eksikliği sorununa katkıda bulunan önemli faktörlerden biri, meyve bahçesi tasarımındaki sınırlamalardır. Araştırmalar, farklı çeşitlerin aynı bahçe içinde bir arada yetiştirilmesinin çapraz tozlaşmayı teşvik ettiğini ve polinatörlerin sınırlı olduğu durumlarda bile meyve tutumunu artırabileceğini göstermiştir (Anders ve ark., 2023). Bu yöntem, özellikle polinatör hizmetlerinin azaldığı bölgelerde etkili bir strateji olarak öne çıkmaktadır. Polinatör popülasyonlarındaki düşüş, özellikle bal arılarının sayısındaki azalma, sert kabuklu meyve üretiminde istikrarsızlığa neden olmakta ve genel gıda güvenliği için risk oluşturmaktadır (Reilly ve ark., 2020). Bal arılarının yanı sıra doğal polinatörlerin yetersiz olduğu bu sistemlerde, tozlaşma etkinliğinin desteklenmesi gıda arzındaki dalgalanmaların önüne geçmek için kritik bir öneme sahiptir.

Dahası, mevcut polinatör popülasyonlarının azalması, sert kabuklu meyve ürünlerinin veriminde yalnızca doğrudan bir düşüş yaratmakla kalmaz, aynı zamanda giderek artan küresel sert kabuklu meyve talebini karşılamayı da zorlaştırır. Bu bağlamda, meyve bahçelerinin tasarımını çeşitlendirmek, polinatör çeşitliliğini destekleyecek yaşam alanları oluşturmak ve sürdürülebilir polinasyon hizmetlerinden faydalanacak

yönetim uygulamalarını benimsemek, sert kabuklu meyve üretimi için çok yönlü bir çözüm sunmaktadır. Graß ve ark. (2018) tarafından yapılan araştırmalar, tarım alanlarının çevresel düzenlemelerle çeşitlendirilmesinin, polinatörlerin popülasyonlarını olumlu yönde etkilediğini ve böylece tozlaşma etkinliğini artırdığını göstermiştir. Ancak bu tür önlemler olmadan, polinatör popülasyonlarındaki azalma hızlanabilir ve bu durum sert kabuklu meyveler gibi polinatörlere bağımlı mahsullerde ciddi verim kayıpları yaratabilir.

Bu bilgiler ışığında, sert kabuklu meyvelerin verimliliği, polinatörlerin varlığı ve etkinliği ile doğrudan ilişkilidir. Optimum ürün verimi ve kalitesine ulaşmak için, yalnızca tozlaşma hizmetlerinden yararlanmak yerine, bu hizmetleri destekleyen çevresel ve sosyal önlemleri devreye almak gereklidir. Bu, polinatör yaşam alanlarının artırılmasını, bahçe tasarımlarının daha etkin şekilde düzenlenmesini ve ekosistem sağlığını destekleyecek entegre tozlaşma yönetimi uygulamalarının uygulanmasını içermelidir. Etkili çözümlere yönelik bu çok yönlü yaklaşım olmaksızın, tarım sektörü, sert kabuklu meyve ürünlerine yönelik talebi karşılamakta ciddi zorluklarla karşılaşabilir. Uygun müdahalelerle, yalnızca tozlaşma etkinliği artırılmakla kalmaz, aynı zamanda bu kritik tarım ürünlerinin sürdürülebilir üretimi de güvence altına alınabilir.

4. TARIMSAL UYGULAMALAR

4.1. Yanlış Besleme

Yetersiz veya aşırı g¼breleme uygulamaları, sert kabuklu meyvelerin verimliliği üzerinde önemli olumsuz etkiler yaratarak hem verimin azalmasına hem de ¼r¼n kalitesinin bozulmasına yol açabilir. Besin dengesi, sert kabuklu meyve ¼retiminde kritik bir fakt¼r olup, ağaçların b¼y¼mesi ve gelişimini optimize etmek için hayati ¼neme sahiptir. Araştırmalar, ¼zellikle çinko gibi belirli mikro besinlerin ¼r¼n verimliliği ve kalite ¼zerindeki doğrudan etkisini vurgulamaktadır. ¼rneđin, ¼zen ve ¼zen (2014), çinko g¼brelemesinin sert kabuklu meyvelerde mineral bileşim ve genel verim ¼zerindeki ¼nemine dikkat çekmiş, çinko eksikliğinin ¼zellikle toprak bileşimi ile ilişkili olduğunu ve y¼ksek kaliteli ¼r¼n elde etmek için dengeli g¼breleme uygulamalarının önemli bir gereklilik olduğunu belirtmiştir. Benzer şekilde, Noperi-Mosqueda ve ark. tarafından y¼r¼t¼len çalışmalar, hem organik hem de mineral g¼breleme stratejilerinin ceviz ¼retiminde önemli bir etki sağladığını ve bu stratejilerin besin eksiklikleri ile ilişkili verim kayıplarını azaltmak adına etkin bir denge sunduğunu g¼stermektedir (Noperi-Mosqueda ve ark., 2019; 2020). Bu bulgular, ceviz yetiştiriciliğinde kullanılan ¼zel besin y¼netimi yaklaşımlarının toprak verimliliğini koruma ve verimi optimize etme açısından kritik bir rol oynadığını ortaya koymaktadır.

Bununla birlikte, aşırı g¼breleme uygulamaları, uzun vadede toprak sağlığını ve besin alımını negatif y¼nde etkileyerek verimliliğin

azalmasına yol açabilir. Örneğin, Zhu ve ark. (2022) ile Wan (2024) tarafından yapılan araştırmalar, areka cevizi plantasyonlarında sürekli olarak inorganik gübrelerin kullanılmasının toprak organik karbon ve toplam azot seviyelerini düşürdüğünü ve besinlerin doğal dolaşımını bozduğunu göstermiştir. Bu durum, toprak sağlığında bir bozulma yaratmasının yanında, sert kabuklu meyve ağaçlarının çevresel stres faktörlerine karşı dayanıklılığında azalma ve verimlilikte düşüş ile sonuçlanmaktadır. Toprak yapısının sağlıklı kalması için gübreleme uygulamalarının dikkatli yönetilmesi ve besin dengesizliklerinin önüne geçilmesi gerekliliği böylece bir kez daha açıkça ortaya konmaktadır.

Öte yandan, organik ve inorganik gübrelerin birleştirilmesini içeren entegre besin yönetimi (INM) uygulamalarının çeşitli sert kabuklu meyve türlerinde önemli başarılar sunduğu görülmektedir. Hindistan cevizi gibi ürünlerde yapılan araştırmalar, INM'nin yalnızca ürün verimliliğini artırmakla kalmayıp, aynı zamanda zayıf tarımsal uygulamalardan kaynaklanan üretim açıklarını kapatmada da etkili bir yöntem olduğunu ortaya koymuştur. Crisostomo (2023), INM'nin hindistan cevizi bahçelerinde verimi artırarak düşük üretim koşullarını iyileştirdiğini rapor etmiştir. Benzer şekilde, Karna ve ark. (2022), organik geri dönüşüm ve toprak testine dayalı gübreleme stratejilerinin hindistan cevizi ürünlerinin hem verim hem de kalite parametrelerinde dikkate değer iyileştirmeler sağladığını bildirmiştir. Bu bulgular, sert kabuklu meyve türlerinin farklı besin gereksinimlerine uygun olan, sürdürülebilir ve dengeli gübreleme yaklaşımlarının benimsenmesinin gerekliliğini bir kez daha vurgulamaktadır.

Bu bağlamda, sert kabuklu meyvelerin verimi ve kalitesi, besin yönetimi uygulamalarıyla sıkı bir şekilde ilişkilidir ve yanlış uygulamalar ürün performansı üzerinde olumsuz sonuçlar doğurabilir. Hem yetersiz gübreleme, ağaçları besin yetersizliği nedeniyle büyüme ve gelişmeyi sürdürmemeye iterken, aşırı gübreleme de toprak sağlığını ve besin döngüsünü olumsuz etkileyerek uzun vadeli üretim sürdürülebilirliğini tehdit edebilir. Bu nedenle, toprak ve bitki testlerine dayalı dengeli gübreleme stratejilerinin uygulanması, sert kabuklu meyvelerde optimum verimliliği sağlamak ve toprak sağlığını korumak için hayati öneme sahiptir. Entegre besin yönetimi gibi yaklaşımlar da sert kabuklu meyve üretiminde sürdürülebilirlik ve başarı açısından değerli bir çözüm sunmaktadır. Bu bütüncül yaklaşımlar benimsenmediği takdirde, verim düşüşleri ve çevresel zararlar kaçınılmaz olabilir; dolayısıyla, tarımsal uygulamalarda dengeli ve bilinçli yönetim öncelik haline getirilmelidir.

4.2. Budama ve Bakım Eksiklikleri

Uygunsuz budama teknikleri, özellikle sert kabuklu meyvelerde, bitki büyümesi, gelişimi ve üretkenliği üzerinde ciddi olumsuz etkiler yaratabilir. Budama, bitki sağlığını iyileştirmek, büyümeyi yönlendirmek ve üretim verimini artırmak için kritik bir bahçecilik uygulaması olarak kabul edilir. Ancak, yanlış yöntemlerle uygulandığında, istenilen sonuçların aksine bitkiler üzerinde ciddi stres yaratarak hem büyümeyi hem de meyve kalitesini olumsuz etkileyebilir. Lameira ve ark. (2022), budama tekniklerinin etkilerini

ele aldığı çalışmasında, çeşitli yöntemlerin jaborandi'de farklı derecelerde dal rejenerasyonu sağladığını ve optimum büyüme sonuçları elde etmek için doğru tekniğin seçilmesinin önemini vurgulamaktadır. Uygulanan budama yönteminin bitki büyümesi üzerindeki bu kritik etkisi, ceviz ve diğer sert kabuklu meyveler açısından da benzer sonuçlar doğurduğu gözlemlenen bir gerçektir. Örneğin, Wells (2018), mekanik çit budamasının ceviz boyutu ve kalitesi üzerindeki etkilerini araştırmış ve bu budama yönteminin uygunsuz uygulanmasının ceviz ağırlığı ve çekirdek kalitesi üzerinde olumsuz sonuçlara yol açabileceğini belirtmiştir. Bu durum, gövde su potansiyelinde azalmaya neden olarak bitkinin genel sağlığını olumsuz etkileyebildiği gibi, özellikle ürün kalitesinin düşmesine de yol açabilmektedir. Bu bulgular, uygun budama uygulamalarını benimsenmesinin hem sağlıklı bitki gelişimi hem de üretkenlik açısından kesinlikle hayati önem taşıdığını göstermektedir.

Budamanın yalnızca yöntemi değil, aynı zamanda zamanlaması ve yoğunluğu da sert kabuklu meyve üretiminde büyük bir rol oynar. Yanlış zamanlamalarda veya gereğinden fazla yoğunlukta yapılan budama işlemleri, ağaçların büyüme süreçlerini ve üreme özelliklerini ciddi biçimde engelleyebilir. Örneğin, Kovaleski ve ark. (2015), yaban mersininde yaz budaması üzerine yaptığı çalışmada, budama zamanlamasının ve yoğunluğunun bitki verimini ve üreme özelliklerini doğrudan etkilediğini gözlemlemiştir. Aynı zamanda, yanlış zamanlamayla gerçekleştirilen budama işlemlerinin, bitki metabolizmasının doğal dengelerini bozabileceği ve bunun birçok sert

kabuklu meyve türünde optimum büyüme ve gelişim süreçlerini olumsuz etkileyebileceği gösterilmiştir. Benzer şekilde, kaju üzerine yapılan bir çalışmada, Adu-Gyamfi ve ark. (2020), budama uygulamalarının tek başına düşük verimlilikteki esas faktör olmadığını, genetik ve çevresel faktörlerle birleşerek daha karmaşık sorunlar oluşturduğunu bildirmiştir. Ancak yine de, budama gibi temel tarımsal yönetim uygulamalarının etkin bir şekilde stratejilere entegre edilmesinin, genetik ve çevresel zorlukların üstesinden gelmekte yardımcı olabileceği öne sürülmüştür.

Budamanın etkisi, yalnızca tek başına bir uygulama olarak ele alınmamalı; çevresel koşullar, bitkilerin gövde yapıları ve büyüme dinamikleri ile birlikte düşünülmelidir. Smith (2012), ceviz yetiştiriciliği üzerine yaptığı çalışmada, düzgün yapılan budamanın, ağaç gölgelik boyutunu düzenleyerek bitkinin ışık alma kapasitesini artırdığını ve böylece ürün kalitesi ve verimini doğrudan etkilediğini ortaya koymuştur. Sert kabuklu meyve ağaçlarında gölgelik genişliği ve ışık erişimi hem büyüme süreçlerini hem de meyve tutumunu yakından etkileyen önemli faktörlerdir. Bu bağlamda, budamanın doğru şekilde yapılması, ağaçların ihtiyaç duyduğu ışık, besin ve suyu daha etkili bir şekilde kullanmalarına olanak tanımaktadır. Dilla ve ark. (2020) ise bu konuya ilişkin yaptığı bir araştırmada, ağaçların bu kaynaklar için kendi içlerindeki rekabetin verimliliği nasıl azaltabileceğini incelemiş ve budama uygulamalarının bu rekabeti azaltarak ürün verimliliğini artırma potansiyeline sahip olduğunu göstermiştir.

Budama, sert kabuklu meyve ağaçlarının yönetiminde bir denge gerektirir. Yanlış yöntemler, zamanlama ya da yoğunlukta yapılan budamalar, istenilen verim ve kalite hedeflerini baltalayabilirken; doğru stratejilerin benimsenmesi, bitki sağlığını optimize ederek uzun vadede yüksek verimli ve kaliteli ürünler elde edilmesini sağlayabilir. Bu nedenle, sert kabuklu meyve üretiminde budama uygulamaları, yalnızca temel bir bakım pratiği olarak değil, aynı zamanda verimlilik, kalite ve sürdürülebilirlik açısından stratejik bir araç olarak ele alınmalıdır.

4.3. Hatalı Hasat Zamanlaması

Sert kabuklu meyvelerde hasat zamanlaması, ürünün hem kalitesini hem de verimini doğrudan etkileyen kritik bir faktördür. Hasadın erken ya da geç yapılması, sert kabuklu meyvelerin kimyasal bileşimlerini, besin değerlerini ve genel pazarlanabilirliklerini olumsuz yönde etkileyebilir. Erken hasat, özellikle büyük bayramlar veya özel dönemlerde yüksek fiyat avantajı sağlama potansiyeline sahip olsa da, genellikle daha düşük kaliteli ürünlerle sonuçlanır. Bai ve ark. (2018), erken hasat edilen bademlerin kimyasal bileşenlerini tam olarak geliştiremediğini ve bu durumun şeker ve yağ içeriğinde eksikliklere yol açtığını göstermiştir. Bu eksiklikler, ürünün besin değerini ve lezzet profilini olumsuz etkileyerek pazarlanabilirliğini düşürmektedir. Benzer şekilde, Wang ve ark. (2021), erken hasadın yetersiz olgunlaşma nedeniyle ürün ağırlığında ve genel kalitede kayıplara

neden olduğunu, bunun da sert kabuklu meyvelerin pazar değerini önemli ölçüde düşürdüğünü vurgulamaktadır.

Öte yandan, geç hasat da farklı zorluklar ortaya çıkarır ve ürün kalitesini tehlikeye atabilir. Hasadın geciktirilmesi, sert kabuklu meyveleri nem, küf ve diğer çevresel faktörlere karşı daha duyarlı hale getirir. Karaosmanoğlu (2023), geç hasat edilen sert kabuklu meyvelerin lipid oksidasyonuna daha yatkın olduğunu ve bunun da bozulmaya ve yağ kalitesinde düşüşe neden olduğunu bildirmiştir. Bu durum, özellikle yağ içeriği yüksek olan macadamia ve badem gibi sert kabuklu meyvelerde daha belirgin hale gelmektedir. Ayrıca, Leggieri ve ark. (2020), aşırı olgunlaşma nedeniyle yere düşen sert kabuklu meyvelerin hasadının zorlaştığını ve bu ürünlerin yüksek nem koşullarında aflatoksin kontaminasyonu riski taşıdığını belirtmiştir. Aflatoksin kontaminasyonu, yalnızca ürünün pazarlanabilirliğini değil, aynı zamanda insan sağlığı açısından güvenliğini de tehdit eden ciddi bir sorundur. Chen ve Pan (2022), hasat sırasında nem içeriğinin kritik bir faktör olduğunu ve geç hasadın genellikle daha yüksek nem seviyelerine yol açarak depolama sırasında bozulma riskini artırdığını ifade etmiştir.

Hasat zamanlaması, yalnızca fiziksel kaliteyi değil, aynı zamanda sert kabuklu meyvelerin kimyasal bileşimini ve sağlık yararlarını da etkiler. Pycia ve ark. (2019), farklı zamanlarda hasat edilen sert kabuklu meyvelerin antioksidan aktivitelerinde ve polifenol içeriklerinde önemli farklılıklar gösterdiğini ve bu durumun sağlık yararlarını en üst düzeye çıkarmak için optimum hasat zamanlamasının önemini ortaya

koyduğunu bildirmiştir. Antioksidan aktivite ve polifenol içeriği, sert kabuklu meyvelerin besin değerini ve fonksiyonel gıda olarak tüketim potansiyelini artıran önemli bileşenlerdir. Ancak, geç hasat durumunda bu bileşenlerin azalması, ürünün sağlık açısından faydalarını ve ticari değerini olumsuz etkileyebilir. Karaosmanoğlu (2023), macadamia ve badem gibi sert kabuklu meyvelerden elde edilen yağların kalitesinin geç hasat durumunda bozulabileceğini ve bu durumun özellikle yağ asidi profili üzerinde olumsuz etkiler yarattığını belirtmiştir.

Özetle, sert kabuklu meyvelerde hasat zamanlaması, ürünün fiziksel, kimyasal ve ticari özelliklerini belirleyen temel bir unsurdur. Erken hasat, yetersiz olgunlaşma nedeniyle kalite ve besin değerinde kayıplara yol açarken, geç hasat ise çevresel faktörlere bağlı olarak bozulma, kontaminasyon ve yağ kalitesinde düşüş gibi sorunlara neden olabilir. Bu nedenle, optimum hasat zamanlamasının belirlenmesi, sert kabuklu meyve üretiminde hem verimliliği hem de kaliteyi en üst düzeye çıkarmak için hayati bir öneme sahiptir. Hasat zamanlamasının doğru bir şekilde yönetilmesi, yalnızca ürünün pazarlanabilirliğini artırmakla kalmaz, aynı zamanda tüketici memnuniyetini ve gıda güvenliğini de sağlamaya yardımcı olur.

5. EKONOMİK VE SOSYAL FAKTÖRLER

5.1. Maliyetler

Gübre, ilaç ve su gibi girdilerin artan maliyetleri, sert kabuklu meyve üretiminde verimliliği ve sürdürülebilirliği önemli ölçüde etkileyen temel sorunlardan biridir. Bu artan maliyetler, çiftçileri tarımsal

uygulamalarını yeniden değerlendirmeye ve ayarlamaya zorlamakta, bu da genellikle verim kayıplarına ve ekonomik zorluklara yol açmaktadır. Sert kabuklu meyveler, yüksek girdi gereksinimleri nedeniyle bu durumdan özellikle etkilenmektedir. Gübre fiyatlarındaki artış, bu bağlamda en büyük endişelerden biridir. Alexander ve ark. (2022), gübre fiyatlarındaki yükselişin çiftçileri uygulama oranlarını düşürmeye yönelttiğini ve bunun ürün verimi ile genel üretim seviyelerinde düşüşe neden olduğunu belirtmektedir. Gübre kullanımındaki bu azalma, yalnızca kısa vadede verim kaybına yol açmakla kalmaz, aynı zamanda toprak sağlığı ve uzun vadeli verimlilik üzerinde olumsuz etkiler yaratarak bir kısır döngü oluşturabilir (Sarkar, 2023). Bu durum, çiftçilerin ekonomik baskılar altında temel girdileri azaltmak gibi zor kararlar almasına neden olmakta ve sert kabuklu meyve üretiminin sürdürülebilirliğini tehlikeye atmaktadır.

Su kıtlığı, sert kabuklu meyve üretiminde karşılaşılan bir diğer kritik sorundur. Arellano-González ve Moore (2020), sert kabuklu meyve ağaçlarının, yüksek kuruluş maliyetleri ve sürekli su temini gereksinimleri nedeniyle su kıtlığına karşı özellikle savunmasız olduğunu vurgulamaktadır. Raihan ve ark. (2018), su çıkarma ve sulama ile ilişkili artan maliyetlerin çiftçilerin karşılaştığı zorlukları daha da artırarak daha düşük ürün verimine ve azalan gelire yol açtığını ifade etmektedir. Sert kabuklu meyve yetiştiriciliğinde su yoğun uygulamalara olan bağımlılık, bu sektörü su bulunabilirliğindeki dalgalanmalara ve artan maliyetlere karşı daha hassas hale getirmektedir. Su kaynaklarının sınırlı olduğu bölgelerde, bu durum

yalnızca üretim seviyelerini değil, aynı zamanda çiftçilerin ekonomik sürdürülebilirliğini de tehdit etmektedir.

Girdi maliyetleri ile tarımsal uygulamalar arasındaki ilişki oldukça karmaşıktır. Suh ve Moss (2021), tarım sektörünün girdilere yönelik esnek olmayan bir talep sergilediğini ve çiftçilerin artan maliyetlere yanıt olarak girdi kullanımını ayarlamada sınırlı esnekliğe sahip olduğunu belirtmektedir. Bu durum, çiftçilerin ekonomik baskılara uyum sağlama kapasitesini kısıtlamakta ve üretkenlik ile karlılıkta azalmaya yol açmaktadır. Özellikle su teminindeki istikrarsızlık, çok yıllık ürünlerde kayıp riskini artırmaktadır. Feinerman ve Tsur (2014), sert kabuklu meyve ağaçları gibi çok yıllık ürünlerde istikrarlı su kaynaklarının önemini vurgulamakta ve su teminindeki dalgalanmaların ürün kayıplarını önemli ölçüde artırabileceğini ifade etmektedir. Bu nedenle, su kaynaklarının sürdürülebilir yönetimi, sert kabuklu meyve üretiminde verimliliği korumak için kritik bir öneme sahiptir.

Ayrıca, yüksek girdi maliyetleri, sert kabuklu meyvelerin ticarileştirilmesini de zorlaştırmaktadır. Falola ve ark. (2022), krediye erişim eksikliğinin ve yüksek girdi fiyatlarının, Bambara yemişleri gibi ürünlerin başarılı bir şekilde ticarileştirilmesinin önünde önemli engeller oluşturduğunu belirtmektedir. Bu durum, çiftçilerin finansal kısıtlamalar nedeniyle iyileştirilmiş tarım uygulamalarına ve daha verimli çeşitlere erişim sağlayamamasıyla daha da karmaşık hale gelmektedir. Sert kabuklu meyve üretiminde bu tür finansal

kısıtlamalar, yalnızca üretim seviyelerini değil, aynı zamanda çiftçilerin gelirlerini ve sektördeki genel büyümeyi de sınırlamaktadır.

Bu bilgiler ve kaynaklar bağlamında, gübre, su ve diğer temel girdilerin artan maliyetleri, sert kabuklu meyve üretiminde ciddi zorluklar yaratmaktadır. Bu zorluklar, çiftçilerin ekonomik baskılar altında üretim seviyelerini koruma çabalarını zorlaştırmakta ve sektörde sürdürülebilirliği tehdit etmektedir. Bu sorunların üstesinden gelmek için çiftçilere finansal destek sağlanması, sürdürülebilir tarım uygulamalarına yatırım yapılması ve kaynaklara daha iyi erişim sağlanması gerekmektedir. Ayrıca, su ve gübre gibi girdilerin daha verimli kullanımı için yenilikçi teknolojilerin benimsenmesi, maliyetlerin azaltılmasına ve üretim verimliliğinin artırılmasına katkıda bulunabilir. Bu tür çok yönlü yaklaşımlar, artan ekonomik baskılar karşısında sert kabuklu meyve üretiminin dayanıklılığını ve sürdürülebilirliğini artırmak için hayati öneme sahiptir.

5.2. Pazarlama ve Tedarik Zinciri Sorunları

Sert kabuklu meyvelerin pazarlama ve tedarik zinciri sorunları, bu ürünlerin tüketicilere ulaşmasını zorlaştıran önemli engeller yaratmaktadır. Pazar yapısındaki dengesizlikler, lojistik kısıtlamalar ve tedarik zincirindeki karmaşıklık, üreticilerin karlılığını ve ürünlerin pazarlanabilirliğini olumsuz etkilemektedir. Örneğin, İngiltere'deki sert kabuklu meyve pazarı, yerel üretimin sınırlı olması nedeniyle ithalata bağımlıdır ve bu durum, fiyatlandırma ile pazar talebi arasında bir kopukluk yaratmaktadır. Benzer şekilde, Nijerya'daki kaju fıstığı

pazarı, toplayıcılardan işleyicilere kadar birden fazla aracılığı içeren karmaşık bir yapıya sahiptir ve bu durum maliyetlerin artmasına, gecikmelere ve verimsizliklere yol açmaktadır. Lojistik zorluklar da sert kabuklu meyvelerin pazarlanmasında önemli bir rol oynamaktadır. Gana'daki kola yemişi örneğinde olduğu gibi, sert kabuklu meyvelerin fiziksel özellikleri taşıma ve depolama süreçlerini doğrudan etkilerken, çam fıstığı pazarında fitosaniter sorunlar hastalıkların yayılması nedeniyle üretim ve ticareti olumsuz etkilemektedir. Bu tür sorunlar, yalnızca ürünlerin zamanında teslimatını engellemekle kalmaz, aynı zamanda sert kabuklu meyvelerin genel pazarlanabilirliğini ve ticari değerini düşürmektedir.

Bu sorunlara çözüm olarak, teknoloji ve veri analitiğinin tedarik zincirine entegrasyonu önemli bir fırsat sunmaktadır. Büyük veri ve yenilikçi tedarik zinciri modellerinin uygulanması, lojistik süreçlerin verimliliğini artırabilir, maliyetleri düşürebilir ve ürün izlenebilirliğini iyileştirebilir. Veri odaklı yaklaşımlar, tedarik zincirindeki aracı sayısını azaltarak ve kaynak tahsisini optimize ederek operasyonları kolaylaştırabilir. Ayrıca, dalgalanan piyasa talepleri ve çevresel zorluklar bağlamında, bu teknolojiler tedarik zincirlerindeki riskleri ve belirsizlikleri yönetmek için kritik bir rol oynayabilir. Sert kabuklu meyve üreticilerinin karşılaştığı bu sorunların üstesinden gelmek için tedarik zinciri yapısının basitleştirilmesi, hasat sonrası yönetimin iyileştirilmesi, teknolojik entegrasyonun artırılması, fitosaniter önlemlerin alınması ve yerel üretimin desteklenmesi gibi çok yönlü stratejiler benimsenmelidir. Bu yaklaşımlar, sert kabuklu meyve

üretiminin sürdürülebilirliğini ve karlılığını artırarak sektörde büyümeyi destekleyebilir.

5.3. İşçilik

Sert kabuklu meyvelerin verimliliği, işgücü mevcudiyeti ve maliyetleri gibi tarımsal verimlilikte kritik öneme sahip faktörlerden büyük ölçüde etkilenmektedir. Borah ve ark. (2023) tarafından yapılan bir çalışma, işgücü girdisinin üretim seviyeleriyle pozitif bir ilişki gösterdiğini ve hektar başına işgücü artışının Assam'daki betel fıncığı üreticileri için toplam üretimde önemli bir artış sağladığını ortaya koymuştur. Bu durum, sert kabuklu meyve üretiminde kalifiye işgücünün verimliliği artırmadaki temel rolünü vurgulamaktadır. Ancak, işgücü kıtlığı, özellikle kaju fıncığı gibi işgücü yoğun ürünlerde ciddi zorluklar yaratmaktadır. Pham (2024), kaju fıncığının elle ayıklanmasının zaman alıcı ve maliyetli olduğunu, bunun da verimliliği düşürdüğünü ve üretim maliyetlerini artırdığını belirtmektedir. Tarımdaki işgücü kıtlığı, bu sorunları daha da kötüleştirerek üreticilerin artan küresel talebi karşılamaını zorlaştırmaktadır. Tola ve Mazengia (2019), bu durumun diğer mahsullerden gelen rekabetle birleşerek sert kabuklu meyve üreticilerinin kârlılığını daha da azalttığını ifade etmektedir.

İşgücüyle ilgili bu zorluklara karşı mekanizasyon, potansiyel bir çözüm olarak öne çıkmaktadır. Eyles ve ark. (2022), sert kabuklu meyveler için mekanik tozlaşma sistemlerinin uygulanabilirliğini tartışarak, tozlaşma gibi kritik süreçlerde manuel emeğe olan bağımlılığı azaltmanın mümkün olduğunu göstermektedir. Bu tür teknolojilerin benimsenmesi,

özellikle vasıflı işgücünün kıt olduğu bölgelerde işgücü eksikliklerini azaltabilir ve üretkenliği artırabilir. Ayrıca, Ghimire ve Dhungana (2020) tarafından yapılan bir çalışma, Nepal'deki areka fıncığı üretiminin pirince kıyasla daha yüksek brüt getiri sağladığını ve bunun büyük ölçüde daha düşük işçilik maliyetleri ve daha basit yetiştirme uygulamalarından kaynaklandığını ortaya koymuştur. Bu durum, işçilik maliyetlerinin artmaya devam etmesi halinde çiftçilerin sert kabuklu meyve ürünlerine yönelme eğiliminde olabileceğini göstermektedir.

Teknolojik gelişmeler de işgücü kullanımını optimize etme ve üretkenliği artırma açısından önemli bir potansiyele sahiptir. Panda ve ark. (2010), meyve ve sert kabuklu meyve ürünlerinin yerel yönetimi için coğrafi konumsal teknolojilerin verimliliği artırabileceğini ve işçilik gereksinimlerini azaltabileceğini vurgulamaktadır. Veri analitiği ve uzaktan algılama gibi teknolojilerin entegrasyonu, çiftçilerin işgücü dağıtımını optimize eden ve bilinçli kararlar almasını sağlayan yenilikçi çözümler sunmaktadır. Genel bir özet olarak, işgücü bulunabilirliği, maliyetler ve teknolojik gelişmeler arasındaki etkileşim, sert kabuklu meyve ürünlerinin üretkenliğinde kritik bir rol oynamaktadır. İşgücü eksikliklerinin mekanizasyon ve yenilikçi tarım uygulamaları yoluyla giderilmesi, artan işgücü maliyetleri ve küresel talep karşısında sert kabuklu meyve üretiminin sürdürülebilirliğini ve verimliliğini sağlamak için hayati önem taşımaktadır.

6. TEKNOLOJİK VE MEKANİK FAKTÖRLER

6.1. Mekanik Hasar

Makine kullanımı sırasında sert kabuklu meyvelere verilen mekanik hasar, verimliliği önemli ölçüde etkileyerek verimin azalmasına ve kalitenin düşmesine yol açabilir. Bu sorun, sert kabuklu meyvelerin mekanik özelliklerini, hasat ekipmanının tasarımını ve mahsulleri etkileyen çevre koşullarını içeren çok yönlü bir konudur. Ceviz ve macadamia gibi sert kabuklu meyvelerin mekanik özellikleri, hasat ve işleme sırasında mekanik kuvvetlere nasıl tepki verdiklerini anlamak için kapsamlı bir şekilde incelenmiştir. Örneğin, araştırmalar sert kabuklu meyvelerin nem içeriğinin çatlama özelliklerinde kritik bir rol oynadığını ve bunun doğrudan mekanik hasat ekipmanının verimliliğini etkilediğini göstermektedir (Shahbazi, 2014). Yüksek nem seviyeleri, çatlama sırasında çekirdek hasarının artmasına yol açarak daha düşük kalite ve verime neden olabilir (Zhang ve ark., 2018). Ayrıca, hasat tekniklerini optimize etmek ve hasarı en aza indirmek için sert kabuklu meyvelerin sıkıştırma yüklemesi altındaki mekanik davranışı analiz edilmiştir (Gharibzahedi ve ark., 2011). Bu, kayıpları azaltmak için farklı sert kabuklu meyve çeşitlerinin belirli mekanik özelliklerine uyum sağlayan makineler tasarlanmasının gerekliliğini vurgulamaktadır.

Sert kabuklu meyvelerin fiziksel özelliklerine ek olarak, meyve bahçesi ortamlarının yönetimi mekanik hasarı azaltmak için çok önemlidir. Kontrollü çimlendirme ve örtü bitkilerinin kullanımı gibi etkili toprak yönetimi uygulamaları, meyve bahçesi tabanının yapısal bütünlüğünü iyileştirebilir ve böylece mekanik hasat sırasında toz ve erozyonu

azaltabilir (Silvestri ve ark., 2020). Bu sadece sert kabuklu meyvelerin kalitesini iyileştirmekle kalmaz, aynı zamanda hasat makinelerinin daha düzgün çalışmasını da kolaylaştırır. Dahası, mekanik tozlaşma sistemlerinin entegrasyonu, sert kabuklu meyve verimi için hayati önem taşıyan daha iyi tozlaşma sonuçlarını sağlayarak üretkenliği artırmanın bir yolu olarak önerilmiştir (Eyles ve ark., 2022). Ancak, böcek tozlaşma hizmetlerine olan mevcut bağımlılık, mekanik sistemlerde inovasyona olan ihtiyacı vurgulayan sınırlayıcı bir faktör olmaya devam etmektedir.

Kuraklık gibi çevresel streslerin sert kabuklu meyveler üzerindeki etkisi göz ardı edilemez. Kuraklık stresi, hem büyümeyi hem de verimi etkileyen ürün üretimi üzerinde önemli bir kısıtlama olarak tanımlanmıştır (Behrooz ve ark., 2019). Mekanik hasat uygulamaları ile çevresel koşullar arasındaki etkileşim, bu tür streslerin olumsuz etkilerini hafifletecek uygulamaların uyarlandığı bütünsel bir bahçe yönetimi yaklaşımını gerekli kılmaktadır.

6.2. Teknoloji Eksikliği

Modern tarım teknolojilerinin yetersiz kullanımı, özellikle kaju ve macadamia fıstığı gibi ürünlere bağımlı bölgelerde, sert kabuklu meyve üretkenliğini ciddi şekilde engellemektedir. Hassas tarım ve otomasyon gibi gelişmiş tarım uygulamalarının entegrasyonu, üretkenliği artırmak ve sürdürülebilirliği sağlamak için kritik bir öneme sahiptir. Hassas tarım, sensörler ve veri analitiği kullanarak toprak koşulları, sulama ihtiyaçları ve zararlı yönetimi gibi unsurları hassas bir şekilde izlemeyi

mümkün kılarak kaynak israfını azaltır ve ürün kalitesini artırır (Baerdemaeker, 2013; Orn ve ark., 2020). Sert kabuklu meyveler bağlamında, uzaktan algılama ve coğrafi konumsal teknolojiler, bölgeye özgü yönetimi kolaylaştırarak kaynak tahsisini ve ürün izlemeyi iyileştirebilir (Panda ve ark., 2010). Bu, özellikle kaju fıstığı gibi farklı bölgelerdeki tarımsal uygulamalardaki farklılıkların kalite ve verimde değişikliklere yol açabileceği ürünler için önemlidir (Stéphane ve ark., 2021).

Geleneksel sert kabuklu meyve hasadı ve işleme yöntemlerinin emek yoğun yapısı, üretkenlikte önemli bir engel oluşturmaktadır. Sert kabuklu meyvelerin elle ayıklanması, zaman alıcı olmasının yanı sıra işgücü kıtlığını artırarak üretim maliyetlerini yükseltmektedir. Derin öğrenmeye dayalı ayıklama teknolojileri gibi otomatik sistemlerin tanıtılması, manuel emeğe olan bağımlılığı azaltarak ve verimliliği artırarak bu sorunları hafifletebilir (Pham, 2024). Tarım iş gücünün azalmasıyla birlikte, üretim seviyelerini korumak için otomasyona geçiş hayati bir çözüm olarak öne çıkmaktadır.

Teknolojik gelişmelerin yanı sıra, sert kabuklu meyve çiftçiliğinin sosyo-ekonomik bağlamı da üretkenlik üzerinde belirleyici bir rol oynamaktadır. Küçük ölçekli çiftçiler genellikle modern tarım tekniklerine ve kaynaklarına erişimde zorluk yaşamakta, bu da yenilikçi uygulamaları benimsemelerini sınırlamaktadır (Bandason ve ark., 2022). Kooperatif yapılarının ve eğitim programlarının oluşturulması, çiftçilere modern tarım uygulamalarını etkili bir şekilde uygulamak için gerekli bilgi ve araçları sağlayarak bu engelleri aşmalarına yardımcı

olabilir (Fauziyah ve ark., 2017). Ayrıca, sert kabuklu meyve ürünlerinin çeşitlendirilmesi, pazar rekabet gücünü ve karlılığı artırarak çiftçileri daha iyi teknolojilere yatırım yapmaya teşvik edebilir.

Bu literatürler ışığında sert kabuklu meyve üretimindeki teknoloji eksikliğini gidermek, hassas tarımın benimsenmesini, otomasyonu ve çiftçiler için sosyo-ekonomik desteği kapsayan çok yönlü bir yaklaşım gerektirir. Modern tarım teknolojilerinin entegrasyonu ve çiftçilerin bu teknolojilere erişiminin artırılması, sert kabuklu meyve ürünlerinde üretkenliği önemli ölçüde artırabilir. Bu, yalnızca tarım topluluklarında ekonomik istikrarı ve gıda güvenliğini desteklemekle kalmaz, aynı zamanda küresel sert kabuklu meyve talebini karşılamada da önemli bir rol oynar.

7. SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK VE ÇEVRE DOSTU ÜRETİM

7.1. Erozyon ve Toprak Kaybı

Erozyon ve toprak kaybı, özellikle olumsuz tarımsal iklim koşulları nedeniyle sert kabuklu meyve yetiştiriciliğinde ciddi sorunlar oluşturmaktadır. Toprak bütünlüğü ve ürün verimi üzerindeki bu etkiler, toprak yönetimi uygulamaları, arazi kullanım değişiklikleri ve iklim değişkenliği gibi birçok faktörle ilişkilidir. Sert kabuklu meyve bahçelerinde yaygın bir uygulama olan temiz toprak işleme, toprağı açığa çıkararak erozyona karşı hassasiyeti artırır. Bu durum, yüzey akışı, besin tükenmesi ve toprağın sertleşmesi gibi sorunlara yol açarak toprak erozyonunu ve organik madde kaybını daha da kötüleştirir (Ma ve ark., 2021). Buna karşılık, canlı malçların ve örtü bitkilerinin

kullanımı, toprak stabilitesini artırarak erozyon oranlarını önemli ölçüde azaltabilir. Örneğin, çim veya saman malç kullanımı, tortu kaybını azaltarak erozyon oranlarında %1300'e kadar azalma sağlayabilir (Maticic, 2023). Bu, sürdürülebilir tarım uygulamalarının toprak sağlığını korumadaki önemini açıkça ortaya koymaktadır.

Sert kabuklu meyve bahçelerinin hidrolojik tepkisi, eğim ve toprak yönetimi uygulamalarından da etkilenmektedir. Daha dik eğimler, su akışını artırarak erozyon riskini yükseltirken, organik maddelerle malçlama gibi etkili toprak yönetimi stratejileri, toprak özelliklerini iyileştirerek erozyonu azaltabilir (Telak ve ark., 2021; Bayraklı, 2023). Bu tür uygulamalar, yalnızca toprak kalitesini korumakla kalmaz, aynı zamanda sert kabuklu meyve mahsullerinin genel sağlığını ve verimliliğini destekler. Ayrıca, iklim değişikliği, yağış modellerindeki değişiklikler ve aşırı hava olaylarının artan sıklığı nedeniyle toprak erozyonunu ve besin kaybını daha da kötüleştirerek sert kabuklu meyve yetiştiriciliği için ek bir tehdit oluşturmaktadır (Nepal ve ark., 2022). Bu değişen koşullara adaptasyon, üretimin sürdürülebilirliği için kritik öneme sahiptir. Örneğin, yüksek çözünürlüklü dijital yükseklik modelleri (DEM'ler), toprak erozyonu risklerini değerlendirmek ve bu etkileri azaltabilecek yönetim uygulamalarını belirlemek için kullanılmaktadır (Gioia ve ark., 2021).

Kısaca, tarım uygulamaları, arazi yönetimi ve iklim koşulları arasındaki etkileşim, sert kabuklu meyve yetiştiriciliğinde erozyon ve toprak kaybı sorunlarının ele alınmasında belirleyici bir rol oynamaktadır. Malçlama, örtü bitkisi kullanımı ve dikkatli toprak yönetimi gibi

sürdürülebilir uygulamalar, toprak dayanıklılığını ve ürün verimliliğini artırarak iklim değişikliği ve erozyonun olumsuz etkilerini azaltabilir. Bu tür uygulamaların benimsenmesi, sert kabuklu meyve yetiştiriciliğinin uzun vadeli sürdürülebilirliği için hayati önem taşımaktadır.

7.2. Biyolojik Çeşitlilik

Doğal yaşam alanlarının azalması ve tarımsal alanlardaki biyolojik çeşitliliğin korunamaması, sert kabuklu meyve ürünlerinin verimliliği üzerinde ciddi etkiler yaratmaktadır. Tarımsal yoğunlaşma, ekosistem hizmetlerinin sürdürülmesi için kritik öneme sahip habitat kaybına ve biyolojik çeşitlilikte azalmaya yol açarak, tozlaşma ve zararlı kontrolü gibi tarımsal üretkenlik için hayati hizmetleri olumsuz etkilemektedir. Araştırmalar, yüksek işlevsel heterojenliğe sahip tarımsal alanların daha fazla biyolojik çeşitliliği desteklediğini ve bunun da ekosistem hizmetlerini geliştirdiğini göstermektedir (Fahrig ve ark., 2010; Frutos ve ark., 2016). Örneğin, tarım arazilerinde ekilmemiş ortamların varlığı, biyolojik kontrol ajanları olarak hizmet eden kuş popülasyonlarını destekleyerek zararlı baskısını azaltabilir ve ürün verimliliğini artırabilir (Frutos ve ark., 2016). Bu durum, doğal yaşam alanlarının tarımsal uygulamalara entegre edilmesinin önemini vurgulamaktadır.

Habitat kaybı, özellikle polinatör toplulukları üzerinde olumsuz etkiler yaratarak sert kabuklu meyve mahsullerinin verimliliğini tehlikeye atmaktadır. Polinatörlerin azalması, ürün veriminde düşüşe ve daha

düşük kaliteli ürünlere yol açabilir (Buchori ve ark., 2019). Ayrıca, biyolojik çeşitliliğin kaybı, yalnızca polinatörleri değil, aynı zamanda ürün sağlığı ve üretkenliği için önemli olan diğer ekolojik etkileşimleri de bozarak tarımsal sistemlerin dayanıklılığını zayıflatmaktadır (Shaver ve ark., 2015; Macfadyen ve ark., 2012). Bu etkiler, tarımsal alanların yönetiminin biyolojik çeşitliliği destekleyecek şekilde yeniden düzenlenmesi gerektiğini göstermektedir.

Tarımsal ormancılık ve çeşitlendirilmiş çiftçilik sistemleri gibi biyolojik çeşitliliği destekleyen uygulamalar, ekosistem dayanıklılığını ve tarımsal üretkenliği artırmada etkili çözümler sunmaktadır (Davidai ve ark., 2015; Kremen ve Merenlender, 2018). Bu yaklaşımlar, habitat bağlantısını koruyarak daha geniş bir tür yelpazesini destekler ve tozlaşma hizmetlerini ve zararlı yönetimini iyileştirerek sert kabuklu meyve mahsullerinin verimliliğini artırabilir. Ancak, tarımsal genişleme ve biyolojik çeşitliliğin korunması arasındaki takaslar giderek daha belirgin hale gelmektedir. Tarım arazilerinin gıda üretimi için önceliklendirildiği durumlarda, habitat kaybı, uzun vadede tarımsal üretkenliğin sürdürülebilirliği için gerekli olan biyolojik çeşitlilik üzerinde ciddi bir tehdit oluşturmaktadır (Wang ve ark., 2022; Hoang, 2023).

Genel bir bakış olarak, doğal yaşam alanlarının korunması ve biyolojik çeşitliliğin desteklenmesi, sert kabuklu meyve mahsullerinin üretkenliğini ve sürdürülebilirliğini sağlamak için kritik öneme sahiptir. Habitat kaybını önleyen ve biyolojik çeşitliliği artıran sürdürülebilir tarım uygulamaları, tarımsal ekosistemlerin dayanıklılığını

güçlendirebilir ve sert kabuklu meyve ürünlerinin uzun vadeli yaşayabilirliğini destekleyebilir. Bu tür uygulamalar, tarımsal üretkenliği biyolojik çeşitliliğin korunmasıyla dengeleyerek, hem ekolojik hem de ekonomik faydalar sağlayabilir.

8. ARAŞTIRMA VE GELİŞTİRME EKSİKLİKLERİ

8.1. Bölgesel olarak sert kabuklu türlerinin performansı üzerine yeterli AR-GE çalışmalarının olmaması

Sert kabuklu meyve türleri üzerinde yeterli Ar-Ge çalışmalarının yapılmaması, bu ürünlerin bölgesel verimliliği üzerinde ciddi olumsuz etkiler yaratmaktadır. Ar-Ge eksikliği, genetik iyileştirme çalışmalarında durgunluğa, iklim değişikliğine uyumda yetersizliğe ve tarımsal uygulamaların etkili bir şekilde anlaşılmasına yol açarak sert kabuklu meyve üretiminde verimliliğin azalmasına neden olmaktadır. Genetik iyileştirme, sert kabuklu meyve türlerinde verim ve kaliteyi artırmak için kritik bir öneme sahiptir. Örneğin, kaju üzerinde yapılan araştırmalar, verim bileşenlerinin genel meyve verimiyle güçlü bir ilişki gösterdiğini ortaya koymuştur (Aliyu ve ark., 2014). Ancak, üstün genotiplerin belirlenmesi ve yetiştirilmesi için yeterli Ar-Ge yatırımı olmadan, bu potansiyel büyük ölçüde kullanılmadan kalmaktadır. Batı Afrika gibi bölgelerde, dar genetik çeşitlilik ve düşük verimlilik, yetersiz araştırma fonu ve yetiştirme programlarına odaklanma eksikliği nedeniyle daha da kötüleşmektedir (Babatunde ve ark., 2023). Bu durum, genetik çeşitliliği artırmak ve meyve kalitesini iyileştirmek için hedefli Ar-Ge çalışmalarının gerekliliğini açıkça ortaya koymaktadır.

İklim değışikliği de sert kabuklu meyve üretkenliği üzerinde önemli bir tehdit oluşturmaktadır ve bu etkilerin hafifletilmesi için sağlam Ar-Ge girişimlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Araştırmalar, iklim kaynaklı verim kayıplarının giderek daha şiddetli hale geleceğini ve bu durumun çiftçilerin değışen koşullara uyum sağlamasını zorlaştıracakını göstermektedir (Baldos ve ark., 2020). Sert kabuklu meyve türlerinin iklim değışikliğine adaptasyonu, üretkenlik seviyelerinin korunması için hayati öneme sahiptir. Ancak, Ar-Ge'ye yeterli yatırım yapılmadığında, çiftçiler bu zorluklara yanıt verebilmek için gerekli bilgi ve araçlardan yoksun kalmaktadır. Ar-Ge bulgularının pratik tarım stratejilerine entegre edilmesi, çiftçilerin bu değışikliklere uyum sağlamasına ve sert kabuklu meyve üretiminde sürdürülebilirliği sağlamasına yardımcı olabilir.

Ayrıca, tarımsal uygulamalar sert kabuklu meyve üretkenliğinde belirleyici bir rol oynamaktadır. Birçok çiftçinin en iyi uygulamalar hakkında bilgiye erişiminin olmaması, üretkenliklerini doğrudan olumsuz etkilemektedir (Amon-Armah ve ark., 2021). Örneğin, Gana gibi bölgelerde uzatma hizmetlerinin eksikliği, sert kabuklu meyve üretimini iyileştirme çabalarının önünde önemli bir engel olarak tanımlanmıştır. Bu bilgi eksikliği, optimum olmayan tarım uygulamalarına yol açarak daha düşük verim ve zararlılara karşı artan hassasiyetle sonuçlanmaktadır.

Verilen literatürlerden çıkarımla, sert kabuklu meyve türleri üzerinde yeterli Ar-Ge çalışmalarının yapılmaması, bu ürünlerin verimliliği

üzerinde derin etkiler yaratmaktadır. Bu sorunun çözümü, genetik çeşitliliği artırmak için üreme programlarına yatırım yapılmasını, iklim değişikliğine uyum sağlamak için hedefli araştırmaların yürütülmesini ve çiftçilere bilgi aktarımını iyileştirmek için etkili uzatma hizmetlerinin sağlanmasını içeren çok yönlü bir yaklaşımı gerektirir. Bu çabalar olmadan, sert kabuklu meyve ürünlerinin verimliliği azalmaya devam edecek ve bu durum hem yerel ekonomiler hem de gıda güvenliği üzerinde olumsuz etkiler yaratacaktır.

8.2. Üretim tekniklerinin yerel koşullara uygun şekilde optimize edilmemesi

Yerel koşullara uygun üretim tekniklerinin optimize edilmesi, sert kabuklu meyve üretiminde verimliliği artırmak ve ürün kalitesini yükseltmek açısından kritik bir öneme sahiptir. Yerel iklim, toprak yapısı ve çevresel koşullara adapte edilmemiş üretim yöntemleri, yalnızca ürün veriminde değil, aynı zamanda meyvelerin besin değeri, pazarlanabilirlik ve genel kalitesinde ciddi kayıplara yol açabilir. Bu nedenle, sürdürülebilir üretim uygulamalarını sağlamak ve küresel rekabet gücünü artırmak için bölgesel özelliklere göre optimize edilmiş üretim yöntemlerinin benimsenmesi gerekmektedir. Sert kabuklu meyve türlerinde genetik çeşitlilik, verim ve kaliteyi artırmada temel bir faktör olarak öne çıkmaktadır. Çeşitli araştırmalar, genetik çeşitliliğin yetersizliğinin hem ürün verimini hem de kaliteyi olumsuz etkilediğini ortaya koymaktadır. Örneğin, kaju ürünlerinde düşük tane verimi ve küçük tane ağırlıkları, ticari olarak yetiştirilen çeşitler arasındaki dar genetik temele bağlanmıştır. Genetik çeşitliliğin

eksikliği, düzensiz yağış ve uzun süreli kuraklık gibi çevresel değişikliklerle birleştiğinde, ürün verimliliğini ciddi şekilde tehdit etmektedir. Bu durum, genetik kaynakların çeşitlendirilmesi ve üretim tekniklerinin bu çeşitliliği destekleyecek şekilde optimize edilmesinin önemini vurgulamaktadır. Genetik çeşitliliği artırmaya yönelik sürdürülebilir tarım uygulamaları, değişen iklim koşullarına karşı dirençli sert kabuklu meyve türlerinin geliştirilmesi için hayati bir gerekliliktir.

Tozlaşma, sert kabuklu meyve üretiminde hem verim hem de ürün kalitesi için sınırlayıcı bir faktör olarak öne çıkmaktadır. Araştırmalar, doğal böcek tozlaşmasına güvenmenin riskli olabileceğini ve doğal tozlayıcı popülasyonlarının azaldığı veya yetersiz olduğu bölgelerde ciddi verim kayıplarına yol açabileceğini göstermektedir. Bu bağlamda, mekanik tozlaşma sistemlerinin uygulanması, doğal tozlayıcılara olan bağımlılığı azaltarak üretkenliği artırabilir ve tozlaşma sürecindeki belirsizlikleri en aza indirebilir. Ancak, bu tür yenilikçi yaklaşımların eksikliği, özellikle yerel koşulların etkili doğal tozlaşmayı desteklemediği bölgelerde, verim kayıplarını daha da artırabilir. Dolayısıyla, tozlaşma süreçlerini optimize etmek ve bu süreçte teknolojik çözümleri entegre etmek, sert kabuklu meyve üretiminde sürdürülebilirliği sağlamak için büyük bir öneme sahiptir.

Kuraklık gibi çevresel stres faktörleri, sert kabuklu meyve ürünlerinin üretkenliğini ve genel sağlığını önemli ölçüde etkileyebilir. Araştırmalar, arbusküler mikoriza mantarları ve bitki büyümesini teşvik eden bakterilerin, ceviz ağaçlarında kuraklık stresini hafifletmedeki

rolünü vurgulamaktadır. Bu tür biyolojik müdahalelerin eksikliği, sert kabuklu meyve ürünlerinin olumsuz çevresel koşullar altında düşük büyüme ve verimle karşı karşıya kalma olasılığını artırmaktadır. Bu biyolojik destek sistemleri, bitkilerin su ve besin alımını artırarak kuraklık gibi stres faktörlerine karşı dayanıklılıklarını güçlendirebilir. Ancak, bu tür müdahalelerin uygulanmaması, özellikle kuraklık gibi çevresel zorlukların sık yaşandığı bölgelerde, sert kabuklu meyve üretiminde ciddi kayıplara yol açabilir. Bu durum, farklı bölgelerdeki sert kabuklu meyve ürünlerinin karşılaştığı spesifik çevresel zorlukları dikkate alan, yerel koşullara uyarlanmış tarımsal uygulamaların geliştirilmesi ve uygulanmasının gerekliliğini bir kez daha ortaya koymaktadır. Sürdürülebilir üretim için çevresel stres faktörlerini hafifletmeye yönelik yenilikçi ve bölgesel çözümler kritik bir öneme sahiptir.

Aralık uygulamaları da sert kabuklu meyve ürünlerinin üretkenliğinde önemli bir rol oynamaktadır. Araştırmalar, uygunsuz sıra içi ve sıra arası mesafe uygulamalarının, sert kabuklu meyve ağaçlarında önemli ölçüde daha düşük verime yol açtığını ortaya koymaktadır. Bu durum, ağaçların büyüme alışkanlıkları ve kaynaklara erişim gereksinimlerinin dikkate alınmadığı durumlarda hem bireysel ağaç performansının hem de genel bahçe verimliliğinin olumsuz etkilendiğini göstermektedir. Sert kabuklu meyve türlerinin özel büyüme alışkanlıklarına ve fizyolojik gereksinimlerine uygun şekilde optimize edilmiş aralık uygulamaları hem verimi artırmak hem de kaynak kullanımını daha verimli hale getirmek için hayati önem taşımaktadır. Bu bulgu, yerel

tarımsal uygulamaların, yetiştirilen türlerin özelliklerine ve bölgesel koşullara göre uyarlanmasının gerekliliğini bir kez daha ortaya koymaktadır.

İklim değişikliğinin sert kabuklu meyve ürünleri üzerindeki etkisi geniş çapta belgelenmiştir. Araştırmalar, çevresel değişikliklerin meyve ve sert kabuklu meyve verimini, besin kalitesini ve genel üretkenliği ciddi şekilde tehdit edebileceğini ortaya koymaktadır. Örneğin, Benin'deki kaju üreticilerinin iklim değişikliği ve bunun üretkenlik üzerindeki etkileri konusundaki algıları, yerel iklim koşullarına uygun uyarlanabilir stratejilere olan ihtiyacı açıkça ortaya koymaktadır. Bu durum, iklim değişikliğinin etkilerini hafifletmek ve sert kabuklu meyve üretimini sürdürülebilir kılmak için bölgesel koşullara göre tasarlanmış stratejilerin geliştirilmesinin ve uygulanmasının önemini vurgulamaktadır. Aksi takdirde, iklim değişikliğine uyum sağlanamaması durumunda, sert kabuklu meyve ürünlerinin hem veriminde hem de kalitesinde ciddi düşüşler yaşanması kaçınılmaz olacaktır. Bu bağlamda, iklim değişikliğine dayanıklı üretim sistemlerinin oluşturulması, sert kabuklu meyve sektörünün geleceği için kritik bir gereklilik haline gelmiştir.

Üretim tekniklerinin yerel koşullara göre optimize edilememesi, genetik çeşitliliğin sınırlı olması, yetersiz tozlaşma stratejileri, çevresel stres faktörleri, uygunsuz tarımsal uygulamalar ve iklim değişikliğinin etkileri gibi bir dizi mekanizma aracılığıyla sert kabuklu meyve ürünlerinde üretkenliğin azalmasına neden olabilir. Bu zorluklar, yalnızca verim kayıplarına değil, aynı zamanda ürün kalitesinin

d¼şmesine ve ekonomik s¼rd¼r¼lebilirliđin tehlikeye girmesine de yol a¼abilir. Bu nedenle, yerel koşullara uygun, uyarlanabilir ve yenilikçi yönetim stratejilerinin geliştirilmesi ve uygulanması, sert kabuklu meyve ¼r¼nlerinin ¼retkenliđini korumak ve artırmak i¼in kritik bir ¼neme sahiptir. Bu yaklaşımlar, hem ¼evresel değişimlere karşı dayanıklılığı artıracak hem de s¼rd¼r¼lebilir tarım uygulamalarına katkı sağlayacaktır.

KAYNAKÇA

- Adeniran, A. H. (2023). Economic Analysis of Poverty Among Cashew Nut Marketers in Ogbomoso North Local Government Area of Oyo State, Nigeria. *World Journal of Advanced Research and Reviews*.
- Ahmad, S., Muhammad, E., Ahmad, I., Ali, Y., Ehetisham-ul Haq, M., Haq, I. U., & Zeeshan, M. (2022). Current Status of Fungal Diseases of Almond in District Loralai and Ziarat. *Pakistan Journal of Phytopathology*.
- Akça, Y., ŐimŐek, H., Çekiç, Ç., Ünl¼kara, A., & Muradoğlu, F. (2017). Effects of salt and water stress on walnut of the leaf nutrient accumulation. *Journal of International Scientific Publications*, 5, 1314-8591.
- Alae-Carew, C., Nicoleau, S., Bird, F. A., Hawkins, P., Tuomisto, H. L., Haines, A., Dangour, A. D., & Scheelbeek, P. (2020). The Impact of Environmental Changes on the Yield and Nutritional Quality of Fruits, Nuts and Seeds: A Systematic Review. *Environmental Research Letters*.
- Alexander, P., Arneth, A., Henry, R., Maire, J., Rabin, S., & Rounsevell, M. (2022). High Energy and Fertilizer Prices Are More Damaging Than Food Export Curtailment From Ukraine and Russia for Food Prices, Health and the Environment. *Nature Food*.
- Aliyu, O. M., Adeigbe, O. O., & Lawal, O. O. (2014). Phenotypic Stability Analysis of Yield Components in Cashew (<i>Anacardium Occidentale</i> L.) Using Additive Main Effect and Multiplicative Interaction (AMMI) and GGE Biplot Analyses. *Plant Breeding and Biotechnology*.
- Almeida Paz-Neto, A. de, Calvet, É. C., da Melo, J. W., Lima, D. B., C. Gondim, M. G., & Janssen, A. (2022). Mite Damage Provides Refuges and Affects Preference and Performance of a Subsequent Herbivorous Moth. *Journal of Applied Entomology*.
- Amon-Armah, F., Oduro, S. S., Doe, E. K., Asani, M., Nyadanu, D., & Konlan, S. (2021). Supply-Side Practices and Constraints of the Kola Nut (Cola Nitida (Vent) Schott. And Endl.) Value Chain in Ghana: A Descriptive Evidence. *International Journal of Agronomy*.

- Anders, M., Graß, I., Linden, V. M. G., Taylor, P. J., & Westphal, C. (2023). Smart Orchard Design Improves Crop Pollination. *Journal of Applied Ecology*.
- Arellano-González, J., & Moore, F. C. (2020). Intertemporal Arbitrage of Water and Long-Term Agricultural Investments: Drought, Groundwater Banking, and Perennial Cropping Decisions in California. *American Journal of Agricultural Economics*.
- Baazeem, A., García-Cela, E., Medina, Á., & Magan, N. (2021). Interacting Abiotic Factors Affect Growth and Aflatoxin B1 Production Profiles of *Aspergillus Flavus* Strains on Pistachio-Based Matrices and Pistachio Nuts. *Frontiers in Microbiology*.
- Babatunde, O. P., Adeigbe, O. O., Sobowale, O. I., Muyiwa, A. A., & Balogun, S. T. (2023). Cashew Production and Breeding in 5 West African Countries. *Journal of Scientific Research and Reports*.
- Baerdemaeker, J. D. (2013). Precision Agriculture Technology and Robotics for Good Agricultural Practices. *Ifac Proceedings Volumes*.
- Bai, S. H., Brooks, P., Gama, R., Nevenimo, T., Hannet, G., Hannet, D., Randall, B., Walton, D. A., Grant, E. L., & Wallace, H. M. (2018). Nutritional Quality of Almond, Canarium, Cashew and Pistachio and Their Oil Photooxidative Stability. *Journal of Food Science and Technology*. <https://doi.org/10.1007/s13197-018-3539-6>
- Bak, T. (2010). Fındıkta (*Corylus avellana* L.) farklı dal sayılarının kalite faktörleri üzerine etkileri. Ordu Üniversitesi. *Fen Bilimleri Enstitüsü, Bahçe Bitkileri Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi. Ordu*.
- Bak, T., Güler, E., & Karadeniz, T. (2024). Relationships between the number of nuts per cluster and fruit characteristics in the Foşa hazelnut cultivar. *Mustafa Kemal Üniversitesi Tarım Bilimleri Dergisi*, 29(3), 622-628.
- Bak, T., & Karadeniz, T. (2021). Effects of branch number on quality traits and yield properties of European hazelnut (*Corylus avellana* L.). *Agriculture*, 11(5), 437.

- Bandason, W., Parwada, C., & Mushunje, A. (2022). Macadamia Nuts (*Macadamia Integrifolia*) Value Chain and Technical Efficiency Among the Small-Scale Farmers in Zimbabwe. *Research on World Agricultural Economy*.
- Bayrakli, B. (2023). The Effect of Hazelnut Husk Applications on Some Properties of Hazelnut Orchard Soil and Hazelnut Yield. *Ege Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*.
- Behrooz, A., Vahdati, K., Rejali, F., Lotfi, M., Sarikhani, S., & Leslie, C. A. (2019). Arbuscular Mycorrhiza and Plant Growth-Promoting Bacteria Alleviate Drought Stress in Walnut. *Hortscience*.
- Bello, D. O., Ahoton, L. E., Saidu, A. M., Akponikpe, I. P. B., Ezin, V., Balogoun, I., & Aho, N. (2017). Climate Change and Cashew (<i>Anacardium Occidentale</i> L.) Productivity in Benin (West Africa): Perceptions and Endogenous Measures of Adaptation. *International Journal of Biological and Chemical Sciences*.
- Bhattarai, S. P., Pendergast, L., Li, S., & Midmore, D. J. (2021). Effects of Spatial and Temporal Regulation of Drip Emitters and Tube Configurations on Water Productivity of Juvenile Macadamia Trees in the Tropics. *Experimental Agriculture*.
- Borah, D. K., Buragohain, P. P., & Saikia, J. (2023). *Does Efficiency Matter? A Study on Factors Affecting the Technical Efficiency of Betel Nut Producers in Assam*.
- Brittain, C., Kremen, C., Garber, A. K., & Klein, A. (2014). Pollination and Plant Resources Change the Nutritional Quality of Almonds for Human Health. *Plos One*.
- Buchori, D., Rizali, A., Larasati, A., Hidayat, P., Ngo, H. T., & Gemmil-Herren, B. (2019). Natural Habitat Fragments Obscured the Distance Effect on Maintaining the Diversity of Insect Pollinators and Crop Productivity in Tropical Agricultural Landscapes. *Heliyon*.
- C. Baldos, U. L., Fuglie, K. O., & Hertel, T. W. (2020). The Research Cost of Adapting Agriculture to Climate Change: A Global Analysis to 2050. *Agricultural Economics*.

- Calvo-Peña, C. (2023). Albocycline Is the Main Bioactive Antifungal Compound Produced by *Streptomyces* Sp. OR6 Against *Verticillium Dahliae*. *Plants*.
- Chander, S. (2023). Integrated Pest Management of Field Crops. *Indian Journal of Entomology*.
- Chandrasekhar, M., Sethi, K. L., Tripathy, P., Mukherjee, S., Panda, P. K., & Roy, A. (2018). Performance of Released Cashew (*Anacardium Occidentale* L.) Varieties Under Hot and Humid Climatic Zone of Odisha. *Indian Journal of Agricultural Research*.
- Chen, C., & Pan, Z. (2022). *Processing of Tree Nuts*.
- Choudhury, B. U., Ansari, M., Chakraborty, M., & Meetei, T. T. (2021). Effect of Land-Use Change Along altitudinal gradients on Soil Micronutrients in the Mountain Ecosystem of Indian (Eastern) Himalaya. *Scientific Reports*.
- Crisostomo, S. D. (2023). Narrowing the Yield Gap of Coconut (*Cocos Nucifera* L.) Through Integrated Nutrient Management in the Philippines: An on-Farm Experiment Approach. *Iop Conference Series Earth and Environmental Science*.
- Da Silva, P. G., & Daane, K. M. (2014). Life History Parameters of *Chinavia hilaris* (Hemiptera: Pentatomidae), a Stink Bug Injurious to Pistachios in California. *Journal of Economic Entomology*.
- Daane, K. M., Yokota, G. Y., & Wilson, H. F. (2019). Seasonal Dynamics of the Leaf-footed Bug *Leptoglossus zonatus* and Its Implications for Control in Almonds and Pistachios. *Insects*.
- Davidai, N., Westbrook, J. K., Lessard, J.-P., Hallam, T. G., & McCracken, G. F. (2015). The Importance of Natural Habitats to Brazilian Free-Tailed Bats in Intensive Agricultural Landscapes in the Winter Garden Region of Texas, United States. *Biological Conservation*.
- Deketelaere, S., Tyvaert, L., Carvalho França, S. de, & Höfte, M. (2017). Desirable Traits of a Good Biocontrol Agent Against *Verticillium* Wilt. *Frontiers in Microbiology*.
- Devkota, K. (2023). *Assessing the Economic and Nutritional Value of Pollination Services in Nepal*.

- Dilla, A. M., Smethurst, P. J., Huth, N., & Barry, K. (2020). Plot-Scale Agroforestry Modeling Explores Tree Pruning and Fertilizer Interactions for Maize Production in a Faidherbia Parkland. *Forests*.
- Dobrovolski, R. (2014). Integrating Agricultural Expansion Into Conservation Biogeography: Conflicts and Priorities. *Frontiers of Biogeography*.
- Dobrovolski, R., Loyola, R., Marco, P. D., & Felizola Diniz-Filho, J. A. (2011). Agricultural Expansion Can Menace Brazilian Protected Areas During the 21st Century. *Natureza & Conservação*.
- Degu, T. K., & Kebeto, F. D. (2024). Pre-scaling up of Groundnut (*Arachis hypogaea* L) Technology in mid and lowlands of West Guji Zone, Southern Oromia, Ethiopia. *Alst*.
- Eyles, A., Close, D., Quarrell, S. R., Allen, G., Spurr, C., Barry, K., Whiting, M., & Gracie, A. (2022). Feasibility of Mechanical Pollination in Tree Fruit and Nut Crops: A Review. *Agronomy*.
- Fahrig, L., Baudry, J., Brotons, L., Burel, F., Crist, T. O., Fuller, R., Sirami, C., Siriwardena, G., & Martin, J. (2010). Functional Landscape Heterogeneity and Animal Biodiversity in Agricultural Landscapes. *Ecology Letters*.
- Falola, A., Mukaila, R., & Ahmed, A. G. (2022). Commercialization of Bambara Nut Production in Nigeria. *Yüzüncü Yıl Üniversitesi Tarım Bilimleri Dergisi*.
- Fauziyah, E., Aniyatussholihah, A., & Hidayati, D. R. (2017). Strategy of Export Competitiveness Enhancement on Cashew Nut Commodity. *Jejak*.
- Feinerman, E., & Tsur, Y. (2014). Perennial Crops Under Stochastic Water Supply. *Agricultural Economics*.
- Frutos, A. E., Reales, C. F., Lorenzón, R. E., & Ronchi-Virgolini, A. L. (2016). Spatial Variation in Bird Assemblages Are Linked to Environmental Heterogeneity in Agricultural Landscapes in the Province of Entre Ríos, Argentina. *Avian Biology Research*.
- García-González, I. (2023). Cover Crop Identity Determines Root Fungal Community and Arbuscular Mycorrhiza Colonization in Following Main Crops. *European Journal of Soil Science*.

- Ghimire, R., & Dhungana, S. (2020). Comparative Advantage of Areca Nut Over Rice in Jhapa, Nepal. *Reviews in Food and Agriculture*.
- Gioia, D., Amodio, A. M., Maggio, A., & Sabia, C. A. (2021). Impact of Land Use Changes on the Erosion Processes of a Degraded Rural Landscape: An Analysis Based on High-Resolution DEMs, Historical Images, and Soil Erosion Models. *Land*.
- Gómez, S. R., Gil-Tapetado, D., García-Gila, J., Blasco-Aróstegui, J., & Polidori, C. (2021). The Leaf Beetle *Labidostomis Lusitanica* (Coleoptera: Chrysomelidae) as an Iberian Pistachio Pest: Projecting Risky Areas. *Pest Management Science*.
- Gramaje, D., Baumgartner, K., Halleen, F., Mostert, L., Sosnowski, M., Úrbez-Torres, J. R., & Armengol, J. (2016). Fungal Trunk Diseases: A Problem Beyond Grapevines? *Plant Pathology*.
- Graß, I., Meyer, S., Taylor, P. J., Foord, S. H., Hajek, P., & Tschardtke, T. (2018). Pollination Limitation Despite Managed Honeybees in South African Macadamia Orchards. *Agriculture Ecosystems & Environment*.
- Guarnaccia, V., Kraus, C., Markakis, E. A., Alves, A., Armengol, J., Eichmeier, A., Compant, S., & Gramaje, D. (2023). Fungal Trunk Diseases of Fruit Trees in Europe: Pathogens, Spread and Future Directions. *Phytopathologia Mediterranea*.
- Guo, W., & Yao, K. (2022). Supply Chain Governance of Agricultural Products Under Big Data Platform Based on Blockchain Technology. *Scientific Programming*.
- Gülsoy, E., Kaya, E. D., Türkhan, A., Bulut, M., Koyuncu, M., Güler, E., ... & Muradoğlu, F. (2023). The effect of altitude on phenolic, antioxidant and fatty acid compositions of some Turkish hazelnut (*Coryllus avellana* L.) cultivars. *Molecules*, 28(13), 5067.
- Hernández, J. E., Mortimer, M., & Panetto, H. (2020). Operations Management and Collaboration in Agri-Food Supply Chains. *Production Planning & Control*.
- Hoang, N. T. (2023). Mapping Potential Conflicts Between Global Agriculture and Terrestrial Conservation. *Proceedings of the National Academy of Sciences*.

- Howlett, B. G., Read, S. F. J., Alavi, M., Cutting, B. T., Nelson, W., Goodwin, M., Cross, S., Thorp, T. G., & Pattemore, D. E. (2019). Cross-Pollination Enhances Macadamia Yields, Even With Branch-Level Resource Limitation. *Hortscience*.
- Jeanneret, P., Lüscher, G., Schneider, M. K., Pelletier, P., Arndorfer, M., Bailey, D., Balázs, K., Báldi, A., Choisis, J. P., Dennis, P., Díaz, M., Eiter, S., Elek, Z., Fjellstad, W., Frank, T., Friedel, J. K., Geijzendorffer, I. R., Gillingham, P., Gomiero, T., ... Herzog, F. (2021). An Increase in Food Production in Europe Could Dramatically Affect Farmland Biodiversity. *Communications Earth & Environment*.
- Jenderek, M. M., Serimian, J. C., Postman, J. D., Hummer, K. E., & Yeater, K. M. (2022). Yield and Nut Characteristics of Hazelnut Genotypes Grown in San Joaquin Valley, California. *Crop Science*.
- Kämper, W., Trueman, S. J., Ogbourne, S. M., & Wallace, H. M. (2021). Pollination Services in a Macadamia Cultivar Depend on Across-orchard Transport of Cross Pollen. *Journal of Applied Ecology*.
- Karadeniz, T., Bak, T., Güler, E., Kırca, L., & Tekintaş, F. E. (2019). Türk fındık çeşitlerine anaç (*Corylus colurna* L.) seçimi. II. *Uluslararası Tarım Kongresi*, 21-24.
- Karadeniz, T.; Bostan, S.Z.; Tuncer, C.; Tarakçıoğlu, C. Fındık Yetiştiriciliği (2009). In *Ziraat Odası Başkanlığı Bilimsel Yayınlar Serisi*; Ofset Matbaa: Ordu, Türkiye, 126s.
- Karadeniz, T., Kırca, L., Şenyurt, M., & Bak, T. (2020). Determination and evaluation of wild hazelnut genotypes in tirebolu harkköy region. *International Journal of Anatolia Agricultural Engineering Sciences*, 2(1), 13-23.
- Karaosmanoğlu, H. (2023). Impact of Different Harvest Times on Fatty Acid Profile, Sterol, Tocopherol and Bioactive Properties of Hazelnut Oil. *Grasas Y Aceites*.
- Karna, A. K., Mishra, G., Nayak, P. K., Sahoo, S. C., Nayak, R. K., & Panda, R. K. (2022). Effect of Cropping Systems and Integrated Nutrient Management on Growth and Yield of Coconut in Littoral Sand. *International Journal of Plant & Soil Science*.

- Keykhasaber, M., Thomma, B. P. H. J., & Hiemstra, J. A. (2017). Verticillium Wilt Caused by Verticillium Dahliae in Woody Plants With Emphasis on Olive and Shade Trees. *European Journal of Plant Pathology*.
- Kırca, S., Yarılgaç, T., Kırca, L., & Bak, T. (2014). Study on the selection of walnut (*Juglans regia* L.) in Trabzon. *Türk Tarım ve Doğa Bilimleri Dergisi*, 1(Özel Sayı-1), 835-841.
- Klatt, B. K., Holzschuh, A., Westphal, C., Clough, Y., Smit, I., Pawelzik, E., & Tschardtke, T. (2014). Bee Pollination Improves Crop Quality, Shelf Life and Commercial Value. *Proceedings of the Royal Society B Biological Sciences*.
- Kovaleski, A. P., Darnell, R. L., Casamali, B., & Williamson, J. G. (2015). Effects of Timing and Intensity of Summer Pruning on Reproductive Traits of Two Southern Highbush Blueberry Cultivars. *Hortscience*.
- Krah Adu-Gyamfi, P. K., Akperterey, A., Barnnor, M., Ofori, A., & Padi, F. K. (2020). Genotypic Characterization of Cashew (*Anacardium Occidentale* L.) Clones Using Agro-morphological Traits. *Plant-Environment Interactions*.
- Kremen, C., & Merenlender, A. M. (2018). Landscapes That Work for Biodiversity and People. *Science*.
- Lameira, O. A., S. Ribeiro, F. N., Rocha, T. T., Germano, C. M., & Alves Assis, R. M. (2022). Branch Regeneration of Jaborandi Submitted to Diferentes Types of Pruning and Cropping Systems. *Acta Agronómica*.
- Leggieri, M. C., Tsitsigiannis, D. I., & Battilani, P. (2020). AFLA-PISTACHIO: Development of a Mechanistic Model to Predict the Aflatoxin Contamination of Pistachio Nuts. *Toxins*. <https://doi.org/10.3390/toxins12070445>
- Li, B., Chen, J., & Lv, X. (2023). *Analysis of Influencing Factors of Agricultural Products Supply Chain Quality Risk Based on ISM*.
- Ma, W., Yang, Z., Hou, S., Ma, Q., Liang, L., Wang, G., Liang, C., & Zhao, T. (2021). Effects of Living Cover on the Soil Microbial Communities and Ecosystem Functions of Hazelnut Orchards. *Frontiers in Plant Science*.
- Macfadyen, S., Cunningham, S. A., Costamagna, A. C., & Schellhorn, N. A. (2012). Managing Ecosystem Services and Biodiversity Conservation in Agricultural Landscapes: Are the Solutions the Same? *Journal of Applied Ecology*.

- Majid, S., Kumar, A., Bashir, S., ul Seerat-Nisa, Amin, A. U., Nagoo, S., Rashid, Z., Dar, Z. A., & Paul, S. (2020). Xenia Studies in Exotic and Indigenous Almond (*Prunus Amygdalus L.*) Varieties of Kashmir, India. *Journal of Applied and Natural Science*.
- Mall, N. K., & Herman, J. D. (2019). Water Shortage Risks From Perennial Crop Expansion in California's Central Valley. *Environmental Research Letters*.
- Maticic, M. (2023). Mulch and Grass Cover Unevenly Halt Runoff Initiation and Sediment Detachment During the Growing Season of Hazelnut (*Corylus Avellana L.*) in Croatia. *Sustainability*.
- McNeil, D. (2014). Market Chain Insights Created by Empirical Modelling of Inputs to the UK Nut Market. *British Food Journal*.
- Melhaoui, R., Addi, M., Houmy, N., Abid, M., Mihamou, A., Serghini-Caíd, H., Sindic, M., & Elamrani, A. (2018). Pomological Characterization of Main Almond Cultivars From the North Eastern Morocco. *International Journal of Fruit Science*.
- Melin, A., Rouget, M., Midgley, J. J., & Donaldson, J. S. (2014). Pollination Ecosystem Services in South African Agricultural Systems. *South African Journal of Science*.
- Monaco Neto, L. C., Brewer, B., & Gray, A. W. (2023). Data on Data: An Analysis of Data Usage and Analytics in the Agricultural Supply Chain. *Applied Economic Perspectives and Policy*.
- Moral, J., Morgan, D. P., Trapero, A., & Michailides, T. J. (2019). Ecology and Epidemiology of Diseases of Nut Crops and Olives Caused by Botryosphaeriaceae Fungi in California and Spain. *Plant Disease*.
- Mu, Z., Wei, Z., Liu, J., Cheng, Y., Song, Y., Yao, H., Yuan, X., Wang, S., Gu, Y., Zhong, J., Liu, K., Li, C., Du, J., & Zhang, Q. (2022). RNA-Seq Analysis Demonstrates Different Strategies Employed by Tiger Nuts (*Cyperus Esculentus L.*) in Response to Drought Stress. *Life*.
- Muradoglu, F., Balta, F., & Battal, P. (2010). Endogenous hormone levels in bearing and non-bearing shoots of walnut (*Juglans regia L.*) and their mutual relationships. *Acta physiologiae plantarum*, 32, 53-57.

- Muradoglu, F., Oguz, H. I., Yildiz, K., & Yilmaz, H. (2010). Some chemical composition of walnut (*Juglans regia* L.) selections from Eastern Turkey. *African Journal of Agricultural Research*, 5(17), 2379-2385.
- Naseri, B., Shobeiri, S. S., & Tabande, L. (2015). The Intensity of a Bean *Fusarium* Root Rot Epidemic Is Dependent on Planting Strategies. *Journal of Phytopathology*.
- Nepal, A., Tashi, S., Sherub, K., Dorji, T., Dorji, U., & Sapkota, S. (2022). Impacts of Climate Change on Hazelnut (*Corylus Avellane* L.) Cultivation in Bhutan. *Vietnam Journal of Agricultural Sciences*.
- Nimbokar, P. (2024). Data-Driven Transformation of Agri-Supply Chain (Ascs): Comprehensive Review. *Int Res J Adv Engg Hub*.
- Njue, N. I. (2023). Diversity of Insect Flower Visitors on Macadamia Within a Monoculture Orchard in Murang'a County, Central Kenya. *Advances in Entomology*.
- Noperi-Mosqueda, L. C., Soto-Parra, J. M., Sánchez, E., Navarro-León, E., Pérez-Leal, R., Flores-Córdova, M. A., Salas-Salazar, N. A., & Yáñez-Muñoz, R. M. (2020). Yield, Quality, Alternate Bearing and Long-Term Yield Index in Pecan, as a Response to Mineral and Organic Nutrition. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*.
- Noperi-Mosqueda, L. C., Soto-Parra, J. M., Sánchez, E., Piña-Ramírez, F. J., Pérez-Leal, R., Flores-Córdova, M. A., & Salas-Salazar, N. A. (2019). Impact of Organic and Mineral Fertilization in Pecan Nut on Production, Quality and Antioxidant Capacity. *Agricultural Sciences*.
- Nouri, M. T., Rhouma, A., Yahgmour, M. A., Mnari-Hatteb, M., Jraidi, B., & Hajlaoui, M. R. (2012). First Report of Wilt of Almond Caused by *Verticillium Dahliae* in Tunisia. *New Disease Reports*.
- Obeten, W. O. (2022). Factors Influencing Pest Management Decisions Among Maize Farming Households. *Review of Agricultural and Applied Economics*.
- Orn, D., Duan, L., Liang, Y., Siy, H., & Subramaniam, M. (2020). *Agro-Ai Education*. <https://doi.org/10.1145/3368308.3415457>

- Özenç, N., & Özenç, D. B. (2014). Nut Traits and Nutritional Composition of Hazelnut (*Corylus Avellana* L.) as Influenced by Zinc Fertilization. *Journal of the Science of Food and Agriculture*.
- Panda, S. S., Hoogenboom, G., & Paz, J. O. (2010). Remote Sensing and Geospatial Technological Applications for Site-Specific Management of Fruit and Nut Crops: A Review. *Remote Sensing*.
- Pérez-Méndez, N., Miguel-Rojas, C., Berni, J. A. J., Gómez-Candón, D., Pérez-de-Luque, A., Fereres, E., Català-Forner, M., Villegas, D., & Sillero, J. C. (2021). Plant Breeding and Management Strategies to Minimize the Impact of Water Scarcity and Biotic Stress in Cereal Crops Under Mediterranean Conditions. *Agronomy*.
- Pettenella, D., & M. Awan, H. U. (2017). *Pine Nuts: A Review of Recent Sanitary Conditions and Market Development*.
- Pham, V.-N. (2024). A Low-Cost Deep-Learning-Based System for Grading Cashew Nuts. *Computers*.
- Pycia, K., Kapusta, I., & Jaworska, G. (2019). Changes in Antioxidant Activity, Profile, and Content of Polyphenols and Tocopherols in Common Hazel Seed (*Corylus Avellana* L.) Depending on Variety and Harvest Date. *Molecules*.
- Raihan, L., Sarker, Md. A., & Miah, M. (2018). Shortage of Water in Teesta River Basin and Its Impact on Crop Production in Northern Bangladesh. *Saarc Journal of Agriculture*.
- Reilly, J. R., Artz, D. R., Biddinger, D. J., Bobiwash, K., Boyle, N. K., Brittain, C., Brokaw, J., Campbell, J. W., Daniels, J. C., Elle, E., Ellis, J., Fleischer, S. J., Gibbs, J., Gillespie, R. L., Gundersen, K. B., Gut, L. J., Hoffman, G. D., Joshi, N. K., Lundin, O., ... Winfree, R. (2020). Crop Production in the USA Is Frequently Limited by a Lack of Pollinators. *Proceedings of the Royal Society B Biological Sciences*.
- Rudnick, J., Lubell, M., S. Khalsa, S. D., Tatge, S., Wood, L., Sears, M., & Brown, P. H. (2021). A Farm Systems Approach to the Adoption of Sustainable Nitrogen Management Practices in California. *Agriculture and Human Values*.

- Sakamoto, M., & Suzuki, T. (2015). Elevated Root-Zone Temperature Modulates Growth and Quality of Hydroponically Grown Carrots. *Agricultural Sciences*.
- Sánchez-Hernández, E., Balduque-Gil, J., García, V. G., Barriuso-Vargas, J. J., Casanova-Gascón, J., Gil, J. M., & Martín-Ramos, P. (2023). Phytochemical Profiling of Sambucus Nigra L. Flower and Leaf Extracts and Their Antimicrobial Potential Against Almond Tree Pathogens. *International Journal of Molecular Sciences*.
- Sarkar, P. K. (2023). Impact of Fertilizer and Pesticide Use on the Productivity of Seven Major Crop in the Kaliyaganj C D Block of Uttar Dinajpur District, West Bengal, India. *Current Agriculture Research Journal*.
- Shahbazi, F. (2014). Effects of Moisture Content and Impact Energy on the Cracking Characteristics of Walnuts. *International Journal of Food Engineering*.
- Shaver, I., Chain-Guadarrama, A., Cleary, K., Sanfiorenzo, A., Santiago-García, R. J., Finegan, B., Hormel, L., Sibelet, N., Vierling, L. A., Bosque-Pérez, N. A., DeClerck, F., Fagan, M. E., & Waits, L. P. (2015). Coupled Social and Ecological Outcomes of Agricultural Intensification in Costa Rica and the Future of Biodiversity Conservation in Tropical Agricultural Regions. *Global Environmental Change*.
- Silvestri, C., Bacchetta, L., Bellincontro, A., & Cristofori, V. (2020). Advances in Cultivar Choice, Hazelnut Orchard Management, and Nut Storage to Enhance Product Quality and Safety: An Overview. *Journal of the Science of Food and Agriculture*.
- Smith, M. R., Mueller, N. D., Springmann, M., Sulser, T. B., Garibaldi, L. A., Gerber, J., Wiebe, K., & Myers, S. S. (2022). Pollinator Deficits, Food Consumption, and Consequences for Human Health: A Modeling Study. *Environmental Health Perspectives*.
- Smith, M. W. (2012). Fruit Production Characteristics of ‘Pawnee’ Pecan. *Hortscience*.
- Sohrabi, M., Mohammadi, H., León, M., Armengol, J., & Banihashemi, Z. (2020). Fungal Pathogens Associated With Branch and Trunk Cankers of Nut Crops in Iran. *European Journal of Plant Pathology*.

- Spera, S. T., Baldoni, A. B., de Magalhães, C. A., Lulu, J., Tonini, H., Zolin, C. A., & Behling, M. (2020). Characterizing Edaphoclimatic Variables in Sites Hosting Natural Brazil Nut Tree Populations in Mato Grosso State. *Nativa*.
- Stéphane, K. Y., Halbin, K. J., & Joseph, S. (2021). Disparities in Agricultural Practices According to Cashew Nut Production Regions in Côte D'Ivoire and Probable Incidence on Nut Quality. *Agricultural Sciences*.
- Suh, D. H., & Moss, C. B. (2021). Examining the Input and Output Linkages in Agricultural Production Systems. *Agriculture*.
- Taghi Gharibzahedi, S. M., Mousavi, M., Hamed, M., Khodaiyan, F., & Dadashpour, A. (2011). Mechanical Behavior of Persian Walnut and Its Kernel Under Compression Loading: An Experimental and Computational Study. *Journal of Food Processing and Preservation*.
- Tavares, P. D., Uzêda, M. C., & Santos Pires, A. dos. (2019). Biodiversity Conservation in Agricultural Landscapes: The Importance of the Matrix. *Floresta E Ambiente*.
- Telak, L. J., Dugan, I., & Bogunović, I. (2021). Soil Management and Slope Impacts on Soil Properties, Hydrological Response, and Erosion in Hazelnut Orchard. *Soil Systems*.
- Tola, J., & Mazengia, Y. (2019). Cashew Production Benefits and Opportunities in Ethiopia: A Review. *Journal of Agricultural and Crop Research*.
- Uzoma, K. C., Inoue, M., Andry, H., Fujimaki, H., Zahoor, A. F., & Nishihara, E. (2011). Effect of Cow Manure Biochar on Maize Productivity Under Sandy Soil Condition. *Soil Use and Management*.
- V. Carr, M. K. (2012). The Water Relations And Irrigation Requirements Of Macadamia (<i>MACADAMIA</I> SPP.): A Review. *Experimental Agriculture*.
- Vahdati, K., Sarikhani, S., Arab, M., Leslie, C. A., Dandekar, A. M., Aletà, N., Bielsa, B., Gradziel, T. M., Montesinos, Á., Rubio Cabetas, M. J., Sideli, G. M., Serdar, Ü., Akyüz, B., Beccaro, G. L., Donno, D., Rovira, M., Ferguson, L., Akbari, M. G., Sheikhi, A., ... Mehlenbacher, S. A. (2021). Advances in Rootstock Breeding of Nut Trees: Objectives and Strategies. *Plants*.

- Villa, Y. B., S. Khalsa, S. D., Ryals, R., Duncan, R. A., Brown, P. H., & Hart, S. C. (2021). Organic Matter Amendments Improve Soil Fertility in Almond Orchards of Contrasting Soil Texture. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*.
- Wan, Y. (2024). Active Soil Organic Carbon Pools Decrease With Increased Time Since Land-Use Transition From Rice Paddy Cultivation to Areca Nut Plantations Under the Long-Term Application of Inorganic Fertilizer. *Agronomy*.
- Wang, Y., Schaub, S., Wuepper, D., & Finger, R. (2022). Culture and Agricultural Biodiversity Conservation. *SSRN Electronic Journal*.
<https://doi.org/10.2139/ssrn.4043727>
- Wang, Y., Yao, X., Liu, Y., Xueqian, F., Cao, Y., Wang, K., & Guo, S. (2021). Effects of Harvest Time on the Yield, Quality and Active Substance of <i>Torreya Grandis</i> Nut and Its Oil. *Journal of Oleo Science*.
- Wells, L. (2018). Mechanical Hedge Pruning Affects Nut Size, Nut Quality, Wind Damage, and Stem Water Potential of Pecan in Humid Conditions. *Hortscience*.
- Williams, A., Hunter, M. C., Kammerer, M., Kane, D. A., Jordan, N. R., Mortensen, D. A., Smith, R. G., Snapp, S. S., & Davis, A. S. (2016). Soil Water Holding Capacity Mitigates Downside Risk and Volatility in US Rainfed Maize: Time to Invest in Soil Organic Matter? *Plos One*.
- Wood, S. A., Sokol, N. W., Bell, C. W., Bradford, M. A., Naeem, S., Wallenstein, M. D., & Palm, C. (2016). Opposing Effects of Different Soil Organic Matter Fractions on Crop Yields. *Ecological Applications*.
<https://doi.org/10.1890/16-0024.1>
- Xi, Z., Lu, D., Liu, L., & Ge, H. (2016). Detection of Drought-Induced Hickory Disturbances in Western Lin an County, China, Using Multitemporal Landsat Imagery. *Remote Sensing*.
- Yang, Y.-M., Wei, F., Li, Z., Fu-gen, H., Guan, H., & Huang, J. (2023). Improper Crop Rotation May Enrich Soil-borne Pathogens of <i>Panax Notoginseng</i>. *Journal of Phytopathology*.

- Yao, W., & Li, N. (2021). Research on Agricultural Products Logistics and Supply Chain System Based on Computer Big Data Model. *E3s Web of Conferences*.
- Yuan, W., Cai, W., Chen, Y., Liu, S., Dong, W., Zhang, H., Yu, G., Chen, Z., He, H., Guo, W., Dan, L., Liu, S., Xiang, W., Xie, Z., Zhao, Z., & Zhou, G. (2016). Severe Summer Heatwave and Drought Strongly Reduced Carbon Uptake in Southern China. *Scientific Reports*.
- Zasada, I. A., Walters, T., & Hanson, B. D. (2010). Challenges in Producing Nematode- And Pathogen-Free Fruit and Nut Nursery Crops in the United States. *Outlooks on Pest Management*.
- Zhang, H., Shen, L., Lan, H., Li, Y., Liu, Y., Tang, Y., & Li, W. (2018). Mechanical Properties and Finite Element Analysis of Walnut Under Different Cracking Parts. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*.
- Zhu, Q., Liu, L., Li, K., Chen, W., Li, M., Fan, C., Zhu, T., Shen, Q., Wu, Y., Tang, S., Ling, M., Müller, C., & Zhang, J. (2022). Decrease in Soil Inorganic Nitrogen Supply Capacity Under Long-term Areca Nut Plantations in the Tropics. *Land Degradation and Development*.

BÖLÜM 6

TIBBİ VE AROMATİK BİTKİLERDE SÜRDÜRÜLEBİLİR ÜRETİM İÇİN AMF VE PGPR UYGULAMALARI

Doç. Dr. Abdurrahim YILMAZ^{1*}
Prof. Dr. Vahdettin ÇİFTÇİ²

DOI: <https://dx.doi.org/10.5281/zenodo.14541795>

^{1*} Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Tarla Bitkileri Bölümü, Bolu, Türkiye. abdurrahimyilmaz@ibu.edu.tr

² Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Tarla Bitkileri Bölümü, Bolu, Türkiye. vahdettinciftci@ibu.edu.tr

GİRİŞ

Modern tarım, hızla artan d¼nya n¼fusunun neden olduğu çeşitli çevresel zorluklarla karşı karşıya kalmakta ve bu zorluklar doğrultusunda önemli değişimlerden geçmektedir (Noceto ve ark., 2021). Bu değişimler insanları küresel gıda güvenliğini sağlama ve sürdürülebilirliği koruma konusunda yeni stratejiler geliştirmeye zorlamaktadır (Evelin ve ark., 2019). Bu çerçevede, kimyasal gübreler çoğunlukla kısa vadeli bir çözüm olarak tercih edilmektedir (Molina-Santiago ve Matilla, 2020). Kimyasal gübrelerin kullanımı bitki verimini hızla artırabilse de sürekli kullanıldığında toprak pH'sının ve organik madde içeriğinin düşmesine, ayrıca toprak yapısının sertleşmesine neden olmaktadır. Bu durum, uzun vadede verimin azalmasına, çeşitli biyolojik ve çevresel sorunların ortaya çıkmasına yol açmaktadır (Yılmaz ve ark., 2023). Ayrıca, sentetik gübrelerin besin maddelerinin sızarak su kirliliğine yol açması gibi çevresel etkileri, alternatif gübreleme stratejilerine olan ihtiyacı artırmaktadır (Piwowar, 2021).

İklim koşullarındaki değişiklikler d¼nya genelinde bitki verimliliğini olumsuz etkileyerek gıda güvenliği sorunlarına neden olmaktadır (Yılmaz ve Çiftçi, 2021). Ekonomik olarak sürdürülebilir bir tarım elde edebilmek ve çiftçilerin geçimlerini sürdürebilmelerini sağlamak için tarımsal yönetim ve üretim yaklaşımlarının değiştirilmesi gerekmektedir (Yılmaz ve ark., 2021). Bu bağlamda doğal gübrelerin kullanımının, kimyasal girdileri azaltarak ve daha sağlıklı

ekosistemleri teşvik ederek sürdürülebilir tarım uygulamalarını desteklediği görülmektedir (Staley ve ark., 2010).

Alternatif doğal gübrelere geçiş, sürdürülebilir tarım uygulamalarına ulaşmak için vazgeçilmez bir gereklilik haline gelmektedir. Çiftçiler, organik malzemelerden ve yenilikçi gübreleme tekniklerinden yararlanarak toprak sağlığını iyileştirebilmekte, ürün verimini artırabilmekte ve sentetik gübrelerin neden olduğu çevresel etkileri azaltabilmektedir. Bu dönüşüm, yalnızca gıda güvenliğini desteklemekle kalmayıp, aynı zamanda tarımda sürdürülebilir kalkınmayı teşvik etmeye yönelik küresel çabalarla da uyum sağlamaktadır.

1. TIBBİ VE AROMATİK BİTKİLERDE SÜRDÜRÜLEBİLİR YAKLAŞIMLAR

İnsanların sağlık ve beslenme amacıyla doğal kaynakları kullanma eğiliminin artmasıyla birlikte tıbbi ve aromatik bitkilerin önemi de zamanla artmıştır (Bulunuz Palaz ve ark., 2023). Tıbbi ve aromatik bitkiler öncelikle sağlığı korumak, hastalıkları önlemek veya tedavi etmek amacıyla kullanılır (Yılmaz ve ark., 2022). Ayrıca bu bitkiler, vücut bakımında, beslenmede, kozmetik ürünlerde ve tütsü olarak da kullanılmaktadır (Yılmaz, 2022). Tıbbi ve aromatik bitkilerin sürdürülebilir uygulamalara entegrasyonu, sağlık, çevre koruma ve ekonomik uygulanabilirlik gibi çok yönlü faydaları nedeniyle giderek daha fazla tanınmaktadır. COVID-19 salgını, birçok kişinin bağışıklık sistemlerini güçlendirmek için doğal ilaçlar aramasıyla tıbbi ve aromatik bitkilerin terapötik potansiyeline ilişkin farkındalığını önemli

ölçüde artırmıştır. Araştırmalar, çeşitli tıbbi ve aromatik bitkilerin bağışıklık fonksiyonunu artırarak önleyici sağlık faydaları sağlayabileceğini ortaya koymaktadır. Özellikle *Allium spp.* ve *Anchusa spp.* gibi bitkilerin bu bağlamda değerlendirilmeleri gerektiği önerilmektedir (Kavaklı ve ark., 2022). Bu tür bitkilere olan eğilim, Dünya Sağlık Örgütü'nün (WHO) tıbbi bitkilerin korunması ve sürdürülebilir kullanımına vurgu yapmasıyla birlikte, sağlık hizmetlerinde doğal ürünlerin kullanılmasına yönelik daha geniş bir küresel hareketi doğurmuştur (Ogunkunle ve ark., 2021).

Tıbbi ve aromatik bitki sektöründe sürdürülebilirlik yalnızca sağlık yararlarıyla ilgili olmayıp aynı zamanda bu bitkilerin pazarlarda uygulanabilirliğini sağlayan ekonomik stratejileri de kapsamaktadır. Bu sektörde sürdürülebilir ticaret uygulamalarını teşvik etmek için etkili pazarlama bilgi sistemleri ve stratejileri oldukça önemlidir. Chandra ve Sharma tarafından yapılan bir çalışma, sürdürülebilirlik ve rekabet gücüne ulaşmak için gerekli temel göstergeleri ana hatlarıyla belirterek, bu çabalara rehberlik etmede uzman doğrulamasının ve stratejik çerçevelerin önemini vurgulamaktadır (Chandra ve ark., 2019). Ayrıca, özellikle Hindistan gibi bölgelerde tıbbi ve aromatik bitkilerin markalaşması, biyolojik çeşitliliği korurken yerel geçim kaynaklarını destekleyen sürdürülebilir bir ekonomi oluşturmak için önemlidir (Chandra ve Sharma, 2019).

Tıbbi ve aromatik bitkilerin çevresel faydaları, kirlilik kontrolü ve toprak sağlığındaki rollerine kadar uzanmaktadır. Son araştırmalar, tıbbi ve aromatik bitkilerin çevre kirliliğini azaltma potansiyelini

vurgulayarak sentetik kimyasallara sürdürülebilir alternatifler sunmaktadır (Akhilraj ve ark., 2023). Örneğin, aromatik bitkilerin toprak kalitesini iyileştirdiği ve ekolojik dengeyi korumak için hayati önem taşıyan tarımsal ortamlardaki faydalı organizma topluluğunu geliştirdiği bildirilmektedir (Argyropoulou ve ark., 2022). Ek olarak, tıbbi ve aromatik bitkileri diğer mahsullerle birlikte yetiştirme uygulaması, kimyasal pestisitlere olan bağımlılığı azaltırken biyolojik çeşitliliği teşvik eden zararlı yönetimi için etkili bir strateji olarak tanımlanmaktadır (Li ve ark., 2021).

Tıbbi ve aromatik bitkilerin üretkenliğini artırmaya yönelik birincil biyoteknolojik yaklaşımlardan biri, bitki büyümesini teşvik eden rizobakteriler (PGPR) ve arbüsküler mikorizal mantarlar (AMF) gibi mikrobiyal aşılama ajanlarının uygulanmasıdır. Bu mikrobiyal ajanlar besin alımını artırmakta, toprak kalitesini iyileştirmekte ve bitkilerin biyotik ve abiyotik streslere karşı dayanıklılığını artırmaktadır. Araştırmalar, PGPR ve AMF uygulamalarının tıbbi ve aromatik bitkilerin veriminde ve kalitesinde önemli artışlara yol açabileceğini ve dolayısıyla sürdürülebilir tarım uygulamalarına katkıda bulunabileceğini göstermiştir. Bu mikrobiyal aşılama ajanlarının kullanımı yalnızca verimliliği artırmakla kalmaz, aynı zamanda zararlı çevresel etkilere sahip olabilen kimyasal gübrelere olan bağımlılığı da azaltmaktadır (Şirin ve ark., 2022; Swamy ve ark., 2016).

Bu bağlamda, mikrobiyal uygulamaların tıbbi ve aromatik bitkiler üzerindeki olumlu etkilerini anlamaya yönelik kapsamlı çalışmaların ele alınması gerekmektedir. PGPR ve AMF uygulamalarının tıbbi ve

aromatik bitkiler üzerindeki potansiyelleri, detaylı bir şekilde araştırılması gereken önemli bir alandır.

2. TIBBİ VE AROMATİK BİTKİLERDE BİTKİ GELİŞİMİNİ TEŞVİK EDEN BAKTERİLERLE (PGPR) İLGİLİ ÇALIŞMALAR

Rizosferde aktif olarak gelişen, bitki köklerini agresif bir şekilde kolonize eden ve bitki büyümesini teşvik eden serbest yaşayan toprak bakterileri, bitki büyümesini destekleyici rizobakteriler (PGPR) olarak tanımlanmaktadır (Basu ve ark., 2021). PGPR, büyümeyi teşvik edici çeşitli kimyasal bileşiklerin sentezlenmesiyle konukçu bitkilerin mikro besin elementlerine erişimini artırmakta ve dolayısıyla bitki büyümesi ile gelişimi üzerinde belirgin etkiler sağlamaktadır. Aynı zamanda, kök büyüme modellerinin iyileştirilmesinde oynadıkları rol ile de dikkat çekmektedir (Khan ve ark., 2019; Turan ve ark., 2021; Yılmaz ve Karık, 2022). Bu bakteriler, bitkileri biyotik ve abiyotik stres faktörlerine karşı çeşitli mekanizmalarla koruma yeteneğine de sahiptir (Khademian ve ark., 2019; Asghari ve ark., 2020). Belirli PGPR suşları, bitki hormonlarının sentezini taklit ederek bitki fizyolojisini doğrudan düzenlerken; bazıları ise bitki büyümesini teşvik etmek amacıyla toprakta mineral ve azot mevcudiyetini artırmaktadır (Moncada ve ark., 2021). Son yıllarda, verim artırma potansiyelleri nedeniyle PGPR'ların tarımda yaygın olarak kullanılmasıyla birlikte hem bitki hem de toprak sağlığının korunmasında kritik bir role sahip oldukları giderek daha fazla anlaşılmaktadır. Buna paralel olarak, son yıllarda pazara yönelik çeşitli ticari PGPR formları geliştirilmiştir (Yılmaz ve Karık, 2022).

Tıbbi ve aromatik bitkiler bağlamında bitki büyümesini teşvik eden rizobakterilerin kullanımı, bitki büyümesini, verimini ve sekonder metabolit üretimini artırma potansiyelleri nedeniyle son yıllarda büyük ilgi görmüştür. PGPR, bitki köklerini kolonize etme, besin alımını artırma, fitoormon üretimi ve stres toleransını geliştirme gibi çeşitli mekanizmalarla bitki sağlığını ve verimliliğini olumlu yönde etkileyebilen yararlı mikroorganizmalardır (Ghorbanpour ve ark., 2016; Noumavo ve ark., 2016).

PGPR uygulamalarının tıbbi ve aromatik bitkilerde büyüme parametrelerini artırdığı çeşitli çalışmalarda gösterilmiştir. Örneğin, fesleğen (*Ocimum basilicum L.*) üzerinde yapılan bir çalışmada, PGPR'ın taze ot ve yaprak verimi gibi büyüme parametrelerini artırdığı tespit edilmiştir. Kontrol grubuna kıyasla, PGPR uygulamalarıyla daha yüksek verim sağlanmış ve sekonder metabolit üretiminde belirgin bir artış gözlemlenmiştir (Yılmaz ve Karik, 2022). Benzer şekilde Kutlu ve arkadaşları, PGPR'nin Türk kekiğinde uçucu yağ içeriğini artırarak metabolitlerin ekonomik ve biyolojik değerini yükselttiğini belirtmişlerdir (Kutlu ve ark., 2019). Ghorbanpour ve arkadaşları, *Salvia officinalis* bitkisinde PGPR'nin büyüme parametrelerini artırdığını ve tıbbi özellikler açısından önemli olan antioksidan ve antimikrobiyal özellikleri geliştirdiğini belirtmiştir (Ghorbanpour ve ark., 2016). Bu bulgular, PGPR'nin yalnızca biyokütle artışına değil, aynı zamanda bitkilerin kalite değerine de katkıda bulunduğunu ortaya koymaktadır.

Tıbbi ve aromatik bitkilerin yetiştiriciliğinde PGPR uygulamaları, büyümenin, sekonder metabolit üretiminin ve stres direncinin artırılmasında umut vadeden bir araç olarak değerlendirilmektedir. Yapılan araştırmalar, PGPR'nin çok yönlü faydalarını ortaya koymakta ve bu mikroorganizmaların sürdürülebilir tarım uygulamalarının vazgeçilmez bir bileşeni olabileceğini göstermektedir. PGPR uygulamaları, kuraklık ve tuzluluk gibi stres faktörlerine karşı bitki dayanıklılığını artırmada etkili olabilmektedir. Örneğin, Ghorbanpour tarafından yapılan bir çalışmada, PGPR'nin *Hyoscyamus niger* üzerindeki su kıtlığı stresinin olumsuz etkilerini azaltabileceği ve klorofil içeriğini ve genel bitki sağlığını iyileştirebileceği gösterilmiştir (Ghorbanpour ve ark., 2013). Çakmakçı ve arkadaşları ise PGPR'nin *Origanum onites* üzerinde stres toleransını artırdığını ve bu yolla bitki sağlığını desteklediğini bildirmiştir (Çakmakçı ve ark., 2023).

Gelecekteki çalışmalar, tıbbi ve aromatik bitkilere özgü PGPR uygulamalarını optimize etmeye odaklanmalıdır. Özellikle farklı PGPR suşlarının bitki metabolizması üzerindeki etkilerinin detaylı bir şekilde ele alınması, bu mikroorganizmaların potansiyelini tam olarak anlamak için kritik öneme sahiptir. Ayrıca, PGPR'nin etkinliğinin hem laboratuvar hem de tarla koşullarında değerlendirilmesi, bu uygulamaların geniş ölçekli tarımda kullanılabilirliğini artırabilir. Bunun yanında, PGPR'nin çevresel stres faktörlerine karşı dayanıklılığı artırmada gösterdiği etkilerin moleküler düzeyde incelenmesi, bu simbiyotik ilişkilerin altında yatan mekanizmaların

anlaşılmasını sağlayabilir. Çevresel sürdürülebilirliğin sağlanması adına, PGPR'nin tıbbi ve aromatik bitki yetiştiriciliğinde etkin kullanımına yönelik yeni stratejilerin geliştirilmesi ve bu stratejilerin saha uygulamalarında test edilmesi, tarımsal verimlilik ve gıda güvenliğine katkı sağlayacaktır. Bu bağlamda, PGPR uygulamalarının farklı stres faktörlerine karşı dayanıklılığı artırmada kullanılabilme potansiyeli, gelecekteki araştırmaların öncelikli konuları arasında yer almalıdır.

3. TIBBİ VE AROMATİK BİTKİLERDE ARBÜSKÜLER MİKORİZAL FUNGUSLAR (AMF) İLE İLGİLİ ÇALIŞMALAR

Arbüsküler mikorizal funguslar (AMF), karasal ekosistemlerde yaygın olarak bulunan ve bitkilerle simbiyotik ilişkiler kuran endotrofik mantar türlerini içermektedir. AMF'ler, bitkilerin karbon değişim süreçlerini etkileyerek toprak besin elementlerine erişimini kolaylaştırmakta ve kök kolonizasyonu yoluyla bitkilerin hormonal dengesini değiştirerek fotosentez oranlarını artırmaktadır (Yılmaz ve Karık, 2022). Günümüz tarım uygulamalarının sürdürülebilirliğinin artırılmasında AMF'ler önemli bir rol oynamaktadır (Bhantana ve ark., 2021). Bununla birlikte, AMF'lerin bitki verimi üzerindeki etkileri, topraktaki çeşitli mantar topluluklarının varlığına göre farklılık gösterebilmektedir. Yapılan çalışmalar, daha geniş bir tür çeşitliliğine sahip AMF topluluklarının bitki büyümesini daha etkin bir şekilde destekleyebileceğini ortaya koymuştur (Yılmaz ve Karık, 2022).

AMF kolonizasyonunun en önemli avantajlarından birisi tıbbi bitkilerde sekonder metabolit üretimini artırmasıdır. Örneğin, Yuan

(2023), AMF inokulasyonunun fotosentetik fizyolojik aktiviteyi artırdığını ve bunun tıbbi bitkilerde aktif bileşenlerin sentezi için kritik öneme sahip olduğunu ortaya koymuştur. AMF ile bitki kökleri arasındaki karbonhidrat alışverişinin artması, fotosentezi teşvik ederek sekonder metabolit üretimi için gerekli olan fizyolojik ve metabolik aktiviteleri desteklemektedir. Abdullahi ve ark. (2021), AMF ile yapılan simbiyozların terpenler, fenoller ve alkaloidler gibi önemli aktif bileşenlerin üretimini ve birikimini artırdığını belirtmiştir. Bu, söz konusu bitkilerin farmakolojik etkinliği açısından kritik öneme sahiptir. Benzer şekilde, Vieira ve ark. (2021), AMF'nin *Catharanthus roseus* ve *Calendula officinalis* gibi çeşitli tıbbi bitkilerde sekonder metabolitlerin verimini en üst düzeye çıkarabileceğini bulmuştur. Bu bulgular, AMF'nin tıbbi bitkilerin terapötik özelliklerini artırmak için kullanılabileceğini göstermektedir. Kapoor ve ark. (2002), AMF inokulasyonunun kişnişte esansiyel yağların konsantrasyonunu ve kalitesini artırdığını bildirmiştir. Bu, aromatik bitki endüstrisi için büyük önem taşımaktadır; çünkü uçucu yağ kalitesi bu bitkilerin değerini belirleyen ana faktörlerden biridir. Bu çalışma, çeşitli aromatik bitkilerde esansiyel yağ üretimini optimize edebilecek belirli AMF türlerinin araştırılmasının gerekliliğini vurgulamaktadır.

Tıbbi bitkilerde AMF'nin bu faydaları üzerine yapılan çalışmalara ek olarak, fesleğen (*Ocimum basilicum L.*) üzerinde yapılan bir araştırma, AMF uygulamalarının bitkinin büyüme parametreleri ve sekonder metabolit profili üzerinde önemli etkiler yarattığını ortaya koymuştur. Özellikle, AMF uygulamaları fesleğen üzerinde esansiyel yağ içeriğini

artırmış ve metabolitlerin ekonomik değerini yükseltmiştir. Çalışmada, AMF'nin özellikle Eugenol ve γ -cadinen gibi bileşenlerin miktarında önemli artışlara neden olduğu bildirilmiştir (Yılmaz ve Karik, 2022). Aynı şekilde, kişniş (*Coriandrum sativum L.*) üzerinde yapılan bir diğer çalışmada, AMF'nin esansiyel yağ içeriğini artırdığı ve özellikle PGPR ile kombinasyonun uygulandığı bir muamalenin *linalool* ile γ -*terpinene* gibi ana bileşenlerin oranlarını yükselttiği bildirilmiştir (Yılmaz, 2022).

Çeşitli AMF türlerinin simbiyotik ilişkilerinin etkinliğindeki rolü de büyük önem taşımaktadır. Zubek ve Błazzkowski (2009), AMF'nin biyokütle üretimini ve tıbbi malzeme kalitesini artırma potansiyelini vurgulamış ve nesli tükenmekte olan bitki türlerinin korunmasında mikorizal varlığın önemine dikkat çekmiştir. Habitat kaybı ve aşırı hasat nedeniyle tehdit altında olan birçok tıbbi bitki açısından mikorizal varlığın anlaşılması özellikle kritik bir konu olarak değerlendirilmektedir.

AMF'nin büyüme ve metabolit üretimini artırmanın ötesinde, çevresel streslere karşı bitki dayanıklılığını iyileştirmedeki rolü de dikkate değerdir. Duc ve ark. (2021), *Eclipta prostrata* üzerinde yaptıkları çalışmada, AMF'nin tuz stresine toleransı artırdığını ve bitkinin tıbbi özellikleri açısından önemli olan polifenol profillerinde değişiklikler oluşturduğunu ortaya koymuştur. Benzer şekilde, Yılmaz ve ark. (2023) tarafından fesleğen (*Ocimum basilicum L.*) üzerinde yapılan bir çalışmada, AMF'nin tuz stresi altında büyümeyi desteklediği ve özellikle yaprak sayısında anlamlı bir artış sağladığı belirtilmiştir.

Antioksidan enzim aktivitelerindeki artış (APX ve CAT'de %25, SOD'da %5) ve oksidatif enzim birikimindeki azalma (H_2O_2 %7,3, MDA %24,9) bu etkinin bir göstergesi olarak rapor edilmiştir. Her iki çalışma, farklı bitki t¼rlerinde y¼r¼t¼lm¼ř olsalar da AMF'nin hem b¼y¼me hem de stres toleransını artırmadaki kritik rol¼n¼ vurgulamaktadır. Xu ve ark. (2008), AMF'nin *Medicago truncatula* bitkisinde arsenik toleransını artırarak fosfor durumunu iyileştirdiğini ve arsenat alımını sınırladığını göstermiştir. AMF'nin bu toprak kirliliğini hafifletme yeteneği, özellikle kontamine ortamlarda tıbbi bitkilerin yetiştirilmesi açısından kritik öneme sahiptir. Ayrıca, AMF'nin çeşitli bitki t¼rlerinde kuraklık toleransını artırabildiği, bunun da iklim değişikliği bağlamında giderek daha önemli hale geldiği gr¼lm¼řt¼r (Wu ve ark., 2022).

Ekolojik açıdan, AMF'nin bitki sağlığının ötesindeki etkileri dikkate değerdir. Zubek ve ark. (2008), endemik ve nesli t¼kenmekte olan bitki t¼rleri için etkili koruma stratejileri geliştirmek adına bitki-mantar etkileşimlerinin anlaşılmasının önemini vurgulamıştır. AMF'nin besin dng¼s¼n¼ iyileştirme ve toprak sağlığını destekleme yeteneği, s¼rd¼r¼lebilir tarım uygulamalarındaki önemini daha da artırmaktadır.

AMF'nin tıbbi ve aromatik bitkilerle etkileşimleri üzerine yapılan çalışmalar, tarımsal ve ekolojik uygulamalar için birçok fayda sunmaktadır. Sekonder metabolit üretimini artırılması, besin alımının iyileştirilmesi ve stres toleransının artırılması, AMF'nin bitkiler için

sağladığı temel avantajlardır. Bunun yanı sıra, AMF'nin toprak yapısını iyileştirerek besin elementlerinin daha verimli kullanılmasını sağlaması, kök gelişimini teşvik etmesi ve bitkilerin toprak kaynaklarından daha etkin faydalanmasına olanak tanınması, sürdürülebilir tarım açısından önemlidir. Ayrıca, bu simbiyotik mantarların organik tarım sistemlerinde çevre dostu bir alternatif olarak kullanımı ve toprak mikrobiyal çeşitliliğini artırması, ekosistem sağlığını desteklemekte ve gıda güvenliğine katkıda bulunmaktadır. AMF'nin farklı bitki türleri üzerindeki etkileri, stres koşullarındaki dayanıklılığı artırma potansiyeli ve metabolit verimindeki iyileştirici rolü göz önünde bulundurulduğunda, bu simbiyotik ilişkinin daha derinlemesine araştırılması hem çevresel sürdürülebilirlik hem de ekonomik verimlilik açısından kritik öneme sahiptir.

SONUÇ

Tıbbi ve aromatik bitkilerin sürdürülebilir üretimi, çevresel, ekonomik ve sağlık odaklı zorluklara karşı bir çözüm sunma potansiyeli taşımaktadır. Bu doğrultuda, AMF ve PGPR uygulamaları, sağladıkları çok yönlü avantajlarla sürdürülebilir tarım stratejileri içinde önemli bir yer edinmektedir. Besin alımını artırma, stres toleransını geliştirme ve biyoaktif bileşiklerin üretimini teşvik etme gibi etkiler, bu mikroorganizmaların bitki sağlığı ve verimliliği üzerindeki kritik rollerini ortaya koymaktadır. Ayrıca, biyokömür gibi sürdürülebilir tarım uygulamalarıyla kombinasyonları, uzun vadede daha dayanıklı tarımsal sistemlerin geliştirilmesine olanak tanımaktadır.

AMF ve PGPR uygulamalarının tarımsal üretimde sunduğu katkılar, yalnızca verim ve kalite artışıyla sınırlı kalmamakta, aynı zamanda ekosistemlerin sürdürülebilirliğini koruma açısından da büyük bir öneme işaret etmektedir. Özellikle kimyasal gübre ve pestisitlerin kullanımını azaltma potansiyelleri, bu uygulamaları çevre dostu bir alternatif olarak öne çıkarmaktadır. Bununla birlikte, bu biyoteknolojik yaklaşımların farklı ekolojik koşullarda adaptasyonunu inceleyen çalışmaların artırılması, teknolojilerin geniş çaplı uygulanabilirliğini desteklemek adına gereklilik göstermektedir.

Gelecekte, AMF ve PGPR'nin tıbbi ve aromatik bitkiler üzerindeki etkilerinin genetik, fizyolojik ve metabolik düzeylerde detaylı bir şekilde ele alınması gerektiği düşünülmektedir. Ayrıca, bu mikroorganizmaların farklı bitki türleriyle etkileşimleri ve uygulama yöntemlerinin optimize edilmesi, sürdürülebilir tarım sistemlerinin daha verimli hale getirilmesine katkı sağlayacaktır.

AMF ve PGPR uygulamaları, sürdürülebilir tarımın geleceği için umut vadeden yenilikçi yaklaşımlar arasında yer almaktadır. Çevresel sürdürülebilirlik, ekonomik kalkınma ve halk sağlığını iyileştirme yönündeki katkıları, bu mikroorganizmaların daha geniş kapsamlı tarımsal üretim sistemlerine entegrasyonunu gerektirmektedir. Bu hedeflerin tam anlamıyla gerçekleştirilmesi için multidisipliner iş birlikleri, kapsamlı saha çalışmaları ve destekleyici politikaların hayata geçirilmesi önem arz etmektedir.

KAYNAKÇA

- Abdullahi, R., Kwari, J., & Zubairu, A. (2021). Arbuscular mycorrhizal fungi association with some selected medicinal plants. *Asian Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 1-6.
- Akhilraj B.C., Venkatesan, K., Sandra, J., Raghul, S. (2023). The impact of medicinal and aromatic plants on pollution control: a comprehensive review. *Pollution Research*, 42(04), 445-449.
- Argyropoulou, M., Karmezi, M., Tsiafouli, M., Chalkos, D., Bountla, A., & Vokou, D. (2022). Soil amendments with spearmint, peppermint and rosemary enhance the community of free-living nematodes and improve soil quality, while having strikingly different effects on plant growth. *Life*, 12(8), 1121.
- Asghari, B., Khademian, R., & Sedaghati, B. (2020). Plant growth promoting rhizobacteria (PGPR) confer drought resistance and stimulate biosynthesis of secondary metabolites in pennyroyal (*Mentha pulegium* L.) under water shortage condition. *Scientia Horticulturae*, 263, 109132.
- Basu, A., Prasad, P., Das, S. N., Kalam, S., Sayyed, R. Z., Reddy, M. S., & El Enshasy, H. (2021). Plant growth promoting rhizobacteria (PGPR) as green bioinoculants: recent developments, constraints, and prospects. *Sustainability*, 13(3), 1140.
- Bhantana, P., Rana, M. S., Sun, X. C., Moussa, M. G., Saleem, M. H., Syaifudin, M., ... & Hu, C. X. (2021). Arbuscular mycorrhizal fungi and its major role in plant growth, zinc nutrition, phosphorous regulation and phytoremediation. *Symbiosis*, 84, 19-37.
- Bulunuz Palaz, E., Demirel, F., Adali, S., Demirel, S., & Yilmaz, A. (2023). Genetic relationships of salep orchid species and gene flow among *Serapias vomeracea* × *Anacamptis morio* hybrids. *Plant Biotechnology Reports*, 17(2), 315-327.
- Chandra, P., & Sharma, V. (2019). Marketing information system and strategies for sustainable and competitive medicinal and aromatic plants trade. *Information Development*, 35(5), 806-818.

- Chandra, P., Sharma, V., & Kant, S. (2019). From commodity to brand: The country of origin branding perspective for Indian medicinal and aromatic plants. *Business Strategy & Development*, 2(1), 4-12.
- Çakmakçı, R., Halilolglu, K., Türkoğlu, A., Özkan, G., Kutlu, M., Varmazyari, A., ... & Bocianowski, J. (2023). Effect of different Plant Growth-Promoting Rhizobacteria on biological soil properties, growth, yield and quality of oregano (*Origanum onites* L.). *Agronomy*, 13(10), 2511.
- Duc, N. H., Vo, A. T., Haddidi, I., Daood, H., & Posta, K. (2021). Arbuscular mycorrhizal fungi improve tolerance of the medicinal plant *Eclipta prostrata* (L.) and induce major changes in polyphenol profiles under salt stresses. *Frontiers in plant science*, 11, 612299.
- Evelin, H., Devi, T. S., Gupta, S., & Kapoor, R. (2019). Mitigation of salinity stress in plants by arbuscular mycorrhizal symbiosis: current understanding and new challenges. *Frontiers in Plant Science*, 10, 470.
- Ghorbanpour, M., Hatami, M., & Khavazi, K. (2013). Role of plant growth promoting rhizobacteria on antioxidant enzyme activities and tropane alkaloid production of *Hyoscyamus niger* under water deficit stress. *Turkish Journal of Biology*, 37(3), 350-360.
- Ghorbanpour, M., Hatami, M., Kariman, K., & Dahaji, P. (2016). Phytochemical variations and enhanced efficiency of antioxidant and antimicrobial ingredients in *salvia officinalis* as inoculated with different rhizobacteria. *Chemistry & Biodiversity*, 13(3), 319-330.
- Kapoor, R., Giri, B., & Mukerji, K. G. (2002). Mycorrhization of coriander (*Coriandrum sativum* L) to enhance the concentration and quality of essential oil. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 82(4), 339-342.
- Kavaklı, S., Ergül, B., & Uğurlu, E. (2022). The effect of covid-19 on the use of medicinal and aromatic plants: the case of turkey. *Mediterranean Botany*, Online first, 1-16.
- Khademian, R., Asghari, B., Sedaghati, B., & Yaghoubian, Y. (2019). Plant beneficial rhizospheric microorganisms (PBRMs) mitigate deleterious effects of salinity in sesame (*Sesamum indicum* L.): Physio-biochemical properties,

- fatty acids composition and secondary metabolites content. *Industrial Crops and Products*, 136, 129-139.
- Khan, N., Bano, A., Rahman, M. A., Guo, J., Kang, Z., & Babar, M. A. (2019). Comparative physiological and metabolic analysis reveals a complex mechanism involved in drought tolerance in chickpea (*Cicer arietinum* L.) induced by PGPR and PGRs. *Scientific reports*, 9(1), 2097.
- Kutlu, M., Çakmakçı, R., Hosseinpour, A., & Karagöz, H. (2019). The use of plant growth promoting rhizobacteria (pgpr)'s effect on essential oil rate, essential oil content, some morphological parameters and nutrient uptake of turkish oregano. *Applied Ecology and Environmental Research*, 17(2), 1641-1653.
- Li, X. W., Lu, X. X., Zhang, Z. J., Huang, J., Zhang, J. M., Wang, L. K., ... & Lu, Y. B. (2021). Intercropping rosemary (*Rosmarinus officinalis*) with sweet pepper (*Capsicum annum*) reduces major pest population densities without impacting natural enemy populations. *Insects*, 12(1), 74.
- Molina-Santiago, C., & Matilla, M. A. (2020). Chemical fertilization: a short-term solution for plant productivity?. *Microbial Biotechnology*, 13(5), 1311.
- Moncada, A., Miceli, A., & Vetrano, F. (2021). Use of plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR) and organic fertilization for soilless cultivation of basil. *Scientia Horticulturae*, 275, 109733.
- Noceto, P. A., Bettenfeld, P., Boussageon, R., Hériché, M., Sportes, A., van Tuinen, D., ... & Wipf, D. (2021). Arbuscular mycorrhizal fungi, a key symbiosis in the development of quality traits in crop production, alone or combined with plant growth-promoting bacteria. *Mycorrhiza*, 31(6), 655-669.
- Noumavo, P., Agbodjato, N., Baba-Moussa, F., Adjanooun, A., & Baba-Moussa, L. (2016). Plant growth promoting rhizobacteria: beneficial effects for healthy and sustainable agriculture. *African Journal of Biotechnology*, 15(27), 1452-1463.
- Ogunkunle, A., Ideh, J., & Jimoh, M. (2021). Herbal recipes, drug indications and sustainability potential of traditional oral liquid formulations in ogbomoso, nigeria. *Global Journal of Science Frontier Research*, 21(C2), 39-50.

- Piowar, A. (2021). Consumption of mineral fertilizers in the polish agriculture – trends and directions of changes. *Agricultural Research*, 11(3), 477-487. <https://doi.org/10.1007/s40003-021-00591-7>
- Staley, J. T., Stafford, D. B., Green, E. R., Leather, S. R., Rossiter, J. T., Poppy, G. M., ... & Wright, D. J. (2010). Plant nutrient supply determines competition between phytophagous insects. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 278(1706), 718-724. <https://doi.org/10.1098/rspb.2010.1593>
- Swamy, M. K., Akhtar, M. S., & Sinniah, U. R. (2016). Response of PGPR and AM fungi toward growth and secondary metabolite production in medicinal and aromatic plants. *Plant, Soil and Microbes: Volume 2: Mechanisms and Molecular Interactions*, 145-168.
- Şirin, E., Ertürk, Y., & Kazankaya, A. (2022). Effects of PGPR, AMF and Trichoderma Applications on Adaptation Abilities to Different Biotic and Abiotic Conditions in Medicinal and Aromatic Plants. *Turkish Journal of Agriculture-Food Science and Technology*, 10(2), 166-173.
- Turan, M., Arjumend, T., Argın, S., Yıldırım, E., Katırcıoğlu, H., Gürkan, B., Ekinci, M., Günes, A., Kocaman, A., & Bolouri, P. (2021). Plant root enhancement by plant growth promoting rhizobacteria. In Yıldırım, E., Turan, M., & Ekinci, M. (Eds.), *Plant Roots*. (pp. 1–19). Intech Open.
- Vieira, M., Freitas, M., Peçanha, D., Lima, T., Martins, M., & Vieira, I. (2021). Arbuscular mycorrhizal fungi and phosphorus in spilanthal and phenolic compound yield in jambu plants. *Horticultura Brasileira*, 39(2), 192-198.
- Wu, S., Shi, Z., Chen, X., Gao, J., & Wang, X. (2022). Arbuscular mycorrhizal fungi increase crop yields by improving biomass under rainfed condition: a meta-analysis. *Peerj*, 10, e12861.
- Xu, P., Christie, P., Liu, Y., Zhang, J., & Li, X. (2008). The arbuscular mycorrhizal fungus *Glomus mosseae* can enhance arsenic tolerance in *Medicago truncatula* by increasing plant phosphorus status and restricting arsenate uptake. *Environmental Pollution*, 156(1), 215-220.

- Yılmaz, A., & Çiftçi, V. (2021). Pütresin'in tuz stresi altında yetişen yer fıstığı (*Arachis hypogaea* L.)'na etkisi. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (31), 562-567.
- Yılmaz, A., & Karik, Ü. (2022). AMF and PGPR enhance yield and secondary metabolite profile of basil (*Ocimum basilicum* L.). *Industrial Crops and Products*, 176, 114327.
- Yılmaz, A., Soysal, S., Emiralioğlu, O., Yılmaz, H., Soydemir, H. E. ve Çiftçi, V. (2021) Sürdürülebilir Tarımda Anıza Ekimin Önemi. M.F. Baran, K. Bellitürk ve A. Çelik (Ed) Türkiye'de Sürdürülebilir Tarım Uygulamaları: Zorluklar ve Potansiyeller (221-230. ss.). Adıyaman.
- Yılmaz, A., Yılmaz, H., Turan, S., Çelik, A., Nadeem, M. A., Demirel, F., ... & Arslan, M. (2022). Biotechnological advancements in coriander (*Coriandrum sativum* L.). *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (35), 203-220.
- Yılmaz, A. (2022). Mixed consortium of microbial inoculants improves yield and essential oil profile of coriander. *Journal of bioscience and bioengineering*, 134(5), 462-470.
- Yılmaz, A., Yildirim, E., Yılmaz, H., Soydemir, H. E., Güler, E., Ciftci, V., & Yaman, M. (2023). Use of arbuscular mycorrhizal fungi for boosting antioxidant enzyme metabolism and mitigating saline stress in Sweet Basil (*Ocimum basilicum* L.). *Sustainability*, 15(7), 5982.
- Yuan, M. L., Zhang, M. H., Shi, Z. Y., Yang, S., Zhang, M. G., Wang, Z., ... & Gao, J. K. (2023). Arbuscular mycorrhizal fungi enhance active ingredients of medicinal plants: a quantitative analysis. *Frontiers in Plant Science*, 14, 1276918.
- Zhao, Y., Cartabia, A., Lalaymia, I., & Declerck, S. (2022). Arbuscular mycorrhizal fungi and production of secondary metabolites in medicinal plants. *Mycorrhiza*, 32(3-4), 221-256.
- Zubek, S., & Błaskowski, J. (2009). Medicinal plants as hosts of arbuscular mycorrhizal fungi and dark septate endophytes. *Phytochemistry Reviews*, 8, 571-580.

Zubek, S., Turnau, K., & Blaszkowski, J. (2008). Arbuscular mycorrhiza of endemic and endangered plants from the Tatra Mts. *Acta Societatis Botanicorum Poloniae*, 77(2).

B¼L¼M 7
İNSEKTİSİT ÖZELLİĞİ G¼STEREN
SEKONDER METABOLİTLER

Araş. Gör. Sibel TURAN SİRKE^{1*}
Dr. Öğr. Üyesi Metin KOÇAK²

DOI: <https://dx.doi.org/10.5281/zenodo.14541798>

^{1*} Van Y¼z¼nc¼ Yıl Üniversitesi, Ziraat Fak¼ltesi, Tarımsal Biyoteknoloji B¼l¼m¼,
Van, T¼rkiye. *sibelturan@yyu.edu.tr

² Van Y¼z¼nc¼ Yıl Üniversitesi, Ziraat Fak¼ltesi, Tarımsal Biyoteknoloji B¼l¼m¼,
Van, T¼rkiye. metinkocak@yyu.edu.tr

GİRİŞ

Tarım zararlılarıyla en etkili m¼cadele y¼ntemi olan pestisitlerin b¼y¼k bir kısmının ithal edilmesi bitkisel üretim maliyetinin artmasına neden olmaktadır. Pestisitlerin çoğunun insan ve çevre sağlığına zarar verdiği bilindiğinden, tarımda zararlı y¼netimi, ekonomik ve ekolojik s¼rd¼r¼lebilirliđi sağlarken b¼cek zararlılarını öld¼rmek için uygun ajanların geliştirilmesinde zorluklarla karşılaşmaktadır.

İnsektisitler ise pestisitlerin bir alt grubu olup zararlı b¼ceklerle m¼cadelede kullanılan kimyasallardır. B¼cek zararlılarının sadece tarımsal ¼r¼nlere zarar vererek önemli ekonomik kayıplara neden olmasının dışında çeşitli insan hastalıklarını bulaştırabilen vekt¼rler olarak da hareket ettikleri bilinmektedir (Nauen, 2007; Phillips ve Throne, 2010). Buna rağmen Organofosfatlar, organokloridler ve karbamatlar dahil olmak ¼zere kimyasal insektisitler genellikle kayıpları en aza indirmek için kullanılır. Son zamanlarda hem laboratuvar hem de tarla koşullarında çeşitli zararlı t¼rlerinde insektisitlere karşı direnç bildirilmiştir. Bu nedenle, yeni aktivitelere sahip çevre dostu insektisitlerin belirlenmesine y¼nelik çalışmalara ihtiyaç duyulmaktadır. Biyolojik olarak aktif bileşikler olarak yaygın bir şekilde kullanıldıkları ve biyolojik olarak paralanabildikleri ve entegre y¼netim programlarında kullanım için potansiyel olarak uygun oldukları için tarımda s¼rd¼r¼lebilir b¼cek zararlıları y¼netimi için önemli bir alternatif strateji olarak kabul edilmiştir. Bitki k¼kenli insektisitler, çevre dostu, güvenli ve entegre ¼r¼n y¼netimi

yaklaşımlarıyla artan bir ilgi ve dikkat çekmektedir. Ayrıca, küresel olarak organik gıda üretiminde hayati bir rol oynamaktadırlar.

İnsektisitler böcekler ve diğer eklembacaklılar üzerinde geniş bir etki yelpazesine sahiptir: nöroeksitasyon, enerji tükenmesi ve nöromusküler yorgunluk nedeniyle hiperaktivite, titreme ve sert felçle sonuçlanırken, nöroinhibisyon, olası oksijen yoksunluğu ve/veya solunum kapasitesinin azalması nedeniyle hareketsizlik ve felçle sonuçlanarak ölüm gerçekleşir (Scharf ve ark., 2003). Yeni ve geleneksel insektisitlerin etki biçimlerini ve toksik maddeyle temaslarını en aza indirerek çevredeki tepkilerini aydınlatmak için böceklerdeki davranış kalıplarını araştırmak önemlidir.

Aktif bileşenler / fitokimyasallar olarak da adlandırılan bitki sekonder metabolitleri artık kalitatif olarak taranmakta, kantitatif olarak ekstrakte edilmekte, tanımlanmakta, keşfedilmekte ve özellikle böcek zararlılarının kontrolü için tasarlanmış yeşil pestisitler veya biyoinssektisitler olarak adlandırılan formülasyonlar halinde geliştirilmektedir (Zhang ve ark., 2011).

Bitki sekonder metabolitleri, küçük miktarlarda sentezlenen büyük ve çeşitli bir organik bileşik grubunu oluşturur; fotosentez, solunum, çözünen madde taşınması, protein sentezi, besin asimilasyonu ve karbonhidratların, proteinlerin ve lipitlerin farklılaşması veya oluşumu gibi temel süreçlerde doğrudan bir işlevi yoktur. Bitkilerde kimyasal dönüşümler sonucu ortaya çıkarlar ve işlevlerinin çoğu bilinmese bile, sekonder metabolitlerin bitkinin avcılara ve patojenlere karşı

savunmasıyla ilgili olduğuna inanılmaktadır. Ayrıca diğer bitkilerin b¼y¼mesini, hayatta kalmasını ve çoğalmasını etkileyen allelopatik ajanlar olarak hareket ederler, tohum tozlayıcılarını ¼ekerler ve sıcaklık, nem, ışık yoğunluğu ve kuraklıktaki ani değişikliklere uyum sağlamaya hizmet ederler (Zaynab ve ark., 2018).

Sekonder metabolitler, b¼ceklere karşı direnç g¼stermede önemli roller oynamakta ve insektisidal aktivite gibi ¼eřitli özellikler sergilemektedir (Cavalacante ve ark., 2006; Koca ve ark., 2023). Kimyasal yapılarının doğası gereği biyosit etkisi g¼steren madde veya madde karışımı olarak kabul edilirler (Celis ve ark., 2008). Ancak b¼ceklere karşı kullanılan bitkilerin çoğu insektisitten ziyade insektistatik etkiye sahiptir. Bu, b¼ceđin gelişiminin ve davranışının engellendiği bir mekanizmadır (Celis ve ark., 2008). Kovucu, beslenmeyi önleyici), b¼y¼meyi d¼zenleyici, beslenmeyi caydırıcı ve yumurtlamayı caydırıcı aktivite olarak etki g¼stermektedir (Eriksson ve ark., 2008; Koul, 2004 ;Wheeler ve Isman, 2001; Viglianco ve ark., 2006; Banchio ve ark., 2003).

Kovucu aktivite, b¼ceklerin kendilerinden uzaklaşmasına neden olan sinek kokulu veya tahriş edici etkiler g¼steren bileşiklere sahip bitkilerde ortaya ¼ıkar (Peterson ve Coats, 2001). Beslenmeyi önleyici aktivite, b¼cek tarafından yutulduktan sonra beslenmeyi durdurmasına ve sonunda açlıktan ölmesine neden olan bileşikler tarafından uygulanır (Isman, 2006). B¼y¼meyi d¼zenleyen bileşikler metamorfozu engeller veya erken deri değiştirmeyi tetikler. B¼y¼meyi d¼zenleyen hormonları

değiştirirler ve böceklerde malformasyonlara, kısırılığa veya ölüme neden olurlar (Celis ve ark., 2008).

Bitkilerdeki sekonder metabolitlerin araştırılması, sentetik insektisitlere umut verici bir alternatif sunan insektisidal özellikleri nedeniyle büyük ilgi görmüştür. Flavonoidler, terpenoidler, alkaloidler ve fenolik bileşikler dahil olmak üzere ikincil metabolitler, otçul böceklerle karşı bitki savunma mekanizmalarında önemli bir rol oynamaktadır. Bu bileşikler sadece böcek beslenmesini engellemekle kalmaz, aynı zamanda zararlıların çeşitli yaşam evreleri üzerinde toksik etkiler sergileyerek biyotik stres faktörleri karşısında bitkinin direncini ve hayatta kalmasını artırır (Singh ve ark., 2018). Yapılan araştırmalar, sekonder metabolitlerin böcek zararlılarının fizyolojisini önemli ölçüde etkileyebileceğini göstermiştir. Örneğin, fenolik bileşiklerin ve terpenoidlerin sivrisinek larvalarının midgut epitelini bozarak büyüme ve hayatta kalma oranlarını etkilediği gösterilmiştir. Bu metabolitlerin insektisidal aktivitesi genellikle böceklerde sindirim ve metabolizma gibi kritik biyolojik süreçlere müdahale etme yeteneklerine bağlanmaktadır. Bu müdahale, zararlı popülasyonları arasında ölüm oranlarının artmasına neden olabilir ve bu bileşikler açısından zengin bitki özütlerini entegre zararlı yönetimi stratejileri için değerli hale getirir (Singh ve ark., 2018).

Doğrudan böcek öldürücü etkilerine ek olarak, sekonder metabolitler böcek davranışını da etkileyebilir. Örneğin, bazı alkaloidler ve terpenoidler, bitkiyi daha az lezzetli hale getirerek herbivor olasılığını azaltarak beslenme caydırıcıları olarak hareket eder (Akhtar ve ark.,

2008). Bu davranış değişikliği, haşere popülasyonlarının azalmasına ve kimyasal böcek ilaçlarına daha az güvenilmesine yol açabileceğinden, tarımsal uygulamalar bağlamında özellikle önemlidir. Ayrıca, birden fazla sekonder metabolitin sinerjik etkileri, genel etkinliklerini artırarak çeşitli böcek zararlılarına karşı daha güçlü bir savunma mekanizması oluşturabilir (Zaynab ve ark., 2018).

Dahası, sekonder metabolitlerin zararlı kontrolünde uygulanması, doğrudan böcek öldürücü özellikleriyle sınırlı değildir. Bu bileşiklerin birçoğu aynı zamanda antimikrobiyal ve antifungal aktiviteler sergileyerek tarımsal ortamlardaki kullanımlarını daha da artırmaktadır (Phillips ve Throne, 2010). Örneğin, *Streptomyces lydicus* tarafından üretilen metabolitlerin hem insektisidal hem de antifungal özelliklere sahip olduğu bulunmuştur, bu da onları ürün korumada biyokontrol ajanları için uygun adaylar haline getirmektedir (Phillips ve Throne, 2010). Bitki kaynaklı bileşiklerin bu çok işlevliliği, sürdürülebilir tarımda ikincil metabolitlerin öneminin altını çizmektedir.

Böcek zararlılarının sentetik insektisitlere karşı artan direnci, zararlı yönetiminde önemli bir zorluk teşkil etmektedir. Bununla birlikte, bitki sekonder metabolitlerinin kullanımı bu sorunu hafifletebilir, çünkü bu doğal bileşikler genellikle geleneksel insektisitlere kıyasla farklı etki şekillerine sahiptirler. Örneğin, pamuk bitkisinde bulunan bir seskiterpen olan gossipolünün bazı insektisitlere karşı tolerans sağladığı gösterilmiştir ve bu da zararlı kontrolünde hem sentetik hem de doğal insektisitleri içeren çeşitlendirilmiş bir yaklaşıma duyulan ihtiyacı vurgulamaktadır (Isman 2020).

Bugüne kadar, *Euphorbiaceae*, *Asteraceae*, *Labiatae*, *Fabaceae*, *Meliaceae* ve *Solanaceae* familyalarının öne çıktığı, böcek öldürücü özelliklere sahip olduğu bilinen 2000'den fazla bitki türü bulunmaktadır (García ve ark., 2004). Böceklere karşı biyolojik aktiviteye sahip metabolitler arasında flavonoidler, terpenoidler, alkaloidler, steroidler ve fenoller öne çıkmaktadır (Montoya ve ark., 2006).

İnsektisit özelliği gösteren sekonder metabolitlerin önemli kaynakları olarak dikkat çeken üç bitki familyası şunlardır: *Annonaceae*, *Solanaceae* ve *Meliaceae*. Bu familyalar;

- 1) Böcek kontrolü için farklı kimyasal gruplara sahip olmaları,
- 2) Tropik bölgelerde yaygın olan ve çeşitli bölgelerde yetiştirilen familyalar olmaları,
- 3) Böceklere karşı biyolojik aktivite gösteren ve tropik bölgelerde kullanımları için potansiyel bitkiler olmalarından dolayı oldukça önemlidir.

1. ANNONACEAE

Annonaceae familyası, 1980'lerden bu yana, yapısal özellikleri böcek öldürücü aktivitenin öne çıktığı çeşitli biyolojik aktivitelere sahip olan asetojenlerin varlığı nedeniyle büyük ilgi görmüştür (Ocampo ve Ocampo, 2006). *Annona* cinsi arasında böcek öldürücü özellikleriyle öne çıkan iki tür vardır. Bunlar, *Annona muricata* L. ve *Annona squamosa* L. dir. *A. muricata*'da annokatalin, annoheksosin, annomonisin, annomontasin, annomurikatin, annomurisin, annonasin,

koronin, korosolin, korosolon, gigantetrosin, gigantetronenin, montanansin, murasin, murikatalisin, murisin, robustosin, solamin, squamosin, uvariamisin sekonder metabolitleri bulunmaktadır (Nutrition, 2004). Yapıları bakımından asetojeninler, C-35/C-37 yağ asitlerinden türetilen C-32/C-34 ve 2-propanol biriminden oluşan bir dizi doğal üründen oluşmaktadır (Alali ve ark., 1999). Asetojeninler yapraklarda, dallarda ve çoğunlukla *Annonaceous* bitkilerinin tohumlarında bulunur ve *A. muricata* en yaygın olarak çalışılan tür olmuştur. Çok çeşitli asetojeninler arasında squamocin ve annonacin böcekler üzerinde en yüksek etkiyi göstermiştir (Colom ve ark., 2008).

2. MELIACEAE

Meliaceae familyası yaklaşık 1400 tür içerir (Tringali, 2001) ve bunlardan bazıları triterpenoid limonoidler içermeleri nedeniyle böcek öldürücü özelliklere sahip olmalarıyla öne çıkar (Akhtar ve ark., 2008). Bu bileşik grubu, çeşitli fitofag böcek türlerinin davranışları ve fizyolojileri üzerindeki yüksek aktiviteleri nedeniyle çok fazla ilgi çekmiştir (López ve ark., 1998). Azadirachtine, *Spodoptera littoralis* Boisd., *Schistocerca gregaria* Dallas ve *S. gregaria* Forskal gibi önemli tarım zararlılarında ölüm, beslenmeyi önleme ve caydırıcılığa neden olarak en iyi sonuçları gösteren bileşiktir (Coria ve ark., 2008). Azadiraktin, neem ağacının (*Azadirachta indica* A. Juss.) kabuğunda, yapraklarında, meyvelerinde ve çoğunlukla tohumlarında bulunabilir. Bu nedenle *Meliaceae* türleri üzerinde yapılan araştırmaların çoğu (Feng ve Isman, 1995; Capataz Tafur ve ark., 2007; Das ve ark., 2008) neem ekstraktlarının böcekler üzerindeki biyolojik aktivitesini test

etmeye odaklanmıştır. Neem tohumu özünde yaklaşık 18 sekonder metabolit tespit edilmiş olup genetik veya çevresel nedenler (Angulo-Escalante ve ark., 2004), meyve gelişim aşaması (Ramos ve ark., 2004) ve hatta tohum depolama süresi (Otero-Colina., 2006) nedeniyle %10 ile %25 arasında değişebilen (Govindachari ve ark., 2000) daha yüksek konsantrasyonlarda azadirachtine bulunmuştur. Azadiraktinin yanı sıra, salanine, melianrol ve nimbina gibi hem tarımsal hem de insan sağlığı açısından önemli olan zararlı böceklerin büyümesini engelleme yeteneklerini kanıtladıkları için en önemlileri olarak kabul edilen başka triterpenoidler de vardır. Bu triterpenoidler neem tohumu ekstresinin toplam biyoaktivitesini oluşturur; ancak biyolojik aktivitenin %72 ile %90'ının ana aktif bileşen olan Azadiraktin den kaynaklandığı düşünülmektedir (Isman, 2006).

3. SOLANACEAE

Solanaceae familyası, çoğunlukla tropikal bölgelerde bulunan yaklaşık 102 cins ve 2460 türden oluşmaktadır. Türlerin %60 ile %70'i patojenlere ve herbivorlara karşı önemli bir rol oynayan alkaloidler üretir. Bu alkaloidler böcekler üzerinde toksik ve yem caydırıcı etkiye sahiptirler (Eich, 2008). Toksik alkaloidlere sahip türler arasında bulunan domatesten (*Lycopersicon esculentum* P. Mill.) ekstrakte edilen Solanin ve Demissin gibi alkaloidlerin *Atta cephalotes* L. üzerinde yem engelleyici aktivite gösterdiği belirlenmiştir (Serna ve Correa, 2003). Ayrıca, Soule ve arkadaşları (1999), *Solanum laxum* Spreng.'den izole edilen steroidal glikozitlerin *Schizaphis graminum* R. yaprak bitlerinin %80'inden fazlasını öldürdüğünü bulmuştur. Yaygın

olarak bilinen botanik insektisitlerden biri, böcekler üzerinde biyoaktiviteye sahip bir alkaloid olan tütünden (*Nicotiana tabacum* L.) elde edilen nikotindir.

Nikotin bitkide serbest olarak bulunmaz; asitlerle birleşerek malat ve sitratları oluşturur (Mareggiani, 2001). Kalıcı olmayan bir kontakt insektisittir ve etki şekli, asetil-kolin (ACH) ile reaksiyona giren post sinaptik membrandaki ACH reseptörü (etki bölgesi) ile birleştiğinde ACH'ı taklit ederek nöromusküler birleşme noktasının geçirgenliğini değiştirir. Nikotin, spazmodik kasılmalara, konvülsiyonlara ve nihayetinde ölüme yol açan yeni sinir uyarılarının oluşmasına neden olmaktadır (Celis ve ark., 2008). Bugüne kadar nikotinoidler olarak bilinen ve nikotin yapısının sentetik kopyaları veya türevleri olan imidaklopid, tiyaklopid, asetamiprid ve tiyametoksan gibi birçok insektisit bulunmaktadır (Tomizawa ve Casida, 2005).

SONUÇ

Tarımda sürdürülebilir büyüme, gelişmekte olan ülkelerin çoğunun artan nüfuslarını idame ettirebilmeleri için hayati önem taşımaktadır. Sentetik bitki koruma kimyasalları zararlıların yeniden ortaya çıkması, hedef dışı organizmalar, sağlık ve çevre üzerindeki etkileri ile ilişkilendirilmektedir. Bu nedenle, daha spesifik ve geniş bir faaliyet yelpazesine sahip güvenli alternatif bitki koruyucuların (insektisitler) geliştirilmesine ihtiyaç vardır. Sentetik insektisitlerin etkileriyle mücadele etmek için yeni etkili insektisidal bileşiklerin tanımlanması esastır. Giderek artan sayıda araştırmacı, bu sorunlardan bazılarını ele

alma çabalarında aktif fitokimyasallar içeren botanikleri yeniden değerlendirmektedir. Sonuç olarak, sürdürülebilir zararlı yönetimde önemli bir rol oynayabilecek geniş spektrumlu toksisiteye sahip çevresel olarak kalıcı kimyasalların yerini alacak daha hedef seçici ve biyolojik olarak parçalanabilen bileşiklere ihtiyaç duyulmaktadır. Multidisipliner nanobiyoteknoloji yaklaşımının kullanılması, uygun dağıtım formülasyonları sağlayarak bitki sekonder metabolitlerinin farklı sürdürülebilir tarım sistemlerine dahil edilmesini kolaylaştırabilir. İnsektisit aktivitesi kanıtlanmış bitki sekonder metabolitlerinin yeni, stabil formülasyonlarının oluşturulması için daha fazla çaba gösterilmelidir. Bitki bazlı insektisitlere yönelik mevzuat ve ruhsatlandırma süreçlerinin gevşetilmesi de botanik insektisitlerin sürdürülebilir bitki korumasına entegrasyonunda ilerleme kaydedilmesini sağlayabilir.

KAYNAKÇA

- Akhtar, Y., Yeoung, Y. R., & Isman, M. B. (2008). Comparative bioactivity of selected extracts from Meliaceae and some commercial botanical insecticides against two noctuid caterpillars, *Trichoplusia ni* and *Pseudaletia unipuncta*. *Phytochemistry reviews*, 7, 77-88.
- Alali, F. Q., Liu, X. X., & McLaughlin, J. L. (1999). Annonaceous acetogenins: recent progress. *Journal of Natural products*, 62(3), 504-540.
- Angulo-Escalante, M. A., Gardea-Béjar, A. A., Vélez-de la Rocha, R., García-Estrada, R. S., Carrillo-Fasio, A., Cháidez-Quiroz, C., & Partida-López, J. I. (2004). Contenido de azadiractina A en semillas de NIM (*Azadirachta indica* A. Juss) colectadas en Sinaloa, México. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 27(4), 305-305.
- Banchio, E., Valladares, G., Defago, M., Palacios, S., & Carpinella, C. (2003). Effects of *Melia azedarach*, (Meliaceae) fruit extracts on the leafminer *Liriomyza huidobrensis*, (Diptera, Agromyzidae): Assessment in laboratory and field experiments. *Annals of Applied Biology*, 143(2), 187-193.
- Capataz Tafur, J., Orozco Sánchez, F., Vergara Ruiz, R., & Hoyos Sánchez, R. (2007). Efecto antialimentario de los extractos de suspensiones celulares de *Azadirachta indica* sobre *Spodoptera frugiperda* JE Smith en condiciones de laboratorio. *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*, 60(1), 3703-3715.
- Cavalcante, G. M., Moreira, A. F. C., & Vasconcelos, S. D. (2006). Potencialidade inseticida de extratos aquosos de essências florestais sobre mosca-branca. *Pesquisa agropecuária brasileira*, 41, 9-14.
- Celis, A., Mendoza, C., Pachón, M., Cardona, J., Delgado, W., Cuca, L. 2008. Extractos vegetales Celis, Álvaro, Mendoza, C., Pachón, M., Cardona, J., Delgado, W. and Cuca, L. E. (2008). Extractos vegetales utilizados como biocontroladores con énfasis en la familia Piperaceae. Una revisión. *Agronomía Colombiana*, 26(1), 97-106.

- Colom, O. A., Barrachina, I., Mingol, I. A., Mas, M. C. G., Sanz, P. M., Neske, A., & Bardon, A. (2008). Toxic effects of annonaceous acetogenins on *Oncopeltus fasciatus*. *Journal of Pest Science*, *81*, 85-89.
- Coria, C., Almiron, W., Valladares, G., Carpinella, C., Ludueña, F., Defago, M., & Palacios, S. (2008). Larvicide and oviposition deterrent effects of fruit and leaf extracts from *Melia azedarach* L. on *Aedes aegypti* (L.)(Diptera: Culicidae). *Bioresource Technology*, *99*(8), 3066-3070.
- Das, B. C., Sarker, P. K., & Rahman, M. M. (2008). Aphidicidal activity of some indigenous plant extracts against bean aphid *Aphis craccivora* Koch (Homoptera: Aphididae). *Journal of Pest Science*, *81*, 153-159.
- Eich, E. (2008). *Solanaceae and Convolvulaceae: Secondary metabolites: Biosynthesis, chemotaxonomy, biological and economic significance (a handbook)*. Springer Science & Business Media.
- Eriksson, C., Månsson, P. E., Sjödin, K., & Schlyter, F. (2008). Antifeedants and feeding stimulants in bark extracts of ten woody non-host species of the pine weevil, *Hylobius abietis*. *Journal of Chemical Ecology*, *34*, 1290-1297.
- Feng, R., & Isman, M. B. (1995). Selection for resistance to azadirachtin in the green peach aphid, *Myzus persicae*. *Experientia*, *51*, 831-833.
- García-Mateos, R., Pérez-Pacheco, R., Rodríguez-Hernández, C., & Soto-Hernández, M. (2004). Toxicidad de alcaloides de *Erythrina americana* en larvas de mosquito *Culex quinquefasciatus*. *Revista Fitotecnia Mexicana*, *27*(4), 297-297.
- Govindachari, T. R., Suresh, G., Geetha Gopalakrishnan, & Wesley, S. D. (2000). Insect antifeedant and growth regulating activities of neem seed oil—the role of major tetranortriterpenoids. *Journal of applied Entomology*, *124*(7-8), 287-291.
- Isman, M. B. (2006). Botanical insecticides, deterrents, and repellents in modern agriculture and an increasingly regulated world. *Annual review of entomology*, *51*(1), 45-66.

- Isman, M. B. (2020). Commercial development of plant essential oils and their constituents as active ingredients in bioinsecticides. *Phytochemistry reviews*, 19, 235-241.
- Koca, S., Yılmaz, A., & Kaçar, G. (2023). Tıbbi ve aromatik bitkilerin insektisit etkisi. In A. Yılmaz & H. Yılmaz (Eds.), *Bitkilerde stres direncini artırma yöntemleri* (pp. 91-115). Adıyaman, Türkiye: İKSAD Publishing House.
- Koul, O. (2004). Biological activity of volatile di-n-propyl disulfide from seeds of neem, *Azadirachta indica* (Meliaceae), to two species of stored grain pests, *Sitophilus oryzae* (L.) and *Tribolium castaneum* (Herbst). *Journal of Economic Entomology*, 97(3), 1142-1147.
- López-Olguín, J. F., De la Torre, M. C., Viñuela, E., & Castañera, P. (1998). Actividad de extractos de semillas de *Trichilia havanensis* Jacq., sobre larvas de *Helicoverpa armigera* (Hübner). *Boletín de Sanidad Vegetal. Plagas*, 24(3), 629-636.
- Mareggiani, G. (2001). Manejo de insectos plaga mediante sustancias semioquímicas de origen vegetal. *Manejo Integrado de Plagas*. 60: 22-30.
- Montoya, J. O., Giraldo, A. S., & de Sousa, A. H. (2006). Efecto de repelencia de *Crotalaria juncea*, *Galactia striata* y *Cymbopogon nardus* para el manejo de *Cyrtomenus bergi* (Hemiptera: Cydnidae). *Revista de Biología e Ciencias Da Terra*, 6(2), 179-185.
- Nauen, R. (2007). Insecticide resistance in disease vectors of public health importance. *Pest Management Science: formerly Pesticide Science*, 63(7), 628-633.
- Nutrition, R. (2004). Graviola Monograph. [www: raintree. com/Graviola-Monograph. pdf](http://www.raintree.com/Graviola-Monograph.pdf). *Diakses tanggal*, 9.
- Ocampo, D., & Ocampo, R. (2006). Bioactividad de la familia Annonaceae. *Revista Universidad de Caldas*, 26(1/2), 135-155.
- Otero-Colina, G. (2006). Toxicidad y repelencia de *Azadirachta indica* contra *Varroa destructor* (Acari: Varroidae). *Agrociencia*, 40(6), 741-751..
- Peterson, C., & Coats, J. (2001). Insect repellents-past, present and future. *Pesticide Outlook*, 12(4), 154-158.

- Phillips, T. W., & Throne, J. E. (2010). Biorational approaches to managing stored-product insects. *Annual review of entomology*, 55(1), 375-397.
- Scharf, M. B., Baumann, M., & Berkowitz, D. V. (2003). The effects of sodium oxybate on clinical symptoms and sleep patterns in patients with fibromyalgia. *The Journal of Rheumatology*, 30(5), 1070-1074.
- Serna, F. J., & Correa, J. A. (2003). Extractos de hojas de tomate *Lycopersicon esculentum* como fagoinhibidores de *Atta cephalotes*. *Agronomía Colombiana*, 21(3), 142-153.
- Singh, P., & Pandey, A. K. (2018). Prospective of essential oils of the genus *Mentha* as biopesticides: A review. *Frontiers in plant science*, 9, 1295.
- Tomizawa, M., & Casida, J. E. (2005). Neonicotinoid insecticide toxicology: mechanisms of selective action. *Annu. Rev. Pharmacol. Toxicol.*, 45(1), 247-268.
- Tringali, C. (Ed.). (2001). *Bioactive Compounds from Natural Sources: Isolation, Characterization and Biological Properties* (1st ed.). CRC Press.
- Viglianco, A. I., Novo, R. J., Cragnolini, C. I., & Nassetta, M. (2006). Actividad biológica de extractos crudos de *Larrea divaricata* Cav. y *Capparis atamisquea* Kuntze sobre *Sitophilus oryzae* (L.). *Agriscientia*, 23(2), 83-89.
- Wheeler, D. A., & Isman, M. B. (2001). Antifeedant and toxic activity of *Trichilia americana* extract against the larvae of *Spodoptera litura*. *Entomologia Experimentalis et Applicata*, 98(1), 9-16.
- Zaynab, M., Fatima, M., Abbas, S., Sharif, Y., Umair, M., Zafar, M. H., & Bahadar, K. (2018). Role of secondary metabolites in plant defense against pathogens. *Microbial pathogenesis*, 124, 198-202.
- Zhang, S., Zhu, W., Wang, B., Tang, J., & Chen, X. (2011). Secondary metabolites from the invasive *Solidago canadensis* L. accumulation in soil and contribution to inhibition of soil pathogen *Pythium ultimum*. *Applied Soil Ecology*, 48(3), 280-286.

BÖLÜM 8

BİTKİ TRANSPOSABLE ELEMENTLERİNİN EPIGENİK İLE İLİŞKİSİ

Araş. Gör. Leyla KURGAN^{1*}
Dr. Öğr. Üyesi Fatih DEMİREL²
Doç. Dr. Adnan AYDIN³

DOI: <https://dx.doi.org/10.5281/zenodo.14541800>

^{1*} Iğdır Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Tarımsal Biyoteknoloji Bölümü, Iğdır, Türkiye.

*leyla.kurgan@igdir.edu.tr

² Iğdır Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Tarımsal Biyoteknoloji Bölümü, Iğdır, Türkiye.
drfdemirel@gmail.com

³ Iğdır Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Tarımsal Biyoteknoloji Bölümü, Iğdır, Türkiye.
adnan.aydin@igdir.edu.tr

GİRİŞ

Transpozonlar, ilk kez Barbara McClintock tarafından 1948’de mısır bitkisi üzerinde keşfedilmiştir. Bu genetik elementler, kromozomlar arasında hareket edebilme yeteneği olan DNA segmentleridir. Bitki genomlarının büyük bir bölümünü oluşturan transpozonlar, genetik çeşitliliğe katkıda bulunur ve bitki evriminde önemli bir rol oynar. Transpozonlar DNA transpozonları ve retrotranspozonlar olarak iki ana kategoriye ayrılır. Epigenetik mekanizmalar, transpozonların kontrol edilmesinde önemli bir rol oynar ve bu mekanizmalar, genetik çeşitliliğin dengelenmesine yardımcı olur. DNA transpozonları “kes-yapıştır” mekanizmasıyla hareket ederken, retrotranspozonlar RNA aracılığıyla kopyalanarak yeni yerlerde genomda tekrar eklenir. Retrotranspozonlar LTR ve Non-LTR olmak üzere iki gruba ayrılır. LTR retrotranspozonları özellikle bitki genomlarında yaygındır ve genom yapısının şekillenmesinde önemli roller oynar. Epigenetik mekanizmalar, transpozonları düzenleyerek kontrolsüz çoğalmalarını engeller. DNA metilasyonu ve histon modifikasyonları gibi epigenetik mekanizmalar, transpozonların susturulmasına yardımcı olur. Ayrıca siRNA ve miRNA gibi küçük RNA’lar da bu süreçte önemli bir rol oynar. Transpozonlar, bitki genomlarının yapısında ve evriminde önemli bir rol oynayan genetik elementlerdir. Epigenetik mekanizmalar transpozonların hareketliliğini kontrol ederek genomik dengeyi sağlar. Transpozonlar, tarım ve biyoteknolojide genetik çeşitliliği artırmak ve bitki ıslahında yenilikler sunmak açısından büyük potansiyele sahiptir. Gelecek araştırmalar, bu elementlerin düzenlenmesi ve genom evrimi

üzerindeki etkileri konusunda daha fazla bilgi sağlayarak bitki ıslahında yeni stratejiler geliştirilmesine katkıda bulunacaktır.

Transpozonlar ilk kez Barbara McClintock tarafından 1948'de mısır bitkisi (*Zea mays*) üzerinde yapılan çalışmalar esnasında keşfedilmiştir. McClintock, mısırın renkli tanelerinin kalıtımı ile ilgili çalışması esnasında bazı genetik elementlerin kromozomlar arasında hareket ettiğini gözlemlemiştir. Bu hareketli elementlerin genlerin aktivitesini değiştirdiğini fark etmiş ve bu elementlere “kontrol birimleri” adını vermiştir. Daha sonra bu elementler, transpozonlar olarak adlandırılmıştır (McClintock, 1950). Transposable elementler (TE'ler), bitki genomlarında kendi kendilerini kopyalayarak veya taşıyarak bir yerden başka bir yere hareket edebilen DNA segmentleridir. Bu elementler, bitki genomlarının önemli bir kısmını oluşturur ve genetik çeşitliliğe katkıda bulunurlar. Bitki hücrelerinde transposable elementler, genlerin düzenlenmesinde ve genom evriminde kritik rol oynar. TE'ler, DNA transpozonları ve retrotranspozonlar olmak üzere iki ana kategoriye ayrılır. DNA transpozonları, kesilip yapıştırma mekanizması ile hareket ederken, retrotranspozonlar RNA aracılığıyla kopyalanarak genomda yeni yerlere eklenir (Kidwell ve Lisch, 2001). TE'ler, bitki genomlarının yapısına, işlevine ve evrimine önemli katkılarda bulunur (Bennetzen ve Wang, 2014). Bitki hücrelerinde TE'lerin düzenlenmesi ve kontrolü, epigenetik mekanizmalarla sıkı bir şekilde denetlenir. Bu mekanizmalar arasında DNA metilasyonu, RNA aracılı susturma yolları ve histon modifikasyonları bulunur. Bu

d¼zenleme mekanizmaları, TE'lerin kontrols¼z çoğalmasını engelleyerek genom b¼t¼nl¼đ¼n¼ korur (Fedoroff, 2012).

1. TRANSPOSABLE ELEMENTLERİN SINIFLANDIRILMASI

1.1. DNA Transpozonları

Genellikle "kes-yapıştır" transpozonları olarak adlandırılan DNA transpozonları, bir DNA ara maddesi kullanarak doğrudan bir genomik konumdan diğerine hareket eder. S¼re, transpozonun uçlarındaki spesifik dizileri tanıyan, onu çıkaran ve genom içindeki yeni bir bölgeye yerleştiren transpozaz enzimi tarafından kolaylaştırılır. Retrotranspozonların aksine, DNA transpozonları transpozisyon sırasında kopya sayılarını artırmazlar, bu da hareketlerini daha korunaklı hale getirir (Fedoroff, 2012). DNA transpozonları genom yapısı ¼zerinde önemli etkilere sahip olabilir, özellikle de gen açısından zengin bölgelere eklendiklerinde, potansiyel olarak gen işlevini bozabilir veya d¼zenleyici unsurları değiştirebilirler (Hassan ve ark., 2024).

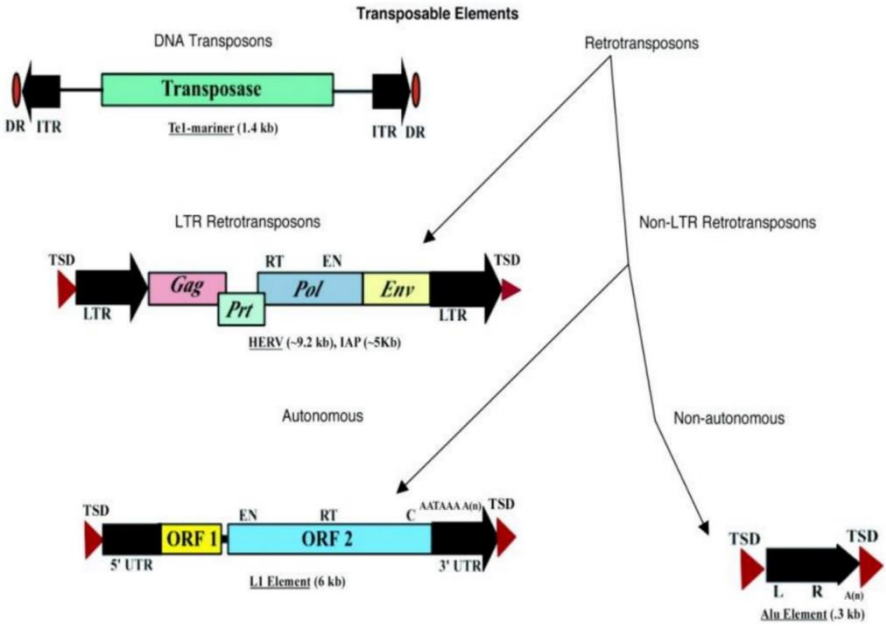
1.2. Retrotranspozonlar

Retrotranspozonlar, DNA transpozonlarının aksine, bir RNA ara maddesi aracılığıyla hareket eder. Bu RNA retrotranspozondan kopyalanır, ters transkriptaz enzimi tarafından DNA'ya ters kopyalanır ve daha sonra yeni bir konumda genoma geri entegre edilir. Retrotranspozonlar ayrıca iki ana t¼re ayrılabilir: Uzun Terminal Tekrarlı (LTR) retrotranspozonlar ve Non-LTR retrotranspozonlar (Wicker ve ark., 2007). Bu elementler özellikle bitki genomlarında bol

miktarda bulunur ve replikatif transpozisyon mekanizmaları yoluyla genom genişlemesini sağlayabilir (Orozco-Arias ve ark., 2019).

LTR Retrotranspozonları

LTR retrotranspozonları, uçlarında uzun terminal tekrarların varlığı ile karakterize edilir. Bu elementler, toplam DNA'nın önemli bir bölümünü oluşturabildikleri birçok bitki genomunda oldukça yaygındır. LTR retrotranspozonlarının genom yapısını şekillendirmede ve gen ifadesini düzenlemede önemli roller oynadığı bilinmektedir. Örneğin, mısırdaki LTR retrotranspozonları genomun yaklaşık %50'sini oluşturur ve aktiviteleri stres tepkileri ve gelişimde yer alan genlerin düzenlenmesiyle ilişkilendirilmiştir (SanMiguel ve Bennetzen, 1998).



Şekil 1. Transposons: The Jumping Genes (Pray, 2008)

2. BİTKİLERDE TRANSPOSABLE ELEMENTLERİN DAĞILIMI

2.1. Model Bitkilerdeki Dağılım

Arabidopsis thaliana, *Zea mays*, *Oryza sativa*, *Brachypodium distachyon*, *Medicago truncatula* ve *Populus trichocarpa* gibi model bitkilerde TE'lerin dağılımı kapsamlı bir Şekilde incelenmiştir. *Arabidopsis*'te TE'ler genom boyunca, genellikle gen ifadesini etkileyebilecekleri ve genom evrimine katkıda bulunabilecekleri y¼ksek gen yoğunluğu b¼lgelerinde bulunur (Bennetzen, 2000). Mısırdada (*Zea mays*), TE'ler genomun ¼nemli bir b¼l¼m¼n¼ oluşturur ve transpozon aktivitesinin dinamik doğasını ve bitki evrimi ¼zerindeki etkisini yansıtır (Galindo-Gonzalez ve ark., 2017). Pirinç (*Oryza sativa*), ¼zellikle tarımsal ¼nemi ve genom b¼y¼kl¼đ¼n¼n nispeten k¼¼¼k olması nedeniyle TE ¼alıŐmaları i¼in sıkça kullanılmaktadır. Pirinç genomunda y¼ksek sayıda LTR retrotranspozon bulunmuştur ve bu TE'ler, gen ifadesini ve ¼evresel strese tepkileri etkileyebilecek Şekilde d¼zenleyici b¼lgelerde yođunlaŐmıŐtur (Kumar ve Bennetzen, 1999). ¼im bitkileri ve biyoyakıt araŐtırmalarında model olarak kullanılan *Brachypodium distachyon* bitkisinde yapılan transposable element (TE) analizleri, genomun b¼y¼k ¼l¼¼de retrotranspozonlarla dolu olduğunu ve bu elementlerin genom boyutunun geniŐlemesinde ¼nemli bir rol oynadığını ortaya koymuştur. ¼zellikle LTR retrotranspozonlarının genetik ¼eŐitliliđe katkıda bulunduğu belirlenmiştir. *Arabidopsis* gibi model bitkilerle karşılaştırıldığında, *Brachypodium*'un TE'leri genomun daha geniş b¼lgelerine yayılmıŐ, *Arabidopsis*'te ise genellikle heterokromatik b¼lgelerde sınırlı kalmıŐtur

(The International Brachypodium Initiative, 2010). *Medicago*'da yapılan çalışmalar, TE'lerin gen bölgelerine daha yakın konumlandığını ve baklagil spesifik genlerin düzenlenmesinde rol oynadığını göstermiştir (Yu ve ark., 2022). *Populus* ise TE'lerin biyotik ve abiyotik streslere yanıt olarak nasıl aktive olduklarını anlamak için bir model olarak kullanılmıştır (Peña-Ponton ve ark., 2024; Sun ve ark., 2024).

2.2. Bitki Türleri Arasında Karşılaştırma

Transpozonların (TE) bolluğu ve dağılımı, farklı bitki türleri arasında önemli ölçüde değişiklik göstermekte olup, bu varyasyon her türün evrimsel geçmişini ve çevresel baskılara karşı adaptif tepkilerini yansıtmaktadır. Mısır (*Zea mays*) ve buğday (*Triticum aestivum*) gibi daha büyük genomlara sahip türler, genom boyutunun genişlemesine katkıda bulunan daha yüksek TE oranlarına sahiptir (Wessler, 2006). Buğday, geniş bir LTR retrotranspozon yelpazesine sahiptir ve genomunun büyük bir kısmı TE'lerle kaplıdır. Poliploid bir tür olan buğdayda TE'ler, genom kararlılığı ve evrimsel adaptasyon süreçleri açısından incelenmiş olup, *Arabidopsis* gibi diploid türlere kıyasla oldukça dikkat çekici bir farklılık göstermektedir (Wicker ve ark., 2018). Pirinç (*Oryza sativa*) ve *Arabidopsis* (*Arabidopsis thaliana*) gibi model bitkiler karşılaştırıldığında ise, pirinçte TE yoğunluğunun daha yüksek olduğu ve bunun daha kompakt bir genom yapısına katkı sağladığı görülmüştür (Bureau, 1996). Soya fasulyesi (*Glycine max*) ise hem DNA transpozonları hem de retrotranspozonlar açısından zengin bir genom yapısına sahip olup, bu elementler genlerin çevresinde

yoğunlaşarak bitkinin büyüme ve gelişim süreçlerini etkileyebilmektedir (Schmutz ve ark., 2010). Patates (*Solanum tuberosum*) ise genomunda bol miktarda TE barındıran bir diğer bitkidir. Özellikle stres koşullarında TE'lerin aktif hale gelerek adaptasyona katkıda bulunduğu ve çevresel uyum kapasitesini artırdığı bilinmektedir (Shi ve ark., 2022; Zavallo ve ark., 2020). Karşılaştırmalı genomik çalışmalar, TE içeriğinin yalnızca türler arasında değil, türlerin içinde de çevresel koşullara ve evrimsel baskılara bağlı olarak değişebileceğini göstermiştir. Bu bulgular, TE'lerin genom yapısını, genetik çeşitliliği ve çevresel adaptasyonu şekillendiren önemli unsurlar olduğunu ortaya koymaktadır.

3. TRANSPOSABLE ELEMANLARIN MEKANİZMALARI

3.1. Aktarım Mekanizmaları

TE'lerin transpozisyon mekanizmaları oldukça çeşitlidir ve elementin bir DNA transpozonu mu yoksa bir retrotranspozon mu olduğuna bağlıdır. DNA transpozonları tipik olarak transpozaz enziminin transpozonu bir genomik konumdan çıkarıp başka bir konuma yerleştirdiği bir "kes-yapıştır" mekanizması ile hareket eder. Öte yandan retrotranspozonlar, bir RNA ara maddesinin DNA'ya ters kopyalandığı ve genomda yeni bir bölgeye entegre edildiği bir "kopyala ve yapıştır" mekanizması yoluyla hareket eder. Bu farklı mekanizmalar genom yapısı ve işlevi üzerinde farklı etkilere neden olurken, retrotranspozonlar replikatif doğaları nedeniyle genellikle daha fazla genom genişlemesine yol açmaktadır (Curcio ve Derbyshire, 2003).

3.2. Enzimatik Süreçler

TE'lerin hareketi, transpozisyonlarını kolaylaştıran spesifik enzimlere dayanır. DNA transpozonları için, transpozaz enzimi transpozonun çıkarılması ve yeniden entegre edilmesi için gereklidir. Retrotranspozonlar için, RNA ara ürününü tekrar DNA'ya dönüştürmek için ters transkriptaz gereklidir, integraz ise genoma yerleştirilmesini kolaylaştırır. Bu enzimler oldukça spesifiktir ve TE aktivitesinin düzenlenmesinde çok önemli roller oynarlar. Son çalışmalar, bu enzimlerin sadece TE hareketliliğinde değil, aynı zamanda gen ifadesi ve genom stabilitesinin düzenlenmesindeki önemini de vurgulamıştır (Curcio ve Derbyshire, 2003).

4. TRANSPOSABLE ELEMENTLERİN GENOMİK ETKİSİ

4.1. Gen İfadesi Üzerindeki Etkisi

TE'ler, genlerin yakınına veya içine yerleşerek, işlevlerini bozarak veya ifade şekillerini değiştirerek gen ifadesi üzerinde derin etkilere sahip olabilir. Bazı durumlarda TE'ler, yakındaki genlerin aktivitesini modüle eden düzenleyici unsurlar olarak hareket edebilirler (Lisch, 2013). Örneğin, bir TE'nin bir genin promotör bölgesine eklenmesi, transkripsiyonunu artırabilir veya baskılayabilir, bu da fenotipik özelliklerde değişikliklere yol açabilir. Gen ifadesini etkileme yeteneği, TE'leri genomik aktivitenin düzenlenmesinde ve yeni özelliklerin evriminde önemli oyuncular haline getirmektedir (Deneweth ve ark., 2022). Pirinç ve mısırdaki yapılan çalışmalar, TE eklemelerinin hastalık direnci ve stres toleransı gibi önemli agronomik özelliklerin gelişmesine yol açabileceğini göstermiştir (Makarevitch ve ark., 2015).

4.2. Genom Büyüklüğü ve Yapısına Katkı

TE'ler, özellikle bitkilerde genom boyutuna önemli katkıda bulunurlar. Özellikle retrotranspozonların çoğalması, mısır ve buğday gibi türlerde görüldüğü gibi genom boyutunda önemli artışlara yol açabilir. Bu genişlemenin hem olumlu hem de olumsuz etkileri olabilir; evrim için hammadde sağlarken aynı zamanda daha büyük bir genomu korumanın yükünü de artırır (SanMiguel ve Bennetzen, 1998). TE'lerin varlığı genomda delesyonlar, duplikasyonlar ve inversiyonlar gibi yapısal varyasyonlara da yol açabilir, bu da genetik çeşitliliğe ve evrimsel yeniliğe daha fazla katkıda bulunabilir (Hassan ve ark., 2024).

4.3. Mutasyon ve Çeşitlilik Potansiyeli

TE'lerin yeni genomik konumlara eklenmesi mutasyonlara neden olarak genetik çeşitliliğe yol açabilir. Bu mutajenik potansiyel, popülasyonların değişen ortamlara uyum sağlamasına olanak tanıyan evrimde itici bir güçtür (Feschotte ve ark., 2002). Bununla birlikte, kontrolsüz TE aktivitesi de genomik istikrarsızlığa ve zararlı mutasyonlara yol açarak sıkı düzenleme ihtiyacını vurgulayabilir. TE'lerin genetik çeşitlilik yaratmadaki rolü hem doğal popülasyonlarda hem de TE kaynaklı mutasyonların arzu edilen özelliklere sahip yeni bitki çeşitleri yaratmak için kullanıldığı ıslah programlarında iyi bir şekilde belgelenmiştir (Hassan ve ark., 2024).

5. BİTKİLERDE TRANSPOSABLE ELEMANLARIN DÜZENLENMESİ

5.1. Epigenetik Mekanizmalar

DNA metilasyonu ve histon modifikasyonu gibi epigenetik mekanizmalar, TE'lerin aktivitesinin düzenlenmesinde çok önemli bir rol oynar. DNA metilasyonu tipik olarak CpG dinükleotidleri içindeki sitozin kalıntılarında meydana gelir ve TE ile ilgili dizilerin transkripsiyonunu önleyerek TE aktivitesinin baskılanmasına yol açar. Histon H3 lizin 9 metilasyonu (H3K9me2) gibi histon modifikasyonları da TE'leri susturan baskılayıcı kromatin yapılarının oluşumuna katkıda bulunur (Slotkin ve Martienssen, 2007). Bu mekanizmalar, TE'lerin genom içindeki kontrolsüz hareketini önleyerek genomik stabiliteyi korumak için gereklidir. Farklı epigenetik işaretler arasındaki etkileşim ve bunların TE düzenlemesi üzerindeki etkisi, çevresel faktörlerin epigenetik durumları ve dolayısıyla TE aktivitesini etkileyebileceğini gösteren çalışmalarla birlikte önemli bir araştırma alanı haline gelmiştir (Zhao ve ark., 2022).

siRNA ve miRNA Aracılı Düzenleme

siRNA'lar (küçük interfering RNA'lar) ve miRNA'lar (mikroRNA'lar) dahil olmak üzere küçük RNA'lar, TE'lerin transkripsiyon sonrası düzenlenmesinde rol oynar. Bu küçük RNA'lar TE dizilerinden üretilir ve RNA ile indüklenen susturma kompleksini (RISC) TE transkriptlerini bozulma veya translasyonel baskı için hedeflemeye yönlendirir. Bu RNA tabanlı susturma yolu, özellikle aktif TE'lerin zararlı mutasyonlara yol açabileceği germ hattında TE aktivitesini

kontrol etmek için çok önemlidir (Voinnet, 2009). Araştırmalar, siRNA'ların ve miRNA'ların üretiminin bitkinin gelişim aşaması ve çevresel koşullar tarafından sıkı bir şekilde düzenlendiğini ve TE aktivitesi ile bitkinin fizyolojik durumu arasında karmaşık bir etkileşim olduğunu göstermiştir (Tiwari ve Rajam, 2022)

DNA Metilasyonu ve Histon Modifikasyonları

DNA metilasyonu ve histon modifikasyonları TE susturmasını oluşturmak ve sürdürmek için birlikte çalışır. TE DNA'sının DNA metiltransferazlar (MET1 gibi) tarafından metilasyonu, yakındaki histonlara H3K9me2 gibi baskılayıcı işaretler ekleyen histon değiştirici enzimlerin işe alınmasına yol açar. Bu modifikasyonlar, transkripsiyonel makine tarafından erişilemeyen kompakt bir kromatin yapısı oluşturarak TE'yi etkili bir şekilde susturur (Mirouze ve Vitte, 2014). Bu epigenetik kontrol dinamikdir, TE'ler gelişimsel ipuçlarına veya çevresel streslere yanıt olarak yeniden etkinleştirilir veya yeniden susturulur. Çalışmalar ayrıca TE'lerin düzenlenmesinde histon varyantlarının ve kromatin yeniden şekillendiricilerinin rolünü vurgulamış ve epigenetik kontrollerine başka bir karmaşıklık katmanı eklemiştir (Lämke ve Bäurle, 2017).

5.2. Retrotransposable Elementler ve Epigenetik ile İlişkileri

Retrotranspozonlar, özellikle de LTR-retrotranspozonlar, genom içinde kontrolsüz çoğalmalarını önlemek için epigenetik mekanizmalar tarafından sıkı bir şekilde düzenlenir. DNA metilasyonu, retrotranspozonları susturmak için birincil mekanizmadır ve metilasyon

modelleri erken gelişim sırasında oluşturulur ve organizmanın yaşamı boyunca korunur. DNA metilasyonuna ek olarak, histon modifikasyonları ve spesifik transkripsiyonel baskılayıcıların bağlanması retrotranspozonların epigenetik susturulmasına katkıda bulunur (Kim ve Zilberman, 2014). Retrotranspozonlar ve bitkinin epigenetik mekanizması arasındaki etkileşim karmaşıktır, son çalışmalar retrotranspozonların yakındaki genlerin epigenetik manzarasını etkileyebileceğini ve gen ifadesinde ve fenotipik varyasyonda değişikliklere yol açabileceğini göstermektedir (Wei ve Cao, 2016; Song ve Cao, 2017; Papolu ve ark., 2022; Yang ve ark., 2023).

5.3. Retrotransposable Elementler ve Epigenetik Susturma

Epigenetik susturma, kontrolsüz aktivasyonları genomik kararsızlığa ve zararlı mutasyonlara yol açabileceğinden, retrotranspozonların inaktivitesini korumak için gereklidir. Küçük RNA'lar, özellikle de siRNA'lar, epigenetik mekanizmayı retrotranspozon dizilerine yönlendirmede, DNA metilasyonu ve histon modifikasyonları yoluyla susturulmalarını sağlamada kilit bir rol oynar (Lippman ve Martienssen, 2004). Bazı durumlarda, çevresel stresler veya gelişimsel sinyaller retrotranspozonların kısmi reaktivasyonuna yol açarak epigenetik düzenlemenin dinamik doğasını vurgulayabilir. Bu reaktivasyonun genom stabilitesi ve gen ifadesi üzerinde önemli sonuçları olabilir, bu da retrotranspozon susturma çalışmasını bitki biyolojisinde kritik bir araştırma alanı haline getirir (Voronova ve ark., 2014; Ito, 2022; Arnholdt-Schmitt, 2024).

5.4. LTR-Retrotranspozonlar Elementler ve Epigenetik İlişkisi

LTR-retrotranspozonlar, transpoze olma ve genomik bütünlüğü koruma yeteneklerini düzenleyen sıkı epigenetik kontrole tabidir. LTR-retrotranspozonların epigenetik düzenlemesi, DNA metilasyonu, histon modifikasyonları ve RNA tabanlı susturma mekanizmaları dahil olmak üzere çoklu kontrol katmanlarını içerir. Bu elementler genellikle DNA metiltransferazları LTR dizilerine yönlendirmek için siRNA'ları kullanan ve susturulmalarını sağlayan RNA yönlendirmeli DNA metilasyon (RdDM) yolu tarafından hedeflenir (Havecker ve ark., 2004). Bu epigenetik kontrol, LTR-retrotranspozon aktivasyonunun genom kararsızlığı ve yakın gen fonksiyonunun bozulmasını içerebilen zararlı etkilerini önlemek için gereklidir. LTR-retrotranspozonların ve epigenetik düzenlemelerinin incelenmesi, bitkilerdeki epigenetik kontrolün daha geniş mekanizmaları hakkında değerli bilgiler sağlamıştır (Wambui Mbichi ve ark., 2020; Yang ve ark., 2023; Ramakrishnan ve ark., 2023).

6. TRANSPOSABLE ELEMENTLERİN EVRİMSEL ROLÜ

6.1. Evrimsel Çeşitlilik ve Adaptasyona Katkı

TE'ler, yeni genomik konumlara yerleştirilmeleri yoluyla genetik çeşitlilik getirerek evrimsel çeşitliliğe katkıda bulunur. Bu varyasyon doğal seçim için hammadde sağlayarak popülasyonların değişen ortamlara uyum sağlamasına olanak tanıyabilir. Bazı durumlarda, TE'ler gen ifade kalıplarını değiştiren ve yeni özelliklerin evrimini yönlendiren arttırıcılar veya destekleyiciler gibi yeni düzenleyici

unsurlar oluşturabilir (Kazazian, 2004). TE'lerin genom yapısını ve işlevini etkileme yeteneği, onları evrimsel değişimin güçlü ajanları haline getirir. Örneğin, bazı bitki türlerinin genomlarında gözlemlenen TE aktivitesi patlaması, hızlı çevresel değişim dönemleriyle ilişkilendirilmiştir; bu da TE'lerin yeni koşullara adaptasyonu kolaylaştırmada rol oynayabileceğini düşündürmektedir (Wicker ve ark., 2018; Liu ve A. El-Kassaby, 2019; Oggenfuss ve Croll, 2023; Hassan ve ark., 2024).

6.2. Transposable Elementlerin Varlığı ve Dağılımı

TE'lerin varlığı ve dağılımı, bitki türleri arasındaki evrimsel ilişkilerin izini sürmek için kullanılabilir. TE'ler, farklı türlerin ortak evrimsel geçmişini yansıtan ekleme modelleriyle moleküler belirteçler olarak hareket edebilir. Karşılaştırmalı genomik çalışmalar, yakın akraba türlerin genellikle benzer TE manzaralarını paylaştığını, daha uzak akraba türlerin ise farklı TE profilleri sergilediğini göstermiştir (El Baidouri ve Panaud, 2013). Bu bilgi, filogenetik ilişkileri ortaya çıkarmak ve bitki soylarının evrimsel geçmişini yeniden yapılandırmak için kullanılabilir. TE'lerin filogenetik belirteçler olarak kullanılması, bitki sistematğinde önemli bir araç haline gelmiştir ve türlerin farklılaşma zamanlaması ve kalıpları hakkında içgörüler sağlamaktadır (Feschotte ve ark., 2002; Jurka ve ark., 2011; Ågren ve ark., 2014; Roy ve ark., 2015; Hassan ve ark., 2024).

7. MODERN TEKNOLOJİLER VE ARAŞTIRMA YAKLAŞIMLARI

7.1. Transposable Elementlerin Tespiti ve Analizi

Genomik ve biyoinformatik alanındaki gelişmeler TE'leri tespit ve analiz etme becerimizi büyük ölçüde geliştirmiştir. Yüksek verimli dizileme teknolojileri, TE'lerin genomlar içinde kapsamlı bir şekilde haritalanmasına olanak tanırken, biyoinformatik araçlar TE dizilerinin tanımlanmasını ve sınıflandırılmasını sağlar (Feschotte ve Pritham, 2007). Bu yaklaşımlar TE'lerin bitki genomlarındaki dağılımı, çeşitliliği ve etkisi hakkında değerli bilgiler sağlamaktadır. TE ek açıklamaları için özel veri tabanlarının ve yazılımların geliştirilmesi, bu elementlerin incelenmesini daha da kolaylaştırmış ve araştırmacıların genom evrimi ve işlevindeki rollerini keşfetmelerini sağlamıştır (Bergman ve Quesneville, 2007; Debladis ve ark., 2017; Arkhipova, 2017).

7.2. Genom Dizileme ve Biyoinformatik Yaklaşımlar

Yüksek verimli genom dizileme ve biyoinformatik, TE konumlarının belirlenmesinde ve genom işlevi üzerindeki etkilerinin anlaşılmasında kilit araçlardır. Birden fazla bitki türü için referans genomların bulunması, farklı türler arasında TE içeriğinin karşılaştırmalı analizlerinin yapılmasını mümkün kılmış ve TE'lerin genom evrimindeki rolüne ışık tutmuştur (Bourque ve ark., 2018). Bu teknolojiler aynı zamanda genetik çeşitliliğe katkıda bulunan eklemeler, silmeler ve duplikasyonlar gibi TE kaynaklı yapısal varyasyonların tanımlanmasını da sağlar. TE verilerinin gen ifadesi ve

epigenetik işaretler gibi diğer genomik özelliklerle entegrasyonu, TE'lerin bitki genomlarını nasıl etkilediğinin daha kapsamlı bir şekilde anlaşılmasını sağlamıştır (Galindo-González ve ark., 2018; Deneweth ve ark., 2022).

7.3. CRISPR-Cas Sistemleri ve İşlevsel Analiz

CRISPR-Cas sistemleri, genomda hassas değişikliklere izin vererek TE'lerin işlevini incelemek için giderek daha fazla kullanılmaktadır. Araştırmacılar, belirli TE dizilerini hedefleyerek, TE ekleme veya silmenin gen ifadesi ve genom stabilitesi üzerindeki etkilerini araştırabilirler (Hsu ve ark., 2014). Bu teknoloji aynı zamanda TE kodlu proteinlerin ve bunların transpozisyon ve genom düzenlemesindeki rollerinin araştırılmasına da olanak sağlamaktadır. CRISPR-Cas sistemleri, TE biyolojisi ve bunun bitki genetiği ve ıslahı üzerindeki etkileri konusundaki anlayışımızı ilerletmek için büyük umut vaat etmektedir. Son çalışmalar CRISPR-Cas'ın sadece TE aktivitesini bozmakla kalmayıp aynı zamanda hedeflenen genom mühendisliği için TE'lerden yararlanma potansiyelini göstermiş ve ürünün iyileştirilmesi için yeni fırsatlar sunmuştur (Wada ve ark., 2020; Ahmad, 2023; Guo ve ark., 2024).

8. TRANSPOSABLE ELEMENTLERİN TARIM VE BİYOTEKNOLOJİDEKİ UYGULAMALARI

8.1. Genetik Modifikasyon ve Bitki Islahı

TE'ler, faydalı özellikler kazandırmak ve ürün çeşitlerini geliştirmek için bitki ıslahında ve genetik modifikasyonda kullanılmıştır.

Yetiştiriciler, TE'leri genom içinde harekete geçirerek hastalık direnci, stres toleransı ve verim gibi özellikleri geliştiren yeni genetik kombinasyonlar oluşturabilir. Ayrıca, TE'ler gen etiketleme ve fonksiyonel genomik çalışmalar için araç olarak kullanılabilir ve önemli tarımsal özelliklerle ilişkili genlerin tanımlanmasını sağlar. TE'lerin bitki ıslahında uygulanması, ticari açıdan önemli birkaç ürün çeşidinin geliştirilmesine yol açarak tarımdaki değerlerini vurgulamıştır (Roy ve ark., 2015; Quesneville, 2020; Kirov, 2023).

8.2. Transposable Elementler Kullanılarak Yeni Bitki Çeşitlerinin Geliştirilmesi

TE'lerin bitki ıslahı programlarında kontrollü kullanımı, gelişmiş özelliklere sahip yeni bitki çeşitlerinin geliştirilmesine yol açarak tarımsal yeniliğe katkıda bulunmuştur. Örneğin, TE'ler çiçeklenme zamanı, meyve olgunlaşması ve abiyotik stres tepkileri ile ilgili olanlar gibi önemli genlerin yeni alellerini oluşturmak için kullanılmıştır (Heslop-Harrison ve Schwarzacher, 2011). Bu yeni çeşitler, çeşitli çevresel koşullar altında gelişmiş performans sunarak onları sürdürülebilir tarım için değerli kaynaklar haline getirmektedir. Hedeflenen özelliklerin iyileştirilmesi için TE aktivitesinden yararlanma yeteneği, gıda güvenliği ve iklim değişikliği gibi küresel zorlukları ele alma potansiyeli ile bitki ıslahında önemli bir ilerlemeyi temsil etmektedir (Springer, 2013; Mhiri ve ark., 2022; Dayi, 2024)

SONUÇ

TE'leri anlamamızdaki önemli ilerlemelere rağmen, özellikle TE'lerin düzenlenmesi ve genom evrimi üzerindeki uzun vadeli etkileri ile ilgili bilgilerimizde birçok boşluk bulunmaktadır. Gelecekteki araştırmalar, TE düzenlemesinde epigenetiğin rolü ve TE kaynaklı mutasyonların sonuçları da dahil olmak üzere TE'ler ve konak genomu arasındaki karmaşık etkileşimleri aydınlatmaya odaklanmalıdır. Bu etkileşimleri anlamak, bitki genomlarının evrimsel yörüngelerini tahmin etmek ve ürün iyileştirme için TE'lerden yararlanmak üzere yeni stratejiler geliştirmek için kritik öneme sahip olacaktır.

TE'ler tarım ve biyoteknolojide büyük bir potansiyele sahiptir ve ürün geliştirme ve genetik yenilik için yeni yollar sunar. TE aktivitesini kontrol etme ve hedeflenen genom modifikasyonu için kullanma yeteneği, bitki ıslahında devrim yaratarak gelişmiş özelliklere sahip ürünlerin geliştirilmesini ve çevresel zorluklara karşı daha fazla direnç gösterilmesini sağlayabilir. TE'ler hakkındaki anlayışımız artmaya devam ettikçe, bu unsurlardan tarım ve toplum yararına yararlanma fırsatları da artacaktır.

KAYNAKÇA

- Ågren, J. A., Wang, W., Koenig, D., Neuffer, B., Weigel, D., & Wright, S. I. (2014). Mating system shifts and transposable element evolution in the plant genus *Capsella*. *Bmc Genomics*, *15*, 1-9.
- Ahmad, M. (2023). Plant breeding advancements with “CRISPR-Cas” genome editing technologies will assist future food security. *Frontiers in Plant Science*, *14*, 1133036.
- Arkipova, I. R. (2017). Using bioinformatic and phylogenetic approaches to classify transposable elements and understand their complex evolutionary histories. *Mobile DNA*, *8*(1), 1–14.
- Arnholdt-Schmitt, B. (2004). Stress-induced cell reprogramming: A role for global genome regulation? *Plant Physiology*, *136*(1), 2579–2586.
- Bennetzen, J. L. (2000). Transposable element contributions to plant gene and genome evolution. *Plant Molecular Biology*, *42*(1), 251-269.
- Bennetzen, J. L., & Wang, H. (2014). The contributions of transposable elements to the structure, function, and evolution of plant genomes. *Annual review of plant biology*, *65*(1), 505-530.
- Bergman, C. M., & Quesneville, H. (2007). Discovering and detecting transposable elements in genome sequences. *Briefings in Bioinformatics*, *8*(6), 382–392.
- Bourque, G., Burns, K. H., Gehring, M., Gorbunova, V., Seluanov, A., Hammell, M., ... & Feschotte, C. (2018). Ten things you should know about transposable elements. *Genome biology*, *19*, 1-12.
- Bureau, T. E., Ronald, P. C., & Wessler, S. R. (1996). A computer-based systematic survey reveals the predominance of small inverted-repeat elements in wild-type rice genes. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *93*(16), 8524–8529.
- Curcio, M. J., & Derbyshire, K. M. (2003). The outs and ins of transposition: From mu to kangaroo. *Nature Reviews Molecular Cell Biology*, *4*(11), 865–877.
- Dayi, M. (2024). Diversity and evolution of transposable elements in the plant-parasitic nematodes. *BMC Genomics*, *25*(1), 511.

- Debladis, E., Llauro, C., Carpentier, M. C., Mirouze, M., & Panaud, O. (2017). Detection of active transposable elements in *Arabidopsis thaliana* using Oxford Nanopore Sequencing technology. *BMC Genomics*, *18*(1), 1–8.
- Deneweth, J., Van de Peer, Y., & Vermeirssen, V. (2022). Nearby transposable elements impact plant stress gene regulatory networks: A meta-analysis in *A. thaliana* and *S. lycopersicum*. *BMC Genomics*, *23*(1), 18.
- El Baidouri, M., & Panaud, O. (2013). Comparative genomic paleontology across plant kingdom reveals the dynamics of TE-driven genome evolution. *Genome Biology and Evolution*, *5*(5), 954–965.
- Fedoroff, N. V. (2012). Transposable elements, epigenetics, and genome evolution. *Science*, *338*(6108), 758–767.
- Feschotte, C., Jiang, N., & Wessler, S. R. (2002). Plant transposable elements: Where genetics meets genomics. *Nature Reviews Genetics*, *3*(5), 329–341.
- Feschotte, C., & Pritham, E. J. (2007). DNA transposons and the evolution of eukaryotic genomes. *Annual Review of Genetics*, *41*, 331–368.
- Galindo-González, L., Mhiri, C., Deyholos, M. K., & Grandbastien, M. A. (2017). LTR-retrotransposons in plants: Engines of evolution. *Gene*, *626*, 14–25.
- Galindo-González, L., Sarmiento, F., & Quimbaya, M. A. (2018). Shaping plant adaptability, genome structure and gene expression through transposable element epigenetic control: Focus on methylation. *Agronomy*, *8*(9), 180.
- Guo, Y., Xue, Z., Gong, M., Jin, S., Wu, X., & Liu, W. (2024). CRISPR-TE: A web-based tool to generate single guide RNAs targeting transposable elements. *Mobile DNA*, *15*(1), 3.
- Hassan, A. H., Mokhtar, M. M., & El Allali, A. (2024). Transposable elements: Multifunctional players in the plant genome. *Frontiers in Plant Science*, *14*, 1330127.
- Havecker, E. R., Gao, X., & Voytas, D. F. (2004). The diversity of LTR retrotransposons. *Genome Biology*, *5*(6), 225. <https://doi.org/10.1186/gb-2004-5-6-225>
- Heslop-Harrison, J. S., & Schwarzacher, T. (2011). Organisation of the plant genome in chromosomes. *The Plant Journal*, *66*(1), 1–17.

- Hsu, P. D., Lander, E. S., & Zhang, F. (2014). Development and applications of CRISPR-Cas9 for genome engineering. *Cell*, *157*(6), 1262–1278.
- Ito, H. (2022). Environmental stress and transposons in plants. *Genes & Genetic Systems*, *97*(4), 169–175.
- Jurka, J., Bao, W., & Kojima, K. K. (2011). Families of transposable elements, population structure, and the origin of species. *Biology Direct*, *6*, 1–16.
- Kazazian, H. H. (2004). Mobile elements: Drivers of genome evolution. *Science*, *303*(5664), 1626–1632.
- Kidwell, M. G., & Lisch, D. R. (2001). Perspective: Transposable elements, parasitic DNA, and genome evolution. *Evolution*, *55*(1), 1–24.
- Kim, M. Y., & Zilberman, D. (2014). DNA methylation as a system of plant genomic immunity. *Trends in Plant Science*, *19*(5), 320–326.
- Kirov, I. (2023). Toward transgene-free transposon-mediated biological mutagenesis for plant breeding. *International Journal of Molecular Sciences*, *24*(23), 17054.
- Kumar, A., & Bennetzen, J. L. (1999). Plant retrotransposons. *Annual Review of Genetics*, *33*(1), 479–532.
- Lämke, J., & Bäurle, I. (2017). Epigenetic and chromatin-based mechanisms in environmental stress adaptation and stress memory in plants. *Genome Biology*, *18*, 1–11.
- Lippman, Z., & Martienssen, R. (2004). The role of RNA interference in heterochromatic silencing. *Nature*, *431*(7006), 364–370.
- Lisch, D. (2013). How important are transposons for plant evolution? *Nature Reviews Genetics*, *14*(1), 49–61.
- Liu, Y., & El-Kassaby, Y. A. (2019). Novel insights into plant genome evolution and adaptation as revealed through transposable elements and non-coding RNAs in conifers. *Genes*, *10*(3), 228.
- Makarevitch, I., Waters, A. J., West, P. T., Stitzer, M., Hirsch, C. N., Ross-Ibarra, J., & Springer, N. M. (2015). Transposable elements contribute to activation of maize genes in response to abiotic stress. *PLoS Genetics*, *11*(1), e1004915.

- McClintock, B. (1950). The origin and behavior of mutable loci in maize. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 36, 344–355.
- Mhiri, C., Borges, F., & Grandbastien, M. A. (2022). Specificities and dynamics of transposable elements in land plants. *Biology*, 11(4), 488.
- Mirouze, M., & Vitte, C. (2014). Transposable elements, how to be quiet. *Current Opinion in Plant Biology*, 20, 128–133.
- Oggenfuss, U., & Croll, D. (2023). Recent transposable element bursts are associated with the proximity to genes in a fungal plant pathogen. *PLoS Pathogens*, 19(2), e1011130.
- Orozco-Arias, S., Isaza, G., & Guyot, R. (2019). Retrotransposons in plant genomes: Structure, identification, and classification through bioinformatics and machine learning. *International Journal of Molecular Sciences*, 20(15), 3837.
- Papolu, P. K., Ramakrishnan, M., Mullasserı, S., Kalendar, R., Wei, Q., Zou, L. H., ... & Zhou, M. (2022). Retrotransposons: How the persistent evolutionary frontier shapes plant genomes in response to heat stress. *Frontiers in Plant Science*, 13, 1064847.
- Peña-Ponton, C., Diez-Rodríguez, B., Perez-Bello, P., Becker, C., McIntyre, L. M., van der Putten, W. H., ... & Verhoeven, K. J. (2024). High-resolution methylome analysis uncovers stress-responsive genomic hotspots and drought-sensitive TE superfamilies in the clonal Lombardy poplar. *Journal of Experimental Botany*.
- Pray, L. A. (2008). Transposons: The jumping genes. *Nature Education*, 1(1), 204.
- Quesneville, H. (2020). Twenty years of transposable element analysis in the *Arabidopsis thaliana* genome. *Mobile DNA*, 11(1), 28.
- Ramakrishnan, M., Papolu, P. K., Mullasserı, S., Zhou, M., Sharma, A., Ahmad, Z., ... & Wei, Q. (2023). The role of LTR retrotransposons in plant genetic engineering: How to control their transposition in the genome. *Plant Cell Reports*, 42(1), 3–15.
- Roy, N. S., Choi, J. Y., Lee, S. I., & Kim, N. S. (2015). Marker utility of transposable elements for plant genetics, breeding, and ecology: A review. *Genes & Genomics*, 37, 141–151.

- SanMiguel, P., & Bennetzen, J. L. (1998). Evidence that a recent increase in maize genome size was caused by the massive amplification of intergene retrotransposons. *Annals of Botany*, 82(Supplement_A), 37–44.
- Schmutz, J., Cannon, S. B., Schlueter, J., Ma, J., Mitros, T., Nelson, W., ... & Jackson, S. A. (2010). Genome sequence of the palaeopolyploid soybean. *Nature*, 463(7278), 178–183.
- Shi, Y., Qin, Y., Li, F., & Wang, H. (2022). Genome-wide profiling of DNA methylome and transcriptome reveals epigenetic regulation of potato response to DON stress. *Frontiers in Plant Science*, 13, 934379.
- Springer, N. M. (2013). Epigenetics and crop improvement. *Trends in Genetics*, 29(4), 241–247.
- Song, X., & Cao, X. (2017). Transposon-mediated epigenetic regulation contributes to phenotypic diversity and environmental adaptation in rice. *Current Opinion in Plant Biology*, 36, 111–118.
- Sun, J., Xu, J., Qiu, C., Zhai, J., Zhang, S., Zhang, X., ... & Li, Z. (2024). The chromosome-scale genome and population genomics reveal the adaptive evolution of *Populus pruinosa* to desertification environment. *Horticulture Research*, 11(3), uhae034.
- The International Brachypodium Initiative. (2010). Genome sequencing and analysis of the model grass *Brachypodium distachyon*. *Nature*, 463(7282), 763–768.
- Tiwari, R., & Rajam, M. V. (2022). Enhancing abiotic stress tolerance in plants using RNA and miRNA interventions. *Journal of Plant Biochemistry and Biotechnology*, 31(4), 689–704.
- Voinnet, O. (2009). Origin, biogenesis, and activity of plant microRNAs. *Cell*, 136(4), 669–687.
- Voronova, A., Belevich, V., Jansons, A., & Rungis, D. (2014). Stress-induced transcriptional activation of retrotransposon-like sequences in the Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) genome. *Tree Genetics ve Genomes*, 10(4), 937–951.
- Wada, N., Ueta, R., Osakabe, Y., & Osakabe, K. (2020). Precision genome editing in plants: State-of-the-art in CRISPR/Cas9-based genome engineering. *BMC Plant Biology*, 20, 1–12.

- Wambui Mbichi, R., Wang, Q. F., & Wan, T. (2020). RNA-directed DNA methylation and seed plant genome evolution. *Plant Cell Reports*, 39(8), 983–996.
- Wei, L., & Cao, X. (2016). The effect of transposable elements on phenotypic variation: Insights from plants to humans. *Science China Life Sciences*, 59, 24–37.
- Wessler, S. R. (2006). Transposable elements and the evolution of eukaryotic genomes. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 103(47), 17600–17601.
- Wicker, T., Gundlach, H., Spannagl, M., Uauy, C., Borrill, P., Ramírez-González, R. H., ... & Choulet, F. (2018). Impact of transposable elements on genome structure and evolution in bread wheat. *Genome biology*, 19, 1-18.
- Wicker, T., Sabot, F., Hua-Van, A., Bennetzen, J. L., Capy, P., Chalhoub, B., Flavell, A., Leroy, P., Morante, M., Panaud, O., Paux, E., SanMiguel, P., & Schulman, A. H. (2007). A unified classification system for eukaryotic transposable elements. *Nature Reviews Genetics*, 8(12), 973–982.
- Yang, L. L., Zhang, X. Y., Wang, L. Y., Li, Y. G., Li, X. T., Yang, Y., ... & Gao, W. J. (2023). Lineage-specific amplification and epigenetic regulation of LTR-retrotransposons contribute to the structure, evolution, and function of *Fabaceae* species. *BMC Genomics*, 24(1), 423.
- Zavallo, D., Crescente, J. M., Gantuz, M., Leone, M., Vanzetti, L. S., Masuelli, R. W., & Asurmendi, S. (2020). Genomic re-assessment of the transposable element landscape of the potato genome. *Plant Cell Reports*, 39, 1161-1174.
- Zhao, L., Zhou, Q., He, L., Deng, L., Lozano-Duran, R., Li, G., & Zhu, J. K. (2022). DNA methylation underpins the epigenomic landscape regulating genome transcription. *Genome Biology*, 23(1), 197.

BÖLÜM 9

DOKU KÜLTÜRÜ İLE MEYVE FIDANI ÜRETİMİNDE FİZYOLOJİK PROBLEM: VİTRİFİKASYON VE OLASI NEDENLERİ

Doktora Öğrencisi Nida BAYHAN^{1*}
Prof. Dr. Müttalip GÜNDOĞDU²

DOI: <https://dx.doi.org/10.5281/zenodo.14541802>

^{1*} Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Bahçe Bitkileri Anabilim Dalı, Bolu, Türkiye. *snidaaksoy@gmail.com

² Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi, Ziraat Fakültesi Bahçe Bitkileri Bölümü, Bolu, Türkiye. gundogdumuttalip@gmail.com

GİRİŞ

Geçmiş zamanlardan günümüze kadar doğada olan bitkilerden daha fazla yararlanmak amacıyla geliştirilen metotlardan biri de “doku kültürü sistemleridir” (Kocaçalışkan, 2017; Bayhan, 2023). Makro ve mikro besin elementleri, vitaminler, su, jelleştiriciler ve amaca göre belirlenen bitki büyüme düzenleyicileri (sitokininler, oksinler vb.) içeren bitki doku kültürü besiyerleri, yaygın olarak ışık geçirgenliği olan şeffaf kapaklı kültür kaplarına alınmaktadır. Öncesinde mutlaka hem kullanılacak bitki materyalleri hem de ekipmanlar sterilizasyon işlemlerine tabii tutulmaktadır. Böylece aseptik koşullar altında bitki çoğaltım protokolleri uygulanabilmektedir. Ticari olarak büyük ölçekli bitki yetiştirme için hızlı ve teknolojik bir süreç olan bu metotta bitkilerin küçük gövde parçalarından, tomurcuklarından, somatik embriyolarından, tohumlarından yararlanılmaktadır (Ahloowalia ve ark., 2004). Bitkilerin doku kültüründe mikroçoğaltım süreci, materyal olarak belirlenen bitkinin herhangi bir yerinden alınan ve ‘eksplant’ olarak adlandırılan küçük parçalara sterilizasyon işlemlerinin uygulanması ve ardından besiyeri bulunan kültür kaplarına aktarılmasıyla da tamamlanmaktadır. Doku kültürü ile bitki çoğaltım protokolleri birçok açıdan avantaj sağlasa da kontaminasyon ve vitrifikasyon gibi temelde dikkat edilmesi gereken iki önemli hususu bünyesinde barındırır. Bu problemler iyi yönetilmez ise ciddi ticari kayıplar yaşanabilir.

Geleneksel meyve üretiminde bazı bitkilerin büyük boyutlu olması, uzun gençlik evreleri ve genetik kazanımların sınırlılığı gibi zorluklarla

karşılaşılabilmektedir. Doku kültürü tekniklerinin kullanılmasıyla ise, üstün nitelikli ve çeşitli hastalıklara ya da zararlılara dayanıklılığı olan bitkilerin çoğaltılmasıyla geleneksel yöntemlere göre avantaj sağlanabilmektedir (Dasgupta ve ark., 2020). Bununla birlikte doku kültürü yöntemleri, büyük ölçekte, stabil ve verimli meyve üretimi için gerekli olan tek tipte ve sağlıklı bitki materyalinin sağlanmasında da oldukça etkili olduğu bilinmektedir. Bu yaklaşımla, bir çalışmada çileklerin mikroçoğaltımında viral sanitasyon ve germ plazması iyileştirmesi için *in vitro* çoğaltım başarıyla uygulanmıştır (Mahmoud ve ark., 2017). Doku kültürü teknikleri ile üretilen bitkilerde nod kültürler, yaprak, yaprak sapı gibi çeşitli eksplantlar kullanıldığı için daha kontrollü bir üretim ortamında mikrobiyal kontaminasyondan arı, hastaliksız üretim yapılabilmektedir. Bunun yanında doku kültürü, genetik mühendisliği ile birleştirildiğinde bir bitkideki belirli özellikler ön plana çıkarılıp mevcut ürünün geliştirilmesine ya da ortaya çıkan sorunların çözümüne katkı oluşturulabilir. Doku kültürü üretiminde somatik hücrelerde ortaya çıkan somaklonal varyasyon epigenetik veya kalıtsal çeşitlilik nedeni ile olabilir. Bu değişimler birçok alt kültür boyunca devam edebilir ve bazı genlerde farklılıklar oluşabilir. Doku kültürü ile üretimde bitkide kallus indüksiyonu ve sürgün rejenerasyonu gibi süreçler bitki hücreleri için stres oluşturabilmekte ve normal hücresel düzenleme bozulabilmektedir (Debnath ve Ghosh, 2022). Böylece DNA metilasyonu, kromatin modifikasyonu, protein kodlamayan RNA biyosentezi gibi mekanizmalar epigenetik düzenlemenin görülmesine neden olabilmektedir (Bond ve Finnegan, 2007). Doku kültüründen kaynaklanan epigenetik varyasyonlardan

DNA metilasyonu, yaban mersini, çilek ve kızılcıkta incelenmiştir (Debnath ve Ghosh, 2022). Yaban mersininde yapılan bir çalışmada (Goyali ve ark., 2015) yabani klon QB 9C ve Fundy çeşitleri hem doku kültürü hem de çelikle çoğaltım yapılarak morfolojik olarak aynı zamanda da fitokimyasal ve antioksidan içerikleri bakımından incelenmiştir. Bunun yanında doku kültürü ve çelikle çoğaltılan çeşitlerin klonal doğruluklarını değerlendirmek (clonal fidelity) için de yirmi mikrosatelit belirteci (SSR) kullanılmıştır. Çalışmanın sonucunda, çoğaltma yöntemlerinin yaban mersininin morfolojisini ve antioksidan metabolitleri etkilediğini bununla birlikte söz konusu meyvede türe özgü genetik yapının korunduğu genetik mühendisliğinin bir yöntemi ile gösterilmiştir. Böylece doku kültürü teknikleri kullanılarak çoğaltılan bir meyvenin klonal olarak doğruluğu başka bir bilim dalı olan genetikten yararlanılarak yapılmış, çalışmada entegrasyon sağlanmıştır.

Doku kültürü ile meyve üretiminde her zaman temel amaç mikroçoğaltım yapılarak anaç üretmek değildir. Bilindiği gibi bitkiler, primer metabolitlerin haricinde hayati fonksiyonlarını devam ettirebilmek için çeşitli sekonder metabolitler de üretmektedirler. Bu maddelerin bazıları polen transferinin sağlanması amacıyla çeşitli böcekler için caziptir ve çiçek dokularında, bazıları da bitkinin savunma mekanizmasında yer almak için kök ve yapraklarda sentezlenmektedir (Özyiğit ve ark., 2023). Fenolikler, terpenler ve alkaloidler olarak ayrılan sekonder metabolitler bitkilerde lignin biyosentezinde, pigmentasyonda önemli rol oynarken; polifenoller de bitkiyi bazı stres

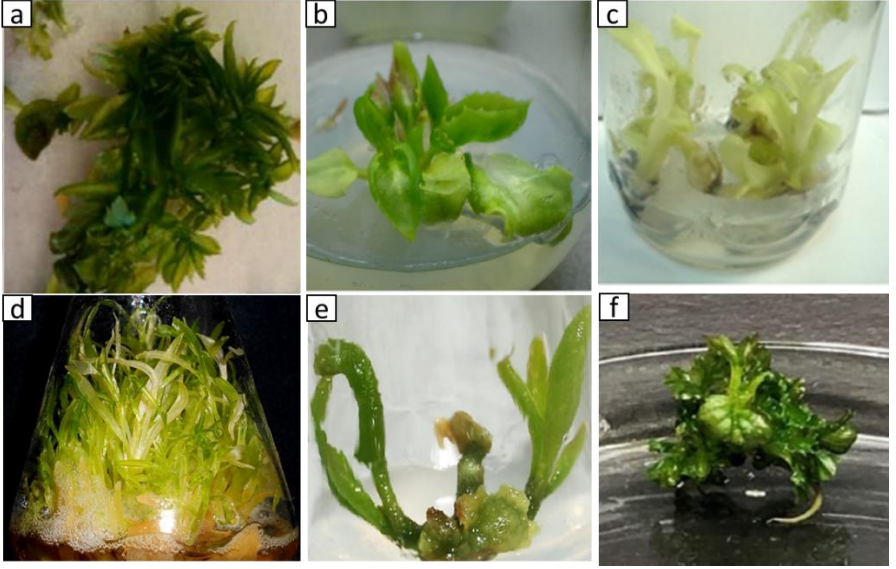
faktörlerinin zararlı etkilerinden korumakla görevlidir. Bitkiler için son derece önemli olan bu maddeler günümüzde özellikle tarım, gıda, ilaç ve kozmetik sanayinin hammaddelerini oluşturmaktadır. Katma değeri yüksek ticari ürünlerin üretiminde kullanılmaya üzere sekonder metabolitlerin büyük miktarlarda üretilmesi gerekir. Bunun içinde geliştirilen tekniklerden bir tanesi doku kültürü tabanlı biyoteknolojik sistemlerdir. Clapa ve ark. (2022)'nin yaban mersininde (Duke ve Hortblue Petite çeşitleri) biyoaktif bileşiklerin birikimi üzerine yaptıkları çalışmada, *in vitro* doku kültürü tekniğinden yararlanılmıştır. Hem agarlı katı kültür ortamında hem de biyoreaktördeki sıvı kültür ortamında çeşitli büyüme düzenleyicileri kullanılmıştır. Çalışma sonucunda, biyoreaktörde Duke çeşidinin tüm büyüme düzenleyicileri konsantrasyonlarında en yüksek düzeyde toplam fenolik bileşik ürettiği ortaya konmuştur. Yine *Aronia arbutifolia* ve *Aronia × prunifolia* çeşitlerinde yapılan bir başka çalışmada (Szopa ve ark., 2018), *in vitro* ortamda farklı bitki büyüme düzenleyicileri kullanılarak kallus ve sürgünlerden metanol özleri, fenolik asitler elde edilmiştir. Çalışmada, metabolitlerin toplam miktarının kullanılan bitki büyüme düzenleyicilerinin miktarına göre değişiklik gösterdiği belirtilmiştir.

Yapılan çalışmalara bakıldığında ve mevcut literatür incelendiğinde, doku kültürü ile meyve üretiminin genetik çeşitliliği korumak, büyük miktarlarda meyve anacı üretmek, hastaliksız klonlar elde etmek ve bazı meyve çeşitlerinden sekonder metabolitleri üretmek gibi avantajlar sağladığı görülmektedir. Bu çalışmada, meyve üretiminde doku kültürü tekniklerinin bu avantajlarının yanında ticari kayıplara yol açabilen

vitrifikasyon sorununun da yaşandığı, bu problemin k¼lt¼r ortamının i¼eriđinden ve ¼evresel koşullardan etkilenererek ortaya ¼ıkabileceđi ve yeni nesil biyoreat¼r sistemlerinin de bu problemdeki rol¼ne y¼nelik bilgiler derlenmiştir.

1. DOKU K¼LT¼R¼NDE VİTRİFİKASYON PROBLEMİ

Vitrifikasyon, bitki doku k¼lt¼r¼ uygulamalarında karşılaşılan en ¼onemli fizyolojik bir sorundur. Vitrifikasyona maruz kalmış bitkiler, sulu ve yarı saydam g¼r¼n¼m¼nde (cam gibi) yapraklar ve g¼vdelerle karakterize olmuştur (Rodríguez ve ark., 2012). Vitrifiye bitkilerin yaprakları genellikle koyu yeşil, kalın, i¼e doğru kıvrık ve uzundur, bu s¼rg¼nlerin g¼vdeleri de kalın ve kırılıgandır (şekil 1). *In vitro* koşullardaki bitki ¼retim merkezlerinin y¼ksek derecede ¼nem vermesi gereken vitrifikasyon problemi ticari işletmelere maddi kayıplar yaşatabilecek bir sorundur. Yeterli bilgi, beceri ve deneyimi olmayan ¼alıřanlar vitrifikasyonu bir problem olarak fark edemeyebilirler ve bu durum zaman, maddi kazan¼ ve girdi kayıplarına neden olabilmektedir.



Şekil 1. Farklı bitki türlerinde oluşan vitrifikasyonun görselleri. (a) *Aronia melanocarpa* (Bayhan ve Yücesan, 2024), (b) *Gerbera* (Gantait ve Mahanta, 2022), (c) Grand Naine muz (El-Mahrouk ve ark., 2019), (d) Çin karanfili (*Dianthus chinensis* L.) (Sreelekshmi ve ark., 2022), (e) Zeytin (*Olea europaea* L.) (Bayraktar ve ark., 2020), (f) Beyaz çilek (*Fragaria x ananassa*) (Pang ve ark., 2023)

Doku kültürü ile çoğaltma sırasında bitkiler nemin yüksek ve aydınlatmanın yetersiz olması, besin ortamının yüksek miktarda şeker ve nitrat içermesi gibi nedenlerden dolayı morfolojik, fizyolojik ve anatomik özelliklerinde bozukluklara neden olabilen bazı koşullara maruz kalmaktadırlar. Görsel belirtilerin dışında klorofil eksikliği, plastidlerde nişasta birikimi, hücreler arası boşluklarda aşırı su birikimi, protein sentezinde değişiklikler gibi pek çok belirti mevcuttur (Polivanova ve Bedarev, 2022). Bitkilerde oluşan vitrifikasyonun neden olduğu konusu hala araştırılmaktadır. Ancak bitki büyüme düzenleyicilerin seviyeleri ya da büyütme ortamının içeriği ve ortam koşulları tarafından vitrifikasyon tetiklenebilir. Vitrikiye bitkilerin dokularındaki su içeriğinde oluşan anormallikler ve ozmotik stres,

hücre duvarı lignifikasyon eksikliği, yüksek oranda etilen varlığı ve reaktif oksijen türlerinin yüksek olması (ROS) ve oksidatif stresin oluşması vitrifikasyon nedenleri arasında yer almaktadır (Kemat ve ark., 2021; Gao ve ark., 2022; Amnuaykan ve ark., 2023). Vitrikiye bitkilerin dokularındaki bozukluklar ve biyokimyasal değişiklikler iki temel fizyolojik süreci etkilemektedir: Fotosentez ve gaz değişimi. In vitro koşullarda bitkiler kapalı kültür kapların içerisinde yetiştirildiğinden yüksek bağıl neme ve etilen, karbondioksit gibi gaz birikimlerine maruz kalmaktadırlar. Bu da vitrifikasyon oluşumunu etkilemektedir (Kevers ve ark., 2004). Aynı zamanda vitrikiye bitkilerde bazı morfolojik anormalliklerle ilişkili olarak çeşitli biyokimyasal özellikler görülmektedir. Bunlar (Gaspar, 1991):

- Vitrikiye bitkilerde kuru ağırlık kaybı,
- Düşük lignifikasyon,
- Glutamat dehidrojenazın yüksek aktivitesi,
- Düşük kalsiyum seviyesi,
- Klorofil düzeyinin düşük olmasından dolayı fotosentez kapasitesinin azalması ve yarı saydam bir görünüm oluşması,
- Oksin katabolizmasının artmasıyla bazı peroksidazların yüksek aktivitesi.

1.1. Kültür Ortamının ve İçeriğinin Vitrifikasyona Etkisi

Azot ve diğer iyonların vitrifikasyona etkisi

Kültür ortamının içeriğinde yer alan nitrat ve amonyum nitrojen içeriği vitrifikasyon düzeyini etkilemektedir (Polivanova ve Bedarev, 2022).

Bazı çalışmalarda besin ortamındaki amonyum nitrojeninin artmasıyla vitrifikasyonun, nitrat nitrojen düzeylerinin ve toplam nitrojen içeriğinin doğrusal olarak arttığı rapor edilmiştir (Brand, 1993). Bir başka çalışmada (Daguin ve Letouze, 1986), söğüt ağacının (*Salix babylonica* L.) camsılığının kültür ortamındaki amonyak nitrojen miktarı ile kontrol edilebileceği bildirilmiştir. Anadolu kestanesi (*Castanea sativa*)'nin MS ortamında çoğaltılmasında vitrifiye sürgünler elde edilirken, besin ortamına amonyum sülfat eklenmesiyle normal sürgünler elde edilmiştir (Vleitez ve ark., 1985). Bitkiler için önemli bir diğer element kalsiyumdur. Sonriza (1997) çalışmasında; arpacık soğanı vitrifiye sürgünlerindeki dokuların normal dokulara göre daha yüksek oranda kalsiyum ve serbest şeker içerdiğini belirtmiştir. Aynı zamanda bu maddelerin hücrelerde biriktiğini vurgulamıştır. Bununla birlikte kültür ortamındaki potasyum iyonunun düşük olmasının bitki metabolizmasına zarar verdiği, enerji ihtiyacının karşılanmadığı bu nedenle de şeker ve amino asit birikime neden olduğu, bunun da protein sentezini olumsuz etkilediği düşünülmektedir (Pasqualetto ve ark., 1988). *Salvia santolinifolia*'nın in vitro çoğaltılmasında bazı bitki büyüme düzenleyicilerin ve bileşiklerin sürgünlerdeki vitrifikasyonu azaltmadaki etkisi araştırılmıştır (Jan ve ark., 2021). Bu çalışmada bazı bitki büyüme düzenleyicilerin yanında amonyum nitrat (NH_4NO_3), potasyum nitrat (KNO_3) ve kalsiyum klorürün ($\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) vitrifikasyona etkisi çalışılmıştır. Kalsiyum klorür tüm çalışmada sabit tutulup (880 mg L^{-1}), amonyum nitrat (825 mg L^{-1} 'den 412 mg L^{-1} 'ye) ve potasyum nitrat (950 mg L^{-1} 'den 475 mg L^{-1} 'ye) azaltıldığında vitrifiye sürgün oranında azalma görülmüştür

(%38,4'den %23,6'ya). Kalsiyum klorür sabit iken (880 mg L⁻¹), ortamdan amonyum nitrat çıkarılıp potasyum nitratın oranı azaltıldığında ya da potasyum nitrat çıkarılıp amonyum nitrat oranı azaltıldığında vitrifiye sürgünlerin oranında azalma olduğu belirtilmiştir. Standart MS besini kullanılarak oluşturulan kontrol grubunda vitrifiye sürgünlerin oranı %46,5'tir. Bu durumda kalsiyum klorür, amonyum nitrat ve potasyum nitratın vitrifikasyonu kontrol etmede etkili olduğu düşünülmektedir.

Bitki büyüme düzenleyicilerin vitrifikasyona etkisi

Bitki büyüme düzenleyicilerden özellikle sitokinler bitkilerin in vitro koşullarda çoğaltılmasında yaygın olarak kullanılmaktadır. Pek çok çalışmada bu bileşiklerin bitkiler üzerindeki etkisi araştırılmıştır ve etkilerinin daha iyi anlaşılması için çalışmalar devam etmektedir. Vitrifikasyon genellikle sitokinin konsantrasyonlarının artmasıyla birlikte artış göstermektedir (Van der Westhuizen, 2014). Sitokin düzeyinin normal sürgünlere göre vitrifiye sürgünlerin dokularında arttığı çok sayıda çalışmada rapor edilmiştir. Vitrifikasyon derecesinin de kültür ortamındaki sitokin konsantrasyonuna bağlı olarak değiştiği birçok ürün (Lisyantus çiçeği, Naşhi armudu, karanfil, aronya) için gösterilmiştir (Peak ve Hahn, 2000; Kadota ve Niimi, 2003; Kharrazi ve ark., 2011; Bayhan ve Yücesan, 2024). Araştırmacıların vitrifikasyonla ilgili ürettiği hipotezlerden birine göre, sitokin konsantrasyonunun yüksek olması etilen üretimini artırarak sürgün çoğalmasını olumsuz etkiler ve apikal nekroza neden olabilir (Polivanova ve Bedarev, 2022). Zeatin, kinetin, 6-benzilaminopurin (BAP), Thidiazuron (TDZ) ve

meta-topolin (mT) gibi sitokinin çeşitlerinin pekçok bitki türlerinde vitrifikasyon üzerindeki etkinliği farklı olabilmektedir. *Lisianthus* bitkisinin in vitro koşullarda çoğaltımında kullanılan farklı konsantrasyonlardaki BAP ve kinetinin varlığında oluşan vitrifikasyonun oranlarına bakıldığında BAP'ın kinetine göre daha yüksek vitrifiye sürgünlere neden olduğu rapor edilmiştir (Peak ve Hahn, 2000). Böylece BAP kullanmak yerine kinetin tercih edilerek daha düşük vitrifiye sürgünlerle çoğaltım tercih edilebilir. Bununla birlikte *Pyrus pyrifolia* N. (Kadota ve Niimi, 2003), *Aloe polyphylla* (Ivanova ve Van Staden, 2011), elma (*Malus × domestica*) (Höhnle ve Weber, 2009) bitki türleri için TDZ kaynaklı sitokinin kullanımının çok daha yüksek vitrifikasyona neden olduğu rapor edilmiştir. Morfogenezi uyarıcı bir etkiye sahip aynı zamanda vitrifikasyonu azaltma eğilimi gösteren aromatik bir sitokinin olan meta-topolin de birçok araştırmada kullanılmaktadır. Vitrifikasyona yönelik etkinliğini ölçmek için; *Aloe polyphylla* (Bairu ve ark., 2007)'da, okaliptusta (Van der Westhuizen, 2014), Avrupa armudunda (*Pyrus communis*) (Lotfi ve ark., 2020) ve Antep fıstığında (*Pistacia vera*) (Abdouli ve ark., 2022) çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Bu araştırmaların sonuçları, vitrifikasyonu kontrol altına almada mT sitokininin çalışmalarda kullanılan diğer sitokininlere göre daha başarılı olduğunu göstermiştir.

Jelleştiricilerin vitrifikasyona etkisi

Bitki doku kültürü sistemlerinde yaygın olarak kullanılan jelleştirici ajanlar; agar, agaroz, PhytigelTM ya da GelriteTM, jelatin, aljinat gibi maddelerdir (Hürkan, 2021). Bitkilerde jelleştirici ajan olarak

kullanılacak olan bu maddelerin vitrifikasyona olan etkisinin jelleştirici türüne ve markasına bağlı olduğu düşünülmektedir (Singha ve ark., 1990). Agarların fiziksel ve kimyasal özelliklerine yönelik birçok araştırma olmasına rağmen, bitki türleri için en iyi agarın hangisi olduğu hala net olarak bilinmemektedir (Scholten ve Pierik, 1998a). Agar performansı; jelin kuvveti, mineral bileşimi, inhibitör bileşikler gibi faktörlere bağlı olarak değişebilmektedir (Scholten ve Pierik, 1998b). Gelrite™ gibi gellan sakızı bazlı jelleştiriciler, daha az safsızlık içermekte ve *in vitro* ile üretim yapılan süreçlerde yaygın olarak kullanılmaktadır. İstenen yoğunlukta ya da sertlikte bir besin ortamı için agardan daha düşük miktarlarda kullanılırlar. *In vitro* çoğaltımda agar konsantrasyonlarının artırılarak kullanılması birçok bitki türünde vitrifikasyonun kontrol altına alınmasını sağlamıştır ancak bazı çalışmalara göre gellan sakızı bazlı jelleştiriciler vitrifikasyonu azaltmamıştır. Bu durumun nedeni olarak kültür ortamındaki su, sitokininler ve amonyum iyonları gibi maddelerin daha yoğun bir şekilde bitki tarafından emilimini teşvik ettiği gösterilmiştir (Polivanova ve Bedarev, 2022). ‘York’ ve ‘Vermont Spur Delicious’ elma çeşitlerinin *in vitro* çoğaltımında farklı konsantrasyonlarda K⁺, Mg⁺⁺, gelrite ve Difco Bacto agar kullanılarak vitrifikasyon üzerindeki etkisi test edilmiştir. Bu çalışmada en düşük K⁺ seviyesi daha yüksek oranlarda vitrifiye sürgünler üretmiştir. Bununla birlikte 7 g L⁻¹ Difco Bacto agar kullanılarak sağlanan jel sertliği 1,5 g L⁻¹ gelrite kullanılarak elde edilmiştir. Ancak gelrite vitrifiye yapraklar ve gövdelerin üretilmesine neden olmuştur (Pasqualetto ve ark., 1986). Bugüne kadar yapılan çalışmalar veya elde edilen verilere bakıldığında, vitrifikasyon

konusunda hangi agarın en iyi sonuç verdiği henüz netlik kazanmayan bir husustur.

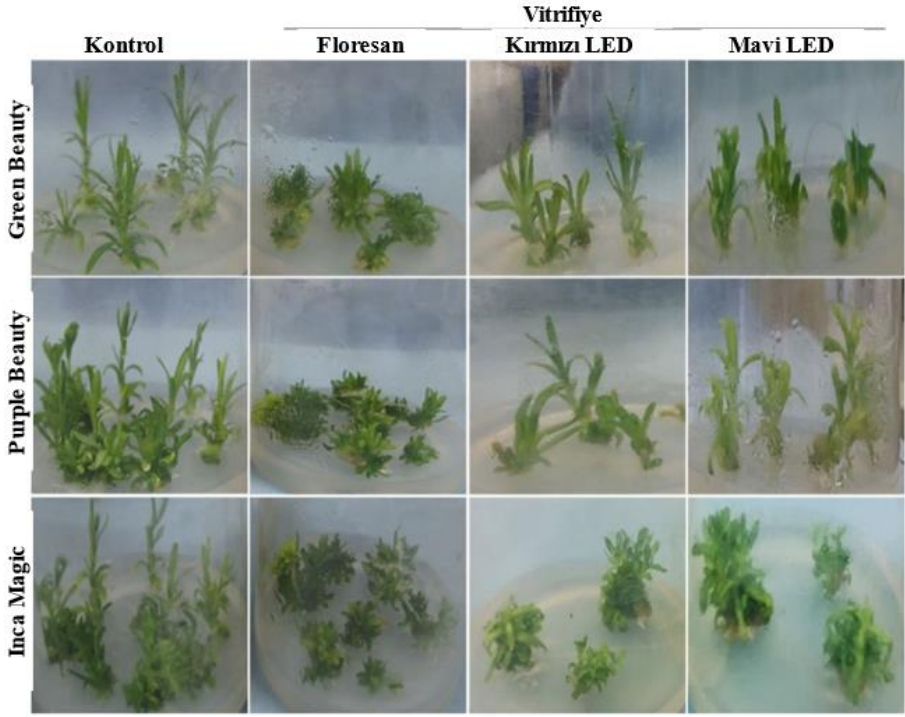
Kültür kabı atmosferinin vitrifikasyona etkisi

Doku kültüründe yetiştirilecek bitkilerin kural olarak kapalı bir kapta, sabit sıcaklıkta, yüksek nemde ve değişken CO₂ konsantrasyonlarında olması istenmektedir. Ancak bu durumda kültür ortamının bileşimi değişmekte ve toksik etki gösteren metabolik ürünlerin birikmesine yol açmaktadır. Etilen, asetaldehit ya da etanol bu ürünlere örnek gösterilebilir. Kapta biriken bu toksik ürünler bitki morfogenezini olumsuz etkileyebilir ve istenmeyen fizyolojik bozukluklara neden olabilir (Polivanova ve Bedarev, 2022). Etilen ve CO₂ hücreler ve dokular üzerinde önemli etkiye sahiptir. İki karanfil çeşidi ('Barbaret Antares' ve 'Barbaret Tanga') üzerinde etilenin rolünün araştırıldığı bir çalışmada, her iki çeşitte kapalı kültür kaplarında kültüre alınmıştır. Bu çeşitlerin her ikisinde etilen üretilmiştir. Barbaret Tanga çeşidinde Barbaret Antares'e göre daha yüksek oranda vitrifiye sürgün oluşmuştur. Havalandırmalı kaplar kullanılarak kültür kabındaki atmosfer değiştirildiğinde vitrifikasyonun önlendiği belirtilmiştir (Fal ve ark., 1999). *Aloe polyphylla* Schönland ex Pillans'ın in vitroda vitrifikasyon seviyesini düşürmek için kültür kabı havalandırmasının rolüne yönelik bir araştırma gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada in vitro kültür kabının atmosferi ile dış ortam arasındaki gaz alışverişinin kontrol altına alınmasının önemi ortaya konmuştur. Kapağı kapalı ve gelrite ile jelleştirilmiş kültür ortamlarında yeni oluşan sürgünlerin %84'ü vitrifikasyon etkisi altına girmiştir. Daha sonra gaz değişimine

olanak tanıyan kapaklar kullanılarak kültür ortamı atmosferinin değiştirilmesi sağlanmıştır. Bu yöntemle havalandırılan kültür ortamında jelleştirici türü dikkate alınmaksızın vitrifikasyonun tamamen ortadan kaldırıldığı rapor edilmiştir (Ivanova ve Van Staden, 2010). *In vitro* ortamda kültür kaplarında gerçekleştirilecek inovatif buluşlar ile vitrifikasyonla mücadele daha mümkün hâle gelebilir.

Işığın vitrifikasyona etkisi

Bitki yetiştirme odalarında kullanılan ışığın vitrifikasyon üzerindeki etkisini inceleyen sınırlı sayıda çalışma bulunmaktadır. Muneer ve ark. (2018), *in vitro*da kültüre alınan karanfilde vitrifikasyonu azaltabilecek etmenleri belirlemeye yönelik çalışma gerçekleştirmiştir. Vitrikiye ve normal sürgünler kırmızı, mavi LED'lerde ve beyaz floresan ışıkta yetiştirilmiştir (Şekil 2). Tiyobarbitürik asit reaktif maddeleri (TBARS) içeriği bakımından vitrifikasyonun oksidatif strese neden olduğu, kırmızı ve mavi LED ışıklarla bu stresin hafifletildiği belirtilmiştir. Çalışma sonucunda kırmızı ve mavi ışık LED'lerinin karanfil genotiplerinde tilakoid proteinlerin bileşimini ve antioksidatif savunma mekanizmasını koruduğu, böylece vitrifikasyonu kontrol düzeylerine düşürdüğü rapor edilmiştir. *Lippia grata* Schauer sürgünleri, 1:1 ve 5:1 oranında kırmızı:mavi LED ışık kombinasyonunda, beyaz LED altında kısmi havalandırma sağlanarak ve floresan lamba altında havalandırılmadan (geleneksel yöntem) kültüre alınmıştır. Kısmi havalandırma ve 1:1 kırmızı:mavi LED ışık kombinasyonunda vitrifikasyon oranı, geleneksel yönteme göre %61 azalmıştır (Zárate-Salazar ve ark., 2020).



Şekil 2. Sağlıklı ve vitrifiye karanfil genotiplerinin farklı ışık kaynağı altındaki görüntüleri (Muneeer ve ark. (2018))

1.2. Doku Kültürü ile Meyve Anacı Üretiminde Vitrifikasyona Dair Bulgular

Meyve ağaçlarının diğer bitki türleri gibi doku kültürü tekniği kullanılarak çoğaltılması, ilk defa 1858 yılında Virchow'un "hücre totipotensi" kavramına dayandırılmıştır. Bu kavram, Schleiden'in 1838'de önerdiği "hücre teorisinden" türetilmiştir. Yaşanan bazı teknik aksaklıklar bitkilerin *in vitro* şartlarda kültüre alınmasını çok uzun bir süre geciktirmiştir. Ancak teknolojinin ilerlemesi ile birlikte teknikler geliştirilerek sunulan teoriler uygulanmaya başlanmıştır (Fiorino ve

Loreti, 1987). Bilim dünyasındaki gelişmelerle birlikte günümüzde bitki doku kültürü ile ilgili devasa bir literatür bulunmaktadır.

Meyve anacı seçimi meyvecilik sektörü için önemli hususlardan biridir. Özellikle toprak ve iklim koşullarına uygun anaç geliştirme çalışmaları da halen devam etmektedir. Ekonomik açıdan düşünüldüğünde erkencilik ve birim alandan en yüksek verimi alabilmek için klonal anaç kullanmak avantaj sağlamaktadır. Böylece genetik devamlılık sağlanmakta, tek tip popülasyon oluşturulmakta ve gençlik kısırlığı atlatılmaktadır. Bu da erken dönemde meyve yatmasını kolaylaştırmaktadır (Arıcı, 2008). Aynı zamanda anacın göz ya da kalemle uyuşma durumu yani gelişme dönemlerinin kontrol edilebilmesi, meyve ağaçlarının verimliliği, gelişme kuvvetleri, meyvelerin kalitesi, ekonomik yaşam döngüleri, ekolojik ve fizyolojik isteklerinin bilinmesi gibi diğer önemli unsurlarda söz konusudur (Demiral ve Ülger, 2008). Anaçların uniform yapıda olması bakımından vejetatif çoğaltma yöntemlerinden doku kültürü ile mikroçoğaltım tekniği kullanılmaktadır. Ancak odunsu türlerin her biri için bir mikroçoğaltım protokolü belirlenmesi gerekir. Bu nedenle her genotip için ayrı ayrı çalışılması önem arz etmektedir (Zainel ve Hepaksoy, 2018). Bu protokoller en az kayıpla en yüksek verimi elde edecek şekilde tasarlanmalıdır. Örneğin, büyük oranda sürgün almak için sitokininlerin yüksek konsantrasyonda kullanılması vitrifikasyona neden olabileceği gibi bitki büyüme düzenleyiciler ile sükroz etkileşimi de vitrifikasyonda önemli rol oynamaktadır (Bayhan ve Yücesan, 2024). Tablo 1’de doku kültürüne alınan bazı meyve türlerinde

vitrifikasyon görülme durumuna yönelik veriler paylaşılmıştır. Vitrifikasyonun artmasında çalışmalarda kullanılan bazı sitokininlerin rolü kritik olurken, farklı jelleştiricilerin vitrifikasyonun en aza indirilmesinde etkili olduğu görülmüştür. Bunun yanında ışık dalga boylarının da vitrifikasyonu artırdığı ya da azalttığına yönelik bulgular mevcuttur.

Tablo 1: Doku kültürüne alınan bazı meyve türlerinde vitrifikasyon görülme durumu

İlgili çalışma	Meyve/a naç türü	Kültür ortamı	Kültür şartları	Vitrifikasyon
Orlikowska, 1985	Elma P2 ve P13, armut, ayva S1	Farklı düzeylerde BAP, NAA, agar, sükroz ve çift doz MgSO ₄ ile PG ve AS kullanılmıştır.	İklim odası 20-25°C, fotoperiyod 16/8 saat, 1500 luks ışık şiddeti.	P2 ve P13 kültürlerinin vitrifiye eksplant oranını PG artırmıştır. Ayvada ise vitrifikasyonu %100 tetiklemiştir. Ayvada 1.0 mg L ⁻¹ ve 1.5 mg L ⁻¹ BAP vitrifikasyon hızını artırırken, çift doz MgSO ₄ vitrifiye eksplantların oranını azaltmıştır.
Höhnle ve Weber, 2008	Elma (M9/T33 7) ve M26	MSVit, TDZ, BAP, NAA, agar ve gelrite ile kallus ve sürgün indüksiyonu incelenmiştir.	İklim odası 24°C, fotoperiyod 16/8 saat.	TDZ ve gelrite besin ortamlarındaki sürgünlerin %100'üne yakınında vitrifikasyon görülmüştür. Gelritin agar ile TDZ'nin BAP ile değiştirilmesinden sonra vitrifikasyon oranlarında ciddi düşüş olduğu rapor edilmiştir.

El-Mahrouk ve ark., 2019	Muz (<i>Musa ×paradis iaca</i> L. 'Grand Naine')	Sürgün çoğaltımı; MS, sükroz, BAP ve kinetin ile gellan kullanılmıştır. Vitrikiye muz sürgünlerini normal sürgünlere çevirmek için; aynı sükroz ve MS içeriğine sahip ortamda farklı düzeylerde kalsiyum nitrat, agar-agar veya gellan eklenmiştir.	İnkübasyon ortamı 25±1°C, fotoperiyod 16/8 saat.	Kalsiyum nitrat (0.5 – 1 g L ⁻¹) içeren ortamda geri dönen muz fidanları, turba ve perlit (1:1) içeren bir büyüme substratında %100 hayatta kalma ile aklimatize edilmiştir.
Abdoui ve ark., 2023	Antep fıstığı (<i>Pistacia vera</i>)	Sükroz, agar içeren ortama 2.4 mg L ⁻¹ mT ilave edilmiştir.	İklim odası 25°C, farklı ışık kaynakları altında 16 saat fotoperiyod.	Her ışık uygulamasında farklı seviyelerde vitrifikasyon gözlenmiştir. Bu seviyeler ışığın dalga boyuna göre değişkenlik göstermiştir.
Bayhan ve Yücesan, 2024	Aronya (<i>Aronia melanocarpa</i>)	Sürgün rejenerasyonu ve VOP için; MS ve gelrite ortamında farklı düzeylerde sükroz ve BAP kombinasyonları ile vitrikiye bitkileri geri kazanmak için VSP ortamı hazırlanmıştır.	İklim odası 24°C, fotoperiyod 16/8 saat, ışık kaynağı beyaz floresan.	Yüksek dozda sükroz ve BAP'ın vitrifikasyon derecesini artırdığı belirtilirken, BAPSız ya da düşük dozda BAP'ın sürgünlerde vitrifikasyonu sonlandırmış ya da azaltmıştır.

Pang ve ark., 2023a	Beyaz çilek (Fragaria x ananassa)	MS, sükröz ve gelrite içeren ortamda farklı düzeylerde BAP, TDZ ve GO kullanılmıştır.	İklim odası 25°C±2, fotoperiyod 16 saat.	8 µM TDZ ve 7,5 mg L ⁻¹ GO içeren kültür ortamında aşırı hidrasyonun önemli ölçüde azaldığı belirtilmiştir.
Pang ve ark., 2023b	Beyaz çilek (Fragaria x ananassa)	MS kontrol ortamında sükröz ve gelrite kullanılmıştır. Bu ortamla birlikte farklı seviyelerde BAP, TDZ, NAA ve IBA ile sürgün rejenerasyonu ve köklendirme yapılmıştır.	İklim odası 25°C±2, fotoperiyod 16/8 saat ve ışık kaynağı dört farklı dalga boyu ve yoğunluğu ndadır.	Farklı konsantrasyonlarda BAP içeren kültür ortamlarında vitrifikasyon gözlenmiştir.

AS Adenin sülfat; BAP 6-benzilaminopurin; GA₃ Giberellik asit; GO Grafite oksit; IBA İndol bütirik asit; MgSO₄ Magnezyum sülfat; MS Murashige & Skoog; mT Meta-topolin; NAA Naftalin asetik asit; PG Floroglisinol; TDZ Thidiazuron; VOP Vitrifikasyon oluşturma protokolü; VSP Vitrifikasyon sonlandırma protokolü.

2. YENİ NESİL DOKU KÜLTÜRÜ SİSTEMİ BİYOREAKTÖRLERİN VİTRİFİKASYONA ETKİSİ

Biyoreaktörler için farklı tanımlar bulunmakla birlikte genellikle içerisinde canlı organizma bulunan, hücre ya da dokuların, sıvı kültür ortamına alınarak, içerisindeki kültür şartlarının iyi bir şekilde kontrol altına alınabildiği mekanik kaplar ya da tanklar olarak tanımlanabilir. Başlangıç materyali konulduğunda hedeflenen ürüne ulaşmak için bir dizi biyokimyasal olaylar gerçekleşmektedir. Hücre büyümesinin etkin bir şekilde yapılması ve metabolizma için gerekli fiziksel ve kimyasal faktörlerin düzenlenebilmesi temel işlevleri arasında yer almaktadır. Biyoreaktörler çeşitli yardımcı ekipmanlara da sahiptirler. Bunlar; pH, sıcaklık, çözünmüş oksijen seviyesini algılayan probalar ve aseptik

koşulları bozmadan pH düzenleme, taze hava sağlama, karıştırma, ısı kontrolü gibi süreçlere olanak tanıyan elektronik kontrol paneli gösterilebilir (Topçu ve Çölgeçen, 2015). Aynı zamanda katı kültürü sistemlerinde karşılaşılan pek çok sorunun ortadan kaldırılmasına yönelik geliştirilen ve belirlenen aralıklarla sürgünlerin sıvı kültür ortamından uzaklaşmasına olanak tanıyan sistemlerdir. Klasik katı kültüründe olduğu gibi girdi maliyetini artıran agar ve farklı jel yapıcı maddelere, yoğun iş gücüne, çok sayıda kültür kabına ve büyük alanlı iklim odasına bu sistemlerde ihtiyaç duyulmayabilir. Maliyet açısından da avantaj sağlamaktadır (Umarusman ve ark., 2020). Kısacası biyoreaktörler, kültür ortamının içeriğinin ayarlanarak yakından takibini mümkün kılan ve elektronik olarak istenildiği şekilde programlanabilen teknolojik sistemlerdir. İlk zamanlarda biyoreaktörlerin içerisindeki sıvı kültür ortamı mikroçoğaltım aşamasında besin maddelerinin alımını artırarak büyümeyi teşvik etti. Fakat bu ortamda genellikle oksijen yetersizliği, vitrifikasyon ve parçalanma gibi teknik problemler yaşandı. Bu sorunların üstesinden gelebilmek için zaman içerisinde çeşitli biyoreaktörler geliştirildi ve farklı modelleri üretildi. Birçok sınıflandırması olan bu sistemlerin genel sınıflandırması şu şekildedir; operasyon şekline (seri, yarı kesikli, devamlı), kültür sistemlerine (mikrobiyal, memeli hücre kültürü, bitki hücre/doku kültürü) ve ortam fazına (sıvı, gaz, hibrit) göre olan biyoreaktörlerdir (Topçu ve Çölgeçen, 2015).

Doku kültürü ile meyve anacı üretimi genellikle klasik yöntemle yapılırsa da günümüzde birçok çalışmaya biyoreaktörler de dahil

edilmiştir. Umarusman ve ark. (2020) farklı böğürtlen çeşitlerinde klasik doku kültürü yöntemi ile Plantform biyoreaktör sistemini karşılaştırmalı olarak mikroçoğaltım ve köklendirme uygulamaları yürütmüşlerdir. Katı kültürde mikroçoğaltımda MS, farklı konsantrasyonlarda BAP (Benziladeninpurin) ve GA₃ (Gibberellik Asit) bitki büyüme düzenleyicileri kullanılmıştır. Katı kültür köklendirme ortamında ise; MS, NAA (Naftalen Asetik Asit) ve IBA (İndol Bütirik Asit)'nın farklı dozlarıyla çalışılmıştır. Burada belirlenen en iyi mikroçoğaltım ve köklendirme besin ortamı içeriği Plantform biyoreaktör sisteminde uygulamaya alınmıştır. Çalışma sonucunda elde edilen verilere göre biyoreaktör sisteminin böğürtlen gelişimi üzerinde klasik katı yöntemle göre daha yüksek oranda başarıya ulaşıldığı belirtilmiştir. Aynı zamanda çalışmada herhangi bir vitrifikasyon bulgusunun gözlemlendiğine dair veri paylaşılmamıştır. Sacco ve ark. (2015)'nin şeker otu (*Stevia rebaudiana*) üzerinde yaptıkları bir araştırmada, Plantform sisteminde bitki rejenerasyonu için farklı daldırma sürelerinin eksplantlar üzerindeki etkisi çalışılmıştır. Çalışmada elde edilen bulgulara göre, üç saatte bir daldırma yapılan eksplantlarda kallus ve vitrifikasyon sorunu olduğu, sekiz saatte bir yapılan daldırmada ise yüksek kalitede rejenerasyon elde ettiklerini belirtmişlerdir.

SONUÇ

Vitrifikasyon, bitkilerin şeffaf ya da yarı saydam yaprak görünümü, sürgünlerde belirgin bir deformasyon ve alt kültüre alınan bitkilerde çoğalma hızının yavaşlaması ile karakterize olan fizyolojik bir

bozukluktur (George ve ark. 2008; Shen ve ark., 2012). Vitrifiye bitkileri köklendirmek ve iklimlendirme süreçlerini başarıyla tamamlamak, söz konusu bitkilerin kök sisteminin zayıflaması nedeniyle oldukça zordur (Shen, 2005).

Yapılan çalışmaların ışığında, *in vitro* ortamda üretilen bitkilerde vitrifikasyonun görülmesinin olası nedenleri olarak şunlar karşımıza çıkmaktadır:

- i. *Kültür kabında toksik metabolik ürünlerin varlığı*: Kapalı kültür kabında etilen, asetalaldehit ve etanol gibi toksik maddelerin birikmesi, bitki hücrelerinin gelişimini olumsuz etkileyerek anormal gelişime neden olabilir.
- ii. *Kültür kabındaki yüksek nem içeriği*: Bu durum suyun bitki dokularında hücrelerarası boşluklarda aşırı birikmesine neden olarak vitrifikasyona yol açabilir. Ayrıca, yüksek nemden dolayı bitkilerin su dengesi bozulabilir.
- iii. *Kültür kabındaki oksijen konsantrasyonunun düşük olması*: düşük oksijen konsantrasyonu, bitki hücrelerinin normal ilerleyen metabolik süreçlerini olumsuz etkileyebilir.
- iv. *Kültür kabındaki karbondioksit düzeylerinin değişkenliği*: CO₂'deki dalgalanmalar ile birlikte bitkilerin fotosentez ve metabolik faaliyetleri olumsuz etkilenebilir.
- v. *Besin ortamında kullanılan jelleştirici ajanlar*: Tercih edilen jelleştiricilerin türü, markası ve konsantrasyonun vitrifikasyonu

etkilediğine dair bulgular mevcuttur. Bazı jelleştiriciler toksik etki yapabileceği gibi bazıları vitrifikasyonu tetikleyebilmektedir.

vi. *Besin ortamındaki bitki büyüme düzenleyicilerin konsantrasyonları*: Hücre bölünmesini ve bitki gelişimini teşvik eden sitokininlerden özellikle BAP'ın yüksek seviyelerdeki konsantrasyonu veya diğer besin maddeleriyle olan etkileşimi vitrifikasyonun oluşmasına neden olabilmektedir.

vii. *Besin ortamının yetersizliği*: Bitkinin ihtiyacından daha düşük oranlarda kullanılan besin maddeleri, bitkilerin normal bir şekilde gelişmesini etkileyerek vitrifikasyona yol açabilir.

Bu nedenler, vitrifikasyonun önlenmesi için dikkat edilmesi gereken önemli faktörlerdir.

Bitkilerin vitrifikasyonla başa çıkabilmek için özellikle stomalarını arttırdıklarını yönelik çalışmalar vardır. Marques ve ark. (2021), genellikle sıvı kültür ortamında *in vitro* olarak çoğaltılan ve sıklıkla apoplastta su birikimi, düşük lignifikasyon, vitrifikasyon ve bozulmuş stoma fonksiyonu gibi sorunlarla karşılaşılan koca yemiş üzerinde bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Bu sorunların üstesinden gelebilmek için Fourier Dönüşümlü Kızılötesi (FTIR - Fourier-Transform Infrared) Spektroskopisi ve Zayıflatılmış Toplam Yansımaya (ATR - Attenuated Total Reflection) modunda vitrifiye edilmiş ve vitrifiye edilmemiş hücre duvarları arasındaki kimyasal farklılıklar değerlendirilmiştir. FTIR bazlı spektral göstergeler, yaprakların gövdelere göre daha fazla aromatik bileşik içerdiği belirtilmiştir. Asetil bromürle gerçekleştirilen lignin ölçümleri, farklı yaprak türleri arasında kuru ağırlığa göre lignin

yüzdesi bakımından önemli bir farklılık göstermemiştir. Hem ışık mikroskobu hem de taramalı elektron mikroskobu kullanılarak yapılan anatomik incelemeler, vitrifiye yaprakların epidermisindeki değişikliklerin yanında abaksiyal yüzeyde anormal derecede stoma olduğunu ortaya koymuştur. Benzer şekilde Bayhan ve Yücesan (2024)'ın aronya bitkisi üzerinde vitrifikasyon modellemesi yaptıkları çalışmalarında da vitrifiye sürgünlerin yapraklarında stomaların artığına yönelik benzer bulgu elde etmişlerdir. Muzda yapılan bir çalışmada da (El-Mahrouk ve ark., 2019), vitrifiye sürgünlerde oluşan stomaların deformasyonuna değinilmiştir. Normal sürgünlerdeki eliptik stomaların aksine vitrifiye sürgünlerde oluşan stomaların koruyucu hücrelerinin deformasyonu sonucu yuvarlaklaştığı belirtilerek, aşırı su birikiminden kaynaklı hücre duvarının yapısının ve elastikiyetinin kaybolduğuna yönelik görüş bildirilmiştir. Çalışmalardaki bu gözlemler vitrifiye bitkilerin transpirasyonu dengelemek ve iklimlendirme aşamasında su stresiyle başa çıkmak için bitkinin geliştirdiği taktikler olarak açıklanabilir.

Vitrifikasyonla ilgili bitkide yaşanan en belirgin stres, bitki dokusundaki aşırı su birikmesinden dolayı oksijen düzeyinin düşmesi ve hücrelerdeki difüzyonunu sınırlayan bir stres oluşturmasıdır. Bu sebeple, bitki dokularının hipoksi stresine maruz kaldığı bazı çalışmalar tarafından ileri sürülmüştür (Franck ve ark., 2004; Kevers ve ark., 2004). Aynı zamanda yaşanan bu oksidatif stresin, membran hasarı, proteinlerin yapısının bozulması, enzim inaktivasyonu ve DNA hasarı gibi pekçok metabolik süreçlerden de sorumlu olabileceğine dair

görüşlere yer verilmiştir (Chen ve Ziv, 2001; Dewir, 2005; Dewir ve ark., 2006).

Sonuç olarak, in vitro ortamda çoğaltılan bitkilerde vitrifikasyonla karşılaşmamak ya da vitrifikasyon şiddetini en aza indirmek için bitkiye özgü bir mikroçoğaltım protokolü geliştirmek gerekir. Ticari olarak belli bir öneme sahip olan meyve fidanı yetiştiriciliğinde de in vitro teknikleri kullanıldığında bu soruna dikkat etmek elzemdir. Besin ortamının bitki türüne göre optimizasyonu yapılarak çevresel koşullarda (ortam sıcaklığı, ışık vb.) dikkate alınmalıdır. Vitrifikasyona tek bir faktör neden olmayacağı gibi birbiriyle etkileşimli birçok faktör sebep olabilir. Özellikle bitki hücreleri ya da dokuları aşırı su alımı nedeniyle amorf bir yapı kazanırlar. Bu da bitkilerde bir takım gelişim bozukluklarına yol açabilir. Bitki gelişimi yavaşlar, köklenme, büyüme ve aklimatizasyon olumsuz etkilenebilir. Besin ortamında kullanılan maddelerin bitkiye özel dengesinin sağlanması, kültür kaplarının mümkünse havalandırılması, kalsiyum gibi besin takviyeleriyle bitkilerin metabolik süreçlerine olumlu katkı sağlayacak bileşiklerin kullanılması, düzenli olarak besin ortamının değiştirilmesi gibi uygulamalarla vitrifikasyon önlenir ya da şiddeti en aza indirilebilir. Uygun mikroçoğaltım stratejileri belirleyerek daha sağlıklı, kaliteli ve verimli bitki üretimi sağlanabilir.

KAYNAKA

- Abdouli, D., Plakov, L., Doleşal, K., Bettaieb, T., & Werbrouck, S. P. (2022). Topolin cytokinins enhanced shoot proliferation, reduced hyperhydricity and altered cytokinin metabolism in *Pistacia vera* L. seedling explants. *Plant Science*, 322, 111360.
- Abdouli, D., Soufi, S., Bettaieb, T., & Werbrouck, S. P. (2023). Effects of Monochromatic Light on Growth and Quality of *Pistacia vera* L. *Plants*, 12(7):1546.
- Ahloowalia, B. S., Prakash, J., Savangikar, V. A., & Savangikar, C. (2004). Plant tissue culture. Low-cost options for tissue culture technology in developing countries. *International Atomic Energy Agency*, Vienna, 3-11.
- Amnuaykan, P., Nathewet, P., & Thepsukhon, A. (2023). Silver nanoparticles eliminate hyperhydricity in micropropagated Lavender. *Ornamental Horticulture*, 29(3):354-364.
- Arıı, ř. E. (2008). Bazı sert ekirdekli meyve analarının doku k¼lt¼r¼ ile oğaltılması. *Ziraat Fak¼ltesi Dergisi*, 3(1):19-23.
- Bairu, M. W., Stirk, W. A., Dolezal, K., & Van Staden, J. (2007). Optimizing the micropropagation protocol for the endangered *Aloe polyphylla*: can meta-topolin and its derivatives serve as replacement for benzyladenine and zeatin?. *Plant Cell, Tissue and Organ Culture*, 90:15-23.
- Bayhan, N. (2023). *Bitki doku k¼lt¼r¼ sistemlerinde vitrifikasyon sorununun aronya'da (aronia melanocarpa) modellenmesi ve z¼m nerileri* (Y¼ksek Lisans Tezi). Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi, Bolu.
- Bayhan, N., & Y¼cesan, B. (2024). The impact of sucrose and 6-benzylaminopurine on shoot propagation and vitrification in *Aronia melanocarpa* (black chokeberry). *Plant Cell, Tissue and Organ Culture (PCTOC)*, 156(2):55.
- Bayraktar, M., Hayta-Smedley, S., Unal, S., Varol, N., & Gurel, A. (2020). Micropropagation and prevention of hyperhydricity in olive (*Olea europaea* L.) cultivar 'Gemlik'. *South African Journal of Botany*, 128:264-273.

- Bond, D. M., & Finnegan, E. J. (2007). Passing the message on: inheritance of epigenetic traits. *Trends in Plant Science*, 12(5), 211-216.
- Brand, M.H. (1993). Agar and ammonium nitrate influence hyperhydricity, tissue nitrate and total nitrogen content of serviceberry (*Amelanchier arborea*) shoots in vitro. *Plant Cell Tissue Organ Culture*, 35:203–209.
- Chen, J. & Ziv, M. (2001) The effect of ancymidol on hyperhydricity, regeneration, starch and antioxidant enzymatic activities in liquid-cultured *Narcissus*, *Plant Cell Reports*, 20:22-27.
- Clapa, D., Nemeş, SA, Ranga, F., Hârța, M., Vodnar, DC, & Călinoiu, LF (2022). Micropropagation of *Vaccinium corymbosum* L.: An alternative procedure for the production of secondary metabolites. *Horticulturae*, 8(6):480.
- Daguin, F., & Letouzé, R. (1986). Ammonium-induced vitrification in cultured tissues. *Physiologia Plantarum*, 66(1):94-98.
- Dasgupta, K., Hotton, S., Belknap, W., Syed, Y., Dardick, C., Thilmony, R., & Thomson, J. G. (2020). Isolation of novel citrus and plum fruit promoters and their functional characterization for fruit biotechnology. *BMC Biotechnology*, 20:1-15.
- Debnath, S. C., & Ghosh, A. (2022). Phenotypic variation and epigenetic insight into tissue culture berry crops. *Frontiers in Plant Science*, 13, 1042726.
- Demiral, S., & Ülger, S. (2008). Gisela 5 kiraz anacının doku kültürü ile çoğaltılması üzerine bir araştırma. *Akdeniz Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, 21(1):117-121.
- Dewir, Y.H. (2005) Ornamental Euphorbia and Spathiphyllum: Application of bioreactor system and microponics for large-scale production, in vitro flowering and its physiology. Ph.D. dissertation, Chungbuk National University, South Korea.
- Dewir, Y.H., Chakrabarty, D., Ali, M.B., Hahn, E.J. & Paek, K.Y. (2006). Lipid peroxidation and antioxidant enzyme activities of *Euphorbia millii* hyperhydric shoots. *Environmental and Experimental Botany*, 58:93-99.
- El-Mahrouk, M. E., El-Shereif, A. R., Dewir, Y. H., Hafez, Y. M., Abdelaal, K. A., El-Hendawy, S., ... & Al-Obeed, R. S. (2019). Micropropagation of banana:

- Reversion, rooting, and acclimatization of hyperhydric shoots. *HortScience*, 54(8):1384-1390.
- Fal, M. A., Majada, J. P., González, A., & Tamés, R. S. (1999). Differences between *Dianthus caryophyllus* L. cultivar in in vitro growth and morphogenesis are related to their ethylene production. *Plant Growth Regulation*, 27:131-136.
- Fiorino, P., & Loreti, F. (1987). Propagation of fruit trees by tissue culture in Italy. *HortScience*, 22(3):353-358.
- Franck, T., Kevers, C., Gaspar, T., Dommès, J., Deby, C., Greimers, R., Serteyn, D. & Deby-Dupont, G. (2004) Hyperhydricity of *Prunus avium* shoots cultured on gelrite: a controlled stress response. *Plant Physiology and Biochemistry*, 42:519-527.
- Gantait, S., & Mahanta, M. (2022). Hyperhydricity-induced changes among *in vitro* regenerants of gerbera. *South African Journal of Botany*, 149:496-501.
- Gao, H.; Xia, X.; An, L. (2022). Critical roles of the activation of ethylene pathway genes mediated by DNA demethylation in *Arabidopsis* hyperhydricity. *The Plant Genome*, 15(2), e20202.
- Gaspar, Th. (1991). Vitrification in micropropagation. In: Bajaj, YPS. (ed) *Biotechnology in Agriculture and Forestry, Vol. 17. High-Tech and Micropropagation I* (116–126). Springer, Berlin.
- George, E.F., Hall, M.A., Klerk, G.J.D., 2008. Effects of the physical environment. *Plant Propagation by Tissue Culture*. Wiley-Blackwell, London, pp. 423–464.
- Goyalı, J. C., Igamberdiev, A. U., & Debnath, S. C. (2015). Propagation methods affect fruit morphology and antioxidant properties but maintain clonal fidelity in lowbush blueberry. *HortScience*, 50(6), 888-896.
- Höhnle, M. K., & Weber, G. (2008, September). Development of a suitable protocol to overcome hyperhydricity in apple (*Malus* sp.) during in vitro regeneration. In *I International Symposium on Biotechnology of Fruit Species: BIOTECHFRUIT2008*, 839 (pp. 287-291).
- Höhnle, M. K., & Weber, G. (2009). Development of a suitable protocol to overcome hyperhydricity in apple (*Malus* sp.) during in vitro regeneration. *Acta Horticulturae*, (839):287–291.

- Hürkan, Y. K. (2021). Bitki doku kültürü besiyerine eklenen bazı önemli organik ekstraktlar üzerine derleme. *Environmental Toxicology and Ecology*, 1(1):1-7.
- Ivanova, M., & Van Staden, J. (2010). Natural ventilation effectively reduces hyperhydricity in shoot cultures of *Aloe polyphylla* Schönland ex Pillans. *Plant Growth Regulation*, 60:143-150.
- Ivanova, M., & Van Staden, J. (2011). Influence of gelling agent and cytokinins on the control of hyperhydricity in *Aloe polyphylla*. *Plant Cell, Tissue and Organ Culture (PCTOC)*, 104:13-21.
- Jan, T., Gul, S., Khan, A., Pervez, S., Noor, A., Amin, H., ... & Ullah, H. (2021). Range of factors in the reduction of hyperhydricity associated with *in vitro* shoots of *Salvia santolinifolia* Bioss. *Brazilian Journal of Biology*, 83, e246904.
- Kadota, M., & Niimi, Y. (2003). Effects of cytokinin types and their concentrations on shoot proliferation and hyperhydricity in *in vitro* pear cultivar shoots. *Plant Cell, Tissue and Organ Culture*, 72:261-265.
- Kemat, N., Visser, R. G., Krens, F. A. (2021). Hypolignification: a decisive factor in the development of hyperhydricity. *Plants*, 10(12):2625.
- Kevers, C., Franck, T., Strasser, R.J., Dommès, J. & Gaspar, T. (2004) Hyperhydricity of micropropagated shoots: a typically stress-induced change of physiological state. *Plant Cell Tissue Organ Culture*, 77:181-191.
- Kharrazi, M., Nemati, H., Tehranifar, A., Bagheri, A., & Sharifi, A. (2011). *In vitro* culture of carnation (*Dianthus caryophyllus* L.) focusing on the problem of vitrification. *Journal of Biological and Environmental Sciences*, 5(13), 1-6.
- Kocaçalışkan, İ. (2017). Bitki Doku Kültürleri Kitabı (Organ, Doku ve Hücre) (ISBN: 978-975-8201-47-6). DPÜ, Fen Edebiyat Fakültesi, Biyoloji Bölümü, Kütahya.
- Lotfi, M., Bayouhd, C., Werbrouck, S., & Mars, M. (2020). Effects of meta-topolin derivatives and temporary immersion on hyperhydricity and *in vitro* shoot proliferation in *Pyrus communis*. *Plant Cell, Tissue and Organ Culture (PCTOC)*, 143:499-505.

- Mahmoud, K. B., Najjar, A., Jedid, E., Jemai, N., & Jemmali, A. (2017). Tissue culture techniques for clonal propagation, viral sanitation and germplasm improvement in strawberry (*Fragaria* × *ananassa* Duch.).
- Marques, M. P., Martins, J., de Carvalho, L. A. B., Zuzarte, M. R., da Costa, R. M., & Canhoto, J. (2021). Study of physiological and biochemical events leading to vitrification of *Arbutus unedo* L. cultured *in vitro*. *Trees*, 35:241-253.
- Muneer, S., Park, Y. G., & Jeong, B. R. (2018). Red and blue light emitting diodes (LEDs) participate in mitigation of hyperhydricity in *in vitro*-grown carnation genotypes (*Dianthus caryophyllus*). *Journal of plant growth regulation*, 37:370-379.
- Orlikowska, T. (1985). Vitrification problem in the *in vitro* culture of fruit tree rootstocks. In Symposium on In Vitro Problems Related to Mass Propagation of Horticultural Plants (pp. 239-244).
- Ozyigit, I. I., Dogan, I., Hocaoglu-Ozyigit, A., Yalcin, B., Erdogan, A., Yalcin, I.E., Cabi, E. & Kaya, Y. (2023). Production of secondary metabolites using tissue culture-based biotechnological applications. *Front. Plant Sci.* 14:1132555.
- Paek, K. Y., & Hahn, E. J. (2000). Cytokinins, auxins and activated charcoal affect organogenesis and anatomical characteristics of shoot-tip cultures of lisianthus [*Eustoma grandiflorum* (Raf.) Shinn]. *In Vitro Cellular & Developmental Biology-Plant*, 36:128-132.
- Pang, W. Q., Lai, C. S., Mad'Atari, M. F., Pandian, B. R., Ibrahim, M. N. M., Tan, S. T., ... & Subramaniam, S. (2023a). Effect of graphene oxide nanoparticles on *in vitro* growth of *Fragaria* × *ananassa* (Cameron Highlands white Strawberry) and evaluation of genetic stability using DAMD and ISSR markers. *Plant Physiology and Biochemistry*, 204:108104.
- Pang, W. Q., Tan, S. T., Mad'Atari, M. F., Yoong, I. C. K., & Subramaniam, S. (2023b). Establishment of an efficient micropropagation protocol for Cameron Highlands White Strawberry (*Fragaria* × *ananassa*) using light emitting diodes (LEDs) system. *South African Journal of Botany*, 157:189-200.

- Pasqualetto, P. L., Zimmerman, R. H., & Fordham, I. (1986). Gelling agent and growth regulator effects on shoot vitrification of ‘Gala’ apple *in vitro*. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 111(6):976-980.
- Pasqualetto, P.L., Zimmerman, R.H., Fordham, I. (1988). Influence of cations and gelling agent concentrations on vitrification of apple cultivars *in vitro*. *Plant Cell, Tissue and Organ Culture*, 14:31–40.
- Polivanova, O. B., & Bedarev, V. A. (2022). Hyperhydricity in plant tissue culture. *Plants*, 11(23):3313.
- Rodríguez, R., Tamés, R. S., Durzan, D. J. (2012). Plant aging: basic and applied approaches. Springer, Berlin
- Sacco, E., Mascarello, C., Pamato, M., Musso, V., Ruffoni, B. (2015). Evaluation of temporary immersion system for *in vitro* propagation of *Stevia rebaudiana* Bertoni. *Acta Horticulturae*, 1083:327-333.
- Scholten, H. J., & Pierik, R. L. M. (1998a). Agar as a gelling agent: chemical and physical analysis. *Plant Cell Reports*, 17:230-235.
- Scholten, H. J., & Pierik, R. L. M. (1998b). Agar as a gelling agent: differential biological effects *in vitro*. *Scientia horticulturae*, 77(1-2):109-116.
- Shen, H.L. (2005). Plant Tissue Culture. China’s Forestry Press, Beijing (in Chinese).
- Tian, D., Tilt, K.M., Dane, F., Woods, F.M., Sibley, J.L. (2010). Comparison of shoot induction ability of different explants in herbaceous peony (*Paeonia lactiflora* Pall.). *Sci. Hortic.* 123(3):385–389.
- Shen, M., Wang, Q., Yu, X., & da Silva, J. A. T. (2012). Micropropagation of herbaceous peony (*Paeonia lactiflora* Pall.). *Scientia Horticulturae*, 148:30-38.
- Singha, S., Townsend, E. C., Oberly, G. E. (1990). Relationship between calcium and agar on vitrification and shoot-tip necrosis of quince (*Cydonia oblonga* Mill.) shoots *in vitro*. *Plant Cell Tissue Organ Culture*, 23:135–142.
- Sonriza, M. (1997). *In vitro* shoot vitrification (hyperhydricity) in shallot (*Allium cepa* var. gr. aggregatum). *Philipp. J. Crop. Sci.*, 22:14–22.
- Sreelekshmi, R., Siril, E. A., & Muthukrishnan, S. (2022). Role of biogenic silver nanoparticles on hyperhydricity reversion in *Dianthus chinensis* L. an *in vitro* model culture. *Journal of Plant Growth Regulation*, 41:23–39.

- Szopa, A., Kubica, P., Snoch, A., & Ekiert, H. (2018). High production of bioactive depsides in shoot and callus cultures of *Aronia arbutifolia* and *Aronia× prunifolia*. *Acta Physiologiae Plantarum*, 40, 1-11.
- Topcu, Ő., & lgeen, H. (2015). Bitki sekonder metabolitlerinin biyoreaktörlerde retilmesi. *T¼rk Bilimsel Derlemeler Dergisi*, (2), 9-29.
- Umarusman, M. A., ŐimŐek, ., Biçen, B., Serçe, S., & Kaçar, Y. A. (2020). Farklı bg¼rtlen (*Rubus fruticosus* L.) eŐitlerinin klasik ve yeni nesil doku k¼lt¼r¼ teknikleri ile mikroçoğaltım olanaklarının araştırılması. *Alatarım*, 19(2):75-84.
- Van der Westhuizen, A. (2014). The use of meta-topolin as an alternative cytokinin in the tissue culture of *Eucalyptus* species. *Acta Horticulturae*, 1055:25–28.
- Vleitez, A. M., Ballester, A., San-Jose, M. C., and Vieitez, E., (1985). Anatomical and chemical studies of vitrified shoots of chestnut regenerated in vitro. *Physiol. Plant.*, 65:177-184.
- Zainel, A. A., & Hepaksoy, S. (2018). Bir idris anacı ‘pontaleb’in doku k¼lt¼r¼ ile oğaltılma olanaklarının araştırılması. *Ege Üniversitesi Ziraat Fak¼ltesi Dergisi*, 55(1):83-88.
- Zrate-Salazar, J. R., de Souza, L. M., de Moraes, M. B., Neto, L. P., Willadino, L., Gouveia-Neto, A., & Ulisses, C. (2020). Light-emitting diodes and gas exchange facilitation minimize hyperhydricity in *Lippia grata*: Physiological, biochemical and morpho anatomical aspects. *South African Journal of Botany*, 135:164-171.

BÖLÜM 10

KANATLILARIN BESLENMESİNDE VERİMİ KISITLAYAN YEM ÖĞELERİ: ANTİNUTRİSYONEL FAKTÖRLER

Arş. Gör. Yusuf Talha İÇÖĞLU^{1*}
Prof. Dr. Mevlüt KARAOĞLU²

DOI: <https://dx.doi.org/10.5281/zenodo.14541804>

^{1*} Atatürk Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Zootekni Bölümü, Erzurum, Türkiye.
*yusuftalhaicoglu@gmail.com

² Atatürk Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Zootekni Bölümü, Erzurum, Türkiye.
karaoglu@atauni.edu.tr

GİRİŞ

D¼nya n¼fusu hızla artmaktadır. N¼fus artış oranı 2023 yılında yaklaşık %0,9/yıl civarında olup bu oran 74 milyon kişinin her yıl d¼nya n¼fusuna eklenmesi anlamına gelmektedir (Vikipedi, 2024). Artan n¼fus için birinci derecede endiŖe kaynağı yeterli ve kaliteli gıdanın temin edilmesi meselesidir. Bahse konu ihtiyacın karŖılanmasında tarımsal üretim etkin s¼rd¼r¼lmesi gerekmektedir. İnsan beslenmesinde gıdaların kalitesi, i¼erdiđi besin maddelerinin miktarı ve v¼cut tarafından değerlendirilebilirliği ile yakından iliŖkilidir. N¼fus artışı ve bitkisel r¼ne dayalı beslenme alışkanlıkları göz n¼ne alındığında özellikle hayvansal kaynaklı proteine olan talep fevkalade artış göstermektedir. Sağlıklı bir hayat s¼rmek ve ideal b¼y¼me-geliŖmeyi sağlamak için ihtiya¼ duyulan protein miktarını bitkisel ve hayvansal kaynaklardan dengeli bir Ŗekilde temin etmek esastır (Wu ve ark., 2014). G¼n¼m¼zde hayvancılık kolları arasında protein ihtiyacının karŖılanmasında kanatlı hayvanlar hem yumurta hem de et verimi ile önemli bir yere sahiptir.

Arzu edilen miktar ve kalitede r¼n elde etmek için kanatlıların yeterli ve dengeli bir rasyonla beslenmesi gerekir. Kanatlı rasyonlarını oluŖturan hammaddeler çoğunlukla bitkisel kökenli yemlerden meydana gelmiŖ olup b¼y¼k bir kısmını tahıllar, baklagiller ve k¼speler oluŖturmaktadır (Deniz, 2014). Söz konusu yem hammaddeleri kanatlıların ihtiya¼ duyduğu protein, karbonhidrat, yağ, enerji, vitamin ve mineral gibi önemli besin maddelerini b¼nyesinde bulundurmaktadır. Ancak bu avantajlı yönlerinin yanı sıra bitkiler

büyüme döneminde metabolizmaları tarafından meydana getirilen ve bazı durumlarda zararlı etkileri olan maddeleri de barındırırlar. Bu metabolik ürünlere genel olarak “antinutrisyonel faktörler” adı verilmektedir.

Antinutrisyonel faktörler (ANF) bitkilerin sekonder metaboliti olup aslında onları otçul hayvanlar, böcekler, hastalıklar ve olumsuz yetiştirme koşullarından korumak gibi bir görev de üstlenmişlerdir. ANF’ler genelde baklagiller, tahıllar ve kuruyemişler ile bazı bitkilerin yaprak, kök ve meyvelerinde bulunur (Nath ve ark., 2022). Bu maddelerin konsantrasyon durumuna göre olumlu veya olumsuz etkileri olabilir (Redden ve ark., 2005; Shi ve ark., 2004). Birçok antinutrisyonel faktör bulunmakla beraber bunların çoğu fazla miktarda alındığında hayvanlarda besin maddelerinin biyoyararlılığını olumsuz etkilemektedir. Sonuç olarak antinutrisyonel faktörler kanatlıların yemlerden yeterli oranda yararlanmasını engelleyerek verimde düşüğe sebep olurlar. Hatta bazı dozları ciddi sağlık sorunlarına sebep olarak hayvanların ölümüne neden olabilir.

Tüm bu durumlar göz önüne alındığında kanatlıların beslenmesinde kullanılan yemlerin besin madde kompozisyonunun iyi bilinmesi, mümkünse antinutrisyonel faktörler açısından sıkıntı oluşturmayacak yemlerin seçilmesi veya bu faktörler açısından sıkıntı oluşturabilecek yemlerin beslemede kullanılmadan önce gerekli yöntemlere tabi tutularak ilgili bileşikler açısından zararsız hale getirilmesi gerekmektedir (Martin ve ark., 1991; Horwitz ve ark., 1975).

Bu çalışmada, kanatlıların beslenmesinde kullanılan yemlerde bulunan antinutrisyonel faktörlerin meydana getirdiği sorunlar ve giderilmesine yönelik çözüm önerileri tartışılmıştır.

1. ANTİNUTRİSYONEL FAKTÖRLER

Antinutrisyonel maddeler: fenolik bileşikler, glikozitler, alkaloidler, nişasta tabiatında olmayan polisakkaritler, yağlarda bulunan antinutrisyonel faktörler, antinutrisyonel proteinler, toksik amino asitler, östrojenik etkili maddeler, nitrat ve nitritler ile mineral ve vitaminleri bağlayan maddeler olarak sınıflandırılabilir.

1.1. Glikozitler

Glikozitler karbonhidrat olmayan bir grup ile şeker molekülünün ester bağlarıyla bağlanmasından oluşur. Bitkilerdeki glikozit miktarı bitkinin fizyolojik dönemi, gübreleme ve iklim şartları gibi faktörlere bağlı olarak değişiklik gösterir (Baydar, 2007). Bitkinin yetiştiği toprakta azot mineralinin fazla, fosforun ise az miktarda bulunması o bitkide glikozitlerin yoğun olarak oluşmasına neden olmaktadır.

Siyanür Oluşturan Glikozitler

Siyanür, çeşitli bitkilerde bulunan zehirli bir maddedir (Curry ve Patrick 1991). Keten tohumunda bulunan linemarin siyanürlü bir glikozit olup linaz enzimiyle reaksiyona girdiğinde hidrosiyanik asit (HCN) oluşturur. Bu durumun oluşmaması için keten tohumları yüksek sıcaklık uygulamasına maruz bırakılarak linaz enziminin hidrolizi sağlanmaktadır. Sonuç olarak hidrosiyanik asit oluşmadığından

herhangi bir sorun gözlemlenmemektedir. Keten tohumunda bulunan antibesinsel faktörler nedeniyle ilgili yemin kanatlı rasyonlarında kullanması durumunda büyümede gerilik, yemden yararlanmada azalma, yumurta ağırlığı ve kalitesinde düşme, anormal solunum ve sinirlilik gibi istenmeyen durumlara neden olduğu ve ısı ile işlem görmüş keten tohumu kullanılmasıyla bu sorunların ortadan kaldırılabileceği bildirilmiştir (Jia ve ark., 2008).

Glukosinolatlar

Sülfür ve azot içeren glukosinolatlar bitkinin kimyasal savunma sisteminde kullandığı sekonder metabolitler olup antioksidan, antimikrobiyal ve antikanserojen özelliğindedir. Glukosinolatlar başlıca lahana, brokoli ve Brüksel lahanasında bulunur ve 1,5–2,0 mg/g düzeyleri seviyesindedir. (Kristal ve Lampe, 2002; Ehlers ve ark., 2015). Bu maddeleri tüketen hayvanlarda tiroid bezinde büyüme, karaciğer hastalıkları ve canlı ağırlık kaybı meydana gelmektedir (Seyis ve Aydın, 2014).

Kümes hayvanları ve domuzlar rasyonlarında 2,00 ve 2,50 mol/g seviyesinde glukosinolatı tolere edebilir. Çoğu kanola yan ürünündeki toplam glukosinolat içeriği orta düzeydedir (<10 mol/g). Bu nedenle, modern kanola çeşitlerinden elde edilen yan ürünler yem tüketimini etkilemezken, orijinal kanola yan ürünlerinin rasyona dahil edilmesi (toplam glukosinolat içeriği ≤ 35 mol/g olan) etlik piliç civcivlerinin yem tüketimini günde 4 g azaltmıştır (Woyengo ve ark., 2017).

Pirimidin Glikozitleri

Baklagil danelerinde bulunan pirimidin glikozitlerinden olan vicin ve convicin, özellikle fiğ ve bakla denelerinde bulunur ve rasyonda baklagil kullanımını kısıtlar (Crépon ve ark., 2010). Danenin doğrudan kanatlılara ve tek midelilere verilmesi hayvanlarda performansın azalmasına, amino asit emiliminde düşmeye ve pankreasta büyümeye neden olmaktadır. Bu bileşikler sıcaklığa oldukça dayanıklıdır. Dolayısıyla baklagil tohumlarında bulunan antibesinsel faktörlerin etkilerini gidermek için bir taraftan fiziksel ve kimyasal teknikler geliştirilmesine yönelik araştırmalar yürütülürken diğer taraftan da bitkideki konsantrasyonlarını düşürmek adına ıslah çalışmaları yapılmaktadır (Sezmiş ve Macit, 2018). Yumurtacı tavukların rasyonlarında glikozitlerin bulunması yumurtadan çıkış gücünün azalmasına, küçük yumurta üretimine, yumurta kabuğunun incelmeye ve yumurtada kan lekesinin artmasına yol açarlar (Yalçın, 2002).

Steroid Glikozitleri

Saponinler genellikle bitkilerde bulunan uçucu olmayan yüzey aktif sekonder metabolitlerdir (Vincken ve ark., 2007; de La Garza ve ark., 2011). Saponinler glikozidik bağ ile bir veya daha fazla oligosakkarit grubuna bağlı bir steroid veya triterpenoid aglikon içeren bileşiklerdir (Vincken ve ark., 2007). Triterpenoid saponinler genellikle baklagiller (örneğin soya fasulyesi, fıstık, nohut, bakla ve mercimek), ayçiçeği çekirdeği, ıspanak yaprağı, çay yaprağı, kino tohumu, şeker pancarı ve allium türlerinde bulunur. Buna karşılık steroid saponinler genellikle yulaf, yuka, domates çekirdeği, çemen tohumu, kuşkonmaz, patlıcan ve

yam fasulyesi gibi bitkilerde bulunur (Fenwick ve ark., 1991; Moses ve ark., 2014).

Yüksek konsantrasyonlarda saponinler bitkilere acı bir tat verir bu sebeple antinutrisyonel faktör olarak kabul edilirler. Boğazı tahriş edici yapıları tüketimlerinin azalmasına yol açmakta ve kullanılmasını önemli bir ölçüde sınırlandırmaktadır (Shi ve ark., 2004). Saponinler ayrıca amilaz, glukosidaz, tripsin, kimotripsin ve lipaz gibi sindirim enzimlerini inhibe edici aktivite göstererek protein, karbonhidrat ve yağ sindirilebilirliğini azaltmaktadır (Liener, 2003; Ali ve ark., 2006; Birari ve Bhutani, 2007; Lee ve ark., 2015; Ercan ve El, 2016).

Saponinler yağda çözünen vitaminlerle benzer yapıya sahip çeşitli sterollerle kompleksler oluşturarak vitamin emilimini azaltmaktadır (Cheeke, 1971). Samtiya ve ark., (2020) bir çalışmada triterpenoid saponinler içeren *Gypsophila* ve *Quillaaja* kullanılarak hazırlanan bir diyetin civcivlere yedirilmesi sonucunda rasyondaki A ve E vitaminlerinin emiliminin azaldığını bildirmiştir.

Yüksek oranda saponin içeren bitkileri tüketen koyunlarda (vücut ağırlığına göre %0.5) ve bir haftalık civcivlerde (vücut ağırlığına göre %2-3) zehirlenmeler görülmüştür (Williams, 1978). Piliç rasyonlarına %0,10 veya %0,15'in altında saponin ilave edilmesiyle büyümenin etkilenmediği, ancak bu oranların üzerinde ilavenin büyüme baskıladığı tespit edilmiştir (Francis ve ark., 2002). Kümes hayvanları saponine domuzlardan daha hassastır. Yemdeki %0,4-0,5 oranındaki

saponin kanatlılarda yem tüketimini, yumurta üretimini ve vücut ağırlığını azaltmaktadır (Ramteke ve ark., 2019).

1.2. Alkaloidler

Alkaloidler, terapötik özelliklere sahip çok çeşitli bitki türlerinde bulunan sekonder metabolitlerdir. *Amaryllidaceae*, *Compositae*, *Leguminosae*, *Liliaceae*, *Papaveraceae* ve *Solanaceae* familyasına mensup bitkiler özellikle alkaloidler açısından zengindir. Solanin ve tomatin yaygın örneklerdir. Solanin patateslerde az konsantrasyonlarda bulunurken, tomatin domateslerde bulunur. Alkaloidlerin sinir sistemi üzerindeki etkileri elektrokimyasal iletimi engellemeleri veya hatalı bir şekilde artırmaları nedeniyle antibesinler olarak tanımlanmaktadır.

Yapısında bir şeker parçası ve bir alkaloid bulunduran glikoalkaloidler, hidrolizinde aglikon veren bileşiklerdir (Edwards ve Cobb, 1996). Alkaloidler, tüketildiğinde hayvanlarda zehirlenmelere neden olur. Civev rasyonlarına katılan sarı lüpen oranının %10'u geçmemesi gerektiği, aksi halde canlı ağırlık artışının azaldığı rapor edilmiştir.

1.3. Fenolik Bileşikler

Kimyasal yapılarında benzen halkası içeren maddelere fenolik bileşikler denilmektedir. Hidroksibenzoik asitler, hidroksisünamik asitler ve flavanoidler fenolik maddelerdir (Gürsoy ve Gökçe, 2001). Bitkilerde bulunan fenolik bileşikler yemde istenmeyen koyu bir rengin oluşması ile amino asitlerle birleşerek bazı mineral maddelerin (çinko vs.) ve besin maddelerinin yararlanılabilirliğini azaltmaktadır (Açıkgöz, 2001).

Gossipol

Gossipol, pamuk tohumu kotiledonlarındaki salgı bezlerinde bulunur; ancak toksik etki yapan gossipol serbest şekilde bulunandır (Özkan, 1974). Bitkinin türü, bitkinin yetiştirildiği toprak ve gübreleme, yağ ekstraksiyon metodu, linter, tohum kabuğu ve iklim şartları gibi faktörler tohum veya küspede bulunan gossipol oranını etkilemektedir (Nagalakshmi ve ark., 2007). Bu bileşik genç bitki yapraklarında yüksek düzeyde olup bitki olgunlaştıkça miktarı azalır. Pamuk tohumunda bulunan gossipol, tohumun işlenmesinden etkilenmemektedir. Kanatlı ve tek mideli hayvanların karma yemlerinde kullanımı bu nedenle oldukça sınırlıdır. Belirli sınırlarda ve demir takviyesi ile hazırlanan rasyonlar gossipol toksisitesini azaltmaktadır. Yetiştiricilikte en önemli toksik etkisi üreme sisteminde (erkek ve dişi) bozukluklar oluşturmasıdır (Gadelha ve ark., 2014). Gossipol civcivlerde gelişmenin gerilemesine, yumurta sarısında bozulmaya yumurta boyutunda küçülmeye neden olmaktadır (Berardi ve Goldblatt, 1969).

Tanen

Tanenler bitki yapraklarında, meyvelerinde ve kabuklarında oluşan sekonder bileşiklerdir (Aktaş ve Akkan, 2011; Timotheo ve Lauer, 2018). Tanenler büyük ölçüde içeceklerde, narda, meyve sularında ve kakao çekirdeklerinde yoğunlaşmıştır, ancak sorgum ve arpa gibi tahıllarda da bulunurlar (Serrano ve ark. 2009; Morzelle ve ark., 2019). Hayvan besleme açısından ise tanenler yapısına, miktarına, hayvanın türü ve fizyolojik durumuna göre olumlu ve olumsuz etkilere sebep

olabilirler (Ünver ve ark., 2014). Hidrolize tanenler (HT) ve kondanse tanenler olarak ikiye ayrılırlar (Akande ve ark., 2010). HT'ler genellikle bitkilerde daha az miktarda bulunur ve hafif asitler ve bazlar tarafından karbonhidrat ve fenolik asitlere kolayca hidrolize edilir. Tanen-protein kompleksleri, sindirim enzimlerinin inaktivasyonuna, protein substratının iyonizasyonuna, demirle etkileşim yoluyla protein sindirilebilirliğinin azalmasına ve B vitamini ile kompleks oluşturmaya sebep olabilir (Salunkhe ve Chavan, 1989). Bu bileşikler ayrıca yemlerde lezzetin azalmasına ve hayvanlarda büyüme hızının düşmesine neden olmaktadır (Kiranmayi, 2014).

Rasyonda bulunan taneni, keçiler %8-10 düzeyinde, sığırlar %3-5, kanatlılar ise %1 oranında tolere edebilmektedir (Begovic ve ark., 1978). Tanenlerin yüksek miktarda tüketiminin kanatlı hayvanlar üzerindeki etkileri canlı ağırlıkta ve yumurta veriminde azalma, büyümede gerileme, yem tüketimini ve yemden yararlanmada azalma şeklindedir. Bununla birlikte tanenler nişasta sindirilebilirliğini olumsuz etkiler ve rasyonda %5 oranında tüketiminde ölümlere neden olmaktadır (Etuk ve ark., 2012; Çalışlar, 2018).

1.4. Yağlarda Bulunan Antinutrisyonel Faktörler

Yağlarda bulunan antinutrisyonel faktörler yağın kalitesini olumsuz etkiler. Kolza tohum yağında bulunan erusik asit ve pamuk tohum yağında bulunan siklopropanoid yağ asitleri toksik etkiye sebep olmaktadır. Kanatlılarda yağlar yüksek sıcaklıkta canlı ağırlığın

azalmasına ve kaslarda lipit oksidasyonuna duyarlılığın artmasına neden olur (Küçük, 2019).

Erusik Asit

Erusik asit tekli doymamış uzun zincirli bir yağ asidi olup kolza tohumu yağı %20 ile %55 oranında erusik asit içermektedir. Yüksek oranda erusik asit bulunan kolza çeşitlerinin kullanılması yasaklanmış; sonrasında yağında erusik asit bulunmayan 00-tipi kolza çeşitleri geliştirilerek yaygın olarak yetiştirilmeye tekrar başlanmıştır. Bu çeşitlere de kanola denilmiştir. Kolzanın içerdiği yüksek orandaki erusik asit ve glukosinolatın hayvanlarda tiroid bezinin büyümesine, karaciğer rahatsızlıklarına ve bağırsak iltihaplanmalarına neden olduğu bildirilmiştir (Seguin, 1997). Kutlu, (2015) kolza yağının içerdiği erusik asidin yumurtanın kokusunu olumsuz etkilediğini ve yumurtaya odun talaşı kokusu verdiğini ifade etmiştir.

Siklopropenoid Asit

Pamuk tohumu yağında bulunan malvalik ve sterkulik gibi siklopropenoid yağ asitleri yumurta beyazının pembeleşmesine yol açmaktadır (Yıldırım ve Öztürk, 2013). Pamuk tohumu küspesinde siklopropenoid yağ asitleri oranı %0,0021 ile %0,017 kadardır. Bu asitlerin yumurta tavuklarında zararlı etkilerini ortaya çıkarması için rasyonda lipidlerin %0,2'den daha fazla olması gereklidir (Phelps ve ark., 1965). Siklopropenoid yağ asitlerinin zararlı etkilerinin bazı yöntemlerle giderilebildiği bildirilmiştir. Bunlar: ısıtma, rasyona demirli bileşiklerin ilavesi, kimyasal işlem, ıslah çalışmaları vb. muamelelerdir (Yıldırım ve Öztürk, 2013).

1.5. Nişasta Tabiatında Olmayan Polisakkaritler (NOP)

Bu maddeler hücre duvarı polisakkaritleri olarak da bilinir. NOP'ler fiziksel ve kimyasal olarak kompleks bileşiklerdir. Selüloz, hemiselüloz, oligasakkaritler ve pektinler bu grupta yer almaktadır. Kanatlı hayvanlar tek mideli canlılar olup sindirim sistemlerinden bu bileşikleri parçalayan enzimler salgılanmamaktadır. Bu nedenle NOP'ler kanatlı hayvanlarca enzimatik olarak parçalanamaz, hayvanların performansını olumsuz etkiler ve antinutrisyonel faktör olarak adlandırılırlar. Genç kanatlı rasyonlarında bu bileşikleri içeren yem hammaddeleri kullanıldığı zaman yemlere enzim katılması veya tahılların besleme değerini yükseltmek için ıslatma ve fermentasyon gibi tekniklerin kullanılması gerekmektedir (Bölükbaşı ve ark., 2019). Ayrıca kanatlı hayvanlarda, suda çözünebilir NOP'lerin, enzimatik olarak sindirim organlarında parçalanabilmesi için karma yeme β -glukanaz ve ksilinaz enzimleri ilave edilir (Leeson ve Summers, 2001).

1.6. Antinutrisyonel Proteinler

Antinutrisyonel protein özelliğinde olan ve doğada yaygın olarak bulunanlar; proteaz inhibitörleri (tripsin ve kimotripsin) ve lektinlerdir. Kanatlı rasyonlarının önemli bir kısmını oluşturan baklagiller ve tahıllar proteaz inhibitörlerini içermektedir. Bu inhibitörler hayvanların gastrointestinal sisteminde yer alan enzim sınıflarının (serin, sistein, aspartil ve metalloproteinazlar) hepsinin işlevini egele edebilmektedir (Mareš ve ark., 1989; Otto ve Schirmeister 1997; Christeller ve ark., 1998; Haq ve ark., 2004). Proteaz inhibitörleri substratları taklit ederek enzimin aktif bölgesine bağlanır ve ayrılmayan bir inhibitör-enzim

kompleksi oluştururlar. Sonuç olarak enzimin aktif bölgesi inhibe olur ve enzimin proteaz aktivitesi etkili bir şekilde engellenir (Lawrence ve Koundal, 2002).

Tripsin inhibitörleri (TI) artan pankreas salgılama aktivitesi, artan pankreas hipertrofisi ve azalan protein sindirilebilirliği ile ilişkilendirilmiştir. Sıçanlara ve tavuklara kısmen saflaştırılmış tripsin inhibitörleri ile desteklenmiş çığ soya fasulyesi verilmesini içeren besleme çalışmaları önemli pankreas hipertrofisi ve bol miktarda enzim salgılanması ile sonuçlanmıştır (Kwon ve ark., 2022).

Normal pankreas fonksiyonları değişir ve pankreasın salgılama aktivitesinde artışa yol açar. Pankreas negatif geri bildirim mekanizmasıyla kontrol edilir; enzim salgılanması bağırsaktaki tripsin seviyesiyle ters orantılıdır. Bu nedenle vücutta sindirim enzimleri tripsin, kimotripsin ve elastazın aşırı üretimi vardır.

Lektinler

Bitkilerde bulunan protein moleküllerinden olup karbonhidrat bağlayıcı özellikleriyle bilinir. Belirli şeker seçiciliği ile alyuvarları bir araya getirebilen proteinlere "lektinler" denir (Shahidi, 1997). Şeker spesifitesi bilinmediğinde bunlara "hemagglütinin"ler adı da verilir. Lektinler baklagillerde ve soya fasulyesi gibi bazı yağlı tohumlarda yaygın olarak bulunan glikozillenmiş proteinlerdir (Kiranmayi, 2014). Özellikle baklagillerin bünyesinde %2-10 arasında bulunan ve glikoprotein yapısında söz konusu bileşikler hücrelerde karbonhidratlara bağlanabilen moleküllerdir. Hayvanlar tarafından

tüketildikten sonra bağırsak epitel hücrelerine bağlanarak sindirim kanalında besin maddelerinin absorpsiyonlarının azalmasına, diğer besinlerle beraber eozinofil ve lenfosit infiltrasyonuna ve yangı olmasına, bağışıklık sisteminin harabiyetine ve bağırsak kanalında hasara neden olarak bakteri popülasyonunun kan dolaşımıyla temas etmesine izin verir (Muramoto, 2017). Ayrıca piliçlerde gelişme geriliğine, yemden yararlanma oranında azalmaya, buzağılarda ishallerin görülmesine ve endojen azot kaybına, yağ ile glikojenin parçalanmasına ve mineral metabolizmasının bozulmasına da sebep olurlar (Atmaca ve Aksoy, 2015). Lektinlerin bu zararlı etkileri sıcaklık muamelesi ile azalmakta, ancak tamamen yok olmamaktadır (Ergün ve ark., 2002). Kuru baklanın 5 saat suda tutulduktan sonra bu suyun tahliyesinden sonra zararlı etkinin azaldığı; fasulyenin 100°C’de 10 dakika pişirilmesi ile lektin içeriğinin tahrip olduğu, ancak tümüyle parçalanması için pişirmenin 30 dakika sürmesi gerektiği vurgulanmıştır (Lampel ve ark., 2012).

1.7. Toksik Amino Asitler

Bitkilerin tohum ve yapraklarında bir kısım toksik amino asitler bulunur ki bunlar antibesinsel etkili işlevlere sahiptir. Protein tabiatında olmayan söz konusu amino asitler bir ürünün besin değerinin belirlenmesinde önemli rol oynarlar. Bu amino asitlerin beslenme açısından önemli diğer bazı amino asitler üzerine antagonistik etkiye sahip olduğu bildirilmiştir (Liener, 1980). Bell (1971), protein olmayan amino asitlerin esas olarak depolama metabolitleri olarak işlev gördüğünü, aynı zamanda bitkileri çeşitli hayvanların saldırılarına karşı

koruduğunu belirtmiştir. Toksik amino asitlerden bazıları hipoglisin A, indospicine, nörotoksik aminoasitler, mimosin, djenkolik asit, dihidroksifenilalanin (DOPA), a-amino-b-metilaminopropiyonik asit ve selenosistationin'dir. Djenkol fasulyesi tüketildiğinde bazen böbrek yetmezliğine yol açar, buna idrarda kan ve beyaz iğne benzeri kümeler eşlik eder. Bu kümeler, fasulyede serbest halde %1-4 oranında bulunan djenkolik asit olarak bilinen kükürt içeren amino asitlerdir. Bu amino asit hayvanlar için düşük konsantrasyonda bile toksiktir (Akande ve ark., 2010).

1.8. Nitrat ve Nitritler

Nitrat ve nitrit tahıllarda, su, toprak, bitki, hayvansal doku ve artıklarında doğal olarak bulunur. Ayrıca, azotlu gübrenin ihtiyaçtan fazla uygulanması halinde bazı çevre koşullarında bitkiler bu azotun proteinlere dönüşümünü sınırlar. Bu durum bitkide nitrat birikimine neden olur (Kardeş, 2012). Bünyesinde nitrat biriktirmeye en yatkın olan bitkiler pancar, marul, brokoli, ıspanak, turp ve kereviz gibi bitkilerdir (Prasad ve Chetty, 2008). Yüksek miktarda nitrat tüketimi hayvanlarda sancı, kusma ile koma ve ölümlere yol açar (Kaya ve Akar, 2002). Nitrat ruminant hayvanlar için aslında zehirli değildir; ancak rumende nitrite dönüşmesi ile birlikte zehirli etki gösterirler. Nitrit, hemoglobindeki demiri ferro formdan ferri forma okside ederek methemoglobine çevirir. Böylece oksijenin dokulara iletilmemesi halinde titreme, solunum sayısında artma, sallanma gibi semptomlarla birlikte sonuçta ölüm vuku bulur. Bu tabloya “nitrat zehirlenmesi” denilmektedir (Balabanlı ve ark., 2006). Kanatlılarda nitrat ve nitritlerin

karaciğer, böbrek ve immün sistemle ilgili hastalıkların etiolojisinde rol oynayabileceği belirtilmiştir (Atef ve ark., 1991). Bir kümeşte yeterli havalandırma olmaması sonucunda içeride biriken amonyak, nem ile nitrite ve nitrate dönüşerek suluklara karışmaktadır. Bu olay sonucunda yem tüketiminde ve yumurta veriminde azalma, hayvanlarda ölüm ve ölen hayvanların ibiklerinde mavimsi soluk bir renk oluştuğu bildirilmiştir (Oruç ve ark., 2001).

1.9. Östrojenik Etkili Maddeler

Bazı üçgüller, soya fasulyesi ve yonca gibi bitkilerde östrojenik etkili bir dizi madde vardır. Bu bitkilerde isoflovanlar glikozid şeklinde bulunur. İsoflovanlar östrojen reseptörlerine bağlanması ile östrojenik aktivite 1/1.000 veya 1/10.000 oranında azalma gösterir (Önal ve ark., 2004). Funguslar tarafından üretildiği bilinen tek bitkisel östrojen zearalenondur. Bu özelliği sayesinde ticari öneme sahip olan bir mikotoksindir. Zearalenol (Zeranol) anabolik ajan olarak kullanılmaktadır (Ayaz ve Yurttagül, 2008). Doğal bir östrojen olması nedeniyle hayvanlar üzerinde hormonal etkilere sahiptir. Tahıllarda bulunan zearalenon, dişi hayvanlarda fertilitate bozuklukları ve ölü doğumlara, erkek hayvanlarda sperm kalitesinin düşmesine yol açar (Binder, 2007).

1.10. Mineral ve Vitaminleri Bağlayan Maddeler

Birçok bitkisel yem ham maddesi kapsadıkları fitik asit, oksalik asit gibi maddelerden dolayı sindirim kanalından birçok mineral maddenin emilimini azaltarak bunlara olan ihtiyacı artırır. Benzer durum

antivitamin faktörlerin vitaminlerin emilimini engellemesi ve sonuç olarak canlının vitamin ihtiyacının artmasına neden olmasıyla ortaya çıkmaktadır.

Oksalik Asit

Oksalik asit genellikle bitkilerde ve hayvanlarda bulunan bir dikarboksilik asittir. Diyetle alımının yanı sıra insan vücudunda askorbik asit ve glioksilat metabolizması sonucunda da ortaya çıkabilmektedir. Daha önce yapılan çalışmalarda karambola, ıspanak, amarant, bambu filizi, zencefil, badem, kaju, çam fıstığı, fındık, fıstık, su ıspanağı, Çin kurt üzümü, siyah yapışkan pirinç, ejder meyvesi, pirinç fasulyesi, abalone meyvesi ve Çin torreya meyvesinin yüksek seviyelerde oksalat içerdiği bildirilmiştir (Ruan ve ark., 2013). Birçok bitkide bulunan oksalik asit, sindirim kanalından çinko, demir, manganez, bakır, kalsiyum ve fosfor gibi mineral maddelerinin emilimini azaltır ve hayvanların bu mineral maddelerine olan ihtiyacı artırır (Davies, 1979). Şeker pancarı yaprağı ve silajında bulunan oksalik asit tüketildiğinde ishale neden olmakta ve kalsiyum mineralinden yararlanmayı azaltmaktadır. Bu yüzden araştırmacılar oksalik asitin etkisinin azaltılması için rasyonlara ilave kalsiyumun eklenmesini ve şeker pancarı yaprağı silajı ile birlikte rasyonlara yonca kuru otu veya saman gibi yemlerin ilave edilmesi gerektiğini önermişlerdir (Ayaşan ve ark., 2012).

Fitik Asit

Fitik asit, bitkilerde (tohum, kök ve yumrular) (Gürsoy, 2022), hayvanlarda ve toprakta mono ve divalent katyonların (K^+ , Mg^{2+} ve

Ca²⁺) tuzu formunda bulunan bir miyoinositol 1, 2, 3, 4, 5, 6-hekzakis dihidrojen fosfattır. Tahılların, baklagillerin, yağlı tohumların ve kuruyemişlerin ağırlıkça %1-%5'ini kapsayan başlıca fosfor deposudur (Gupta ve ark., 2015). Bitkisel kökenli yem maddelerindeki toplam fosforun yaklaşık olarak üçte ikisi fitik asite bağlanmış olan fitat fosforu şeklindedir (Pallauf ve Rimbach, 1997). Kanatlılarda fitat fosforunu hidrolize eden endojen fitaz enzimi üretimi oldukça düşük olduğundan (NRC, 1994) bitkisel kökenli yem maddelerindeki fosfordan yeterince yararlanamazlar. Yapılan çalışmalarda kanatlı hayvanlarda fitat fosforundan yararlanma oranının % 3 ile %42 oranları arasında değişkenlik gösterdiği bildirilmiştir (Singh, 2002).

Tahıllarda fitat, aleuron tabakasında (buğday ve pirinç gibi küçük tahıllarda yaklaşık %80) ve tohumda bulunurken endospermde yer almaz. Baklagillerde fitat öncelikle endosperm ve kotiledonun protein göve arkelerinde bulunur (yaklaşık %90) (Schlemmer ve ark., 2009). Fitik asit beslenme açısından öneme sahip mineral maddelerle kompleks oluşturur ve bu minerallerin alınamamasına neden olur (Harland ve Harland, 1980). Fitik asitin fosfor dışında başta bakır ve çinko olmak üzere kobalt, mangan, demir, kalsiyum ve magnezyum gibi birçok mineral maddeye karşı güçlü bir affinitesi bulunmaktadır.

Ayrıca fitik asitin proteinlerin emilimini de olumsuz etkilediği, yemin metabolik enerjisinde ve nişasta sindiriminde azalmaya yol açtığı bilinmektedir (Deniz, 2014). Fitik asitin bir diğer olumsuz etkisi yem hammaddelerindeki karbonhidratlarla kompleks yapılar oluşturarak yemin metabolik enerjisinde azalmaya yol açmasıdır. Yemin metabolik

enerjisinin azalmasında, fitik asitin kalsiyumu bağlamak suretiyle nişasta sindiriminde görev alan alfa-amilaz enziminin aktivasyonunu azaltması da etkili olmaktadır. Ayrıca vücutta demir eksikliğine neden olduğu için anemiye de neden olur. Fitik asit yukarıda bahsedilen bütün bu olumsuz etkilerinden dolayı kanatlı hayvanlar için bir antinutrisyonel faktör olarak kabul edilmektedir. (Febles ve ark., 2002). Fitik asitin neden olduğu sorunlardan dolayı rasyona dikalsiyum fosfor (DCP) gibi pahalı inorganik fosfor kaynaklarının ilave edilmesi gerekmekte olup rasyon maliyeti artmaktadır. Ayrıca kanatlıların dışkısında, emilemeyen iz minerallerin bulunması çevre kirliliğine sebep olur (Deniz, 2014). Bu olumsuz etkilerin giderilmesinde kanatlı rasyonlarına fitaz enzimi ilave edilerek yapılan çalışmalarda olumlu sonuçlar elde edilmiştir (Erkek ve Ünlü, 2003; Cufadar ve ark., 2009; Deniz, 2014).

Anti Vitaminler

Anti vitamin faktörleri, bitkilerden izole edilmiş, anti vitamin aktivitesi gösteren çok çeşitli bileşiklerdir. Bu bileşikler;

- 1) Soya fasulyesinde bulunan ve karoteni yok eden ve ısıyla kolayca yok olmayan anti vitamin A faktörü,
- 2) Soya fasulyesinde bulunan ve civcivlerde kalsiyum ve fosfor emilimini engelleyerek raşitojenik etki gösteren ve otoklavlama ile yok edilen antivitamin D faktörü,
- 3) Barbunya fasulyesi, soya fasulyesi, yonca ve bezelyede bulunan civcivlerde ve kuzularda karaciğer nekrozu ve kas distrofisine neden olan ve otoklavlama ile yok edilen antivitamin E faktörü,

- 4) Tatlı yoncada bulunan antivitamin K faktörü,
- 5) Pamuk tohumu, keten tohumu, maş fasulyesi ve hardal tohumunda bulunan tiyaminaz adı verilen antitiamin faktörü,
- 6) Sorgumda bulunan antiniasin faktörü,
- 7) Keten tohumunda bulunan su ekstraksiyonu ve otoklavlama ile yok edilen antipiridoksin faktörü ve
- 8) Çiğ soya fasulyesinde mevcut olan antivitamin B₁₂ faktörüdür (Hill, 2003; Ramteke ve ark., 2019).

2. ANTİNUTRİSYONEL FAKTÖRLERİN GİDERİLMESİNDE KULLANILAN YÖNTEMLER

2.1. Öğütme ve Kepek Ayırma

Günümüzde endüstrilerde tahılların, baklagillerin ve kuruyemişlerin boyutunu küçültme işlemi uygulanmaktadır (doğrama/dilimleme/öğütme). Öğütme, tahıllardan kepek tabakasını çıkarmak için en yaygın kullanılan yöntemdir. Bu teknikle fitik asit gibi antinutrisyonel faktörler ortadan kaldırılmaktadır. Ayrıca öğütme derecesinin artırılmasının ve parçacık boyutunun küçültülmesinin ıslatma, fermentasyon ve çimlendirme gibi diğer işleme yöntemleriyle birleştirildiğinde fitik asitin azaltılması üzerinde daha büyük bir etkiye sahip olduğu bildirilmektedir (Kruger ve ark., 2014). Ancak öğütme yönteminde bu avantajın yanı sıra minerallerin ve liflerin büyük bir kısmı atıldığı için besleme açısından bir dezavantaj meydana gelmektedir (Gupta ve ark., 2015).

Majzoobi ve ark., (2014) tarafından yapılan bir çalışmada buğday kepeğinin parçacık boyutunun küçültülmesinin fitik asit üzerindeki etkileri incelenmiştir. Sonuç olarak kepek parçacığının boyutunun 1.200 µm'den 90 µm'ye düşürülmesiyle fitik asitte %12,5 ile %56,9 oranında istatistiksel olarak anlamlı bir azalma olduğunu göstermişlerdir. Ancak kepek parçacığı boyutunun 1.200 µm'den 90 µm'ye düşürülmesiyle kalsiyum (%0,080 ila 0,046), demir (%0,026 ila 0,016) ve çinko (%0,006 ila 0,003) seviyelerinde azalma olduğu ifade edilmiştir.

Sudan sorgumunun öğütülmesiyle fitik asit seviyesinde meydana gelen azalmanın esas olarak fitik asidin yoğunlaştığı tahılın dış tabakasının çıkarılması nedeniyle meydana geldiği bildirilmiştir (Mahgoub ve Elhag, 1998).

Perlas ve Gibson, (2002) bütün mung fasulyelerini 1 ve 6 saat suda beklettiklerinde fitik asit seviyesinde hiçbir azalma gözlemlenmemişlerdir. Ancak mung fasulyesi ununu suda beklettiklerinde fitat içeriğinin sırasıyla %10 ve %47 oranında azaldığını bildirmişlerdir. Bu araştırma sonucuna göre öğütme işlemi ile birlikte ıslatma uygulamasının daha etkili bir sonuç ortaya koyduğu görülmektedir.

Hotz ve Gibson, (2001) dövülmüş mısırı 1 saat oda sıcaklığında beklettiklerinde fitik asitte %51 oranında azalma gözlemlerken, öğütülmüş mısırdaki ise fitik asitte %57 oranında azalma olduğunu tespit etmişlerdir.

2.2. Islatma

Islatma, g¼nl¼k yaşamda kullanılan kolay bir yöntemdir. Bu yöntem, tahıl ve baklagil danelerinin belirli bir s¼re boyunca tamamen suya batırılmasını ifade etmektedir. Islatma işleminin gıdaların yapısı üzerinde hem fiziksel hem de kimyasal olarak olumlu etkileri bulunmaktadır. Bu yöntem pişirme s¼resinin kısalmasına, tahılların çimlenmesine ve fermentasyonuna yardımcı olmaktadır.

Endojen fitazlar tahıllarda doğal olarak bulunmaktadır. Islatma sırasında endojen fitazlar aktive olmakta ve antinutrisyonel bileşiklere etki etmektedir. Bu yöntemde ıslatma suyunun sıcaklığı ve ıslatma s¼resi önemli rol oynamaktadır. Islatma sadece fitatın uzaklaştırılması için yapılabileceği gibi fermentasyon ve çimlendirme gibi diğer teknikler için ön işlem olarak da uygulanmaktadır (Kumar ve ark., 2010). Öte yandan bu uygulamanın dezavantajı suda çz¼nebilir protein ve minerallerin ıslatma suyuna geçerek kaybolmasıdır (Egli ve ark., 2002; Lestienne ve ark., 2005; Ogbonna ve ark., 2012; Kruger ve ark., 2014).

Çok sayıda çalışma ıslatmanın tam ve đ¼t¼lm¼ř tahıllar ile baklagillerdeki fitat içeriği üzerindeki etkisini araştırmıştır. Lestienne ve ark., (2005) tahılların endojen veya eksojen fitaz ile ıslatılmasının Fe ve Zn gibi minerallerin *in vitro* çz¼n¼rl¼đ¼n¼ %2 ila %23 oranında artırdığını bildirmişlerdir. Greiner ve Konietzny (2006) y¼r¼tt¼kleri bir çalışmada 5 - 6 pH ve 45°C - 65°C arasındaki sıcaklıktaki ıslatmanın fitik asidi önemli bir oranda hidrolize ettiğini tespit etmişlerdir. Nohutta

ıslatma süresinin 2 saatten 12 saate çıkarılmasının fitik asit içeriğini %47,4 oranında azaltarak %55,71'e düşürdüğü bildirilmiştir (Ertaş ve Türker, 2014).

Islatmadan sonra tam sorgum ve mısırdaki önemli miktarda fitat azalması görülmüştür. Öğütülmüş sorgum ve mısır 6-12 saat süreyle ıslatıldığında daha fazla fitat azalması (sırasıyla %39 ve %57) gözlemlenmiştir (Hotz ve ark., 2001; Kruger ve ark., 2014). Islatma sonucunda pirinç, çave, arkar ve üç yapraklı buğday için yaklaşık %19-29 ve Afrika yam fasulyesi için %16-31 oranında fitat azalması tespit edilmiştir (Egli ve ark., 2002; Ene-Obong ve Obizoba, 1996). Benzer şekilde, ön ıslatmadan sonra kahverengi pirinci 10°C'de ıslatmanın fitik asidi %42-59 oranında azalttığı bildirilmiştir (Liang ve ark., 2008).

Islatma uygulaması sonucunda ortaya çıkan farklılıklar yemlerdeki fitat profili, fitatın tahıldaki yeri, fitatın çözünürlüğü, ıslatma süresi ve ıslatma suyunun sıcaklığı, ıslatma çözeltisinin pH'sı, kabuk soyma işleminin yapılıp yapılmaması ve kabuk soyma derecesi ile tahıllar ve baklagillerde daha önce herhangi bir termal işlemin yapılıp yapılmaması durumundaki farklılıklardan kaynaklanabilmektedir (Kumar ve ark., 2010; Gibson ve ark., 2006; Gupta ve ark., 2015).

Protein sindirilebilirliğini iyileştirmek ve antibesin faktörlerinin inaktivasyonunda gereken işlem süresini azaltmak için soya fasulyelerinin ortam sıcaklığında ön işlem olarak ıslatılması çok önemlidir. Islatmanın, proteaz inhibitörlerini ve sindirilemeyen şekerler

gibi diğer istenmeyen faktörleri suya etkili bir şekilde uzaklaştırabildiği ve böylece pişirme süresini %70 oranında azalttığı gözlemlenmiştir.

Soya fasulyelerinin iki saat suda bekletilmesi ve ardından ısıtma işlemi uygulanması, ısıtılmamış fasulyelerle karşılaştırıldığında genel inaktivasyonda %40'lık bir artışla sonuçlanmıştır (Bayram ve ark., 2004).

2.3. Fermentasyon

Fermentasyon, gıda tanelerindeki antinutrisyonel faktörlerin seviyelerini düşüren ve minerallerin biyoyararlılığı ile tahılların besin değerini artıran önemli uygulamalardan biridir (Badau ve ark., 2005; Simwaka ve ark., 2017). Fermentasyon, Afrika'da tahıl ürünlerini yenilebilir hale getirmek ve ayrıca bu gıdaların besin kalitesini ve güvenlik yönlerini artırmak için kullanılan işleme yöntemlerinden biridir, çünkü tahıllar doğal/çiğ formlarında kolayca tüketilemez (Galati ve ark., 2014). Fermentasyonun çimlendirme gibi diğer işlemlerle kombinasyonu, fermentasyonun tek başına kullanılmasından daha etkilidir. Fermentasyon sırasında fitik asitteki azalma, mikroorganizmaların fermentasyonu sonucu açığa çıkan fitaz enziminin etkisine bağlanabilir. Bu nedenle tahıl bazı gıdalar kesinlikle fermentasyon işleminden sonra tüketilmelidir.

Fitik asit, tahıllarda Zn, Fe, Ca ve proteinler gibi metal katyonlarla kompleksler halinde bulunur. Fitik asidin enzimlerle hidrolizi ekşi maya fermentasyonu gibi doğal fermentasyonla sağlanabilen optimum

bir pH (genellikle pH 4,5'in altında) gerektirmektedir (Hayta ve Hendek Ertop, 2017).

Laktik asit bakterileri (LAB) tarafından tahılların fermentasyonunun, proteoliz ve metabolik sentez yoluyla serbest amino asitleri ve türevlerini artırdığı bildirilmiştir. Fermentasyonun, lisin, metiyonin ve triptofan gibi esansiyel amino asitlerin içeriğini artırarak tahılların besin değerini iyileştirdiği gösterilmiştir (Mohapatra ve ark., 2019). Spontan fermentasyon olarak da adlandırılan doğal fermentasyon, mikrobiyal ve tahıl fitazlarının etkisiyle tahıllarda ve baklagillerde fitik asitte büyük bir azalma sağlamaktadırlar. Zira, tahıl ve mikrobiyotaya dayalı fitazlar, fermentasyon sırasında fitik asit üzerinde etki göstermektedir. Samia ve ark., (2005) çimlendirme ve fermentasyonun darının kimyasal bileşiminde önemli değişikliklere neden olduğunu ve bu işlemlerin antinutrisyonel faktörleri ortadan kaldırarak darının besin değerini artırdığını bildirmişlerdir. Darı tanesinin 12 ve 24 saatlik fermentasyonu sonucunda proteaz inhibitörleri, fitik asitler ve tanenler de dahil olmak üzere çeşitli antibesinlerin azaldığı gözlemlenmiştir (Coulibaly ve ark., 2011). Kaur ve ark., (2012) çimlendirilmiş darının *Lactobacillus brevis*, *L. fermentum*, *Saccharomyces diasticus* ve *S. Cerevisiae*'nin saf kültürleriyle 30°C'de 72 saat fermente edilmesiyle fitat içeriğinin %88,3 oranında azaldığını bildirmişlerdir.

Samtiya ve ark., (2020), tahılların çoğunun fermentasyonunda *Lactobacillus spp.*'nin önemli bir rol oynadığını bildirmiştir. *Lactobacillus spp.* ve *Streptococcus spp.* pirinç fermentasyonu için çok uygun bakteriler değildir. Bu mikroorganizmalar nişasta

sakkarifikasyonu için gerekli olan amilazdan yoksundurlar (Ray ve ark. 2016). Tahıl tanelerinin laktik asit fermentasyonu için doğal ortam olarak kullanıldığı durumlarda, fermentasyondan önce veya sırasında amilaz eklenmesi gerekir veya amilolitik *bifido* bakterileri kullanılmalıdır; çünkü bu bakteriler tahıl nişastasının sakkarifikasyonu için gerekli olan amilazı yeterli düzeyde içerirler (Kim ve ark., 2000). Ragon ve ark., (2008) yaptıkları bir çalışmada pirinç ununu doğal fermentasyona tabi tutarak mikrobiyal enzimlerin etkisiyle fitik asidin (IP6) IP5, IP4, IP3, IP2, IP1 ve miyoinositol gibi daha düşük formlara indirindiği sonucuna varmışlardır.

Antibesin faktörleri üzerinde fermentasyonun etkisini kontrol etmek için mısır unu, 12 saatlik aralıklarla standart yöntemle bir laktik asit bakteri konsorsiyumu ile fermente edilmiştir (Ogodo ve ark., 2019). Sonuç olarak artan fermentasyon süresiyle birlikte fermente mısırdaki tanen, polifenol, fitat ve tripsin inhibitör aktivitesi de dahil olmak üzere antibesinlerde istatistiksel olarak önemli azalmalar gözlemlenmiştir. Ogodo ve ark., (2019) çalışma sonucunda antibesin içeriklerinin kendiliğinden fermentasyona kıyasla LAB-Konsorsiyum fermentasyonunda daha fazla azaldığı sonucuna ulaşmışlardır.

Etsuyankpa ve ark., (2015) manyok ürünleri üzerine yaptıkları bir çalışmada mikroorganizmalar tarafından yapılan fermentasyonun siyanür, tanen, fitat, oksalat ve saponin düzeylerini sırasıyla %86, %73, %72, %61 ve %92 oranında ve önemli ölçüde azalttığını tespit etmişlerdir.

Yapılan bir çalışmada antibesin faktörlerini azaltmak ve bu tür gıda karışımlarının besin bileşimini iyileştirmek için mikroorganizmaları, özellikle *Lactobacillus plantarum*'u ve ürettiği enzimleri kullanmanın etkili olduğu rapor edilmiştir. Kendiliğinden fermente olan tahıllardan izole edilen, tanımlanan ve karakterize edilen dokuz *Lactobacillus plantarum* suşu, baklagillerin fermentasyonu için bol miktarda *alfa-galaktosidaz* üretimine dayanarak seçilen araştırmada örnekler 5 gün boyunca fermentasyona tabi tutulmuş ve antibesin faktörlerinin azalma dereceleri takip edilmiştir. Fermentasyonun, ham örneklerdeki tanen içeriğini 1,93'ten 0,12 mg/g'a düşürdüğü tespit edilmiştir. Fitat içeriği 1,16'dan 0,04 mg/g'a; Tripsin inhibitörü ile proteaz inhibitörü de sırasıyla 1,20'den 0,010'a ve 1,2'den 0,020'ye düşmüştür. *L. plantarum* tarafından üretilen alfa-galaktosidaz (1,8 birim/ml) azalmayı artırırken, soya fasulyesinin eklendiği gıda karışımının besin bileşimi önemli ölçüde iyileşmiştir. Yerel gıda kaynaklarından *Lactobacillus plantarum* tarafından kullanılan alfa-galaktosidaz enziminin soya fasulyesindeki antibesin faktörlerini azalttığı gözlenmiştir. Bu durum, tahıl-baklagil lapalarının besin kalitesini artırmada faydalı olabileceğini göstermiştir (Adeyemo ve Onilude, 2013).

Laktik asit bakterileri, genellikle güvenli kabul edilen (GRAS) heterojen bir bakteri grubudur. Bu organizmaların gıda ürünlerinde kullanımı çok eski zamanlara dayanır ve esas olarak fermente ürünlerin lezzetine, aromasına ve raf ömrünün artmasına yaptıkları katkı nedeniyle hep gündemde olmuşlardır (Nes ve ark., 1996). Bu grubun çeşitli üyeleri süt ürünleri, fermente sebzeler, fermente hamur, alkollü

i¼ecekler, hayvan yemlerinde ve et ¼r¼nlerinde probiyotikler, bebekleri s¼tten kesme gıdaları olarak kullanılan sorgum ve mısırsız bazı tahılların laktik asit fermentasyonu dahil olmak ¼zere gıdaların ticari ¼retiminde starter k¼lt¼r olarak kullanılırlar (Wakil ve Onilude, 2009). ¼zellikle *Lactobacillus plantarum*, gıdaların raf ¼mr¼n¼ artırmak ve gıdalarda istenen aromayı elde etmek i¼in lezzetleri korumak amacıyla kullanılmıştır (Daeshel, 2004). *L. plantarum*, y¼zyıllardır insan gıdalarının korunması i¼in kullanılan laktik asit ¼reten bakterilerden biridir.

2.4. ¼imlendirme

¼imlendirme, fitik asit i¼eriđini %40'a kadar azaltmada olduk¼a etkili bir y¼ntemdir (Masud ve ark., 2007). ¼imlendirme s¼recinde, fitat par¼alama yeteneğine sahip endojen enzim aktivitesi artar. Bu durum, fitik asit gibi antinutrisyonel maddelerin par¼alanmasını ve azalmasını sağlar. ¼imlenmemiř tahıl ve baklagillerde az miktarda endojen aktivite vardır (Greiner ve Konietzny, 2006).

Marshall ve ark. (2011) tarafından y¼r¼t¼len bir ¼alıřmada tahıl daneleri fitik asit i¼eriđi a¼ısından taranarak 10 g¼nl¼k ¼imlendirmenin ardından t¼m tahıl danelerinin fitat i¼eriđinde ¼nemli bir azalmaya ($p < 0,05$) yol a¼ıđı tespit edilmiştir. Azeke ve ark. (2011) tarafından yapılan bir diğer ¼alıřmada, tahıl daneleri ¼rneklerinin fitat i¼eriđinin ¼imlendirmeden 10 g¼n sonra tahmin edilenden ¼nemli ¼l¼de azaldığı g¼zlemlenmiřtir.

Darı örneklerinin 72 saat ve 96 saat çimlendirilmesinden sonra fitik asit içeriğinin sırasıyla %23,95 ve %45,3 oranında azaldığı bulunmuştur (Makokha ve ark. 2002; Coulibaly ve ark. 2011). Singh ve ark. (2017) tarafından yapılan bir diğer çalışmada darılar çimlendirme yoluyla işleme tabi tutulduğunda ıslatma, mikrodalgaya maruz bırakma ve fermentasyonla karşılaştırıldığında polifenol içeriğinde maksimum azalmanın (%75'e kadar) tespit edildiği bildirilmiştir. Polifenollerdeki azalmanın çimlendirme sırasında fenolik oksidazın varlığından kaynaklanabileceğini ifade etmişlerdir. (Tian ve ark., 2019; Tajoddin ve ark., 2014).

Son çalışmalar çimlendirmenin ayrıca β -glukosidazların aktivasyonu nedeniyle soya fasulyesinin izoflavon profilini değiştirdiğini bildirmektedir. Bu izoflavonlar şelat oluşturma özellikleri göstermesi nedeniyle besin değerini artırmada önemlidir (Yoshiara ve ark. 2018; de Camargo ve ark. 2019).

Çimlendirilmiş soya fasulyeleri riboflavin ve askorbik asidin mükemmel bir kaynağıdır. Proteolitik enzimlerin aktivitesi baklagillerin çimlendirilmesi sırasında artar (Wang ve ark., 1997). Çalışmalar, soya fasulyelerinin çimlendirilmesinin tripsin inhibitör aktivitesini azalttığını ve ayrıca soya fasulyesi proteininin *in vitro* sindirilebilirliğini artırdığını göstermiştir (Savelkoul ve ark., 1992). Mostafa ve ark., (1987)'nin sonuçlarına göre, 6 günlük çimlendirme işlemi ve bunu izleyen 24 saatlik damıtılmış su ile ıslatma işlemi ile TIA' (tripsin inhibitör aktivitesi) %32 oranında azaltılabileceği sonucuna varabiliriz.

2.5. Otoklavlama ve Pişirme

Otoklavlama, ısı işlem uygulamasıdır. Tahıllara veya diğer sebze ürünlerine ısı işlem uygulanmasıyla birlikte asitlik artar ve fitaz enzimi aktive olur. Gıdaların çoğu günlük beslenmede ısı işlem uygulamasıyla yararlı ve sağlıklı hale gelir. Tüm baklagiller ve bazı tahıllar genellikle tüketilmek üzere ya basit kaynatma yoluyla ya da düdüklü tencerede pişirilir. Literatürde, basit kaynatmanın antibesleme faktörlerini azaltması nedeniyle gıda tanelerinin besin kalitesini artırdığı bildirilmiştir (Rehman ve Shah, 2005).

Fitik asit içeriği pişirme ve ıslatma sırasında büyük ölçüde azalır (Vellingiri ve Hans, 2010). Islatma ve pişirme birlikte, sadece kısa bir süre ıslatmaktan çok daha etkilidir (Vidal-Valverde ve ark., 1994). Bir çalışmada, otoklav ve mikrodalga işlemleri fitik asit içeriğini azaltırken aynı zamanda tam buğday ekmeğindeki toplam ve HCL asitte çözünebilen mineral konsantrasyonunu artırmıştır (Demir ve Elgün, 2014).

Başka bir çalışmada, basınçlı pişirmenin siyah mercimek ve maş fasulyesinin antinutrisyonel faktörlerini azaltmada sıradan pişirmeden daha etkili olduğu bulunmuştur (Kataria ve ark., 1989). Rehman ve Shah (2001), basınçlı pişirmeden sonra tanenlerin uzaklaştırılması nedeniyle siyah mercimeğin protein sindirilebilirliğinde bir iyileşme gözlemlenmiştir.

Ayrıca, daha önceki çalışmalarda pişirme işleminin jelatinleşme ve antinutrisyonel faktörlerin yok edilmesi yoluyla nişastanın sindirilebilirliğini iyileştirdiği bildirilmiştir (Rehman ve ark., 2001). Nişastanın sindirilebilirliğindeki iyileşmenin ısı işlemlerin bir sonucu olarak nişastanın hidrolizinden kaynaklanabileceği belirtilmiştir. Başka bir yaklaşıma göre, tanenlerin ve fitik asidin kısmen uzaklaştırılması muhtemelen matris içinde büyük bir boşluk oluşturur. Bu da enzimatik saldırıya karşı duyarlılığı artırarak pişirme işleminden sonra protein ve nişastanın sindirilebilirliğini iyileştirir (Rehman ve Shah, 2005).

Pişirme yöntemlerine göre oksalat içeriğinde önemli bir fark elde edildiği gösterilmiştir. Örneğin, taro örnekleri 40 dakika suda kaynatıldığında oksalat içeriğinin en az %47 oranında azaldığı belirtilmiştir. Ancak, örnekler 180°C'de 40 dakika pişirildiğinde işlemin oksalat seviyesinde önemli bir değişiklik meydana getirmediği tespit edilmiştir (Savage ve Martensson, 2010).

Kızartma işleminin, kızartılmış soya fasulyesi ununun tohuma göre tripsin inhibitör aktivitesinde önemli bir azalmaya yol açtığı bildirilmiştir (Novak ve Haslberger, 2000).

Farklı çalışmalara göre, yaygın işleme yöntemleri arasında otoklavlama işleminin çeşitli antinutrisyonel bileşikler azaltmada daha etkili olduğu saptanmıştır (Shimelis ve Raksihit, 2007; Vadivel ve ark., 2008). Doss ve ark. (2011), otoklavlama, pişirme ve ıslatma yöntemlerinin sırasıyla toplam serbest fenolik gibi çeşitli antibesinsel bileşikler önemli düzeyde azalttığını bildirmiştir. Başka bir çalışmada da baklagillerin

besin kalitesinin lektin ve saponin içeriğindeki azalma nedeniyle pişirildikten sonra önemli ölçüde iyileştiği bildirilmiştir (Maphosa ve Jideani, 2017). Kavrurma yöntemi ayrıca soya fasulyesi ununda tripsin inhibitör aktivitesini önemli ölçüde azaltmıştır (Vagadia ve ark., 2017). Başka bir çalışmada, baklagillerin otoklavlanması, ıslatılması ve pişirilmesinden sonra çeşitli antibesin maddelerinin önemli ölçüde azaldığı gözlemlenmiştir (Torres ve ark. 2016).

ANF'lerin giderilmesine yönelik çalışma sonuçları arasındaki farklılıkların ilgili işleme maruz kalma süresi, sıcaklık, ısıtma prosedüründeki farklılık ve olası nem kaybının dikkate alınmamasından kaynaklanabileceği belirtilmiştir (Kumari, 2018).

2.6. Fiziksel Yöntemler

Isı enerjisi genellikle moleküllerin fiziksel düzenini bozarak enzimik sindirimi kolaylaştırır. Fiziksel işlem tripsin inhibitörlerini etkisiz hale getirmek için kullanılan klasik yaklaşımdır. Dikkatlice optimize edilmezse tek dezavantajı baklagillerde bulunan diğer temel besinleri ayırım gözetmeksizin yok edebilmesidir (Agrahar-Murugkar ve Jha, 2010; Chen, 2015; Jasti ve ark., 2015; Murugkar, 2015).

Tripsin inhibitörlerinin termal inaktivasyonu süreye, sıcaklığa ve yemlerin nem içeriğine bağlıdır. Geleneksel kurutma ve kavrurma, tripsin inhibitörlerinin ortadan kaldırılması için kullanılan bazı yaygın ısı işlem yöntemleridir (Carvalho ve ark., 1997; Stewart ve ark., 2003). Kavrurma, esas olarak döner tambur kurutucu, tuz yataklı kavrurma ve 110 ila 170°C arasında değişen sıcaklıklarda geleneksel tahıl

kurutucunun kullanımını içerir. Söz konusu düzenekler TIA'yı %85'e kadar inaktif hale getirebilir ve aynı anda soya fasulyelerini depolama için gerekli olan optimum nem içeriğine gelinceye kadar kurutur. 20 dakika boyunca 200°C'de fırında termal işlem, bütün soya fasulyesi ununda tripsin inhibitörlerinin aktivitesini önemli ölçüde azaltmıştır (Andrade ve ark., 2016).

Soya ununun sıcak havayla geleneksel kurutulması işleminde, 100°C'de iki saat boyunca tutulması nitrojen sindirilebilirliği ve rengini etkilemeden tripsin inhibitör aktivitesini %80 oranında azaltmıştır. Aynı deneyde, soya fasulyesi ununun 10 dakika buharda pişirilmesi ve ardından 60°C'deki sıcak hava işlemine tabi tutulması inhibitör aktivite seviyesini 3 saat sonra %80'e düşürmüştür (Agrahar-Murugkar ve Jha, 2010).

Kaur ve ark., (2012)'e göre, tahıl kepeğindeki tripsin inhibitörleri gibi biyoaktif bileşiklerin inaktivasyonu için en etkili muamele kuru veya nemli ısı kullanımındır.

Benzer bir şekilde Mazza ve Oomah (1995), keten tohumunda bulunan siyanojenik bileşiklerin pişirme ya da asit muameleleriyle giderilebileceğini bildirmişlerdir.

Ayrıca, çeşitli çalışmalar, 12-14 saat ıslatmanın tek başına soya fasulyesindeki tripsin inhibitör aktivitesini azaltmada etkili olmayacağını göstermiştir. Ancak, 12-14 saat ıslatılmış soya

fasulyesini pişirmek, tripsin inhibitör¼n¼n %82 oranında azalmasıyla sonuçlanmıştır (Egounlety ve Aworh, 2003).

Yukarıda belirtilen çalışmalardan, otoklavlanmanın soya fasulyesindeki tripsin inhibitör¼ enzimini inaktive etmek için etkili bir işlem olabileceği ve ısılatmanın işlem s¼resini azalttığı oldukça açıktır. Benzer sonuçlar Kwok ve ark. (2002) tarafından da yapılmıştır; araştırmacılar tripsin inhibitör¼lerinin tahribatının sıcaklığa ve zamana bağlı olduğunu belirtmişlerdir; burada TIA, 125°C'de 5 dakika boyunca en etkili olan termal olarak işlenmiş soya fasulyesinde test edilmiştir. Ultra y¼ksek sıcaklık işlemi (UHT) ve buhar enjeksiyonu, antibesleme faktör¼lerinin inaktivasyonu için soya ¼r¼nlerinin b¼y¼k ölçekli işleme tesislerinde kullanılmıştır. 100°C'de 20 dakika buhar enjeksiyonu, 70-85°C'de 30 saniye-7,5 dakika haşlama ve 135°C - 150°C'de 10-50 saniye UHT ile işlenen soya s¼t¼ sırasıyla %13, %50 ve %10'luk kalıntı tripsin inhibitör¼ seviyelerine sahip olmuştur ve UHT işleminin en etkili yöntem olduğunu kanıtlamaktadır (Yuan ve Chang, 2010). Kwok ve ark., (1993) soya s¼t¼ söz konusu olduğunda tripsin inhibitör¼lerinin 100°C'nin altındaki sıcaklıklarda %10'a kadar inaktive edilebileceğini önermiştir. Bu işlem, soya s¼t¼n¼n ultra y¼ksek sıcaklık (UHT) muamelesi öncesinde önceden ısıtılmasıyla (80°C'de 2 dakika) gerçekleştirilebilir. Ayrıca, bu aynı zamanda y¼ksek sıcaklıklarda oluşan besin maddelerine (lisin, k¼k¼rt amino asitleri ve vitaminler gibi) verilen zararı azaltmaya da yardımcı olacaktır.

Savage ve ark., (1995), soya fasulyelerini 100°C'de 12 dakika haşlama işlemiyle tripsin inhibitörlerinin %80 oranında inaktivasyonunu bildirmiştir.

HTST muamelesiyle soya sütünün 137°C'de 77 saniye boyunca işleme tabi tutulması ELISA tekniğiyle (Brandon, 1991; Rouhana, 1996) denenen geleneksel toplu kaynatma işlemine (15 dakika) kıyasla %20 oranında tripsin inhibitörlerinde azalma görülmüştür.

2.7. Güncel Teknikler

Ohmik Isıtma

Gıdaların üzerinden elektrik akımı geçirilen gelişmiş bir termal işleme yöntemine Ohmik ısıtma adı verilmektedir (Wang ve ark., 2007). Ohmik ısıtmanın elektrokimyasal etkileri tripsin inhibitörlerini inaktive edebilmektedir. Bu işlem sırasında tripsin inhibitörlerinin inaktivasyonu elektrik voltajına bağlıdır. Lu ve ark., (2015) tarafından yapılan çalışmalara göre, 3 dakikadan uzun süreler boyunca uygulanan ohmik ısıtma (220V, 50Hz), 3 dakikadan uzun süre uygulanan indüksiyonlu ocak veya elektrikli ocak yöntemleriyle karşılaştırıldığında tripsin inhibitörünü etkili bir şekilde inaktive etmektedir. Ohmik ısıtma sonrasında kalan tripsin inhibitör aktivitesi %13'tür. Bu da indüksiyonlu ocak ve elektrikli ocaktan sonra kalan %19'luk tripsin inhibitörü oranına kıyasla önemli ölçüde daha düşüktür. İndüksiyonlu ocağın gücü, ohmik ısıtmayla (220 V, 50Hz) aynı koşulları simüle etmek için kullanılmıştır (Luu ve ark., 2015). Bu yöntemle işlenen soya sütü, diğer geleneksel ısıtma prosedürleriyle

karşılaştırıldığında yüksek kaliteli toфу üretimini de sağlamaktadır (Li ve Toyoda, 2011; Wang ve ark., 2007).

Radyo Frekansları

Literatürde çok çeşitli baklagiller üzerine sunulan farklı çalışmalar, 42 MHz (Radyo frekansı) ve 2450 MHz (Mikrodalga) frekanslarında endüstriyel ölçekli dielektrik ısıtma işlem teknolojisinin proteinin genel kalitesi üzerinde yararlı bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir. Mikrodalga ısıtma, besin ve protein kalitesini etkilemeden seçili baklagil tohumlarındaki proteaz inhibitörlerinin inaktivasyonunda önemli ölçüde etkilidir. Baklagillerin mikrodalga işleminden önce ıslatılması, tripsin inhibitörlerinin aktivitesini mikrodalga ısıtmalı kuru yöntemle kıyasla önemli ölçüde azaltmıştır. Bunun nedeni ıslatılmış soya fasulyelerindeki daha yüksek nem içeriğidir ve bu da daha iyi dielektrik özelliklerle sonuçlanabilir. Bakla, nohut, soya fasulyesi, mercimek ve normal fasulye gibi baklagil tohumlarının TIA'sı, 0,54 kW güçte 2450 MHz'de mikrodalga ısıtma yöntemiyle, geleneksel ısıtma işlemine kıyasla (kaynatmanın ardından 20 saat boyunca 60°C'de sıcak hava işlemi) aynı derecede inaktivasyon gösterdi (Hernandez-Infante ve ark., 1998).

Jourdan ve ark., (2007) göre Brezilya fasulyelerinde 15 dakika boyunca 2450 MHz'de mikrodalga işlemi kullanılarak TIA'nın %3'e düşürülebileceği belirtilmiştir. 2450 MHz'de 10 dakika mikrodalga işlemi, ıslatılmış kadife fasulyelerindeki (8-12 saat) antibesinsel faktörleri ortadan kaldırmada ıslatılmamış kadife fasulyelerine kıyasla

(aynı işlem, 12 dakika) %8 kalıntı TIA'ya ulaşmada başarılı olmuştur (Kala ve Mohan, 2012).

Soya fasulyesi örnekleri bu işlemde test edilerek TIA'nın 2450 MHz'de 30 dakikalık mikrodalga uygulamasından sonra ortadan kalktığı saptanmıştır. Büyük miktarda soya fasulyesi (30 cm katmanlarda 45 kg), 120°C'de mikrodalga ile muamele edildiğinde tripsin inhibitörlerinin %93'ünün inaktive olduğu rapor edilmiştir (Petres ve ark., 1990). Mikrodalga uygulamasının geleneksel yöntemlerle karşılaştırıldığında güvenli bir inaktivasyon seviyesine ulaşmak için gereken işlem süresini azalttığı açıktır. Barac ve Stanojević, (2005) tarafından yürütülen bir çalışmada, soya fasulyesinde 2450 MHz'de 2 dakika mikrodalga ile kavurma tripsin inhibitör aktivitesini (TIA) %13,33'e düşürmüştür. İşlem, ayrıca güçlü bir olumlu etki sağlayarak soya fasulyesinin sindirilebilir protein miktarını artırmıştır.

Islatılmamış soya fasulyeleri için gereken 6 dakikaya kıyasla (Yoshida ve Kajimoto, 1988) damıtılmış suya 1 saat boyunca batırılan bütün soya fasulyeleri, antitripsin faktörlerinin inaktivasyonu için 2450 MHz'de sadece 4 dakikalık mikrodalga işlemine ihtiyaç duymuştur. Bu, soya fasulyelerinin ıslatılmasının avantajlı bir ön işlem yöntemi olduğunu ve mikrodalga işleminin etkili bir inaktivasyon sağladığını kanıtlamaktadır. Radyofrekans işlemi, geleneksel termal işleme kıyasla daha az zaman alan bir dielektrik ısıtma teknolojisidir (Vearasilp ve ark., 2005). Tripsin inhibitörlerini yok etmek ve protein kalitesini iyileştirmek için yeni bir gıda işleme tekniği olarak tanıtılmıştır. Artan sıcaklıkla birlikte, soya fasulyesi örneklerinin radyo frekans ışınlanması

(27 MHz), 80 ila 120°C arasındaki sıcaklıklarda ve 90 ila 120 saniye arasındaki işleme süresinde TIA seviyelerinin %7-12'ye düştüğünü göstermiştir (Vearasilp ve ark., 2005). 30 dakika boyunca mikrodalga işlemi veya 600 MPa'da yüksek hidrostatik basınç, 30 dakika boyunca 60°C'deki işlemle karşılaştırıldığında, 30 dakika boyunca RF, muamele edilen örneklerde esansiyel amino asitlerin oranı açısından en az besin kaybına neden olduğu gözlenmiştir. Dahası, RF işlemi antinutrisyonel faktörleri etkili bir şekilde azaltmış ve protein yapıları üzerinde nispeten daha az etkiye sahip olduğu gözlenmiştir (Zhong ve ark., 2015).

Kızılötesi ışınlarla muamele gıda endüstrisinde giderek artan öneme sahip olan bir diğer yeni işleme tekniğidir. Bu işlem, daha düşük sıcaklıklarda elektromanyetik radyasyonlar kullanarak enerji transferi yapma yeteneğine sahiptir. Ayrıca su adsorpsiyon özelliklerini iyileştirir, pişirme süresini kısaltır ve baklagillerdeki antibesin faktörlerini azaltır (Kayitesi ve ark., 2013). Gıda endüstrisinde ticari olarak öncelikle tahılların, baklagillerin, meyvelerin ve sebzelerin nem içeriğini azaltmak için kullanılır (Sakai ve Mao, 2006). Yalcin ve Basman (2015) tarafından yapılan bir çalışmada, 15 dakika boyunca 1342 W'ta kızılötesi işlemin önceden ıslatılmış bütün soya fasulyelerinin (45 dakika) tripsin inhibitör aktivitesinde önemli bir azalma sağladığı gösterilmiştir. Bu çalışmada, kapalı bir kurutma odası, 12 adet 150 W halojen lamba ve 2 havalandırma kanalından oluşan laboratuvar ölçekli kızılötesi ekipman kullanılmıştır. Gıda endüstrisinde gama ışınlaması mikroorganizmalardan kurtulmak için dezenfektan olarak yaygın olarak kullanılmaktadır. Bunlar gıdalardaki

proteinlerin konformasyonel değişikliklerine, çapraz bağlanmalarına ve agregasyonlarına neden olur. Gıdalardaki antibesinlerin giderilmesinde gama ışınlanması kullanılması için girişimlerde bulunulmuştur. Bu teknikte numuneler ışınlamaları üreten bir gama hücresine tabi tutulur. ABD Gıda ve İlaç Dairesi (FDA), insan tüketimi için güvenli gıdalarda 10 kGy (1 Gy ¼ 1 J kg⁻¹) veya daha az gama ışınlanması kullanımını onaylamıştır (Tewari ve ark., 2015).

Gama ışınlanması uygulamaları ayrıca soya fasulyesindeki inhibisyon kapasitelerinin değerlendirilmesinde de kullanılmıştır. Abu-Tarboush (1998), 10 kGy'lik bir dozajla yağsız soya fasulyesi ununda TIA'da %34'lük bir azalma olduğunu ve bunun sindirilebilirliğini de %4 oranında iyileştirdiğini bildirmiştir. Bu, radyasyon işlemiyle tripsin inhibitör yapısındaki kırılmadan kaynaklanmaktadır. Farag'a (1998) göre, inaktivasyon seviyeleri ışınlamanın dozajındaki artışla artmıştır. 5, 15, 30 ve 60 ky'lik dozajlar için, tripsin inhibitör aktivitesindeki kaybın sırasıyla %41, %56, %62 ve %72,5 olduğu bulunmuştur. Tripsin inhibitör aktivitesinin ortalama %37'si 8 kGy'lik gama ışınlanmasıyla azalmıştır. Yasal düzeylerde (2 kGy ve 4 kGy) indirgeme düzeylerinin çalışmada kullanılan soya fasulyesi çeşitlerinde önemli ölçüde daha küçük olduğu belirtilmiştir (de Toledo ve ark., 2007).

Ultrason

Ultrason, gıda endüstrisinde yeni yeni gelişmekte olan bir teknoloji olup enzim inaktivasyonu, ekstraksiyon, filtrasyon, kurutma ve homojenizasyon dahil olmak üzere birçok uygulama alanına sahiptir. Çeşitli geleneksel işleme yöntemleriyle karşılaştırıldığında işleme

süresini azaltmaktadır (Entezari ve Pétrier, 2005). Yaklaşık 20 dakika boyunca 20 kHz'de ultrason işleminin, tripsin inhibitörünü %55 oranında inaktive ettiği, inaktivasyon oranının ultrason genlikleri ve sonikasyon süresiyle doğru orantılı olduğu bildirilmiştir. İnhibitör etkisinin disülfür bağlarındaki azalma ve protein yapısındaki çeşitli konformasyonel değişikliklerden kaynaklanıyor olabileceği bildirilmiştir (Huang ve ark., 2008).

Yüksek Basınç

Yüksek basınç işleme (HPP), gıda endüstrisinde kullanılan bir diğer yeni işleme tekniğidir. Van Der Ven ve ark., (2005) soya sütündeki antinutrisyonel faktörleri HPP ve yüksek sıcaklıkların bir kombinasyonu ile inaktive etmişlerdir. Yaptıkları çalışmada 120 L/saat akış hızına sahip yüksek basınçlı homojenizatör ve yüksek basınç koşullarını destekleyebilen yüksek basınçlı seramik bir valf kullanmışlardır. 70°C - 90°C arasındaki sıcaklıklarda ve 525 ile 750 MPa arasındaki basınçlarda iki dakikadan daha kısa bir işlem süresiyle %10 tripsin kalıntı aktivitesi elde etmişlerdir. Bezelyede 600 MPa'da ve 60 dakikalık sürede 60°C'de %100 tripsin inhibitörleri inaktivasyonu gözlemlenmiştir (Linsberger-Martin ve ark., 2013).

Manassero ve ark., (2016) kalsiyum eklenmiş soya sütünü HHP (500-700 MPa) ve termal işleme (45-65°C) tabi tutmuşlardır. Çalışma sonunda tripsin inhibitörü ve lipoksijenaz enzimlerinin inaktivasyonunun eklenen CaCl_2 konsantrasyonundan bağımsız olduğunu ve yalnızca basınç seviyesi ve sıcaklıktan etkilendiğini ortaya koymuşlardır. Bu çalışma kalsiyumla zenginleştirilmiş soya sütünün

şelat oluşturuucu maddeler eklenmeden üretilebileceğini ve aynı zamanda yüksek basınç ve ısıtma ile soya sütünün besin kalitesini artırmak için antibesin içeriğini azaltabileceğini göstermiştir.

Mekanik İşlemler

Ekstrüzyon işlemi, gıda endüstrisinde yaygın olarak kullanılan başlıca mekanik işleme yöntemlerinden biridir. Ekstrüzyon prosedürü, özel olarak tasarlanmış bir sarmal tarafından bir silindirden sıkıştırılan numunenin sürtünmesi sırasında ortaya çıkan sıcaklık etkilerine dayanmaktadır. Araştırmacılar, bu işlemin amino asit bileşimini değiştirmedeğini ancak soya ürünlerindeki tripsin inhibitör aktivitesini azalttığını tespit etmiştir. Ekstrüzyon yöntemleri kullanılarak, soya fasulyeleri genel protein kalitesinde herhangi bir azalma olmaksızın yüksek kaliteli ürünlere dönüştürülür (Clarke ve Wiseman, 2007; Romarheim ve ark., 2005). İnhibitör aktivitesini azaltmak için en etkili işlem kuru ekstrüzyondur. Ekstrüzyon yöntemi sırasında, istenmeyen enzimler denatüre edilir, antibesinsel faktörler ve patojen etkiye sahip olası mikroorganizmalar doğal koku ve tadı bozmadan sterilize edilir (Riaz, 2000; Altan ve ark., 2009). Ekstrüzyon ayrıca sindirilebilir nişasta düzeyini önemli ölçüde artırır (Dust ve ark., 2004). Bazı durumlarda yüksek sıcaklık vitamin kayıplarına neden olduğundan üreticiler tarafından diyetle belirli miktarda vitamin ilavesi yapılmalıdır (Case ve ark., 2010).

150°C'de işlendiğinde, tripsin inhibitör aktivitesinin kaybı başlangıç değerinin %95'ine kadar ulaşırken, en az etkili işlem, başlangıç TI içeriğinin %40'ını koruyan ıslak ekstrüzyon işlemi olmuştur (öğütülmüş

soya fasulyesi numunesine %6-8 oranında su eklenir) (Žilić ve ark., 2012). Anında Kontrollü Basınç Düşüşü (DIC), soya fasulyelerinde hidro-termomekanik işlemin birleşimini içeren iyi kontrollü, yeni bir teknolojidir. DIC işlemi, nemlendirilmiş soya fasulyelerinin (4°C'de 12 saat boyunca suyla homojenize edilmiş) yaklaşık 1 dakika boyunca 170°C'de bir buhar ve 800 MPa basınçla işlenmesini içerir. Bunu ani bir basınç düşüşüne (50 102 Pa) maruz kalma izler. DIC makinesinde, numunelerin yüksek sıcaklık ve basınçta işlendiği bir işlem odası, ardından bir rezervuar ve bir valf bulunur. Bir dakika sonra %94'lük bir inaktivasyon ve 6 dakikalık DIC işleminden sonra %99'luk bir inaktivasyon gözlenir. Daha düşük bir sıcaklığa neden olan ani basınç düşüşü ve işlemin kısa süresi, soya fasulyelerinin herhangi bir termal hasardan korunmasını sağlar. Çalışmada, gıdalardan antibesinsel faktörlerin giderilmesi ve iyi kalitede son ürün üretilmesi için iyi kontrol edilen bir teknolojinin yürütülmesi amaçlanmıştır (Haddad ve Allaf, 2007). Akışkan yataklar kurutma süresini, enerji tüketimini, ısıya duyarlı inhibitörlerin inaktivasyonunu azaltmada ve ayrıca baklagillerin besin kalitesini artırmada başarılı olmuştur. Akışkan yataklarda, antibesinsel faktörlerinin kurutulması ve inaktivasyonu aynı işlemde gerçekleştirilebilir. Osella ve ark., (1997), akışkan yataklı kurutmanın soya fasulyesinin tripsin inhibitör aktiviteleri üzerindeki etkilerini araştırmıştır. 140°C ve 10 dakikada, akışkan yataklı bir reaktörde soya fasulyesi örneklerindeki antibesin faktörleri tamamen inaktif hale getirilmiştir.

2.8. Kimyasal Yöntemler

Çeşitli bitki türleri bol miktarda L-Askorbik asit içermekte olup soya fasulyelerinde bu miktar yaklaşık 40 mg/100 g seviyesindedir.

Askorbik asit ve bakır sülfatla muamele edilen yağsız soya unu, 65°C'de 1 saatte %90 tripsin inhibitörü inaktivasyonu gösterir. Bu, esas olarak askorbik asit ve bakır sülfatın doğrudan tripsin inhibitörü üzerindeki prooksidan etkisinden kaynaklanmaktadır (Sessa ve ark., 1990).

Çay polifenollerinin soya fasulyesi tripsin inhibitörleri üzerinde etkisizleştirici bir etkiye sahip olduğu kanıtlanmıştır. Huang ve ark., (2004) tarafından yürütülen çalışma, polifenollerin SKTI ile bir kompleks oluşturduğunu ve 30°C'de 30 dakika boyunca bir su banyosunda işlendiğinde onları etkisizleştirdiğini göstermektedir.

Soya sütü sindirilebilirliğinde %19'luk bir artışa ek olarak, sodyum karbonatla ön işlem görmüş soya fasulyeli soya sütü örnekleri, 20 dakikada 98°C'de tam ve daha hızlı bir TI inaktivasyon oranı göstermiştir (Wallace ve ark., 1971). 15 dakika boyunca 90°C'de sodyum hidroksitinin etkisiyle, soya fasulyesi unundaki tripsin inhibitörleri tamamen inaktive edilmiştir. Deney, farklı asitler ve bazlarla değişen konsantrasyonlarda tekrarlanarak sülfürik asit, hidroklorik asit, fosforik asit, amonyum hidroksit ve sodyum bikarbonat da kullanılmıştır. Ne sülfürik asit ne de fosforik asit, tripsin inhibitörlerinin ortadan kaldırılmasında hidroklorik asit kadar etkili olamamıştır. Hidroklorik asit, TI aktivitesini 82°C ve altında azaltmış, ancak 82°C'nin üzerindeki tüm sıcaklıklarda tripsin inhibitörü asit

eklenmesiyle stabilize edilmiştir. Sodyum bikarbonatın en az etkiye sahip olduğu ve sodyum hidroksit ile karşılaştırıldığında TI, katkı maddesi olarak amonyum hidroksit ile 90°C'de 15 dakika pişirildiğinde ısıya duyarlı olduğu gözlemlenmiştir (Baker ve Mustakas, 1973; Baker ve Rackis, 1986; Wallace ve ark., 1971).

Sodyum bikarbonatın %0,5'lik çözeltisine batırılmış (80°C'de, 550 MPa'da, 15 dakika) soya fasulyelerinden hazırlanan soya sütündeki antibesinsel aktivitenin azaldığı gözlemlenmiştir (Guerrero-Beltrán ve ark., 2009). Tripsin inhibitörlerinin tamamen inaktivasyonu, bütün soya fasulyelerinin 23°C'de 8 saat boyunca seyreltilmiş hidroklorik asitte bekletilmesiyle gözlemlenmiştir (Che Man ve ark., 1991). SDS-PAGE (Sodyum dodeasil sülfat poliakrilamid jel elektroforezi) yöntemi kullanılarak, soya fasulyesi tripsin inhibitörlerinin Ferri sülfatlar tarafından 70°C ve pH 7,5'te inaktive edildiği bildirilmiştir (Baoqing, 2009). Sodyum metabisülfid veya glutaraldehit veya her ikisinin bir kombinasyonu gibi sülfatlama maddeleriyle işlenen (75°C'de 1 saat) soya unu özlerindeki inhibitör aktivitesi %95 oranında azalmaktadır (Sessa ve ark., 1988).

SONUÇ

Sonuç olarak günümüzde kanatlı hayvan yetiştiriciliğinde verimi kısıtlayan en önemli faktörlerden biri yemlerde bulunan antinutrisyonel bileşiklerdir. Birçok antinutrisyonel faktör mevcut olup her birinin verim üzerine etkisi farklıdır. Ancak, tüm antinutrisyonel faktörlerin inaktivasyonu için ortak yöntemlerin varlığından bahsetmek

mümkündür. Bugüne kadar öğütme, ıslatma, otoklavlama ve fermentasyon gibi yöntemler kullanılmış olup günümüzde daha güncel yöntemlerle (dielektrik, radyo frekansı, yüksek basınç) antinutrisyonel faktörlerin ortadan kaldırılabileceğine dair araştırma sonuçları mevcuttur. Bununla birlikte kullanılan yöntemin ekonomik ve etkin olmasının yanı sıra yemlerde bulunan besin maddelerine zarar vermemesi de çok önemlidir. Buradan hareketle, konuyla ilgili daha fazla araştırma yapmaya ihtiyaç duyulduğu âşikârdır.

KAYNAKÇA

- Abu-Tarboush, H. M. (1998). Irradiation inactivation of some antinutritional factors in plant seeds. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 46(7), 2698-2702.
- Açıkgöz, E. (2001). Yem Bitkileri (3. Baskı) Uludağ Üniv. *G¼lendirme Vakfı Yayın*, 182.
- Adeyemo, S. M., & Onilude, A. A. (2013). Enzymatic reduction of anti-nutritional factors in fermenting soybeans by *Lactobacillus plantarum* isolates from fermenting cereals. *Nigerian Food Journal*, 31(2), 84-90.
- Agrahar-Murugkar, D., & Jha, K. (2010). Effect of drying on nutritional and functional quality and electrophoretic pattern of soyflour from sprouted soybean (*Glycine max*). *Journal of food science and technology*, 47, 482-487.
- Akande, K. E., Doma, U. D., Agu, H. O., & Adamu, H. M. (2010). Major antinutrients found in plant protein sources: their effect on nutrition.
- Aktaş, B., & Akkan, S. (2011). Sığır Besi Yemine İlave Edilen Meş Palamudu Tanenin Rumen Fermentasyonuna Etkilerinin Rumen Simulasyon Tekniği (Rusitek) ile Saptanması. *Ege Üniversitesi Ziraat Fak¼ltesi Dergisi*, 48(3), 249-254.
- Ali, H., Houghton, P. J., & Soumyanath, A. (2006). α -Amylase inhibitory activity of some Malaysian plants used to treat diabetes; with particular reference to *Phyllanthus amarus*. *Journal of ethnopharmacology*, 107(3), 449-455.
- Altan, A., McCarthy, K. L., & Maskan, M. (2009). Effect of extrusion cooking on functional properties and in vitro starch digestibility of barley-based extrudates from fruit and vegetable by-products. *Journal of Food Science*, 74(2), E77-E86.
- Andrade, J. C., Mandarino, J. M. G., Kurozawa, L. E., & Ida, E. I. (2016). The effect of thermal treatment of whole soybean flour on the conversion of isoflavones and inactivation of trypsin inhibitors. *Food Chemistry*, 194, 1095-1101.
- Atef, M., Abo-Norage, M. A. M., Hanafy, M. S. M., & Agag, A. E. (1991). Pharmacotoxicological aspects of nitrate and nitrite in domestic fowls. *British Poultry Science*, 32(2), 399-404.

- Atmaca, E., & Aksoy, A. (2015). Toksikolojik Açıdan Yemlerde Oluşabilecek Doğal Kaynaklı Risk Faktörleri. *Türkiye Klinikleri Animal Nutrition and Nutritional Diseases-Special Topics*, 1(1), 32-42.
- Ayaşan, T., Gök, K., Asarkaya, A., Hızlı, H., Görgülü, M., Karakozak, E., ... & Seğmenoğlu, M. S. (2012). Mısır silajı ve şeker pancarı posasının erkek danaların besi performansı, kan parametresi ile kesim ölçütleri üzerine etkisi. *Ziraat Fakültesi Dergisi*, 7(1), 64-73.
- Ayaz, A., & Yurttagül, M. (2008). Besinlerdeki toksik öğeler-I. Hacettepe Üniversitesi Sağlık Bilimleri Fakültesi Beslenme ve Diyetetik Bölümü, Klasmat Matbaacılık, Yayın No: 727, Ankara.
- Azeke, M. A., Egielewa, S. J., Eigbogbo, M. U., & Ihimire, I. G. (2011). Effect of germination on the phytase activity, phytate and total phosphorus contents of rice (*Oryza sativa*), maize (*Zea mays*), millet (*Panicum miliaceum*), sorghum (*Sorghum bicolor*) and wheat (*Triticum aestivum*). *Journal of food science and technology*, 48, 724-729.
- Badau, M. H., Nkama, I., & Jideani, I. A. (2005). Phytic acid content and hydrochloric acid extractability of minerals in pearl millet as affected by germination time and cultivar. *Food chemistry*, 92(3), 425-435.
- Baker, E. C., & Mustakas, G. C. (1973). Heat inactivation of trypsin inhibitor, lipoxygenase and urease in soybeans: effect of acid and base additives. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 50(5), 137-141.
- Baker, E. C., & Rackis, J. J. (1986). Preparation of unheated soy protein isolates with low trypsin inhibitor content. In *Nutritional and Toxicological Significance of Enzyme Inhibitors in Foods* (pp. 349-355). Boston, MA: Springer US.
- Balabanlı, C., Albayrak, S., Türk, M., & Yüksel, O. (2006). Türkiye Çayır-Meralarında Bulunan Bazı Zararlı Birkiler ve Hayvanlar Üzerindeki Etkileri. *Turkish Journal of Forestry*, 7(2), 89-96.
- Baoqing, F. (2009). Study on the Soybean Trypsin Inhibitor Inactivated by Ferrisulphas. *Guangdong Chemical Industry*.

- Barac, M., & Stanojević, S. (2005). The effect of microwave roasting on soybean protein composition and components with trypsin inhibitor activity. *Acta alimentaria*, 34(1), 23-31.
- Baydar, H. (2007). *Tıbbi, aromatik ve keyf bitkileri bilimi ve teknolojisi*. Süleyman Demirel Üniversitesi.
- Bayram, M., Kaya, A., & Öner, M. D. (2004). Changes in properties of soaking water during production of soy-bulgur. *Journal of Food Engineering*, 61(2), 221-230.
- Begovic, S., Duzic, E., Sakirbegovic, A., & Tafro, A. (1978). Examination of tannase activity in ruminal contents and mucosa of goat fed oak leaves and during intraruminal application of 3 to 10 % tannic acid. *Veterinaria, Yugoslavia*, 4: 445-457.
- Bell, E. A., Harborne, J. B., Boulter, D., & Turner, B. L. (1971). Chemotaxonomy of the Leguminosae.
- Berardi, L. C., & Goldblatt, L. A. (1969). Gossypol. In *Toxic Constituents of Plant Foodstuff*, ed. I.E. Liener, New York, p. 183.
- Binder, E. M. (2007). Managing the risk of mycotoxins in modern feed production. *Animal feed science and technology*, 133(1-2), 149-166.
- Birari, R. B., & Bhutani, K. K. (2007). Pancreatic lipase inhibitors from natural sources: unexplored potential. *Drug discovery today*, 12(19-20), 879-889.
- Bölükbaşı, C., Dumlu, B., & Ahmadova, R. (2019). Katıfaz fermentasyonu ile arpanın besin değerinin iyileştirilmesi. *Atatürk Üniversitesi Veteriner Bilimleri Dergisi*, 14(3), 315-323.
- Brandon, D. L., Bates, A. H., & Friedman, M. (1991). ELISA analysis of soybean trypsin inhibitors in processed foods. In *Nutritional and toxicological consequences of food processing* (pp. 321-337). Boston, MA: Springer US.
- Carvalho, M. R. B., & Sgarbieri, V. C. (1997). Heat treatment and inactivation of trypsin-chymotrypsin inhibitors and lectins from beans (*Phaseolus vulgaris* L.). *Journal of Food Biochemistry*, 21(4), 219-233.

- Case, L. P., Daristotle, L., Hayek, M. G., & Raasch, M. F. (2010). *Canine and feline nutrition: a resource for companion animal professionals*. Elsevier Health Sciences.
- Che Man, Y. B., Wei, L. S., Nelson, A. I., & Yamashita, N. (1991). Effects of soaking soybeans in dilute acids on biologically active components. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 68, 471-473.
- Cheeke, P. R. (1971). Nutritional and physiological implications of saponins: a review. *Canadian Journal of Animal Science*, 51(3), 621-632.
- Chen Jr, Y. (2015). Effects of micronization, ethanol washing, and enzymatic hydrolysis processing alone or in combination on trypsin inhibitors, lipooxygenase activities and selected "beany" flavour related compounds in soybean flour.
- Christeller, J. T., Farley, P. C., Ramsay, R. J., Sullivan, P. A., & Laing, W. A. (1998). Purification, characterization and cloning of an aspartic proteinase inhibitor from squash phloem exudate. *European Journal of Biochemistry*, 254(1), 160-167.
- Clarke, E., & Wiseman, J. (2007). Effects of extrusion conditions on trypsin inhibitor activity of full fat soybeans and subsequent effects on their nutritional value for young broilers. *British poultry science*, 48(6), 703-712.
- Coulibaly, A., Kouakou, B., & Chen Jie, C. J. (2011). Phytic acid in cereal grains: structure, healthy or harmful ways to reduce phytic acid in cereal grains and their effects on nutritional quality.
- Crépon, K., Marget, P., Peyronnet, C., Carrouée, B., Arese, P., & Duc, G. (2010). Nutritional value of faba bean (*Vicia faba L.*) seeds for feed and food. *Field crops research*, 115(3), 329-339.
- Cufadar, Y., Yıldız, A. Ö., Olgun, O., & Bahtiyarca, Y. (2009). Mısır-soya küspesine dayalı rasyonlara inorganik çinko ve fitaz ilavesinin yumurta tavuklarında performans ve yumurta kalite özelliklerine etkisi. *Hayvansal Üretim*, 50(2).
- Curry, S. C., & Patrick, H. C. (1991). Lack of evidence for a percent saturation gap in cyanide poisoning. *Annals of emergency medicine*, 20(5), 523-528.

- Çalışlar, S. (2018). Tanenlerin kanatlı hayvan beslemede etkileri. *Kahramanmaraş S¼t¼ İmam Üniversitesi Tarm ve Doğa Dergisi*, 21(4), 615-623.
- Daeshel, M. A. (2004). Strains of *Lactobacillus plantarum* found in foods from different cultures. *African Journal of Food and Nutritional Sciences*, 49, 112-115.
- Davies, N. T. (1979). Anti-nutrient factors affecting mineral utilization. *Proceedings of the Nutrition Society*, 38(1), 121-128.
- de Camargo, A. C., Favero, B. T., Morzelle, M. C., Franchin, M., Alvarez-Parrilla, E., de la Rosa, L. A., ... & Schwember, A. R. (2019). Is chickpea a potential substitute for soybean? Phenolic bioactives and potential health benefits. *International Journal of Molecular Sciences*, 20(11), 2644.
- de La Garza, A. L., Milagro, F. I., Boque, N., Campi¼n, J., & Mart¼nez, J. A. (2011). Natural inhibitors of pancreatic lipase as new players in obesity treatment. *Planta medica*, 77(08), 773-785.
- de Toledo, T. C. F., Canniatti-Brazaca, S. G., Arthur, V., & Piedade, S. M. D. S. (2007). Effects of gamma radiation on total phenolics, trypsin and tannin inhibitors in soybean grains. *Radiation Physics and Chemistry*, 76(10), 1653-1656.
- Demir, M. K., & Elg¼n, A. (2014). Comparison of autoclave, microwave, IR and UV-C stabilization of whole wheat flour branny fractions upon the nutritional properties of whole wheat bread. *Journal of food science and technology*, 51, 59-66.
- Deniz, G. (2014). Kanatlı hayvanların rasyonlarında fitaz enzimi kullanılmasının ¼nemi. *Uludağ Üniversitesi Veteriner Fak¼ltesi Dergisi*, 33(1-2), 27-31.
- Doss, A., Pugalenthı, M., Vadivel, V. G., Subhashini, G., & Subash, A. R. (2011). Effects of processing technique on the nutritional composition and antinutrients content of under-utilized food legume *Canavalia ensiformis* L. DC. *International Food Research Journal*, 18(3).
- Dust, J. M., Gajda, A. M., Flickinger, E. A., Burkhalter, T. M., Merchen, N. R., & Fahey, G. C. (2004). Extrusion conditions affect chemical composition and in

- vitro digestion of select food ingredients. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 52(10), 2989-2996.
- Edwards, E. J., & Cobb, A. H. (1996). Improved high-performance liquid chromatographic method for the analysis of potato (*Solanum tuberosum*) glycoalkaloids. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 44(9), 2705-2709.
- Egli, I., Davidsson, L., Juillerat, M. A., Barclay, D., & Hurrell, R. F. (2002). The influence of soaking and germination on the phytase activity and phytic acid content of grains and seeds potentially useful for complementary feedin. *Journal of food science*, 67(9), 3484-3488.
- Egounlety, M., & Aworh, O. C. (2003). Effect of soaking, dehulling, cooking and fermentation with *Rhizopus oligosporus* on the oligosaccharides, trypsin inhibitor, phytic acid and tannins of soybean (*Glycine max* Merr.), cowpea (*Vigna unguiculata* L. Walp) and groundbean (*Macrotyloma geocarpa* Harms). *Journal of food engineering*, 56(2-3), 249-254.
- Ehlers, A., Florian, S., Schumacher, F., Meinel, W., Lenze, D., Hummel, M., ... & Lampen, A. (2015). The glucosinolate metabolite 1-methoxy-3-indolylmethyl alcohol induces a gene expression profile in mouse liver similar to the expression signature caused by known genotoxic hepatocarcinogens. *Molecular nutrition & food research*, 59(4), 685-697.
- Ene-Obong, H. N., & Obizoba, I. C. (1996). Effect of domestic processing on the cooking time, nutrients, antinutrients and in vitro protein digestibility of the African yambean (*Sphenostylis stenocarpa*). *Plant Foods for Human Nutrition*, 49, 43-52.
- Entezari, M. H., & Pétrier, C. (2005). A combination of ultrasound and oxidative enzyme: sono-enzyme degradation of phenols in a mixture. *Ultrasonics sonochemistry*, 12(4), 283-288.
- Ercan, P., & El, S. N. (2016). Inhibitory effects of chickpea and *Tribulus terrestris* on lipase, α -amylase and α -glucosidase. *Food chemistry*, 205, 163-169.

- Ergün, A., Tuncer, Ş. D., Çolpan, İ., Yalçın, S., Yıldız, G., Küçükersan, K., ... & Şehu, A. (2002). Yemler, Yem Hijyeni ve Teknolojisi, AÜ Veteriner Fak. *Hayvan Besleme ve Beslenme Hastalıkları Anabilim Dalı, Ankara*.
- Erkek, R., & Ünlü, H. B. (2003). Fitaz enziminin etlik piliçlerin beslenmesinde kullanımı. *Hayvansal Üretim, 44*(2).
- Ertaş, N., & Türker, S. (2014). Bulgur processes increase nutrition value: possible role in in-vitro protein digestability, phytic acid, trypsin inhibitor activity and mineral bioavailability. *Journal of Food Science and Technology, 51*, 1401-1405.
- Etsuyankpa, M. B., Gimba, C. E., Agbaji, E. B., Omoniyi, K. I., Ndamitso, M. M., & Mathew, J. T. (2015). Assessment of the effects of microbial fermentation on selected anti-nutrients in the products of four local cassava varieties from Niger state, Nigeria. *American Journal of Food Science and Technology, 3*(3), 89-96.
- Etuk, E. B., Ifeduba, A. V., Okata, U. E., Chiaka, I., Okoli, I. C., Okeudo, N. J., ... & Moreki, J. C. (2012). Nutrient composition and feeding value of sorghum for livestock and poultry: a review. *J. Anim. Sci. Adv, 2*(6), 510-524.
- Farag, M. D. E. D. H. (1998). The nutritive value for chicks of full-fat soybeans irradiated at up to 60 kGy. *Animal feed science and Technology, 73*(3-4), 319-328.
- Febles, C. I., Arias, A., Hardisson, A., Rodriguez-Alvarez, C., & Sierra, A. (2002). Phytic acid level in wheat flours. *Journal of Cereal Science, 36*(1), 19-23.
- Fenwick, G. R., Price, K. R., Tsukamoto, C., & Okubo, K. (1991). Saponins. In F. J. P. D'Mello, C. M. Duffus, & J. H. Duffus (Eds.), *Toxic substances in crop plants* (pp. 285–327).
- Francis, G., Kerem, Z., Makkar, H. P., & Becker, K. (2002). The biological action of saponins in animal systems: a review. *British journal of Nutrition, 88*(6), 587-605.
- Gadelha, I. C. N., Fonseca, N. B. S., Oloris, S. C. S., Melo, M. M., & Soto-Blanco, B. (2014). Gossypol toxicity from cottonseed products. *The Scientific World Journal, 2014*(1), 231635.

- Galati, A., Oguntoyinbo, F. A., Moschetti, G., Crescimanno, M., & Settanni, L. (2014). The cereal market and the role of fermentation in cereal-based food production in Africa. *Food Reviews International*, 30(4), 317-337.
- Gibson, R. S., Perlas, L., & Hotz, C. (2006). Improving the bioavailability of nutrients in plant foods at the household level. *Proceedings of the Nutrition Society*, 65(2), 160-168.
- Greiner, R., & Konietzny, U. (2006). Phytase for food application. *Food Technology & Biotechnology*, 44(2).
- Guerrero-Beltrán, J. A., Estrada-Girón, Y., Swanson, B. G., & Barbosa-Cánovas, G. V. (2009). Pressure and temperature combination for inactivation of soymilk trypsin inhibitors. *Food Chemistry*, 116(3), 676-679.
- Gupta, R. K., Gangoliya, S. S., & Singh, N. K. (2015). Reduction of phytic acid and enhancement of bioavailable micronutrients in food grains. *Journal of food science and technology*, 52, 676-684.
- Gürsoy, E. (2002). Yemlerde Bulunan Antinutrisyonel Maddeler ve Hayvan Beslemede Kullanımları.
- Gürsoy, O., & Gökçe, R. (2001). Soya ve Ürünlerinde Fenolik Bileşikler ve Beslenmeyi Kısıtlayıcı Faktörler. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 7(1), 87-93.
- Haddad, J., & Allaf, K. (2007). A study of the impact of instantaneous controlled pressure drop on the trypsin inhibitors of soybean. *Journal of Food Engineering*, 79(1), 353-357.
- Haq, S. K., Atif, S. M., & Khan, R. H. (2004). Protein proteinase inhibitor genes in combat against insects, pests, and pathogens: natural and engineered phytoprotection. *Archives of biochemistry and Biophysics*, 431(1), 145-159.
- Harland, B. F., & Harland, J. (1980). Fermentative reduction of phytate in rye, white and whole wheat breads. *Cereal Chem*, 57(3), 226-229.
- Hayta, M., & Hendek Ertop, M. (2017). Optimisation of sourdough bread incorporation into wheat bread by response surface methodology: Bioactive and nutritional properties. *International Journal of Food Science & Technology*, 52(8), 1828-1835.

- Hernandez-Infante, M., Sousa, V., Montalvo, I., & Tena, E. (1998). Impact of microwave heating on hemagglutinins, trypsin inhibitors and protein quality of selected legume seeds. *Plant Foods for Human Nutrition*, 52, 199-208.
- Horwitz, W., Chichilo, P., & Reynolds, H. (1975). Official methods of analysis of AOAC.
- Hotz, C., & Gibson, R. S. (2001). Assessment of home-based processing methods to reduce the phytate content and phytate/zinc molar ratio of white maize (*Zea mays*). *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 49(2), 692-698.
- Hotz, Rosalind S. Gibson, Lara Temple, C. (2001). A home-based method to reduce phytate content and increase zinc bioavailability in maize-based complementary diets. *International journal of food sciences and nutrition*, 52(2), 133-142.
- Huang, H., Kwok, K. C., & Liang, H. (2004). Effects of tea polyphenols on the activities of soybean trypsin inhibitors and trypsin. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 84(2), 121-126.
- Huang, H., Kwok, K. C., & Liang, H. H. (2008). Inhibitory activity and conformation changes of soybean trypsin inhibitors induced by ultrasound. *Ultrasonics Sonochemistry*, 15(5), 724-730.
- Jasti, L. S., Lavanya, K., & Fadnavis, N. W. (2015). Adsorption induced denaturation: application to denaturation of soybean trypsin inhibitor (SBTI) and lipoxygenase (LOX) in soymilk. *Biotechnology letters*, 37, 147-151.
- Jia, W., Slominski, B. A., Guenter, W., Humphreys, A., & Jones, O. (2008). The effect of enzyme supplementation on egg production parameters and omega-3 fatty acid deposition in laying hens fed flaxseed and canola seed. *Poultry science*, 87(10), 2005-2014.
- Jourdan, G. A., Noreña, C. P., & Brandelli, A. (2007). Inactivation of trypsin inhibitor activity from Brazilian varieties of beans (*Phaseolus vulgaris* L.). *Food science and technology international*, 13(3), 195-198.
- Kala, B. K., & Mohan, V. R. (2012). Effect of microwave treatment on the antinutritional factors of two accessions of velvet bean, *Mucuna pruriens* (L.)

- DC. var. utilis (Wall. ex Wight) Bak. ex Burck. *International Food Research Journal*, 19(3).
- Kardeş, T. A. (2012). *Azotlu ve organik gübrelemenin Beypazarı yöresinde yetiştirilen bazı sebzelerin nitrat kapsamına etkisi* (Master's thesis, Fen Bilimleri Enstitüsü).
- Kataria, A., Chauhan, B. M., & Punia, D. (1989). Antinutrients in amphidiploids (black gram × mung bean): Varietal differences and effect of domestic processing and cooking. *Plant Foods for Human Nutrition*, 39, 257-266.
- Kaur, S., Sharma, S., Dar, B. N., & Singh, B. (2012). Optimization of process for reduction of antinutritional factors in edible cereal brans. *Food science and technology international*, 18(5), 445-454.
- Kaya, S., & Akar, F. (2002). Metaller, diğer organik maddeler ve radyoaktif maddeler Veteriner Hekimliğinde Toksikoloji 2. Baskı. Ed: S. Kaya, İ. Pirinççi, A. Bilgili., s. 240- 243, Ankara.
- Kayitesi, E., Duodu, K. G., Minnaar, A., & de Kock, H. L. (2013). Effect of micronisation of pre-conditioned cowpeas on cooking time and sensory properties of cooked cowpeas. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 93(4), 838-845.
- Kim, H. Y., Min, J. H., Lee, J. H., & Ji, G. E. (2000). Growth of lactic acid bacteria and bifidobacteria in natural media using vegetables, seaweeds, grains and potatoes. *Food Science and Biotechnology*, 9(5), 322-324.
- Kiranmayi, P. (2014). Is bio active compounds in plants acts as anti nutritonal factors. *Int J Curr Pharm Res*, 6(2), 36-38.
- Kristal, A. R., & Lampe, J. W. (2002). Brassica vegetables and prostate cancer risk: a review of the epidemiological evidence. *Nutrition and cancer*, 42(1), 1-9.
- Kruger, J., Oelofse, A., & Taylor, J. R. (2014). Effects of aqueous soaking on the phytate and mineral contents and phytate: mineral ratios of wholegrain normal sorghum and maize and low phytate sorghum. *International Journal of Food Sciences and Nutrition*, 65(5), 539-546.
- Kumar, V., Sinha, A. K., Makkar, H. P., & Becker, K. (2010). Dietary roles of phytate and phytase in human nutrition: A review. *Food chemistry*, 120(4), 945-959.

- Kumari, S. (2018). *The effect of soaking almonds and hazelnuts on Phytate and mineral concentrations* (Doctoral dissertation, University of Otago).
- Kutlu, H. R. (2015). Kanatlı hayvan besleme (Teorik Temel-Pratik Uygulama) -Ders Notu. Çukurova Üniversitesi Ziraat Fakültesi Zootekni Bölümü Yemler ve Hayvan Besleme Anabilim Dalı Adana, s. 83.
- Küçük, O. (2019). Yem hijyeni ve teknolojisi. Ders notları. Erciyes Üniversitesi Veteriner Fakültesi Hayvan Besleme ve Beslenme Hastalıkları Anabilim Dalı – Kayseri, s. 74-75.
- Kwok, K. C., Qin, W. H., & Tsang, J. C. (1993). Heat inactivation of trypsin inhibitors in soymilk at ultra-high temperatures. *Journal of Food Science*, 58(4), 859-862.
- Kwok, K. C., Liang, H. H., & Niranjana, K. (2002). Mathematical modelling of the heat inactivation of trypsin inhibitors in soymilk at 121-154 C. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 82, 243-247.
- Kwon, D., Son, S. W., Kim, S. H., Bae, J. E., Lee, Y. H., & Jung, Y. S. (2022). Effects of dietary restriction on hepatic sulfur-containing amino acid metabolism and its significance in acetaminophen-induced liver injury. *The Journal of Nutritional Biochemistry*, 108, 109082.
- Lampel, K. A., Al-Khalidi, S., & Cahill, S. M. (Eds.). (2012). *Bad Bug Book: Foodborne Pathogenic Microorganisms and Natural Toxins Handbook*. CreateSpace.
- Lawrence, P. K., & Koundal, K. R. (2002). Plant protease inhibitors in control of phytophagous insects. *Electronic Journal of Biotechnology*, 5(1), 5-6.
- Lee, S. S., Mohd Esa, N., & Loh, S. P. (2015). In vitro inhibitory activity of selected legumes against pancreatic lipase. *Journal of Food Biochemistry*, 39(4), 485-490.
- Leeson, S., & Summers, J. D. (2001). Non-nutritive feed additives, Nutrition of the chicken. *Published by University Books PO Box, 1326*, 429-455.
- Lestienne, I., Icard-Vernière, C., Mouquet, C., Picq, C., & Trèche, S. (2005). Effects of soaking whole cereal and legume seeds on iron, zinc and phytate contents. *Food chemistry*, 89(3), 421-425.

- Li, X., & Toyoda, K. (2011). Monitoring of coagulation degree of soymilk by electrical impedance spectroscopy and ohmic heating. *Sensor Letters*, 9(3), 1120-1125.
- Liang, J., Han, B. Z., Nout, M. R., & Hamer, R. J. (2008). Effects of soaking, germination and fermentation on phytic acid, total and in vitro soluble zinc in brown rice. *Food chemistry*, 110(4), 821-828.
- Liener, I. E. (1980). Heat-labile antinutritional factors. *Advances in Legume Science. International Legume Conference*. 157-170.
- Liener, I. E. (2003). Phytohemagglutinins: Their nutritional significance. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 22, 17.
- Linsberger-Martin, G., Weighlofer, K., Phuong, T. P. T., & Berghofer, E. (2013). High hydrostatic pressure influences antinutritional factors and in vitro protein digestibility of split peas and whole white beans. *LWT-Food Science and Technology*, 51(1), 331-336.
- Lu, L., Zhao, L., Zhang, C., Kong, X., Hua, Y., & Chen, Y. (2015). Comparative effects of ohmic, induction cooker, and electric stove heating on soymilk trypsin inhibitor inactivation. *Journal of Food Science*, 80(3), C495-C503.
- Luu, H. N., Blot, W. J., Xiang, Y. B., Cai, H., Hargreaves, M. K., Li, H., ... & Shu, X. O. (2015). Prospective evaluation of the association of nut/peanut consumption with total and cause-specific mortality. *JAMA internal medicine*, 175(5), 755-766.
- Mahgoub, S. E., & Elhag, S. A. (1998). Effect of milling, soaking, malting, heat-treatment and fermentation on phytate level of four Sudanese sorghum cultivars. *Food chemistry*, 61(1-2), 77-80.
- Majzoobi, M., Pashangeh, S., Farahnaky, A., Eskandari, M. H., & Jamalian, J. (2014). Effect of particle size reduction, hydrothermal and fermentation treatments on phytic acid content and some physicochemical properties of wheat bran. *Journal of food science and technology*, 51, 2755-2761.
- Makokha, A. O., Oniang'o, R. K., Njoroge, S. M., & Kamar, O. K. (2002). Effect of traditional fermentation and malting on phytic acid and mineral availability

- from sorghum (*Sorghum bicolor*) and finger millet (*Eleusine coracana*) grain varieties grown in Kenya. *Food and nutrition bulletin*, 23(3_suppl1), 241-245.
- Manassero, C. A., Vaudagna, S. R., Sancho, A. M., Añón, M. C., & Speroni, F. (2016). Combined high hydrostatic pressure and thermal treatments fully inactivate trypsin inhibitors and lipoxigenase and improve protein solubility and physical stability of calcium-added soymilk. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 35, 86-95.
- Maphosa, Y., & Jideani, V. A. (2017). The role of legumes in human nutrition. *Functional food-improve health through adequate food*, 1, 13.
- Mareš, M., Meloun, B., Pavlik, M., Kostka, V., & Baudyš, M. (1989). Primary structure of cathepsin D inhibitor from potatoes and its structure relationship to soybean trypsin inhibitor family. *FEBS letters*, 251(1-2), 94-98.
- Marshall, A. A., Samuel, J. E., Mary, U. E., & Inegbenose, G. I. (2011). Effect of germination on the phytase activity, phytate and total phosphorus contents of rice, maize, millet, sorghum and wheat. *J Food Sci Tech*, 48, 724-729.
- Martin, P., Shalini, O. O., & Werry, K. T. (1991). Evaluation of the LAB isolated from faeces of breast-fed infants. *African Journal of Biotechnology*, 6, 939-949.
- Masud, T., Mahmood, T., Latif, A., Sammi, S., & Hameed, T. (2007). Influence of processing and cooking methodologies for reduction of phytic acid content in wheat (*Triticum aestivum*) varieties. *Journal of Food Processing and Preservation*, 31(5), 583-594.
- Mazza, G., & Oomah, B. D. (1995). Flaxseed, dietary fiber, and cyanogens. In "Flaxseed in Human Nutrition"(SC Cunnane, and LU Thompson, eds.).
- Mohapatra, D., Patel, A. S., Kar, A., Deshpande, S. S., & Tripathi, M. K. (2019). Effect of different processing conditions on proximate composition, antioxidants, anti-nutrients and amino acid profile of grain sorghum. *Food chemistry*, 271, 129-135.
- Morzelle, M. C., Salgado, J. M., Massarioli, A. P., Bachiega, P., de Oliveira Rios, A., Alencar, S. M., ... & de Camargo, A. C. (2019). Potential benefits of phenolics

- from pomegranate pulp and peel in Alzheimer's disease: Antioxidant activity and inhibition of acetylcholinesterase. *Journal of Food Bioactives*, 5, 136-141.
- Moses, T., Papadopoulou, K. K., & Osbourn, A. (2014). Metabolic and functional diversity of saponins, biosynthetic intermediates and semi-synthetic derivatives. *Critical reviews in biochemistry and molecular biology*, 49(6), 439-462.
- Mostafa, M. M., Rahma, E. H., & Rady, A. H. (1987). Chemical and nutritional changes in soybean during germination. *Food Chemistry*, 23(4), 257-275.
- Muramoto, K. (2017). Lectins as bioactive proteins in foods and feeds. *Food Science and Technology Research*, 23(4), 487-494.
- Murugkar, D. A. (2015). Effect of different process parameters on the quality of soymilk and tofu from sprouted soybean. *Journal of food science and technology*, 52, 2886-2893.
- Nagalakshmi, D., Rama, R. S. V., Panda, A. K., & Sastry, V. R. B. (2007). A review: cottonseed meal in poultry diets. *J. Poult. Sci.* 44:119– 134.
- Nath, H., Samtiya, M., & Dhewa, T. (2022). Beneficial attributes and adverse effects of major plant-based foods anti-nutrients on health: A review. *Human Nutrition & Metabolism*, 28, 200147.
- National Research Council, & Subcommittee on Poultry Nutrition. (1994). *Nutrient requirements of poultry: 1994*. National Academies Press.
- Nes, I. F., Diep, D. B., Håvarstein, L. S., Brurberg, M. B., Eijsink, V., & Holo, H. (1996). Biosynthesis of bacteriocins in lactic acid bacteria. *Antonie van leeuwenhoek*, 70, 113-128.
- Novak, W. K., & Haslberger, A. G. (2000). Substantial equivalence of antinutrients and inherent plant toxins in genetically modified novel foods. *Food and Chemical Toxicology*, 38(6), 473-483.
- Ogbonna, A. C., Abujah, C. I., Ide, E. O., & Udofia, U. S. (2012). Effect of malting conditions on the nutritional and anti-nutritional factors of sorghum grist. *The Annals of the University Dunarea de Jos of Galati. Fascicle VI-Food Technology*, 36(2), 64-72.

- Ogodo, A. C., Agwaranze, D. I., Aliba, N. V., Kalu, A. C., & Nwaneri, C. B. (2019). Fermentation by lactic acid bacteria consortium and its effect on anti-nutritional factors in maize flour.
- Oruç, H. H., Sonal, S., & Ceylan, S. (2001). Kuş yemlerinde total aflatoksin, nitrat ve nitrit. *J Fac Vet Med*, 20, 35-38.
- Osella, C. A., Gordo, N. A., González, R. J., Tosi, E., & Ré, E. (1997). Soybean heat-treated using a fluidized bed. *LWT-Food Science and Technology*, 30(7), 676-680.
- Otto, H. H., & Schirmeister, T. (1997). Cysteine proteases and their inhibitors. *Chemical reviews*, 97(1), 133-172.
- Önal, A. G., Şahin, A., & Kuran, M. (2004). Çakşir (*Ferula communis*) otunun toklularda üreme fonksiyonları üzerine etkileri, 4. *Ulusal Zootečni Bilim Kongresi*, 1, 443-446.
- Özkan, K. (1974). Ülkemizde yeterince değeriendirilmeyen bir yem: Pamuk tohumu k¼sþesi. *Ege Üniv. Zir. Fak. Derg.*, 11(1), 135-145.
- Pallauf, J., & Rimbach, G. (1997). Nutritional significance of phytic acid and phytase. *Archives of animal nutrition*, 50(4), 301-319.
- Perlas, L. A., & Gibson, R. S. (2002). Use of soaking to enhance the bioavailability of iron and zinc from rice-based complementary foods used in the Philippines. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 82(10), 1115-1121.
- Petres, J., Márkus, Z., Gelencsér, É., Bogár, Z., Gajzágó, I., & Czukor, B. (1990). Effect of dielectric heat treatment on protein nutritional values and some antinutritional factors in soya bean. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 53(1), 35-41.
- Phelps, R. A., Shenstone, F. S., Kemmerer, A. R., & Evans, R. J. (1965). A review of cyclopropanoid compounds: biological effects of some derivatives. *Poultry Science*, 44(2), 358-394.
- Prasad, S., & Chetty, A. A. (2008). Nitrate-N determination in leafy vegetables: Study of the effects of cooking and freezing. *Food Chemistry*, 106(2), 772-780.

- Ragon, M., Aumelas, A., Chemardin, P., Galvez, S., Moulin, G., & Boze, H. (2008). Complete hydrolysis of myo-inositol hexakisphosphate by a novel phytase from *Debaryomyces castellii* CBS 2923. *Applied microbiology and biotechnology*, 78(1), 47-53.
- Ramteke, R., Doneria, R., & Gendley, M. K. (2019). Antinutritional factors in feed and fodder used for livestock and poultry feeding. *Acta scientific nutritional Health*, 3(5), 39-48.
- Ray, M., Ghosh, K., Singh, S., & Mondal, K. C. (2016). Folk to functional: an explorative overview of rice-based fermented foods and beverages in India. *Journal of Ethnic Foods*, 3(1), 5-18.
- Redden, R. J., Chen, W., & Sharma, B. (2005). Chickpea breeding and management. *United Kingdom: CABI*.
- Rehman, Z. U., & Shah, W. H. (2005). Thermal heat processing effects on antinutrients, protein and starch digestibility of food legumes. *Food chemistry*, 91(2), 327-331.
- Rehman, Z. U., Salariya, A. M., Yasin, M., & Zafar, S. I. (2001). Thermal heat processing effects on in vitro protein digestibility of chickpea (*Cicer arietinum*). *Pakistan Journal of Science and Research*, 53, 75-77.
- Riaz, M. N. (Ed.). (2000). *Extruders in food applications*. CRC press.
- Romarheim, O. H., Aslaksen, M. A., Storebakken, T., Krogdahl, Å., & Skrede, A. (2005). Effect of extrusion on trypsin inhibitor activity and nutrient digestibility of diets based on fish meal, soybean meal and white flakes. *Archives of animal nutrition*, 59(6), 365-375.
- Rouhana, A., Adler-Nissen, J. E. N. S., Cogan, U. R. I., & Frøkiær, H. (1996). Heat inactivation kinetics of trypsin inhibitors during high temperature-short time processing of soymilk. *Journal of Food Science*, 61(2), 265-269.
- Ruan, Q. Y., Zheng, X. Q., Chen, B. L., Xiao, Y., Peng, X. X., Leung, D. W., & Liu, E. E. (2013). Determination of total oxalate contents of a great variety of foods commonly available in Southern China using an oxalate oxidase prepared from wheat bran. *Journal of food composition and analysis*, 32(1), 6-11.

- Sakai, N., & Mao, W. (2006). Infrared heating. *Food science and technology-new yorkmarcel dekker*, 150, 493.
- Salunkhe, D. K., & Chavan, J. K. (1989). *Dietary tannins: consequences and remedies*. CRC Press.
- Samia, M., Abdel-Rahaman, A. R., El-Maki, B. H., Babiker, E. E., & El-Tinay, H. A. (2005). Effect of malt pretreatment followed by fermentation on antinutritional factors and HCl extractability of minerals of pearl millet cultivars.
- Samtiya, M., Aluko, R. E., & Dhewa, T. (2020). Plant food anti-nutritional factors and their reduction strategies: an overview. *Food Production, Processing and Nutrition*, 2, 1-14.
- Savage, G. P., & Mårtensson, L. (2010). Comparison of the estimates of the oxalate content of taro leaves and corms and a selection of Indian vegetables following hot water, hot acid and in vitro extraction methods. *Journal of Food Composition and Analysis*, 23(1), 113-117.
- Savage, W. D., Wei, L. S., Sutherland, J. W., & Schmidt, S. J. (1995). Biologically active components inactivation and protein insolubilization during heat processing of soybeans. *Journal of Food Science*, 60(1), 164-168.
- Savelkoul, F. H. M. G., Van der Poel, A. F. B., & Tamminga, S. (1992). The presence and inactivation of trypsin inhibitors, tannins, lectins and amylase inhibitors in legume seeds during germination. A review. *Plant Foods for Human Nutrition*, 42, 71-85.
- Schlemmer, U., Frølich, W., Prieto, R. M., & Grases, F. (2009). Phytate in foods and significance for humans: food sources, intake, processing, bioavailability, protective role and analysis. *Molecular nutrition & food research*, 53(S2), S330-S375.
- Seguin, J. (1997). Kanolanın Fransa ve Avrupa’da yem sanayinde kullanımı. *Kanola sempozyumu*, 10.
- Serrano, J., Puupponen-Pimiä, R., Dauer, A., Aura, A. M., & Saura-Calixto, F. (2009). Tannins: current knowledge of food sources, intake, bioavailability and biological effects. *Molecular nutrition & food research*, 53(S2), S310-S329.

- Sessa, D. J., Baker, E. C., & Friedrich, J. P. (1988). Inactivation of trypsin inhibitors in whole and cracked soybeans with sodium metabisulfite.
- Sessa, D. J., Haney, J. K., & Nelsen, T. C. (1990). Inactivation of soybean trypsin inhibitors with ascorbic acid plus copper. *Journal of agricultural and food chemistry*, 38(7), 1469-1474.
- Seyis, F., & Aydın, E. (2014). The last barrier for 00-type interspecific rapeseed (*Brassica napus* L.): Glucosinolates. *Türk Tarım ve Doğa Bilimleri Dergisi*, 1(Özel Sayı-2), 1413-1418.
- Sezmiş, G., & Macit, M. (2018). Çiğ ve Fiziksel Muameleye Tabi Tutulmuş Adi Fiğın (*Vicia Sativa* L.) Etlik Piliçlerde Performans, Kesim ve Bazı Kan Parametreleri Üzerine Etkisi. *Tekirdağ Ziraat Fakültesi Dergisi*, 15(1), 102-110.
- Shahidi, F. (1997). Beneficial health effects and drawbacks of antinutrients and phytochemicals in foods: an overview.
- Shi, J., Arunasalam, K., Yeung, D., Kakuda, Y., Mittal, G., & Jiang, Y. (2004). Saponins from edible legumes: chemistry, processing, and health benefits. *Journal of medicinal food*, 7(1), 67-78.
- Shimelis, E. A., & Rakshit, S. K. (2007). Effect of processing on antinutrients and in vitro protein digestibility of kidney bean (*Phaseolus vulgaris* L.) varieties grown in East Africa. *Food chemistry*, 103(1), 161-172.
- Simwaka, J. E., Chamba, M. V. M., Huiming, Z., Masamba, K. G., & Luo, Y. (2017). Effect of fermentation on physicochemical and antinutritional factors of complementary foods from millet, sorghum, pumpkin and amaranth seed flours. *International Food Research Journal*, 24(5), 1869-1879.
- Singh, A., Gupta, S., Kaur, R., & Gupta, H. R. (2017). Process optimization for anti-nutrient minimization of millets. *Asian Journal of Dairy and Food Research*, 36(4), 322-326.
- Singh, P. K. (2002). Utilisation of phytic acid in poultry diets. *Poultry Planner*, 3(11), 17-19.
- Stewart, O. J., Raghavan, G. S. V., Orsat, V., & Golden, K. D. (2003). The effect of drying on unsaturated fatty acids and trypsin inhibitor activity in soybean. *Process Biochemistry*, 39(4), 483-489.

- Tajoddin, M., Manohar, S., & Lalitha, J. (2014). Effect of soaking and germination on polyphenol content and polyphenol oxidase activity of mung bean (*Phaseolus aureus* L.) cultivars differing in seed color. *International journal of food properties*, 17(4), 782-790.
- Tewari, K., Kumari, S., Vinutha, T., Singh, B., & Dahuja, A. (2015). Gamma irradiation induces reduction in the off-flavour generation in soybean through enhancement of its antioxidant potential. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 303, 2041-2051.
- Tian, S., Sun, Y., Chen, Z., Yang, Y., & Wang, Y. (2019). Functional properties of polyphenols in grains and effects of physicochemical processing on polyphenols. *Journal of Food Quality*, 2019(1), 2793973.
- Timotheo, C. A., & Lauer, C. M. (2018). Toxicity of vegetable tannin extract from *Acacia mearnsii* in *Saccharomyces cerevisiae*. *International journal of environmental science and technology*, 15, 659-664.
- Torres, J., Rutherford, S. M., Muñoz, L. S., Peters, M., & Montoya, C. A. (2016). The impact of heating and soaking on the in vitro enzymatic hydrolysis of protein varies in different species of tropical legumes. *Food Chemistry*, 194, 377-382.
- Ünver, E., Okur, A. A., Tahtabiçen, E., Kara, B., & Şamlı, H. E. (2014). Tanenler ve hayvan besleme üzerine etkileri. *Turkish Journal of Agriculture-Food Science and Technology*, 2(6), 263-267.
- Vadivel, V., Pugalenthi, M., & Megha, S. (2008). Biological evaluation of protein quality of raw and processed seeds of gila bean (*Entada scandens* Benth.). *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 8(2), 125-133.
- Vagadia, B. H., Vanga, S. K., & Raghavan, V. (2017). Inactivation methods of soybean trypsin inhibitor—A review. *Trends in Food Science & Technology*, 64, 115-125.
- Van Der Ven, C., Matser, A. M., & Van den Berg, R. W. (2005). Inactivation of soybean trypsin inhibitors and lipoxygenase by high-pressure processing. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 53(4), 1087-1092.
- Vearasilp, T., Laenoi, W., Vearasilp, S., Krittigamas, N., Lücke, W., Pawelzik, E., & Ter Meulen, U. (2005). Effect of radio frequency technique on nutrient quality

- and destruction of trypsin inhibitor in soybean. *The Global Food and Product Chain—Dynamics, Innovations, Conflicts, Strategies. Book of Abstracts*, 384.
- Vellingiri, V., & Hans, K. B. (2010). Effect of certain indige nous processing methods on the bioactive compounds of ten different wild type legume grains. *Journal of Food Science and Technology*, 49, 673-684.
- Vidal-Valverde, C., Frias, J., Estrella, I., Gorospe, M. J., Ruiz, R., & Bacon, J. (1994). Effect of processing on some antinutritional factors of lentils. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 42(10), 2291-2295.
- Wikipedi, 2024. Erişim adresi: https://en.wikipedia.org/wiki/Projections_of_population_growth. Erişim tarihi: 12.11.2024.
- Vincken, J. P., Heng, L., de Groot, A., & Gruppen, H. (2007). Saponins, classification and occurrence in the plant kingdom. *Phytochemistry*, 68(3), 275-297.
- Wakil, S. M., & Onilude, A. A. (2009). Microbiological and chemical changes during production of malted and fermented cereal-legume weaning foods. *Adv. Food Sci*, 31(3), 139-145.
- Wallace, G. M., Bannatyne, W. R., & Khaleque, A. (1971). Studies on the processing and properties of soymilk: II.—Effect of processing conditions on the trypsin inhibitor activity and the digestibility in vitro of proteins in various soymilk preparations. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 22(10), 526-531.
- Wang, L. J., Li, D., Tatsumi, E., Liu, Z. S., Chen, X. D., & Li, L. T. (2007). Application of two-stage ohmic heating to tofu processing. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 46(5), 486-490.
- Wang, N., Lewis, M. J., Brennan, J. G., & Westby, A. (1997). Effect of processing methods on nutrients and anti-nutritional factors in cowpea. *Food chemistry*, 58(1-2), 59-68.
- Williams, M. C. (1978). Toxicity of saponins in Alfombrilla (*Drymaria arenarioides*).
- Woyengo, T. A., Beltranena, E., & Zijlstra, R. T. (2017). Effect of anti-nutritional factors of oilseed co-products on feed intake of pigs and poultry. *Animal Feed Science and Technology*, 233, 76-86.

- Wu, G., Fanzo, J., Miller, D. D., Pingali, P., Post, M., Steiner, J. L., & Thalacker-Mercer, A. E. (2014). Production and supply of high-quality food protein for human consumption: sustainability, challenges, and innovations. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1321(1), 1-19.
- Yalcin, S., & Basman, A. (2015). Effects of infrared treatment on urease, trypsin inhibitor and lipoxygenase activities of soybean samples. *Food chemistry*, 169, 203-210.
- Yalçın, S. (2002). Yemlerde Antinutrisyonel Faktörler. *Ergün, A., Tuncer, ŞD, Çolpan, İ., Yalçın, S., Yıldız, G., Küçükersan, MK, Küçükersan, S., Önel, AG, Muğlalı, ÖH, Şehu, A. Yemler, Yem Hijyeni ve Teknolojisi. Pozitif Matbaacılık, Ankara*, 334.
- Yıldırım, A., & Öztürk, E. (2013). Japon Bildirimi Rasyonlarında Soya Küspesi Yerine Pamuk Tohumu Küspesi İkamesinin Yumurta Verim ve Kalite Özelliklerine Etkisi. *Turkish Journal of Agriculture-Food Science and Technology*, 1(1), 44-50.
- Yoshiara, L. Y., Mandarino, J. M. G., Carrão-Panizzi, M. C., Madeira, T. B., da Silva, J. B., de Camargo, A. C., ... & Ida, E. I. (2018). Germination changes the isoflavone profile and increases the antioxidant potential of soybean.
- Yoshida, H., & Kajimoto, G. (1988). Effects of microwave treatment on the trypsin inhibitor and molecular species of triglycerides in soybeans. *Journal of food science*, 53(6), 1756-1760.
- Yuan, S. H., & Chang, S. K. (2010). Trypsin inhibitor activity in laboratory-produced and commercial soymilk. In *Chemistry, texture, and flavor of soy* (pp. 23-43). American Chemical Society.
- Zhong, Y., Wang, Z., & Zhao, Y. (2015). Impact of radio frequency, microwaving, and high hydrostatic pressure at elevated temperature on the nutritional and antinutritional components in black soybeans. *Journal of Food Science*, 80(12), C2732-C2739.
- Žilić, S., Bozović, I., & Hadži-Tašković Šukalović, V. (2012). Thermal inactivation of soybean bioactive proteins. *International Journal of Food Engineering*, 8(4).



IKSAD
Publishing House



ISBN: 978-625-378-030-2