

TARIMSAL VERİMLİLİĞİ KISITLAYAN SORUNLARLA MÜCADELE YÖNTEMLERİ-3



EDİTÖRLER
DOÇ. DR. ABDURRAHİM YILMAZ
DOÇ. DR. HİLAL YILMAZ

TARIMSAL VERİMLİLİĞİ KISITLAYAN SORUNLARLA MÜCADELE YÖNTEMLERİ-3

EDİTÖRLER

Doç. Dr. Abdurrahim YILMAZ

Doç. Dr. Hilal YILMAZ

YAZARLAR

Prof. Dr. Mevlüt KARAOĞLU

Prof. Dr. Vahdettin ÇİFTÇİ

Doç. Dr. Abdurrahim YILMAZ

Doç. Dr. Hilal YILMAZ

Dr. Öğr. Üyesi Ahmet YAMAN

Dr. Öğr. Üyesi Metin KOÇAK

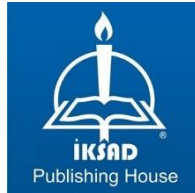
Dr. Öğr. Üyesi Sibel BOYSAN CANAL

Öğr. Gör. Dr. Onur VURAL

Arş. Gör. Dr. Sibel TURAN SİRKE

Arş. Gör. Leyla KURGAN

Arş. Gör. Yusuf Talha İÇOĞLU



Copyright © 2025 by iksad publishing house
All rights reserved. No part of this publication may be reproduced,
distributed or transmitted in any form or by
any means, including photocopying, recording or other electronic or
mechanical methods, without the prior written permission of the publisher,
except in the case of
brief quotations embodied in critical reviews and certain other
noncommercial uses permitted by copyright law. Institution of Economic
Development and Social
Researches Publications®
(The Licence Number of Pubicator: 2014/31220)
TÜRKİYE TR: +90 342 606 06 75
USA: +1 631 685 0 853
E mail: iksadyayinevi@gmail.com
www.iksadyayinevi.com

It is responsibility of the author to abide by the publishing ethics rules.
Iksad Publications – 2025©

ISBN: 978-625-378-493-5
Cover Design: Abdurrahim YILMAZ
December / 2025
Ankara / Türkiye
Size: 16x24cm

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ	1
--------------------	---

BÖLÜM 1

KURAKLIK STRESİNİN HAFİFLETİLMESİNDE BİTKİ EKSTRAKTLARININ KULLANIMI

Doç. Dr. Hilal YILMAZ

Doç. Dr. Abdurrahim YILMAZ

Prof. Dr. Vahdettin ÇİFTÇİ.....	3
---------------------------------	---

BÖLÜM 2

BİTKİ DOKU KÜLTÜRÜNÜN TARIMSAL VERİMLİLİĞİ KISITLAYAN SORUNLARLA MÜCADELEDE KULLANIMI

Arş. Gör. Dr. Sibel TURAN SİRKE

Dr. Öğr. Üyesi Metin KOÇAK.....	29
---------------------------------	----

BÖLÜM 3

SEKONDER METABOLİTLERİN ARTIRILMASINDA BİYOTEKNOLOJİK YÖNDEN EPİGENETİK ve OMİK YAKLAŞIMLAR

Arş. Gör. Leyla KURGAN.....	59
-----------------------------	----

BÖLÜM 4

POTASYUM VE KALSIYUM'UN KURAKLIK STRES KOŞULLARINA ETKİSİ

Dr. Öğr. Üyesi Sibel BOYSAN CANAL.....	83
--	----

BÖLÜM 5

SPİRULİNA UYGULAMALARININ BİTKİLERDE ABİYOTİK STRES FAKTÖRLERİNE ETKİLERİ

Doç. Dr. Abdurrahim YILMAZ.....99

BÖLÜM 6

ÇİFTLİK HAYVANLARINDA GENETİK İYİLEŞTİRME: MAS TEMELLİ ISLAH UYGULAMALARI

Öğr. Gör. Dr. Onur VURAL.....123

BÖLÜM 7

SÜT SIĞIRLARINDA BESİN YETERSİZLİĞİNE BAĞLI VERİM KISITLARI

Arş. Gör. Yusuf Talha İÇOĞLU

Prof. Dr. Mevlüt KARAOĞLU.....137

BÖLÜM 8

ETLİK PİLİÇLERDE ORTAYA ÇIKAN ET KALİTE KUSURLARI VE ÇÖZÜM STRATEJİLERİ

Dr. Öğr. Üyesi Ahmet YAMAN.....161

ÖNSÖZ

Küresel ölçekte derinleşen iklim değişikliği, doğal kaynakların sürdürülebilir olmayan kullanımı ve tarımsal üretim üzerindeki artan baskılar, bitkisel ve hayvansal üretim sistemlerinde verimlilik sorunlarını daha görünür ve karmaşık hâle getirmiştir. Bu çok boyutlu sorunlar, yalnızca geleneksel üretim yaklaşımlarıyla çözülemeyecek düzeyde olup; biyoteknoloji, moleküler biyoloji, fizyoloji, besleme bilimi ve sürdürülebilir üretim teknolojilerinin bütüncül biçimde ele alınmasını zorunlu kılmaktadır. Tarımsal Verimliliği Kısıtlayan Sorunlarla Mücadele Yöntemleri – 3, bu gereksinimden hareketle hazırlanmış olup, güncel bilimsel gelişmeleri üretim pratikleriyle buluşturmayı amaçlayan bir başvuru kaynağı niteliği taşımaktadır.

Bu kitapta, bitkisel üretimde kuraklık stresinin hafifletilmesine yönelik bitki ekstraktları ve mikroalg temelli spirulina uygulamaları gibi biyostimülan yaklaşımlar ayrıntılı biçimde ele alınırken; potasyum ve kalsiyum gibi temel besin elementlerinin stres fizyolojisindeki rolleri de bilimsel veriler ışığında değerlendirilmektedir. Bitki doku kültürü tekniklerinin, tarımsal verimliliği sınırlayan sorunların aşılmasındaki stratejik önemi ayrıntılı biçimde ele alınırken; sekonder metabolitlerin artırılmasına yönelik epigenetik ve omik yaklaşımlar da bağımsız bir biyoteknolojik perspektif çerçevesinde değerlendirilmektedir.

Kitap yalnızca bitkisel üretimle sınırlı kalmayarak, hayvansal üretimde verim ve kaliteyi etkileyen temel kısıtlara da odaklanmaktadır. Çiftlik hayvanlarında markör destekli seleksiyon

(MAS) temelli genetik iyileştirme uygulamaları, süt sığırlarında besin maddelerine bağlı verim sınırlamaları ve etlik piliçlerde ortaya çıkan et kalite kusurları ile bunlara yönelik çözüm stratejileri, disiplinler arası bir yaklaşımla ele alınmıştır. Böylece bitkisel ve hayvansal üretim sistemlerinin ortak hedefi olan sürdürülebilir verim artışı, bütüncül bir çerçevede değerlendirilmektedir.

Uzman akademisyenler ve araştırmacıların katkılarıyla hazırlanan bu eser, tarımsal üretimde karşılaşılan güncel sorunlara bilimsel temelli, yenilikçi ve uygulanabilir çözüm yolları sunmayı hedeflemektedir. Bilimsel literatüre katkı sağlamasının yanı sıra, araştırmacılar, lisansüstü öğrenciler ve tarım sektöründe faaliyet gösteren uygulayıcılar için yol gösterici bir kaynak olacağına inanıyoruz. Kitabın hazırlanmasında emeği geçen tüm yazarlarımıza ve katkı sunan paydaşlara teşekkür eder; okuyucularımıza ufuk açıcı ve ilham verici bir okuma deneyimi dileriz.

Doç. Dr. Abdurrahim YILMAZ¹

Doç. 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 MYO Bitkisel ve Hayvansal Üretim Bölümü, Tıbbi ve Aromatik Bitkiler Programı, Kocaeli, Türkiye. hilal.yilmaz@kocaeli.edu.tr
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9138-3382>

BÖLÜM 1

KURAKLIK STRESİNİN HAFİFLETİLMESİNDE BİTKİ EKSTRAKTLARININ KULLANIMI

Doç. Dr. Hilal YILMAZ^{1*}
Doç. Dr. Abdurrahim YILMAZ²
Prof. Dr. Vahdettin ÇİFTÇİ³

DOI: <https://www.doi.org/10.5281/zenodo.18082693>

^{1*} Kocaeli Üniversitesi, İzmit MYO, Bitkisel ve Hayvansal Üretim Bölümü, Tıbbi ve Aromatik Bitkiler Programı, Kocaeli, Türkiye. hilal.yilmaz@kocaeli.edu.tr

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

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

GİRİŞ

Bitkisel üretim sistemleri, küresel ölçekte artan çevresel baskılar karşısında giderek daha kırılgan bir hâle gelmekte; bu baskıların başında ise su kaynaklarının azalmasına bağlı olarak ortaya çıkan kuraklık stresi yer almaktadır (Dietz ve ark., 2021). Dünya tarım alanlarının önemli bir bölümünün yarı kurak ve kurak iklim kuşaklarında bulunması, su kıtlığının ürün verimliliği üzerindeki olumsuz etkilerini daha da belirgin kılmaktadır (Huang ve ark., 2016; Qader ve ark., 2021). Birleşmiş Milletler Gıda ve Tarım Örgütü (FAO) tarafından yayımlanan raporlar, kuraklığın bitkisel üretimde gözlenen küresel kayıpların başlıca nedenlerinden biri hâline geldiğini ve gıda güvenliği açısından kritik bir tehdit oluşturduğunu ortaya koymaktadır (Junaid ve Gokce, 2024). İklim değişikliğinin tetiklediği sıcaklık artışları, yağış rejimindeki düzensizlikler ve topraklarda su tutma kapasitesinin azalması, kuraklık stresinin şiddetini ve sürekliliğini artırarak tarımsal üretim sistemlerini daha hassas bir duruma getirmektedir (Singh ve ark., 2022; Kumar ve ark., 2022). Bu nedenle kuraklık stresinin fizyolojik ve moleküler temelde daha iyi anlaşılması ile stres toleransını artırmaya yönelik yenilikçi, sürdürülebilir ve çevre dostu uygulamaların geliştirilmesi modern bitki bilimlerinin öncelikli araştırma alanları arasında yer almaktadır.

Kuraklık, bitkisel üretimi sınırlayan en önemli abiyotik stres faktörlerinden biridir ve bitki büyümesi, fotosentetik kapasite, su kullanım etkinliği ve verim üzerinde ciddi kayıplara yol açmaktadır (Ahanger ve ark., 2016; Zhao ve ark., 2020). Su kıtlığı koşullarında

bitkilerde turgor basıncının azalması, klorofil içeriğinin düşmesi, gaz değişim parametrelerinin zayıflaması ve karbon asimilasyonunun yavaşlaması sonucunda büyüme gerilemekte; bunun yanı sıra reaktif oksijen türlerinin (ROS) aşırı birikimi nedeniyle hücre zarlarında lipid peroksidasyonu artarak metabolik dengenin bozulmasına yol açmaktadır (Riboldi ve ark., 2016; Vitale ve ark., 2009; Zhang ve ark., 2011; Koyro ve ark., 2022; Sachdev ve ark., 2021; Zou ve ark., 2022). Bu fizyolojik ve biyokimyasal bozulmalar, ürün veriminde dramatik düşüslere ve bitki gelişiminde uzun vadeli hasarlara neden olabilmektedir. Ayrıca ROS birikiminin artması, protein ve nükleik asit yapılarında geri dönüşü zor hasarlar oluşturarak bitkilerin stres adaptasyon kapasitesini daha da sınırlandırmaktadır (Rao ve ark., 2025).

Küresel iklim değişikliği ile kuraklık sıklığının ve şiddetinin artması, bitkilerin stres toleransını artırmaya yönelik alternatif uygulamaların önemini belirgin ölçüde artırmıştır (Ali ve ark., 2017). Geleneksel kimyasal düzenleyicilerin çevresel riskleri göz önüne alındığında, doğal kaynaklı biyostimülanların sürdürülebilir tarım açısından daha avantajlı çözümler sunduğu görülmektedir (Cristofano ve ark., 2021; Arumugam ve Rabert, 2022). Bu bağlamda, son yıllarda bitkisel ekstraktlar hem düşük çevresel etkileri hem de geniş biyolojik aktivite spektrumları nedeniyle kuraklık stresinin hafifletilmesine yönelik çalışmalarda ön plana çıkan yenilikçi uygulamalar arasında yer almaktadır.

Bitkisel ekstraktlar; antioksidan bileşikler, fenolik maddeler, flavonoidler, terpenoidler, alkaloidler, bitki büyüme düzenleyicileri ve osmoregülasyon sağlayan metabolitler bakımından zengin bir kimyasal çeşitliliğe sahiptir (Garcia-Caparros ve ark., 2025). Bu bileşenlerin, bitkilerde oksidatif stresin azaltılması, antioksidan savunma sistemlerinin güçlendirilmesi, hücre zar bütünlüğünün korunması, su kullanım etkinliğinin iyileştirilmesi ve stres sinyalizasyon yollarının düzenlenmesi gibi çok yönlü etkiler sağladığı bildirilmektedir (Akbari ve ark., 2022; Paul ve Roychoudhury, 2021; Han ve ark., 2024; Zhu ve ark., 2025). Ayrıca çeşitli ekstraktların stresle ilişkili genlerin ekspresyonunu düzenleyerek bitkilerin kuraklığa karşı adaptif yanıtlarını güçlendirdiği belirtilmektedir (Alharby ve ark., 2021; Osman ve ark., 2021). Dolayısıyla bitki ekstraktları hem fizyolojik süreçlere hem de moleküler savunma mekanizmalarına etki edebilen kompleks yapılarıyla kuraklık toleransının artırılmasında önemli bir potansiyel taşımaktadır.

1. BİTKİ EKSTRAKTLARININ ANTİOKSİDAN AKTİVİTEYİ ARTIRMADAKİ ROLÜ

Kuraklık stresi, bitkilerde su potansiyelinin düşmesine bağlı olarak metabolik dengenin bozulmasına ve bunun sonucunda reaktif oksijen türlerinin (ROS) aşırı birikimine neden olan temel abiyotik stres faktörlerinden biridir (Seleiman ve ark., 2021). Normal koşullarda bitkiler, ROS üretimi ve detoksifikasyonu arasında hassas bir dengeyi sürdürmekte; ancak kuraklık altında bu denge bozulmakta ve süperoksit anyonu ($O_2^{\bullet-}$), hidrojen peroksit (H_2O_2) ve hidroksil

radikali ($\bullet\text{OH}$) gibi toksik oksijen türevlerinin oluşumu hızlanmaktadır (Sachdev ev ark., 2021; Zheng ve ark., 2024). Bu reaktif moleküller, lipid peroksidasyonunu tetikleyerek hücre zarlarında bütünlük kaybına, protein ve enzim yapılarında bozulmaya, DNA hasarına ve fotosentetik aparatın çökmesine neden olabilmektedir (Yaman ve Ayhanci, 2021). Dolayısıyla, kuraklık koşullarında ROS birikiminin kontrol altına alınması, bitki sağkalımı açısından kritik bir uyum mekanizmasıdır.

Bitki ekstraktları, içeriklerindeki zengin fenolik bileşikler, flavonoidler, tanenler, alkaloidler, askorbik asit, tokoferoller ve çeşitli uçucu yağlar gibi biyolojik olarak aktif moleküller sayesinde bitkilerin antioksidan savunma kapasitesini önemli ölçüde artırabilmektedir (Beni ve ark., 2020; Bolouri ve ark., 2022; Akbari ve ark., 2022). Bu ekstraktlar hem doğrudan serbest radikal temizleyici (radical scavenger) olarak işlev görmekte hem de bitkinin endojen antioksidan enzim sistemlerini uyarak dolaylı bir koruma sağlamaktadır (Hussen ve ark., 2023; Mihailović ve ark., 2021). Özellikle fenolik bileşikler, hidrojen bağışlama kapasiteleri ve metal şelatlama özellikleri sayesinde ROS'un zararlı etkilerini azaltmada temel bir rol üstlenmektedir (Ouahhoud ve ark., 2022; Hajam ve ark., 2023; Alwazeer, 2024). Flavonoidler ise hem güçlü antioksidan özellikleri hem de bitki hücrelerinde sinyal iletim yollarını düzenleyerek stres yanıtlarını optimize etme potansiyelleri ile dikkat çekmektedir (Shomali ve ark., 2022).

Bitki ekstraktlarının en önemli etkilerinden biri, antioksidan enzim aktivitelerinde gözlenen artıştır. Süperoksit dismutaz (SOD), süperoksit radikallerini H_2O_2 'ye dönüştürerek oksidatif stresin ilk basamağını kontrol ederken; katalaz (CAT) ve peroksidaz (POD) enzimleri H_2O_2 'yi suya ve oksijene dönüştürerek hücre içi toksisiteyi azaltmaktadır (Mihailović ve ark., 2021; Khan ve ark., 2021; Sultan ve ark., 2023). Ekstrakt uygulamaları, bu enzimlerin gen ekspresyon düzeylerini artırarak oksidatif hasarın en düşük seviyede tutulmasına katkı sağlamaktadır (Mihailović ve ark., 2021). Bazı araştırmalarda, ekstrakt uygulanan bitkilerde SOD ve CAT aktivitelerinin kuraklık koşullarında kontrol bitkilerine kıyasla belirgin şekilde yükseldiği ve bunun sonucunda membran stabilitesinin korunduğu bildirilmiştir. Aynı şekilde askorbat peroksidaz (APX) ve glutatyon redüktaz (GR) gibi enzimlerdeki artış da antioksidan döngünün etkinliğini artırarak ROS detoksifikasyonunu hızlandırmaktadır. (Mohamed ve Akladious, 2014; Moreno-Galván ve ark., 2020; Ibrahim ve ark., 2022).

Antioksidan enzimlerdeki bu artış, fotosentetik sistem üzerinde doğrudan olumlu etkiler oluşturmaktadır. ROS birikimi klorofil moleküllerine zarar verebildiğinden, ekstrakt uygulamaları sayesinde pigment yapısının korunması fotosentetik etkinliği sürdürmekte ve karbon asimilasyonu daha stabil bir şekilde devam etmektedir (Khan ve ark., 2021). Ayrıca stomal davranışların ve su kullanım etkinliğinin düzenlenmesiyle birlikte ekstrakt uygulanan bitkilerde fotosistem II (PSII) verimliliğinde kayıpların azaldığı da bazı çalışmalarda rapor

edilmiştir (Santaniello ve ark., 2017; Lyamlouli, 2023; Park ve ark., 2024).

Bitki ekstraktları içeriklerindeki doğal antioksidanlar, fenolik maddeler ve enzim aktivatörleri sayesinde kuraklık stresinin tetiklediği oksidatif baskıyı azaltmakta ve bitkinin savunma mekanizmalarını hem enzimatik hem de enzimatik olmayan yollarla güçlendirmektedir. Bu çok yönlü etkiler, ekstraktların kuraklık toleransını artırmada sürdürülebilir ve etkili biyostimülanlar olarak değerlendirilmesine olanak tanımaktadır.

2. BİTKİ EKSTRAKTLARININ OSMOREGÜLASYON VE SU KULLANIM ETKİNLİĞİ ÜZERİNE ETKİLERİ

Kuraklık stresi, bitkilerde su potansiyelinin düşmesine bağlı olarak hücre içi su dengesinin bozulmasına ve metabolik aktivitelerin yavaşlamasına neden olan kritik bir abiyotik stres faktörüdür (Farooq ve ark., 2009). Bu koşullar altında bitkiler, hücre turgorunun korunması ve su kaybının en aza indirilmesi amacıyla bir dizi osmoregülasyon mekanizması geliştirmektedir (Ozturk ve ark., 2021). Bu mekanizmaların temelini, prolin, glisin betain, trehaloz, çözünür şekerler ve bazı poliaminler gibi uyum (compatible) osmolitlerinin sentezi oluşturmaktadır (Singh ve ark., 2015; Wijayasinghe ve ark., 2017). Söz konusu osmolitler, düşük su potansiyeli koşullarında hücre içindeki ozmotik basıncı dengeleyerek hücre turgorunu sürdürmekte, enzim ve protein yapılarını stabilize etmekte ve membran bütünlüğünün korunmasına yardımcı olmaktadır (Singh ve ark., 2017).

Bitki ekstraktları, içeriklerindeki biyolojik aktif bileşenler sayesinde bu osmolitlerin sentez yollarını uyarak osmoregülasyon süreçlerinin daha etkin çalışmasını sağlamaktadır (Mansori ve ark., 2015; Carvalho ve ark., 2018). Fenolik bileşikler, bazı hormon-benzeri bileşikler ve bitkisel ya da mikrobiyal uçucu organik bileşikler, stres koşullarında prolin gibi uyumlu osmolitlerin birikimini artırmakta; bu etki çoğu zaman prolin biyosentezinden sorumlu genlerin (örn. *P5CS* ve *P5CR*) ekspresyonunun yükselmesi ve prolin yıkım genlerinin baskılanması ile ilişkilendirilmektedir. Bu sayede bitki dokularında osmotik dengenin yeniden kurulmasına katkı sağlanmaktadır. (Carvalho ve ark., 2018; Strizhov ve ark., 1997; Reguerave ark., 2013; Loutfy ve ark., 2022; Nguyen ve ark., 2025). Ekstrakt uygulamaları sonucunda prolin birikiminin artması, hücre içi suyun tutulmasını kolaylaştırmakta ve aynı zamanda prolinin antioksidan özellikleri sayesinde stres kaynaklı hasarı azaltmaktadır (Carvalho ve ark., 2018; Tiwari, 2024). Benzer şekilde glisin betain, hem membran fosfolipitlerini stabilize etmekte hem de fotosentetik sistem II'nin (PSII) yapısal bütünlüğünü koruyarak kuraklık altında fotosentez etkinliğinin devamını desteklemektedir (Mansori ve ark., 2015; Huang ve ark., 2020).

Osmoregülasyonun yanında su kullanım etkinliği (WUE), bitkilerin kuraklık stresine adaptasyonunda belirleyici bir fizyolojik parametredir (Soares ve ark., 2021; Dubey ve ark., 2023). Bitki ekstraktları, stomal iletim üzerinde düzenleyici bir etki oluşturarak su kullanım etkinliğinin iyileşmesine önemli katkılar sağlamaktadır

(Buthelezi ve ark., 2025). Bazı ekstraktların, stomaların açılıp kapanmasını kontrol eden koruma hücreleri üzerinde etkili olan sinyal moleküllerini (örneğin ABA benzeri bileşikler veya ikinci haberci sistemleri) modüle ederek su kaybının kontrol altına alınmasını sağladığı bildirilmektedir (Santaniello ve ark., 2017; Rasul ve ark., 2021). Daha dengeli stomal davranış, kuraklık koşullarında transpirasyon oranının aşırı yükselmesini engellemekte; aynı zamanda yeterli CO₂ alımının sürdürülmesini sağlayarak fotosentetik sürecin tamamen durmasını önlemektedir (Li ve ark., 2017; Shahbaz ve ark., 2025). Böylece ekstrakt uygulamaları hem su tasarrufu hem de karbon asimilasyonu açısından çift yönlü bir koruyucu mekanizma oluşturmaktadır.

Ekstraktların kök gelişimi üzerindeki olumlu etkileri de su alım kapasitesinin artırılmasına katkıda bulunmaktadır (Sogoni ve ark., 2024; Chen ve ark., 2021). Bitki büyüme düzenleyicileri içeren ekstraktların, özellikle lateral kök oluşumunu ve kök uzunluğunu artırarak toprak profilindeki suyun daha etkin kullanılmasını sağladığı çeşitli çalışmalarda gösterilmiştir (Guatam ve ark., 2024; Chen ve ark., 2021; Kakbra, 2024). Daha geniş ve derin kök sistemleri, kuraklık sırasında bitkinin erişilebilir su miktarını artırmakta ve su stresinin etkilerini önemli ölçüde hafifletmektedir.

Bu yönleri bir arada değerlendirildiğinde bitki ekstraktlarının, kuraklık koşullarında bitkilerin fizyolojik dayanıklılığını artıran çok katmanlı ve bütüncül bir etki profili ortaya koyduğu anlaşılmaktadır. Osmolit

birikiminin teşvik edilmesi, stomal davranışın daha dengeli hâle gelmesi, kök mimarisinin güçlenmesi ve buna bağlı olarak suyun hem toprakta hem de bitki içinde daha verimli taşınması gibi süreçlerin eşzamanlı olarak desteklenmesi, bitkinin suya erişimini ve mevcut suyu kullanma kapasitesini belirgin ölçüde iyileştirmektedir. Ayrıca ekstraktların fotosentetik yapının korunmasına, metabolik dengeyi sürdüren enzimatik süreçlerin stabilizasyonuna ve hücresel bütünlüğün stressiz koşullara daha yakın bir düzeyde tutulmasına da katkı sağladığı bildirilmektedir. Bu kapsamda ekstrakt uygulamaları, bitkilerin hem kısa vadeli su kaybına karşı geliştirdiği hızlı koruyucu yanıtları hem de uzun dönemli kuraklığa uyumu destekleyen yapısal ve metabolik modifikasyon süreçlerini etkin biçimde harekete geçiren doğal biyostimülanlar olarak öne çıkmaktadır.

3. BİTKİ EKSTRAKTLARININ BÜYÜME PARAMETRELERİ VE VERİM ÜZERİNDEKİ ETKİLERİ

Kuraklık stresi, bitki büyüme süreçlerini sınırlayan en kritik çevresel faktörlerden biridir ve özellikle hücre bölünmesi, hücre genişlemesi ve meristematik doku aktiviteleri üzerinde belirgin baskı oluşturmaktadır. Su kısıtı altında bitkilerde büyüme hızının düşmesi, yaprak alanının daralması, sürgün gelişiminin yavaşlaması ve kök-sürgün oranında dengesizlikler meydana gelmesi, literatürde çeşitli çalışmalarla ayrıntılı biçimde rapor edilmiştir (Farooq ve ark., 2009; Wu ve ark., 2022; Khan ve ark., 2025; Jarin ve ark., 2024; Chieb ve ark., 2023; Wang ve ark., 2024). Bu bağlamda bitki ekstraktlarının büyüme parametreleri üzerine etkisi, yalnızca fizyolojik bir destek

mekanizması değil, aynı zamanda stres altında bozulan gelişimsel süreçleri yeniden düzenleyen önemli bir biyostimülasyon aracı olarak değerlendirilmektedir.

Bitki ekstraktlarının içerdiği oksin, sitokinin ve gibberellin benzeri fitohormonların, kuraklık koşullarında kök gelişimi üzerinde belirgin bir teşvik edici etki gösterdiği çeşitli araştırmalarda ortaya konmuştur (Stirk ve Van Staden, 2014; Singh ve ark., 2025). Özellikle lateral kök oluşumunun artması, kök hacminin genişlemesi ve kök yüzey alanının büyümesi, ekstrakt uygulamalarının su alım kapasitesini güçlendirdiğini göstermektedir (Kakbra, 2024; Ertani ve ark., 2018). Derin ve dallanmış kök sistemleri, kuraklığın süre ve şiddeti arttığında dahi bitkinin toprak profilinin alt katmanlarındaki suya erişimini kolaylaştırarak fizyolojik dayanıklılığı artırmaktadır (Kou ve ark., 2022). Bu nedenle ekstrakt uygulamalarının kök mimarisi üzerindeki etkisi, verimle doğrudan ilişkili temel bir adaptasyon olarak görülmektedir.

Sürgün ve yaprak gelişiminin desteklenmesi de ekstraktların büyüme üzerindeki önemli etkilerindendir. Sitokinin türevlerinin hücre bölünmesi ve yaprak formasyonu üzerinde düzenleyici rolü olduğu bilinmektedir; bu nedenle ekstrakt uygulanan bitkilerde yaprak alanının genişlemesi ve sürgün biyokütlesinde artış gözlenmesi beklenen bir sonuçtur (Yasmeen ve ark., 2013; Rind ve ark., 2024; Lam ve ark., 2025). Yaprak alanındaki artış, özellikle kuraklık altında fotosentetik yüzeyin korunmasına katkı sağlamaktadır (Khan ve ark., 2025; Mathobo ve ark., 2017). Bunun yanında, ekstraktların klorofil

bozunmasını yavaşlatan antioksidan bileşenler içermesi, pigment stabilitesini koruyarak fotosentetik kapasitenin devamlılığını desteklemektedir (Khan ve ark., 2021; Toscano ve ark., 2023). Bu durum, PSII verimliliği, elektron taşıma hızı ve karboksilasyon etkinliği gibi fotosentetik göstergelerde iyileşmelerle ilişkilendirilmiştir (Santaniello ve ark., 2017; Hafeez ve ark., 2022; Lahmaoui ve ark., 2025).

Bitki ekstraktlarının büyüme üzerindeki olumlu etkileri yalnızca morfolojik parametrelerle sınırlı değildir; aynı zamanda karbon ve azot metabolizmasının dengelenmesi, hücre duvarı elastikiyetinin korunması ve protein sentezinin sürdürülmesi gibi metabolik süreçlerde de düzenleyici rolü olduğu bildirilmektedir (Garcia-Caparrós ve ark., 2025). Bitki ekstraktlarının uygulanması, bitkilerde amino asit, fenolik ve organik asit metabolit birikimini artırarak, stres altında hücresel metabolizmanın korunmasını ve enerjinin büyüme/onarım süreçlerine yönlendirilmesini destekleyebilir (Han ve ark., 2024; Di Sario ve ark., 2025).

Verim parametreleri incelendiğinde, ekstrakt uygulamalarının tane ağırlığı, meyve iriliği, kuru madde birikimi ve hasat indeksi gibi göstergelerde artış sağladığına yönelik çok sayıda çalışma bulunmaktadır (Yasmeen ve ark., 2012; Biswas ve ark., 2016; Al-Shatri ve ark., 2020; Fatima ve Al-Yasari, 2024; Baloch ve ark., 2024). Bu artışlar; iyileştirilmiş kök gelişimi, daha sürdürülebilir fotosentetik aktivite, dengeli stomal davranış ve yüksek metabolik canlılık gibi mekanizmaların bütünsel etkilerinden

kaynaklanmaktadır (Jacomassi ve ark., 2022; Khan ve ark., 2023; Hariharan ve ark., 2024). Ayrıca ekstrakt uygulamalarının çiçeklenme senkronizasyonunu artırdığı ve meyve tutum oranını yükselttiği rapor edilmiştir; bu durum özellikle kuraklık altında bozulan üreme gelişimi açısından önemli bir avantajdır (El Chami ve Galli, 2020; Ali ve ark., 2021; Espinosa-Antón ve Hernández-Herrera, 2024).

Genel olarak literatür, bitki ekstraktlarının büyüme ve verim üzerinde çok yönlü, fizyolojik ve metabolik düzeyde etkiler oluşturduğunu ve kuraklık stresinin bitkilerde oluşturduğu gelişimsel sınırlamaları önemli ölçüde hafiflettiğini göstermektedir. Bu özellikleri nedeniyle ekstraktlar, stres altındaki tarımsal üretim sistemlerinde uygulanabilir, çevre dostu ve sürdürülebilir biyostimülanlar arasında giderek daha fazla önem kazanmaktadır.

SONUÇ

Bitki ekstraktları, kuraklık stresinin bitkiler üzerinde oluşturduğu fizyolojik ve biyokimyasal baskıları hafifletme potansiyeli nedeniyle sürdürülebilir tarımsal üretimde önemli bir biyostimülan yaklaşım olarak değerlendirilmektedir. Antioksidan savunmanın güçlendirilmesi, osmolit birikiminin desteklenmesi, stomal düzenlemeye bağlı olarak su kullanım etkinliğinin artırılması ve büyüme süreçlerinin korunması gibi çok yönlü etkiler, ekstraktların kuraklık altında bitki performansını anlamlı düzeyde iyileştirdiğini ortaya koymaktadır. Araştırma sonuçları, ekstrakt uygulamalarının membran stabilitesinin korunmasından fotosentetik kapasitenin

sürdürülmesine, kök-sürgün gelişiminin desteklenmesinden verim kayıplarının azaltılmasına kadar geniş bir etki spektrumuna sahip olduğunu göstermektedir. Bu çerçevede bitki ekstraktları, hem kısa vadeli stres tepkilerini düzenleyen hem de uzun dönemli adaptasyon süreçlerini güçlendiren doğal bileşenler içermeleri nedeniyle iklim değişikliği ve su kıtlığının belirginleştiği günümüz tarımında önemli bir alternatif olarak öne çıkmaktadır. Bununla birlikte, farklı bitki türlerinde optimum dozların, uygulama zamanlarının ve ekstrakt bileşenlerinin etkileşimlerinin daha ayrıntılı biçimde araştırılması, bu biyostimülanların tarımsal üretimde daha yaygın, güvenilir ve bilimsel temelli bir şekilde kullanılmasına katkı sağlayacaktır.

KAYNAKÇA

- Ahanger, M. A., Morad-Talab, N., Abd-Allah, E. F., Ahmad, P., & Hajiboland, R. (2016). Plant growth under drought stress: Significance of mineral nutrients. *Water stress and crop plants: a sustainable approach*, 2, 649-668.
- Akbari, B., Baghaei-Yazdi, N., Bahmaie, M., & Mahdavi Abhari, F. (2022). The role of plant-derived natural antioxidants in reduction of oxidative stress. *BioFactors*, 48(3), 611-633.
- Alharby, H. F., Al-Zahrani, H. S., Alzahrani, Y. M., Alsamadany, H., Hakeem, K. R., & Rady, M. M. (2021). Maize grain extract enriched with polyamines alleviates drought stress in *Triticum aestivum* through up-regulation of the ascorbate–glutathione cycle, glyoxalase system, and polyamine gene expression. *Agronomy*, 11(5), 949.
- Ali, F., Bano, A., & Fazal, A. (2017). Recent methods of drought stress tolerance in plants. *Plant Growth Regulation*, 82(3), 363-375.
- Ali, O., Ramsubhag, A., & Jayaraman, J. (2021). Biostimulant properties of seaweed extracts in plants: Implications towards sustainable crop production. *Plants*, 10(3), 531.
- Al-Shatri, A. H. N., Pakyürek, M., & Yavic, A. (2020). Effect of seaweed application on the vegetative growth of strawberry cv. Albion grown under Iraq ecological conditions. *Applied Ecology & Environmental Research*, 18(1).
- Alwazeer, D. (2024). Hydrogen-rich solvent method in phytochemical extraction: potential mechanisms and perspectives. *Phytochemical Analysis*, 35(2), 203-219.
- Arumugam, R., & Rabert, G. A. (2022). Plant biostimulants: Overview of categories and effects. *Biostimulants: Exploring sources and applications*, 1-29.
- Baloch, H., Sabir, I. A., Leghari, S. K., Saddiq, M. S., Alam, P., Khan, S., ... & Iqbal, R. (2024). Moringa leaf extract enhances the growth and yield characteristics of buckwheat genotypes by modulating the biochemical and physiological activities. *Asian Journal of Agriculture and Biology*, 2024(04).

- Beni, C., Casorri, L., Masciarelli, E., Ficociello, B., Masetti, O., Neri, U., ... & Cichelli, A. (2020). Characterization of thyme and tansy extracts used as basic substances in zucchini crop protection. *Journal of Agricultural Studies*, 8(4), 95-110.
- Biswas, A. K., Hoque, T. S., & Abedin, M. A. (2016). Effects of moringa leaf extract on growth and yield of maize. *Progressive Agriculture*, 27(2), 136-143.
- Bolouri, P., Salami, R., Kouhi, S., Kordi, M., Asgari Lajayer, B., Hadian, J., & Astatkie, T. (2022). Applications of essential oils and plant extracts in different industries. *Molecules*, 27(24), 8999.
- Buthelezi, N. M. D., Mugivhisa, L. L., & Gololo, S. S. (2025). Moringa oleifera Lam. Seed Extract Enhances Tolerance to Drought Stress by Regulating Photosynthesis and Antioxidant Defense Mechanism in Lessertia frutescens L. *HortScience*, 60(9), 1615-1625.
- Carvalho, M. E. A., de Camargo, P. R., Gaziola, S. A., & Azevedo, R. A. (2018). Is seaweed extract an elicitor compound? Changing proline content in drought-stressed bean plants. *Comunicata Scientiae*, 9(2), 292-297.
- Chen, D., Zhou, W., Yang, J., Ao, J., Huang, Y., Shen, D., ... & Shen, H. (2021). Effects of seaweed extracts on the growth, physiological activity, cane yield and sucrose content of sugarcane in China. *Frontiers in Plant Science*, 12, 659130.
- Chieb, M., & Gachomo, E. W. (2023). The role of plant growth promoting rhizobacteria in plant drought stress responses. *BMC plant biology*, 23(1), 407.
- Cristofano, F., El-Nakhel, C., & Rouphael, Y. (2021). Biostimulant substances for sustainable agriculture: Origin, operating mechanisms and effects on cucurbits, leafy greens, and nightshade vegetables species. *Biomolecules*, 11(8), 1103.
- Di Sario, L., Boeri, P., Matus, J. T., & Pizzio, G. A. (2025). Plant biostimulants to enhance abiotic stress resilience in crops. *International Journal of Molecular Sciences*, 26(3), 1129.

- Dietz, K. J., Zörb, C., & Geilfus, C. M. (2021). Drought and crop yield. *Plant Biology*, 23(6), 881-893.
- Dubey, R., Pandey, B. K., Sawant, S. V., & Shirke, P. A. (2023). Drought stress inhibits stomatal development to improve water use efficiency in cotton. *Acta Physiologiae Plantarum*, 45(2), 30.
- El Boukhari, M. E. M., Barakate, M., Drissi, B., Bouhia, Y., & Lyamlouli, K. (2023). Seaweed extract biostimulants differentially act in mitigating drought stress on faba bean (*Vicia faba* L.). *Journal of Plant Growth Regulation*, 42(9), 5642-5652.
- El Chami, D., & Galli, F. (2020). An assessment of seaweed extracts: Innovation for sustainable agriculture. *Agronomy*, 10(9), 1433.
- Ertani, A., Francioso, O., Tinti, A., Schiavon, M., Pizzeghello, D., & Nardi, S. (2018). Evaluation of seaweed extracts from *Laminaria* and *Ascophyllum nodosum* spp. as biostimulants in *Zea mays* L. using a combination of chemical, biochemical and morphological approaches. *Frontiers in plant science*, 9, 428.
- Espinosa-Antón, A. A., & Hernández-Herrera, R. M. (2024). Effects of green seaweed (*Ulva onhoi*) on the reproductive development of tomato (*Solanum lycopersicum*) plants. *Acta Agrobotanica*, 77.
- Farooq, M., Wahid, A., Kobayashi, N. S. M. A., Fujita, D. B. S. M. A., & Basra, S. M. (2009). Plant drought stress: effects, mechanisms and management. In *Sustainable agriculture* (pp. 153-188). Dordrecht: Springer Netherlands.
- Fatima, M. M., & Al-Yasari, M. N. H. (2024). Maize response to mineral fertilizers and seaweed extract for growth and yield-related traits. *SABRAO J. Breed. Genet*, 56(4), 1738-1748.
- Garcia-Caparrós, P., Ciriello, M., Roupael, Y., & Giordano, M. (2025). The Role of Organic Extracts and Inorganic Compounds as Alleviators of Drought Stress in Plants. *Horticulturae*, 11(1), 91.
- Gautam, A., Chauhan, A., Singh, A., Mundepi, S., Pant, M., & Husen, A. (2024). Use of seaweed extract-based biostimulants in plant growth, biochemical

- constituents, and productions. In *Biostimulants in Plant Protection and Performance* (pp. 129-148). Elsevier.
- Hafeez, A., Tipu, M. I., Saleem, M. H., Al-Ashkar, I., Saneoka, H., & El Sabagh, A. (2022). Foliar application of moringa leaf extract (MLE) enhanced antioxidant system, growth, and biomass related attributes in safflower plants. *South African Journal of Botany*, 150, 1087-1095.
- Hajam, Y. A., Lone, R., & Kumar, R. (2023). Role of plant phenolics against reactive oxygen species (ROS) induced oxidative stress and biochemical alterations. In *Plant phenolics in abiotic stress management* (pp. 125-147). Singapore: Springer Nature Singapore.
- Han, M., Kasim, S., Yang, Z., Deng, X., Saidi, N., Uddin, M., & Shuib, E. (2024). Plant extracts as biostimulant agents: a promising strategy for managing environmental stress in sustainable agriculture. *Phyton*, 93(9), 2149.
- Hariharan, G., Vathshalyan, N., Galahitigama, H., Wimalasiri, U., & Kumara, G. D. K. (2024). Potential of foliar application of seaweed extracts as a biostimulant for abiotic stress alleviation on crop production. *Reviews in Agricultural Science*, 12, 295-312.
- Huang, J., Ji, M., Xie, Y., Wang, S., He, Y., & Ran, J. (2016). Global semi-arid climate change over last 60 years. *Climate Dynamics*, 46(3), 1131-1150.
- Huang, S., Zuo, T., & Ni, W. (2020). Important roles of glycinebetaine in stabilizing the structure and function of the photosystem II complex under abiotic stresses. *Planta*, 251(2), 36.
- Hussen, E. M., & Endalew, S. A. (2023). In vitro antioxidant and free-radical scavenging activities of polar leaf extracts of *Vernonia amygdalina*. *BMC complementary medicine and therapies*, 23(1), 146.
- Ibrahim, M. U., Khaliq, A., Hussain, S., & Murtaza, G. (2022). Sorghum water extract application mediates antioxidant defense and confers drought stress tolerance in wheat. *Journal of Plant Growth Regulation*, 41(2), 863-874.
- Jacomassi, L. M., Viveiros, J. D. O., Oliveira, M. P., Momesso, L., de Siqueira, G. F., & Crusciol, C. A. C. (2022). A seaweed extract-based biostimulant mitigates drought stress in sugarcane. *Frontiers in plant science*, 13, 865291.

- Jarin, A. S., Islam, M. M., Rahat, A., Ahmed, S., Ghosh, P., & Murata, Y. (2024). Drought stress tolerance in rice: physiological and biochemical insights. *International Journal of Plant Biology*, 15(3), 692-718.
- Junaid, M. D., & Gokce, A. F. (2024). Global agricultural losses and their causes. *Bulletin of Biological and Allied Sciences Research*, 2024(1), 66-66.
- Kakbra, R. F. (2024). Effect of seaweed, moringa leaf extract and biofertilizer on growth, yield and fruit quality of cucumber (*Cucumis sativus* L.) under greenhouse condition. *arXiv preprint arXiv:2403.17984*.
- Khan, A. A., Wang, Y. F., Akbar, R., & Alhoqail, W. A. (2025). Mechanistic insights and future perspectives of drought stress management in staple crops. *Frontiers in Plant Science*, 16, 1547452.
- Khan, S., Basit, A., Hafeez, M. B., Irshad, S., Bashir, S., Bashir, S., ... & Li, Y. (2021). Moringa leaf extract improves biochemical attributes, yield and grain quality of rice (*Oryza sativa* L.) under drought stress. *Plos one*, 16(7), e0254452.
- Khan, S., Ibrar, D., Hasnain, Z., Nawaz, M., Rais, A., Ullah, S., ... & Irshad, S. (2023). Moringa leaf extract mitigates the adverse impacts of drought and improves the yield and grain quality of rice through enhanced physiological, biochemical, and antioxidant activities. *Plants*, 12(13), 2511.
- Kou, X., Han, W., & Kang, J. (2022). Responses of root system architecture to water stress at multiple levels: A meta-analysis of trials under controlled conditions. *Frontiers in Plant Science*, 13, 1085409.
- Koyro, H. W., & Huchzermeyer, B. (2022). From soil amendments to controlling autophagy: supporting plant metabolism under conditions of water shortage and salinity. *Plants*, 11(13), 1654.
- Kumar, A., Bhattacharya, T., Mukherjee, S., & Sarkar, B. (2022). A perspective on biochar for repairing damages in the soil-plant system caused by climate change-driven extreme weather events. *Biochar*, 4(1), 22.
- Lahmaoui, S., Hidri, R., Msaad, H., Farssi, O., Lamsaadi, N., El Moukhtari, A., ... & Farissi, M. (2025). Biostimulatory Effects of Foliar Application of Silicon

- and *Sargassum muticum* Extracts on Sesame Under Drought Stress Conditions. *Plants*, 14(15), 2358.
- Lam, V. P., Bok, G., Loi, D. N., Do, M. C., & Park, J. (2025). Seaweed Foliar Biostimulants Improve Growth and Phytochemicals of Thai Basil (*Ocimum basilicum* L.) in a Plant Factory. *Plants*, 14(21), 3271.
- Li, Y., Li, H., Li, Y., & Zhang, S. (2017). Improving water-use efficiency by decreasing stomatal conductance and transpiration rate to maintain higher ear photosynthetic rate in drought-resistant wheat. *The crop journal*, 5(3), 231-239.
- Loutfy, N., Hassanein, A. M., Inouhe, M., & Salem, J. M. (2022). Biological aspects and proline metabolism genes influenced by polyethylene glycol and salicylic acid in two wheat cultivars. *Egyptian Journal of Botany*, 62(3), 671-685.
- Mansori, M., Chernane, H., Latique, S., Benaliat, A., Hsissou, D., & El Kaoua, M. (2015). Seaweed extract effect on water deficit and antioxidative mechanisms in bean plants (*Phaseolus vulgaris* L.). *Journal of applied phycology*, 27(4), 1689-1698.
- Mathobo, R., Marais, D., & Steyn, J. M. (2017). The effect of drought stress on yield, leaf gaseous exchange and chlorophyll fluorescence of dry beans (*Phaseolus vulgaris* L.). *Agricultural Water Management*, 180, 118-125.
- Mihailović, M., Dinić, S., Arambašić Jovanović, J., Uskoković, A., Grdović, N., & Vidaković, M. (2021). The influence of plant extracts and phytoconstituents on antioxidant enzymes activity and gene expression in the prevention and treatment of impaired glucose homeostasis and diabetes complications. *Antioxidants*, 10(3), 480.
- Mohamed, H. I., & Akladios, S. A. (2014). Influence of garlic extract on enzymatic and non enzymatic antioxidants in soybean plants (*Glycine max*) grown under drought stress. *Life Sci. J*, 11(3), 46-58.
- Moreno-Galván, A. E., Cortés-Patiño, S., Romero-Perdomo, F., Uribe-Vélez, D., Bashan, Y., & Bonilla, R. R. (2020). Proline accumulation and glutathione reductase activity induced by drought-tolerant rhizobacteria as potential

- mechanisms to alleviate drought stress in Guinea grass. *Applied Soil Ecology*, 147, 103367.
- Nguyen, D. K., Nguyen, T. P., Lin, C. C., Ly, T. T., Li, Y. R., Chang, C. H., ... & Huang, H. J. (2025). Transcriptome analysis reveals the role of microbial volatile 3-methyl-1-butanol-induced salt stress tolerance in rice (*Oryza sativa* L.) seedlings through antioxidant defense system. *Plant Physiology and Biochemistry*, 223, 109830.
- Osman, M. S., Badawy, A. A., Osman, A. I., & Abdel Latef, A. A. H. (2021). Ameliorative impact of an extract of the halophyte *Arthrocnemum macrostachyum* on growth and biochemical parameters of soybean under salinity stress. *Journal of Plant Growth Regulation*, 40(3), 1245-1256.
- Ouahhoud, S., Khoulati, A., Kadda, S., Bencheikh, N., Mamri, S., Ziani, A., ... & Saalaoui, E. (2022). Antioxidant activity, metal chelating ability and DNA protective effect of the hydroethanolic extracts of *Crocus sativus* stigmas, tepals and leaves. *Antioxidants*, 11(5), 932.
- Ozturk, M., Turkyilmaz Unal, B., García-Caparrós, P., Khursheed, A., Gul, A., & Hasanuzzaman, M. (2021). Osmoregulation and its actions during the drought stress in plants. *Physiologia plantarum*, 172(2), 1321-1335.
- Park, H. H., Win, P. P., & Kuk, Y. I. (2024). Effect of Treatment with Selected Plant Extracts on the Physiological and Biochemical Parameters of Rice Plants under Drought and Salt Stress. 69(1): 1-14
- Paul, A., & Roychoudhury, A. (2021). Go green to protect plants: repurposing the antimicrobial activity of biosynthesized silver nanoparticles to combat phytopathogens. *Nanotechnology for Environmental Engineering*, 6(1), 10.
- Qader, S. H., Dash, J., Alegana, V. A., Khwarahm, N. R., Tatem, A. J., & Atkinson, P. M. (2021). The role of earth observation in achieving sustainable agricultural production in arid and semi-arid regions of the world. *Remote Sensing*, 13(17), 3382.
- Rao, M. J., Duan, M., Zhou, C., Jiao, J., Cheng, P., Yang, L., ... & Zheng, B. (2025). Antioxidant defense system in plants: Reactive oxygen species production,

- signaling, and scavenging during abiotic stress-induced oxidative damage. *Horticulturae*, 11(5), 477.
- Rasul, F., Gupta, S., Olas, J. J., Gechev, T., Sujeeth, N., & Mueller-Roeber, B. (2021). Priming with a seaweed extract strongly improves drought tolerance in Arabidopsis. *International journal of molecular sciences*, 22(3), 1469.
- Reguera, M., Peleg, Z., Abdel-Tawab, Y. M., Tumimbang, E. B., Delatorre, C. A., & Blumwald, E. (2013). Stress-induced cytokinin synthesis increases drought tolerance through the coordinated regulation of carbon and nitrogen assimilation in rice. *Plant Physiology*, 163(4), 1609-1622.
- Riboldi, L. B., Oliveira, R. F., & Angelocci, L. R. (2016). Leaf turgor pressure in maize plants under water stress. *Australian Journal of Crop Science*, 10(6), 878-886.
- Rind, W. A., Talpur, N. A., Bhatti, I. P., Khooharo, A. A., Jamali, K., Memon, N., & Khanzada, I. U. H. (2024). Effect of foliar application of moringa leaf extract on biomass production and nutrient content of maize. *Pakistan Journal of Agriculture*, 1(1), 1-5.
- Sachdev, S., Ansari, S. A., Ansari, M. I., Fujita, M., & Hasanuzzaman, M. (2021). Abiotic stress and reactive oxygen species: Generation, signaling, and defense mechanisms. *Antioxidants*, 10(2), 277.
- Santaniello, A., Scartazza, A., Gresta, F., Loreti, E., Biasone, A., Di Tommaso, D., ... & Perata, P. (2017). *Ascophyllum nodosum* seaweed extract alleviates drought stress in Arabidopsis by affecting photosynthetic performance and related gene expression. *Frontiers in plant science*, 8, 1362.
- Seleiman, M. F., Al-Suhaibani, N., Ali, N., Akmal, M., Alotaibi, M., Refay, Y., ... & Battaglia, M. L. (2021). Drought stress impacts on plants and different approaches to alleviate its adverse effects. *Plants*, 10(2), 259.
- Shahbaz, U., Videau, P., Coulonnier, E., Papon, C., Navarro-Payá, D., Valenzuela, A. V., ... & Dalla Costa, L. (2025). Reduced stomatal density improves water-use efficiency in grapevine under climate scenarios of decreased water availability. *Plant cell reports*, 44(9), 1-21.

- Shomali, A., Das, S., Arif, N., Sarraf, M., Zahra, N., Yadav, V., ... & Hasanuzzaman, M. (2022). Diverse physiological roles of flavonoids in plant environmental stress responses and tolerance. *Plants*, 11(22), 3158.
- Singh, A., Sharma, K., Chahal, H. S., Kaur, H., & Hasanain, M. (2025). Seaweed-derived plant boosters: revolutionizing sustainable farming and soil health. *Frontiers in Soil Science*, 5, 1504045.
- Singh, L. R., Dar, T. A., & Kumari, K. (2017). Cellular Osmolytes. *Springer, Ordibehesht*, 26, 1396.
- Singh, M., Kumar, J., Singh, S., Singh, V. P., & Prasad, S. M. (2015). Roles of osmoprotectants in improving salinity and drought tolerance in plants: a review. *Reviews in environmental science and bio/technology*, 14(3), 407-426.
- Singh, P., Sharma, A., & Dhankhar, J. (2022). Climate change and soil fertility. In *Plant Stress Mitigators: Action and Application* (pp. 25-59). Singapore: Springer Nature Singapore.
- Soares, G. F., Ribeiro Júnior, W. Q., Pereira, L. F., Lima, C. A. D., Soares, D. D. S., Muller, O., ... & Ramos, M. L. G. (2021). Characterization of wheat genotypes for drought tolerance and water use efficiency. *Scientia Agricola*, 78, e20190304.
- Sogoni, A., Ngcobo, B. L., Jimoh, M. O., Kambizi, L., & Laubscher, C. P. (2024). Seaweed-Derived Bio-Stimulant (Kelpak®) Enhanced the Morphophysiological, Biochemical, and Nutritional Quality of Salt-Stressed Spinach (*Spinacia oleracea* L.). *Horticulturae*, 10(12), 1340.
- Stirk, W. A., & Van Staden, J. (2014). Plant growth regulators in seaweeds: occurrence, regulation and functions. In *Advances in botanical research* (Vol. 71, pp. 125-159). Academic Press.
- Strizhov, N., Ábrahám, E., Ökrész, L., Blickling, S., Zilberstein, A., Schell, J., ... & Szabados, L. (1997). Differential expression of two P5CS genes controlling proline accumulation during salt-stress requires ABA and is regulated by ABA1, ABI1 and AXR2 in Arabidopsis. *The Plant Journal*, 12(3), 557-569.

- Sultan, K., Perveen, S., Parveen, A., Atif, M., & Zafar, S. (2023). Benzyl amino purine (BAP), moringa leaf extract and ascorbic acid induced drought stress tolerance in pea (*Pisum sativum* L.). *Gesunde Pflanzen*, 75(6), 2423-2436.
- Tiwari, Y. K. (2024). Proline as a key player in heat stress tolerance: Insights from maize. *Discover Agriculture*, 2(1), 121.
- Toscano, S., Gómez-Bellot, M. J., Romano, D., & Sánchez-Blanco, M. J. (2023). Physiological and biochemical changes in response to *Moringa oleifera* biostimulant in petunia plants under water deficit. *Scientia Horticulturae*, 319, 112187.
- Vitale, L., Di Tommasi, P., Arena, C., Riondino, M., Forte, A., Verlotta, A., ... & Magliulo, V. (2009). Growth and gas exchange response to water shortage of a maize crop on different soil types. *Acta Physiologiae Plantarum*, 31(2), 331-341.
- Wang, S., Zhou, H., He, Z., Ma, D., Sun, W., Xu, X., & Tian, Q. (2024). Effects of drought stress on leaf functional traits and biomass characteristics of *Atriplex canescens*. *Plants*, 13(14), 2006.
- Wijayasinghe, Y. S., Tyagi, A., & Poddar, N. K. (2017). Regulation of cell volume by osmolytes. In *Cellular osmolytes: From chaperoning protein folding to clinical perspectives* (pp. 195-228). Singapore: Springer Singapore.
- Wu, J., Wang, J., Hui, W., Zhao, F., Wang, P., Su, C., & Gong, W. (2022). Physiology of plant responses to water stress and related genes: A review. *Forests*, 13(2), 324.
- Yaman, S. O., & Ayhancı, A. (2021). Lipid peroxidation. In P. Atukeren (Ed.), *Accenting lipid peroxidation*. IntechOpen.
- Yasmeen, A., Basra, S. M. A., Ahmad, R., & Wahid, A. (2012). Performance of late sown wheat in response to foliar application of *Moringa oleifera* Lam. leaf extract.
- Yasmeen, A., Basra, S., Maqsood, A., Wahid, A., Nouman, W., & Rehman, H. U. (2013). Exploring the potential of *Moringa oleifera* leaf extract (MLE) as a seed priming agent in improving wheat performance. *Turkish Journal of Botany*, 37(3), 512-520.

- Zhang, Y. J., Xie, Z. K., Wang, Y. J., Su, P. X., An, L. P., & Gao, H. (2011). Effect of water stress on leaf photosynthesis, chlorophyll content, and growth of oriental lily. *Russian journal of plant physiology*, 58(5), 844-850.
- Zhao, W., Liu, L., Shen, Q., Yang, J., Han, X., Tian, F., & Wu, J. (2020). Effects of water stress on photosynthesis, yield, and water use efficiency in winter wheat. *Water*, 12(8), 2127.
- Zheng, F. L., Tan, Z. P., Zhang, Y., Xu, X. H., Hashem, A., Debnath, A., & Wu, Q. S. (2024). Enhancing walnut growth and drought tolerance through *Serendipita indica*: focus on mitochondrial antioxidant defense. *Plant Growth Regulation*, 104(3), 1697-1706.
- Zhu, Y., Tian, M., Lu, S., Qin, Y., Zhao, T., Shi, H., ... & Qin, D. (2025). The antioxidant role of aromatic plant extracts in managing neurodegenerative diseases: A comprehensive review. *Brain Research Bulletin*, 111253.
- Zou, J., Hu, W., Loka, D. A., Snider, J. L., Zhu, H., Li, Y., ... & Zhou, Z. (2022). Carbon assimilation and distribution in cotton photosynthetic organs is a limiting factor affecting boll weight formation under drought. *Frontiers in plant science*, 13, 1001940.

BÖLÜM 2

BİTKİ DOKU KÜLTÜRÜNÜN TARIMSAL VERİMLİLİĞİ KISITLAYAN SORUNLARLA MÜCADELEDE KULLANIMI

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

DOI: <https://www.doi.org/10.5281/zenodo.18082728>

^{1*} Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Tarımsal Biyoteknoloji Bölümü, Van, Türkiye. sibelturan@yyu.edu.tr

² Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Tarımsal Biyoteknoloji Bölümü, Van, Türkiye. metinkocak@yyu.edu.tr

GİRİŞ

Dünya nüfusunun sürdürülebilir bir biçimde beslenmesi önemli bir zorluk olarak karşımıza çıkmaktadır (Yüksel ve ark., 2025). Günümüzde tarımsal üretim, iklim değişikliği, zararlı ve hastalık baskısı, toprak verimsizliği ve su kıtlığı gibi çok sayıda faktör nedeniyle ciddi kısıtlamalarla karşı karşıyadır (Liaqat ve ark., 2022; Güler ve ark., 2023; Güler, 2024; Yuan ve ark., 2024). Bu sorunlar, bitkisel verimliliği ve ürün kalitesini doğrudan etkileyerek küresel gıda güvenliği üzerinde önemli bir tehdit oluşturmaktadır; özellikle verim dalgalanmalarının artmasına ve gıda arz zincirinin kırılgan hâle gelmesine yol açmaktadır (Mirzabaev ve ark., 2023; Saleem ve ark., 2025; Xue ve ark., 2025). Bu bağlamda, bitki biyoteknolojisi ve doku kültürü teknikleri, tarımsal üretimde sürdürülebilir çözümler sunan yenilikçi ve bilimsel temelli araçlar olarak öne çıkmaktadır (Villalobos-López ve ark., 2022; Wijerathna-Yapa ve ark., 2023). Doku kültürü yöntemleri, bitki hücre, doku veya organlarının steril koşullar altında in vitro çoğaltılmasını, hastalıklardan arındırılmasını ve genetik olarak iyileştirilmesini mümkün kılarak, geleneksel üretim yöntemlerinin ötesinde zaman ve mekân kısıtlarını azaltan, hızlı ve kontrollü bir üretim sistemi sunmaktadır (Oseni ve ark., 2018; Espinosa-Leal ve ark., 2018). Böylece, tarımsal verimliliği kısıtlayan biyotik ve abiyotik streslerle mücadelede, iklim değişikliğine uyum kapasitesinin artırılmasıyla birlikte, yeni çeşitlerin geliştirilmesi ve mevcut bitki materyalinin optimizasyonu için kritik bir araç olarak kullanılmaktadır (Rai ve ark., 2011).

1. HASTALIKSIZ BİTKİ ÜRETİMİ

Bitki doku kültürü teknikleri, özellikle vejetatif çoğaltılan türlerde virüs ve viroid enfeksiyonlarının kontrolünde kritik bir biyoteknolojik araç olarak kullanılmaktadır. Tarımsal üretimde verim ve kaliteyi önemli ölçüde azaltan viral patojenlerin geleneksel yöntemlerle elimine edilmesi çoğu zaman mümkün olmadığından, meristem kültürü, termoterapi, kemoterapi ve kriyoterapi gibi in vitro yöntemler hastalıksız bitki materyali elde edilmesinde standart haline gelmiştir. Son yirmi yılda yapılan çalışmalar, bu yöntemlerin kombinasyon halinde uygulanmasının virüs eliminasyonunu daha etkili hale getirdiğini göstermektedir (Panattoni ve Luvisi 2013; Wang ve ark. 2008). Bu teknik uygulanabilirliği açısından 4'e ayrılmaktadır.

1.1. MERİSTEM KÜLTÜRÜ

Meristem kültürü, bitkilerin apikal veya aksiller meristem bölgelerinin in vitro koşullarda kültüre alınmasıyla sağlıklı, genetik olarak stabil ve hastalıksız bitkilerin elde edilmesini sağlayan en etkili doku kültürü yöntemlerinden biridir. Bu yöntemin bilimsel temelleri ilk kez Morel ve Marthin'in (1952) meristem dokusunun virüs taşımama özelliğini ortaya koymasıyla atılmış ve daha sonra Morel (1964) tarafından orkide çoğaltımında uygulanarak modern mikroçoğaltımın gelişmesine öncülük etmiştir. Bitki meristemi yüksek hücre bölünme oranına sahip olup virüslerin sistemik hareketinden kaçtığı için temiz ve sağlıklı bitki materyali üretiminde ideal bir hedef doku haline gelmiştir (George ve De Klerk, 2008; Bhojwani ve Razdan, 1996).

Meristem kültürü, özellikle vejetatif çoğaltılan bitki türlerinde virüs eliminasyonu için en güvenilir biyoteknolojik araçlardan biridir. Virüslerin meristematik bölgelerde bulunmaması veya çok düşük seviyede olması, bu dokuların kültüre alınmasıyla virüslerden tamamen arındırılmış bitkilerin elde edilmesini mümkün kılmaktadır (Faccioli ve Marani, 1998). Termoterapi, kemoterapi veya kriyoterapi ile kombine edilen meristem kültürü uygulamaları virüs eradikasyon verimliliğini daha da artırmaktadır (Wang ve ark., 2008). Bu yöntemler patates, çilek, Musa türleri, marul ve birçok sebze-meyve türünde başarıyla uygulanmış ve virüsten ari sertifikalı üretim programlarının temel bileşeni haline gelmiştir (Hussey ve Stacey, 1981). Meristem kültürüyle üretilen hastaliksız bitkiler, özellikle patates, çilek, muz, üzüm ve sebze türlerinde ticari üretimde yüksek verim, hızlı çoğalma ve üstün kalite sağlamaktadır. Bu teknik, modern fide-fidan endüstrisinin temel biyoteknolojik bileşenlerinden biri olarak kabul edilmektedir (Styer ve Chin, 2010). Türkiye’de yapılan çalışmalar da birçok meyve ve sebze türünde meristem kültürünün başarıyla uygulandığını göstermekte olup, özellikle fındık, pistachio, turunçgil ve bağcılık programlarında virüsten ari materyal geliştirmede önemli katkılar sağlamıştır (Gürel ve ark., 2000; Onay ve ark. 2003). Bu yönüyle meristem kültürü, uluslararası düzeyde sürdürülebilir ve sağlıklı bitki üretimi için vazgeçilmez bir yöntemdir.

1.2. TERMOTERAPİ

Termoterapi, bitkilerin kontrollü yüksek sıcaklıklara maruz bırakılmasıyla viral replikasyonun baskılanmasını amaçlayan ve

özellikle meristem kültürüyle birleştirildiğinde etkinliği belirgin şekilde artan modern bir virüs eradikasyon yöntemidir. Yüksek sıcaklık uygulamalarının, RNA virüslerinde replikasyon kompleksinin sentezini inhibe ettiği ve sistemik hareketi sınırladığı bilinmektedir. Alavijeh ve ark., (2025), *Geranium* türlerinde 35–38 °C’de uygulanan termoterapinin 0.2–0.3 mm meristem uçlarıyla birlikte kullanıldığında %60–70’e varan virüs arındırma başarısı sağladığını bildirmiştir. Benzer şekilde Benke ve ark., (2023), sarımsakta meristem kültürü, termoterapi ve antiviral kimyasal uygulamalarının ortak kullanımının tek başına meristem kültürüne göre anlamlı biçimde daha yüksek eradikasyon oranları oluşturduğunu rapor etmiştir. Abdelwahab ve ark. (2024) tarafından karadutta yürütülen bir diğer çalışmada ise termoterapinin ribavirin uygulamasıyla birlikte kullanılması, Idacovirus (BMIV) eliminasyon oranını %50’ye kadar çıkarmıştır. Ayrıca son yıllardaki araştırmalar, termoterapinin yalnızca virüs eliminasyonu değil, aynı zamanda in vitro kültürlerde kontaminasyonun azaltılmasında da önemli rol oynadığını göstermektedir; Şekerli (2024) tarafından fındık dokusu üzerinde yapılan çalışmada, termoterapi uygulamasının kontaminasyon oranlarını düşürdüğü ve kültür canlılığını olumlu etkilediği belirtilmiştir. Bununla birlikte sıcaklık stresine duyarlı türlerde fotosentetik kapasitenin azalması, sürgün nekrozu ve morfolojik bozulmalar gibi fitotoksik etkilerin görülebileceği bildirildiğinden, termoterapi protokollerinin tür, genotip ve virüs tipine özgü şekilde optimize edilmesi gerekmektedir (Wang ve ark., 2008; Benke ve ark., 2023).

1.3. KRİYOTERAPİ

Kriyoterapi, bitki meristem dokusunun ultra düşük sıcaklıklara (–196 °C; sıvı azot) kısa süreli maruziyetiyle virüslerin eliminasyonunu sağlayan etkili bir yöntemdir. Bu yöntemin temel prensibi, viral partiküllerin düşük sıcaklıklara karşı daha duyarlı olması ve meristematik dokunun kriyoprotektif özellikleri sayesinde canlılığını korumasıdır. Bettoni ve ark., (2022), patates dokularında uygulanan “dondur-çöz” (vitrifikasyon tabanlı) protokollerin PVS, PVA ve PVX gibi önemli virüslerin eliminasyonunda güvenilir sonuçlar verdiğini vurgulamıştır.

1.4. KEMOTERAPİ

Kemoterapi, virüs replikasyonunu baskılayan antiviral kimyasalların (ribavirin, virazole, acyclovir vb.) in vitro kültür ortamına eklenerek kullanıldığı bitki virüs arındırma yöntemidir. Son yıllarda yapılan çalışmalar, kemoterapinin özellikle meristem kültürü ve termoterapi ile kombine edildiğinde daha yüksek arındırma oranı sağladığını göstermektedir. Benke ve ark. (2023) sarımsakta meristem kültürü, termoterapi ve kimyasal antiviral uygulamayı birlikte kullanarak virüs eliminasyon oranını %90’ın üzerine çıkarmıştır. Son dönem çalışmalar, antiviral bileşiklerin kontrollü dozlarda uygulanmasının bitki rejenerasyon kapasitesini korurken virüs eliminasyon sürecini güçlendirdiğini vurgulamaktadır (Abdelwahab ve ark. 2024).

2. SOMAKLONAL VARYASYON

Evrin ile bitkilerde gen ekspresyonu ve morfolojisinde epigenetik aracılı değişiklikler arasındaki olası bağlantılar gösterilmiştir (Rapp ve Wendel 2005). Bu nedenle, evrimsel biyolojinin temel bir ilkesi, doğal seçilimin, DNA dizisi varyasyonu tarafından belirlenen ve geleneksel doğal popülasyonlar içinde bir dizi epigenetik mekanizma yoluyla elde edilen fenotipler üzerinde etki ettiği olmalıdır. Tarih boyunca, evrim teorisi öncelikle çok hücreli organizmalar, tek hücreli organizmalar, fajlar ve virüsler gibi canlı organizmaların incelenmesine dayanmıştır. Son yıllarda, birçok bilim insanı bitkiler, omurgalılar ve özellikle mikroorganizmalar dahil olmak üzere çeşitli organizmalar üzerinde evrim deneyleri gerçekleştirmiştir (Elena ve Lenski 2003).

Somaklonal varyasyon, hücre ve doku kültürlerinde ortaya çıkan varyasyon olarak tanımlanır (Larkin ve Scowcroft 1981). Günümüzde, somaklonal varyasyon terimi, doku kültüründen türetilen tüm varyantlar için evrensel olarak kullanılmaktadır (Bajaj,1990), ancak protoplast, anter ve meristem kültürlerinden türetilen varyantları tanımlamak için protoklonal, gametoklonal ve meriklonal varyasyon gibi diğer isimler de sıklıkla kullanılmaktadır. Bazı bilim adamları tanıma başka bir boyut eklemiş ve somaklonal varyasyonun cinsel döngü yoluyla kalıtsal olmasını şart koşmuştur. Ne yazık ki, karmaşık cinsel uyumsuzluklar, tohum eksikliği, poliploidi veya uzun nesil döngüleri nedeniyle kalıtım özelliğini her zaman göstermek mümkün değildir. Bu nedenle, bu tür bitkiler için somaklonal varyasyonun

kalıtsal doğasını açıklamak zor ve neredeyse imkansız olabilir (Skirvin ve ark. 1994).

Braun (1959) tarafından somaklonal varyasyonun ilk kez gözlemlenmesi ve raporlanmasından bu yana, bu durum birçok doku kültürü bitkisinin en önemli sorunlarından biri olmaya devam etmektedir. Bitki hücrelerinin in vitro olarak büyümesi ve bütün bitkilere dönüşmesi, sadece hücrenin mitotik bölünmesini içeren eşeysiz bir süreçtir ve teorik olarak herhangi bir varyasyona neden olmamalıdır. İdeal olarak, genetik olarak tek tip bitkilerin klonal çoğalması beklenir. Bu nedenle, kültür süreci sırasında kontrolsüz ve rastgele spontan varyasyonların ortaya çıkması, beklenmedik ve çoğunlukla istenmeyen bir durumdur. Ancak bu olumsuz etkilerin aksine, yeni varyantlar yaratarak mahsulün iyileştirilmesinde yararlılığı da iyi belgelenmiştir (Bouharmont 1994; Mehta 2001).

Somaklonal varyasyonun özellikle mikroçoğaltım ile eş zamanlı uygulanması durumunda, bitkilerin genetik çeşitliliği artırılarak yeni fenotiplerin ortaya çıkmasının mümkün olduğu birçok çalışmada vurgulanmıştır (Bairu ve ark., 2011). Somaklonal varyasyon ile geliştirilmiş hatlar, özellikle süs bitkileri, meyve ağaçları, sebze ve ticari ürünlerde kullanılmış; bu hatlarda hastalık direnci, stres toleransı, verim artışı veya kalite özelliklerinde iyileşmeler rapor edilmiştir (Bairu ve ark., 2011). Ayrıca, doku kültürü yoluyla elde edilen somaklonlar arasında hastalık ve stres toleransına sahip hatlar olduğunda belirlenmiştir (Pawełkowicz ve ark., 2021).

Somaklonal varyasyon, modern bitki ıslahı ve koruma stratejilerinde, özellikle geleneksel genetik varyasyonun yetersiz kaldığı durumlarda alternatif ve tamamlayıcı bir araç olarak değerlendirilebilir. Doğal variationun sınırlı olduğu genotiplerde, doku kültürü yoluyla oluşturulabilecek somaklonlar; patojen, zararlı ve stres koşullarına dayanıklı hatların geliştirilmesine katkı sağlayabilir (Pawełkowicz ve ark., 2021).

3. EMBRİYO KURTARMA TEKNİĞİ

Embriyo kurtarma teknikleri, geleneksel ıslah yöntemleriyle aşılması güç olan türler arası genetik bariyerleri ve embriyo sorunlarını aşarak, tarımsal üretimde hem biyotik hem abiyotik streslere karşı direnç-yum genlerini kültür çeşitlerine aktarmada kritik bir araçtır. Özellikle sebze ve meyve ıslahında tür dışı yabancı gen kaynakları, çekirdeksiz meyveler ya da tohum tutmayan hatlar gibi genetik çeşitliliği genişletmek ve arzu edilen agronomik özellikleri kazandırmak için vazgeçilmez bir yöntem haline gelmiştir. Örneğin, *Cucurbita pepo* × *C. moschata* interspesifik meleziyle yapılan hibridleşmede, 24 çapraz kombinasyondan 22'sinde meyve seti elde edilmiş olmasına rağmen çoğunda tohum embriyosu yokluğu gözlemlenmiş; yalnızca tek bir çapraz kombinasyondan elde edilen embriyolar in vitro'da kurtarılaraq %80 başarıyla fideye dönüşebilmiştir (Kapoor ve ark, 2024). Bu bulgu, sebze ıslahında embriyo kurtarmanın özellikle hastalık direnci, stres toleransı gibi sert genetik bariyerlerin olduğu durumlarda gen aktarımına olanak sağladığını göstermektedir.

Meyve ıslahında, özellikle çekirdeksiz veya stenospermokarpik üzümlerde, embriyo kurtarma teknikleri son yıllarda büyük oranda geliştirilmiştir. Farklı hibrid kombinasyonlarında embriyoların örneklenme zamanlaması ve genotip seçiminin başarı oranını önemli biçimde etkilediği saptanmıştır. ‘Yalova Seedless’ anaç çeşidi kullanıldığında, embriyo kurtarma yöntemiyle fide elde etme şansı artmıştır (Doyğacı ve ark., 2024). Bu tür optimizasyonlar, sadece tohum tutma problemini aşmakla kalmayıp aynı zamanda fungal hastalık direnci, verim ve kalitenin hedeflenmesine olanak tanımaktadır.

Tarımsal mücadele de hastalık ve zararlı yönetimi ile üretim risklerini azaltma durumunda embriyo kurtarma uygulamaları üç ana başlıkta toplanabilir: (i) yabani veya uzak akrabalardan alınan dayanıklılık genlerinin kültüre aktarılmasıyla interspesifik melezlemeleri mümkün kılmak ve dolayısıyla hastalık, zararlı veya çevresel streslere karşı direnç kaynaklarını geri melezlemek; (ii) haploid ve doubled-haploid (DH) üretimi yoluyla ıslah programlarında homozigot hatların hızlı elde edilmesi böylece dirençli hatların daha hızlı seleksiyonu ve ticarileşmesi; (iii) hızlı döngü (speed breeding) ve melezleme döngüsünün kısaltılması ile zaman ve kaynak kullanımının optimize edilmesini sağlayarak daha hızlı çeşit geliştirme. Bu uygulamaların her biri, bitki korunması ve sürdürülebilir üretim stratejilerinde risk azaltıcı ve önleyici yaklaşımlar sunarak doğrudan tarımsal mücadeleye katkı sağlamaktadır (Doyğacı ve ark., 2024).

4. GEN TRANSFERİ

Bitki doku kültürü, hücre ve dokuların in vitro koşullarda rejenerasyonunu sağlayarak genetik modifikasyon süreçleri için uygun bir platform oluşturur. Modern ıslah programlarında, doku kültürü ile gen aktarım ve genom düzenleme tekniklerinin entegrasyonu; stres toleransı, hastalık direnci ve verim artışı gibi tarımsal açıdan kritik özelliklerin geliştirilmesinde önemli bir ivme sağlamaktadır. Son yıllarda yapılan çalışmalar, doku kültürü temelli transformasyon sistemlerinin, özellikle yüksek rejenerasyon kapasitesi gösteren türlerde gen aktarımını önemli ölçüde kolaylaştırdığını ortaya koymaktadır.

Gen düzenleme veya gen aktarım tekniklerinin pratik uygulamaya dönüşebilmesi için doku kültürü adımları kritik önemdedir. Geleneksel transformasyon yöntemleri örneğin agrobakteriyum aracılı transformasyon, gen bombardımanı (biolistik), protoplast transformasyonu ile birlikte, uygun eksplant seçimi, besi ortamı ve büyüme düzenleyici hormon dengesi gibi parametrelerin optimize edilmesi gereklidir (Sütçü ve Sarıkamış, 2024). CRISPR/Cas9 başta olmak üzere genom düzenleme teknolojileri, sebze ve tarla bitkilerinde hastalık direnci ve abiyotik stres toleransının artırılmasında öncelikli araçlar olarak değerlendirilmektedir (Karakaş, 2023). Ayrıca base editing ve prime editing gibi yeni CRISPR türevleri, daha hassas hedefleme kapasitesi sayesinde verim ve kalite özelliklerinin geliştirilmesine yönelik uygulamaları genişletmiştir (Liu ve ark., 2025). İklim değişikliği, su kısıtlılığı ve toprak tuzluluğu gibi

faktörler; küresel tarımsal verimliliği ciddi ölçüde tehdit etmektedir. CRISPR temelli gen düzenleme çalışmaları; su stresine, tuzluluğa ve ısı stresine tolerans kazandıracak genlerin düzenlenmesini mümkün kılmaktadır (Sütçü ve Sarıkamış, 2024). Su stresi toleransını artıran gen yollarında düzenleme yapılması; bitkilerin toprak suyu az olduğunda bile verim kaybını minimize etmesine olanak tanıyabilir. Aynı şekilde, tuzluluk stresi için iyon taşıyıcı genleri veya osmoregulasyonla ilişkili genlerin modifikasyonu; bitkilerin tuzlu topraklarda üretim yapabilmesini sağlayabilir. Bu yaklaşım, özellikle kurak ve yarı-kurak iklim kuşağındaki tarım arazilerinde su ve tuz kısıtlarının olduğu bölgelerde verim kayıplarını azaltma potansiyeline sahiptir.

Patojenlere ve zararlılara karşı dayanıklı çeşitlerin geliştirilmesi, kimyasal kontrol yöntemlerine olan bağımlılığı azaltarak hem çevresel hem ekonomik sürdürülebilirlik sağlar. CRISPR/Cas9 ile patojen duyarlılık genlerinin (S-genleri) susturulması ya da direnç genlerinin aktive edilmesi; bitkilerin viral, fungal veya bakteriyel hastalıklara karşı kalıcı dirence sahip olmasına imkan tanır (Wang ve ark., 2025). Pamukta multiplex (çoklu) sgRNA kullanan CRISPR/Cas9 sistemi ile bitki virüslerine karşı yüksek düzeyde direnç sağlayan hatlar elde edilmiştir. Dönüştürülmüş bitkiler virüs bulaşmasına rağmen hastalık semptomu göstermemiştir (Gul ve ark., 2025). Bu tip uygulamalar, pestisit kullanımını azaltarak çevreye dost ve sürdürülebilir tarım stratejilerine katkı sunar. Geleneksel ıslah programları genellikle yıllar süren melezleme ve seleksiyon döngüleri gerektirir. Oysa, doku

kültürü ile gen düzenleme kombinasyonu sayesinde istenen özelliklere sahip genotipler daha kısa sürede oluşturulabilir ve homojen, stabil hatlar haline getirilebilir. Bu durum; gıda güvenliği, hızlı çeşit geliştirme ve piyasaya sunma açısından büyük avantaj sağlar. Ayrıca, genom düzenleme yalnızca dayanıklılık ya da stres toleransı değil; besin kalitesi (besin bileşenleri, besin değeri), raf ömrü, adaptasyon yeteneği gibi karmaşık özelliklerin iyileştirilmesinde de potansiyel taşımaktadır. Özellikle regülatör gen bölgelerinin düzenlenmesi, gen ifadesinin kontrolünü sağlayarak kalite ve fizyolojik adaptasyon üzerinde hassas müdahalelere imkan tanımaktadır (Ceasar ve Kavas, 2024).

Son yıllarda bitki doku kültürü ile entegre gen aktarım ve genom düzenleme teknolojilerinde yaşanan gelişmeler, tarımsal verimliliği sınırlandıran biyotik ve abiyotik stres faktörleriyle mücadelede yöntemsel bir dönüşüme yol açarak, önemli değişikliklere neden olmuştur. Geleneksel ıslah yöntemleri, çoğu zaman uzun süre gerektirmesi, genetik varyabiliteye bağımlılığı ve türler arası üreme engelleri gibi sınırlılıklar nedeniyle modern tarımsal gereksinimleri karşılamada yetersiz kalmaktadır. Buna karşın doku kültürü temelli transformasyon sistemleri, hücre düzeyinde genetik müdahaleye imkân tanıyarak hedeflenen özelliklerin gen ifadesi ve fenotip düzeyinde daha öngörülebilir sonuçlar verecek şekilde, yüksek doğrulukla ve kısa sürede bitkilere kazandırılmasını mümkün kılmaktadır. Bu yaklaşım, stres toleransının artırılması, verim

stabilitesinin sağlanması ve kalite özelliklerinin iyileştirilmesi açısından stratejik avantajlar sunmaktadır.

5. PROTOPLAST KÜLTÜRÜ

Protoplastlar, hücre duvarları çıkarılmış, sadece plazma zarı ve sitoplazması sağlam kalan bitki hücresidir. Protoplast kültürü, bitki biyoteknolojisinde önemli bir rol oynar ve bitki biyolojisi hakkındaki bilgimizi artırarak genetik iyileştirmeleri kolaylaştıran sayısız uygulama sunar. Protoplast izolasyonu süreci, araştırmacıların bitki hücrelerinin sert hücre duvarlarını aşmalarını sağlayarak, gen ekspresyonu analizi, genetik transformasyon ve rejenerasyon çalışmaları dahil olmak üzere çeşitli deneysel manipülasyonlar gerçekleştirmek için benzersiz bir platform sunar.

Protoplast izolasyonu için yaygın olarak kullanılan materyaller arasında genç yapraklar, taç yapraklar, kökler, kallus ve süspansiyon kültürleri bulunur. Protoplast kaynağı olarak, kuvvetli bir şekilde büyüyen ve daha genç dokuların kullanılmasının, daha yüksek verim ve canlılığa sahip protoplastların elde edilmesini sağladığı gösterilmiştir. Çalışmalar, taç yapraklardan ekstrakte edilen protoplastların genç yapraklardan elde edilenlerden daha iyi performans gösterdiğini ortaya koymuştur. Ayrıca, aynı enzimatik koşullar altında, süspansiyon kültürlerinden izole edilen protoplastlar en yüksek verim ve canlılığı gösterirken, bunları steril fide yaprakları izlemektedir (Chen ve ark., 2023).

Protoplast izolasyonu için tercih edilen dokunun özellikleri ve kullanılan enzim karışımları izolasyonun başarısını etkilemektedir. Ayrıca, kullanılan dokuya ait hücrelerin kalınlığı, enzimatik reaksiyon sürecindeki sıcaklık ve süre, enzim karışımının pH değeri ve protoplastların izole edileceği dokunun izolasyon öncesi plazmoliz durumu gibi birçok etmen de başarıyı etkilemektedir (Çimen ve ark., 2016). Protoplastların üretildiği koşullar, örneğin spesifik enzimler, konsantrasyonlar ve işlem süreleri, protoplastların verimi ve canlılığı üzerinde önemli bir rol oynar (Leaunghitikanhanchana ve ark., 2021; Wang ve ark., 2025).

Protoplast izolasyon yöntemleri temel olarak iki kategoriye ayrılır: mekanik ayırma ve enzimatik sindirim. Mekanik yöntem, hücrelerin hipertonic bir çözeltiye yerleştirilmesini içerir; bu, plazma duvarının ayrılmasını tetikler, hücresel materyalin dışarı çıkmasına ve ardından bitki dokusunun bölünmesine yol açar, sonuç olarak protoplastlar serbest kalır. Ancak, bu teknik belirli dokularla sınırlıdır ve genellikle soğan soğanı pulları, havuç ve pancar gibi depo dokularında bulunan daha büyük, yüksek derecede damarlanmış hücrelerde etkilidir. Bu yöntemin bir dezavantajı, ezilmiş hücrelerden salınan maddelerin diğer protoplastların canlılığını önemli ölçüde azaltabilmesidir. Protoplastların enzimatik izolasyonu, protoplast ekstraksiyonunda yaygın olarak kullanılan bir tekniktir. Bu teknik, bitki hücre duvarının parçalanmasını kolaylaştırmak ve protoplastların elde edilmesini sağlamak için selüloz, hemiselüloz, ayrıştırıcı enzimler ve pektinaz gibi enzimlerin kullanılması ilkesine dayanır. Özellikle pektinaz ve

ayırıştırıcı enzimler, öncelikle pektin moleküllerinin parçalanmasını hedefleyerek komşu hücrelerin ayrılmasını teşvik eder. Protoplast izolasyonu sürecinde, selüloz ve pektinazın karıştırılması yaygın bir uygulamadır. İlk olarak, pektinaz pektini parçalamak için kullanılır, ardından hücre duvarı selülozun sürekli etkisi altında daha fazla parçalanır ve sonunda protoplastlar serbest kalır. Bu enzimatik ayırma yöntemi, yapısal bütünlüğü ile karakterize edilen önemli miktarda protoplast verir ve geniş bir uygulama yelpazesi sunar (Chen ve ark., 2023).

Protoplast kültürünün kullanım amaçları

- Türler-arası Melezleme / Somatik Hücre Melezlemesi: Protoplast füzyonu ile cins veya tür farkı olan bitkiler arasında, doğal yollarla elde edilemeyecek hibritler oluşturulabilir. Bu yöntem sayesinde genetik bariyerler aşılabılır ve özellikle sebze ve meyve ıslahında yeni çeşitler geliştirilebilir (Kang ve ark, 2020; Ozojiofor, 2017).
- Genetik Modifikasyon ve Gen Aktarımı: Protoplastlar, doğrudan DNA aktarımı için uygun bir sistem sunar. Bu yöntem, özellikle klonal üreme ile çoğaltılan veya üreme döngüsü uzun olan bitkilerde genetik değişim için kullanılır (Li et al., 2025). Günümüzde bu sistemler, geçici gen ekspresyonu, CRISPR/Cas9 ile genom düzenleme ve gen fonksiyonunun araştırılmasında yaygın olarak kullanılmaktadır (Mukundan ve ark., 2025).

- Sekonder Metabolit Üretimi ve Moleküler Biyoteknoloji: Protoplast temelli kültürler, bitkisel metabolit üretimi veya gen ekspresyonunu hedef alan biyoteknolojik uygulamalarda kullanılabilir (Ozojiofor, 2017). Özellikle tıbbi veya endüstriyel protein üretimi için “bitki moleküler üretim platformu” kapsamında potansiyel sunar (Li et al., 2025).
- Çevresel Uygulamalar ve Fitoremediasyon: Protoplast teknolojisi, genetik modifikasyon ile birlikte kullanılarak bitkileri çevresel streslere ve kirleticilere karşı dönüştürmek için de değerlendirilmektedir (Mukundan ve ark., 2025).

6. HAPLOİD BİTKİ ÜRETİMİ

Haploid bitkiler somatik hücrelerindeki kromozom sayısı gamet hücrelerindeki kromozom sayısı kadar olan bitkiler olarak tanımlanmaktadır. Bu bitkiler, gamet hücrelerinin füzyonu olmadan yumurta hücresi veya sinergidlerin embriyo haline gelmesiyle doğada kendiliğinden oluşabilir veya farklı teknikler kullanılarak elde edilebilir. Kendiliğinden oluşan haploidlerin oluşumu düşük sıklıkta olduğundan, doğada bunları belirlemek kolay değildir (Tütüncü ve ark. 2017).

Günümüzde, F1 çeşitleri üstün özellikleri nedeniyle ıslah çalışmalarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak, F1 melez ıslahının başlangıç malzemesi olan saf hatların üretimi, uzun bir ıslah döngüsü (tekrarlayan kendi kendine döllenme veya kardeş çaprazlama), yoğun emek, deneyim ve teknoloji gerektirir. Ayrıca,

klasik yöntemlerle %100 saflığa ulaşmak mümkün değildir. Öte yandan, ıslah programlarında DH tekniklerine uyum sağlayarak kısa sürede tamamen homozigot hatlar elde edilebilmektedir. DH ıslahı, iş gücü, maliyet, zaman ve etkinlik açısından ıslahçılara büyük avantajlar sunmakta ve böylece ıslah çalışmalarını büyük ölçekte hızlandırmaktadır (Kurtar ve ark., 2020).

Haploid ve DH bitkilerin elde edilmesi, androgenesis, ginogenesis ve partenogenesis gibi stratejilerden oluşan yöntemleri kullanır ve her yöntem, mevcut ürün türlerine ve ıslah hedeflerine göre farklı avantajlar sağlar.

Haploid bitki üretiminin Avantajları

- Hızlı homozigot hat geliştirme: Haploidlerde kromozom katlanması ile çift haploid (DH) hatların tek nesilde elde edilebilmesi, klasik ıslah yöntemlerinde 6–8 nesil süren saflaştırmayı büyük ölçüde hızlandırır (Germanà, 2011).
- Daha etkin seleksiyon: Homozigot bireylerin genetik yapısı sabit olduğundan, üstün fenotiplerin belirlenmesi daha kolaydır. Bu durum seleksiyonun doğruluğunu ve verimliliğini artırır (Maluszynski ve ark., 2003).
- Hibrit tohum üretiminin hızlanması: Melez programlarında gerekli olan ebeveyn hatlarının saflaştırılması DH yöntemi ile hızlı ve güvenilir bir şekilde sağlanır (Touraev ve ark., 2009).
- Genetik ve fonksiyonel analizlerde kolaylık: Haploidlerde resesif mutasyonlar doğrudan fenotipe yansıdığı için mutasyon

taramaları, gen haritalama ve QTL analizleri daha hızlı yapılabilir (Hu ve Yang, 1986).

- Stres ve hastalık tolerans ıslahını kolaylaştırma: DH sistemleri, stres koşullarına toleranslı bireylerin erken nesilde tespit edilmesini mümkün kılar (Dunwell, 2010).

Haploid bitki üretiminin dezavantajları

- Tür ve genotip bağımlılığı: Haploid ve DH üretim başarı oranı hem türler hem de genotipler arasında büyük değişkenlik gösterir; bazı türlerde embriyo gelişimi çok düşük olabilir (Germanà, 2011).
- Düşük verim ve kültür zorlukları: Anter veya mikrospor kültürlerinde embriyo oluşumu genellikle düşüktür ve özel teknik koşullar gerektirir (Touraev ve ark., 2009).
- Somaklonal varyasyon riski: Doku kültürü süreçleri, özellikle uzun süreli kallus aşamaları, genetik kararlılığı bozabilir (Maluszynski ve ark., 2003).
- Yüksek teknik uzmanlık ve maliyet: Haploid üretimi; steril koşullar, özel besi ortamları, kontrollü iklimlendirme sistemleri ve deneyimli personel gerektirir (Hu ve Yang, 1986).
- Kromozom katlanması gerekliliği: Haploid bitkiler genellikle kısırdır; bu nedenle üretimde ilerlemek için kolşisin gibi maddelerle kromozom katlaması gerekir. Ancak bu işlem her zaman yüksek verimle gerçekleşmeyebilir ve toksisite riski taşır (Dunwell, 2010).

7. İN VİTRO SELEKSİYON

İn vitro seleksiyon, bitki hücreleri, dokuları veya organlarının steril ortamda (in vitro şartlarda) kültüre alınıp, ortam besinlerine ya da zararlı seçim ajanlarına (tuz, zararlı kimyasallar, patojen toksinleri, PEG gibi) maruz bırakılarak, bu streslere dayanıklı hücre veya dokuların seçilmesi prensibine dayanır (Rai ve ark. 2011, Wijerathna-Yapa ve Hiti-Bandaralage 2023). Bu yöntemle, geleneksel melezleme ya da alan ıslahından daha hızlı ve kontrollü biçimde, tuz toleransı, kuraklık toleransı, hastalık direnci, ağır metal toleransı gibi istenen özellikleri taşıyan hücre hatları / bitkiler geliştirmek mümkün olabilir (Lestari 2006, Rai ve ark. 2011, Wijerathna-Yapa ve Hiti-Bandaralage 2023).

İn vitro seleksiyonda doku/kök/embriyo gibi “eksplant” materyali alınarak besin ortamı içinde seçim ajanı (örneğin yüksek tuz — NaCl, kuraklık simülasyonu için PEG, patojen toksinleri vb.) uygulanarak seçilen (hayatta kalan) hücre veya dokulardan yeniden bitki rejenerasyonu yapılır. Bu bitkiler stres koşullarına toleranslı olma ihtimali taşır (Rai ve ark. 2011, Rao ve Sandhya 2018, Wijerathna-Yapa ve Hiti-Bandaralage 2023).

İn vitro kültür sırasında bazen genetik veya epigenetik varyasyonlar (kültür kaynaklı mutasyonlar ya da somaklonal varyasyonlar) ortaya çıkar. Bu varyantlar arasında değerli özelliklere sahip olanlar in vitro seleksiyonla saptanabilir (Lestari 2006, Rao ve Sandhya 2018).

İn vitro seleksiyonun avantajları

- Kısa zamanda (alan çalışmasına göre) daha hızlı seçim yapılabilir.
- Alan koşullarından bağımsız, kontrollü laboratuvar ortamında stres koşulları uygulanabilir; çevresel değişkenlik minimize edilebilir.
- Bazı durumlarda geleneksel ıslahın zor olduğu (örneğin kısırlık, üreme bariyerleri, melezleme zorlukları vs.) bitki türlerinde alternatif bir yöntem olabilir (Rai ve ark. 2011, Wijerathna-Yapa ve Hiti-Bandaralage 2023).

İn vitro seleksiyonun dezavantajları

- İn vitro koşulda elde edilen toleransın, saha (tarla / sera) koşullarında aynı şekilde devam edeceğinin garantisi yoktur bu nedenle mutlaka sonrasında saha testi gerekir.
- Kültür sırasında ortaya çıkan varyasyonlar her zaman istenen yönlü olmayabilir (somaklonal varyasyon bazen istenmeyen mutasyonlara yol açabilir).
- Tüm türlerde, kültür ve rejenerasyon başarı oranı yüksek değildir; bazı türlerde doku/organizasyon rejenerasyonu zor olabilir (Lestari 2006, Rai ve ark. 2011, Wijerathna-Yapa ve Hiti-Bandaralage 2023).

KAYNAKÇA

- Abdelwahab Elansary, D. W., Gürcan, K., Roumi, V., & Şimşek, Ö. (2024). Efficacy of Plant Tissue Culture Techniques for Eliminating Black Mulberry Idaeovirus (BMIV) from Infected Black Mulberry (*Morus nigra*). *Plants*, 13(21), 2959.
- Alavijeh, M. K., Bayat, H., Kianpour, D., Kalantari, S., & Zarei, A. (2025). Optimization of in vitro propagation and virus eradication using meristem culture and thermotherapy in two geranium species *Pelargonium X hortorum* ('Zonal') and *Pelargonium× domesticum* ('Regal'). *BMC Plant Biology*, 25(1), 9.
- Bairu, M. W., Aremu, A. O., & Van Staden, J. (2011). Somaclonal variation in plants: causes and detection methods. *Plant Growth Regulation*, 63(2), 147-173.
- Bajaj, Y. P. S. (1990). Cryopreservation of germplasm of vegetatively propagated crops. *Bulletin de la Société Botanique de France. Actualités Botaniques*, 137(3-4), 99-114.
- Benke, A. P., Krishna, R., Khandagale, K., Gawande, S., Shelke, P., Dukare, S., ... & Mahajan, V. (2023). Efficient elimination of viruses from garlic using a combination of shoot meristem culture, thermotherapy, and chemical treatment. *Pathogens*, 12(1), 129.
- Bettoni, J. C., Mathew, L., Pathirana, R., Wiedow, C., Hunter, D. A., McLachlan, A., ... & Nadarajan, J. (2022). Eradication of Potato Virus S, Potato Virus A, and Potato Virus M from infected in vitro-grown potato shoots using in vitro therapies. *Frontiers in plant science*, 13, 878733.
- Bhojwani, S. S., & Razdan, M. K. (1986). *Plant tissue culture: theory and practice* (Vol. 5). Elsevier.
- Bouharmont, J. (1994, February). Application of somaclonal variation and in vitro selection to plant improvement. In *Plant Breeding for Mankind-Symposium Agribex 94 355* (pp. 213-218).

- Braun, A. C. (1959). A demonstration of the recovery of the crown-gall tumor cell with the use of complex tumors of single-cell origin. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 45(7), 932-938.
- Cesar, S. A., & Kavas, M. (2024). Plant genome editing to achieve food and nutrient security. *BMC Methods*, 1(1), 3.
- Chen, K., Chen, J., Pi, X., Huang, L. J., & Li, N. (2023). Isolation, purification, and application of protoplasts and transient expression systems in plants. *International Journal of Molecular Sciences*, 24(23), 16892.
- Çimen, B., Yeşiloğlu, T., Yılmaz, B., İncesu, M., & Kaçar, Y. A. (2016). Bazı Turunçgil Anaçlarında Farklı Enzim ve Besin Ortamı Konsantrasyonlarının Yaprak Protoplast İzolasyonuna Etkileri. *Bahçe*, 45(Özel Sayı 1) 7. Ulusal Bahçe Bitkileri Kongresi), 881-886.
- Doyğacı, Y., Boztepe, Ö., Kandilli, G. G., & Atak, A. (2024). Embryo recovery (rescue) studies in different Vitis species. *BMC Plant Biology*, 24(1), 822.
- Dunwell, J. M. (2010). Haploids in flowering plants: origins and exploitation. *Plant biotechnology journal*, 8(4), 377-424.
- Elena, S. F., & Lenski, R. E. (2003). Evolution experiments with microorganisms: the dynamics and genetic bases of adaptation. *Nature Reviews Genetics*, 4(6), 457-469.
- Espinosa-Leal, C. A., Puente-Garza, C. A., & García-Lara, S. (2018). In vitro plant tissue culture: means for production of biological active compounds. *Planta*, 248(1), 1-18.
- Faccioli, G., & Marani, F. (1998). Virus elimination by meristem tip culture and tip micrografting. *Plant virus disease control*, 23(4), 346-358.
- George, E. F., Hall, M. A., & De Klerk, G. J. (2008). Plant propagation by tissue culture 3rd Edition. *The Netherlands, The Back Ground Springer*, 65-175.
- Germana, M. A. (2011). Anther culture for haploid and doubled haploid production. *Plant Cell, Tissue and Organ Culture (PCTOC)*, 104(3), 283-300.
- Gul, A., Shakoar, S., Nazik, N., Rao, A. Q., Mammadova, R., Dangol, S. D., & Bakhsh, A. (2025). Designer Crops Developed Against Insect Pests. *Custom-Designed Crop Breeding: Improved Traits*, 2, 689-708.

- Güler, E. (2024). Küresel iklim değişikliğinin üzüm yetiştiriciliğine etkilerine kapsamlı bir bakış. İçinde A. Yılmaz & H. Yılmaz (Ed.), Tarımsal verimliliği kısıtlayan sorunlarla mücadele yöntemleri 2 (s. 135-198). Adıyaman: İKSAD Publishing House.
- Güler, E., Karadeniz, T., Muradoğlu, F. (2023). Sert kabuklu meyvelerde verimliliği sınırlayan faktörler. İçinde A. Yılmaz & H. Yılmaz (Ed.), Tarımsal verimliliği kısıtlayan sorunlarla mücadele yöntemleri 1 (s. 93-165). Adıyaman: İKSAD Publishing House.
- Gürel, S., Gürel, E., & Kaya, Z. (2000). Doubled haploid plant production from unpollinated ovules of sugar beet (*Beta vulgaris* L.). *Plant Cell Reports*, 19(12), 1155-1159. <https://doi.org/10.1007/s002990000248>.
- Hu, H., & Yang, H. (1986). Haploids in plant breeding. In: Gupta, P. K. (Ed.), *Manipulation of Haploid Plants*.
- Hussey, G., & Stacey, N. J. (1981). In vitro propagation of potato (*Solanum tuberosum* L.). *Annals of Botany*, 48, 787-796.
- Kang, H. H., Naing, A. H., & Kim, C. K. (2020). Protoplast isolation and shoot regeneration from protoplast-derived callus of *Petunia hybrida* cv. Mirage rose. *Biology*, 9(8), 228.
- Kapoor, I., Chahal, G. K., Sharma, M., Ghai, N., & Dhatt, A. S. (2024). Barriers to Interspecific Hybridization Between *Cucurbita pepo* L. and *Cucurbita moschata* Duch. *Journal of Plant Growth Regulation*, 43(8), 2599-2614.
- Karakaş, İ. (2023). Bitkilerin Totipotensi Yeteneklerinin Bitki Islahında Kullanılması: Doku Kültürü Teknikleri. *Acta Natura & Scientia*, 4(2).
- Kurtar, E. S., Seymen, M., & Kal, Ü. (2020). An overview of doubled haploid plant production in *Cucurbita* species. *Yuzuncu Yıl University Journal of Agricultural Sciences*, 30(3), 510-520.
- Larkin, P. J., & Scowcroft, W. R. (1981). Somaclonal variation—a novel source of variability from cell cultures for plant improvement. *Theoretical and applied genetics*, 60(4), 197-214.

- Leaungthitikanachana, S., Thongdonyod, K., & Singphan, N. (2021). Effect of enzyme treatments on protoplast isolation from leaves of vetiver (*Vetiveria* spp.).
- Lestari, E. G. (2006). In vitro selection and somaclonal variation for biotic and abiotic stress tolerance. *Biodiversitas Journal of Biological Diversity*, 7(3).
- Li, X., Tesfaye, M., Guan, R., Sandgrind, S., & Zhu, L. H. (2025). Development of a highly efficient protoplast regeneration and transfection protocol for enhancing CRISPR genome editing of *Brassica carinata*. *Frontiers in Plant Science*, 16, 1604283.
- Liaqat, W., Barutçular, C., Farooq, M., Ahmad, H., Jan, M., Ahmad, Z., ... & Li, M. (2022). Climate change in relation to agriculture: A review. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 20(2).
- Liu, J., Zhang, R., Chai, N., Su, L., Zheng, Z., Liu, T., ... & Zhu, Q. (2025). Programmable genome engineering and gene modifications for plant biodesign. *Plant Communications*.
- Maluszynski, M. (Ed.). (2003). Doubled haploid production in crop plants: a manual. Springer Science & Business Media.
- Mehta, U. J. (2001). Tissue culture studies in tamarind (*Tamarindus indica* L.), a leguminous tree species.
- Mirzabaev, A., Kerr, R. B., Hasegawa, T., Pradhan, P., Wreford, A., von der Pahlen, M. C. T., & Gurney-Smith, H. (2023). Severe climate change risks to food security and nutrition. *Climate Risk Management*, 39, 100473.
- Morel G. 1964. Tissue culture — a new means of clonal propagation of orchids. *American Orchid Society Bulletin* 33:473-478.
- Morel, G. and Marthin, C. (1952) Guérison de Dahlias atteints d'une maladie à virus. *CR Hebd Séances Acad*, 253, 1324-1325.
- Mukundan, N. S., Satyamoorthy, K., & Babu, V. S. (2025). Advancing plant protoplasts: innovative techniques and future prospects. *Plant Biotechnology Reports*, 1-20.

- Onay, A., Piriç, V., Adıyaman, F., Işıkan, Ç., Tilkat, E., ve Başaran, D. (2003). In Vivo and in Vitro Micrografting of Pistachio, *Pistacia vera* L. cv. "Siirt". *Turkish Journal of Biology* 27 (2): 95-100.
- Oseni, O. M., Pande, V., & Nailwal, T. K. (2018). A review on plant tissue culture, a technique for propagation and conservation of endangered plant species. *International journal of current microbiology and applied sciences*, 7(7), 3778-3786.
- Ozoriofor, U. O. (2017). Protoplast fusion technology and its application in genetic improvement of plants: A review. *Int J Adv Biochem Res*, 1, 45-52.
- Panattoni, A., Luvisi, A., & Triolo, E. (2013). Elimination of viruses in plants: twenty years of progress. *Spanish journal of agricultural research*, 11(1), 173-188.
- Pawełkowicz, M. E., Skarzyńska, A., Mróz, T., Bystrzycki, E., & Plader, W. (2021). Molecular insight into somaclonal variation phenomena from transcriptome profiling of cucumber (*Cucumis sativus* L.) lines. *Plant Cell, Tissue and Organ Culture (PCTOC)*, 145(2), 239-259.
- Rai, 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. *Environmental and experimental botany*, 71(1), 89-98.
- Rao, S., & Sandhya, H. (2019). In vitro selection and genetic engineering for abiotic stress tolerant plants and underlying mechanism. *Metabolic Adaptations in Plants During Abiotic Stress*, CRC Press, Taylor & Francis Group, UK, 283-290.
- Rapp RA, Wendel JF. Epigenetics and plant evolution. *New Phytol* 168: 81-91.
- Saleem, A., Anwar, S., Nawaz, T., Fahad, S., Saud, S., Ur Rahman, T., ... & Nawaz, T. (2025). Securing a sustainable future: the climate change threat to agriculture, food security, and sustainable development goals. *Journal of Umm Al-Qura University for Applied Sciences*, 11(3), 595-611.
- Şekerli, M. (2024). Season, thermotherapy and surface sterilization play important roles in microbial contamination of hazelnut in vitro cultures. *Plant Cell, Tissue and Organ Culture (PCTOC)*, 157(3), 70.

- Skirvin, R. M., McPheeters, K. D., & Norton, M. (1994). Sources and frequency of somaclonal variation. *HortScience*, 29(11), 1232-1237.
- Styer, D. J., & Chin, C. K. (2010). *Meristem and shoot tip culture for propagation, pathogen elimination and germplasm preservation*. New Jersey. USA.
- Sütçü, Ş., & Sarıkamış, G. (2024). CRISPR/Cas9 Teknolojisinin Sebze Islahında Kullanımı. *Bahçe*, 53(Özel Sayı 1), 115-119.
- Touraev, A., Forster, B. P., & Jain, S. M. (Eds.). (2009). *Advances in haploid production in higher plants* (pp. 1-208). Berlin: Springer.
- Tütüncü, M., İzgü, T., Sevindik, B., & Mendi, Y. Y. (2017). In Vitro haploidy techniques in ornamental plants. *Tarım Bilimleri Araştırma Dergisi*, 10(1), 1-6.
- Villalobos-López, M. A., Arroyo-Becerra, A., Quintero-Jiménez, A., & Iturriaga, G. (2022). Biotechnological advances to improve abiotic stress tolerance in crops. *International Journal of Molecular Sciences*, 23(19), 12053.
- Wang, D., Yang, R., Liu, M., Li, H., Li, H., Yuan, W., & Zhang, H. (2025). Recent advances in innovative strategies for plant disease resistance breeding. *Frontiers in Plant Science*, 16, 1586375.
- Wang, Q., Cuellar, W. J., Rajamäki, M.-L., Hirata, Y., Cuellar, W., & Valkonen, J. (2008). Combined thermotherapy and cryotherapy for efficient virus eradication: relation of virus distribution, subcellular changes, cell survival and viral RNA degradation in shoot tips. *Molecular Plant Pathology*, 9(2), 237-250.
- Wang, S., Wang, L., Liu, Z., Xia, Y., Jing, D., Guo, Q., ... & He, Q. (2025). An Efficient System for Mesophyll Protoplast Isolation, Purification, and Transformation in Loquat: Studies on Fluorescent Marker Analysis and Subcellular Localization. *Horticulturae*, 11(4).
- Wijerathna-Yapa, A., & Hiti-Bandaralage, J. (2023). Tissue culture—A sustainable approach to explore plant stresses. *Life*, 13(3), 780.
- Xue, Y., Yan, J., Mohsin, M., & Mehak, A. (2025). Supply chain risks in agri-food systems: a comprehensive review of economic vulnerabilities and mitigation approaches. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 9, 1649834.

- Yuan, X., Li, S., Chen, J., Yu, H., Yang, T., Wang, C., ... & Ao, X. (2024). Impacts of global climate change on agricultural production: a comprehensive review. *Agronomy*, 14(7), 1360.
- Yüksel, E., Lahlali, R., Barış, A., Sameeullah, M., Ulaş, F., Koca, A. S., ... & Dababat, A. (2025). Entomopathogenic Nematodes and Bioactive Compounds of Their Bacterial Endosymbionts Act Synergistically in Combination with Spinosad to Kill *Phthorimaea operculella* (Zeller, 1873)(Lepidoptera: Gelechiidae), a Serious Threat to Food Security. *Microorganisms*, 13(10), 2368.

BÖLÜM 3

SEKONDER METABOLİTLERİN ARTIRILMASINDA BİYOTEKNOLOJİK YÖNDEN EPİGENETİK ve OMİK YAKLAŞIMLAR

Arş. Gör. Leyla KURGAN^{1*}

DOI: <https://www.doi.org/10.5281/zenodo.18082734>

^{1*} Iğdır Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Tarımsal Biyoteknoloji Bölümü, Iğdır, Türkiye.
leyla.kurgan@igdir.edu.tr

GİRİŞ

Bitkisel sekonder metabolitler, bitkilerin büyüme ve gelişmesi için doğrudan gerekli olmayan ancak çevresel adaptasyon ve savunmada kritik rol oynayan çeşitli kimyasal bileşiklerdir (Böttger ve ark., 2018). Alkaloidler, terpenoidler, fenolikler gibi başlıca sekonder metabolit sınıfları bitkilerde patojen ve zararlılara karşı savunma, ultraviyole ışığa karşı koruma, allelopati ve tozlaşma gibi süreçlerde işlev görmektedir (Gandhi ve ark., 2015; Verpoorte ve ark., 2002). Flavonoidler, yüksek şiddetli ışık altında bitki yapraklarında birikerek fotoprotektif (ışık koruyucu) etki gösterir ve reaktif oksijen türlerini temizleyerek antioksidan işlev görmektedir (Zhang ve ark., 2017). Bu gibi fonksiyonlar, sekonder metabolitlerin bitkisel stres koşullarında hayatta kalma ve uyum kabiliyetine katkı sağladığını ortaya koymaktadır (Guerriero ve ark., 2018). Bunun yanı sıra, birçok bitkisel sekonder metabolit tıbbi ve endüstriyel açıdan yüksek değere sahiptir; artemisinin, vinkristin, kafein ve lignanlar gibi bileşikler ilaç ve gıda alanında kullanılmaktadır (Gonçalves ve Romano, 2018). Bu nedenle, bitkilerden elde edilen sekonder metabolitlerin üretiminin artırılması hem temel bilimsel araştırmalar hem de uygulamalı biyoteknoloji açısından büyük önem taşımaktadır (Gunaseelan ve ark., 2025).

Doğal koşullarda bitkiler genellikle sekonder metabolitlerini düşük düzeylerde üretirler ve bu da bu bileşiklerin endüstriyel/terapötik kullanımı için bir kısıt oluşturmaktadır (Fazili ve ark., 2022). Geleneksel olarak, ticari üretim amacıyla sekonder metabolitler bitkilerin doğal popülasyonlarından ekstraksiyonla elde edilmektedir;

ancak bu yöntem hem düşük verimlidir hem de nadir veya yavaş büyüyen bitkilerin aşırı hasadı nedeniyle ekolojik riskler taşımaktadır (Shruti ve Bharadvaja, 2024; Guerriero ve ark., 2018). Modern biyoteknolojik yaklaşımlar, bitki hücre ve doku kültürü yöntemlerini kullanarak bu değerli metabolitlerin kontrollü ortamlarda üretilmesini mümkün kılmıştır (Murthy ve ark., 2014). Bitki hücre kültürleri (süspansiyon hücreleri) ve farklılaşmış doku/organ kültürleri (kallus, saçak kök/hairy root kültürleri) sayesinde, tarımsal alana bağlı olmaksızın iklimsel ve mevsimsel değişkenliklerden etkilenmeyen standart koşullarda üretim sağlanabilmektedir (Nielsen ve ark., 2019). Bu şekilde doğal bitki materyaline bağımlılık azaltılırken, nadir bileşiklere erişim ve üretimin standardizasyonu mümkün hale gelmektedir (Verpoorte ve ark., 2002; Gonçalves ve Romano, 2018).

Bununla birlikte, hücre/doku kültürlerinde istenen sekonder metabolitlerin verimi genellikle hala düşüktür ve büyük ölçekli üretimde ekonomik fizibilite sağlamak güç olabilmektedir (Kumari ve ark., 2022; Fazili ve ark., 2022). Literatürde kültür sistemlerinde 20-30 katına varan metabolit birikimi artışları rapor edilmesine rağmen, bu seviyeler çoğunlukla endüstriyel talebi karşılamaya yetmemektedir (Verpoorte ve ark., 2002). Verim düşüklüğü, kültürlerin genetik kararlılığı, ölçek büyütme (scale-up) zorlukları ve ürün saflaştırma maliyetleri, biyoteknolojik üretim süreçlerinin karşılaştığı temel engellerdir (Shruti ve Bharadvaja, 2024). Bu engelleri aşmak ve sekonder metabolit üretimini artırmak için son yıllarda çeşitli stratejiler geliştirilmiştir. Klasik yaklaşımlar arasında yüksek üretim

potansiyeline sahip hücre hatlarının seçimi (klonal seleksiyon veya mutajenez ile) ve kültür ortamının kimyasal bileşimi ile fizikokimyasal koşullarının optimize edilmesi (besin maddeleri, karbon kaynakları, hormonlar, ışık, sıcaklık, oksijen vb.) sayılabilir (Dörnenburg ve Knorr, 1995). Ayrıca elisitasyon (uyarı uygulamaları), öncü metabolit beslemesi (prekürsör madde ilavesi), ortam pH/ışık gibi koşulların ayarlanması ve hücre immobilizasyonu gibi teknikler de in vitro üretim verimini artırmada etkin bulunmuştur (Guerriero ve ark., 2018; Halder ve ark., 2019).

Günümüzde, geleneksel biyoteknolojik yöntemlerin ötesine geçilerek, bitkisel sekonder metabolit üretiminin artırılması için çok katmanlı omik yaklaşımlar ve epigenetik düzenlemeler de araştırmaların odağı haline gelmiştir (Vijay ve ark., 2023; Aehsas ve ark., 2025). Omik teknolojiler (genomik, transkriptomik, proteomik, metabolomik ve epigenomik), bitkilerde sekonder metabolit biyosentezinin genetik ve moleküler altyapısını kapsamlı biçimde anlamamızı sağlamaktadır (Borah ve ark., 2024). Fitokimyasal genomik olarak adlandırılan yeni bir disiplin, farklı omik verilerin entegre analiziyle bitkisel metabolit çeşitliliğinin ardındaki genetik düzenleyici mekanizmaları ortaya çıkarmayı ve bu bilgiyi biyoteknolojik uygulamalara aktarmayı hedeflemektedir (Vijay ve ark., 2023; Manchalkar ve Patil, 2025). Bu bütüncül bakış açısı sayesinde, sekonder metabolit üretimindeki kısıtlayıcı adımlar belirlenebilir ve hedef genler ya da enzimler saptanarak genetik mühendislik veya CRISPR/Cas9 gibi tekniklerle modifiye edilebilmektedir (Borah ve ark., 2024). Ayrıca son yıllarda

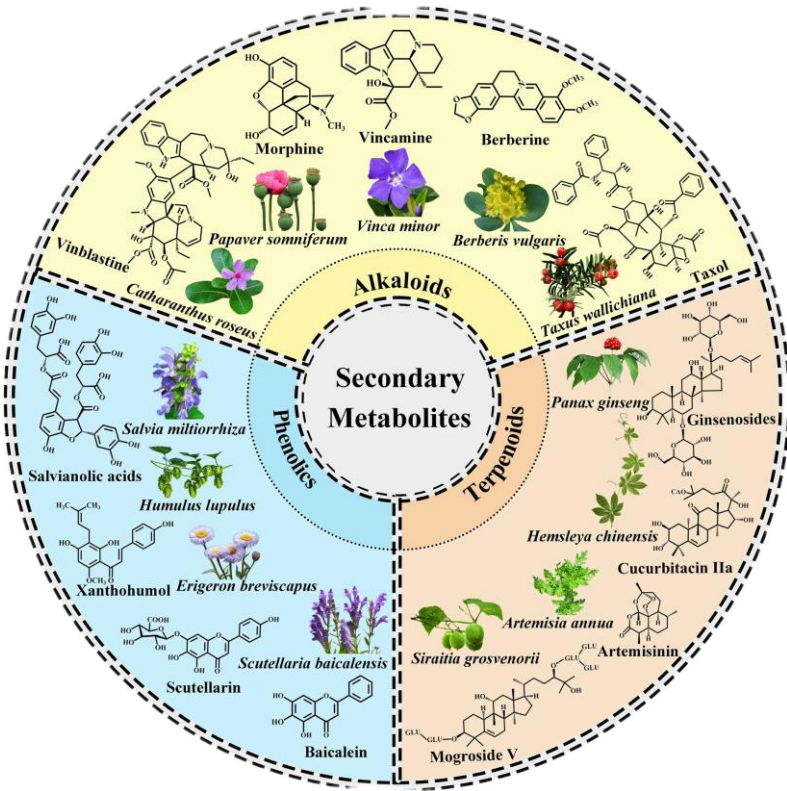
epigenetik düzenleyici mekanizmaların (DNA metilasyonu, histon modifikasyonları ve küçük RNA'lar gibi) da sekonder metabolit gen ifadelerini etkileyebildiği ortaya konmuştur (Fabiani ve ark., 2021). Bu durum, sadece klasik gen ifade düzenlenmesinin değil, aynı zamanda kromatin yapısı ve epigenetik kodların da metabolit üretiminde rol oynadığına işaret etmektedir. Nitekim, kromatin üzerinde biriken epigenetik işaretler, ilgili biyosentetik gen kümelerinin aktif ya da sessiz durumda olmasını belirleyebilir; histon proteinlerinin asetilasyon düzeylerinin artması genlerin aktif hale gelmesiyle ilişkiliyken, histon deasetilaz enzimlerinin aktif olduğu heterokromatin durumunda genler baskılanabilmektedir (Dorna ve ark., 2025). Sekonder metabolitlerin verimi için biyoteknoloji alanında; hücre ve doku kültürü tekniklerinin sağlam altyapısı üzerine, epigenetik ve omik verilerin bütünleştirildiği yenilikçi stratejiler inşa edilmektedir (Shruti ve Bharadvaja, 2024).

Bu bölümün amacı, bitkisel sekonder metabolitlerin biyosentezinin epigenetik ve çok katmanlı omik düzenleyicilerini bütüncül bir bakış açısıyla ele alarak, özellikle hücre ve doku kültürü tabanlı biyoteknolojik üretim sistemlerinde metabolit verimliliğini artırmaya yönelik güncel stratejileri, mekanizmaları ve araştırma eğilimlerini kapsamlı biçimde değerlendirmektir.

1. BİTKİSEL SEKONDER METABOLİTLERİN BİYOSENTEZİ VE FONKSİYONLARI

Bitkisel sekonder metabolitler, biyosentetik olarak primer metabolizmanın ürünlerinden türeyen ve bitkilerde çevresel streslere

karşı savunma, hayvanları cezbetme ya da uzaklaştırma, rekabet, adaptasyon ve mikrobiyal saldırılara direnç gibi çok çeşitli işlevleri bulunan karmaşık moleküllerdir (Böttger ve ark., 2018). Bu bileşikler, başlıca üç ana sınıfta toplanabilir: alkaloidler, terpenoidler ve fenolikler (Şekil 1) (Verpoorte ve ark., 2002). Her bir sınıf, farklı biyosentetik yollarla aracılığıyla sentezlenmekte olup bitkinin yaşamsal olmayan ancak adaptif fonksiyonları için hayati rol oynamaktadır (Eljounaidi ve Lichman, 2020).



Şekil 1. Tıbbi bitkiler tarafından üretilen sekonder metabolitlerin kimyasal yapı örnekleri (Zhao ve ark., 2023).

Alkaloitler, genellikle azot içeren ve toksik etki gösteren bileşiklerdir; patojen ve otçullara karşı bitki savunmasında güçlü bir rol oynamaktadır. Terpenoidler, izopren ünitesi temelinde oluşan bileşikler olup, uçucu yağlar, karotenoidler ve bitkisel reçineler gibi maddeleri içerir ve hem savunma hem de çevresel sinyallere cevap mekanizmalarında görev almaktadır. Fenolikler ise, özellikle ultraviyole (UV) ışınlarına karşı koruma, antioksidan savunma ve patojen saldırılarına karşı antimikrobiyal etki açısından öne çıkmaktadır (Tiwari ve Rana, 2015).

Flavonoidler, fenolik yapılı sekonder metabolitler arasında en çok çalışılan gruplardan biridir ve bitkilerde özellikle ışık stresi gibi abiyotik faktörlere karşı koruyucu etki göstermektedir (Zhang ve ark., 2017).

Sekonder metabolitlerin üretimi, bitkisel organizmanın gelişim evresi, doku tipi, çevresel koşullar ve stres faktörleri gibi parametrelere göre değişiklik göstermektedir (Song ve ark., 2014). Örneğin, soya bitkisinde yapılan metabolomik analizlerde, flavonoid profillerinin bitkinin gelişim evresine göre farklılaştığı ve bazı flavonoid bileşiklerinin özellikle çiçeklenme ve tohum olgunlaşması dönemlerinde maksimum düzeye ulaştığı bildirilmiştir (Song ve ark., 2014).

Bitkisel sekonder metabolitlerin çoğu, savunma genleri, transkripsiyon faktörleri, miRNA'lar ve epigenetik modifikasyonlarla kontrol edilen genetik düzenlemeler aracılığıyla sentezlenmektedir (Vijay ve ark.,

2023). Son yıllarda yapılan entegre transkriptomik ve metabolomik çalışmalar, örneğin flavonoid biyosentezine ait CHS, CHI, FLS, DFR gibi genlerin ekspresyon düzeyleriyle spesifik flavonoid birikimi arasında güçlü korelasyonlar bulunduğunu ortaya koymuştur (Jiang ve ark., 2020). Bu durum, sekonder metabolitlerin yalnızca kimyasal ürünler olmadığını, aynı zamanda genetik programlamanın bir çıktısı olduğunu göstermektedir.

Ayrıca, bitkilerde sekonder metabolitler yalnızca savunma değil; insan sağlığı açısından da yüksek değerli bileşiklerdir. Antioksidan, antiinflamatuvar, antikanser, antimikrobiyal ve antidiabetik etkileri nedeniyle bu bileşikler gıda, ilaç ve kozmetik endüstrisinde yaygın olarak kullanılmaktadır (Kumar ve ark., 2018; Gunaseelan ve ark., 2025).

Tüm bu işlevler, bitkisel sekonder metabolitlerin yalnızca ekolojik adaptasyon değil, aynı zamanda insan sağlığı ve biyoteknoloji uygulamaları açısından da kritik öneme sahip olduğunu göstermektedir. Bu nedenle hem üretim düzeyinde artış sağlamak hem de bu bileşiklerin biyosentetik yollarını moleküler düzeyde anlamak, bitki biyoteknolojisinin temel hedeflerinden biri haline gelmiştir.

2. BİTKİ HÜCRE VE DOKU KÜLTÜRLERİNDE SEKONDER METABOLİT ÜRETİMİ

Bitki hücre ve doku kültürü sistemleri, sekonder metabolitlerin *in vitro* koşullarda üretimini sağlayan kontrollü ve sürdürülebilir biyoteknolojik platformlar sunmaktadır (Fazili ve ark., 2022). Bu sistemler sayesinde

bitkisel kaynaklı yüksek değerli bileşiklerin tarımsal alana, iklimsel koşullara ya da mevsimsel döngülere bağlı olmadan üretilebilmesi mümkün hale gelmiştir (Murthy ve ark., 2014). Ayrıca doğal popülasyonların korunması, ender bitki türlerinin hasat edilmeden değerlendirilmesi ve ürün standardizasyonu gibi ekolojik ve ekonomik avantajlar da sağlamaktadır (Gonçalves ve Romano, 2018).

Bitki biyoteknolojisinde sekonder metabolit üretimi için kullanılan temel sistemler arasında süspansiyon hücre kültürleri, kallus kültürleri, organ kültürleri (yaprak, kök, gövde) ve hairy root (saçak kök) kültürleri yer almaktadır (Shruti ve Bharadvaja, 2024). Bu sistemlerde üretimi artırmak için çeşitli stratejiler uygulanmaktadır: elisitör uygulamaları, öncü metabolit beslemesi, ortam koşullarının (pH, ışık, sıcaklık) optimizasyonu, hücre immobilizasyonu ve permeabilizasyon teknikleri gibi biyoproses yaklaşımları metabolit birikimini anlamlı düzeyde artırabilmektedir (Guerriero ve ark., 2018; Halder ve ark., 2019).

Saçak kök kültürleri, özellikle *Agrobacterium rhizogenes* aracılığıyla elde edilen transformasyonla oluşturulur ve sekonder metabolit üretimi için genetik ve biyokimyasal olarak oldukça stabil sistemler sunmaktadır (Halder ve ark., 2019). Bu kültürler, hızlı büyüme, hormon gereksiniminin olmaması ve yüksek metabolit sentez kapasitesi gibi avantajlar taşımaktadır. Birçok aromatik bitkide saçak kök kültürlerinde elisitör uygulamalarıyla lignanlar, alkaloidler ve flavonoidler gibi bileşiklerin üretiminde kayda değer artışlar elde edilmiştir (Gandhi ve ark., 2015).

Bitki hücre kültürleri aynı zamanda metabolit çeşitliliğini araştırmak, yolak analizleri yapmak ve gen ekspresyon düzeylerini test etmek için de ideal deneysel sistemlerdir. Özellikle metabolomik analizlerin bu kültür sistemlerinde uygulanması, spesifik metabolitlerin üretim desenlerinin anlaşılmasına ve üretimi kısıtlayan adımların belirlenmesine olanak tanımaktadır (Kumar ve ark., 2018; Nielsen ve ark., 2019). Bu sayede, kültür ortamında optimize edilen koşullarla birlikte, genetik mühendislik veya omik temelli müdahalelerin yönlendirici etkisi değerlendirilebilir (Borah ve ark., 2024).

Ancak bu sistemlerin yaygınlaşmasının önündeki başlıca engeller arasında verim düşüklüğü, kültür stabilitesi, büyüme hızı farklılıkları, ölçekleme (scale-up) zorlukları ve ürün saflaştırma maliyetleri yer almaktadır (Dörnenburg ve Knorr, 1995; Fazili ve ark., 2022). Bu nedenle son yıllarda, klasik kültür tekniklerine ek olarak çok katmanlı omik verilerin kullanımıyla metabolit üretiminin optimize edilmesi yönünde çalışmalar artmıştır (Aehsas ve ark., 2025). Genomik, transkriptomik ve metabolomik analizlerin birlikte değerlendirilmesi sayesinde, metabolit biyosentezinde rol alan genler belirlenebilmekte ve bu genlerin ekspresyonu kültür sistemlerinde izlenebilmektedir (Jiang ve ark., 2020).

Ek olarak, CRISPR/Cas9 gibi gen düzenleme teknolojilerinin kültür sistemlerine entegre edilmesiyle metabolit biyosentez yollarının daha etkin yönetimi hedeflenmektedir (Borah ve ark., 2024). Bu strateji, hem hedef metabolitlerin üretim düzeyini artırmakta hem de yan yollardan

kaynaklı istenmeyen metabolit oluşumunu sınırlandırarak verimliliği maksimize etmektedir.

3. EPİGENETİK DÜZENLEMELERİN SEKONDER METABOLİT ÜRETİMİNE ETKİSİ

Epigenetik düzenlemeler, DNA dizisi değişmeden gen ekspresyonunun kontrol edilmesini sağlayan moleküler mekanizmalardır ve bitkisel sekonder metabolitlerin biyosentezinde rol alan genlerin aktivitesini doğrudan ya da dolaylı olarak etkileyebilmektedir. DNA metilasyonu, histon modifikasyonları ve küçük RNA'lar epigenetik düzenlemenin başlıca unsurlarıdır (Anderson ve ark., 2012).

Bitkilerde epigenetik mekanizmaların sekonder metabolit üretimiyle ilişkisi henüz tam olarak çözülmemiş olmakla birlikte, son yıllarda yapılan çalışmalarda kromatin yapısının, transkripsiyonel aktivite üzerindeki etkileri ortaya konmuştur (Vijay ve ark., 2023). Histon proteinlerinin asetillenmesi genlerin aktif hale gelmesini kolaylaştırırken, histon deasetilasyonu ve DNA hipermetilasyonu gen baskılanmasıyla ilişkilidir (Číž ve ark., 2020). Bu durum, sekonder metabolit biyosentezinden sorumlu gen kümelerinin kromatin durumuna bağlı olarak sessiz ya da aktif konuma geçebileceğini göstermektedir (Lorente-Cebrián ve ark., 2025).

Epigenetik kontrolün özellikle stres yanıtları sırasında aktive olduğu bilinmektedir. Bitkiler, abiyotik stres koşullarında (tuzluluk, ışık stresi, sıcaklık vs.) sekonder metabolit üretimini artırarak savunma sistemlerini güçlendirmekte, bu sırada epigenetik işaretlerin yeniden

programlandığı gözlemlenmektedir (Borah ve ark., 2024). Ek olarak, miRNA'lar gibi küçük RNA'lar da epigenetik sessizleştirme mekanizmalarında etkilidir. miRNA'lar genellikle biyosentetik yolaklardaki kritik transkripsiyon faktörlerini hedef alarak gen ekspresyonunu baskılar ve bu yolla metabolit üretimini dolaylı olarak etkilemektedir (Vijay ve ark., 2023).

Epigenetik düzenleme aynı zamanda metabolik çeşitliliğin evrimsel açıklamasında da önemli bir rol oynar. Bazı bitkilerde nadir veya lokalize sekonder metabolitlerin yalnızca belirli dokularda veya gelişim evrelerinde üretilmesi, epigenetik sessizleşme veya aktivasyon olaylarıyla açıklanabilmektedir (Gandhi ve ark., 2015; Zhang ve ark., 2017). Özellikle flavonoid, terpenoid ve alkaloid üretiminden sorumlu gen kümelerinin dokuya özel ekspresyon paternlerinin, epigenetik işaretlerle korele olduğu düşünülmektedir (Jiang ve ark., 2020).

Yüksek değerli metabolitlerin üretimini artırmak amacıyla epigenetik mekanizmaların yapay olarak yönlendirilmesi, yeni bir biyoteknolojik strateji olarak değerlendirilmektedir (Dorna ve ark., 2025). Özellikle HDAC (histon deasetilaz) ve HMT (histon metiltransferaz) enzimlerinin inhibitörlerinin kültür ortamına uygulanmasıyla, bazı sekonder metabolitlerin üretiminin artırıldığı bildirilmiştir (Fabiani ve ark., 2021). Bu tür epigenetik modifikasyonlar, hairy root veya hücre kültürü sistemlerinde hedef gen kümelerinin aktivasyonunu sağlayarak biyosentetik verimi artırabilmektedir (Halder ve ark., 2019).

Ancak, epigenetik manipölasyonların hedef özgülüğü ve kalıcılığı hala tartışmalıdır. Özellikle gen ekspresyonundaki değişimlerin geçici mi yoksa kalıcı mı olduğu, farklı bitki türlerinde ve dokularında farklılık gösterebilmektedir (Miryeganeh ve Armitage, 2025). Bununla birlikte, genom çapında epigenomik haritalama teknikleri sayesinde biyosentetik yolların epigenetik profilleri belirlenmekte ve bu bilgilerle metabolit üretimi arasındaki ilişkiler daha net ortaya konmaktadır (Manchalkar ve Patil, 2025).

Epigenetik düzenleme mekanizmaları, sekonder metabolit üretiminin genetik kontrolüne ek bir düzenleyici katman sağlayarak, özellikle çevresel stres faktörlerine bağlı olarak metabolit sentezinin dinamik biçimde yönetilmesine olanak tanımaktadır. Bu durum hem metabolit verimliliğini artırmak hem de metabolit çeşitliliğini yönlendirmek açısından umut verici bir strateji olarak görülmektedir.

4. OMİK YAKLAŞIMLARIN ENTEGRASYONU: GENOMİK, TRANSKRIPTOMİK, METABOLOMİK VE EPİGENOMİK KATMANLAR

Sekonder metabolitlerin biyosentezi, bitki genomunda kodlanan çok sayıda genin, çeşitli transkripsiyonel, post-transkripsiyonel ve metabolik düzeylerde koordinasyonunu gerektirmektedir. Bu karmaşık sistemin anlaşılmasında omik yaklaşımlar; yani genomik, transkriptomik, proteomik, metabolomik ve epigenomik katmanların birlikte değerlendirilmesi vazgeçilmez hale gelmiştir (Vijay ve ark., 2023). Bu çok katmanlı sistem biyolojisi yaklaşımı, yalnızca genetik bilgiyi değil, aynı zamanda gen ekspresyonu, enzim düzeyleri,

metabolit profilleri ve kromatin durumu gibi dinamik süreçleri de içermektedir (Aehsas ve ark., 2025).

Genomik analizler, sekonder metabolit biyosenteziyle ilişkili gen kümelerinin tanımlanmasında kritik rol oynayabilmektedir. Yeni nesil dizileme teknolojileri sayesinde, metabolit üretimiyle bağlantılı gen ailelerinin (CHS, CHI, FLS) genişlemeleri, varyasyonları ve evrimsel geçmişleri ortaya konabilmektedir (Jiang ve ark., 2020). Ayrıca biyosentez yollarına ilişkin “gene cluster mining” ve filogenetik analizlerle yeni aday genlerin belirlenmesi mümkün hale gelmiştir (Eljounaidi ve Lichman, 2020).

Transkriptomik düzeyde, sekonder metabolit sentezinde görev alan genlerin çevresel koşullara veya gelişim evresine bağlı olarak nasıl regüle edildiği detaylı şekilde ortaya konmaktadır. RNA-seq tabanlı analizlerle farklı ifade edilen genler (DEG’ler) belirlenmekte; bu sayede flavonoid, alkaloid, terpenoid gibi bileşiklerin üretimini yönlendiren transkripsiyon faktörleri ve enzim kodlayan genler karakterize edilmektedir (Liu ve ark., 2025). Örneğin *Perilla frutescens* bitkisinde yapılan analizlerde 223 flavonoid metaboliti ile 9.277 farklı ekspresyon gösteren gen arasındaki bağlantılar haritalanmıştır (Jiang ve ark., 2020).

Metabolomik analizler, hücredeki metabolit seviyelerini kantitatif ve niteliksel olarak inceleyerek biyosentez yollarının son ürünlerini ortaya koyabilmektedir. Bu analizlerde genellikle LC-MS, GC-MS ve NMR gibi ileri düzey teknikler kullanılabilmektedir (Kumar ve ark.,

2018). *Carthamus tinctorius*'ta MeJA uygulaması sonrası metabolomik taramalarda 209 flavonoid metaboliti belirlenmiş ve bunlardan 35'inin anlamlı değişim gösterdiği saptanmıştır (Chen ve ark., 2020).

Epigenomik analizler, DNA metilasyonu, histon modifikasyonları ve kromatin yeniden yapılanması gibi faktörlerin sekonder metabolit biyosentezine etkisini ortaya koyabilmektedir (Fabiani ve ark., 2021; Dorna ve ark., 2025).

Son yıllarda bu katmanların entegrasyonu ile geliştirilen “phytochemical genomics” yaklaşımı, sekonder metabolit üretiminin arkasındaki genetik, moleküler ve çevresel belirleyicileri bütüncül biçimde analiz etmeyi hedeflemektedir (Vijay ve ark., 2023). Bu kapsamda, bitkisel hücre fabrikalarının geliştirilmesi için genetik mühendislik, CRISPR/Cas9, RNAi ve transgenik uygulamalarla birlikte omik verilerin entegrasyonu ön plana çıkmaktadır (Borah ve ark., 2024).

Ayrıca “multi-omics data integration”, “metabolite-transcript correlation networks”, “machine learning tabanlı hedef tahminleme” gibi ileri düzey veri işleme yaklaşımları, biyosentetik yolak optimizasyonunda yeni bir çıkış açmıştır (Manchalkar ve Patil, 2025). Örneğin bazı çalışmalarda belirli flavonoidlerin birikimi ile ekspresyonu yüksek gen kümeleri arasında korelasyon kurularak genetik müdahale hedefleri netleştirilmektedir (Liu ve ark., 2025; Jiang ve ark., 2020).

5. ABİYOTİK UYARICILARIN EPİGENETİK VE OMİK TEPKİLERE ETKİSİ

Bitkiler doğal ortamlarında sıcaklık değişimleri, UV ışınımı, tuzluluk, kuraklık, ağır metaller ve oksidatif stres gibi pek çok abiyotik stres faktörüyle karşı karşıya kalılabilmektedir (Yang ve ark., 2024; Nehra ve ark., 2024). Bu çevresel stresler yalnızca bitki büyüme ve gelişimini değil, aynı zamanda sekonder metabolit sentezi ve birikimini düzenleyebilmektedir (Rabeh ve ark. 2025; Khan, 2025). Stres koşullarına maruz kalan bitkiler, savunma ve adaptasyon mekanizmalarının bir parçası olarak sıklıkla flavonoid, fenolik bileşikler, alkaloidler ve terpenoidler gibi metabolitleri sentezlemeyi artırabilmektedir (Khan ve ark., 2025). Bu tepkiler hem genetik hem de epigenetik düzeyde düzenlenmektedir (He ve ark. 2023; Rabeh ve ark. 2025).

Metabolomik çalışmalar, abiyotik streslere yanıt olarak biriken spesifik metabolitleri tanımlamada önemli katkılar sağlamıştır. Örneğin *Carthamus tinctorius*'ta MeJA elisitasyonu sonrası yapılan metabolomik analizlerde, flavonoid profillerinde anlamlı farklılıklar gözlenmiş; bu farklılıklar RNA-seq verileriyle kıyas edilerek biyosentez yollarının transkripsiyonel düzenlenmesi doğrulanmıştır (Chen ve ark., 2020). Benzer şekilde, *Perilla frutescens* bitkisinde yapılan bir çalışmada flavonoidler ile ilgili transkripsiyon faktörlerinin stres koşullarında farklılaştığı gösterilmiştir (Jiang ve ark., 2020).

Epigenetik tepkiler, abiyotik streslere karşı genetikten bağımsız hızlı yanıt sistemleri sağlayarak sekonder metabolit gen kümelerinin aktif ya

da sessiz hale gelmesini düzenlemektedir (Abdulraheem ve ark., 2024). Stres altındaki bitkilerde epigenetik işaretlerin yeniden programlanması, ilgili metabolit üretiminin dinamik olarak kontrol edilmesini sağlamaktadır (Borah ve ark., 2024). Ayrıca bazı epigenetik değişikliklerin kalıtılabilir olması, bitkilerin sonraki nesillerde de strese hazırlanmış şekilde bulunmasına katkı sunmaktadır (Bashir ve Setyawati, 2025).

SONUÇ

Abiyotik uyarıların sekonder metabolit üretimi üzerindeki etkisinin epigenetik ve omik düzeyde anlaşılması, sadece bitki stres biyolojisi açısından değil, aynı zamanda biyoteknolojik üretim sistemlerinin optimizasyonu bakımından da büyük önem taşımaktadır. Omik verilerle desteklenen epigenetik analizler sayesinde, stres altındaki bitkilerde hangi genlerin, hangi koşullarda, hangi epigenetik işaretlerle aktive edildiği belirlenebilmekte; bu bilgi hücre kültürlerinde hedeflenmiş elisitör uygulamalarıyla sekonder metabolit üretiminin yönlendirilmesine olanak sağlamaktadır. Gelecekte bu bütüncül anlayışın CRISPR tabanlı epigenetik modifikasyonlarla entegre edilmesiyle, kontrollü ve yüksek verimli metabolit üretim sistemlerinin geliştirilmesi mümkün olabilir.

KAYNAKÇA

- Abdulraheem, M. I., Xiong, Y., Moshood, A. Y., Cadenas-Pliego, G., Zhang, H., & Hu, J. (2024). Mechanisms of plant epigenetic regulation in response to plant stress: recent discoveries and implications. *Plants*, 13(2), 163.
- Aehsas, S., Banerjee, S., Sahoo, J. P., Pradhan, M., Mahapatra, M., ve Nayak, P. (2025). Integration of omics and high-throughput technologies for enhancing plant secondary metabolites: A Comprehensive Overview. In *Biotechnology, Multiple Omics, and Precision Breeding in Medicinal Plants* (pp. 248-257).
- Anderson, O.S., Sant, K.E., & Dolinoy, D.C. (2012). Nutrition and epigenetics: An interplay of dietary methyl donors, one-carbon metabolism and DNA methylation. *J. Nutr. Biochem*, 23, 853–859.
- Bashir, H., & Setyawati, A. (2025). Decoding the mechanisms of plant epigenetic adaptations to stress. *Reviews in Agricultural Science*, 13(2), 1-19.
- Borah, A., Singh, S., Chattopadhyay, R., Kaur, J., & Bari, V. K. (2024). Integration of CRISPR/Cas9 with multi-omics technologies to engineer secondary metabolite productions in medicinal plant: Challenges and prospects. *Functional & Integrative Genomics*, 24(6), 207.
- Böttger, A., Vothknecht, U., Bolle, C., & Wolf, A. (2018). Plant secondary metabolites and their general function in plants. In *Lessons on Caffeine, Cannabis & Co: Plant-derived drugs and their interaction with human receptors* (pp. 3-17). Cham: Springer International Publishing.
- Chen, J., Wang, J., Wang, R., Xian, B., Ren, C., Liu, Q., Wu, Q., & Pei, J. (2020). Integrated metabolomics and transcriptome analysis on flavonoid biosynthesis in safflower (*Carthamus tinctorius* L.) under MeJA treatment. *BMC Plant Biology*, 20(1), 353.
- Číž, M., Dvořáková, A., Skočková, V., & Kubala, L. (2020). The role of dietary phenolic compounds in epigenetic modulation involved in inflammatory processes. *Antioxidants*, 9(8), 691.

- Dorna, D., Grabowska, A., & Paluszczak, J. (2025). Natural products modulating epigenetic mechanisms by affecting histone methylation/demethylation: Targeting cancer cells. *British Journal of Pharmacology*, 182(10), 2137-2158.
- Dörnenburg, H., & Knorr, D. (1995). Strategies for the improvement of secondary metabolite production in plant cell cultures. *Enzyme and Microbial Technology*, 17(8), 674-684.
- Eljounaidi, K., & Lichman, B. R. (2020). Nature's chemists: the discovery and engineering of phytochemical biosynthesis. *Frontiers in Chemistry*, 8, 596479.
- Fabiani, R., Vella, N., & Rosignoli, P. (2021). Epigenetic modifications induced by olive oil and its phenolic compounds: A systematic review. *Molecules*, 26(2), 273.
- Fazili, M. A., Bashir, I., Ahmad, M., Yaqoob, U., & Geelani, S. N. (2022). In vitro strategies for the enhancement of secondary metabolite production in plants: A review. *Bulletin of the National Research Centre*, 46(1), 35.
- Gandhi, S. G., Mahajan, V., & Bedi, Y. S. (2015). Changing trends in biotechnology of secondary metabolism in medicinal and aromatic plants. *Planta*, 241(2), 303-317.
- Gonçalves, S., & Romano, A. (2018). Production of plant secondary metabolites by using biotechnological tools. In *Secondary Metabolites – Sources and Applications* (Vol. 5, pp. 81-99).
- Guerriero, G., Berni, R., Muñoz-Sanchez, J. A., Apone, F., Abdel-Salam, E. M., Qahtan, A. A., Alatar, A. A., Cantini, C., Cai, G., Hausman, J., Siddiqui, K. S., Hernández-Sotomayor, S. M. T., & Faisal, M. (2018). Production of plant secondary metabolites: Examples, tips, and suggestions for biotechnologists. *Genes*, 9(6), 309.
- Gunaseelan, R. J., Raj, A., Nagarajan, P., Perumal, S., Kumar, J., & Patil, S. J. (2025). Biotechnological phytochemical synthesis: Innovations, challenges, advantages, implications. In *Biotechnology and Phytochemical Prospects in Drug Discovery* (pp. 83-101). Singapore: Springer Nature Singapore.

- Halder, M., Sarkar, S., & Jha, S. (2019). Elicitation: A biotechnological tool for enhanced production of secondary metabolites in hairy root cultures. *Engineering in Life Sciences*, 19(12), 880-895.
- He, J., Yao, L., Pecoraro, L., Liu, C., Wang, J., Huang, L., & Gao, W. (2023). Cold stress regulates accumulation of flavonoids and terpenoids in plants by phytohormone, transcription process, functional enzyme, and epigenetics. *Critical reviews in biotechnology*, 43(5), 680-697.
- Jiang, T., Guo, K., Liu, L., Tian, W., Xie, X., Wen, S., & Wen, C. (2020). Integrated transcriptomic and metabolomic data reveal the flavonoid biosynthesis metabolic pathway in *Perilla frutescens* (L.) leaves. *Scientific Reports*, 10(1), 16207.
- Khan, A., Kanwal, F., Ullah, S., Fahad, M., Tariq, L., Altaf, M. T., Riaz, A., & Zhang, G. (2025). Plant secondary metabolites—Central regulators against abiotic and biotic stresses. *Metabolites*, 15(4), 276.
- Khan, N. (2025). Exploring plant resilience through secondary metabolite profiling: Advances in stress response and crop improvement. *Plant, Cell & Environment*, 48(7), 4823-4837.
- Kumar, A., Mosa, K. A., Ji, L., Kage, U., Dhokane, D., Karre, S., Madalageri, D., & Pathania, N. (2018). Metabolomics-assisted biotechnological interventions for developing plant-based functional foods and nutraceuticals. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 58(11), 1791-1807.
- Kumari, K., Kumar, S., Jha, A. K., & Kumar, N. (2022). Biotechnological intervention in genetic improvement and regulation of secondary metabolites production in *Ocimum sanctum* L. *Industrial Crops and Products*, 187, 115329.
- Liu, X., Ma, H., Liu, X., Wang, X., Chen, Z., Yang, J., Luo, W., Li, Q., Yang, F., & Li, F. (2025). Transcriptomic and metabolomic analyses provide insights into the flavonoid biosynthesis in Dangshen. *Phytochemical Analysis*, 36(4), 1063-1078.
- Lorente-Cebrián, S., Costa, A. G., Castillo-Rivas, J. A., Castro, M., Arbonés-Mainar, J. M., Goñi, S., Remón, S., Aranaz, P., López, V., Martín-Burriel, I., & Milagro, F. I. (2025). Phenolic compounds and epigenetic mechanisms

- regulating gene expression: effects on human health. *Journal of Physiology and Biochemistry*, 1-18.
- Manchalkar, M., & Patil, C. C. (2025). Computational approaches to phytochemical drug discovery: Bridging plant genomics and pharmaceutical chemistry. *Botanical Insights: From Traditional Knowledge to Modern Science*, 19.
- Miryeganeh, M., & Armitage, D. W. (2025). Epigenetic responses of trees to environmental stress in the context of climate change. *Biological Reviews*, 100(1), 131-148.
- Murthy, H. N., Lee, E. J., & Paek, K. Y. (2014). Production of secondary metabolites from cell and organ cultures: strategies and approaches for biomass improvement and metabolite accumulation. *Plant Cell, Tissue and Organ Culture*, 118(1), 1-16.
- Nehra, A., Kalwan, G., Gill, R., Nehra, K., Agarwala, N., Jain, P. K., Naeem, M., Tuteja, N., Pudake, R.N., & Gill, S. S. (2024). Status of impact of abiotic stresses on global agriculture. In *Nanotechnology for Abiotic Stress Tolerance and Management in Crop Plants* (pp. 1-21). Academic Press.
- Nielsen, E., Temporiti, M. E. E., & Cella, R. (2019). Improvement of phytochemical production by plant cells and organ culture and by genetic engineering. *Plant Cell Reports*, 38(10), 1199-1215.
- Rabeh, K., Hnini, M., & Oubohssaine, M. (2025). A comprehensive review of transcription factor-mediated regulation of secondary metabolites in plants under environmental stress. *Stress Biology*, 5(1), 15.
- Shruti, & Bharadvaja, N. (2024). Biotechnology based strategies for secondary metabolites enhancement: A review. *Vegetos*, 37(4), 1211-1220.
- Song, H. H., Ryu, H. W., Lee, K. J., Jeong, I. Y., Kim, D. S., & Oh, S. R. (2014). Metabolomics investigation of flavonoid synthesis in soybean leaves depending on the growth stage. *Metabolomics*, 10(5), 833-841.
- Tiwari, R., & Rana, C. S. (2015). Plant secondary metabolites: a review. *International Journal of Engineering Research and General Science*, 3(5), 661-670.
- Verpoorte, R., Contin, A., & Memelink, J. (2002). Biotechnology for the production of plant secondary metabolites. *Phytochemistry Reviews*, 1(1), 13-25.

- Vijay, A., Kumar, A., Radhakrishnan, A. M., Kumar, S., Singh, K., Ramchiary, N., & Swamy, M. K. (2023). Emergence of phytochemical genomics: integration of multi-omics approaches for understanding genomic basis of phytochemicals. *In Phytochemical Genomics: Plant Metabolomics and Medicinal Plant Genomics* (pp. 219-261). Singapore: Springer Nature Singapore.
- Yang, Y., Tilman, D., Jin, Z., Smith, P., Barrett, C. B., Zhu, Y. G., Burney, J., D'odorico, P., Fantke, P., Fargione, J., Finlay, C., Rulli, M.C., Sloat, L., Van Groenigen, K.J., West, P.C., Ziska, L., Michalak, A.M., Team T.C., & Lobell, D.B. (2024). Climate change exacerbates the environmental impacts of agriculture. *Science*, 385(6713), eadn3747.
- Zhang, Q., Liu, M., & Ruan, J. (2017). Metabolomics analysis reveals the metabolic and functional roles of flavonoids in light-sensitive tea leaves. *BMC Plant Biology*, 17(1), 64.
- Zhao, Y., Liu, G., Yang, F., Liang, Y., Gao, Q., Xiang, C., Li, X., Yang, R., Zhang, G., Jiang, H., Yu, L., & Yang, S. (2023). Multilayered regulation of secondary metabolism in medicinal plants. *Molecular Horticulture*, 3(1), 11.

BÖLÜM 4

POTASYUM VE KALSİYUM'UN KURAKLIK STRES KOŞULLARINA ETKİSİ

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

DOI: <https://www.doi.org/10.5281/zenodo.18082748>

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

GİRİŞ

Potasyum bitkinin büyüme ve gelişimi için mutlak gerekli makro besin elementidir. Potasyum bitkide protein sentezi, karbonhidrat metabolizması ve enzim aktivasyonu gibi çeşitli biyokimyasal olayları düzenleyici görev üstlenir (Hasanuzzaman ve ark., 2018). Potasyum, bitkide enzim aktivasyonu, ozmo regülasyon, fotosentez, stoma işlevi, protein sentezi, floem taşınması ve iyonik denge gibi biyokimyasal ve fizyolojik süreçleri etkileyen temel bir besin maddesidir ve böylece büyüme ve metabolizmayı etkiler (Canarini vd. 2019)). Topraktakisu kıtlığı kuraklık stresine neden olur ve kurak bölgelerde büyümenin azalmasının ve verim kaybına neden olan abiyotik stres faktörüdür. Bitkilerde kuraklık stresine tepki, öncelikle stomaların kapanmasıyla ortaya çıkar; bunu turgor basıncındaki ve yaprak su potansiyelindeki düşüş ile hücre büyüme ve genişlemesinin yavaşlaması izler (Farooq ve ark. 2009; Hussain ve ark. 2018a,b) Ayrıca kuraklık stresi, iyon alımı ve taşınması, besin metabolizması, solunum, fotosentez, klorofil sentezi ve karbonhidrat metabolizması gibi temel biyokimyasal ve fizyolojik süreçleri bozarak bitki büyümesini daha da sınırlar (Li ve ark., 2011). Yeterli potasyum ve kalsiyum düzeyleri, kuraklık koşullarında bitkilerin hücre zarı stabilitesini, yaprak alanını, kök gelişimini ve toplam kuru madde birikimini güçlendirir. Ayrıca bu iki besin elementi, metabolik süreçleri düzenleyerek bitkinin su alımını ve suyun verimli kullanılmasını destekler. Bu bölümde, kuraklığın bitki büyümesi ve temel fizyolojik göstergeler üzerindeki etkileri ile potasyum ve kalsiyumun bitki metabolizmasını sürdürmedeki işlevleri ele alınmaktadır. Ayrıca bu iki elementin, çeşitli fizyolojik ve

biyokimyasal mekanizmaları düzenleyerek kuraklığın bitkiler üzerindeki olumsuz etkilerini nasıl hafiflettiği tartışılmaktadır.

1. KURAKLIK STRESİ

Küresel iklim değişikliği, tarımsal üretim süreçlerini çok yönlü biçimde etkilemekte; ürün veriminden gıda güvencesine ve tarım sistemlerinin sürdürülebilirliğine kadar pek çok unsuru derinden sarsmaktadır (Güler, 2024). Bu geniş ölçekli etkiler, bitkilerin suya erişimini kısıtlayan kuraklık olaylarının daha sık ve şiddetli yaşanmasına neden olarak bitki fizyolojisi üzerinde doğrudan bir baskı oluşturmaktadır (Seleiman ve ark., 2021). Bitkilerde kuraklık stresine verilen ilk tepki ise stomaların kapanmasıyla birlikte turgor basıncı ve yaprak su potansiyelinin azalması ve buna bağlı olarak hücre büyümesi ile genişlemesinin yavaşlaması şeklinde ortaya çıkmaktadır (Şekil 1; Hussain ve ark., 2018a; Güler ve ark., 2023). Ayrıca iyon alımı ve taşınması, besin metabolizması, solunum, fotosentez, klorofil sentezi ve karbonhidrat metabolizması gibi birçok biyokimyasal ve fizyolojik işlevler etkilenir (Li ve ark., 2011; Hussain ve ark., 2018b). Kuraklık stresi bitkide ROS (Reaktif Oksijen çeşitleri) üretiminde artışa neden olur (Wei ve ark., 2013) Kuraklık stresi stomaların kapanmasına ve bunun sonucunda fotosentezin azalmasına ve kloroplast dehidrasyonuna neden olur. Kuraklık stresinin sebep olduğu su, kısıtlı hale gelerek bitki daha fazla su kaybetmemek adına genelde stomalarını kapatmakta bu da fotosentezle fiksasyon için gerekli CO₂'in alımının kısıtlanmasına neden olmaktadır (Kalefetoğlu ve Ekmekçi, 2005).

Kuraklık Stresi ve Bitki Büyümesi	• Çimlenmeyi Engeller • Sürgün Büyümesi azaltır • Yaprak alanını azaltır • Stoma büyüklüğü azalır
Kuraklık Stresi ve Bitki Biyokimyasal Aktivitesi	• Rubisco verimliliği azalır • ABA konsantrasyonunda azalış • ROS birikimde artış • Antioksidatif enzimlerde artış
Kuraklık Stresi ve Bitki Fizyolojik Aktivitesi	• Kökler tarafından besin alımı azalır • Stoma kapanması • Bitki şişkinliğini kaybeder • Fotosentezi etkiler

Şekil.1 Kuraklık stresinin bitki büyümesi, biyokimyasal ve fizyolojik aktiviteler üzerindeki etkileri.

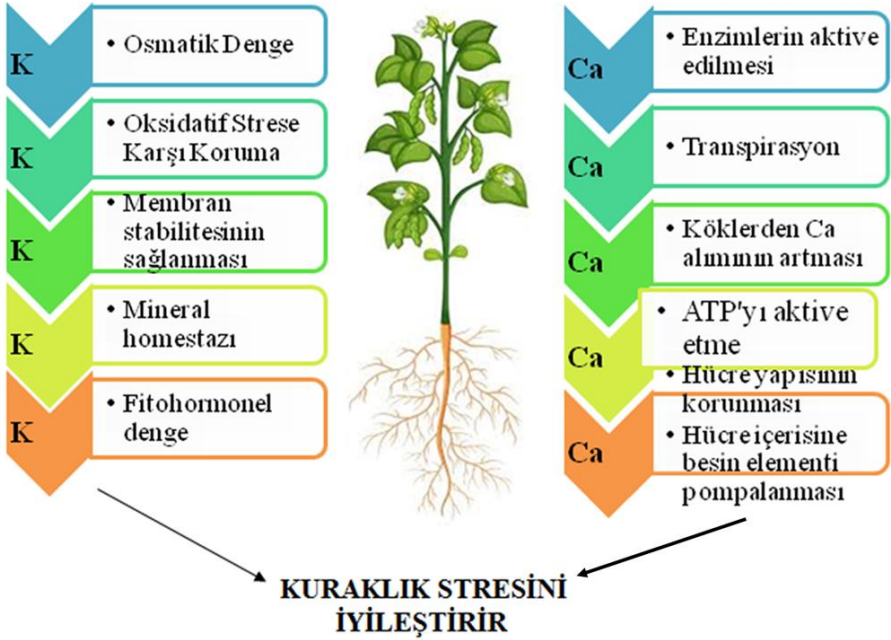
Stoma kapanması nedeniyle CO₂ bulunabilirliğini sınırlayan kuraklık stresi, kloroplastlarda O₂⁻ ve O₂ gibi ROS üretimini artırır ve bu da sırayla ROS üretimini başlatabilir (Choudhury ve ark., 2017). Kuraklık stresi, diğer abiyotik stres türleri gibi, süperoksit (O₂⁻), singlet oksijen (O⁻²), hidrojen peroksit (H₂O₂) ve hidroksil radikalleri (OH) gibi reaktif oksijen türlerinin ROS üretimini, genellikle bitkinin temizleme kapasitesinin ötesindeki seviyelere çıkarır. Bu, hücrelere ve hücresel bileşenlere zarar veren, fizyolojik ve biyokimyasal yaşam süreçlerini bozan ve hatta bitki ölümüne yol açan oksidatif strese neden olur (Li ve ark., 2010). Bitkiler, kloroplastlar, mitokondriler, peroksizomlar, sitozol ve stroma gibi çeşitli hücre organellerinde bulunan ve bölmeye

özgü farklı antioksidatif enzimlere sahiptir. Bu sayede ROS üretimi, son derece verimli temizleme mekanizmaları aracılığıyla kontrol altında tutulur (Sharma ve ark., 2005).

2. KURAKLIK STRES KOŞULLARINDA POTASYUMUN ANTIOKSİDATİF ENZİM AKTİVİTESİNE ETKİSİ

Potasyum, bitkilerde fizyolojik ve biyokimyasal süreçleri düzenleyerek abiyotik streslerin olumsuz sonuçlarını hafifleten bir stres giderici mutlak gerekli bir bitki besin maddesidir (Aslam ve ark., 2013). Abiyotik stres olarak bilinen kuraklık stresi koşullarında potasyum kök büyümesini artırarak, hücre turgor basıncını ve ozmotik basıncını düzenleyerek bitki dayanıklılığını artırdığı bildirilmiştir (Aslam ve ark., 2013). Kuraklık stresiyle CO₂'in fotosentetik fiksasyonunun bozulması, moleküler O₂'nin aktivasyonuna yol açarak ROS üretimine neden olur. Uygun K beslenmesi, su stresinin sonucunda oluşan hasarı önler. Benzer şekilde, kuraklık stresinde yeterli K mevcudiyeti sayesinde bitkilerin fotosentetik verimliliği artmıştır. Ayrıca, K 'nın CO₂'nin fotosentetik fiksasyonunu ve fotosentez ürünlerinin kaynaktan alıcıya taşınmasını artırarak ROS üretimini azalttığı bilinmektedir (Zhao vd. 2001). Potasyum büyümeyi güçlendiren antioksidan sistemini geliştirir ve ayrıca oksidatif stres kaynaklı zar lipidleri peroksidasyonunu kontrol eder (Ahanger ve Agarwal 2017). Zhu (2019) tarafından yapılan çalışmalarında, kolza tohumundaki normal potasyum konsantrasyonunun katalaz (CAT), süperoksit dismutaz (SOD) ve peroksidaz (POD) gibi çeşitli antioksidanların enzimatik aktivitesini artırma eğiliminde olduğunu ve bunun düşük potasyum

konsantrasyonuyla azaldığını bildirmiştir. Kuraklık stresi sırasında buğdayda çiçeklenme sonrası tane doldurma aşamasında yapılan bir başka çalışmada, potasyum yaprak uygulaması sonrasında SOD, CAT ve POD aktivitelerinde azalma gözlenmiştir (Lv ve ark. 2017).



Şekil 2. K ve Ca' nın bitkilerde kuraklığın zararlı etkilerini en aza indirmeye yardımcı olabileceği mekanizmalar

3. KURAKLIK STRESİ ALTINDA POTASYUMUN İYONİK DENGeye VE VERİM BİLEŞENLERİNE ETKİSİ

Potasyum ve kalsiyumun kuraklığın zararlı etkilerini en aza indirmeye yardımcı olabileceği fizyolojik mekanizmalar verilmiştir (Şekil 2) (Waraich ve ark., 2011; Mostofa ve ark., 2022). Kuraklık stresi sırasında, bitkide uygun su durumunun korunması bitkinin hayatta kalması için elzemdir. Bitkilerin turgor potansiyelini ve su dengesini

korumak için benimsediği temel mekanizma, kuraklık stresi altında ozmotik basıncı ayarlamadır (Blum, 2017). Yapraklardaki ozmotik düzenleme, öncelikle bitkilerin kuraklık stresine toleransıya ilgilidir. K^+ , su eksikliği koşullarında birincil ozmotik asit olarak önemli bir rol oynar. Potasyumun uygun mevcudiyeti, çözünen madde birikimini artırır ve ayrıca ozmotik potansiyeli azaltarak su eksikliği koşullarında hücre turgorunun iyileşmesine yol açar (Tuna ve ark. 2010). Potasyumun (K) yeterli miktarda bulunması ozmotik düzenlemeyi destekler ve ayrıca görelî su içeriğinin ve hücre turgorunun korunmasına yardımcı olur, böylece bitkilerin kuraklık stresine karşı direncini artırır. Ancak kuraklık stresi, zayıf difüzyon oranları nedeniyle bitki köklerine K alımını engeller, bu da bitkilerde K seviyelerinin düşmesine neden olur (Umar, 2006). Bununla birlikte potasyum bitkilerdeki terleme oranlarını artırır ve ksilem yoluyla su ve besin alımını yükseltir. Potasyumun besin veya iyon alımını kolaylaştırması, bitkilerde su stresi etkilerinin azalmasına yol açar. Potasyum uygulaması hem normal hem de su kıtlığı koşullarında verim özelliklerini ve su verimliliğini artırmasına rağmen, potasyumun yaptığı etki su kıtlığı koşullarında normal koşullara göre daha belirgindir. Çeşitli çalışmalar, kontrollü dozda potasyum gübresi uygulamasının pamuk bitkisinde lif kalitesini artırdığını ve yaprak yaşlanmasını geciktirdiğini ortaya koymuştur (Yang ve diğerleri 2016; Tian ve diğerleri 2017). Ul-Allah (2020) çalışmasında, mısır hibritlerinin performansının potasyum uygulamasıyla katlanarak arttığını ve potasyumun 75 kg ha^{-1} su kıtlığı koşullarının belirgin olduğu kurak bölgelerdeki mısır üreticilerinin, hektar başına 75 kg

potasyum uygulayarak daha yüksek verim elde edebileceğini tespit etmiştir.

4. KURAKLIK STRES KOŞULLARINDA KALSİYUM'UN METABOLİZMAYA ETKİSİ

Kuraklık stresi, bitkilerin topraktan su alımını zorlaştırdığı gibi kalsiyum (Ca^{2+}) alımını da olumsuz etkiler. Kalsiyum genellikle kök uçlarından ve yan köklerin geliştiği bölgelerden alınır. Bu bölgelerdeki hücreler, kalsiyumun topraktan ksileme (odun borularına) geçişine izin verir. Kalsiyumun bitki içinde taşınması, büyük ölçüde terleme (transpirasyon) ile gerçekleşir. Yani yapraklardan su buharlaştıkça, kökten yukarıya doğru su ve kalsiyum taşınır. Ancak kuraklık stres koşullarında, stomalar kapanır ve terleme azalır. Bu durumda kalsiyumun taşınması da yavaşlar (del Carmen Martínez-Ballesta ve ark., 2011). Bitkilerde Ca^{2+} taşınımı, ksilem akışıyla ve büyük ölçüde transpirasyon hızına bağımlı olarak gerçekleşir. Dolayısıyla, kuraklık koşullarında stomalarda kapanmaya bağlı olarak transpirasyon hızının azalması, Ca^{2+} taşınımını da sınırlar. Bu durum, yaprak ve meyve dokularında Ca^{2+} birikiminin azalmasına ve kalsiyumla ilişkili fizyolojik bozuklukların (örneğin hücre zar stabilitesinin bozulması, büyüme geriliği) ortaya çıkmasına neden olur (Han ve ark., 2003). Kuraklık stresi altında bitkilerde su potansiyelinin azalması, absisik asit (ABA) sentezinin artmasına neden olur. ABA, özellikle bekçi hücrelerde yer alan özgül reseptörler aracılığıyla hücre içi sinyal iletim mekanizmalarını aktive eder. Bu sinyal iletiminin en önemli bileşenlerinden biri kalsiyum (Ca^{2+}) olup, ABA aracılı stres yanıtlarının

hem hedefi hem de düzenleyicisidir (Kim ve ark., 2010). ABA uygulaması, plazma membranındaki Ca^{2+} kanallarını aktive ederek hücre içi serbest Ca^{2+} derişimini artırır. Artan $[\text{Ca}^{2+}]_{\text{cyt}}$, hücre içinde bir ikinci haberci olarak görev yapar ve birçok Ca^{2+} -bağımlı protein kinazı (CDPKs) aktive eder (Geiger ve ark., 2010; Brandt ve ark., 2015). Besin elementlerinin birbirleri ile olan etkileşimler antagonistik ya da sinerjik olabilir ve topraktaki miktarlarından bağımsız olarak besin alımının artmasına ya da azalmasına neden olabilir. Ca^{2+} ve K^{+} 'un sinerjik etkileri, kök biyokütlesinin artmasını ve hücre duvarı gelişiminin iyileşmesini sağlamış; bu durum daha kalın yaprakların ve genişlemiş epidermal hücrelerin oluşmasına yol açmıştır. Bu yapısal iyileşmeler hem normal hem de kuraklık stresi koşullarında fotosentetik kapasitenin artmasına katkıda bulunmuştur (Ramírez-Builes ve ark., 2020). Ayrıca, kuraklık stresi altında K^{+} uygulanan buğday çeşitlerinde kuraklık toleransındaki artış, N, P, K^{+} ve Ca^{2+} alımının yükselmesiyle ilişkilendirilmiş; buna karşılık Na^{+} alımı özellikle çiçeklenme başlangıcı ve tane dolum dönemlerinde azalmıştır (Samar Raza ve ark., 2013).

SONUÇ

Kuraklık, dünya çapında mahsul üretimi için ciddi bir tehdittir. Yetişen üründe birçok biyolojik özelliği etkileyerek ağır verim kayıplarına neden olur. Potasyum, neredeyse tüm yetiştirme sistemlerinde bitkilerin optimum büyümesi için gerekli olan makro elementtir. Yeterli K ve Ca, kuraklık koşullarında yaşayan bitkilerin hücre zarı stabilitesini, yaprak alanını, kök gelişimini ve toplam kuru ağırlığını iyileştirir. Potasyum

ayrıca, ozmolit içeriğini, iyon birikimini ve antioksidatif savunma sistemini artırarak su alımını ve su tasarrufunu da artırır. Yeterli K ve Ca besin durumunu korumak, bitkilerin ozmotik düzenlemesi ve kuraklığın neden olduğu ROS'un zararlı etkilerini hafifletmek için esastır. Bu nedenle, gelecekteki mahsul üretimi çevresel kısıtlamalar altında K ve Ca takviyesi hayati önem taşımaktadır.

KAYNAKÇA

- Ahanger, M. A., Tomar, N. S., Tittal, M., Argal, S., & Agarwal, R. (2017). Plant growth under water/salt stress: ROS production; antioxidants and significance of added potassium under such conditions. *Physiology and Molecular Biology of Plants*, 23(4), 731-744.
- Aslam, M., Zamir, M. S. I., Afzal, I., Yaseen, M., Mubeen, M., & Shoaib, A. (2013). Drought stress, its effect on maize production and development of drought tolerance through potassium application. *Cercetări Agronomice în Moldova*
- Blum, A. (2017). Osmotic adjustment is a prime drought stress adaptive engine in support of plant production. *Plant Cell Environ* 40(1):4–10.
- Brandt, B, Munemasa S, Wang C, Nguyen D, Yong T, Yang PG, Poretsky E, Belknap TF, Waadt R, Alemán F, Schroeder JI (2015) Calcium specificity signaling mechanisms in abscisic acid signal transduction in Arabidopsis guard cells. *Elife* 4:e03599.
- Choudhury, F. K., Rivero, R. M., Blumwald, E., & Mittler, R. (2017). Reactive oxygen species, abiotic stress and stress combination. *The Plant Journal*, 90(5), 856-867.
- del Carmen Martínez-Ballesta M, del Carmen Rodríguez-Hernández M, Alcaraz-López C, Mota-Cadenas C, Muries B, Carvajal M (2011) Plant hydraulic conductivity: The aquaporins contribution. *Hydraulic Conductivity: Issues, Determination and Applications*, p 103.
- Geiger D, Scherzer S, Mumm P, Marten IAPPL, Ache P, Matschi S, Liese A, Wellmann C, Al-Rasheid KAS, Grill E, Romeis T (2010). Guard cell anion channel SLAC1 is regulated by CDPK protein kinases with distinct Ca²⁺ affinities. *PNAS* 107(17):8023–8028.
- Güler, E. (2024). Küresel iklim değişikliğinin üzüm yetiştiriciliğine etkilerine kapsamlı bir bakış. İçinde A. Yılmaz & H. Yılmaz (Ed.), Tarımsal verimliliği kısıtlayan sorunlarla mücadele yöntemleri 2 (s. 135-198). Adıyaman: İKSAD Publishing House.

- Güler, E., Karadeniz, T., Muradoğlu, F. (2023). Sert kabuklu meyvelerde verimliliği sınırlayan faktörler. İçinde A. Yılmaz & H. Yılmaz (Ed.), Tarımsal verimliliği kısıtlayan sorunlarla mücadele yöntemleri 1 (s. 93-165). Adıyaman: İKSAD Publishing House.
- Han S, Tang R, Anderson LK, Woerner TE, Pei Z-M (2003). A cell surface receptor mediates extracellular Ca^{2+} sensing in guard cells. *Nature* 425(6954):196
- Hasanuzzaman, M., Bhuyan, M.H.M., Nahar, K., Hossain, M.S., Mahmud, J.A., Hossen, M.S., Masud, A.A.C., Moumita Fujita, M., 2018. Potassium: a vital regulator of plant responses and tolerance to abiotic stresses. *Agronomy* 8 (3), 31.
- Hussain HA, Hussain S, Khaliq A et al (2018a). Chilling and drought stresses in crop plants: implications, cross talk, and potential management opportunities. *Front Plant Sci* 9(393).
- Hussain M, Farooq S, Hasan W et al (2018b) Drought stress in sunflower: physiological effects and its management through breeding and agronomic alternatives. *Agric Water Manag* 201:152–166.
- Kalefetoğlu, T., & Ekmekci, Y. (2005). The effects of drought on plants and tolerance mechanisms. *Gazi University Journal of Science*, 18(4), 723-740.
- Kim TH, Böhmer M, Hu H, Nishimura N, Schroeder JI (2010) Guard cell signal transduction network: advances in understanding abscisic acid, CO_2 , and Ca^{2+} signaling. *Annu Rev Plant Biol*. 61(561):591.
- Li, C. H., Li, Y., Wuyun, T. N., Wu, G. L., & Jiang, G. M. (2010). Effects of high concentration ozone on soybean growth and grain yield. *Ying Yong Sheng Tai Xue Bao= The Journal of Applied Ecology*, 21(9), 2347-2352.
- Lv X, Li T, Wen X et al (2017) Effect of potassium foliage application post-anthesis on grain filling of wheat under drought stress. *Field Crops Res*, 206,95–105.
- Mostofa, M. G., Rahman, M. M., Ghosh, T. K., Kabir, A. H., Abdelrahman, M., Khan, M. A. R., & Tran, L. S. P. (2022). Potassium in plant physiological adaptation to abiotic stresses. *Plant Physiology and Biochemistry*, 186, 279-289.

- Ramírez -Builes, V.H., Küsters, J., de Souza, T.R., Simmes, C., 2020. Calcium nutrition in coffee and its influence on growth, stress tolerance, cations uptake, and productivity. *Frontiers in Agronomy* 2 (23).
- Samar Raza, M.A., Farrukh Saleem, M., Mustafa Shah, G., Jamil, M., Haider Khan, I., (2013). Potassium applied under drought improves physiological and nutrient uptake performances of wheat (*Triticum Aestivum* L.). *J. Soil Sci. Plant Nutr.* 13, 175–185.
- Seleiman, M. F., Al-Suhaibani, N., Ali, N., Akmal, M., Alotaibi, M., Refay, Y., ... & Battaglia, M. L. (2021). Drought stress impacts on plants and different approaches to alleviate its adverse effects. *Plants*, 10(2), 259.
- Sharma, P. and Dubey, R.S. (2005). Drought induces oxidative stress and enhances the activities of antioxidant enzymes in growing rice seedlings. *Plant Growth Regul.*, 46, 209–221.
- Tian XF, Li CL, Zhang M et al (2017) Effects of controlled-release potassium fertilizer on available potassium, photosynthetic performance, and yield of cotton. *J Plant Nutr Soil Sci* 180:505–515.
- Tuna AL, Kaya C, Ashraf M (2010). Potassium sulfate improves water deficit tolerance in melon plants grown under glasshouse conditions. *J Plant Nutr* 33(9):1276–1286
- Ul-Allah S, Ijaz M, Nawaz A et al (2020) Potassium application improves grain yield and alleviates drought susceptibility in diverse maize hybrids. *Plan Theory* 9(1):75.
- Umar S (2006) Alleviating adverse effects of water stress on yield of sorghum, mustard and groundnut by potassium application. *Pak J Bot* 38(5):1373–1380.
- Waraich, E. A., Ahmad, R., & Ashraf, M. Y. (2011). Role of mineral nutrition in alleviation of drought stress in plants. *Australian journal of Crop Science*, 5(6), 764-777.
- Wei J, Li C, Li Y et al (2013) Effects of external potassium (K) supply on drought tolerances of two contrasting winter wheat cultivars. *PLoS One* 8(7):e69737.
- Yang JS, Hu W, Zhao WQ et al (2016) Soil potassium deficiency reduces cotton fiber strength by accelerating and shortening fiber development. *Sci Rep* 6:28856.

- Zhao D, Oosterhuis DM, Bednarz CW (2001) Potasyum eksikliğinin pamuk bitkilerinin fotosentezi, klorofil içeriği ve kloroplast ultra yapısı üzerindeki etkisi. *Photosynthetica* 39 (1):103–109.
- Zhu B, Xu Q, Zou Y et al (2019) Effect of potassium deficiency on growth, antioxidants, ionome and metabolism in rapeseed under drought stress. *Plant Growth Regul* 90:455–466.

BÖLÜM 5

SPİRULİNA UYGULAMALARININ BİTKİLERDE ABİYOTİK STRES FAKTÖRLERİNE ETKİLERİ

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

DOI: <https://www.doi.org/10.5281/zenodo.18082762>

^{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

Günümüzde tarımsal üretimde kimyasal gübre ve pestisit kullanımının yaygınlaşması, kısa vadede verim artışı sağlasa da uzun vadede toprak sağlığının bozulması, mikrobiyal çeşitliliğin azalması, tuzluluk birikimi, ağır metal kontaminasyonu ve ekosistem üzerinde geri döndürülemez etkilere yol açabilmektedir (Yılmaz ve Yılmaz, 2025). Ayrıca kimyasal uygulamalara aşırı bağımlılık, bitkilerin stres koşullarına karşı doğal dayanıklılığının zayıflamasına ve üretim sistemlerinin dış girdilere daha bağımlı hale gelmesine neden olmaktadır (Safavi-Rizi ve ark., 2021; Jacquet ve ark., 2022). Bu durum, sürdürülebilir tarım stratejilerinde biyolojik ve organik içerikli uygulamalara olan ilgiyi artırmıştır (Chew ve ark., 2019; Aghighi, 2020; Masese ve ark., 2025). Organik biyostimülanlar, çevreye duyarlı üretim modelleriyle uyumlu olmaları, toprak yapısını ve bitki beslenmesini iyileştirmeleri, aynı zamanda abiyotik stres koşullarında bitki metabolizmasını destekleyebilmeleri nedeniyle önemli bir alternatif olarak değerlendirilmektedir (Pal ve ark., 2024; Zhang ve ark., 2024; Meena ve ark., 2025). Bu kapsamda mikroalg temelli biyostimülanlar, zengin biyoaktif içerikleri ve çok yönlü fizyolojik etkileri sayesinde öne çıkmakta; özellikle Spirulina hem biyogübre hem de stres düzenleyici bir biyolojik destek materyali olarak modern bitki yetiştiriciliğinde dikkat çekici bir potansiyel sunmaktadır (Parmar ve ark., 2023; Mostafa ve ark., 2024).

Spirulina, yüksek protein oranı, esansiyel amino asit profili, vitaminler, mineraller, pigmentler ve özellikle güçlü antioksidan

özellik gösteren fikosiyanin içeriği sayesinde tarımda biyostimülan olarak kullanım potansiyeli giderek daha fazla dikkat çeken bir mikroalg türüdür (Liestianty ve ark., 2019; El-Sayed ve ark., 2022). Hem kültürü kolay olması hem de biyokütlesinin doğal büyüme düzenleyicileri, fenolik bileşikler, polisakkaritler ve mikro besin elementleri bakımından zengin olması, Spirulina'yı sürdürülebilir tarım uygulamalarında alternatif bir biyolojik girdi haline getirmiştir (Usharani ve ark., 2012; AlFadhly ve ark., 2022; Taha ve ark., 2023; Chaiklahan ve ark., 2023; Arahou ve ark., 2023). Tarımsal üretimde kimyasal gübrelelere duyulan bağımlılığın azaltılması, stres toleransının biyolojik materyallerle artırılması ve verim kayıplarının önlenmesi yönündeki eğilimler, Spirulina kullanımını daha da önemli kılmaktadır.

Son yıllarda Spirulina'nın bitkilerde abiyotik stres koşullarına karşı dayanıklılığı artırıcı etkileri üzerine yapılan çalışmalar hız kazanmıştır. Özellikle kuraklık, tuzluluk ve sıcaklık stresinin bitkilerde yol açtığı fotosentetik verim kaybı, iyon dengesizliği, ozmotik stres ve reaktif oksijen türlerinin artışı gibi fizyolojik bozulmaların Spirulina uygulamalarıyla hafifletilebildiği raporlanmaktadır (Shukla ve ark., 2018; Jacomassi ve ark., 2022; El-Shazoly ve ark., 2025; Khaled ve ark., 2023; Lao ve Edullantes, 2025). Spirulina ekstraktlarının yaprak uygulamaları, tohum kaplama formülasyonları veya kök bölgesine verilen sıvı alg preparatları, bitkilerin hem hızlı yanıt veren antioksidan savunma sistemlerini hem

de uzun vadeli metabolik adaptasyon süreçlerini düzenleyerek stres etkilerini azaltabilmektedir.

Bu kapsamda Spirulina, modern bitki yetiştiriciliğinde yalnızca bir besin kaynağı olarak değil, aynı zamanda bitki stres yönetiminde etkili bir biyostimülan olarak değerlendirilmektedir. Artan araştırmalar, Spirulina'nın hem fizyolojik hem de biyokimyasal düzeyde bitki dayanıklılığını artıran önemli bir biyoaktif kaynak olduğunu göstermektedir. Dolayısıyla Spirulina uygulamalarının tarımsal üretimde verim kayıplarını azaltma, bitki sağlığını koruma ve çevresel stres faktörlerine karşı sürdürülebilir çözümler geliştirme açısından önemli bir potansiyel taşıdığı söylenebilir.

1. SPİRULİNA UYGULAMALARININ ANTİOKSİDAN SAVUNMA SİSTEMİNE ETKİSİ

Bitkiler abiyotik stres sinyallerini algılayarak bu koşullara uyum sağlayacak savunma tepkileri geliştirme kapasitesine sahip olsa da (Yeken, 2023), aşırı kuraklık, tuzluluk, sıcaklık ve ağır metal toksisitesi gibi yoğun stres durumlarında hücre içi metabolik dengeleri hızla bozulmakta ve bunun sonucunda reaktif oksijen türlerinin (ROS) üretimi belirgin şekilde artmaktadır (Sharma ve ark., 2012; Hasanuzzaman ve ark., 2020). Süperoksit radikali (O_2^-), hidrojen peroksit (H_2O_2) ve hidroksil radikali ($\bullet OH$) gibi bu yüksek reaktif bileşikler, lipid peroksidasyonunu tetikleyerek hücre membran bütünlüğünü bozmakta, fotosentetik pigmentleri parçalamakta ve enzim aktivitelerini olumsuz etkilemektedir (Sachdev ev ark., 2021;

Zheng ve ark., 2024). Stres koşullarında ROS üretimindeki artışa karşı bitkinin kendi antioksidan savunma sistemi çoğu zaman yetersiz kalmakta, bu durum da hücrel hasarın ilerlemesine neden olmaktadır (Hasanuzzaman ve ark., 2020).

Spirulina uygulamalarının söz konusu stres süreçlerini modüle ettiği ve bitkinin antioksidan savunmasını önemli ölçüde güçlendirdiği farklı araştırmalarda ortaya konmuştur (Taha ve ark., 2023; Rady ve ark., 2023; Gharib ve Ahmed, 2023; Hamouda ve ark., 2022). Spirulina biyokütlesi; fikosiyanin, karotenoidler, fenolik bileşikler ile C ve E vitaminleri gibi güçlü antioksidanları doğal formda içermesi sayesinde hem enzimatik hem de enzimatik olmayan savunma mekanizmalarını destekleyebilmektedir (Asghari ve ark., 2016; Stunda-Zujeva ve ark., 2023; Marjanović ve ark., 2024; Wijayanti ve ark., 2024). Fikosiyanin, özellikle serbest radikalleri doğrudan nötralize edebilme kapasitesiyle bilinirken, fenolik bileşikler ROS oluşumunu baskılama ve metal iyonlarını şelatlama özellikleriyle öne çıkmaktadır (Bermejo ve ark., 2008; Agrawal ve ark., 2021; Michalak, 2006; Dai ve Mumper, 2010).

Spirulina'nın bitkilerde antioksidan enzim aktivitelerini artırdığına ilişkin bulgular arasında süperoksit dismutaz (SOD), katalaz (CAT) ve peroksidaz (POD) enzimlerinin aktivitesindeki belirgin yükseliş dikkat çekmektedir (Abd El Baky ve ark., 2014; Gharib ve Ahmed, 2023; Shaari ve ark., 2023). SOD enzimi, süperoksit radikalini (O_2^-) hidrojen peroksite (H_2O_2) dönüştürerek oksidatif hasarın ilk basamakta kontrol altına alınmasına katkı sağlar; katalaz (CAT) ve peroksidazlar

(POD) ise oluşan H_2O_2 'yi daha az zararlı bileşiklere dönüştürerek hücrede zehirli oksijen türevlerinin birikmesini engeller (Gill ve Tuteja, 2010; Sharma ve ark., 2012; Apel ve Hirt, 2004). Spirulina uygulamalarının bu enzimlerin aktivitesini düzenleyerek oksidatif stresin şiddetini azalttığı, böylece bitki hücre yapısının, özellikle de membran ve kloroplast bütünlüğünün daha iyi korunmasını sağladığı çeşitli çalışmalarda rapor edilmektedir (Rady ve ark., 2023; Mat Shaari ve ark., 2023; Mostafa ve ark., 2024). Bunun yanı sıra Spirulina'nın içerdiği γ -linolenik asit (GLA) gibi doymamış yağ asitleri, hücre zarının akışkanlığını sürdürerek stres koşullarında membran stabilitesini artırmakta, bu da oksidatif hasara karşı dolaylı bir koruma sağlamaktadır (Zhang ve ark., 2015; Shu ve ark., 2015; He ve Ding, 2020). Ayrıca Spirulina kaynaklı polisakkarit ve pigmentlerin, glutatyon ve askorbat döngüsü gibi redoks tamponlama sistemlerinin yeniden düzenlenmesine katkıda bulunduğu belirtilmektedir (Wu ve ark., 2016; Trotta ve ark., 2022; Touzout ve ark., 2025). Glutatyon redüktaz (GR), monodehidroaskorbat redüktaz (MDHAR) ve askorbat peroksidaz (APX) gibi enzimlerin artan aktiviteleri, hücre içi redoks dengesinin korunmasına yardımcı olurken ROS'u daha kontrollü düzeyde tutmaktadır (Pandey ve ark., 2015; Hasanuzzaman ve ark., 2019; Foyer, 2024).

Antioksidan savunma sisteminin güçlenmesi sadece hücresel hasarın azaltılmasıyla sınırlı kalmayıp, aynı zamanda fotosentetik süreçlerin, özellikle de klorofil içeriği ve PSII verimliliğinin korunmasına da yardımcı olmaktadır (Foyer & Shigeoka, 2011; Gill & Tuteja, 2010;

Hasanuzzaman ve ark., 2020). Spirulina uygulamalarının stres koşullarında klorofil miktarını koruduğu, fotosistem II (PSII) verimliliğini yükselttiği ve fotokimyasal verim kayıplarını azalttığı çeşitli çalışmalarda rapor edilmiştir (Shaari ve ark., 2025; Taha ve ark., 2023; Touzout ve ark., 2025). Bu durum oksidatif stresin fotosentetik aparata verdiği zararın azaltılması sayesinde mümkün olmakta, bitkilerin stres altında dahi metabolik faaliyetlerini daha etkin sürdürmesine olanak sağlamaktadır (Taha ve ark., 2023; Touzout ve ark., 2025).

Tüm bu bulgular, Spirulina'nın bitkilerde oksidatif stresin zararlarını hafifleten ve antioksidan savunma mekanizmalarını hem biyokimyasal hem de yapısal düzeyde güçlendiren etkili bir biyostimülan olarak değerlendirilebileceğini göstermektedir. Dolayısıyla Spirulina uygulamaları, abiyotik stres koşullarında bitki metabolizmasının korunmasına yönelik sürdürülebilir ve çevre dostu bir yaklaşım sunmaktadır.

2. SPİRULİNA UYGULAMALARININ BİTKİ BESLENMESİNİ DESTEKLEYİCİ ROLÜ VE OSMOPROTEKTAN ETKİSİ

Spirulina biyokütlesi ve ondan elde edilen ekstraktlar, içerdiği yüksek düzeyde makro (N, P, K) ve mikro besin elementleri (Fe, Zn, Mg, Mn, Cu) sayesinde bitkilerin mineral beslenmesini doğrudan destekleyen önemli bir biyolojik girdidir (Yılmaz ve Duru, 2011; Grosshagauer ve ark., 2022). Spirulina'nın hücre yapısındaki bu elementler organik forma bağlı olduğundan, bitkiler tarafından daha yüksek

biyoyararlanımıyla alınabilmekte, özellikle kök bölgesindeki besin alım dinamikleri olumlu yönde etkilenmektedir (Touzout ve ark., 2025). Yapılan çeşitli çalışmalar, Spirulina uygulamalarının kök uzunluğu, kök yüzey alanı ve kök tüyü gelişiminde artış sağladığını, böylece bitkilerin topraktaki su ve besin kaynaklarına daha etkin ulaşabildiğini göstermektedir (Godlewska ve ark., 2019; Gharib ve Ahmed, 2023). Bu durum özellikle kuraklık ve tuzluluk gibi su dengesinin bozulduğu koşullarda büyük önem taşımaktadır.

Besin elementi alımının desteklenmesinin yanı sıra Spirulina, hücre içinde osmoregülatör bileşiklerin birikimini teşvik ederek bitkilerin su stresine karşı dayanıklılığını artırmaktadır (Taha ve ark., 2023). Kuraklık ve tuzluluk stresinde su potansiyelinin düşmesi nedeniyle bitki hücreleri su kaybına uğrama eğilimindedir (Ma ve ark., 2020). Spirulina ekstraktlarında bulunan polisakkaritler, amino asitler ve büyüme düzenleyici özellik gösteren bileşikler, bitkilerde prolin, glisin betain, çözünür şekerler, sorbitol ve diğer osmoprotektanların sentezini uyarmaktadır (Shaari ve ark., 2025; Jiménez-Arias ve ark., 2021). Bu bileşikler hücre içi osmotik basıncı düzenleyerek suyun hücrelerde tutulmasını sağlar ve hücre hacminin korunmasına katkıda bulunur (Ashraf ve Foolad, 2007; Ghosh ve ark., 2021; Singh ve ark., 2022).

Prolin özellikle stres toleransında kilit rol oynayan bir osmoprotektandır; hücre su potansiyelini dengelediği gibi aynı zamanda protein ve membran yapısının stabilizasyonuna katkıda bulunur (Szabados, L., & Saviouré, 2010). Spirulina uygulamalarının

prolin birikimini artırması, bitkilerin hem kısa vadeli hem de uzun vadeli uyum yanıtlarını güçlendirmektedir (Taha ve ark., 2023). Çözünür şekerlerin artışı ise hem enerji kaynağı olarak işlev görmekte hem de hücre içi redoks dengesine katkı sağlayarak membran ve protein yapılarının korunmasına yardımcı olmaktadır (Couée ve ark., 2006).

Spirulina'nın bitki beslenmesini destekleyen önemli etkilerinden biri de fotosentetik metabolizmayı güçlendirmesidir (Shedeed ve ark., 2022). İçeriğindeki magnezyum (klorofil sentezinin ana elementi), demir (elektron taşınım zincirinde görevli), potasyum (stoma hareketlerinin düzenleyicisi) gibi mineraller, bitkilerin fotosentetik kapasitesini stres koşullarında dahi korumasına imkân tanımaktadır (Carolyn Joe Rosario ve Mary Josephine, 2015; Shedeed ve ark., 2022; Ishfaq ve ark., 2022; Rout ve Sahoo, 2015; Hasanuzzaman ve ark., 2018). Spirulina uygulanan bitkilerde klorofil a ve b içeriklerinde artış, net fotosentez hızında iyileşme ve stomal iletkenlikte daha dengeli bir seyir olduğu literatürde bildirilmektedir (Taha ve ark., 2023). Özellikle stomaların aşırı kapanmasını engellemesi ve su kullanım etkinliğini artırması, Spirulina'nın stres altında karbon asimilasyonunu koruyan önemli bir biyostimülan işlevi gördüğünü ortaya koymaktadır (Touzout ve ark., 2025).

Tuzluluk stresinde Spirulina'nın etkisi ayrıca iyon homeostazının düzenlenmesiyle de ilişkilidir. Spirulina kaynaklı biyoaktif bileşiklerin, hücre zarlarında iyon pompalarının (H^+ -ATPaz, Na^+/H^+ antiporterler) aktivitesini düzenleyerek sodyumun toksik birikimini

sınırladığı, buna karşılık potasyum alımını teşvik ettiği ifade edilmektedir (Xu ve ark., 2023; Mutale-Joan ve ark., 2021). Böylece K^+/Na^+ oranı korunarak bitki hücrelerinin metabolik faaliyetleri daha etkin yürütülmektedir (Almeida ve ark., 2017). Bu etkiler hem büyüme parametrelerinde hem de fizyolojik dayanıklılık göstergelerinde belirgin iyileşmelere yol açmaktadır.

Tüm bu mekanizmalar birlikte değerlendirildiğinde Spirulina'nın bitkilerde hem mineral beslenmeyi optimize eden hem de su stresine karşı hücresel osmoregülasyonu güçlendiren çift yönlü bir etki sunduğu görülmektedir. Bu nedenle Spirulina uygulamaları bitki gelişimini sadece besin kaynağı sağlama açısından değil, aynı zamanda stres koşullarında metabolik sürekliliği destekleme açısından da önemli bir biyostimülan olarak değerlendirilmektedir.

3. SPİRULİNA UYGULAMALARININ BÜYÜME VE FİZYOLOJİK PARAMETRELERE ETKİLERİ

Kuraklık stresi, bitkilerde su potansiyelinin düşmesine, oksidatif hasarın artmasına, karbon asimilasyonunun sınırlandırılmasına ve iyonik dengenin bozulmasına yol açan en önemli abiyotik stres faktörlerinden biridir (Mansur ve Luiz, 2015; Wach ve Skowron, 2022). Stres koşullarında özellikle potasyum (K^+), hücre içi osmotik denge, enzim aktivitesi, stomal hareketlerin düzenlenmesi ve fotosentez kapasitesi üzerinde kritik rol oynamaktadır (Hasanuzzaman ve ark., 2018, Fang ve ark., 2023). Spirulina bazlı biyostimülanların içerdiği potasyum, magnezyum ve diğer mineraller ile biyoaktif bileşikler, bitkilerin

kuraklık stresine verdiği yanıtı önemli ölçüde modüle etmektedir (Rahim ve ark., 2021; Elnajar ve ark., 2024; Vangenechten ve ark., 2025).

Spirulina uygulamalarının kök gelişimini teşvik ettiği çok sayıda çalışmada bildirilmiştir (Godlewska ve ark., 2019; Gharib ve Ahmed, 2023; Touzout ve ark., 2025; El-Shazoly ve ark., 2025). Kök yüzey alanının genişlemesi ve kök tüylerinin artışı, suya erişimi kolaylaştırarak bitkilerin kuraklığa karşı toleransını yükseltmektedir (Wasaya ve ark., 2018; Li ve ark., 2021; Duddek ve ark., 2023). Spirulina'da doğal olarak bulunan büyüme düzenleyici bileşikler (IAA ve sitokinin benzeri maddeler), kök hücre bölünmesini ve lateral kök oluşumunu desteklemekte, böylece bitkilerin su alım kapasiteleri güçlenmektedir (Zapata ve ark., 2021; López Mejía ve ark., 2024). Bu gelişmeler genç fide aşamasından itibaren daha güçlü bir su alma kapasitesi oluşturarak ilerleyen dönemlerde verim üzerinde belirleyici rol oynamaktadır (Prakash ve ark., 2022).

Kuraklık stresinin bitkilerde yol açtığı en önemli fizyolojik sorunlardan biri stomaların kapanması sonucu fotosentetik aktivitenin düşmesidir (Zaouay ve ark., 2014; Salehi-Lisar ve Bakhshayeshan-Agdam, 2016). Spirulina uygulamalarının stomal iletkenliği koruyarak CO₂ alımını desteklediği, buna paralel olarak net fotosentez oranını iyileştirdiği rapor edilmiştir (Shedeed ve ark., 2022). Bu etki büyük oranda Spirulina'nın içerdiği potasyumun stoma turgorunun düzenlenmesinde oynadığı rol ile ilişkilidir (Begum ve ark., 2024). Potasyum iyonları, stomaların açılıp kapanmasını kontrol eden en

temel elementlerden biri olduğundan, Spirulina uygulamaları stomaların aşırı kapanmasını önlemekte, böylece hem karbon asimilasyonu hem de transpirasyon dengesi korunmaktadır (Hasanuzzaman ve ark., 2018).

Kuraklık stresi altında bitki büyüme ve verim bileşenleri genellikle ciddi şekilde zarar görür (Salehi-Lisar ve Bakhshayeshan-Agdam, 2016). Spirulina uygulamalarının sıkça rapor edilen etkileri arasında bitki boyu, yaprak alanı, gövde çapı, taze-kuru ağırlık, kök/sürgün oranı gibi morfolojik parametrelerde belirgin iyileşmeler bulunmaktadır (Elnajar ve ark., 2024; López Mejía ve ark., 2024). Bu iyileştirmeler, bitki dokularında hem su hem de mineral dengesinin korunması sayesinde ortaya çıkmaktadır. Verim bileşenleri açısından Spirulina uygulamaları, özellikle tane ağırlığı, sap verimi, biyokütle üretimi, başak/tane oluşumu, meyve tutumu ve hasat indeksinde artışlarla ilişkilendirilmiştir (Dmytryk ve ark., 2022; Ghallab ve ark., 2024; Lima e Silva ve ark., 2025). Kuraklık stresi sırasında karbon asimilasyonu azalmasına rağmen, Spirulina uygulanan bitkilerde karbon metabolizmasının daha etkin çalıştığı ve fotosentetik ürünlerin generatif dokulara daha iyi taşındığı bildirilmektedir (Shedeed ve ark., 2022; Elnajar ve ark., 2024). Bu bulgular Spirulina'nın yalnızca vejetatif büyümeyi değil, generatif süreçleri de desteklediğini göstermektedir.

Tüm bu sonuçlar Spirulina'nın kuraklık stresi altında iyon dengesinin korunması, fotosentetik kapasitenin sürdürülmesi, kök gelişiminin desteklenmesi ve verim bileşenlerinin iyileştirilmesi açısından çok

yönlü bir biyostimülan olduğunu ortaya koymaktadır. Dolayısıyla Spirulina bazlı ürünler, su kısıtı bulunan tarımsal alanlarda hem bitki sağlığını hem de üretim verimliliğini artırmak adına sürdürülebilir bir uygulama potansiyeli taşımaktadır.

SONUÇ

Spirulina temelli biyostimülanların bitki fizyolojisi üzerinde ortaya koyduğu etkiler, abiyotik stres yönetiminde biyolojik kaynaklı çözümlerin önemini yeniden gündeme taşımaktadır. Elde edilen bulgular, Spirulina'nın bitkilerde metabolik dayanıklılığı güçlendiren, çevresel değişkenlik karşısında uyum kapasitesini artıran ve üretim sistemlerinde risk azaltıcı bir unsur olarak değerlendirilebileceğini göstermektedir. Bununla birlikte, Spirulina'nın tarımsal uygulamalardaki etkinliğinin farklı bitki türleri, dozlar ve uygulama şekilleri bağlamında değişkenlik gösterebildiği dikkate alındığında, mekanizmaların daha ayrıntılı olarak incelendiği ve üretim koşullarına uyarlanabilirliği test eden ileri düzey çalışmaların gerekliliği açıktır. Bu çerçevede Spirulina, sürdürülebilir ve iklim uyumlu tarım yaklaşımlarında yalnızca tamamlayıcı bir girdi değil, bitkisel üretimde dayanıklılık stratejilerinin merkezine yerleşme potansiyeli taşıyan stratejik bir biyolojik kaynak olarak değerlendirilmektedir.

KAYNAKÇA

- Abd El Baky, H. H., Hussein, M. M., & El-Baroty, G. S. (2014). Induces of antioxidant compounds and salt tolerance in wheat plant, irrigated with seawater as response to application of microalgae spray. *American Journal of Agricultural and Biological Sciences*, 9(2), 127-137.
- Aghighi, S. (2020). Biofertilizers, Biopesticides and Integrated Pest Management: Potentials and Challenges in the Islamic Republic of Iran. *Journal of Biosafety*, 13(3), 1-12.
- Agrawal, M., Bansal, S., & Chopra, K. (2021). Evaluation of the in vitro and in vivo antioxidant potentials of food grade Phycocyanin. *Journal of Food Science and Technology*, 58(11), 4382-4390.
- AlFadhly, N. K., Alhelfi, N., Altemimi, A. B., Verma, D. K., Cacciola, F., & Narayanankutty, A. (2022). Trends and technological advancements in the possible food applications of Spirulina and their health benefits: A Review. *Molecules*, 27(17), 5584.
- Almeida, D. M., Oliveira, M. M., & Saibo, N. J. (2017). Regulation of Na⁺ and K⁺ homeostasis in plants: towards improved salt stress tolerance in crop plants. *Genetics and molecular biology*, 40(1 suppl 1), 326-345.
- Apel, K., & Hirt, H. (2004). Reactive oxygen species: metabolism, oxidative stress, and signal transduction. *Annu. Rev. Plant Biol.*, 55(1), 373-399.
- Arahou, F., Lijassi, I., Wahby, A., Rhazi, L., Arahou, M., & Wahby, I. (2023). Spirulina-based biostimulants for sustainable agriculture: Yield improvement and market trends. *BioEnergy Research*, 16(3), 1401-1416.
- Asghari, A., Fazilati, M., Latifi, A. M., Salavati, H., & Choopani, A. (2016). A review on antioxidant properties of Spirulina. *Journal of Applied Biotechnology Reports*, 3(1), 345-351.
- Ashraf, M. F. M. R., & Foolad, M. R. (2007). Roles of glycine betaine and proline in improving plant abiotic stress resistance. *Environmental and experimental botany*, 59(2), 206-216.

- Begum, N., Qi, F., Yang, F., Khan, Q. U., Faizan, Fu, Q., ... & Zhang, W. (2024). Nutritional composition and functional properties of *A. platensis*-derived peptides: A green and sustainable protein-rich supplement. *Processes*, 12(11), 2608.
- Bermejo, P., Piñero, E., & Villar, Á. M. (2008). Iron-chelating ability and antioxidant properties of phycocyanin isolated from a protean extract of *Spirulina platensis*. *Food chemistry*, 110(2), 436-445.
- Chaiklahan, R., Chirasuwan, N., Triratana, P., Loha, V., Tia, S., & Bunnag, B. (2013). Polysaccharide extraction from *Spirulina* sp. and its antioxidant capacity. *International journal of biological macromolecules*, 58, 73-78.
- Chew, K. W., Chia, S. R., Yen, H. W., Nomanbhay, S., Ho, Y. C., & Show, P. L. (2019). Transformation of biomass waste into sustainable organic fertilizers. *Sustainability*, 11(8), 2266.
- Couée, I., Sulmon, C., Gouesbet, G., & El Amrani, A. (2006). Involvement of soluble sugars in reactive oxygen species balance and responses to oxidative stress in plants. *Journal of experimental botany*, 57(3), 449-459.
- Dai, J., & Mumper, R. J. (2010). Plant phenolics: extraction, analysis and their antioxidant and anticancer properties. *Molecules*, 15(10), 7313-7352.
- Dmytryk, A., Samoraj, M., Moustakas, K., Witek-Krowiak, A., & Chojnacka, K. (2022). Bioactive fatty acids and compounds from *Spirulina* (*Arthrospira*) *platensis*: Potential as biostimulants for plant growth. *Sustainable Chemistry and Pharmacy*, 30, 100899.
- Duddek, P., Ahmed, M. A., Javaux, M., Vanderborght, J., Lovric, G., King, A., & Carminati, A. (2023). The effect of root hairs on root water uptake is determined by root–soil contact and root hair shrinkage. *New Phytologist*, 240(6), 2484-2497.
- Elnajar, M., Aldesuquy, H., Abdelmoteleb, M., & Eltanahy, E. (2024). Mitigating drought stress in wheat plants (*Triticum Aestivum* L.) through grain priming in aqueous extract of *spirulina platensis*. *BMC Plant Biology*, 24(1), 233.

- El-Sayed, B., El-Feky, A. E., Mounier, A., & Reda, M. (2022). C-Phycocyanin, anticancer activity and nutritional value of mass-produced *Spirulina platensis*. *Egyptian Journal of Chemistry*, 65(11), 611-625.
- El-Shazoly, R. M., Aloufi, A. S., & Fawzy, M. A. (2025). The potential use of arthrospira (*Spirulina platensis*) as a biostimulant for drought tolerance in wheat (*Triticum aestivum* L.) for sustainable agriculture. *Journal of Plant Growth Regulation*, 44(2), 686-703.
- Fang, S., Yang, H., Duan, L., Shi, J., & Guo, L. (2023). Potassium fertilizer improves drought stress alleviation potential in sesame by enhancing photosynthesis and hormonal regulation. *Plant Physiology and Biochemistry*, 200, 107744.
- Foyer, C. H., & Kunert, K. (2024). The ascorbate–glutathione cycle coming of age. *Journal of Experimental Botany*, 75(9), 2682-2699.
- Foyer, C. H., & Shigeoka, S. (2011). Understanding oxidative stress and antioxidant functions to enhance photosynthesis. *Plant physiology*, 155(1), 93-100.
- Ghallab, M., Bukhari, N., Salem, E. A., El-Zaidy, M., El-Sheikh, A., & Raja, R. (2024). Influence of *Spirulina* Extract on Physiological, Qualitative, and Productive Traits of Four Sugarcane Genotypes. *Agronomy*, 14(7), 1594.
- Gharib, F. A. E. L., & Ahmed, E. Z. (2023). *Spirulina platensis* improves growth, oil content, and antioxidant activity of rosemary plant under cadmium and lead stress. *Scientific Reports*, 13(1), 8008.
- Ghosh, U. K., Islam, M. N., Siddiqui, M. N., & Khan, M. A. R. (2021). Understanding the roles of osmolytes for acclimatizing plants to changing environment: a review of potential mechanism. *Plant Signaling & Behavior*, 16(8), 1913306.
- Gill, S. S., & Tuteja, N. (2010). Reactive oxygen species and antioxidant machinery in abiotic stress tolerance in crop plants. *Plant physiology and biochemistry*, 48(12), 909-930.
- Godlewska, K., Michalak, I., Pacyga, P., Baśladyńska, S., & Chojnacka, K. (2019). Potential applications of cyanobacteria: *Spirulina platensis* filtrates and

- homogenates in agriculture. *World journal of Microbiology and Biotechnology*, 35(6), 80.
- Grosshagauer, S., Kraemer, K., & Somoza, V. (2020). The true value of Spirulina. *Journal of agricultural and food chemistry*, 68(14), 4109-4115.
- Hamouda, R. A., Shehawy, M. A., Mohy El Din, S. M., Albalwe, F. M., Albalawi, H. M. R., & Hussein, M. H. (2022). Protective role of Spirulina platensis liquid extract against salinity stress effects on Triticum aestivum L. *Green Processing and Synthesis*, 11(1), 648-658.
- Hasanuzzaman, M., Bhuyan, M. B., Anee, T. I., Parvin, K., Nahar, K., Mahmud, J. A., & Fujita, M. (2019). Regulation of ascorbate-glutathione pathway in mitigating oxidative damage in plants under abiotic stress. *Antioxidants*, 8(9), 384.
- Hasanuzzaman, M., Bhuyan, M. B., Nahar, K., Hossain, M. S., Mahmud, J. A., Hossen, M. S., ... & Fujita, M. (2018). Potassium: a vital regulator of plant responses and tolerance to abiotic stresses. *Agronomy*, 8(3), 31.
- Hasanuzzaman, M., Bhuyan, M. B., Zulfiqar, F., Raza, A., Mohsin, S. M., Mahmud, J. A., ... & Fotopoulos, V. (2020). Reactive oxygen species and antioxidant defense in plants under abiotic stress: Revisiting the crucial role of a universal defense regulator. *Antioxidants*, 9(8), 681.
- He, M., & Ding, N. Z. (2020). Plant unsaturated fatty acids: multiple roles in stress response. *Frontiers in plant science*, 11, 562785.
- Ishfaq, M., Wang, Y., Yan, M., Wang, Z., Wu, L., Li, C., & Li, X. (2022). Physiological essence of magnesium in plants and its widespread deficiency in the farming system of China. *Frontiers in plant science*, 13, 802274.
- Jacomassi, L. M., Viveiros, J. D. O., Oliveira, M. P., Momesso, L., de Siqueira, G. F., & Crusciol, C. A. C. (2022). A seaweed extract-based biostimulant mitigates drought stress in sugarcane. *Frontiers in plant science*, 13, 865291.
- Jacquet, F., Jeuffroy, M. H., Jouan, J., Le Cadre, E., Litrico, I., Malausa, T., ... & Huyghe, C. (2022). Pesticide-free agriculture as a new paradigm for research: Pesticide-free agriculture as a new paradigm for research. *Agronomy for Sustainable Development*, 42(1), 8.

- Jiménez-Arias, D., García-Machado, F. J., Morales-Sierra, S., García-García, A. L., Herrera, A. J., Valdés, F., ... & Borges, A. A. (2021). A beginner's guide to osmoprotection by biostimulants. *Plants*, 10(2), 363.
- Khaled, A. M., Abdel-Razik, A. B., & Tonbol, K. (2023). Enhancing Heat Stress Resilience of Tomato During Flowering Stage Using Biostimulants: Nano Chitosan and *Spirulina platensis* Extract. *Journal of Agricultural Chemistry and Biotechnology*, 14(7), 79-87.
- Lao, I. K. M., & Edullantes, B. (2025). Growth, Productivity, and Size Structure of *Spirulina* Strain Under Different Salinity Levels: Implications for Cultivation Optimization. *Phycology*, 5(3), 31.
- Li, C., Li, L., Reynolds, M. P., Wang, J., Chang, X., Mao, X., & Jing, R. (2021). Recognizing the hidden half in wheat: root system attributes associated with drought tolerance. *Journal of Experimental Botany*, 72(14), 5117-5133.
- Liestianty, D., Rodianawati, I., Arfah, R. A., Assa, A., Patimah, Sundari, & Muliadi. (2019). Nutritional analysis of spirulina sp to promote as superfood candidate. In *IOP conference series: materials science and engineering* (Vol. 509, p. 012031). IOP Publishing.
- Lima e Silva, A., Kurpan, D., dos Santos, A. C., Silva, T. D. S., Santo, I. D. O., de Oliveira, V. R. L., ... & Valle, A. F. D. (2025). Lab-and Pilot-Scale Effects of *Spirulina* (*Limnospira* sp.) Biomass Produced from Brewery Wastewater Treatment as a Biofertilizer for Barley (*Hordeum vulgare*) in Passo Fundo, Brazil. *Agriculture*, 15(22), 2397.
- López Mejía, N., Martínez Correa, H. A., & Lobatón García, H. F. (2024). Biostimulating activity of biomass extracts and supernatants from a culture of *Arthrospira platensis* enriched with L-tryptophan. *Journal of Applied Phycology*, 36(4), 1875-1884.
- Ma, Y., Dias, M. C., & Freitas, H. (2020). Drought and salinity stress responses and microbe-induced tolerance in plants. *Frontiers in plant science*, 11, 591911.
- Mansur, L., & Luiz, C. (2015). Oxidative stress in plants under drought conditions and the role of different enzymes. *Enzyme Engineering*.

- Marjanović, B., Benković, M., Jurina, T., Sokač Cvetnić, T., Valinger, D., Gajdoš Kljusurić, J., & Jurinjak Tušek, A. (2024). Bioactive compounds from *Spirulina* spp.—Nutritional value, extraction, and application in food industry. *Separations*, 11(9), 257.
- Masese, C. O., Odira, M., Marwa, C., Masese, D., Ponoth, P., & Gikonyo, A. (2025). Exploring the Potential of Plant-Based Biopesticides for Sustainable Crop Protection in Mwea, Kirinyaga County, Kenya.
- Meena, D. C., Birthal, P. S., & Kumara, T. K. (2025). Biostimulants for sustainable development of agriculture: A bibliometric content analysis. *Discover Agriculture*, 3(1), 2.
- Michalak, A. (2006). Phenolic compounds and their antioxidant activity in plants growing under heavy metal stress. *Polish journal of environmental studies*, 15(4).
- Mostafa, M. M., Hammad, D. M., Reda, M. M., & El-Sayed, A. E. K. B. (2024). Water extracts of *Spirulina platensis* and *Chlorella vulgaris* enhance tomato (*Solanum lycopersicum* L.) tolerance against saline water irrigation. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 14(17), 21181-21191.
- Mutale-Joan, C., Rachidi, F., Mohamed, H. A., Mernissi, N. E., Aasfar, A., Barakate, M., ... & Arroussi, H. E. (2021). Microalgae-cyanobacteria-based biostimulant effect on salinity tolerance mechanisms, nutrient uptake, and tomato plant growth under salt stress. *Journal of Applied Phycology*, 33(6), 3779-3795.
- Pal, P. K., Šic Žlabur, J., & Wu, H. (2024). Plant nutrition and biostimulants: regulators of secondary metabolites and crop productivity in both normal and abiotic stress conditions. *Frontiers in Plant Science*, 15, 1465149.
- Pandey, P., Singh, J., Achary, V. M. M., & Reddy, M. K. (2015). Redox homeostasis via gene families of ascorbate-glutathione pathway. *Frontiers in Environmental Science*, 3, 25.
- Parmar, P., Kumar, R., Neha, Y., & Srivatsan, V. (2023). Microalgae as next generation plant growth additives: Functions, applications, challenges and

- circular bioeconomy based solutions. *Frontiers in Plant Science*, 14, 1073546.
- Prakash, M., Sunilkumar, B., Bharathi, J. K., & Viswanathan, C. (2022). Root dynamics and drought stress management in plants—Overview. *Indian Journal of Experimental Biology (IJEB)*, 60(07), 449-455.
- Rady, M. M., Elrys, A. S., Selem, E., Mohsen, A. A., Arnaout, S. M., El-Sappah, A. H., ... & Desoky, E. S. M. (2023). Spirulina platensis extract improves the production and defenses of the common bean grown in a heavy metals-contaminated saline soil. *Journal of Environmental Sciences*, 129, 240-257.
- Rahim, A., Çakir, C., Ozturk, M., Şahin, B., Soulaïmani, A., Sibaouieh, M., ... & El Amiri, B. (2021). Chemical characterization and nutritional value of Spirulina platensis cultivated in natural conditions of Chichaoua region (Morocco). *South African Journal of Botany*, 141, 235-242.
- Rosario, J. C., & Josephine, R. M. (2015). Mineral profile of edible algae Spirulina platensis. *Int J Curr Microbiol App Sci*, 4(1), 478-483.
- Rout, G. R., & Sahoo, S. (2015). Role of iron in plant growth and metabolism. *Reviews in agricultural science*, 3, 1-24.
- Sachdev, S., Ansari, S. A., Ansari, M. I., Fujita, M., & Hasanuzzaman, M. (2021). Abiotic stress and reactive oxygen species: Generation, signaling, and defense mechanisms. *Antioxidants*, 10(2), 277.
- Safavi-Rizi, V., Uellendahl, K., Öhrlein, B., Safavi-Rizi, H., & Stöhr, C. (2021). Cross-stress tolerance: Mild nitrogen (N) deficiency effects on drought stress response of tomato (*Solanum lycopersicum* L.). *Plant-Environment Interactions*, 2(5), 217-228.
- Salehi-Lisar, S. Y., & Bakhshayeshan-Agdam, H. (2016). Drought stress in plants: causes, consequences, and tolerance. In *Drought stress tolerance in plants, Vol 1: physiology and biochemistry* (pp. 1-16). Cham: Springer International Publishing.
- Shaari, N. E. M., Khandaker, M. M., Tajudin, M. T. F. M., Majrashi, A., Alenazi, M. M., Bakar, M. F. A., & Badaluddin, N. A. (2025). Effects of Spirulina platensis and Sargassum polycystum extracts on morpho-physiological and

- metabolic responses of Pak Choi under cadmium stress. *Journal of Applied Phycology*, 1-27.
- Shaari, N. E. M., Khandaker, M. M., Tajudin, M. T. F. M., Majrashi, A., Alenazi, M. M., Badaluddin, N. A., ... & Mohd, K. S. (2023). Enhancing the growth performance, cellular structure, and rubisco gene expression of cadmium treated brassica Chinensis using Sargassum polycystum and Spirulina platensis extracts. *Horticulturae*, 9(7), 738.
- Sharma, P., Jha, A. B., Dubey, R. S., & Pessarakli, M. (2012). Reactive oxygen species, oxidative damage, and antioxidative defense mechanism in plants under stressful conditions. *J Bot* 2012: 1–26.
- Shedeed, Z. A., Gheda, S., Elsanadily, S., Alharbi, K., & Osman, M. E. (2022). Spirulina platensis biofertilization for enhancing growth, photosynthetic capacity and yield of Lupinus luteus. *Agriculture*, 12(6), 781.
- Shu, S., Yuan, Y., Chen, J., Sun, J., Zhang, W., Tang, Y., ... & Guo, S. (2015). The role of putrescine in the regulation of proteins and fatty acids of thylakoid membranes under salt stress. *Scientific reports*, 5(1), 14390.
- Shukla, P. S., Shotton, K., Norman, E., Neily, W., Critchley, A. T., & Prithiviraj, B. (2018). Seaweed extract improve drought tolerance of soybean by regulating stress-response genes. *AoB plants*, 10(1), plx051.
- Singh, P., Choudhary, K. K., Chaudhary, N., Gupta, S., Sahu, M., Tejaswini, B., & Sarkar, S. (2022). Salt stress resilience in plants mediated through osmolyte accumulation and its crosstalk mechanism with phytohormones. *Frontiers in Plant Science*, 13, 1006617.
- Stunda-Zujeva, A., Berele, M., Lece, A., & Šķesters, A. (2023). Comparison of antioxidant activity in various spirulina containing products and factors affecting it. *Scientific Reports*, 13(1), 4529.
- Szabados, L., & Saviouré, A. (2010). Proline: a multifunctional amino acid. *Trends in plant science*, 15(2), 89-97.
- Taha, M. A., Moussa, H. R., & Dessoky, E. S. (2023). The influence of Spirulina platensis on physiological characterization and mitigation of DNA damage in

- salt-stressed *Phaseolus vulgaris* L. plants. *Egyptian Journal of Botany*, 63(2), 607-620.
- Touzout, N., Ainas, M., Babaali, M., Moussa, H., Mihoub, A., Ahmad, I., ... & Székely, Á. (2025). Potential effect of non-nitrogen fixing cyanobacteria *Spirulina platensis* on growth promotion of wheat (*Triticum aestivum* L.) under salt stress. *Scientific Reports*, 15(1), 29029.
- Trotta, T., Porro, C., Cianciulli, A., & Panaro, M. A. (2022). Beneficial effects of spirulina consumption on brain health. *Nutrients*, 14(3), 676.
- Usharani, G., Saranraj, P., & Kanchana, D. (2012). Spirulina cultivation: A review. *Int J Pharm Biol Arch*, 3(6), 1327-1341.
- Vangenechten, B., De Coninck, B., & Ceusters, J. (2025). How to improve the potential of microalgal biostimulants for abiotic stress mitigation in plants?. *Frontiers in Plant Science*, 16, 1568423.
- Wach, D., & Skowron, P. (2022). An overview of plant responses to the drought stress at morphological, physiological and biochemical levels. *Polish Journal of Agronomy*, (50), 25-34.
- Wasaya, A., Zhang, X., Fang, Q., & Yan, Z. (2018). Root phenotyping for drought tolerance: a review. *Agronomy*, 8(11), 241.
- Wijayanti, I., Agustini, T. W., & Benjakul, S. (2024). Colour characteristics, phenolic content and antioxidant activity of *Spirulina platensis* soaked in basil (*Ocimum basilicum*) leaves extract. *International Journal of Food Science and Technology*, 59(3), 1490-1501.
- Wu, Q., Liu, L., Miron, A., Klímová, B., Wan, D., & Kuča, K. (2016). The antioxidant, immunomodulatory, and anti-inflammatory activities of *Spirulina*: an overview. *Archives of toxicology*, 90(8), 1817-1840.
- Xu, Q., Zhu, T., Zhao, R., Zhao, Y., Duan, Y., Liu, X., ... & Lu, X. (2023). *Arthrospira* promotes plant growth and soil properties under high salinity environments. *Frontiers in Plant Science*, 14, 1293958.
- Yeken, M. Z. (2023). Fasulye bitkisindeki bazı transkripsiyon faktörlerin abiyotik stres etmenlerine karşı tepkileri. İçinde A. Yılmaz & H. Yılmaz (Ed.),

- Bitkilerde stres direncini artırma yöntemleri (pp. 19-55). Adıyaman, Türkiye: İKSAD Publishing House.
- Yılmaz, H. K., & Duru, M. D. (2011). Syanobakteri *Spirulina platensis*' in besin kimyası ve mikrobiyolojisi. *Türk Bilimsel Derlemeler Dergisi*, 4(1), 31-43.
- Yılmaz, H., & Yılmaz, A. (2025). Hidden hunger in the age of abundance: the nutritional pitfalls of modern staple crops. *Food Science & Nutrition*, 13(2), e4610.
- Zaouay, F., Salem, H. H., Labidi, R., & Mars, M. (2014). Development and quality assessment of new drinks combining sweet and sour pomegranate juices. *Emirates Journal of Food & Agriculture (EJFA)*, 26(1).
- Zapata, D., Arroyave, C., Cardona, L., Aristizábal, A., Poschenrieder, C., & Llugany, M. (2021). Phytohormone production and morphology of *Spirulina platensis* grown in dairy wastewaters. *Algal Research*, 59, 102469.
- Zhang, X., Yin, J., Ma, Y., Peng, Y., Fenton, O., Wang, W., ... & Chen, Q. (2024). Unlocking the potential of biostimulants derived from organic waste and by-product sources: improving plant growth and tolerance to abiotic stresses in agriculture. *Environmental Technology & Innovation*, 34, 103571.
- Zhang, X., Zhang, F., Luo, G., Yang, S., & Wang, D. (2015). Extraction and separation of phycocyanin from *Spirulina* using aqueous two-phase systems of ionic liquid and salt. *Journal of Food and Nutrition Research*, 3(1), 15-19.
- Zheng, F. L., Tan, Z. P., Zhang, Y., Xu, X. H., Hashem, A., Debnath, A., & Wu, Q. S. (2024). Enhancing walnut growth and drought tolerance through *Serendipita indica*: focus on mitochondrial antioxidant defense. *Plant Growth Regulation*, 104(3), 1697-1706.

BÖLÜM 6

ÇİFTLİK HAYVANLARINDA GENETİK İYİLEŞTİRME: MAS TEMELLİ ISLAH UYGULAMALARI

Öğr. Gör. Dr. Onur VURAL^{1*}

DOI: <https://www.doi.org/10.5281/zenodo.18082770>

^{1*} Akdeniz Üniversitesi, Kumluca Meslek Yüksekokulu, Bitkisel ve Hayvansal Üretim bölümü, Antalya, Türkiye. onurvural@akdeniz.edu.tr.

GİRİŞ

Markör Destekli Seleksiyon (MAS)

Tarımsal üretim sistemlerinde çevresel ve genetik sınırlar önemli bir sorun oluşturmaktadır. Çiftlik hayvan yetiştiriciliğinde ise besleme, barındırma ve bakım uygulamalarındaki eksiklikler de hayvan verimliliğini olumsuz etkilemektedir. Bu nedenle verim artışını destekleyen biyoteknolojik yöntemlerin kullanımı günümüzde daha büyük bir gereklilik hâline gelmiştir. Geleneksel ıslah yöntemleri, bu teknolojilerle birlikte uygulandığında daha etkili sonuçlar vermektedir. Bu kapsamda Markör Destekli Seleksiyon (MAS), DNA temelli genetik belirteçleri kullanarak üstün özelliklere sahip genotipleri yüksek doğrulukla belirleyen önemli bir moleküler ıslah tekniğidir. Son 20 yılda yapılan çalışmalarda MAS, ıslah sürecinin hızını ve verimliliğini artırmada güçlü bir araç olarak öne çıkmaktadır (Sharma ve ark., 2024) (Şekil 1). MAS’da kullanılan RFLP, AFLP, SNP ve mikrosatellit gibi genetik belirteçler, istenen özelliklere sahip genotiplerin yüksek oranda tanımlanmasına olanak tanımakta ve böylece seleksiyon programlarının doğruluğunu ve hızını artırmaktadır. Yapılan güncel çalışmalarda, MAS’ın çiftlik hayvanlarında süt, et, büyüme ve üreme gibi temel verim özelliklerini geliştirmede başarılı şekilde uygulandığı ve geleneksel seleksiyon yöntemlerine kıyasla %10–20 oranında ek genetik kazanç sağlayabildiğini ortaya koymaktadır (Wakchaure ve ark., 2015; Salgado ve ark., 2022).



Şekil 1. Çiftlik hayvanlarında markör destekli seleksiyon (MAS) sürecinin şematik gösterimi.

Çiftlik Hayvanlarında MAS Uygulamaları

Süt sığırlarında MAS, süt verimi, döl verimi ve diğer ekonomik öneme sahip özelliklerin belirlenmesinde etkili bir yaklaşımdır. Son çalışmalar, özellikle *LAP3* ve *SIRT1* genlerindeki belirli polimorfizmlerin buzağılama aralığı ve gebe kalma oranı gibi temel üreme performansı ölçütleriyle anlamlı düzeyde ilişkili olduğunu göstermektedir (Worku ve Verma, 2024). Bu bulgular, elde edilen genetik varyantların üreme verimliliğinin iyileştirilmesine yönelik seleksiyon programlarında kullanılabilirliğini desteklemektedir. *BLG*,

CSN3, *DGATI*, *GH*, *PITI* ve *PRL* gibi süt üretiminde rol oynadığı bilinen genlere yönelik yapılan meta-analiz çalışmasında, genlerdeki belirli polimorfizmlerin süt verimi, yağ ve protein yüzdesi gibi kritik üretim parametreleriyle anlamlı ilişkiler sergilediğini ortaya koymuştur (Özdemir ve ark. 2025). Özellikle *DGATI* ve *CSN3* gen varyantlarının süt bileşiminde belirleyici etkiler taşıdığını, *GH*, *PITI* ve *PRL* genlerindeki polimorfizmlerin ise süt verim düzeyleri üzerinde önemli katkılar sağladığını göstermektedir. Bu bulgular, söz konusu genetik belirteçlerin MAS temelli seleksiyon programlarına entegre edilmesinin, Holstein sürülerinde süt verimliliğinin artırılmasına ve genetik ilerlemenin hızlandırılmasına olanak tanıdığını ortaya koymaktadır. Bunun yanı sıra, sığırlarda MAS kullanımı yalnızca verim özelliklerinin iyileştirilmesinde değil, aynı zamanda popülasyonlarda kalıtsal hastalıkların kontrol altına alınmasında da kritik bir araç hâline gelmiştir. Türkiye’de yerli sığır ırkları ile Holstein ve Simmental popülasyonlarında kolesterol eksikliğiyle ilişkili *APOB* mutasyonunun incelendiği çalışma, bu zararlı resesif alelin farklı ırklar arasında değişen frekanslarda bulunduğunu ortaya koymuştur (Meydan ve ark., 2023). Ayrıca son yıllarda genom taramaları sonucunda Süt sığırı ırklarında erken embriyonik ölümlere yol açan 30’dan fazla resesif genotip lokusu tanımlanmıştır (Besnard ve ark. 2024). Bu alellerin erken yaşta belirlenmesinin, MAS ve genomik seleksiyon programlarına entegre edilerek taşıyıcı hayvanların kontrollü şekilde yönetilmesine olanak sağladığını göstermektedir. Böylece sürülerde genetik hastalık azaltılmakta, üreme başarısı ve genel verimlilik uzun vadede artırılabilir. Özetle, MAS’ın süt sığırlarında hem verim

artırıcı genleri seçmede hem de istenmeyen genetik kusurları elimine etmede önemli bir araç olduğu kanıtlanmıştır.

Koyunlarda MAS, özellikle döl verimi, büyüme ve karkas yapısı gibi özelliklerin geliştirilmesinde etkili bir şekilde kullanılmaktadır. Bu türlerde bazı nitelikler çok sayıda genin küçük etkilerine bağlı olsa da, majör gen etkisine sahip önemli örnekler de mevcuttur. Kong ve ark. (2024), *FecB* tek nükleotid polimorfizmlerinin üreme performansı ve vücut büyüklüğü ile ilişkisini inceleyerek, belirli *FecB* genotiplerinin ovülasyon hızı ve doğum oranı üzerinde anlamlı etkiler gösterdiğini bildirmiştir. Küçükbaş hayvan yetiştiriciliğinde et verimi, karkas kompozisyonu ve yağ dağılımı gibi ekonomik öneme sahip aday genlerin tanımlanması sürdürülebilir hayvan yetiştiriciliğinde önemli bir paya sahiptir. Bu kapsamda Khan ve ark. (2025), koyunlarda et üretimiyle ilişkili çok sayıdaki aday genin örneğin *MSTN*, *LEP*, *CAST*, *GH*, *IGF1*, *FABP4*, *TUSC5* fenotipik varyasyon üzerindeki etkilerini sistematik olarak değerlendirmiştir. Çalışmada, bu genlerdeki spesifik polimorfizmlerin karkas ağırlığı, kas gelişimi, intramüsküler yağ (IMF) oranı ve yağ dağılımı gibi kritik performans göstergeleriyle güçlü ilişkiler gösterdiği bildirilmiştir. Çalışmada, bu genetik varyantların seleksiyon programlarına entegre edilmesinin, özellikle kas-yag oranının optimize edilmesi ve et veriminin iyileştirilmesi açısından önemli bir avantaj sağladığını vurgulamaktadır. Bu kapsamda aday genlere dayalı MAS uygulamaları, koyun sürülerinde hem genetik ilerlemenin hızlandırılmasına hem de et kalitesinin artırılmasına yönelik etkili bir strateji olarak öne çıkmaktadır. Genel olarak yapılan

araştırmalar, markör destekli seleksiyon programlarının koyunlarda karkas kalitesini artırmada ve ticari üretim verimliliğini yükseltmede başarılı olduğunu bildirmektedir (Khan ve ark., 2025).

Keçi yetiştiriciliğinde et verimi, büyüme performansı ve vücut yapısı özellikleri üzerine yapılan çalışmalarda, aday gen polimorfizmlerinin canlı ağırlık artışı ve et verimiyle ilişkili olduğu gösterilmiştir. Chalbi ve ark. (2023), Tunus yerli keçilerinde *MSTN*, *IGF1* ve *BMP2* genlerinin çeşitli morfometrik özelliklerle anlamlı ilişkiler gösterdiğini ortaya koymuştur. Özellikle kas gelişiminde önemli rol oynayan *MSTN* ve büyüme genleri olan *IGF1* ve *BMP2*'nin gövde uzunluğu, cidago yüksekliği ve göğüs çevresi gibi üretim açısından önemli morfolojik parametreleri etkilediği bildirilmiştir. Bu sonuçlar, söz konusu genetik varyasyonların keçilerde büyüme ve vücut kompozisyonunu iyileştirmeye yönelik MAS programlarına entegre edilebilecek değerli moleküler belirteçler olduğunu göstermektedir. Çalışma, özellikle yerli keçi populasyonlarında büyüme performansının genetik olarak desteklenmesine yönelik ıslah stratejilerinin geliştirilmesine önemli bir katkı sağlayacağı düşünülmektedir. Süt keçi ırklarında yapılan çalışmalarda ise, süt yağ ve protein oranlarını etkileyen genetik varyantlar tanımlanmış ve bu markörlerin seleksiyon programlarına entegre edilmesiyle hem süt verimi hem de süt bileşiminin iyileştirilmesi amaçlanmıştır. Örneğin, κ -kazein ve β -laktoglobulin genlerindeki bazı alellerin süt yağ ve protein yüzdesiyle anlamlı derecede ilişkili olduğu belirlenmiştir (Salgado ve ark., 2022). Keçilerde döl verimi üzerine de markör taramaları yapılmaktadır. Tıpkı

koyunlarda olduğu gibi, keçilerde de ovulasyon oranını etkileyen genler mevcuttur. *BMP15* ve *GDF9* genlerindeki belirli mutasyonların belirli SNP'lerin bir batında doğan yavru sayısı ile anlamlı ilişkiler gösterdiğini ortaya koymuştur. Keçilerde ikiz veya üçüz doğum ihtimalini artırdığı bazı yerli ırklarda raporlanmıştır (Faris ve ark., 2025). Bu sonuçlar, söz konusu genetik belirteçlerin keçi popülasyonlarında çoğul doğum oranının iyileştirilmesine yönelik MAS programlarına entegre edilebileceğini ve döl veriminin geliştirilmesinde etkili araçlar sunabileceğini göstermektedir. Keçi yetiştiriciliğinde süt verimi ve süt bileşenlerinin iyileştirilmesine yönelik MAS uygulamalarında kazein genlerindeki genetik varyasyonlar önemli bir rol oynamaktadır. Dettori ve ark. (2023), Sarda keçilerinde kazein genlerindeki polimorfizmlerin bu varyantların süt protein ve yağ içerikleriyle anlamlı ilişkiler gösterdiğini ortaya koymuştur. Çalışma, özellikle *CSN1S2* genindeki allelik farklılıkların süt verimini önemli ölçüde etkilediğini ve bu genin verim özelliklerinin genetik kontrolünde kritik bir konuma sahip olduğunu göstermektedir. Elde edilen bulgular, kazein gen varyantlarının süt miktarı ve bileşiminin iyileştirilmesine yönelik MAS programlarında etkili genetik belirteçler olarak kullanılabileceğini desteklemekte; böylece süt keçisi ıslahında daha hedefli ve hızlı bir genetik ilerlemenin mümkün olabileceğini göstermektedir.

Tavuk yetiştiriciliğinde canlı ağırlık, büyüme hızı ve genel verimliliğin artırılmasına yönelik ıslah programlarında genom çapında ilişkilendirme çalışmaları (GWAS) ve meta-analizler, MAS

stratejilerinin geliştirilmesinde önemli bir temel oluşturmaktadır. Wen ve ark. (2025) tarafından üç farklı tavuk popülasyonunda, canlı ağırlığı ile ilişkili çok sayıda anlamlı SNP tespit etmiştir. Özellikle *PLIN1*, *IGF2BP1*, *FGFR3* ve *LCORL* genlerinin büyüme ve iskelet gelişiminin önemli olduğunu göstermiştir. Benzer şekilde Luning tavuklarında yapılan GWAS analizleri, *PPFIA2*, *KITLG*, *DUSP6* ve *FAT3* gibi genlerin vücut büyüklüğü ve kas gelişimi üzerinde etkili olduğunu belirlemiş ve bu genetik belirteçlerin büyüme performansının iyileştirilmesine yönelik MAS ve seleksiyon programlarına entegre edilebileceğini ortaya koymuştur (Li ve ark.,2025). Tavuklarda yumurta verim özelliklerinin genetik olarak geliştirilmesinde de MAS önemli bir araçtır. Schreiweis ve ark. (2006), F₂ popülasyonunda QTL haritalama çalışmasında yumurta üretimi ve canlı ağırlık ile ilişkili çok sayıda QTL tanımlamış; bazı mikrosatellit markörlerinin bu özelliklerdeki varyasyonu anlamlı biçimde açıkladığını göstermiştir. Bu bulgular, yumurta verim özelliklerinin iyileştirilmesine yönelik markör-temelli ıslah stratejilerinin uygulanabilirliğini desteklemektedir. Hastalık direncinin artırılması da MAS'ın tavuk yetiştiriciliğindeki önemli kullanım alanlarından biridir. Kannan ve ark. (2025), Newcastle hastalığına (NDV) karşı genetik direnci kapsamlı şekilde değerlendirerek MHC-B kompleksi ve çeşitli SNP/mikrosatellit markörlerinin hastalık duyarlılık düzeyleri ile ilişkili olduğunu bildirmiştir. Bu markörlerin seleksiyon programlarına entegre edilmesi, NDV başta olmak üzere yaygın enfeksiyonlara karşı daha dirençli sürülerin geliştirilmesine olanak sağlamaktadır. Genel olarak MAS, tavuk yetiştiriciliğinde büyüme performansı, yumurta verimi ve

hastalık direnci gibi temel üretim parametrelerinin geliştirilmesine katkı sağlayan güçlü bir genomik araç olarak önemini korumaktadır.

1. MAS SINIRLAMALARI VE ZORLUKLARI

MAS yöntemi, sunduğu avantajların yanı sıra çeşitli sınırlamalara ve uygulama zorluklarına da sahiptir. Bu sınırların farkında olunması, MAS programlarının daha etkin bir şekilde kullanılmasına yardımcı olacaktır. Başlıca sınırlamalar aşağıdaki gibi özetlenebilir:

- 1) Markör ile hedef QTL arasındaki bağlantının (linkage) rekombinasyon sonucu zamanla zayıflaması, seçimin doğruluğunu düşürebilmektedir. Nesiller boyunca meydana gelen rekombinasyonlar, markör ile gerçek etkili gen arasındaki bağlantıyı zayıflatır.
- 2) Her bir özellik için yeterli doğrulukta ve güvenilir markörlerin tanımlanması gerekmektedir; aksi durumda MAS, hedeflenen genetik kazanımı sağlayamamaktadır.
- 3) Tüm bireylerin genotip bilgilerinin elde edilmesi geniş popülasyonlarda yüksek maliyet ve teknik zorluklar oluşturmakta, bu da MAS'ın ticari hayvancılıktaki uygulanabilirliğini azaltmaktadır.
- 4) Poligenik yapıya sahip özelliklerin örneğin verim, üreme performansı, et verimi kontrolünde tek bir marköre dayalı seleksiyon yetersiz kalmakta ve genetik ilerlemeyi sınırlamaktadır.
- 5) MAS programlarının etkin biçimde uygulanabilmesi için yüksek kaliteli fenotipik ve markör verilerinin düzenli olarak kayıt altına alınması gereklidir; ancak birçok hayvancılık sisteminde bu tür verilerin elde edilmesi sınırlıdır.

6) QTL etkilerinin farklı popülasyonlarda ve yıllarda tutarsızlık göstermesi, MAS'ın güvenilirliğini sınırlayan bir problemdir (Wakchaure ve ark., 2015).

SONUÇ

Çiftlik hayvanlarında verim özelliklerinin iyileştirilmesinde öne çıkan önemli bir biyoteknolojik araç olan MAS, özellikle majör genlerin belirgin etki gösterdiği özelliklerde yüksek etkinlik sağlamaktadır. Bu durumlarda MAS, hedeflenen allellerin popülasyonda hızla sabitlenmesine olanak tanıyarak kısa sürede somut genetik ilerlemeler elde edilmesini mümkün kılmaktadır. Ancak poligenik özellikler söz konusu olduğunda, etkinliğin artırılabilmesi için daha güçlü markörlerin veya nedensel mutasyonların tanımlanmasına yönelik araştırmaların sürdürülmesi gerekmektedir. Bu bağlamda MAS, güncel hayvan ıslah programlarının temel bir bileşeni olarak önemini korumakta ve gelecekte daha kapsamlı genetik iyileştirme stratejilerinin geliştirilmesine katkı sunacaktır.

KAYNAKÇA

- Besnard, F., Guintard, A., Grohs, C., Guzylack-Piriou, L., Cano, M., Escoufflaire, C., Capitan, A. (2024). Massive detection of cryptic recessive genetic defects in dairy cattle mining millions of life histories. *Genome Biology*, 25(1), 248.
- Chalbi, S., Dettori, M. L., Djemali, M. N., Vacca, G. M., Petretto, E., Pazzola, M., & Bedhiah-Romdhani, S. (2023). Haplotype structure of MSTN, IGF1, and BMP2 genes in Tunisian goats (*Capra hircus*) and their association with morphometric traits. *Tropical Animal Health and Production*, 55(1), 2.
- Dettori, M. L., Pazzola, M., Noce, A., Landi, V., Vacca, G. M. (2023). Variations in casein genes are associated with milk protein and fat contents in Sarda goats (*Capra hircus*), with an important role of CSN1S2 for milk yield. *Animals*.
- Faris, A. S., Rodrigues, K. F., Zeshan, B., Sarker, S., Candyrine, S. C. L., Rahman, M. M., Bhuiyan, M. S. A. (2025). Polymorphism analysis of GDF9 and BMP15 genes and their association with litter size in crossbreed goats in Malaysia. *Tropical Animal Health and Production*, 57(4), 1-10.
- Kannan, T. A., Palani, S., Ramasamy, S., Karuppusamy, S., Peters, S. O., & Muthusamy, M. (2025). Genetic Resistance to Newcastle Disease in Poultry: A Narrative Review. *Poultry*, 4(3), 40.
- Khan, M. Z., Ying, H., Akhtar, F., Chen, W., Liu, X., Zhao, M., ... & Wang, C. (2025). Potential candidate genes influencing meat production phenotypic traits in sheep: A review. *Frontiers in Veterinary Science*, 12, 1616533.
- Kong, L., Li, S., Pan, Y., Li, J., Li, S., Liu, Y., ... & Wang, Z. (2024). Association analysis of single nucleotide polymorphisms in the sheep FecB gene with reproductive and body size performance. *Archives Animal Breeding*, 67(1), 81-95.
- Li, Z., Nong, Y., Liu, Y., Wang, Z., Wang, J., & Li, Z. (2025). Genome-Wide Association Study of Body Size Traits in Luning Chickens Using Whole-Genome Sequencing. *Animals: an Open Access Journal from MDPI*, 15(7), 972.

- Meydan, H., Bedir, D.K., Vural, O., Yildiz, M. A., Agerholm, J. S. (2023). Prevalence of carriers of cholesterol deficiency-associated APOB mutation in some native, Holstein and Simmental cattle breeds in Türkiye. Turkish Journal of Veterinary & Animal Sciences, 47(6), 584-587.
- Ozdemir, M., Motmain, Z., Ekinci, K., Saygılı, E. (2025). Associations between BLG, CSN3, DGAT1, GH, PIT1, and PRL gene polymorphisms and milk production traits in Holstein dairy cows: A meta-analysis. Biochemical Genetics, 63(1), 1-21.
- Salgado Pardo, J. I., Delgado Bermejo, J. V., González Ariza, A., León Jurado, J. M., Marín Navas, C., Iglesias Pastrana, C., Navas González, F. J. (2022). Candidate genes and their expressions involved in the regulation of milk and meat production and quality in goats (*Capra hircus*). Animals, 12(8), 988.
- Schreiweis, M. A., Hester, P. Y., Settar, P., & Moody, D. E. (2006). Identification of quantitative trait loci associated with egg quality, egg production, and body weight in an F2 resource population of chickens 1. Animal genetics, 37(2), 106-112.
- Sharma, P., Doultani, S., Hadiya, K. K., George, L. B., & Highland, H. N. (2024). Overview of marker-assisted selection in animal breeding. HISTORY, 9(11).
- Wakchaure, R., Ganguly, S., Praveen, P. K., Kumar, A., Sharma, S., & Mahajan, T. J. J. D. M. T. (2015). Marker assisted selection (MAS) in animal breeding: a review. J. Drug. Metab. Toxicol, 6(5), e127.
- Wen, J., Zheng, M., Wang, Z., Hu, X., & Li, Z. (2025). Genome-Wide Association Study and Meta-Analysis Uncovers Key Candidate Genes for Body Weight Traits in Chickens. Genes, 16(8), 945.
- Worku, D., Verma, A. (2024). Genetic variation in bovine LAP3 and SIRT1 genes associated with fertility traits in dairy cattle. BMC Genomic Data, 25(1), 32.

BÖLÜM 7

SÜT SIĞIRLARINDA BESİN YETERSİZLİĞİNE BAĞLI VERİM KISITLARI

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

DOI: <https://www.doi.org/10.5281/zenodo.18082772>

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

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

GİRİŞ

Süt, dünya genelinde üretimi en yaygın olan ve insan beslenmesinde temel öneme sahip hayvansal ürünlerden biridir. Artan dünya nüfusu ve hayvansal protein ihtiyacı doğrultusunda süt sığırcılığında yürütülen uzun süreli ıslah ve besleme çalışmaları sayesinde süt veriminde önemli artışlar sağlanmıştır. Küresel ölçekte 2023 yılında toplam süt üretimi yaklaşık 981 milyon ton olarak gerçekleşmiş olup bu üretimin %84'ü ineklerden elde edilmiştir (FAO, 2025). Ancak bu gelişmelerle birlikte, özellikle yüksek süt verimli ineklerde beslemeye bağlı metabolik hastalıkların görülme sıklığı da artmıştır.

Yüksek verimli süt sığırlarında metabolik bozukluklar klinik ve subklinik şekilde görülmekle birlikte çoğunlukla laktasyon sürecinde subklinik seyir göstermektedir. Subklinik metabolik hastalıklar klinik belirtiler oluşturmada ilerleyebilmekte ve bu durum hastalıkların erken dönemde fark edilmesini güçleştirmektedir. Bununla birlikte, söz konusu bozukluklar klinik metabolik hastalıkların ortaya çıkma riskini artırmakta, süt verimini önemli ölçüde düşürmekte ve işletmeler açısından ciddi ekonomik kayıplara neden olmaktadır (Kleen ve Cannizzo, 2012; Yanar ve Aktaş, 2021).

Geçiş Döneminin Önemi

Doğumdan önceki üç hafta ile doğumdan sonraki üç haftayı kapsayan ve geçiş dönemi olarak tanımlanan süreç yüksek verimli süt sığırları açısından fizyolojik ve metabolik açıdan kritik bir dönemdir. Bu dönemde hayvanların enerji, protein, mineral ve vitamin

gereksinimleri hızla artarken, kuru madde tüketimi genellikle bu artışı karşılayacak düzeye ulaşamamaktadır. Bunun sonucunda negatif enerji dengesi ortaya çıkmakta ve metabolik adaptasyon süreci başlamaktadır.

Hormonal ve metabolik değişiklikler laktasyonun başlangıcında süt veriminin hızla artmasına paralel olarak enerji gereksinimini daha da yükseltmektedir. Yetersiz kuru madde alımı nedeniyle karşılanamayan enerji ihtiyacı, vücut yağ dokusunun mobilizasyonu ile telafi edilmeye çalışılmaktadır. Bu durum kan metabolitlerinde önemli değişikliklere yol açmakta ve ketozis, hipokalsemi, hipomagnezemi ve rumen asidozu gibi birçok metabolik hastalığın gelişmesine zemin hazırlamaktadır (Atalay, 2019). Ayrıca bu hastalıklar çoğu zaman birbirini tetikleyerek sürü sağlığını olumsuz yönde etkilemektedir.

1. BESLEMESİNE BAĞLI METABOLİK HASTALIKLAR

Geçiş dönemi ve erken laktasyon sürecinde ortaya çıkan metabolik hastalıkların büyük bir bölümü doğrudan veya dolaylı olarak besleme hatalarından kaynaklanmaktadır. Besin maddelerinin yetersizliği, dengesiz rasyonlar, hatalı kuru dönem beslemesi ve ani yem değişiklikleri bu hastalıkların temel nedenleri arasında yer almaktadır. Bu kitap bölümünde, yüksek verimli süt sığırlarında kuru dönemden laktasyona geçiş sürecinde ve özellikle laktasyonun ilk haftalarında sıklıkla görülen, tamamen besleme faktörlerine bağlı metabolik hastalıklar ayrıntılı olarak ele alınacaktır. Söz konusu hastalıkların etiyolojisi, besleme ile ilişkileri ve önlenmesine yönelik temel

besleme stratejileri üzerinde durulacak; uygun ve dengeli besleme programlarının metabolik hastalıkların kontrolündeki önemi vurgulanacaktır.

1.1. KETOZİS

1.1.1. Etiyoloji ve Patogenez

Ketozis, yüksek verimli süt sığırlarında negatif enerji dengesine bağlı olarak gelişen ve kanda keton cisimciklerinin (asetoasetik asit, β -hidroksibütirik asit (BHBA) ve aseton) artışı ile karakterize edilen metabolik bir hastalıktır. Hastalık genellikle laktasyonun ilk altı haftasında ortaya çıkmakta olup, en sık doğumu takip eden ilk 21 gün içerisinde görülmektedir. Klinik ve subklinik formlarda seyredabilmekte ve özellikle subklinik formu, belirgin klinik belirtiler göstermemesi nedeniyle çoğu zaman gözden kaçmaktadır (Umurcular ve Gülşen, 2005).

Klinik ketoziste iştahsızlık, canlı ağırlık kaybı, süt veriminde düşüş ve bazı olgularda sinirsel belirtiler gözlemlenmektedir. Ancak bu klinik belirtiler ortaya çıkmadan önce, keton cisimciklerinin kanda artmasıyla subklinik ketozis şekillenmektedir.

Subklinik ketozis, klinik belirtiler olmaksızın ilerlemesi nedeniyle sürü düzeyinde daha büyük ekonomik kayıplara yol açmaktadır. Özellikle süt veriminde azalma, döl verimi problemleri ve diğer metabolik hastalıkların görülme riskindeki artış, subklinik ketozisin önemini artırmaktadır.

Ketozisin oluşumunda temel etken, artan süt verimine paralel olarak yükselen enerji ihtiyacının, yetersiz kuru madde tüketimi nedeniyle karşılanamamasıdır. Geçiş döneminde negatif enerji dengesine giren hayvanlarda, vücut enerji gereksinimini karşılamak amacıyla yağ dokusu mobilize edilir ve bu süreçte serbest yağ asitleri (NEFA) kana geçer. Karaciğerde metabolize edilen NEFA'ların önemli bir bölümü keton cisimciklerine dönüştürülmektedir. Açlık veya belirgin negatif enerji dengesine maruz kalan hayvanlarda, karaciğerde metabolize olan serbest yağ asitlerinin çok büyük bir kısmı (%81) keton cisimciklerine dönüştüğü bildirilmiştir (Schultz, 1971).

Ketozis; etiyolojik nedenlerine göre farklı şekillerde sınıflandırılmaktadır. Rasyonda yetersiz düzeyde karbonhidrat bulunmasına bağlı olarak gelişen form “primer ketozis” olarak adlandırılmaktadır. Yüksek miktarda bütirik asit içeren silajların tüketilmesi sonucu ortaya çıkan form “alimenter ketozis” olarak tanımlanırken, lipojenik özellikteki rasyonlara bağlı olarak gelişen ketozis “spontan ketozis” olarak ifade edilmektedir. Diğer metabolik hastalıkların (abomasum deplasmanı, metritis, mastitis vb.) sonucunda şekillenen ketozis ise “sekonder ketozis” olarak sınıflandırılmaktadır (Yıldırım, 2020).

1.1.2. Tanı ve Teşhis

Ketozisin tanı ve teşhisinde en güvenilir yöntemlerden biri, kan serumunda β -hidroksibütirik asit (BHBA) düzeyinin belirlenmesidir.

BHBA, subklinik ketozisin erken dönemde saptanmasında önemli bir biyokimyasal belirteçtir.

Sağmal ineklerde kan serumunda BHBA düzeyinin 1 mmol/L'nin altında, kuru dönemdeki ineklerde ise 0,6 mmol/L'nin altında olması gerekmektedir. Klinik ketozisin gelişme olasılığının sağmal ineklerde kan serum BHBA konsantrasyonunun 1,4 mmol/L'nin üzerine çıkması durumunda oldukça yüksek olduğu bildirilmektedir (Quiroz-Rocha ve ark., 2009). Ayrıca idrar ve süt örneklerinde keton cisimciklerinin tespiti de tanıda yardımcı yöntemler arasında yer almaktadır.

1.1.3. Geçiş Dönemi ve Enerji Metabolizması ile İlişkisi

Kuru dönemde hızla gelişen fetüsün enerji gereksinimi ve doğum sonrası başlayan laktasyonla birlikte artan süt üretimi, ineklerin enerji ihtiyacını önemli ölçüde artırmaktadır. Ancak bu dönemde yeterli yem tüketiminin sağlanamaması, ketozisin ortaya çıkmasında temel risk faktörüdür. Laktasyonun dördüncü gününde hayvanın ihtiyaç duyduğu enerjinin, yemle sağlanan enerjiden yaklaşık %26 daha fazla olduğu bildirilmektedir. Süt üretimi için hayvan tarafından tüketilen kuru maddeden elde edilen net enerjinin %97'si ve metabolik proteinin %83'ü kullanılmaktadır (Serbester ve ark., 2012).

Negatif enerji dengesi derinleştikçe, öncelikle karaciğerde depo edilen glikojen kullanılır. Glikojen rezervlerinin yetersiz kalması durumunda ise yağ dokusu parçalanarak glikoneogenez yoluyla enerji üretimi sağlanmaya çalışılmaktadır (Kominiarek ve Rajan, 2016). Bu süreç,

keton cisimciklerinin aşırı üretimine ve ketozisin şekillenmesine neden olmaktadır.

1.1.4. Tedavi ve Korunma Yaklaşımları

Ketozisin tedavisinde temel amaç, negatif enerji dengesinin düzeltilmesi ve keton cisimciklerinin üretiminin azaltılmasıdır. Tedavi sürecinde enerji yoğunluğunun artırılması, glikojenik maddelerin rasyona eklenmesi ve iştahın desteklenmesi öncelikli hedefler arasındadır. Propilen glikol, gliserol ve niasin gibi glikojenik maddeler yaygın olarak kullanılmaktadır. Klinik vakalarda intravenöz glikoz uygulamaları ve destekleyici vitamin-mineral takviyeleri tercih edilebilmektedir.

Ketozisten korunmada ise geçiş dönemi beslemesinin doğru planlanması, kuru dönem kondisyon skorunun optimal düzeyde tutulması, ani yem değişikliklerinden kaçınılması ve kuru madde tüketiminin artırılmasına yönelik stratejilerin uygulanması büyük önem taşımaktadır.

1.2. HİPOKALSEMİ

1.2.1. Etiyoloji ve Patogenez

Hipokalsemi, yüksek verimli süt sığırlarında doğum ve laktasyon başlangıcı ile birlikte sütle büyük miktarda kalsiyumun (Ca) vücuttan uzaklaştırılmasına karşın, diyetle alınan kalsiyumun bu kaybı karşılayamaması sonucu gelişen metabolik bir hastalıktır. Özellikle

doğumu takip eden ilk günlerde süt üretiminin hızla artması, hayvanın kalsiyum ihtiyacını ani ve belirgin şekilde yükseltmektedir.

Hipokalsemi klinik ve subklinik formlarda görülmektedir. Klinik hipokalsemi, kas titremeleri, koordinasyon bozukluğu, yatma eğilimi, iştahsızlık ve ileri vakalarda koma ile karakterizedir. Ancak klinik belirtiler ortaya çıkmadan önce, serum kalsiyum düzeyinin düşmesiyle subklinik hipokalsemi gelişmektedir.

Subklinik hipokalsemi, belirgin klinik semptomlar göstermemekle birlikte; rumen motilitesinde azalma, yem tüketiminde düşüş, süt veriminde azalma ve diğer metabolik hastalıkların (ketozis, abomasum deplasmanı, metritis) görülme riskinde artış ile ilişkilidir. Bu nedenle sürü sağlığı ve ekonomik verimlilik açısından klinik hipokalsemiden daha yaygın ve önemli bir sorun olarak kabul edilmektedir.

Organizma, kalsiyum homeostazisini sağlamak amacıyla iki temel mekanizmayı devreye sokmaktadır: bağırsaklardan kalsiyum emiliminin artırılması ve kemik dokuda depo edilen kalsiyumun mobilizasyonu. Bu süreçte paratiroid hormon (PTH), kemiklerden kalsiyum mobilizasyonunu artırırken; 1,25-dihidroksi vitamin D₃ ise bağırsaklardan kalsiyum emilimini artırıcı etki göstermektedir. Ancak bu hormonal düzenleyici mekanizmaların yetersiz kalması durumunda serum kalsiyum düzeyi fizyolojik sınırların altına düşmekte ve hipokalsemi şekillenmektedir.

Hipokalseminin oluşumunda risk faktörleri arasında; kuru dönemde aşırı kalsiyum içeren rasyonlarla besleme, hipomagnezemi, metabolik

alkaloz, D vitamini metabolizmasındaki bozukluklar, kalsitonin ve glikokortikoid hormonlarının düzeyi yer almaktadır (Goff, 2006). Özellikle kuru dönemde yüksek kalsiyum içeren diyetler, doğum sonrası PTH yanıtının baskılanmasına ve kalsiyum mobilizasyonunun gecikmesine neden olmaktadır.

1.2.2. Tanı ve Teşhis

Hipokalseminin tanısında en güvenilir yöntem, kan serumunda toplam kalsiyum düzeyinin belirlenmesidir. Sığırlarda normal serum kalsiyum düzeyi 9–12 mg dL⁻¹ arasında değişmektedir. Subklinik hipokalsemi vakalarında ise kan serumunda toplam kalsiyum konsantrasyonunun 5,5–8,0 mg dL⁻¹ seviyelerine düştüğü bildirilmektedir (Gül, 2006).

Klinik hipokalsemide ise serum kalsiyum düzeyi bu değerlerin daha da altına inmekte ve klinik belirtilerle birlikte kolaylıkla teşhis edilebilmektedir. Subklinik vakalarda ise sürü düzeyinde serum kalsiyum analizleri, erken tanı açısından büyük önem taşımaktadır.

1.2.3. Tedavi ve Korunma Yaklaşımları

Subklinik ve klinik hipokalseminin önlenmesi ve kontrolü amacıyla son yıllarda birçok besleme ve destekleyici strateji geliştirilmiştir. Bu yaklaşımlar arasında D vitamini uygulamaları, enteral ve parenteral kalsiyum takviyeleri ile diyet kalsiyum içeriğinin ve diyet katyon-anyon farkının (DCAD) düzenlenmesi yer almaktadır.

Prepartum dönemde düşük kalsiyum içerikli diyetlerin uygulanmasındaki temel amaç, PTH salgısını uyaran kontrollü bir

kalsiyum açığı oluşturarak doğum sonrası kalsiyum mobilizasyonunu hızlandırmaktır. Ancak yalnızca düşük kalsiyum içeren bir diyetle hipokalseminin önlenmesi pratikte zordur.

Bu nedenle düşük kalsiyumlu prepartum diyetlerin oluşturulmasında kalsiyum bağlayıcı maddelerden yararlanılmaktadır. Sentetik bir sodyum-alüminyum silikat olan zeolit A en yaygın kullanılan bağlayıcılardan biridir. Zeolit A, rumende kalsiyum, fosfor ve magnezyumu bağlayarak biyoyararlanımlarını azaltmakta ve fonksiyonel olarak düşük kalsiyumlu bir diyet oluşturulmasını sağlamaktadır. Yapılan çalışmalar, doğumdan önce 2–3 hafta süreyle zeolit A ile beslenen ineklerde erken peripartum dönemde serum kalsiyum düzeylerinin arttığını, ancak doğum sonrası performans üzerinde belirgin bir fark oluşturmadığını göstermektedir.

Hipokalsemiden korunmada kullanılan bir diğer önemli yöntem ise asidojenik (anyonik) diyetlerin hazırlanmasıdır. Negatif diyet katyon-anyon farkı (DCAD) prensibine dayanan bu yaklaşımda, güçlü anyonlar güçlü katyonlara göre artırılarak hafif derecede kompanse edilmiş bir metabolik asidoz oluşturulması hedeflenmektedir. Prepartum diyetlerin DCAD değeri aşağıdaki formül esas alınarak düzenlenmektedir:

$$DCAD = [(mEq K + mEq Na) - (mEq Cl + mEq S)]$$

Asidotik besleme koşulları altında, idrarla artan kalsiyum atılımını telafi etmek amacıyla bağırsaklardan kalsiyum emiliminin ve kemik

mobilizasyonunun arttığı bildirilmektedir. Bu durum, doğum sonrası hipokalsemi riskinin azalmasına katkı sağlamaktadır.

1.3. HİPOMAGNEZEMİ (ÇAYIR TETANİSİ)

1.3.1. Etiyoloji ve Patogenez

Hipomagnezemi özellikle süt sığırlarını etkileyen magnezyum (Mg) eksikliğine bağlı olarak gelişen akut ve çoğu zaman ölümcül seyreden nörometabolik bir hastalıktır. Laktasyondaki inekler hastalığa karşı çok duyarlıdır. Serin ve yağışlı bölgelerde ilkbahar aylarında hastalık sıklıkla görülür, kış aylarında ise Mg içeriği düşük kuru çayır otu ve saman gibi yemlerle beslenen hayvanlarda görülebilir (Muruz ve Selçuk, 2024).

Gebelik döneminde yavruya ve laktasyonla birlikte süte yoğun miktarda Mg geçişi olmaktadır ancak vücuttaki Mg rezervleri bu ihtiyacı karşılamada yeterli miktar ve hızda olmamaktadır. Süt sığırlarında hipomagnezemi ve hipokalsemi genellikle aynı dönemlerde seyretmektedir.

Klinik hipomagnezemi; huzursuzluk, kas seğirmeleri, tetani, koordinasyon bozukluğu, yıkılma, konvülziyonlar ve ani ölüm ile karakterizedir. Hastalık genellikle hızlı seyirli olup, tedavi edilmediğinde kısa sürede ölümle sonuçlanabilmektedir.

Subklinik hipomagnezemi ise klinik belirtiler göstermeksizin ilerler; ancak süt veriminde düşüş, yem tüketiminin azalması ve diğer metabolik hastalıklara yatkınlık ile ilişkilidir.

Magnezyum hücre içinde potasyumdan sonra en fazla bulunan katyondur ve vücutta 300'den fazla biyokimyasal reaksiyonda görev almaktadır. En önemli görevleri arasında enerji metabolizması, büyüme ve kemik gelişimi, fertilité, sinir ve kas fonksiyonları, iyon dengesinin korunması ve enzim aktivasyonu sayılabilir.

Magnezyum homeostazisi kalsiyumun aksine doğrudan hormonal kontrol altında değildir ve kemik dokusu Mg eksikliğinde etkin bir rezerv kaynağı olarak kullanılamaz. Bu nedenle Mg alımındaki azalma veya emilim bozukluğu kısa sürede hipomagnezemiye yol açmakta ve klinik tablo hızla ağırlaşabilmektedir. Klinik hipomagnezemik tetaninin gelişiminde belirleyici faktör, beyin omurilik sıvısının (BOS) Mg konsantrasyonudur. Serum Mg düzeyi düşük olsa bile BOS Mg seviyesi bir süre koruyucu olabilir. Ancak BOS Mg konsantrasyonu kritik eşik değerlerin (genellikle <1,25–1,45 mg/dL) altına düştüğünde, klinik tetani belirtileri ortaya çıkmaktadır.

Hipomagnezemi primer ve sekonder olmak üzere iki temel formda sınıflandırılmaktadır. Primer hipomagnezemi, rasyondaki Mg yetersizliğine bağlıdır, sekonder hipomagnezemi ise Mg emilimini olumsuz etkileyen faktörler sonucunda gelişmektedir.

Sekonder hipomagnezemide en önemli etkenlerden biri, hızlı büyüyen ilkbahar meralarının yüksek potasyum (K) ve azot (N), düşük magnezyum (Mg) ve sodyum (Na) içeriğine sahip olmasıdır. Rasyonda K/(Ca+Mg) oranının 2,2'nin üzerinde olması ciddi bir risk oluşturmaktadır. Rumen duvarı Mg'un temel emilim yeridir ve Mg'un

çözünmüş formda bulunması gerekmektedir. Yüksek rumen pH'sı Mg çözünürlüğünü azaltır. Ayrıca Mg'un aktif taşınması, rumen epitel hücrelerinin apikal membran potansiyeline bağlıdır. Yüksek K ve düşük Na içeren rasyonlarda bu mekanizma baskılanır ve Mg emilimi önemli ölçüde azalır.

Kolay fermente olabilir karbonhidrat içeriği düşük rasyonlar, rumende uçucu yağ asidi (UYA) üretimini azaltarak pH'nın yükselmesine ve Mg çözünürlüğünün düşmesine neden olurken; UYA üretiminin artması rumen pH'sını düşürerek Mg emilimini artırmaktadır. Vejetatif dönemdeki mera bitkilerinin düşük NDF içeriği nedeniyle rumenden hızlı geçmesi, emilim için gerekli sürenin kısılmasına yol açmaktadır. Ayrıca fosforun Mg ile çözünmeyen bileşikler oluşturması, bazı yağ asitlerinin Mg sabunları meydana getirmesi ve organik asit içeriği yüksek meralarda otlatma da emilimi olumsuz etkilemektedir.

1.3.2. Tanı ve Teşhis

Hipomagnezeminin tanısında serum Mg konsantrasyonunun belirlenmesi temel yaklaşımdır. Bununla birlikte klinik tetani gelişiminde belirleyici olan BOS Mg düzeyidir. Serum Mg düzeyleri normalin altına düşmesine rağmen BOS Mg konsantrasyonunun bir süre korunabilmesi, erken tanıyı zorlaştırabilmektedir. Klinik belirtiler genellikle BOS Mg düzeyi kritik seviyelerin altına indiğinde ortaya çıkmaktadır.

1.3.3. Tedavi ve Korunma Yaklaşımları

Tedavi sürecinde öncelikle klinik olarak hasta olan veya risk grubunda yer alan hayvanların meradan uzaklaştırılması ve plazma magnezyum (Mg) konsantrasyonunun kısa sürede yükseltilmesi hedeflenmelidir. Klinik bulgu gösteren olgularda gecikmeksizin müdahale edilmesi hayati önem taşımaktadır. Klinik hipomagnezemi vakalarında tedavi, Mg içeren preparatların intravenöz (İV) ya da subkutan (SC) yolla uygulanması esasına dayanmaktadır.

Hipomagnezemi klinik vakaları, intravenöz veya subkutanöz olarak Mg çözeltileri verilerek tedavi edilebilir. Kan Mg seviyeleri, %50'lik Mg çözeltisinden 200 ml verilerek artırılabilir. Alternatif olarak, %25'lik magnezyum sülfat ($MgSO_4 \cdot 7H_2O$) çözeltisinden 200 ila 400 ml subkutanöz olarak verilebilir; uygulama yeri başına lokal doku reaksiyonlarını önlemek amacıyla maksimum 50 ila 100 ml önerilir (Doncel ve ark., 2019). Konsantre Mg solüsyonlarının hızlı İV infüzyonu, medüller depresyon, solunum yetmezliği ve ani ölüme neden olabileceğinden, uygulama sırasında kardiyak fonksiyonlar izlenmeli ve infüzyon hızı titizlikle kontrol edilmelidir. Yalnızca Mg solüsyonunun İV yolla uygulanacağı durumlarda, öncesinde kalsiyum (Ca) içeren bir preparatın verilmesi tedavinin güvenilirliğini artırmaktadır.

Tedaviye alınan yanıt büyük ölçüde, klinik belirtilerin ortaya çıkışı ile tedavinin başlatılması arasındaki süreye bağlıdır. Yutma refleksi geri kazanan hayvanlarda, oral yolla günlük 60 g magnezyum oksit (MgO)

verilmesi önerilmektedir. Bu destekleyici uygulama, genellikle 5–6 gün süreyle veya hayvanlar yeterli Mg içeren rasyonları tüketmeye başlayıncaya kadar sürdürülmelidir. Tehlikeli dönemlerde hayvan başına 60-120 g/gün en az %87 MgO içeren preparatlar verilmelidir. Kalsiyum ve Magnezyum açısından zengin baklagil otlarının rasyona eklenmesi de büyük önem taşımaktadır.

Koruyucu yaklaşımlarda temel hedef, rasyonda yeterli ve süreklilik arz eden Mg düzeyinin sağlanması (%0,35–0,40 Mg) ve Mg emiliminin en üst düzeye çıkarılmasıdır. Bu önlemler özellikle kış rasyonlarından ilkbahar meralarına geçiş döneminde ve laktasyon dönemindeki ineklerde kritik öneme sahiptir. Mg katkı maddesi olarak magnezyum karbonat, sülfat ve klorür kullanılabilmekle birlikte; ekonomik olması, kabul edilebilir lezzeti ve daha düşük laksatif etki göstermesi nedeniyle MgO en yaygın kullanılan Mg kaynağıdır. MgO'nun tuzla (%75 NaCl + %25 MgO) karıştırılarak sunulması, hem tüketimi artırmakta hem de sodyum düzeyini yükselterek rumende Mg emilimini olumlu yönde etkilemektedir (Muruz ve Selçuk, 2024).

Erken ilkbaharda özellikle yağışlı dönemlerde otlatmanın belirli saatlerle sınırlandırılması, otlatmaya ek olarak iyi kaliteli kuru ot verilmesi ve merada baklagil otlarının artırılması Mg eksikliğine karşı alınacak önlemler arasındadır.

1.4. RUMEN ASİDOZU

1.4.1. Etiyoloji ve Patogenez

Subakut rumen asidozu (SARA), ruminant hayvanlarda özellikle yüksek miktarda kolay sindirilebilir karbonhidrat içeren rasyonların tüketilmesi sonucunda ortaya çıkan, rumen fermentasyonunu ve hayvan performansını olumsuz yönde etkileyen önemli bir metabolik bozukluktur. Bu tür karbonhidratların aşırı alımı, rumen fermentasyon hızını artırarak uçucu yağ asitleri ve laktik asit üretiminin yükselmesine neden olmakta, bunun sonucunda rumen pH'sı 6,0'ın altına düşmektedir (Gümüş, 2014; McCann ve ark., 2016). Rumen pH'sındaki bu azalma, rumen ortamının fizyolojik dengesini bozmakta ve mikrobiyal popülasyonda belirgin değişikliklere yol açmaktadır.

Asidik rumen koşullarında selüloz sindiriminden sorumlu fibrolitik bakterilerin aktivitesi ve sayısı azalırken, laktat metabolizmasında görev alan mikroorganizmaların etkinliği sınırlanmakta; rumen protozoaları ise düşük pH'ya karşı oldukça duyarlı olmaları nedeniyle önemli ölçüde zarar görmektedir (Al-Husseiny ve Zenad, 2017; Nagata ve ark., 2018; Çayiroğlu ve ark., 2019). Bu mikrobiyal dengesizlik, yem sindirilebilirliğinin azalmasına, kuru madde tüketiminde düşüşe ve sistemik metabolik problemlerin ortaya çıkmasına zemin hazırlamaktadır.

SARA, rumen pH'sının genellikle 5,0–5,5 aralığında seyrettiği, akut ve kronik asidoz tabloları arasında yer alan bir geçiş formu olarak tanımlanmaktadır (Yanar ve Aktaş, 2021). Özellikle kuru dönemden

laktasyon dönemine geçiş sürecinde, yüksek enerjili ve konsantre yem ağırlıklı rasyonların ani olarak verilmesi SARA oluşumunda temel risk faktörlerinden biri olarak kabul edilmektedir.

1.4.2. Tanı ve Teşhis

Subakut rumen asidozunun gelişiminde, rumende yeterli tamponlama kapasitesinin bulunmaması, hızlı fermente olabilen karbonhidratların aşırı tüketilmesi ve rumen mikrobiyal florasının bu tür rasyonlara yeterli düzeyde uyum sağlayamaması başlıca etiyolojik faktörler arasında yer almaktadır. Klinik belirtilerin çoğunlukla özgül olmaması nedeniyle SARA'nın tanısı güçtür ve genellikle sürü düzeyinde performans kayıpları, süt yağ oranında düşüş, yem tüketiminde dalgalanmalar ve dışkı kıvamındaki değişiklikler gibi dolaylı göstergelere dayanmaktadır.

1.4.3. Tedavi ve Korunma Yolları

SARA'nın kontrolü ve önlenmesinde en etkili yaklaşım, geçiş döneminde uygulanan rasyonların hızlı ve yavaş sindirilebilir karbonhidratlar bakımından dengeli bir şekilde formüle edilmesidir. Rumen mikroorganizmalarının yem değişikliklerine adaptasyonunun yaklaşık üç hafta içinde gerçekleştiği, buna karşın rumen mukozasının tam adaptasyonunun 4-6 haftayı bulabildiği bildirilmektedir (Beauchemin ve Penner, 2009; Alataş, 2013). Bu nedenle, kuru dönemin sonundan laktasyon dönemine geçişte rasyon bileşimindeki değişikliklerin kademeli olarak yapılması büyük önem taşımaktadır.

Besleme hatalarının kısa süreli telafisi amacıyla sürekli kullanımı önerilmemekle birlikte, sodyum bikarbonat, sodyum seskikarbonat, sodyum bentonit ve kalsiyum karbonat gibi tampon maddeler ile maya kültürleri, rumen pH'sının fizyolojik sınırlar içerisinde tutulmasına katkı sağlamakta ve SARA riskinin azaltılmasında destekleyici rol oynamaktadır (Enemark ve ark., 2002; Krause ve Oetzel, 2006).

Bunun yanı sıra, yemlerin besin madde içeriği kadar yemleme yönetimi de SARA'nın önlenmesinde önemli bir faktördür. Süt sığırlarında yeterli yemlik alanının sağlanması, yemleme sıklığının artırılması ve toplam karma rasyonun homojen bir şekilde hazırlanarak yem seçiminin önlenmesi, rumen asit-baz dengesinin korunmasına katkıda bulunmaktadır (Macmillan ve ark., 2017; Humer ve ark., 2018).

SONUÇ

Yüksek verimli süt sığırlarında kuru dönemden laktasyona geçiş süreci, hayvanın metabolik ve hormonal açıdan en fazla zorlandığı dönem olup, bu süreçte ortaya çıkan beslemeye bağlı metabolik hastalıklar süt sığırcılığının sürdürülebilirliği açısından büyük önem taşımaktadır. Bu bölümde ele alınan hipokalsemi, ketozis, çayır tetanisi ve benzeri metabolik bozukluklar, çoğunlukla geçiş döneminde ortaya çıkmakta ve birbirlerini tetikleyerek hayvan sağlığı, süt verimi ve üreme performansı üzerinde ciddi olumsuz etkilere yol açmaktadır. Bu hastalıkların büyük bir kısmı subklinik seyretmekte, erken dönemde fark edilememekte ve klinik tablonun ortaya

çıkmasıyla birlikte işletmeler için önemli ekonomik kayıplara neden olmaktadır.

İncelenen metabolik hastalıkların ortak noktası, temelinde besleme hatalarının yer almasıdır. Yetersiz veya dengesiz enerji, mineral ve elektrolit alımı; kuru madde tüketimindeki düşüş; rasyonun katyon-anyon dengesinin göz ardı edilmesi ve mera yönetimindeki yanlış uygulamalar bu hastalıkların ortaya çıkışında belirleyici faktörlerdir. Bununla birlikte, bu bozuklukların çoğunun uygun rasyon planlaması, geçiş dönemi besleme stratejilerinin doğru uygulanması ve hayvanların metabolik adaptasyonunun desteklenmesi ile büyük ölçüde önlenabilir olduğu açıktır. Özellikle kuru dönemde kalsiyum, magnezyum ve enerji metabolizmasının doğru yönetilmesi; doğum sonrası dönemde ise hayvanların yakından izlenmesi ve erken müdahale edilmesi, metabolik hastalıkların görülme sıklığını ve şiddetini önemli ölçüde azaltmaktadır.

Beslemeye bağlı metabolik hastalıkların önlenmesinde yalnızca rasyon içeriği değil, aynı zamanda işletme yönetimi, hayvan refahı, mera kullanımı ve personel eğitimi de kritik rol oynamaktadır. Bu bağlamda, alanında uzman akademisyenler ve veteriner hekimler tarafından çiftçilerin düzenli aralıklarla bilgilendirilmesi, akademik bilginin ve uygun tekniklerin saha uygulamalarına etkin bir şekilde aktarılması açısından büyük önem taşımaktadır. Çiftlik düzeyinde hayvanların doğum öncesi ve sonrası dönemde bireysel olarak takip edilmesi, risk altındaki hayvanların erken dönemde belirlenmesi ve

koruyucu besleme uygulamalarının hayata geçirilmesi, hastalıkların klinik forma dönüşmeden kontrol altına alınmasını sağlayacaktır.

Sonuç olarak, beslemeye bağlı metabolik hastalıklar süt sığırcılığında kaçınılmaz bir kader olmayıp, doğru besleme yönetimi ve bilinçli işletmecilik ile büyük ölçüde önlenabilir sorunlardır. Bu hastalıkların kontrol altına alınması; süt verimi ve kalitesinin artırılmasına, üreme performansının iyileştirilmesine, sürü ömrünün uzatılmasına ve işletmelerin ekonomik sürdürülebilirliğinin sağlanmasına doğrudan katkı sağlayacaktır. Bu nedenle, geçiş dönemi beslemesine bütüncül bir bakış açısıyla yaklaşılması ve metabolik hastalıkların önlenmesini hedefleyen stratejilerin sistematik olarak uygulanması modern süt sığırcılığının temel gerekliliklerinden biri olarak değerlendirilmelidir.

KAYNAKÇA

- Al-Husseiny, S.H., Zenad, M.M. (2017). Estimation of lipopolysaccharide concentration in the content of ruminal fluid and feces of dairy cows that suffering from subacute ruminal acidosis. *Al-Qadisiyah Journal of Veterinary Medicine Sciences*, 16(2), 157-161. <https://doi.org/10.29079/vol16iss2art451>.
- Atalay, H. (2019). Yüksek Verimli Süt İneklerinde Geçiş Döneminde Görülen Beslenme Hastalıklarının Önemi. *Tıp ve Sağlık Bilimleri*, 55.
- Çayıroğlu, H., Şahin, A., & Coşkun, İ. (2019). Subacute rumen acidosis and preventive feeding practices in dairy cows.
- Doncel, B., Capelesso, A., Giannitti, F., Cajarville, C., Macías-Rioseco, M., Silveira, C., ... & Riet-Correa, F. (2019). Hypomagnesemia in dairy cattle in Uruguay. *Pesquisa Veterinária Brasileira*, 39(08), 564-572.
- Ergün, O. F., & Bayram, B. (2021). Türkiye'de hayvancılık sektöründe yaşanan değişimler. *Bahri Dağdaş Hayvancılık Araştırma Dergisi*, 10(2), 158-175.
- FAO, (2025). Erişim adresi: <https://www.fao.org/faostat/en/#data>. Erişim tarihi: 12.12.2025.
- Goff, J.P. (2006). Macromineral physiology and application to the feeding of the dairy cow for prevention of milk fever and other periparturient mineral disorders. *Anim. Feed Sci. Technol.* 126(3-4):237-57.
- Gül, Y. (2006). Geviş Getiren Hayvanların İç Hastalıkları (Sığır, Koyun-Keçi). In: Gül Y editör. II. Baskı Malatya:Medipres Matbaacılık Ltd Şti. p.452-4.
- Gümüş, H. (2014). Akarbozun Asidozis Üzerine Etkisi. *Mehmet Akif Ersoy University Journal of Health Sciences Institute*, 2(1), 42-49.
- Kleen, J., & Cannizzo, C. (2012). Incidence, prevalence and impact of SARA in dairy herds. *Anim. Feed Sci. Tech.* 172(1-2):4-8.
- Kominiarek, M.A., & Rajan, P. (2016). Nutrition recommendations in pregnancy and lactation. *Med. Clin. North Am.* 100(6):1199-215.
- McCann, J.C., Luan, S., Cardoso, F.C., Derakhshani, H., Khafipour, E., Loor, J.J. (2016). Induction of subacute ruminal acidosis affects the ruminal

- microbiome and epithelium. *Frontiers in Microbiology*, 7: 701. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2016.00701>.
- Muruz, H., & Selçuk, Z. (2024). Hayvan Besleme ve Beslenme Hastalıkları, Kara Kanber, Editör, Akademisyen Yayınevi Kitabevi, ss.311-370.
- Nagata, R., Kim, Y.H., Ohkubo, A., Kushibiki, S., Ichijo, T., Sato, S. (2018). Effects of repeated subacute ruminal acidosis challenges on the adaptation of the rumen bacterial community in Holstein bulls. *Journal of Dairy Science*. 101(5), 4424-4436. <https://doi.org/10.3168/jds.2017-13859>.
- Quiroz-Rocha, G.F., LeBlanc, S.J., Duffield, T.F. (2009) Reference limits for biochemical and hematological analytes of dairy cows one week before and one week after parturition. *Can. Vet. J.* 50: 383-388.
- Schultz, L.H. (1971) Management and nutritional aspects of ketosis. *Journal of Dairy Science* 54: 962-973.
- Serbester, U., Çınar, M., & Hayırlı, A. (2012). Sütçü ineklerde negatif enerji dengesi ve metabolik indikatörleri. *Kafkas Univ. Vet. Fak. Derg.* 18(4):705-11.
- Umurcalılar, H., & Gülşen, N. (2005) Çiftlik Hayvanlarında Beslenme Hastalıkları. Konya: S. Ü. Basımevi s:63-69.
- Yanar, K. E., & Aktaş, M. S. (2021). Periparturient Dönemde Süt Sığırlarında Sıklıkla Görülen Subklinik Metabolik Hastalıklara Güncel Yaklaşımlar. *Türk Doğa ve Fen Dergisi*, 10(1), 304-315.
- Yıldırım, R. (2020). Süt ineklerinde farklı glikoz prekürsörleri kullanılmasının metabolik hastalıklar ve laktasyon performansı üzerine etkileri. (Doctoral dissertation, Bursa Uludağ University (Turkey)).

BÖLÜM 8

ETLİK PİLİÇLERDE ORTAYA ÇIKAN ET KALİTE KUSURLARI VE ÇÖZÜM STRATEJİLERİ

Dr. Öğr. Üyesi Ahmet YAMAN^{1*}

DOI: <https://www.doi.org/10.5281/zenodo.18082780>

^{1*} Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Kanatlı Hayvan Yetiştiriciliği Türkiye. ahmetyaman@ibu.edu.tr

GİRİŞ

Dünya nüfusunun sürdürülebilir bir şekilde beslenmesi günümüzde önemli bir güçlük oluşturmaktadır (Yüksel ve ark., 2025). Beslenmede protein temininin büyük bölümünde, kanatlı sınıfının önemli bir üyesi olan tavuk eti kritik öneme sahiptir (Bailey ve ark., 2020). OECD-FAO raporlarına göre küresel kümes hayvanı tüketimi 2033’e kadar önemli ölçüde artacak ve toplam tüketim 160 milyon tona çıkacaktır. Bu tüketim miktarı toplam et tüketiminin %50’sini oluşturacaktır (OECD-FAO 2024). Bu durum, kümes hayvanı etinin özellikle de tavuk etinin dünya genelinde insan tüketimi için en popüler hayvansal protein kaynaklarından biri olmaya devam edeceğini göstermektedir. Özellikle *Pectoralis major* olarak bilenen göğüs kasının büyüklüğünün artırılması için son altmış yılda, yemden yararlanma kapasitesi yüksek, hızlı büyüyen ve daha az yağlı et eldesi mümkün olan hayvanların seçildiği yoğun genetik seleksiyon uygulamaları söz konusu olmuştur. Günümüzde kesimhanelerde kısa sürede kesilen tavuklar “etlik piliç” olarak adlandırılmaktadır. Ancak bu durum, genetik ve çevresel stres etmenlerine karşı duyarlılığı artmış hayvan tiplerinin gelişmesine zemin hazırlamıştır. İşte bu hassasiyetler sonucunda da özellikle göğüs etinin kalitesini azaltan et hataları daha sık görülmeye başlanmıştır (Petracci ve ark., 2017). Bu bölümde hızlı büyüyen, genetik seleksiyon sonucu geliştirilmiş etlik piliçlerin özellikle göğüs etlerinde görülen et hatalarından (miyopati) derin pektoral miyopati (DPM) (deep pectoral myopathie, yeşil kas hastalığı), ile dorsal kranial myopati (DCM); Solgun, yumuşak ve sulu (pale, soft and exudative) et; beyaz çizgiler (BŞ) (white stripping); tahtamsı göğüs (TG) (woody breast) ve spagetti

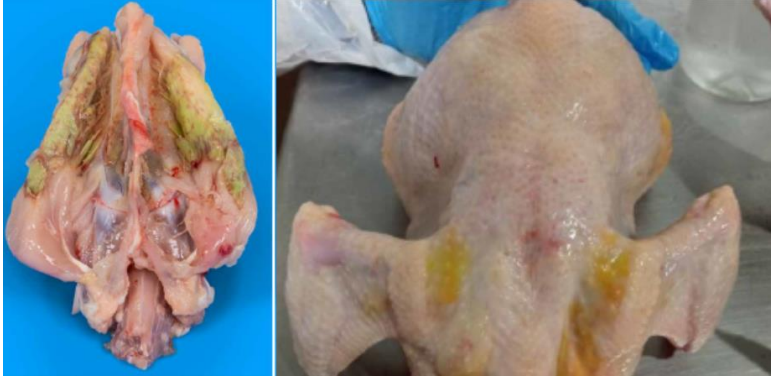
göğüs (SG) (spaghetti meat)'lü etlerin özellikleri ve bunlara karşı alınabilecek önlemler ele alınacaktır.

1. DERİN PEKTORAL MİYOPATİ (DPM) ve DORSAL PEKTORAL MİYOPATİ (DCM)

Et hatalarından ilki: “Derin Pektoral Miyopati” (DPM= deep pectoral myopathy) diye adlandırılan bazı kaynaklarda “Yeşil kas hastalığı” olarak geçen et hatasıdır (Bilgili, 2015). İlk olarak damızlık hindilerde dejeneratif bir et hatası olarak tanımlanmış (Dickinson ve ark., 1968) daha sonra etlik piliçlerde görülmüş (Richardson ve ark., 1980) soluk kırmızı renkten yeşil renge doğru değişebilen bir renk çeşitliliği gösterebildiği (Bilgili ve Hess, 2008) rapor edilmiştir (Fotoğraf 1). *Pectoralis minör* kasında iskemik nekroz (dokuya yeterince kan gitmemesi sonucu oluşan kas hasarı/ölümü) ile karakterizedir. Benzer biçimde, iskemik nekrozla tanımlanan başka bir et hatası türü de *Latissimus dorsi* kasında gözlenmiş ve bu lezyon “Dorsal Kranial Miyopati (DCM)’ olarak adlandırılmıştır. İlk olarak Coates (2003) tarafından etlik piliçlerde “alışılmadık dejeneratif bir kas lezyonu” şeklinde bildirilmiştir. Her iki et hatasının ortaya çıkış sebebi (etiyojisi) tam olarak belli değildir. DPM için en kabul gören varsayım ani kanat çırpma'ya bağlı *Pectoralis minör* kasının sıkışık pozisyonundan dolayı genişleyememesi sonucunda kas içinde (intramüsküler) basınç artması sonucunda kan akışı kısıtlanmasına bağlı oksijen yetersizliğinin ortaya çıkmasıdır. Bu yetersizlik sonucunda ortaya çıkan et hatasının makroskobik gözlemlenmesi sonucu küçük pin noktası kanamalarından (peteşi) daha büyük deri altı

(ekimotik) kanamalar ve sonuçta zamanla geri dönüşümsüz karakteristik sarı/yeşil nekrotik lezyona doğru değişim rapor edilmiştir ve üç grup DPM tanımlanmıştır, bunlar az şiddetliden çok şiddetliye doğru: 1) Damar çevresinde dejenerasyonlu, histolojik olarak odaklanmış ödemli kas ölümü (nekroz) 2) Dikkate değer biçimde kas fiberlerinde düşüşlü solgun/sarı renkli yapısal bozukluklar (lezyonlar) ve 3) Kan damarları ölmüş (nekrozlu), artmış bağ dokulu (fibrozisli) sarı/yeşil kusurlu kas (Wight ve ark., 1981; Wight ve Siller, 1980). Oluşan bu et hatası sonucu etin önemli bölümü kullanılamaz hale gelmektedir ve ekonomik olarak kayıp büyüktür (Barbut, 2019). Aynı şekilde DCM'nin de oluşum sebepleri de tam olarak ortaya konulamasa da DPM gibi aşırı kanat çırpmanın bu et hatasını oluşumuna sebep olduğu şeklindedir (Kindlein, 2022). Yetiştirme esnasında özellikle etlik piliçlerin aktivitesini artıran, kanat çırpmayı tetikleyen ürkeklik ve huzursuzluk faktörleri (şiddeti yüksek ışık, kümes çevresi aşırı gürültü, insan hareketliliği) et hatasının gelişimi için tetikleyici faktör olabileceği ortaya konulmuştur (Bilgili ve ark., 2000) Özellikle DPM etlik piliç endüstrisi için büyük bir zorluktur çünkü diğer et hataları gibi dışarıdan teşhis edilmesi mümkün değildir. Kemik ayırma ve ileri işlem basamaklarına kadar tespit edilemez (Kindlein, 2022). DCM ise DPM gibi olmayıp etlik piliçlerin sırt kısmında iki kanat arasında bulunan *Latissimus dorsi* kaslarında meydana gelir. Bu kaslar deri ile kaplıdır ve bu bölgede sarımtırak bir sıvı birikimi ile kolayca tespit edilebilir (Zimmermann ve ark., 2012). DCM kasın her iki tarafında ya da tek tarafında oluşabilir. Etlik piliç kaslarında üç farklı DCM derecesi bulunabilir: 1) Normal: Lezyon yok 2) Orta: Kaslarda hemoraji ve

peteşiler (İğne ucu büyüklüğünde kanama noktaları) 3) Şiddetli: Deri altında jel benzeri sarı sıvı birikmesi sonucu hacim artışı (Kindlein, 2022). Et hatasından etkilenmiş etlik broylerlerin en iyi değerlendirme şekli ise parçalayarak sorunlu kısımların ayrılması ve ileri işlenmiş ürünlerde kullanımıdır. Her iki et hatasının oluşumunu engellemek için özellikle beslenme programlarının gözden geçirilmesi önemli yer tutmaktadır. Besin kısıtlama programları, günlük yem miktarlarını sınırlamak veya düşük enerjili yem ile beslemek, yeme antioksidan maddeler ilave ederek savunma sistemini ve oksidatif stresi azaltmak gibi stratejiler kullanılabilecek yöntemlerin başında gelmektedir. İlaveten, stresi azaltılmış bir yönetim biçimi, gürültü faktörlerinin ve ışık faktörlerinin doğru ayarlanması ile hem DPM hem de DCM görülme sıklığının azaltıldığına dair çalışmalar rapor edilmiştir (Kindlein, 2022). Sürü bakım-besleme ve yönetimindeki bilgi ve beceriler gelişmesine rağmen göğüs kasında hala DPM gözlenmekte ve çeşitli açılardan araştırmacılar tarafından incelenmektedir (Bordbar ve ark., 2025). Son zamanlarda görülen et hataları olan beyaz çizgiler ve tahtamsı göğüs ile DPM arasında yakın ilişki olabileceği vurgulanmaktadır. Çalışmalar, beyaz çizgiler ile DPM arasında güçlü bir korelasyon bildirmiştir (Russo ve ark., 2015).



Fotoğraf 1. DPM ve DCM (Kindlein, 2022)

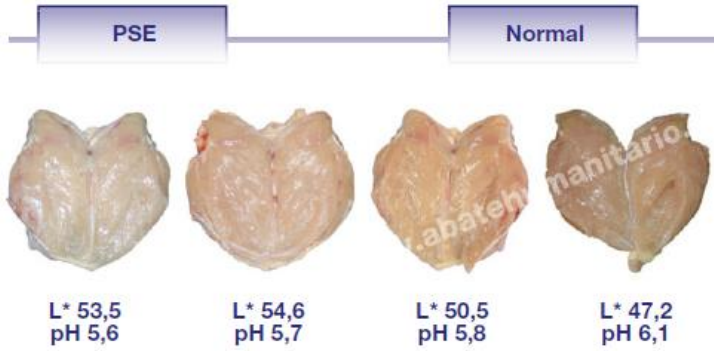
Beyaz çizgiler ile tahtamsı göğüsün makro ve mikroskopik karakterizasyonları hafif-şiddetli ödem (Soglia ve ark., 2016) kanamalı (hemorajenik) iltihaplı lezyonlar (Sihvo ve ark., 2014, Bailey ve ark., 2015) ve damar sorunlarına bağlı solgun/sarı renk (Kuttappan ve ark., 2013a) DPM ile çok büyük benzerlik göstermektedir. Son dönemde her ne kadar DPM gözlemleniyor olsa da beyaz çizgiler ve tahtamsı göğüs kadar önemli değildir (Barbut, 2019).

2. PALE SOFT EXUDATIVE (PSE) ET HATASI

Etlik broylerlerde tespit edilen başka bir et hatası PSE et olarak tanımlanan hatadır. Pale soft and exudative olarak bilinen “soluk, yumuşak ve su tutamayan” et olarak tanımlanır. İlk olarak domuzlarda kesimi takiben karkas sıcaklığı yüksek iken pH’nın hızlı şekilde düşmesi sonucu ortaya çıkan bir et hatası olduğu bildirilmiştir (Briskey ve Wismer-Pedersen, 1961). Daha sonra hindilerde (Van Hoof, 1979) ve etlik piliçlerde de (Barbut, 1997b) gözlenmiştir. Başlangıçta “yumuşak kas dokusu” ve “yaz verim sorunu” gibi tabirler kullanılmış

olsa da (Santé-Lhoutellier ve ark., 1991) daha sonra pekçok kaynakta PSE-benzeri (PSE-like) (Sosnicki ve ark., 1998) veya PSE olarak (Barbut, 1997a) isimlendirilmektedir. Kesimden hemen sonra yaşanan yüksek vücut sıcaklığı kaslarda glikojenin hızla parçalanmasına ve sonuçta laktik asit birikimi ile PSE oluşumuna sebep olmaktadır (Owens ve ark., 2009). Kasın pH değerinin hızlı düşmesi ve etin sıcaklığının yüksek olması ($> \text{ort. } 35^{\circ}\text{C}$) protein denatürasyonu ile sonuçlanmaktadır (McKee ve Sams, 1998; Strasburg ve Chiang, 2003). Et proteinlerinin en önemlilerinden miyosindeki denatürasyon sonucunda miyosin başının uzunluğu azalır ve aktin ile kas kasılması sırasında birleştiklerinde filament boşlukları daralır. Bu daralma hücre içi suyunun dışarı itilmesine sebep olur (Schilling ve ark., 2004). Hücre zarlarından dışarı itilen su ışık yansımaya neden olur ve bu nedenle et rengi soluk görünür (Belitz ve ark., 2009). Bu durumdaki etler soluk renkleri, yumuşak dokuları ve su tutamayan yapıları nedeniyle görsel açıdan cazip değildir (Woelfel ve ark., 2002). Bununla birlikte PSE’li etlik piliç etlerinin işlenmiş ürünlerde kullanımının zor olmasından dolayı pazardaki satışlarda negatif etkilenir (Barbut, 2009). Hem görsel hem de teknolojik olarak sorunlu oldukları için hem üreticiler hem de parakendeciler için önemli ekonomik kayıplara yol açmaktadır (Woelfel ve ark., 2002). PSE tespitinde bir renk parametresi olan L^* değeri ile beraber pH değeri kullanılmakta olup sabit bir değer bulunmamaktadır. Woelfel ve ark. (2002) L^* değeri olarak 54’ün üstü, pH değeri olarak ise 5.76’nın altı olan etleri PSE olarak kabul ederken Petracci ve ark. (2004) L^* değerini 56 ve üstü, pH değerini ise 5.77’nin altı olacak şekilde kabul etmişlerdir. Karunanayaka ve ark. (2016) ise

L* değerinin 58 ve üstü pH değerinin ise 5.83 ve altını PSE olarak kabul etmişlerdir (Fotoğraf 2). Araştırmacılar pH değerinin kesimden sonraki ilk 15 dakika (pH₁₅) veya 24 saat (pH_u, Ultimate pH, Nihai pH) ölçülmesinin PSE tespiti için önemli olduğunu belirtmişlerdir (Petracci ve ark., 2017). Yüksek sıcaklık ve düşük pH'dan dolayı denatüre olan proteinler bünyelerinde suyu tutamamakta bu da özellikle ileri işlenmiş ürünlerde dokusal parçalanmaya sebep olarak teknolojik verim düşmesine sebep olmaktadır (Duclos ve ark., 2007; Schilling ve ark., 2004; Serdaroğlu ve Öztürk, 2011). PSE'nin oluşum mekanizmalarında genetik faktörlerdense sıcaklık stresi, yem çekilmesi (kesim öncesi aç bırakma), yakalama-nakliye gibi çevresel faktörler ile karkas soğutma gibi fabrika uygulamalarının PSE üzerinde daha fazla etkiye sahip olduğunu vurgulamışlardır (Baldi ve ark., 2022). PSE'li etler pH'ları düşük olduğundan su tutma kapasiteleri (STK) düşük olan etlerdir ve dolayısıyla ileri işlenmiş özellikle su katılan emülsiyeye etlerde sorun oluşturmaktadırlar. Bu sebeple bu tip etler işlenirken en iyi çözümler nişasta (Zhang ve Barbut, 2005), kalojen (Schilling ve ark., 2005), karregenon (Daigle ve ark., 2005), gibi katkı maddeleri veya transglutaminaz (Barbut, 2009) gibi enzim ilaveleri ile yapı düzeltilmeye çalışılmasıdır. PSE'li etlerin genetik yapısı tam olarak ortaya konulamadığından bu özelliğe yatkın olmayan hatların seçimi ve geliştirilmesi erken dönemde mümkün görülmemektedir. Ayrıca genetik çalışmalar pahalı ve uzun dönemde sonuçları alınan çalışmalardır.

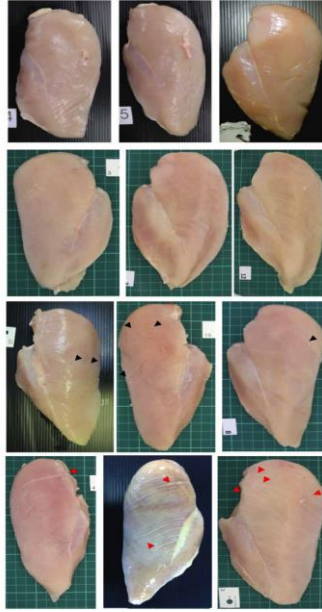


Fotoğraf 2. PSE ve normal etlik piliç eti renge bağlı pH değerleri (Oda ve ark., 2003)

3. BEYAZ ÇİZGİLER (WHITE STRIPPING) ET HATASI

Diğer bir et hatası Beyaz Çizgiler (BŞ) adı ile anılan (White Stripping) et hatasıdır (Bilgili, 2015). İlk kez Kuttappan ve ark. (2009) tarafından tanımlanan ve *P. majör* yüzeyindeki kas liflerine paralel beyaz çizgilerin görünümü ile karakterize olan bir et hatasıdır. Araştırmacılar beyaz renkli çizgilerin alanını görsel değerlendirme ile ortaya koymuşlar ve sonuç olarak 1) Normal (beyaz çizgi yok), 2) Hafif (1 mm'den daha ince ve 40 çizgiden az), 3) Orta derecede (1 veya 2 mm'den daha kalın 1 ile 5 arası veya 40 adetten fazla 1 mm'den daha ince ve yüzeyin %50 si kaplı) ve 4) Şiddetli (1 veya 2 mm'den daha kalın 5 adetten fazla veya 2 mm'den kalın en az 1 adet) olmak üzere 4 kategoriye ayırmışlardır (Fotoğraf 3) (Malila ve ark., 2022). Bu kusurun but etlerinde görüldüğü rapor edilmişse de (Kuttappan ve ark., 2013a) daha çok göğüs etinin genellikle kalın ucunda görülen ve kas liflerine paralel ilerleyen beyaz çizgiler söz konusudur. Sadece ABD'de bu problemten dolayı yıllık 200 milyon dolar kayıp olduğu (Kuttappan ve

ark., 2016) bildirilmişse de Barbut (2019) sektör çalışanları ile yaptığı çalışmasında bu rakamın 18 milyar dolar seviyelerinde olduğunu belirtmektedir. Bu et hatası dünyada etlik piliç üretimi yapan tüm başat ülkelerde araştırılmış ve ilk ortaya çıktığı dönemlerde %10 civarında görülürken (Petracci ve ark., 2013) daha sonra bu oran %20 ile %98'lere kadar yükselmiştir (Kuttappan ve ark., 2013b; Lorenzi ve ark., 2014; Russo ve ark., 2015; Trocino ve ark., 2015; Tijare et al., 2016; Prisco ve ark., 2021) . Görsel olarak müşteri reddine neden olan bu et hatasının yarattığı başka bir problem ise ette yağ oranının artması ve protein oranının düşmesidir (Lorenzi ve ark., 2014; Petracci ve ark., 2014). Orta ve şiddetli vakalarda ise kalojen ve nem miktarlarında artış tespit edilmiştir (Petracci ve ark., 2013, 2014; Mudalal ve ark., 2015; Baldi ve ark., 2018; de Carvalho ve ark., 2020). Artmış damlama kaybı ve buna eşlik eden yüksek pişirme kaybı ve bozulmuş STK ilave problemler olarak göze çarpmaktadır (Petracci ve ark., 2013; Lorenzi ve ark., 2014; Tijare ve ark., 2016; Yu ve ark., 2020). BŞ'li etlere sebep olan temel faktörün genetik olduğu rapor edilmiştir (Alnahhas ve ark., 2016). Genetik olmayan faktörlerde ise en önemli etkinin aşırı besleme (overnutrition) olduğu vurgulanmaktadır (Lake ve Abasht, 2020). BŞ'yi azaltmaya yönelik stratejiler ise genetik olarak BŞ içermeyen hatların genetik olarak seleksiyonu ve yem kısıtlaması yapılması şeklindedir.



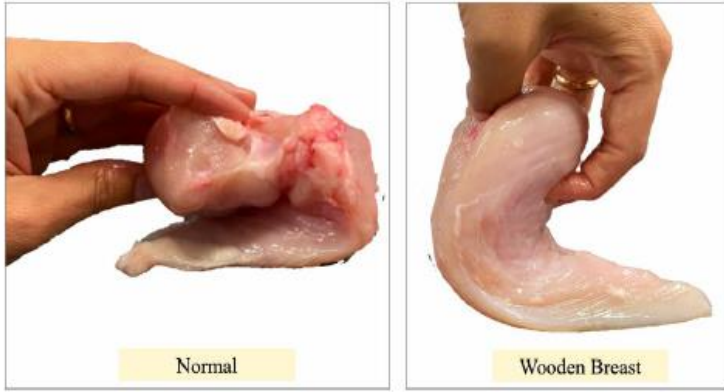
Fotoğraf 3. Normal (1. Sıra); Az (2. Sıra); Orta (3. Sıra) ve şiddetli (4. sıra beyaz çizgiler (Malila ve ark., 2022).

4. TAHTAMSI GÖĞÜS (WOODY BREAST) ET HATASI

Son yıllarda üzerinde en fazla durulan bir başka et kusuru ise “Woody Breast” yada “Wooden Breast” olarak adlandırılan tahtamsı göğüs (TG) kusurudur (Sihvo ve ark., 2014; Bilgili, 2015; Tekeli ve ark., 2016). TG ilk kez canlı etlik piliçlerde palpasyonla tespit edilebilen aşırı sert göğüs kasları olarak rapor edilmiştir (Sihvo ve ark., 2014). Daha sonra canlı hayvanlarda da tespit edildiği bildirilmiştir (Sihvo ve ark., 2017). TG'den etkilenen kasların sertliğinin, soluk rengin ve yüzey kanamasının BŞ ile ilişkili olduğu düşünülmektedir (Sihvo vd. 2014). Bu et hatasının neden ortaya çıktığına dair net bilgi olmasa da bazı araştırmacılar genetik olarak üstün olarak seçilen hayvanlarda daha çok görüldüğünü öne sürerken (Petracci ve ark., 2013) bazı araştırmacılar

bu et hatasına hayvandaki oksidatif stress (Abasht ve ark., 2016) bazıları da yüksek enerjili beslemenin (Cruz ve ark., 2017) sebep olduğuna dair hipotezler ileri sürmektedir. Sonuçta oluşan ürün solgun ve tahta gibi sert bir göğüs eti profili ortaya koymaktadır (Fotoğraf 4) (Sihvo ve ark., 2014). Etkilenen göğüs etleri bazı araştırmacılar tarafından 4 puanlı bir derecelendirme sistemi ile sınıflandırılmaktadır. Bu sınıflandırmaya göre 0) Sertleşmiş alan veya hemoraj yok; 1) Göğüs boyunca yayılmış, sınırlı ve hafif sert alanlar mevcut; 2) Sertleşmiş ve soluk alanlar vardır ancak hemoraji bulunur; 3) Kasın tamamına yayılmış son derece sert ve soluk alanlar ile hemorajiler bulunur (Caldas-Cueva ve Owens, 2020; Petracci, 2019). En-boy oranı ve boyut ile 4 sınıflı derecelendirme sistemleri de mevcuttur (Griffin ve ark., 2018). 3. derece etkilenen göğüslerin hem yapı hem de büyüklük olarak normal göğüslere göre farklılık içerdiğini bildirmektedir (Tijare ve ark., 2016). Diğer et hatalarında olduğu gibi TG’de de oluşuma sebep olan ilk mekanizmalar (Bordini ve ark., 2022) ve bu hataya sebep olabilecek sebep-sonuç ilişkileri tam olarak rapor edilmemiştir (Griffin ve ark., 2018). Araştırmacılar, ortak görüş olarak, genetik faktörlerin etkili olduğu konusunda hemfikirlerdir (Trocino ve ark., 2015; Soglia ve ark., 2019; Petracci, 2019). Birçok araştırma TG’nin oluşumundaki genetik sebepleri ve olası genleri bulmaya çalışmıştır ancak net olarak bir gen üzerinde yoğunlaşmamıştır. Bu da konunun poligenik bir mekanizmaya sahip olduğunu göstermektedir (Bordini ve ark., 2022). TG’ye sahip etler, BŞ gibi, normal etlere kıyasla farklı kimyasal ve besleyici değere sahiptir. Daha yüksek kalojen, yağ ve nem içeriğine sahipken daha düşük protein içeriğine sahiptir (Tasoniero ve ark., 2016;

Baldi ve ark., 2018; de Oliveira ve ark., 2021). Ayrıca marinasyon kapasitesi düşmesinin yanında ürünün temizlenmesi için gereken fire oranı da artmaktadır (Bilgili, 2015; Petracci, 2019). Bu tip etler ile yapılan ileri işlenmiş et ürünleri de görüntü ve yapı kusurları söz konusu olmaktadır. Tahtamsı göğüs problemini elemine etmek için geliştirilen stratejiler ise diğer et hatalarına benzemektedir. Öncelikle genetik olarak sağlıklı hatların seçimi şekilden bir strateji yürütülse de bunu yapmak zaman alacaktır çünkü yukarıda da açıklandığı üzere sorun tek bir genden değil poligenetik bir problem olduğunu göstermektedir. TG'li etlerin işleme stratejilerinde ise papain enzimi denenmiş ve doku sertliğinin önemli ölçüde iyileştiği bildirilmiştir (Lima ve ark., 2022). Bunun yanında marinasyon teknolojileri de denenmiş ancak TG'li etlerin marinat çözeltisini absorbe etme yeteneğinin az olduğu rapor edilmiştir (Tijare ve ark., 2016; Bowker ve ark., 2018; Maxwell ve ark., 2018; Kuttappan ve ark., 2021). Kaliteli ürünle paçallama stratejileri de söz konusudur (Caldas-Cueva ve ark., 2020). Sun ve ark. (2022) emülsiyon ya da fermentasyon gibi işlemlerin kullanılmadığı köftelere %25'e kadar TG'li etin katılmasının sorun olmadığını bildirirken Chen ve ark. (2018) ise jel tipi et ürünlerinde kullanılmasının işlevsel özelliklerinde azalma olduğundan istenilen miktarlarda katmayı sınırlandığını bildirmişlerdir. Hem TG'li etleri azaltmaya yönelik hem de işlenmiş ürünlerde kullanımına yönelik araştırmalara ihtiyaç duyulmaktadır.



Fotoğraf 4. Normal ve tahtamsı göğüs (wooden breast) esneklik farkı (Bordini ve ark., 2022).

5. SPAGETTİ GÖĞÜS (SPAGHETTI MYOPATHY) ET HATASI

Son olarak etlik piliçlerde rapor edilen diğer et hatalarına göre daha yeni olan bir et hatası zayıf filamentler ile karakterize edilen Spagetti Göğüs (SG) (Spaghetti Myopahty) olarak adlandırılmıştır. Bu et hatası hakkında PSE, BŞ ve TG kadar derinlemesine bilgi yoktur. İlk olarak Sirri ve ark. (2016) tarafından “zayıf kohezyon” olarak adlandırılmış daha sonraki çalışmalarda Anton ve ark. (2019) ise “lifsi-süngerimsi” olarak tanımlamıştır. *P. major*'un ventral-kranial (kalın uç) bölümünde olduğu rapor edilmiştir. Göğüs etinin sivri ucunda ya da but gibi diğer parçalarda rastlanıldığına dair herhangi bir rapor şu ana kadar yoktur (Tasoniero ve Bowker 2022). Göğüs etinin kalın tarafında kas lifi demetlerinin birbirinden ayrılma eğilimi ile spagetti makarna benzeri bir görünüm elde etmesinden dolayı bu adla anılmaktadır (Baldi ve ark., 2018). Hafif seyreden vakalarda göğüs sağlam gözükür ancak palpasyonla yüzeyin gevşek olduğu anlaşılır (Bowker ve ark., 2019).

SG'nin tespiti ve sınıflandırılması için net biyobelirteçler henüz tanımlanmamıştır. En yaygın yöntem göğüs etinin kalın ucunda palpasyonla tespit edilen yumuşak ve lifsi yapıdır (Tasoniero ve Bowker, 2022). Diğer et hatalarında olduğu gibi SG'ün şiddet derecesi de örnekten örneğe büyük farklılıklar gösterebilir. Genel olarak 3 seviyeli bir derecelendirme ile teşhis söz konusudur: 0) Et hatası yok; 1) Hafif SG: Göğüs kasının kalın ucunda orta düzeyde gevşek yapı 2) Şiddetli SG: Göğüsün kalın kısmında belirgin lifsi yapı (Fotoğraf 5) (Tasoniero ve Bowker, 2022). Bu et hatasında hatanın olduğu nokta homojen olmadığından kimyasal bileşim her bölgede aynı değildir (Tasoniero ve ark., 2020). SG'lü etler içerik olarak normal etlere kıyasla daha fazla yağ (Baldi ve ark., 2018) ve daha fazla nem (Pascual ve ark., 2021) içermektedir. Bu et hatasına sahip etler bütün ve parçalanmamış göğüs eti ürünlerinde kullanılamamaktadır. Sadece ileri işlenmiş ürünlerde kullanılabilir (Tasoniero ve Bowker, 2022). Aynı göğüs etinde birden fazla et hatasının görülmesi olağandır (Bowker ve ark., 2019). Diğer et hatalarının aksine SG hatası erkek etlik piliçlerden erkekten ziyade dişi piliçlerde daha fazla gözükmemektedir (Pascual ve ark., 2020). Yakalama, taşıma askıya asma gibi faktörlerin etkisi tam olarak bilinmemektedir (Tasoniero ve Bowker, 2022) SG'lü et hatası oluşumunu engellemek için L-arjinin ilavesinin olumlu etki yaptığı tespit edilmiştir (Zampiga ve ark., 2019). Etlik piliç göğüs etlerinde hem BŞ hem de SM'den etkilenen filetoların *P. majör* ağırlığı, kalınlığı ve uzunluğunda bir artış bildirilmiştir (Baldi ve ark., 2018)



Fotoğraf 5. Spagetti göğüs (Tasoniero ve Bowker, 2022).

Sonuç olarak DPM ve DCM tüketim için görsel ve teknolojik olarak uygun değilken BŞ, TG ve SM tüketiminde sağlıksal olarak bir sorun yoktur ancak tamamı müşteri tercihi bakımından görsel olarak kusurlu ve besleyici faktörler olarak eksiktir. Tüm et hatalarının hızlı gelişme ve performans isteğinden kaynaklandığı söylenebilir. Her ne kadar genetik ve besleme temelli çalışmalar yapılıyor ve tüm et hataları için bazı özellikler ortaya konuluyor olsa da ana sebepler, oluşumun engellenmesi ve oluşan et hatalarının değerlendirilmesi için daha fazla araştırmalara ihtiyaç vardır.

KAYNAKÇA

- Abasht, B., Mutryn, M. F., Michalek, R. D., & Lee, W. R. (2016). Oxidative Stress and Metabolic Perturbations in Wooden Breast Disorder in Chickens. *PLoS ONE*, 11(4). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0153750>
- Alnahhas, N., Berri, C., Chabault, M., Chartrin, P., Boulay, M., Bourin, M. C., & Bihan-Duval, E. Le. (2016). Genetic parameters of white striping in relation to body weight, carcass composition, and meat quality traits in two broiler lines divergently selected for the ultimate pH of the pectoralis major muscle. *BMC Genetics*, 17(1), 1–9. <https://doi.org/10.1186/s12863-016-0369-2>
- Anton, Paul., Avendaño, Santiago., Bailey, Richard., Bilgili, Sacit., Canela, Luis., Corzo, Alex., Fancher, Bryan., French, Nick., Nicholson, Dinah., Pearson, Dan., Rossi, Lorenzo., Thomson, Alan., & Thomson, Stuart. (2019). *Breast Muscle Myopathies (BMM)*.
- Bailey, R. A., Souza, E., & Avendano, S. (2020). Characterising the Influence of Genetics on Breast Muscle Myopathies in Broiler Chickens. *Frontiers in Physiology*, 11. <https://doi.org/10.3389/fphys.2020.01041>
- Bailey, R. A., Watson, K. A., Bilgili, S. F., & Avendano, S. (2015). The genetic basis of pectoralis major myopathies in modern broiler chicken lines. *Poultry Science*, 94(12), 2870–2879. <https://doi.org/10.3382/ps/pev304>
- Baldi, G., Soglia, F., & Petracci, M. (2022). *Quality defects associated with poultry muscle development: pale, soft and exudative meat* (pp. 203–246). <https://doi.org/10.19103/AS.2022.0112.09>
- Baldi, G., Soglia, F., Mazzoni, M., Sirri, F., Canonico, L., Babini, E., Laghi, L., Cavani, C., & Petracci, M. (2018). Implications of white striping and spaghetti meat abnormalities on meat quality and histological features in broilers. *Animal*, 12(1). <https://doi.org/10.1017/S1751731117001069>
- Barbut, S. (1997a). Occurrence of pale soft exudative meat in mature turkey hens. *British Poultry Science*, 38(1), 74–77.
- Barbut, S. (1997b). Problem of pale soft exudative meat in broiler chickens. *British Poultry Science*, 38(4), 355–358. <https://doi.org/10.1080/00071669708418002>

- Barbut, S. (2009). Pale, soft, and exudative poultry meat-Reviewing ways to manage at the processing plant. *Poultry Science*, 88(7), 1506–1512. <https://doi.org/10.3382/ps.2009-00118>
- Barbut, S. (2019). Recent myopathies in broiler's breast meat fillets. *World's Poultry Science Journal*, 75(4), 559–582. <https://doi.org/10.1017/S0043933919000436>
- Belitz, H. D., Grosch, W., & Schieberle, P. (2009). *Food chemistry*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Bilgili, S. (2015). Broyler Piliçlerde Pektoral Miyopatiler. *III. Uluslararası Beyaz Et Kongresi. 22-26 Nisan 2015. Antalya -Türkiye*, 85–88.
- Bilgili, S., & Hess, J. (2008). *Green Muscle Disease Reducing the Incidence in Broiler Flocks*.
- Bilgili, S., Hess, J. B., Lien, R. J., & Downs, K. M. (2000). *Deep pectoral myopathy in broiler chickens*.
- Bordbar, F., Guo, W., Wadood, A. A., & Nie, Q. (2025). Skeletal muscle myopathies and cardiovascular diseases in poultry: challenges for meat production. *World's Poultry Science Journal*, 81(3), 705–729. <https://doi.org/10.1080/00439339.2025.2506400>
- Bordini, M., Soglia, F., Zappaterra, M., Meluzzi, A., & Petracci, M. (2022). *Quality defects associated with poultry muscle development: wooden breast* (pp. 295–318). <https://doi.org/10.19103/AS.2022.0112.11>
- Bowker, B. C., Maxwell, A. D., Zhuang, H., & Adhikari, K. (2018). Marination and cooking performance of portioned broiler breast fillets with the wooden breast condition. *Poultry Science*, 97(8), 2966–2970. <https://doi.org/10.3382/ps/pey144>
- Bowker, Brian., Zhuang, H., Yoon, S. C., Tasoniero, G., & Lawrence, K. (2019). Relationships Between Attributes of Woody Breast and White Striping Myopathies in Commercially Processed Broiler Breast Meat. *Journal of Applied Poultry Research*, 28(2), 490–496. <https://doi.org/10.3382/japr/pfz007>

- Briskey, E. J., & Wismer-Pedersen, J. (1961). Biochemistry of Pork Muscle Structure. 1. Rate of Anaerobic Glycolysis and Temperature Change versus the Apparent Structure of Muscle Tissue. *Journal of Food Science*, 26(3), 297–305. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1961.tb01658.x>
- Caldas-Cueva, J. P., & Owens, C. M. (2020). A review on the woody breast condition, detection methods, and product utilization in the contemporary poultry industry. In *Journal of Animal Science* (Vol. 98, Issue 8). Oxford University Press. <https://doi.org/10.1093/jas/skaa207>
- Caldas-Cueva, J. P., Maynard, C. J., Mauromoustakos, A., & Owens, C. M. (2020). Effect of Woody Breast Condition on Instrumental Texture Characteristics of Poultry Deli Loaves. *Meat and Muscle Biology*, 4(1). <https://doi.org/10.22175/mmb.11223>
- Chen, H., Wang, H. H., Qi, J., Wang, M., Xu, X., & Zhou, G. (2018). Chicken breast quality – normal, pale, soft and exudative (PSE) and woody – influences the functional properties of meat batters. *International Journal of Food Science and Technology*, 53(3), 654–664. <https://doi.org/10.1111/ijfs.13640>
- Coates, J. (2003). An unusual degenerative muscle lesion (myopathy) in broilers. *Diagnostic Diary*, 13(2), 3–4.
- Cruz, R. F. A., Vieira, S. L., Kindlein, L., Kipper, M., Cemin, H. S., & Rauber, S. M. (2017). Occurrence of white striping and wooden breast in broilers fed grower and finisher diets with increasing Lysine levels. *Poultry Science*, 96(2), 501–510. <https://doi.org/10.3382/ps/pew310>
- Daigle, S. P., Schilling, M. W., Marriott, N. G., Wang, H., Barbeau, W. E., & Williams, R. C. (2005). PSE-like turkey breast enhancement through adjunct incorporation in a chunked and formed deli roll. *Meat Science*, 69(2), 319–324. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2004.08.001>
- de Carvalho, L. M., Madruga, M. S., Estévez, M., Badaró, A. T., & Barbin, D. F. (2020). Occurrence of wooden breast and white striping in Brazilian slaughtering plants and use of near-infrared spectroscopy and multivariate analysis to identify affected chicken breasts. *Journal of Food Science*, 85(10), 3102–3112. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.15465>

- de Oliveira, R. F., de Mello, J. L. M., Ferrari, F. B., Cavalcanti, E. N. F., de Souza, R. A., Pereira, M. R., Giampietro-ganeco, A., Villegas-cayllahua, E. A., Fidelis, H. de A., Fávero, M. S., Amoroso, L., de Souza, P. A., & Borba, H. (2021). Physical, chemical and histological characterization of pectoralis major muscle of broilers affected by wooden breast myopathy. *Animals*, 11(3), 1–15. <https://doi.org/10.3390/ani11030596>
- Dickinson, E. M., Stevens, J. O., & Helfer, D. H. (1968). A degenerative myopathy in turkeys. *Proceedings of the 17th Western Poultry Disease Conference. University of California, Davis.*, 6.
- Duclos, M. J., Berri, C., & Le Bihan-Duval, E. (2007). *Muscle Growth and Meat Quality*.
- Griffin, J. R., Moraes, L., Wick, M., & Lilburn, M. S. (2018). Onset of white striping and progression into wooden breast as defined by myopathic changes underlying Pectoralis major growth. Estimation of growth parameters as predictors for stage of myopathy progression. *Avian Pathology*, 47(1), 2–13. <https://doi.org/10.1080/03079457.2017.1356908>
- Karunanayaka, D. S., Jayasena, D. D., & Jo, C. (2016). Prevalence of pale, soft, and exudative (PSE) condition in chicken meat used for commercial meat processing and its effect on roasted chicken breast. *Journal of Animal Science and Technology*, 58(1), 27. <https://doi.org/10.1186/s40781-016-0110-8>
- Kindlein, L. (2022). *Breast meat abnormalities associated with ischaemic necrosis: dorsal cranial myopathy and deep pectoral myopathy* (pp. 179–202). <https://doi.org/10.19103/AS.2022.0112.08>
- Kuttappan, V. A., Brewer, V. B., Clark, F. D., McKee, S. R., & Meullenet, J. F. (2009). Effect of white striping on the histological and meat quality characteristics of broiler fillets. *Poultry Science*, 88((E-Suppl. 1)), 136–137.
- Kuttappan, V. A., Hargis, B. M., & Owens, C. M. (2016). White striping and woody breast myopathies in the modern poultry industry: A review. In *Poultry Science* (Vol. 95, Issue 11, pp. 2724–2733). Oxford University Press. <https://doi.org/10.3382/ps/pew216>

- Kuttappan, V. A., Huff, G. R., Huff, W. E., Hargis, B. M., Apple, J. K., Coon, C., & Owens, C. M. (2013b). Comparison of hematologic and serologic profiles of broiler birds with normal and severe degrees of white striping in breast fillets. *Poultry Science*, 92(2), 339–345. <https://doi.org/10.3382/ps.2012-02647>
- Kuttappan, V. A., Manangi, M., Bekker, M., Chen, J., & Vazquez-Anon, M. (2021). Nutritional Intervention Strategies Using Dietary Antioxidants and Organic Trace Minerals to Reduce the Incidence of Wooden Breast and Other Carcass Quality Defects in Broiler Birds. *Frontiers in Physiology*, 12. <https://doi.org/10.3389/fphys.2021.663409>
- Kuttappan, V. A., Shivaprasad, H. I., Shaw, D. P., Valentine, B. A., Hargis, B. M., Clark, F. D., McKee, S. R., & Owens, C. M. (2013a). Pathological changes associated with white striping in broiler breast muscles. *Poultry Science*, 92(2), 331–338. <https://doi.org/10.3382/ps.2012-02646>
- Lake, J. A., & Abasht, B. (2020). Glucolipotoxicity: a proposed etiology for wooden breast and related myopathies in commercial broiler chickens. *Frontiers in Physiology*, 11, 169.
- Lima, J. L., Bezerra, T. K. A., Carvalho, L. M., Galvão, M. S., Lucena, L., Rocha, T. C., Estevez, M., & Madruga, M. S. (2022). Improving the poor texture and technological properties of chicken wooden breast by enzymatic hydrolysis and low-frequency ultrasound. *Journal of Food Science*, 87(6), 2364–2376. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.16149>
- Lorenzi, M., Mudalal, S., Cavani, C., & Petracci, M. (2014). Incidence of white striping under commercial conditions in medium and heavy broiler chickens in Italy. *Journal of Applied Poultry Research*, 23(4), 754–758. <https://doi.org/10.3382/japr.2014-00968>
- Malila, Y., Thanatsang, K. V., & Srimarut, Y. (2022). *Quality defects associated with poultry muscle development: white striping* (pp. 247–294). <https://doi.org/10.19103/AS.2022.0112.10>
- Maxwell, A. D., Bowker, B. C., Zhuang, H., Chatterjee, D., & Adhikari, K. (2018). Descriptive sensory analysis of marinated and non-marinated wooden breast

- fillet portions. *Poultry Science*, 97(8), 2971–2978.
<https://doi.org/10.3382/ps/pey145>
- McKee, S. R., & Sams, A. R. (1998). Rigor mortis development at elevated temperatures induces pale exudative turkey meat characteristics. *Poultry Science*, 77(1), 169–174. <https://doi.org/10.1093/ps/77.1.169>
- Mudalal, S., Lorenzi, M., Soglia, F., Cavani, C., & Petracci, M. (2015). Implications of white striping and wooden breast abnormalities on quality traits of raw and marinated chicken meat. *Animal*, 9(4), 728–734.
<https://doi.org/10.1017/S175173111400295X>
- Oda, S. H. I., Schneider, J., Soares, A. L., Barbosa, D. M. L., Ida, E. I., Olivo, R., & Shimokomaki, M. (2003). Detecção de cor em filés de peito de frango. *Revista Nacional Da Carne*, 28(321), 30–34.
- OECD-FAO *Agricultural Outlook 2024-2033*. (2024).
<https://doi.org/10.1787/4c5d2cfb-en>
- Owens, C. M., Alvarado, C. Z., & Sams, A. R. (2009). Research developments in pale, soft, and exudative turkey meat in North America. *Poultry Science*, 88(7), 1513–1517. <https://doi.org/10.3382/ps.2009-00008>
- Pascual Guzmán, A., Trocino, A., Susta, L., & Barbut, S. (2021). Comparing three textural measurements of chicken breast fillets affected by severe wooden breast and spaghetti meat. *Italian Journal of Animal Science*, 20(1), 465–471.
<https://doi.org/10.1080/1828051X.2021.1893134>
- Pascual, A., Trocino, A., Birolo, M., Cardazzo, B., Bordinon, F., Ballarin, C., Carraro, L., & Xiccato, G. (2020). Dietary supplementation with sodium butyrate: growth, gut response at different ages, and meat quality of female and male broiler chickens. *Italian Journal of Animal Science*, 19(1), 1134–1145.
<https://doi.org/10.1080/1828051X.2020.1824590>
- Petracci, M. (2019, September). Growth-related breast meat abnormalities in Broilers. *Lohmann Information*, 11–18.
- Petracci, M., Betti, M., Bianchi, M., & Cavani, C. (2004). Color variation and characterization of broiler breast meat during processing in Italy. *Poultry Science*, 83(12). <https://doi.org/10.1093/ps/83.12.2086>

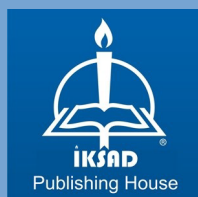
- Petracci, M., Mudalal, S., Babini, E., & Cavani, C. (2014). Effect of White Striping on Chemical Composition and Nutritional Value of Chicken Breast Meat. *Italian Journal of Animal Science*, 13(1), 3138. <https://doi.org/10.4081/ijas.2014.3138>
- Petracci, M., Mudalal, S., Bonfiglio, A., & Cavani, C. (2013). Occurrence of white striping under commercial conditions and its impact on breast meat quality in broiler chickens. *Poultry Science*, 92(6), 1670–1675. <https://doi.org/10.3382/ps.2012-03001>
- Petracci, M., Soglia, F., & Berri, C. (2017). Muscle Metabolism and Meat Quality Abnormalities. In *Poultry Quality Evaluation* (pp. 51–75). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100763-1.00003-9>
- Prisco, F., De Biase, D., Piegari, G., D'Aquino, I., Lama, A., Comella, F., Mercogliano, R., Dipineto, L., Papparella, S., & Paciello, O. (2021). Pathologic characterization of white striping myopathy in broiler chickens. *Poultry Science*, 101150. <https://doi.org/10.1016/j.psj.2021.101150>
- Richardson, J. A., Burgener, J., Winterfield, R. W., & Dhillon, A. S. (1980). Deep Pectoral Myopathy in Seven-Week-Old Broiler Chickens. *Avian Diseases*, 24(4), 1054–1059.
- Russo, E., Drigo, M., Longoni, C., Pezzotti, R., Fasoli, P., & Recordati, C. (2015). Evaluation of White Striping prevalence and predisposing factors in broilers at slaughter. *Poultry Science*, 94(8), 1843–1848. <https://doi.org/10.3382/ps/pev172>
- Santé-Lhoutellier, V., Bielicki, G., Renerre, M., & Lacourt, A. (1991). Post mortem evolution in the Pectoralis superficialis muscle from two turkey breeds: Relationship between pH and colour changes. 37. *International Congress of Meat Science and Technology*.
- Schilling, M. W., Daigle, S. P., Alvarado, C. Z., Marriott, N. G., & Wang, H. (2005). Effects of Collagen Addition on The Functionality of PSE-Like and Normal Broiler Breast Meat in a Chunked ann Formed Deli Roll. *Journal of Muscle Foods*, 16(1), 46–53. <https://doi.org/10.1111/j.1745-4573.2004.08104.x>

- Schilling, M. W., Marriott, N. G., Acton, J. C., Anderson-Cook, C., Alvarado, C. Z., & Wang, H. (2004). Utilization of response surface modeling to evaluate the effects of non-meat adjuncts and combinations of PSE and RFN pork on water holding capacity and cooked color in the production of boneless cured pork. *Meat Science*, 66(2), 371–381. [https://doi.org/10.1016/S0309-1740\(03\)00123-2](https://doi.org/10.1016/S0309-1740(03)00123-2)
- Serdaroğlu, Meltem., & Öztürk, Burcu. (2011). Etlik Piliç ve Hindilerde Solgun Kanatlı Eti Sendromu. In *Hayvansal Üretim* (Vol. 52, Issue 1).
- Sihvo, H. K., Immonen, K., & Puolanne, E. (2014). Myodegeneration With Fibrosis and Regeneration in the Pectoralis Major Muscle of Broilers. *Veterinary Pathology*, 51(3), 619–623. <https://doi.org/10.1177/0300985813497488>
- Sihvo, H. K., Lindén, J., Airas, N., Immonen, K., Valaja, J., & Puolanne, E. (2017). Wooden Breast Myodegeneration of Pectoralis Major Muscle Over the Growth Period in Broilers. *Veterinary Pathology*, 54(1), 119–128. <https://doi.org/10.1177/0300985816658099>
- Sirri, F., Maiorano, G., Tavaniello, S., Chen, J., Petracci, M., & Meluzzi, A. (2016). Effect of different levels of dietary zinc, manganese, and copper from organic or inorganic sources on performance, bacterial chondronecrosis, intramuscular collagen characteristics, and occurrence of meat quality defects of broiler chickens. *Poultry Science*, 95(8), 1813–1824. <https://doi.org/10.3382/ps/pew064>
- Soglia, F., Silva, A. K., Lião, L. M., Laghi, L., & Petracci, M. (2019). Effect of broiler breast abnormality and freezing on meat quality and metabolites assessed by 1 H-NMR spectroscopy. *Poultry Science*, 98(12), 7139–7150. <https://doi.org/10.3382/ps/pez514>
- Soglia, Francesca., Laghi, Luca., Canonico, Luca., Cavani, Claudio., & Petracci, Massimiliano. (2016). Functional property issues in broiler breast meat related to emerging muscle abnormalities. *Food Research International*, 89, 1071–1076. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2016.04.042>
- Sosnicki, A. A., Greaser, M. L., Pietrzak, M., Popiech, E., & Sante, V. (1998). PSE-Like Syndrome in Breast Muscle of Domestic Turkey: A Review. *Journal of*

- Muscle Foods*, 9(1), 13–23. <https://doi.org/10.1111/j.1745-4573.1998.tb00640.x>
- Strasburg, G. M., & Chiang, W. (2003). Genetic basis for Pale, Soft and Exudative turkey meat. *Reciprocal Meat Conference*, 56, 17–22.
- Sun, X., You, J., Xu, L., Zhou, D., Cai, H., Maynard, C. J., & Caldas-Cueva, J. P. (2022). Quality properties of chicken meatballs prepared with varying proportions of woody breast meat. *Journal of Food Science and Technology*, 59(2), 666–676. <https://doi.org/10.1007/s13197-021-05060-1>
- Tasoniero, G., & Bowker, B. (2022). *Quality defects associated with poultry muscle development: spaghetti meat* (pp. 319–342). <https://doi.org/10.19103/AS.2022.0112.12>
- Tasoniero, G., Cullere, M., Cecchinato, M., Puolanne, E., & Dalle Zotte, A. (2016). Technological quality, mineral profile, and sensory attributes of broiler chicken breasts affected by White Striping and Wooden Breast myopathies. *Poultry Science*, 95(11), 2707–2714. <https://doi.org/10.3382/ps/pew215>
- Tasoniero, G., Zhuang, H., Gamble, G. R., & Bowker, B. C. (2020). Effect of spaghetti meat abnormality on broiler chicken breast meat composition and technological quality. *Poultry Science*, 99(3), 1724–1733. <https://doi.org/10.1016/j.psj.2019.10.069>
- Tekeli, A., Özcan, A., & Kutlu, H. R. (2016). Etlik Piliçlerde Odunsu Göğüs Eti “Wooden Breast” Sorunu. *Türk Tarım - Gıda Bilim ve Teknolojisi Dergisi*, 4(11), 962–967.
- Tijare, V. V., Yang, F. L., Kuttappan, V. A., Alvarado, C. Z., Coon, C. N., & Owens, C. M. (2016). Meat quality of broiler breast fillets with white striping and woody breast muscle myopathies. *Poultry Science*, 95(9), 2167–2173. <https://doi.org/10.3382/ps/pew129>
- Trocino, A., Piccirillo, A., Birolo, M., Radaelli, G., Bertotto, D., Filiou, E., Petracci, M., & Xiccato, G. (2015). Effect of genotype, gender and feed restriction on growth, meat quality and the occurrence of white striping and wooden breast in broiler chickens. *Poultry Science*, 94(12), 2996–3004. <https://doi.org/10.3382/ps/pev296>

- Van Hoof, J. (1979). Influence of ante- and peri-mortem factors on biochemical and physical characteristics of turkey breast muscle. *Veterinary Quarterly*, 1(1), 29–36. <https://doi.org/10.1080/01652176.1979.9693718>
- Wight, P. A. L., & Siller, W. G. (1980). Pathology of Deep Pectoral Myopathy of Broilers. In *Vet. Pathol* (Vol. 17).
- Wight, P. A. L., Siller, W. G., & Martindale, L. (1981). The sequence of pathological events in deep pectoral myopathy of broilers. *Avian Pathology*, 10(1), 57–76. <https://doi.org/10.1080/03079458108418458>
- Woelfel, R. L., Owens, C. M., Hirschler, E. M., Martinez-Dawson, R., & Sams, A. R. (2002). The characterization and incidence of pale, soft, and exudative broiler meat in a commercial processing plant. *Poultry Science*, 81(4), 579–584. <https://doi.org/10.1093/ps/81.4.579>
- Yu, X., Feng, Y., Bowker, B., & Zhuang, H. (2020). Expressible fluid measurements of broiler breast meat affected by emerging muscle abnormalities. *LWT*, 133, 110110. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.110110>
- Yüksel, E., Lahlali, R., Barış, A., Sameeullah, M., Ulaş, F., Koca, A. S., ... & Dababat, A. (2025). Entomopathogenic Nematodes and Bioactive Compounds of Their Bacterial Endosymbionts Act Synergistically in Combination with Spinosad to Kill *Phthorimaea operculella* (Zeller, 1873)(Lepidoptera: Gelechiidae), a Serious Threat to Food Security. *Microorganisms*, 13(10), 2368.
- Zampiga, M., Soglia, F., Petracci, M., Meluzzi, A., & Sirri, F. (2019). Effect of different arginine-to-lysine ratios in broiler chicken diets on the occurrence of breast myopathies and meat quality attributes. *Poultry Science*, 98(6), 2691–2697. <https://doi.org/10.3382/ps/pey608>
- Zhang, L., & Barbut, S. (2005). Effects of regular and modified starches on cooked pale, soft, and exudative; normal; and dry, firm, and dark breast meat batters. *Poultry Science*, 84(5), 789–796. <https://doi.org/10.1093/ps/84.5.789>
- Zimmermann, F. C., Fallavena, L. C. B., Salle, C. T. P., Moraes, H. L. S., Soncini, R. A., Barreta, M. H., & Nascimento, V. P. (2012). Downgrading of Heavy Broiler Chicken Carcasses Due to Myodegeneration of the Anterior Latissimus

Dorsi: Pathologic and Epidemiologic Studies. *Avian Diseases*, 56(2), 418–421.
<https://doi.org/10.1637/9860-072111-Case.1>.



ISBN: 978-625-378-493-5