

BİTKİ STRES BİYOLOJİSİ VE SÜRDÜRÜLEBİLİR TARIMDA YENİ YAKLAŞIMLAR

EDİTÖRLER

Prof. Dr. Erdoğan ÖZTÜRK

Doç. Dr. Volkan GÜL

Doç. Dr. Fırat SEFAOĞLU



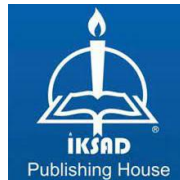
BİTKİ STRES BİYOLOJİSİ VE SÜRDÜRÜLEBİLİR TARIMDA YENİ YAKLAŞIMLAR

Editörler:

Prof. Dr. Erdoğan ÖZTÜRK
Doç. Dr. Volkan GÜL
Doç. Dr. Fırat SEFAOĞLU

Yazarlar:

Prof. Dr. Erdoğan ÖZTÜRK
Prof. Dr. Ergin Murat ALTUNER
Prof. Dr. Burcu SEÇKİN DİNLER
Doç. Dr. Fırat SEFAOĞLU
Doç. Dr. Nezahat TURFAN
Dr. Hatice ÇETİNKAYA
Dr. Halit KARAGÖZ
Öğr. Gör. Gökhan ÖZDEN
Arş. Gör. Kübra TEKŞEN
YL Öğr. Gamze BETÜL ÜNAL
YL Öğr. Melika BİDOLLAHKHANI
YL Öğr. Selcen Gül YUSUFOĞLU



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 Publisher: 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 the author's responsibility to abide by the publishing ethics rules.

Iksad Publications – 2025©

ISBN: 978-625-378-370-9

Cover Design: Volkan GÜL

October / 2025

Ankara / Türkiye

Size: 16x24cm

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ.....	1
------------	---

BÖLÜM 1

ŞEKER PANCARI İŞLEME SÜRECİNDE ORTAYA ÇIKAN YAN ÜRÜNLER ve DEĞERLENDİRİLMESİ	5
--	---

Prof. Dr. Erdoğan ÖZTÜRK

BÖLÜM 2

BİTKİLER İÇİN ÖNEMLİ OLAN BAZI B GRUBU VİTAMİNLER: SENTEZ YOLU, BİYOKİMYASAL ÖZELLİKLERİ VE STRES ALTINDAKİ ETKİLERİ	25
--	----

Dr. Hatice ÇETİNKAYA, Prof. Dr. Burcu SECKİN DINLER

BÖLÜM 3

SİNİR OTU: DOĞANIN ŞİFALI BİTKİSİ	59
---	----

YL Öğr. Gamze BETÜL ÜNAL, Doç. Dr. Fırat SEFAOĞLU

BÖLÜM 4

BAKTERİYEL BİYOFİLMİN KURAKLIK STRESİ ALTINDAKİ BİTKİLERDE KULLANIM POTANSİYELİ	81
---	----

YL Öğr. Melika BİDOLLAHKHANI,

YL Öğr. Selen Gül YUSUFOĞLU, Prof. Dr. Ergin Murat ALTUNER

BÖLÜM 5

BİTKİLERDE SEKONDER METABOLİZMA VE STRES YANITLARINA METABOLOMİK YAKLAŞIM	119
---	-----

Arş. Gör. Kübra TEKŞEN, Doç. Dr. Nezahat TURFAN,

Prof. Dr. Ergin Murat ALTUNER

BÖLÜM 6

SÜRDÜRÜLEBİLİR TARIM İÇİN AZOLLA	141
--	-----

Öğr. Gör. Gökhan ÖZDEN

BÖLÜM 7

YEREL POPÜLASYONLARIN ÖNEMİ: TİR EKMEKLİK BUĞDAYI ÖRNEĞİ	165
--	-----

Dr. Halit KARAGÖZ

ÖNSÖZ

Değerli okuyucularımız;

Küresel iklim değişikliğinin etkileriyle birlikte artan kuraklık, toprak bozulması ve çevresel stres faktörleri, bitkisel üretimde verim ve kalite kayıplarını kaçınılmaz hâle getirmektedir. Bu durum, bitkilerin stres koşullarına uyum mekanizmalarının anlaşılmasını ve sürdürülebilir tarım sistemlerinde kullanılabilecek biyoteknolojik ve biyokimyasal yaklaşımların geliştirilmesini zorunlu kılmaktadır.

Elinizdeki bu kitap, bitki-mikroorganizma etkileşimlerinden metabolik yanıtların omik düzeyde analizine kadar uzanan geniş bir perspektifte, bitkilerin stres koşullarındaki biyolojik tepkilerini ele almaktadır. Bakteriyel biyofilmler, vitamin metabolizması, sekonder metabolit üretimi ve endüstriyel bitki yan ürünlerinin değerlendirilmesi gibi konular hem temel bilim hem de uygulamalı araştırmalar açısından bütüncül bir bakış açısıyla sunulmuştur. Amaç, bitkilerin çevresel streslere karşı geliştirdiği fizyolojik, biyokimyasal ve moleküler uyum stratejilerini ortaya koyarak, geleceğin iklim dirençli tarım sistemlerinin oluşturulmasına katkı sağlamaktır. Bu doğrultuda kitap, bitki biyoteknolojisi, fizyoloji, biyokimya ve sürdürülebilir üretim alanlarında çalışan araştırmacılar, lisansüstü öğrenciler ve uygulayıcılar için değerli bir kaynak niteliği taşımaktadır.

Esere katkılarından dolayı kıymetli yazarlarımız Prof. Dr. Erdoğan ÖZTÜRK, Prof. Dr. Ergin Murat ALTUNER, Prof. Dr. Burcu SEÇKİN DİNLER, Doç. Dr. Fırat SEFAOĞLU, Doç. Dr. Nezahat TURFAN, Dr. Hatice ÇETİNKAYA, Dr. Halit KARAGÖZ, Öğr. Gör. Gökhan ÖZDEN, Arş. Gör. Kübra TEKŞEN, Yüksek Lisans Öğrencisi Gamze BETÜL ÜNAL, Yüksek Lisans Öğrencisi Melika BİDOLLAHKHANİ ve Yüksek Lisans Öğrencisi Selcen Gül YUSUFOĞLU'na kitabın hazırlanma aşamasında yardımlarını ve desteğini esirgemeyen Sayın Sefa Salih BİLDİRİCİ' ye, yayınlanma aşamasında desteği ve emeği geçen İksad Yayınevi çalışanlarına teşekkürlerimizi sunarız.

Bilimsel bilgi birikimine katkı sağlaması ve yeni araştırmalara ilham vermesi dileğiyle.

YAYIN EDITÖRLERİ

Prof. Dr. Erdoğan ÖZTÜRK

Doç. Dr. Volkan GÜL

Doç. Dr. Fırat SEFAOĞLU

Prof. Dr. Erdoğan ÖZTÜRK

(erozturk@atauni.edu.tr)

Atatürk Üniversitesi, Erzurum/Türkiye



Erzurum'da 15.12.1974 doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini Erzurum'da tamamladı. Atatürk Üniversitesi Ziraat Fakültesi Tarla Bitkileri Bölümünden 1996 yılında mezun oldu. 1997- 1998 yılların da Millî Eğitim Bakanlığı bünyesinde Erzurum Oltu ilçesi Yaylaçayır Köyünde sınıf öğretmenliği yaptıktan sonra 1998 yılında Atatürk Üniversitesi Ziraat Fakültesi Tarla Bitkileri Bölümünde Araştırma Görevlisi olarak göreve başladı. Aynı yıl başladığı Yüksek Lisans eğitimini 2001 yılında, Doktorasını ise 2006 yılında Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tarla Bitkileri Anabilim Dalı'nda tamamladı. 2010 yılında Dr. Öğr. Üyesi olarak atandı. 2012 yılında Tarla Bitkileri Yetiştiriciliği ve Islahı alanında Doçent oldu. 2018 yılında yine Atatürk Üniversitesi Ziraat Fakültesi Tarla Bitkileri Bölümünde Profesör olarak atandı. Halen aynı üniversitede akademik ve idari olarak birçok görevlerde çalışma hayatına devam etmektedir.

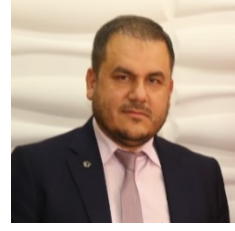
Birçok toplantı ve kongrelere katıldı. Hem SCI-SCI-Expanded kapsamında hem de ulusal ve uluslararası hakemli dergilerde makaleleri yer almaktadır. Önemli dergilerde editörlük görevi bulunmaktadır. Bilimsel araştırma projesi, ulusal ve uluslararası dergilerde hakemlik yapmaktadır. Tarla Bitkileri, Nişasta ve Şeker Bitkileri, Lif Bitkileri, Tarla Tarımı, Tarım İnsan ve Tüketim, Mühendislikte Tasarım gibi lisans seviyesinde dersler vermiş ve vermeye devam etmektedir. Başta patates, şeker pancarı, ayçiçeği ve aspir gibi endüstri bitkileri olmak üzere tıbbi ve aromatik bitkiler gibi birçok alanda çalışmalar yürütmektedir.

Araştırma Alanları: Tarla Bitkileri Yetiştiriciliği ve Islahı, Endüstri Bitkileri ve Tıbbi ve Aromatik Bitkiler

Doç. Dr. Volkan GÜL

(volkangul@bayburt.edu.tr)

Bayburt Üniversitesi, Bayburt/Türkiye



23.05.1979 yılında Samsun’da doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini Samsun’da tamamladı. Lisans eğitimini 2002 yılında Ondokuz Mayıs Üniversitesi Ziraat Fakültesi Tarımsal Yapılar ve Sulama Bölümünden tamamladı. 2005-2017 yılları arasında Emniyet Genel Müdürlüğü’ne bağlı Taşra Teşkilatı’nda Polis Memuru olarak görev yaptı. Yüksek Lisans eğitimini 2008 yılında Ordu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tarla Bitkileri Anabilim Dalı’nda tamamladı. Doktora unvanını 2013 yılında Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tarla Bitkileri Anabilim Dalı’ndan aldı. 2017 yılında Bayburt Üniversitesi Uygulamalı Bilimler Fakültesi Organik Tarım İşletmeciliği Bölümüne Dr. Öğr. Üyesi olarak atandı. 2020 yılında Bayburt Üniversitesi Uygulamalı Bilimler Fakültesi Organik Tarım İşletmeciliği Bölümü’nde Doçent oldu. 2022 yılında Anadolu Üniversitesi Açıköğretim Fakültesi Sosyoloji bölümünden mezun oldu. Halen Bayburt Üniversitesi Aydıntepe Meslek Yüksekokulu Gıda İşleme Bölümü’nde Bölüm Başkanı olarak görev yapmaktadır.

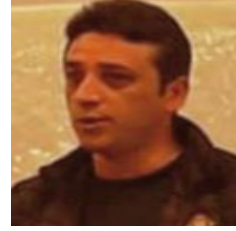
Yurt içi ve yurt dışında birçok toplantı ve kongrelere katıldı. Hem SCI-SCI-Expanded kapsamında hem de ulusal ve uluslararası hakemli dergilerde makaleleri bulunmaktadır. Kongre bildirileri, bilimsel araştırma projesi ve uluslararası dergi hakemliği bulunmaktadır. Endüstri Bitkileri, Organik Tarım, İyi Tarım Uygulamaları, Yağ Bitkileri, Bitki Stres Faktörleri, Tıbbi ve Aromatik Bitkiler temel olmak üzere birçok ders vermiştir. Bayburt bölgesi ve dünyada bu bölgenin iklim ve çevre şartlarına uygun olabilecek başta organik tarım, yağ bitkileri ve tıbbi ve aromatik bitkiler gibi birçok alanda çalışmalar yürütmektedir. Halen Bayburt Üniversitesi’nde akademik çalışmalarına, eğitimlerine ve projelerine devam etmektedir.

Araştırma Alanları: Endüstri Bitkiler, Organik Tarım ve Organik Bitki Besleme, Yağlı Tohumlu Bitkiler, Tıbbi ve Aromatik Bitkiler, Bitki Stres Fizyolojisi

Doç. Dr. Fırat SEFAOĞLU

(fsefaoglu@kastamonu.edu.tr)

Kastamonu Üniversitesi, Kastamonu/Türkiye



11.11.1979 yılında Erzurum'da doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini Erzurum'da tamamladı. Lisans eğitimini 2003 yılında Atatürk Üniversitesi Ziraat Fakültesi Tarla Bitkileri Bölümünde tamamladı. 2008 yılında Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tarla Bitkileri Anabilim Dalı'nda tamamlandı. 2008-2011 yılları arasında Tarım Kredi Kooperatiflerine Bağlı Mersin ve Erzurum Bölge Müdürlüğünde, 2011-2017 yıllarında ise Tarımsal Araştırmalar Genel müdürlüğüne bağlı Doğu Anadolu Tarımsal Araştırma Enstitüsünde Ziraat Yüksek Mühendisi olarak görev yaptı. Doktora unvanını 2017 yılında Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tarla Bitkileri Anabilim Dalı'ndan aldı. 2018 yılında Kastamonu Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Genetik ve Biyomühendislik Bölümüne Dr. Öğr. Üyesi olarak atandı. 2023 yılında Kastamonu Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Genetik ve Biyomühendislik Bölümünde Doçent oldu.

Yurt içi ve yurt dışında birçok toplantı ve kongrelere katıldı. Hem SCI-SCI-Expanded kapsamında hem de ulusal ve uluslararası hakemli dergilerde makaleleri bulunmaktadır. Kongre bildirileri, bilimsel araştırma projesi ve uluslararası dergi hakemliği bulunmaktadır. Bitki Doku Kültürü, Tarımsal Biyoteknoloji, Tıbbi ve Aromatik Bitkiler, temel olmak üzere birçok ders vermiştir. Doğu Anadolu bölgesi ve dünyada bu bölgenin iklim ve çevre şartlarına uygun olabilecek başta, yağ bitkileri ve tıbbi ve aromatik bitkiler gibi birçok alanda çalışmalar yürütmektedir. Halen Kastamonu Üniversitesi'nde akademik çalışmalarına, eğitimlerine ve projelerine devam etmektedir.

Araştırma Alanları: Endüstri Bitkiler, Yağlı Tohumlu Bitkiler, Tıbbi ve Aromatik Bitkiler, Bitki Stres Fizyolojisi

BÖLÜM 1

ŞEKER PANCARI İŞLEME SÜRECİNDE ORTAYA ÇIKAN YAN ÜRÜNLER ve DEĞERLENDİRİLMESİ

Erdoğan ÖZTÜRK¹

DOI: <https://dx.doi.org/10.5281/zenodo.17502323>

¹ Prof. Dr., Atatürk Üniversitesi Ziraat Fakültesi, Tarla Bitkileri Bölümü, Erzurum, Türkiye
E-mail: erozturk@atauni.edu.tr, ORCID ID 0000-0001-8746-3005

GİRİŞ

Amaranthaceae familyasından olan şeker pancarı (*Beta vulgaris* L.), dünya şeker üretiminde, şeker kamışından (*Saccharum officinarum* L.) sonra ikinci en önemli şeker bitkisi konumundadır. Kök gövdesinde yüksek oranda sakkaroz bulunduran bu bitki, dünya şeker ihtiyacının yaklaşık %40'ını karşılamaktadır. Ticari amaçla şeker üretimi için çoğunlukla ılıman iklim bölgelerinde yetiştirilir (Rashid, 1999; Sefaoğlu ve ark., 2016). En yoğun üretim Avrupa'da yapılmakla birlikte, Asya ve Kuzey Amerika'da da belirli bir üretim alanına sahiptir (Kumar & Pathak, 2013). Günümüzde yaklaşık 57 ülkede yetiştirilen şeker pancarının en büyük üreticileri arasında Rusya Federasyonu, Ukrayna, ABD, Almanya, Fransa, Türkiye, Çin, Polonya, Mısır, İngiltere, İran, Belarus, Hollanda, İtalya ve Belçika yer almaktadır (Kabir, 2020).

Şeker pancarı tarımı, yalnızca şeker üretimi açısından değil; bitkisel ve hayvansal üretime katkısı, toprak yapısının iyileştirilmesi ve ekolojik dengeye sağladığı olumlu etkiler bakımından da önemlidir. Nadasa bırakılacak arazilerde veya münavebe sisteminde, kendisinden sonra ekilen ürünlerin verimini artırmakta ve endüstriyel girdi kullanımını optimize etmektedir. Ayrıca, ayçiçeğine kıyasla yaklaşık 5 kat, buğdaya göre ise 20 kat daha fazla istihdam sağlamakta; mekanizasyon imkânı bakımından ise buğday ve ayçiçeğine oranla iki kat daha avantajlıdır (Anonim, 2022).

Taze hasat edilmiş bir şeker pancarı kökü ortalama olarak %75-76 su, %15-20 şeker, %2,6 şeker dışı maddeler ve %4-6 posa içerir. Besin değeri yüksektir; 100 gramında yaklaşık 42,68 kcal enerji, 8 g karbonhidrat, 2 g lif ve 1 g protein bulunur. Bir ton taze pancarın işlenmesiyle ortalama 121 kg kristal şeker, 38 kg melas ve 50 kg küspe elde edilir. Ayrıca şeker pancarı; şurup, etil alkol, biyoyakıt gibi değerli ürünlerin hammaddesi olarak kullanılabilenekte, yaprak ve küspe kısmı ise özellikle sığır besiciliğinde yem olarak

değerlendirilmektedir. Pancar şekerinin hafif sakinleştirici ve idrar söktürücü özellikleri olduğuna dair bilgiler de mevcuttur.

2021 yılı verilerine göre dünya genelinde şeker pancarı ekim alanı 4,6 milyon hektar olup, toplam üretim 287 milyon ton ve ortalama verim 60,1 ton/ha' dır. Türkiye'de ise 2022 yılında 3 milyon dekar ekim alanından 19 milyon ton üretim elde edilmiş ve ortalama verim 6,52 ton/da olmuştur. Türkiye, şeker pancarından şeker üreten ülkeler arasında Rusya, ABD, Fransa ve Almanya'nın ardından beşinci sırada yer almaktadır (TEPGE, 2023).

Şeker pancarı başta şeker üretimi olmak üzere, biyoyakıt, hayvan yemi ve çeşitli endüstriyel kullanım alanlarında değerlendirilen çok yönlü bir endüstri bitkisidir. Şeker pancarı işleme sürecinde esas ürün olarak kristal şeker elde edilirken, üretim sürecinde önemli miktarda yan ürün oluşur. Bu yan ürünler hem ekonomik hem de çevresel açıdan değerlendirildiğinde, pancar endüstrisinin sürdürülebilirliği için kritik öneme sahiptir.

Yan ürünlerin değerlendirilmesi, sadece atıkların geri kazanımı değil, aynı zamanda yeni ürün geliştirme, enerji üretimi ve besin zincirine katkı sağlama açısından da önemlidir. Bu yan ürünlerin etkin kullanımı, şeker pancarı üretiminin çevresel etkilerini azaltırken, ekonomik faydayı artırmaktadır. Özellikle biyoteknolojik yaklaşımlar ve biyorefinerya yöntemleri, bu yan ürünlerin değerini artıran önemli stratejilerdir. Şeker pancarının işlenmesi sırasında sakkarozun büyük bölümü kristal şeker olarak ayrıldıktan sonra, rafine şekerin yanı sıra melas ve yaş pancar posası gibi çeşitli yan ürünler oluşur. Şeker verimi, genellikle taze pancar ağırlığının %10-20'si arasında değişmektedir. Melas, koyu kahverengi, yüksek viskoziteli ve yaklaşık %80 oranında kuru madde içeren bir sıvıdır. İçeriğinin yaklaşık %50'si şeker, %30'u ise organik bileşikler ve mineral tuzlardan oluşur. Ayrıca sukroz, invert şeker, rafinoz, pektin yıkım ürünleri, laktik asit ve azotlu bileşikler gibi çeşitli mineral ve suda çözünebilen maddeler barındırır. Yüksek oranda şeker içermesine rağmen, melastan bu şekerin geri kazanılması ekonomik olarak uygulanabilir

değildir. Bunun yerine melas, fermantasyon sanayisinde yaygın olarak değerlendirilmekte; etil alkol, ispirto, ekmek mayası ve sitrik asit üretiminde temel bir hammadde olarak kullanılmaktadır. Ayrıca, yem sanayisinde de önemli bir katkı maddesi niteliğindedir (Rashid, 1999; Sunulu & Sunulu, 2016; Pathak ve ark., 2017; Eştürk, 2018; Misra ve ark., 2020; Mall ve ark., 2021).

Bu bölümde şeker pancarı yan ürünleri detaylı şekilde ele alınacak ve çeşitli değerlendirme yöntemleri tartışılacaktır.

1. YAN ÜRÜNLER VE DEĞERLENDİRİLMESİ

Şeker pancarı, tarım sektöründe ve tarıma dayalı sanayi üretiminde önemli bir rol üstlenmekte olup hem ekonomik hem de sosyal açıdan yarattığı katma değerle stratejik önemini korumaktadır. Şekerin yüksek ekonomik değerinin yanı sıra, şeker pancarı üretimi kırsal alanda istihdam yaratarak çiftçilerin tarımsal üretime bağlılığını güçlendirmekte ve bu sayede köyden kente göçü azaltıcı bir işlev görmektedir. Ayrıca, şeker pancarının endüstriyel bir bitki olması, ülkemiz başta olmak üzere birçok ülkenin tarım politikalarında öncelikli bir yere sahip olmasının temel nedenini oluşturmaktadır. Bu yönleriyle şeker pancarı, yalnızca bir tarımsal ürün değil, aynı zamanda kırsal kalkınma ve sürdürülebilir tarım açısından stratejik bir unsur niteliği taşımaktadır.

Şeker pancarının işlenmesi sonucu ortaya çıkan yan ürünlerin tamamına yakını stratejik niteliği olan ürünlerdir. Pancar şekeri endüstrisi, şeker pancarından doğrudan olarak pancar yaprakları, posası, melası, şlempe ve şlamı gibi çeşitli yan ürünleri elde etmekte olup, bu yan ürünler hayvancılık sektörü için önemli bir yem kaynağı teşkil etmektedir. Yurt dışında, özellikle şeker pancarı yetiştiriciliğinin bir asrı aşkın süredir sürdürüldüğü ülkelerde, bu yan ürünlerin ekonomik ve besleyici değerleri uzun yıllar boyunca anlaşılmış ve etkin bir şekilde değerlendirilmiştir. Şeker pancarı yan ürünlerinin etkin bir şekilde kullanılabilmesi için, bu ürünlerin ekonomik ve besleyici değerinin

daha geniş kitleler tarafından kabul edilmesi ve hayvancılıkta kullanımının teşvik edilmesi gerekmektedir. Pancar yapraklarının hayvan yemi olarak kullanılması durumunda, ekim alanı, pancar verimi ve besleme değeri dikkate alındığında, posadan elde edilen gelir kadar bir ekonomik katkı sağlanabileceği öngörülmektedir. Pancar yan ürünlerinin etkin şekilde değerlendirilmesi, hem hayvansal üretimde yem maliyetlerinin azaltılmasına hem de tarımsal kaynakların daha verimli kullanılmasına katkı sağlayacaktır. Bu bağlamda, üretici ülkelerde pancar posası, yaprakları ve melasının daha bilinçli ve planlı bir şekilde hayvancılık sektöründe kullanılması, sürdürülebilir tarım ve gıda güvenliği açısından büyük önem taşımaktadır (Skuderna & Sheets, 1934). Bununla birlikte, bu ürünlerin kullanım alanları hayvansal üretimle sınırlı kalmamakta; biyogaz üretimi, etanol ve maya endüstrisi, organik gübreleme, hatta bazı gıda ve kimya sanayi kollarında hammadde olarak da önem kazanmaktadır. Örneğin, melas alkol ve fermantasyon ürünleri elde etmede değerli bir kaynak olurken, küspe organik maddece zengin yapısıyla toprak iyileştirici olarak kullanılabilir. Böylece şeker pancarı yan ürünleri, yalnızca hayvancılığa katkı sağlamakla kalmayıp enerji, gıda, biyoteknoloji ve çevre dostu uygulamalara yönelik farklı sektörlerde de katma değer yaratmaktadır.

1.1. Şeker pancarı yaprakları

Şeker pancarı hasat edildikten sonra, kök dışında kalan baş ve yaprak kısımları gibi yan ürünler şeker pancarı yaprağı olarak adlandırılmaktadır. Şeker pancarı üretiminde yapılan tüm maliyetler kök üretimine yönelik olduğundan, yaprak üretimi için ilave bir harcama yapılmamaktadır (Kılıç, 1986). Şeker pancarları, şeker fabrikaları tarafından öncelikli olarak sakkaroz (sukroz) içeriği dikkate alınarak satın alınmaktadır. Ancak, pancarın taç kısmında belirli miktarda tuzlar birikmekte ve bu tuzlar, pancar suyundan şekerin etkin bir şekilde elde edilmesini olumsuz yönde etkilemektedir. Bu

nedenle, şeker pancarı yetiştiricileri, hasat öncesinde veya hasat sırasında, yaprakların bağlı bulunduğu taç kısmını pancardan ayırmak zorundadır. Hasat sırasında, köklerden şeker elde edildikten sonra geriye kalan yaprakların bir kısmı hayvan yemi olarak değerlendirilirken, önemli bir bölümü tarlada bırakılmakta ve organik madde olarak toprağa karışmaktadır (Akıltepe ve ark., 1964; Kılıç, 1986).

Şeker pancarından büyük miktarda yaprak ve baş artıkları elde edilir. Ülkemizde Şeker üretimi amacıyla her yıl yaklaşık 3 milyon dekar alana şeker pancarı ekilmekte ve yan ürün olarak yaklaşık 6 milyon ton şeker pancarı yaprağı elde edilmektedir. Taze şeker pancarı yaprakları ortalama %20 kuru madde, %2-3 ham protein, %2-5 ham selüloz ve yaklaşık %10 ham kül içermekte olup, bu özellikleriyle besin değeri yüksek bir yan ürün olarak değerlendirilmektedir.

Bu yapraklar ve baş artıkları taze olarak hayvan beslenmesinde tüketilir. Çok miktarda olursa, kurutularak veya silo yemi olarak depolanır, uzun süre yem olarak harcanır. Pancar yaprakları ve baş artıkları çok değerli hayvan yemidir. Pancar hasadından sonra üreticiye kalan baş ve yaprak miktarı, üretilen pancarın %30 ile 40'ını teşkil etmektedir. Bu yemin para değerinden başka, beslenen hayvanların et, süt vs. gelirleri de hesaplanınca kişi, aile ve yurt ekonomisine büyük katkıları olduğu görülmektedir. Bir hektar alandan elde edilen pancarın baş, yaprak ve küspesi hayvan yemi olarak değerlendirildiğinde yaklaşık 300 kg canlı hayvan ağırlığı elde edilmesi mümkündür. Bir dekar şeker pancarı tarlasının yapraklarının ürettiği oksijenin, altı insanın bir yıl boyunca ihtiyaç duyduğu miktara eşit olduğu bilinmektedir. Hasat sonrası toprakta bırakılarak yeşil gübre olarak değerlendirilebilen şeker pancarı yaprakları, aynı zamanda hayvan yemi olarak da kullanılmaktadır. Bunun yanı sıra, biyoyakıt üretiminde hammadde olarak önem taşımakta ve Avrupa'da biyoetanol üretiminin yaklaşık %30'u bu kaynaktan karşılanmaktadır. Yapraklar ayrıca bitki bazlı protein üretiminde değerlendirilebilmekte ve mutfaklarda çeşitli

yemeklerin hazırlanmasında da kullanılmaktadır (Kara, 2011). Bu çok yönlü kullanım alanları, şeker pancarı yapraklarını hem tarımsal hem de endüstriyel açıdan değerli bir yan ürün haline getirmektedir.

1.2. Şeker pancarı posası (küşpesi)

Şeker pancarı işleme sürecinde, pancar köklerinde bulunan sakkarozun sıcak suyla ekstraksiyonu sonrasında geriye kalan lifli ve enerji açısından zengin yan ürün şeker pancarı posası olarak adlandırılmaktadır. Posa, büyük oranda pancar hücre duvarlarından oluşmakta ve yaklaşık %2-4 oranında şeker içermektedir (Western Sugar, 2015; Nordzucker, 2017). Şeker pancarı posası; ruminantlar, kanatlılar, tavşanlar ve atlar dahil olmak üzere tüm çiftlik hayvanları tarafından tercih edilmekte ve çiftçiler tarafından yüksek besleme değeri nedeniyle fazlasıyla değerlendirilmektedir. Besleme açısından, şeker pancarı posası hem lif içeriği bakımından kısılmış kuru ota, hem de enerji içeriği açısından mısıra benzer özellikler taşımaktadır (Crawshaw, 2004). Şeker pancarı posası etanol üretimi için de önemli bir hammadDEDİR. Biyogaz üretiminde de kullanılabilir.

Dünya genelinde, şeker pancarı köklerinin yaklaşık %86'sı şeker üretiminde kullanılmakta ve bu süreç sonunda yan ürün olarak şeker pancarı posası elde edilmektedir (FAO, 2017). Yapılan araştırmalara göre, 1 ton şeker pancarından yaklaşık 150 kg şeker, 500 kg yaş pancar posası ya da 50 kg kurutulmuş şeker pancarı posası elde edilmektedir (Legrand, 2015). Posanın fiziksel ve kimyasal özellikleri, uygulanan işleme yöntemine bağlı olarak farklılık göstermekte olup; yaş, preslenmiş, silolanmış ve kurutulmuş posa olmak üzere dört temel formda değerlendirilmektedir.

1.2.1. Yaş pancar posası

Hasat edilen şeker pancarının (*Beta vulgaris* L.) işleme aşamasından önce depolanması, özellikle kalite ve dayanıklılık açısından çok önemlidir. Şeker üretiminin yanında diğer yan ürünlerin elde edilerek değerlendirilmesi

açısından da başlangıçtaki depolamaya dikkat edilmelidir (Yildiz ve ark., 2024). Şeker üretim sürecinde sıcak su (60-70°C) ile yapılan ekstraksiyon sonrası elde edilen yüksek nem içeriğine sahip lifli artık materyal, yaş şeker pancarı posası olarak adlandırılmaktadır. Sulu küspe, preslerde %13-17 kuru maddeye kadar sıkılır ve yaş küspe adı ile çiftçi ve besicilere hayvan yemi olarak değerlendirilmek üzere verilir. Yaş posanın kuru madde oranı yaklaşık %10-15 arasında değişmektedir. Yüksek su içeriği hem taşıma hem de uzun süreli depolama açısından kısıtlayıcı bir faktördür. Ayrıca, yüksek sıcaklıkta yapılan ekstraksiyon, mikrobiyal gelişmeyi hızlandırarak bozulma riskini artırmaktadır (CNC, 2002). Bu nedenle yaş pancar posasının tüketimi, genellikle şeker fabrikalarının yakın çevresinde sınırlı kalmaktadır. Hayvan beslemesinde süt ve besi sığırları, koyunlar ve atlarda kullanılmakla birlikte, yüksek su içeriği nedeniyle taze olarak sınırlı miktarlarda kullanılır; genellikle silaj yapımında veya hızlı tüketim sağlanacak şekilde değerlendirilir.

1.2.2. Preslenmiş pancar posası

Yaş pancar posasının suyu mekanik presleme yöntemiyle uzaklaştırılarak kuru madde oranı yaklaşık %20'ye çıkarılmaktadır. Preslenmiş pancar posası, taşınabilirliğinin daha kolay olması nedeniyle yaş posaya göre avantajlıdır (Legrand, 2015). Ancak, yapısında hâlâ yüksek miktarda su bulunması nedeniyle mikrobiyal bozulma riski devam etmekte, uygun koşullarda saklanmadığında 2-3 gün içerisinde kullanılmaz hâle gelmektedir (Legrand, 2015; Crawshaw, 2004; CNC, 2002). Preslenmiş posanın taze olarak tüketilmesi önerilmekte, uzun süreli saklama için ise silajlama yöntemi tercih edilmektedir.

1.2.3. Silolanmış pancar posası

Daha uzun süreli depolama amacıyla, preslenmiş pancar posasının silolanması önerilmektedir. Pancar posası, uygun silolama uygulamaları takip

edildiğinde kolaylıkla silolanabilmektedir. Silajlama işlemi temiz bir zeminde, hijyenik ekipmanlar kullanılarak gerçekleştirilmelidir. Posa içerisindeki havanın tamamen uzaklaştırılabilmesi için materyalin doğru şekilde sıkıştırılması gerekmektedir. Ardından, posanın üzeri hava girişini önlemek amacıyla hava geçirmez bir plastik örtü ile kapatılmalıdır. Bu koşullar altında, laktik asit fermentasyonu kendiliğinden ve hızlı bir şekilde gerçekleşmektedir. Bu süreç sonucunda yaklaşık 30 gün içerisinde yüksek kaliteli bir silaj elde edilmekte ve bu silaj birkaç ay boyunca güvenle kullanılabilir. Silolanmış pancar posası, uzun süreli depolamaya uygun, yüksek enerji içeriğine sahip ve özellikle süt sığırları için değerli bir yem kaynağıdır (CNC, 2002; Legrand, 2015).

1.2.4. Kuru pancar posası

Şeker pancarı posasının en uzun süreli korunma yöntemi dehidrasyondur. Kurutulmuş pancar posası üretiminde posa, öncelikle preslenerek fazla su ve kalan şeker uzaklaştırılır. Ardından tamburlu kurutucularda nem oranı yaklaşık %11'e düşürülür. Son aşamada posa, daha uzun raf ömrü ve kolay taşınabilirlik sağlamak amacıyla pelet hâline getirilir. Peletleme sırasında, bağlayıcı olarak melas kullanılabilir. Eğer ürün melas içeriyorsa “melaslı pancar posası”, melas eklenmemişse “melassız pancar posası” olarak adlandırılmaktadır (Western Sugar, 2015; Nordzucker, 2017). Kurutulmuş pancar posası, yüksek enerji değeri, uzun raf ömrü, kolay depolanabilirliği ve yüksek sindirilebilirliği sayesinde, süt ve besi sığırları, koyunlar, keçiler ve atlar için uygun bir enerji ve lif kaynağıdır. Ayrıca, yıl boyunca uygulanabilen dengeli besleme programlarıyla uyumludur (Désialis, 2016). Kuru posanın silaj yapımında da kullanımı mümkündür, ancak silaj kalitesi eklenen katkı maddelerine ve işleme yöntemine bağlı olarak değişmektedir. Kurutulmuş şeker pancarı posası peletlerinin en büyük üreticileri Fransa, Almanya, Rusya, ABD ve Mısır olup, dünya üretiminin

%66'sını (yaklaşık 5 milyon t) sağlamaktadır. Yaş pancar posasının başlıca üreticileri ise Hollanda, Belçika, Polonya, Türkiye, Rusya, Ukrayna ve İran olarak bildirilmiştir (Beef ve Feed, 2017).

1.3. Pancar melası

Pancar melası, şeker pancarı köklerinden elde edilen konsantre şeker suyunun kristalleştirilmesi sonucu ortaya çıkan şerbetimsi yan üründür (SNFS, 2015; Crawshaw, 2004). Viskoz, koyu renkli, tatlı ve şeker açısından zengin olan pancar melası, karamelsi bir aromaya sahiptir. Şeker kamışı melasına benzer şekilde, hayvanlar tarafından oldukça iştah açıcı bulunur ve tüm hayvan türleri için önemli bir yem bileşeni olarak kullanılmaktadır. Pancar melası, enerji kaynağı olarak, iştah artırıcı olarak, karma yemlerde bağlayıcı madde olarak ve üre gibi diğer bileşenlerin taşıyıcısı olarak kullanılmaktadır (CNC, 2002). Melas; alkol, maya ve yem sanayinde temel hammadde durumundadır, ayrıca ucuz olduğu için sitrik asit fermentasyonunda hammadde olarak da kullanılır. İşlenen pancara göre yaklaşık %4-5 oranında elde edilmektedir. Melas yaklaşık olarak %50 oranında şeker, %30 oranında şeker dışı maddeler ve %20 oranında su kapsar. Rafine şekerin aksine melas bazı vitamin ve mineralleri içerir. Manganez, magnezyum, demir, B₆ vitamini, selenyum, potasyum, bakır ve kalsiyum melasın içeriğinde bulunan vitamin ve minerallerdendir (Kara, 2011).

Pancar melası, yüksek şeker içeriği nedeniyle enerji yemi olarak değerlidir ve bu özelliğiyle tüm hayvan türleri için değerli bir yem bileşenidir. Viskoz yapısı, pancar melasının pelet üretiminde bağlayıcı olarak kullanılmasını sağlar; bu sayede yem granülleri peletleme sırasında birbirine yapışır ve taşıma ile yemleme ekipmanları üzerinden geçerken parçalanma olasılığı azalır. Ayrıca, melasın eklenmesi yem karışımındaki tozlanmayı da azaltır (Blair, 2008). Pancar melası, hızlı fermente olabilen şeker sağlaması nedeniyle silaj katkısı olarak da kullanılmaktadır (Crawshaw, 2004). Ayrıca,

pancar melası üreli pelet bloklarının yapımında kullanılmaktadır (FAO, 2011; Beames, 1963). Elde edilen sonuçlar doğrultusunda silajlara melas ilave edilmesi ile kuru madde, ham protein ve ham selüloz parçalana birliklerinde artış görülmüştür Buğday veya arpa samanından silaj yapmak için 300 kg samana 30 kg melas katılarak sindirilebilirliği yüksek bir silaj elde etmiş oluruz.

Pancar melası, etanol üretimi ve maya ile fermente endüstrisinde de kullanılmaktadır. Avrupa Birliği'nde pancar melasının yaklaşık %70'i etanol üretiminde kullanılmaktadır. Amerika Birleşik Devletleri'nde ise, yol buzlanmalarını önlemek için kullanılan klorür tuzuna eklenerek çevresel etkilerin azaltılmasına katkıda bulunur (MidWest Agri, 2019). Pancar melası, şeker içeriği yüksek olduğundan yüksek ozmotik basınca sahiptir ve bu nedenle bakteriler ve diğer mikroorganizmaların gelişmesine izin vermez. Ancak özellikle düşük sıcaklıklarda viskozitesi nedeniyle, depolama tanklarından yem karıştırıcılara aktarımı zorlaştırabilir (Mavromichalis, 2016). Bu nedenle, ısıtmalı tanklarda saklanması ve gerektiğinde kullanılmadan önce ısıtılması önerilmektedir (CNC, 2002; MidWest Agri, 2019).

Viskozite problemlerini azaltmanın yaygın bir yolu, pancar melasının kuru madde oranının %72-75'e düşürülerek sulandırılmasıdır (Harland ve ark., 2006). Sulandırma sırasında önce su eklenmesi tavsiye edilir, çünkü melasa sudan daha yoğundur ve bu yöntem karışımı kolaylaştırır (Bernard ve ark., 1991). Ancak sulandırılmış melasanın ozmotik basıncı daha düşük olduğundan, fermente olma riski artar. Fermente olan melasa, belirgin bir alkol kokusuna sahip olup yüzeyi sıvılaşır. İçerisine %5'ten fazla su eklenmiş melasanın, yüksek sıcaklıklarda 8 gün içinde tüketilmesi önerilmektedir (MidWest Agri, 2019; Harland ve ark., 2006; CNC, 2002). Pancar melası, hayvanlara farklı şekillerde verilebilir. Doğrudan yemliklere konabilir, kaba yem üzerine püskürtülebilir, kuru bloklar hâlinde (örneğin üre ile birlikte) sunulabilir veya diğer yem bileşenleriyle karıştırılabilir (CNC, 2002; Bernard ve ark., 1991).

Melasının emilimi, kullanılan yem altlığına, partikül boyutuna (ince öğütülmüş materyaller melası daha iyi emer), nem içeriğine (kuru materyaller daha iyi emer) ve melasın sıcaklığına (ısıtılmış melasa daha az viskoz ve daha iyi emilir) bağlıdır (Bernard ve ark., 1991). Özetle şeker pancarı yan ürünlerinden biri olan melas, fermantasyon hammadde olarak geniş bir kullanım alanına sahiptir. Etil alkol ve sitrik asit üretiminde değerlendirilen melas, aynı zamanda doğrudan hayvan yemi olarak da kullanılmaktadır. İçilebilir kalitede damıtılan içkilerin üretiminde hammadde olurken, içilemeyen kalitede ise endüstriyel tüketim ve ilaç sanayiinde önemli bir yer tutmaktadır. Bunun yanı sıra sirke ve hamur mayası üretiminde, briket kömür imalatında, inşaat harçlarında, kozmetik sanayiinde ve meşrubat yapımında da kullanılmaktadır. Bu çok yönlü kullanım alanları, melası sadece şeker üretiminin yan ürünü olmaktan çıkarıp, farklı sektörlerle katma değer sağlayan stratejik bir hammadde haline getirmektedir.

2. ÇEŞİTLİ YAN ÜRÜNLER

2.1. Ana pancar kökleri

Şeker pancarı tohum amaçlı olarak da üretilmektedir. Tohum hasadı yapıldıktan sonra, toprakta kalan ana pancar kökleri yem olarak kullanılabilir. Bu kökler, %5–8 veya daha fazla sakkaroz içeriğine sahip oldukları için önemli bir besleme değerine sahiptir. Kökler topraktan çıkarılarak hendeğe veya silo çukuruna yerleştirilmeli ve gerektiği şekilde hayvanlara verilmelidir; ya da istenirse küçük parçalara kesilerek siloya alınabilir. Bu şekilde hazırlanan silajın besleme değeri, pancar başı silajı ile karşılaştırılabilir düzeydedir. Bir diğer uygulama yöntemi ise köklerin topraktan çıkarıldıktan sonra hayvanların üzerinde otlatmasına izin verilmesidir. Ancak, kökler bu şekilde açıkta bırakılırsa hızla kurur, sert ve lifli hâle gelir; bu durumda hayvanlar için tehlikeli olabilir (Skuderna ve Sheets 1934).

2.2. Pancar kuyrukları

Pancarların kamyon veya römorklara aktarılması sırasında, depolama haznelerinde veya çeşitli konveyörlerde bazı “kuyruklar” kırılmaktadır. Bu kuyruklar genellikle fabrikanın su kanallarındaki yakalama havuzları ve tuzaklarda birikir. Ayrıca, otomatik çöp ayırıcı tarafından kanallarda yakalanan bazı pancar başları da kuyruklarla karışmaktadır. Fabrikanın dilimleme kapasitesine bağlı olarak, günlük olarak 2-4 ton veya daha fazla bu atık birikir. Bu yan ürün taze olarak veya siloya alınarak hayvanlara verilebilir. Besleme değeri, taze pancar başları veya pancar başı silajı ile pratikte aynıdır (Skuderna ve Sheets 1934).

2.3. Şlam (pres çamuru, kireçli çamur)

Şlam, pancar şekeri üretiminde şerbet arıtımı aşamasında ortaya çıkan bir yan üründür. Ham şerbetin, kireç sütü (CaO) ile iki kademeli kireçleme işlemine tabi tutulması ve ardından karbondioksit ile karbonatlama sürecinden geçirilmesi sonucunda oluşan çamurlu şerbetin ayrıştırılmasıyla elde edilir. Bu koyu çamur, döner filtre veya sıkıştırıcı süzgeçlerden geçirilerek süzülür ve geriye kalan kısım şlam olarak adlandırılır. İçeriğinde hem organik hem de inorganik bileşikler bulunan şlam, şeker fabrikalarının önemli yan ürünlerinden biridir.

Şeker pancarından şeker ekstraksiyonu ve sonrasında melastan ilave şeker elde edilmesi sürecinde, yüksek kalsiyum karbonat içeriğine sahip büyük miktarda yakılmış kireç kullanılır. Kullanılan miktar, pancarların durumu, fabrikanın verimliliği ve Steffens prosesi uygulanıp uygulanmadığına bağlı olarak değişir. Steffens prosesi uygulanıyorsa, gereken kireç miktarı önemli ölçüde artar. Kullanım oranı, dilimlenen pancarın ağırlığının %4–6’sı veya daha fazlası arasında değişmektedir. Örneğin, 8.000.000 ton pancarın işlenmesi ve kireç kullanımının pancar ağırlığının %5’i olduğu varsayılırsa, bu durumda yaklaşık 400.000 ton kuru şlam elde edilir. Bu şlam (fabrika kireci, atık kireç,

filtre pres çamuru, kireçli çamur olarak da adlandırılır) çoğunlukla kalsiyum karbonattan oluşmakta, bir miktar organik madde içermekte ve kuru halde tarımsal kullanım için satılan öğütülmüş kireçtaşı ile karşılaştırılabilir. Bazı şamlar atık su olarak bertaraf edilse de daha yaygın uygulama, fabrikanın bu yan ürünü büyük çukurlara veya çökeltme havuzlarına boşaltmasıdır; buradan periyodik olarak alınır. Nemli bölgelerde, drenaj ve kurutmayı kolaylaştırmak için şlam büyük yığınlar hâlinde biriktirilebilir ve kısa sürede sevkiyat veya yerel kullanım için hazır hâle gelir. Şlamda az miktarda fosforik asit, azot ve potasyum bulunmaktadır. Kireç keki çok ince öğütüldüğü için, toprağın asiditesini daha hızlı düzeltir ve özellikle yonca, tatlı yonca ve kırmızı yonca yetiştiriciliğinde olumlu sonuçlar vermiştir. Uygulanacak miktar, toprağın kireç ihtiyacına bağlı olarak değişir. Şlam ayrıca sıkışmış toprakların iyileştirilmesinde başarılı bir şekilde kullanılmış; toprağın yapısını gevşetir ve granüler bir yapı kazandırır. Toprak reaksiyonunu düzeltmek veya yapısını iyileştirmek amacıyla şlam tarlaya yaygın olarak uygulanmalı ya kış aylarında ya da baklagillerin ekiminden hemen önce serilmelidir. Bazı fabrika bölgelerinde şlamın değeri tanındığından, önemli miktarlarda bu yan ürün nominal fiyatlarla satılmaktadır. Sulama suyuyla birlikte kullanıldığında, özellikle fabrikaya yakın geri kazanılmış arazilerde toprak kondisyonunu iyileştirir ve sonraki ürünün verimini artırır. Ancak, bu yöntemle kireç uygulaması sırasında şeker pancarı nematodlarının yayılma riski bulunduğundan, bilinen nematod varlığı olan bölgelerde bu uygulama büyük dikkatle yapılmalıdır (Skuderna ve Sheets, 1934). Şlam uygulaması, toprak ve bitki özelliklerine göre doğru miktarda ve uygun yöntemlerle yapılmalıdır. Uygun yönetim ile şlam, tarımsal üretimde sürdürülebilirliği artıran, kimyasal gübre kullanımını azaltan ve toprak sağlığını iyileştiren önemli bir yan ürün olarak değerlendirilmektedir.

2.4. Şlempe

Melasta alkol (ispirto) elde edildikten sonra geriye kalan çözeltiye şlempe denilmektedir. Şlempe alkol fabrikalarının bir yan ürünüdür. Bu çözelti melastan gelen bütün tuzlarla maya üretimi sırasında katılmış bulunan mineral tuzlarını ve mayalanmayı yapmış olan kütesini kapsar. Protein ve mineral maddelerce zengin olan potasyumu azaltılmış, şlempe, hayvan beslemede direkt olarak veya kurutulularak kullanılabildiği gibi melasa ve küspeye ilave edilerek de kullanılabilmektedir. Tarımda özellikle organik sıvı damlama gübreleri ve yaprak gübrelerinin üretiminde ana organik madde olarak değerlendirilmektedir. Endüstride ise kömür sektöründe toz kömürün taş kömüre dönüştürülmesinde bağlayıcı olarak kullanılmaktadır. Ayrıca granül organik gübre veya toprak düzenleyicisi üretiminde, leonardit ve benzeri toz gruplarını birleştirici özellik göstermesiyle önemli bir katkı sağlamaktadır.

3. SONUÇ

Şeker pancarı, dünya şeker üretiminde şeker kamışından sonra ikinci sırada yer alan, yüksek sakkaroz içeriğine sahip çok yönlü bir endüstri bitkisidir. Hem ticari şeker üretimi hem de hayvansal ve endüstriyel kullanımlar açısından stratejik bir öneme sahiptir. Şeker pancarı işleme sürecinde elde edilen yan ürünler (yaprak, posa, melas ile pancar kuyruğu, şlempe ve kireç çamuru gibi) hem ekonomik hem de besinsel açıdan değer taşımaktadır. Özellikle, şeker pancarı işleme sürecinde ortaya çıkan yan ürünlerin etkin şekilde değerlendirilmesi hem ekonomik değer zincirini genişletmekte hem de sürdürülebilir tarım uygulamalarını desteklemektedir.

Şeker pancarı yaprakları, baş ve yaprak artıkları, ek maliyet getirmeden hayvancılıkta taze, kuru veya silolanmış yem olarak değerlendirilebilmekte ve üreticiye doğrudan ekonomik katkı sağlamaktadır. Şeker pancarı posası ise lif ve enerji kaynağı olarak ruminantlar başta olmak üzere tüm çiftlik hayvanlarında yüksek besleme değeri sunmakta, yaş, preslenmiş, silolanmış ve

kurutulmuş gibi farklı formlarda işlenmesi, hem besin değerinin korunmasını hem de uzun süreli depolama ve lojistik kolaylığı sağlamaktadır Pancar melası ise yüksek şeker içeriği ve viskoz yapısı sayesinde enerji kaynağı, yem bağlayıcısı ve silaj katkısı olarak önem kazanmakta, ayrıca etanol, maya ve fermente endüstrisi için kritik bir hammadde olarak değerlendirilmektedir. Ayrıca, kireç keki gibi endüstriyel atıklar da toprak iyileştirici özellikleri sayesinde tarımsal üretimde sürdürülebilirliği destekleyen önemli katkı maddeleri olarak öne çıkmaktadır. Bu yan ürünlerin etkin bir şekilde kullanılması, sadece ekonomik getiriye artırmakla kalmayıp, tarımsal atıkların geri kazanımı ve sürdürülebilir üretim açısından da büyük önem taşımaktadır.

Şeker pancarı üretimi ve işlenmesi yalnızca şeker tedarikine katkı sağlamakla kalmamakta; aynı zamanda hayvansal üretim, enerji sektörü, endüstriyel ürün geliştirme ve çevresel sürdürülebilirlik açısından çok yönlü bir değer zinciri oluşturmaktadır. Sonuç olarak, şeker pancarı üretimi ve işlenmesinde yan ürünlerin planlı ve bilinçli bir şekilde değerlendirilmesi hem hayvancılık sektörüne hem de endüstriyel üretime önemli katkılar sağlamakta ve şeker pancarının çok yönlü potansiyelini ortaya koymaktadır.

KAYNAKÇA

- Akıltepe, S., Malkoç, S., Molbay, İ. (1964). Türkiye Şeker Sanayii ve Şeker Pancarı Ziraatı. Mars Matbaası. Ankara. 780.
- Anonim, (2022). S.S. Ereğli Pancar Ekicileri Kooperatifi, “Şeker Pancarının Önemi”, <http://www.ereglipancar.com.tr/Kooperatif/Sayfa/2042>.
- Beames, R.M. (1963). Provision of urea to cattle in a salt/urea/molasses block. Queensland J. Agric. Sci., 20: 213-230.
- Beef and Feed, (2017). Sugar Beet Pulp Pellets (SBPP). Beet & Feed Ingredients A.S.
- Bernard, M., Chapoutot, P., Chatelet, M., Gueroult, M., Jubert, M., Morel d’Arleux F., Taccard, M., Mariani, M., Tierny, M. (1991). Synthèse sur la mélasse. Comité des sous produits – RNED Bovins, Juillet : 19 p.
- Blair, R., (2008). Nutrition and feeding of organic poultry. Cabi Series, CABI, Wallingford, UK
- CNC, (2002). Pulpe de betterave supressée. Comité National des Coproduits, ADEME, Idele, Fiche N° 9- Coproduits de la betterave.
- Crawshaw, R. (2004). Co-product feeds: animal feeds from the food and drinks industries. Nothingham University Press.
- Désialis, (2016). Processus Pulpe de betterave déshydratée. Désialis
- Eştürk, Ö., (2018). Türkiye’de Şeker Sektörünün Önemi ve Geleceği Üzerine Bir Değerlendirme, Anadolu İktisat ve İşletme Dergisi, 2 (1) 2018, 67-81.
- FAO, (2011). Proc. FAO Electronic Conference, 1-30 September 2010, Rome, Italy. Edited by Harinder P.S. Makkar. FAO Animal Production and Health Proceedings. No. 11. Rome, Italy.
- FAO, (2017). FAOSTAT. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, Italy.

- Harland, J. I., Jones, C. K., Hufford, C. (2006). Co-products. In: Draycott, A. P., 2006. Sugar beet. Blackwell Publishing, 443-463.
- Kabir, S. (2020). Growth and Yield of Sugar Beet Varieties As Influenced By Spacing and Sowing Method. Faculty of Agriculture, Shere-Bangla Agricultural University, Master of Science, Dhaka.
- Kara, K. (2011). Nişasta ve Şeker Bitkileri. Atatürk Üniv. Ziraat Fak. Yayınları
- Kılıç, A. (1986). Silo Yemi. Bilgehan Basımevi. Bornova-İzmir, 327 s.
- Kumar, R., & Pathak, A.D. (2013). Recent trend of sugar beet in world. Souvenir- IISR-Industry Interface on Research and Development Initiatives for Sugar beet in India, 28-29 May, Sugar beet Breeding Outpost of IISR IVRI Campus, Mukteswar-263138, Nainital. Organized by Indian Institute of Sugarcane Research (ICAR) and Association of Sugarcane Technologists of India. pp 46-47.
- Legrand, G. (2015). Le bon usage de la pulpe surpressée. Collection les guides techniques de l'IRBAB.
- Mall, A.K., Misra, V., Santeshwari Pathak, A.D., Srivastava, S. (2021). Sugar beet cultivation in India: prospects for bio-ethanol production and value added co-products. Sugar Tech., <https://doi.org/10.1007/s12355-021-01007-0>.
- Mavromichalis, I. (2016). Why sugar beet pulp is an undervalued livestock feed?. WATTAgrNet, WATT Global Media
- MidWest Agri, (2019). Beet molasses. Midwest Agri-Commodities Company, San Rafael, USA.
- Misra, V., Mall, A.K., Pathak, A.D. (2020). Sugar beet: a sustainable crop for salt stress conditions. In: Hasaanuman M (ed) Agronomic crops. Springer Nature Singapore Pte Ltd. Publications, Singapore, pp 40-62.
- Nordzucker, 2017. Sugar beet pulp. Nordzucker AG.

- Pathak, A.D., Misra, V., Mall, A.K. (2017). Prospects of sugar beet in India. In: Souvenir of international symposium on sugarcane research since Co 205:100 years and beyond, pp 90-97.
- Rashid, M.M. (1999). Sabji Biggan (in Bengali), Rashid Publishing House, 94, Old DOHS, Dhaka. P. 455.
- Sefaoğlu, F., Kaya, C., & Karakuş, A. (2016). Farklı tarihlerde hasat edilen şeker pancarı genotiplerinin verim ve verim unsurlarının belirlenmesi. *Tarla Bitkileri Merkez Araştırma Enstitüsü Dergisi*, 25(ÖZEL SAYI-2), 61-66.
- Syndicat National des Fabricants de Sucre (SNFS), (2015). Les étapes de la fabrication du sucre de betterave. Synd. Nat. Fab. Sucre, Paris, France
- Skuderna, W. and Sheets, W. (1934). Important Sugar-Beet Byproducts and Their Utilization. U.S. Department of Agriculture Farmers' Bulletin No, 1718. (The World's Largest Open Access Agricultural & Applied Economics Digital Library).
- Sunulu, S., Sunulu, A. (2016). Şeker Pancarında Cercospora Yaprak Lekesi Hastalığı. *Pankobirlik*, 27(108): 34.
- TEPGE (2023). Ürün Raporu, Şeker Pancarı ve Şeker. Tarımsal Ekonomi ve Politika Geliştirme Enstitüsü Yay No:388 ISBN: 978-625-94245-3-8.
- Western Sugar (2015). Molasses Beet Pulp Pellets. Western Sugar Cooperative
- Yildiz, U., Öztürk, E., Sefaoğlu, F., Gül, V., and Toktay, Z. (2024). The Effect of Different Storage Duration Periods after Harvesting in A Semi-Arid Environment on The Quality Components in Sugar Beet. *Turkish Journal Of Field Crops*, 29(2), 218-225.

BÖLÜM 2

BİTKİLER İÇİN ÖNEMLİ OLAN BAZI B GRUBU VİTAMİNLER: SENTEZ YOLU, BİYOKİMYASAL ÖZELLİKLERİ VE STRES ALTINDAKİ ETKİLERİ

Hatice ÇETİNKAYA¹, Burcu SEÇKİN DİNLER^{1*}

DOI: <https://dx.doi.org/10.5281/zenodo.17502331>

^{1*}Dr, Prof. Dr., Sinop Üniversitesi, Fen Edebiyat Fakültesi, Biyoloji Bölümü, Sinop, TÜRKİYE
E-mail: burcu_sec@hotmail.com ORCID ID 0000-0002-9792-5928
E-mail: haticeckaya@hotmail.com, ORCID ID 0000-0001-6289-380X

1. GENEL BİLGİLER

Yaşam için gerekli mikro besin maddeleri olan vitaminlerin varlığı fikri ancak 20. yüzyılın başlarında belirlenmiştir. 'Yaşam için gerekli bilinmeyen maddeler' fikri ancak 1912'de Sir Frederick Hopkins'in çalışmasıyla ortaya çıkmıştır. Hopkins, 1901'de keşfettiği triptofanın besinsel etkisini incelemiş ve triptofan eksikliği olan 'sentetik' diyetle beslenen hayvanların, diyetle triptofan eklense bile uzun yaşayamayacaklarını tespit etmiştir. Lunin ve Pekelharing'in (Hopkins, 1929) çalışmalarını bilmeden, beriberi, iskorbüt ve raşitizm gibi ayrı kavramlar olan 'eksiklik hastalıkları' kavramını olarak ortaya çıkmıştır. B vitaminlerinin hemen hemen hepsi 1920'li ve 1940'lı yıllarda keşfedilmiştir. 1912 yılında Casimir Funk, tiamin yani B₁ vitaminini ilk kez izole etti ve bu doğal bileşiğin beriberi hastalığındaki önemli etkisini ortaya konmuştur (Smith ve ark., 2007).

B grubu vitaminlerinin tarihi, Doğu ve Güney Asya'da çok sayıda insanı etkileyen beriberi araştırmalarıyla başlamıştır. Beriberi hastalığının antik Çin'de beslenmeyle ilişkili olduğu öğrenilmemiş ve 19. yüzyılda, hastalıkların bakteri ve toksinler gibi patojenler tarafından oluşturulduğu düşünülmüştür. Vitamin kavramı kademeli olarak kabul edilmiş ve 1920'lerden 1940 yıllarına kadar tüm B vitaminleri keşfedilmiştir (Hayashi vd., 2012). Mikrobiyolojik bir analiz sistemi vitaminlerin izolasyonuna büyük katkıda bulunmuş, ancak, özellikle B₁₂'nin kimyasal yapılarının belirlenmesi, X -ışını kristalografisi gibi analitik yöntemlerin gelişmesini beklemek zorunluluk olmuştur. B vitaminlerinin koenzim olarak etkileri ayrıntılı olarak incelenmiş ve bunlar hakkında çok fazla bilgi toplanmıştır. B vitamini eksikliğinin semptomlarının yalnızca bir kısmı koenzim olarak açıklanmış ve bunun dışındaki işlevleri araştırılmaya devam edilmiştir (Hayashi vd., 2012).

Vitaminler, metabolik faaliyetlerin sürdürülmesi için gerekli ve genellikle besinlerle dışarıdan alınan maddeler olup; çözünürlüklerine göre: yağda çözünen vitaminler (A, D, E, K) ve suda çözünen vitaminler (B ve C)

olarak belirlenmiştir (Yalçın vd., 2024). Başlangıçta tek bir bileşik olarak bilinen B vitamini, zamanla farklı kimyasal yapıda ve biyolojik işlevlere sahip çok sayıda bileşiğin bir araya gelmesinden meydana gelmiş ve "B kompleksi" adı verilen bir grup altında sınıflandırılmıştır (Combs, 2008). Bu kompleks içinde; tiamin (B₁), riboflavin (B₂), niasin (B₃), pantotenik asit (B₅), pridoksin/pridoksal/pridoksamin (B₆), biyotin (B₇), folat/folik asit (B₉) ve kobalamin/ siyanokobalamin (B₁₂) olmak üzere 8 farklı vitamin belirlenmiştir (Yalçın vd., 2024) (Şekil 1).

2. B VİTAMİNİ ÇEŞİTLERİ

B grubu vitaminleri, suda çözünen ve organizmanın metabolik süreçlerinde koenzim olarak görev yapan önemli bileşikler olup; enerji metabolizması, sinir sistemi fonksiyonları ve DNA onarımı gibi birçok biyokimyasal reaksiyonda yer almıştır (Kennedy, 2016). Ayrıca spesifik enzimatik tepkimelerde hücresel fonksiyonların düzenlenmesine katkıda bulunmuş ve homeostazın korunmasında rol oynamıştır (Saedisomeolia & Ashoori, 2015). Bu nedenle, B vitaminlerinin yeterli alınması metabolik denge ve hastalıkların önlenmesi açısından önemli olmuştur (Smith & Jones, 2018). B vitaminleri hayvansal proteinlerde, süt ürünlerinde, yeşil yapraklı sebzelerde ve fasulyede bulunmuştur (Loma Linda University Health, 2022). B vitaminleri pek çok biyolojik olayda kofaktör, prekürsör veya substrat olarak görevli olup; bitki hücrelerinde farklı roller oynamıştır (Hanson vd., 2016). Ayrıca hücre duvarlarının sentezinde, özellikle prolin kalıntılarının hidroksilasyonunda görevli olanlar da dahil birçok enzimin kofaktörü olarak rol oynamıştır (Macknight vd., 2017). B vitaminleri (B₁–B₁₂), enerji metabolizması, sinir sistemi işlevleri ve DNA sentezi gibi temel süreçlerde kofaktör olarak görev yapmıştır

(Kennedy, 2016). Suda çözünebilen bu vitaminlerin düzenli alımı gerekli olup; depolanmadığı belirlenmiştir (Gibson vd., 2020).

Vitamin	Biyolojik Olarak Aktif Form	Biyolojik İşlev	Eksiklik Hastalıkları
Tiamin (B ₁)	Tiamin pirofosfat	Merkezi karbon metabolizmasında çeşitli enzimler için gereklidir	Beriberi
Riboflavin (B ₂)	Flavin mononükleotidi, Flavin adenin dinükleotidi	Hücre boyunca her yerde kullanılır	Ariboflavinoz
Niasin (B ₃)	Nikotinamid adenin dinükleotidi	Hücre boyunca her yerde kullanılır	Pellagra'nın
Pantotenik asit (B ₅)	Koenzim A ve asil taşıyıcı protein de fosfopantetein kısmı	Lipid biyosentezi ve katabolizmasında enzimler için kofaktör ve sekonder metabolitleri biyosentezi	Bilinen bir hastalık yok
Piridoksin (B ₆)	Piridoksal fosfat	Amino asit dönüşümlerinde ve birçok ikincil metabolit yolunda her yerde kullanılır	Kardiyovasküler hastalıkta risk faktörü
Biyotin (B ₇)	Biyotin	Asetil CoA karboksilaz, propionil CoA karboksilaz ve piruvat karboksilaz dahil olmak üzere az sayıda enzim için kofaktör	Bazal gangliyon hastalığı
Folik asit (B ₉)	Di- ve tetra-hidrofolat poliglutamatlar	Birkaç biyosentetik enzim için gereklidir	Pernisiyöz anemi
Kobalamin (B ₁₂)	Adenosilkobalamin, metilkobalamin	Kara bitkilerinde kobalamin yoktur, ancak alglerde, örneğin kobalamine bağımlı metiyonin sentaz için gereklidir	Pernisiyöz anemi
Askorbat (C)	Askorbat	Askorbat oksidaz ve askorbat peroksidazlar gibi çeşitli reaksiyonlarda esansiyel antioksidan ve substrat ve / veya kofaktör	SkorPpit
Provitamin A (β-karoten)	A vitamini	Retinoid asitlerle (all-trans ve 9-cis) ve 11-cis retinanın rodopsin içindeki fotonları emme yeteneği ile gen ekspresyonu	Kserofoalmi, kornea ülseri, körlük
K vitamini	2-metil-3-fitol-1, 4- naflokinon	Biyolojik olarak aktif olması için kalsiyumu bağlaması gereken belirli proteinler üzerinde spesifik Glukoz kalıntılarının γ-karboksilasyonu için kofaktör	Morarma, kanamalar, yüksek kemik kırığı riski

Şekil 1. B grubu vitaminlerin biyolojik olarak aktif formları, işlevleri ve eksikliği durumunda ortaya çıkan belirtiler

2.1. Vitamin B₁ (Tiamin)

B₁ vitamini, vitamin olarak nitelendirilen ilk vitamindir (Collie vd., 2017). B₁ vitamini, tiamin difosfat formunda mitokondriyal membranda, sitrik asit döngüsünde ve dallı zincirli amino asit biyosentez yolunda piruvatın asetil-CoA'ya dönüştürülmesinin yanı sıra pentoz fosfat yolunun sitozolik oksidatif olmayan aşaması gibi önemli metabolik yollar için kofaktör olarak görev yapmıştır (Manzetti vd., 2014). B₁ vitamini in vivo koşullarda yüksek antioksidan aktivite göstermiştir. Önceki çalışmalarda, *A. thaliana* L. bitkisine parakuat (yaygın kullanılan herbisitlerden biri) uygulandığında ve düşük sıcaklık, yüksek ışık, ozmotik stres ve tuzluluk gibi abiyotik streslere maruz

kaldığında B₁ vitamini bitkide antioksidan korumayı sağlamıştır (Tunç-Özdemir vd., 2009).

2.2 Vitamin B₂ (Riboflavin)

Riboflavin (B₂), flavin adenin dinükleotit (FAD) ve flavin mononükleotit (FMN) koenzimlerinin yapı taşı olup; FAD/FMN koenzimleri ile hücresel solunumda görev almıştır (Rossi vd., 2020; Ashoori ve Saedisomeolia, 2014). Mitokondriyal elektron taşınması, fotosentez ve yağ asidi oksidasyonunda yer alanlar da dahil olmak üzere çok sayıda enzim bu flavin kofaktörlerine ihtiyaç duyar. İnsanların riboflavin sentezleyemedikleri durumda besinlerden aldıkları riboflavininden FMN ve FAD sentezleme yeteneğine sahip oldukları görülmüştür. B2 vitamini eksikliği kanser, kardiyovasküler hastalık, anemi ve çeşitli nörolojik ve gelişimsel bozukluklarla ilişkilendirilmiştir (Powers, 2003). Bu koenzimler, glutatyon redüktaz enziminde yer alarak indirgenmiş glutatyon (GSH; en önemli hücresel antioksidanlardan biridir) seviyelerinin korunmasında etkili olmuştur (Ashoori ve Saedisomeolia, 2014).

2.3. Vitamin B₃ (Niasin)

İlk olarak Weidel (1873) tarafından tanımlanan Niasin, piridin'in 39 konumunda sırasıyla nikotinik asit veya nikotinamide yol açan bir karboksil veya karboksamid grubu taşıyan iki piridin türevini oluşturmuştur. Niasin ve nikotinamid, birçok redoks reaksiyonunda gerekli olan yağ asidi ve karbonhidrat metabolizmasında yer alan enzimatik kofaktörler NAD⁺ ve NADP⁺ için öncül görevi görmüştür. ADP-ribosilasyon kompleksi, DNA onarımı, stres tepkileri (Adams-Phillips vd., 2010), hücre döngüsü kontrolü ve kromatin yapısı (Houben vd., 2014) gibi çeşitli hücresel işlemlerde kritik bir rol oynar ve siklik ADP-riboz, hücresel kalsiyum akışı kontrolünde önemli olduğu bildirilmiştir.

2.4. Vitamin B₅ (Pantotenik Asit)

Pantotenik asit (B₅) koenzim A sentezine katılırken, B₆ amino asit metabolizması ve nörotransmitter sentezinde etkili olmuştur (Kennedy, 2016). Pantotenat, CoA'ya 49-fosfopantetein parçasını sağlamaktadır ve lipid biyosentezi ve katabolizmasının yanı sıra piruvat dekarboksilaz aktivitesinde yer alan açıl taşıyıcı bir proteinin öncüsü olduğu bildirilmiştir (Roje, 2007). Birçok gıdada küçük miktarlarda bulunduğu ve içeriği tam tahıllı tahıllar, baklagiller, yumurta, et ve avokado gibi insan gıdalarında özellikle yüksek olduğundan, bu bileşiğin eksikliği ile bilinen hiçbir hastalık ilişkilendirilmemiştir.

2.5. Vitamin B₆ (Piridoksin)

B₆ Vitamini, birbiriyle dönüştürülebilir altı bileşik grubu için kullanılan ortak terim olup; piridoksin, piridoksal, piridoksamin ve bunların fosforile türevleri. 4' konumunda farklı gruplar taşırlar: sırasıyla bir hidroksil, bir amino veya bir aldehit grubu. B₆ vitamini, transaminasyonlar, α -dekarboksilasyonlar, rasemizasyonlar, β - ve γ -eliminasyonları ve aldol bölünmeleri dahil olmak üzere çeşitli enzimatik reaksiyonlarda yer almıştır (Drewke ve Leistner, 2001). Enzimatik bir kofaktör olarak işlev görmek için, farklı B₆ vitaminleri, 5'-konumlarında PNP, PMP veya PLP'ye yol açan ek fosforilasyon gerektirdiği gözlenmiştir ve amino asit biyosentezi ve katabolizması için gerekli olmasına rağmen, şeker ve yağ asidi metabolizması gibi ek işlemlerde de yer almıştır (Fitzpatrick vd., 2007).

Vitamin B₆, transaminasyon ve sülfür metabolizmasında görev alan bir koenzimdir. Aynı zamanda glutatyon biyosentezinde ve homosistein metabolizmasında da görev alarak reaktif oksijen türlerinin üretimini azalttığı bildirilmiştir (Spinneker vd., 2007).

2.6. Vitamin B₉ (Folik Asit)

Folat; 5, 6, 7, 8-tetrahidrofolat kofaktörünü ve ilgili karbon türevlerini içeren bir bileşik grubu için kullanılan terim olup; tek karbonlu transfer sistemlerinde kritik roller oynadıklarından DNA'nın biyosentezinde (pürinler ve timidilat), ayrıca B₅ vitamini, Met veya Met formil-Met-tRNA üretimi için gerekli olduğu bildirilmiştir (Roje, 2007).

Folat ve B₁₂ birlikte çalışarak yüksek homosistein düzeyleri (vasküler endotelde oksidatif strese neden olan bir risk faktörü) düşürdüğü tespit edilmiştir (Selhub, 2002). Bu vitaminler ayrıca metilasyon döngüsünde görev alarak hücresel DNA ve protein düzenlemesini etkilemiştir.

Folat eksikliği, insan popülasyonlarında dünya çapında yaygın rastlanan bir fenomendir ve Pellagra, doğum kusurları, kardiyovasküler problemler, megaloblastik anemi (bozuk DNA sentezinin neden olduğu bir tür anemi), demir eksikliği anemisi ve kırmızı kan hücresi üretimini etkileyen hücre döngüsü kusurları gibi ciddi bozukluklara neden olabileceği bildirilmiştir (Wickramasinghe, 2006).

2.7. Vitamin B₇ (Biyotin)

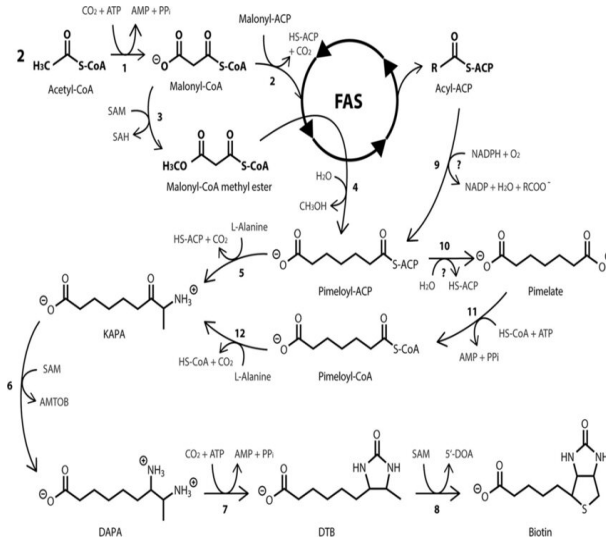
Biyotin (Vitamin B₇ veya H vitamini), suda çözünebilen, diyet yoluyla elde edilen, vücutta depolanmayan, daha fazla kullanım için geri dönüştürülen bir B grubu vitaminleri arasında yer almıştır (Sağlam Çavak, 2024). Hücresel düzeydeki işlevleri yalnızca metabolik süreçlerle sınırlı kalmayıp; aynı zamanda epigenetik düzenlemelerde, özellikle de histon proteinlerinin biyotinilasyonu aracılığıyla gen ifadesinin kontrolünde görev almıştır (Zempleni vd., 2009). Biyotin'in, ilk olarak 1927'de Margarete Boas tarafından, çiğ yumurta akı ile beslenen farelerde görülen deri lezyonları, kas zayıflığı ve saç dökülmesi gibi semptomların, yumurta akındaki avidin adlı proteinin biyotini bağlayarak emilimini engellemesiyle ortaya çıktığı saptanmıştır (Boas, 1927). 1936 yılında Fritz Kögl ve Benno Tönnis tarafından

yumurta sarısından kristalize olarak izole edilen biyotin, 1942 yılında yapısal olarak tanımlanmış ve bu isimle anılmaya başlanmıştır (Kögl ve Tönnis, 1936). Moleküler düzeyde, biyotin dört ana karboksilaz (asetil-CoA, piruvat, propiyonil-CoA ve metilmalonil-CoA) enziminin kofaktörleri olmuştur. Bu enzimlerin her biri glukoneogenez, yağ asidi sentezi ve dallı zincirli amino asitlerin katabolizmasında görev almıştır. Aynı zamanda, DNA'nın yapısal düzenlenmesinde görev alan histon proteinlerine bağlanarak epigenetik bir işlev de üstlenir (Mock, 2017). Biyotin bağlanması, hücre döngüsünün düzenlenmesi ve gen ifadesi gibi temel biyolojik süreçleri etkilemiştir (Dakshinamurti, 2022).

3. VİTAMİN B₇ (BİYOTİN)

İnsanlar ve hayvanlar biyotini sentezleyemezken, prokaryotlar, mantarlar ve bitkiler bu vitamini sentezleme kapasitesine sahiptir (Streit & Entcheva, 2003). Biyotin biyosentezi, genel olarak pimeloyl-CoA türevlerinden başlayan ve dethiobiyotin üzerinden biyotine ulaşan iki aşamalı; yedi karbonlu α , ω -dikarboksilik pimelat grubunun sentezi ve ardından birleşik heterosiklik halkaların oluşumu. Pimelat grubunun sentezinden sorumlu biyotin genleri bakteriler arasında büyük çeşitlilik gösterirken, halka sentezinden sorumlu genler oldukça korunmuştur. Prokaryotlarda, özellikle *Escherichia coli* ve *Bacillus subtilis* gibi bakterilerde, bu yolak oldukça iyi tanımlanmıştır. İlk aşamada, pimeloyl-CoA öncülü BioC/BioH, BioW/BioI veya BioZ/CaiB enzim modülleriyle sentezlenmiştir (Lin ve Cronan, 2011). İkinci aşama dört ardışık enzimatik reaksiyondan; BioF enzimi pimeloyl-ACP'yi 7-keto-8-aminopelargonik aside (KAPA) dönüştürerek: BioA enzimi KAPA'yı 7,8-diaminopelargonik aside (DAPA) çevirip, BioD enzimi DAPA'yı ATP kullanarak dethiobiyotin (DTB)'e dönüştürerek BioB, radikal S-adenosilmetiyonin (SAM) mekanizmasıyla DTB'den biyotini sentezlemiştir (Jarrett, 2005). BioB enzimi bu basamakta [2Fe-2S] kümelerinden sülfür

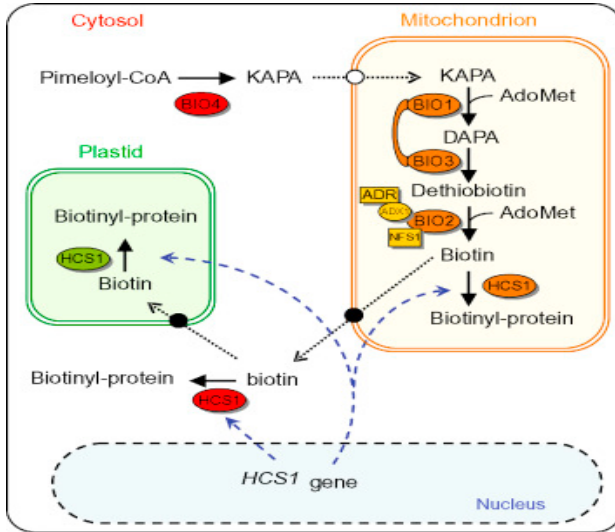
transferi yaparak biyotinin tiyofen halkasını oluşturmuştur. Prokaryotlarda biyotin sentez genleri genellikle bio-operon adı verilen kümeler halinde organize ederek oluşturmuştur (Eisenberg, 2012). “*Bacillus subtilis*, pimelat ara ürününü oluşturmak için bioI ve bioW genlerine sahiptir. Genetik çalışmalarla uyumlu olarak, bioW geninin silinmesi biyotin üretimini bozar, ancak bioI silinmesi böyle bir fenotip oluşturmaz. BioW, pimelik asidi pimeloyl-CoA’ya dönüştüren bir sentetazdır. BioW’nun biyotin sentezi için gerekliliği, serbest pimelik asidin biyotin sentezinde ara ürün olduğunu gösterir; bu durum *E. coli*’de geçerli değildir. *B. subtilis*’te, pimelik asidin kaynağı belirsiz olduğu için ^{13}C -NMR analizleri yapılmış ve bu veriler serbest pimelatın biyotin sentezine katkısını ve yağ asidi sentezinin bu süreçte etkin olduğunu doğrulanmıştır” (Manandhar & Cronan, 2017) (Şekil 2).



Şekil 2: *E. coli* ve *B. subtilis*’te biyotin sentez yolu (Eggers vd., 2020)

Mantarlar ve bitkilerde biyotin biyosentezi temel basamaklar açısından prokaryotik sisteme oldukça benzer olup; subselüler lokalizasyon ve gen organizasyonu bakımından önemli farklılıklar göstermiştir. *Saccharomyces*

cerevisiae gibi mayalarda Bio6p, KAPA oluşumunu katalizleyen BioF homologu olarak görev yaparken, Bio3/4p bifonksiyonel bir enzim olarak DAPA ve DTB oluşumunu gerçekleştirmiştir. DTB'nin biyotine dönüşümünü ise Bio2p katalizler (Meir vd., 2010). Fungal biyotin sentez enzimlerinin bir kısmı peroksisomlarda, diğerleri ise sitozolde lokalizedir. Bitkilerde ise sentez yolu hem prokaryotlarla hem de mantarlarla karşılaştırıldığında daha kompleks bir subselüler organizasyon göstermiştir. *Arabidopsis thaliana*'da BIO4 (AtBioF) enzimi sitoplazmada KAPA sentezini gerçekleştirirken, BIO1–BIO3 geni ürünü olan bifonksiyonel DAPA–DTB sentaz enzimi ile BIO2 biyotin sentaz enzimi mitokondride bulunmuştur (Alban vd., 2000). Ayrıca AtBioF, peroksisomlara taşınmasını sağlayan PTS1 hedefleme sinyaline sahiptir ve bu da biyotin sentezinin başlangıç basamağı için peroksisomların kritik olduğunu göstermiştir (Muralla vd., 2008).



Şekil 3: Bitki hücresindeki biyotin metabolizmasının organellere göre kompozisyonu (Alban 2011'ten modifiye edilmiştir).

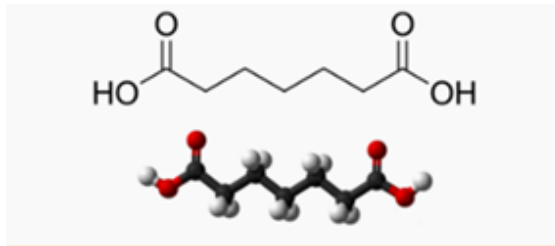
Biyotin, bitkilerde yalnızca metabolik işlevlerde değil, aynı zamanda tohum gelişimi ve enerji metabolizması gibi önemli fizyolojik süreçlerde de kritik bir rol üstlenmiş ve sadece metabolik süreçlerde değil, tohum gelişimi ve enerji metabolizması gibi süreçlerde de hayati rol oynadığı bildirilmiştir (da Fonseca-Pereira vd., 2023) (Şekil 3).

Dikarboksilik asitler ve Genel Özellikleri

Dikarboksilik asitler; iki karboksilik asit fonksiyonel grubu ile donatılmış organik bileşikler olup; genel formülleri RCOOH (R, tipik olarak 2 ila 10 karbon atomlu bir hidrokarbon zinciri), kristalik bileşikler ve erime noktaları, aynı sayıda ve düşük karbon atomu içermiş, monokarboksilik asitlerden daha yüksek olduğu bildirilmiştir (Shome, Mishra, 2016). Dibazik veya diprotik asitlerdir ve iki tür tuz üretebilirler. Polyester, poliamidler ve naylon üretiminde monomer olarak kullanılıp; aktif farmasötik bileşenler ve katkı maddelerinin öncüsü olarak da önemli olduğu bildirilmiştir (Jiang ve Loos., 2016).

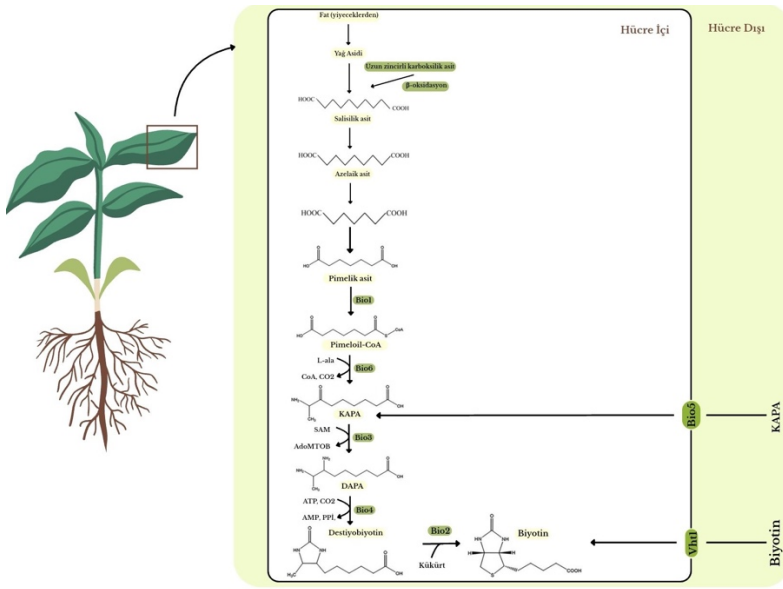
4. BİYOTİN ÖNCÜSÜ OLAN PİMELİK ASİT ($\text{C}_7\text{H}_{12}\text{O}_4$)

Pimelik asit, $\text{C}_7\text{H}_{12}\text{O}_4$ kimyasal formüllü bir α , ω -dikarboksilik asittir ($\text{HO}_2\text{C}-(\text{CH}_2)_5-\text{CO}_2\text{H}$). Adipik aside göre bir karbon fazlası vardır ve heptanedioik asit olarak da adlandırılmıştır (Şekil 4).



Şekil 4: Pimelik asit, $\text{C}_7\text{H}_{12}\text{O}_4$ kimyasal formüllü (pubChem,2003).

Kısa zincirli dikarboksilik asit olup: $\text{HO}_2\text{C}-(\text{CH}_2)_5-\text{CO}_2\text{H}$, molekül ağırlığı ≈ 160.17 g/mol , renksiz/beyaz katı yapıda ve erime noktası $\approx 103-106^\circ\text{C}$, bozulmadan kaynama yapılmaz. Çözünürlüğü: suya yaklaşık 50 g/L ($@20^\circ\text{C}$) pKa değerleri: $\text{pK}_{\text{a}1} \approx 4.71$, $\text{pK}_{\text{a}2} \approx 5.58$ 2 olarak tespit edilmiştir (pubChem,2003).



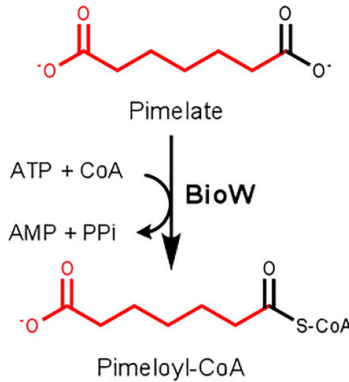
Şekil 5: Bitkilerde pimelik asit ve biyotin biyosentez yolu (Perli vd., 2020 ‘den modifiye edilmiştir).

Biyotin sentez yolunda etkin olan Pimelik asit yedi karbonlu bir α , ω -dikarboksilik asit (heptandioik asit) ve biyotin karbon atomlarının on tanesinden yedisini, özellikle de valeroil yan zincirinin tamamını sağlamıştır. Standart yağ asidi sentezi reaksiyonlarının iki çevriminden sonra, pimeloyl-ACP metil esterinin metil grubu BioH enzimi tarafından uzaklaştırılıp; böylece pimeloyl-ACP elde edilmiştir. Pimeloyl-ACP, BioF enzimi aracılığıyla L-alanin ile birleştirilerek 7-keto-8-

aminopelargonik asit (KAPA) oluşumu ile biyotinin halka yapısını meydana getirmiştir (Zhang vd., 2020) (Şekil 5)

Pimelik Asitin Biyosentezi (Biyotin Yolu)

Bakterilerde pimelik asit biyosentezi, yaygın olarak yağ asidi biyosentez yolunun modifikasyonu ile gerçekleşmiştir. *E. coli*'de: BioC (methyltransferase), enzimi malonil-CoA'yı metil ester yapar, bu yapı iki uzama siklusu sonrası BioH (esteraz), tarafından pimeloyl-ACP'ye dönüştürülür. *B. Subtilis*; Serbest pimelik asit ara ürünü önemli olup, BioW (pimeloyl-CoA ligaz; BioI P450 dekarboksilaz, destekleyici rol), enzimleri pimeloyl-CoA sentaz aracılığıyla aktif hale getirir (Manandhar ve Cronan; 2017). Bazı α -proteobakterilerde (*Agrobacterium*, *Mesorhizobium*), BioZ adlı FabH homologu aracılığıyla pimeloyl-ACP sentezlenmiştir (Şekil 6).



Şekil 6: Pimelik asitin biyosentez yolu (Manandhar ve Cronan; 2017)

Pimelik Asitten Elde Edilen Türevler

Pimelik asidin endüstriyel olarak elde edilen türevleri, özellikle disakkarit ester yapılarına sahip plastikleştiriciler ve biyopolimerler şeklinde değerlendirilmekte ve çevre dostu alternatif malzemeler olarak kullanılmıştır

(Zhang vd., 2011). Itakonik asit benzeri yollardan PVC yerine biyoplastik üretimi hedeflenmiştir.

5. PİMELİK ASİTİN SENTETİK ÜRETİM YÖNTEMLERİ

5.1. Klasik Kimyasal Sentez Yolu

Geleneksel olarak pimelik asit, sikloheptanonun dinitrojen tetroksit ile oksidasyonu yoluyla sentezlenmektedir. Alternatif sentez yöntemleri arasında palmitik asidin oksidasyonu, kaprolaktonun karbonilasyonu ve Mond reaksiyonu gibi zincir uzatmalı stratejiler yer almaktadır (Zhang vd., 2011). Pimelik asit, endüstride genellikle fosil yakıt türevi kimyasallardan geleneksel kimyasal yöntemlerle üretilmektedir. Bu yöntemlerin başında, sikloheptanonun dinitrojen tetroksit (N_2O_4) ile oksidatif açılması gelmektedir. Bu reaksiyon yüksek verim sağlasa da çevresel açıdan zararlı yan ürünler ortaya çıkarabilir. Alternatif yöntemler arasında palmitik asidin oksidasyonu ve kaprolaktonun karbonilasyonu gibi zincir uzatmalı stratejiler öne çıkar. Özellikle Mond karbonilasyon reaksiyonu, pimelik asit üretiminde karbon monoksit kullanımına olanak tanıyarak ekonomik bir avantaj sağlar (Zhang vd., 2011). Son yıllarda daha çevreci ve sürdürülebilir yöntemler geliştirilmiştir. Örneğin, olefin metatezi kullanılarak pimelik asit ve türevleri daha az yan ürünle sentezlenebilmektedir. Bu yöntem özellikle polimer öncüllerinin üretiminde tercih edilmektedir (Maughon vd., 2003). Ayrıca, biyobazlı platform moleküllerinden (örneğin glukoz, gliserol) yola çıkılarak mikrobiyal fermentasyonla pimelik asit üretimi de sentez stratejileri arasında yer almaya başlamıştır. Böylece hem fosil yakıt bağımlılığı azaltılmış hem de biyoplastik üretimi için alternatif ham maddelere erişim sağlanmıştır (Li vd., 2020).

5.2. Biyomühendislik ve GMO Yaklaşımları

Bacillus subtilis'te *bioI*, *orf2* ve *orf3* genleri, maltose-indüklenebilir promotör altına yerleştirilerek pimelik asit üretiminin yaklaşık dört kat

artırıldığı raporlanmıştır (Zhang vd., 2011). *E. coli* ve *Corynebacterium glutamicum*'da ise bioW geninin ekspresyonu ile pimeloyl-CoA üretimi aktive edilmiş ancak hücre içi alımın düşük olması verimliliği kısıtlamıştır (Manandhar ve Cronan, 2017; PMC, 2023). BioC-BioH-BioZ yolları gibi alternatif biyosentetik mekanizmalar da birçok bakteri türünde analiz edilerek biyotin üretiminin artırılmasında kullanılmıştır.

5.3. Zorluklar ve Verimlilik Optimizasyonu

Pasif difüzyonla pimelik asit alımı yüksek dış konsantrasyonlar gerektirmektedir. CAR enzimleriyle pimelik asidin yarı-aldehit formuna indirgenmesi patentle belgelenmiş bir yaklaşımdır. Ancak çok basamaklı reaksiyonların zorluğu, sürecin verimliliğini sınırlanmıştır.

6. PİMELİK ASİT ÜRETİMİNDE GÜNCEL BİYOTEKNOLOJİK GELİŞMELER

Yeni Biyosentez Yolları

Yeni tanımlanan BioZ enzimi, glutaryl-CoA ile malonyl-ACP'yi kullanarak pimeloyl-ACP üretimini sağlamıştır (Manandhar ve Cronan, 2017). *R. eutropha* gibi türlerde klasik BioC/BioH sisteminden bağımsız yollar tanımlanmıştır.

Sentetik Biyoloji ve Metabolik Mühendislik

Pimelik asit üretimi için *E. coli* ve *B. subtilis*'te thioesterazlar ve yağ asidi zincir uzatma enzimleri birlikte çalıştırılmıştır. Ayrıca genetik modifikasyonlarla biyotin üretim verimi artırılmıştır. Özellikle *B. subtilis* sistemlerinde pimelik asit optimizasyonu, biyotin üretimini 4–5 kat artırmış ve konsantrasyonlar 2.3 g/L seviyelerine ulaşmıştır (Zhang vd., 2011). *C. glutamicum*'da ise düşük alım kapasitesine sahip olmuştur.

Pimelik Asitin Canlılardaki Varlığı

Pimelik asit, canlılarda doğal olarak bulunmayan bir bileşik olmasına rağmen, türevleri lizinin biyosentezinde yer almıştır. Bunun yanında anti-inflamatuar ve antibakteriyel özellikleri olduğu ve bu nedenle tıbbi ve kozmetik uygulamalarda potansiyel kullanım taşıdığı belirtilmiştir. Pimelik asit, özellikle bakterilerde biyotin sentezinin bir ilk öncüsü olup; *Bacillus subtilis* ve *E. coli* bu bağlamda önemli model organizmalar olduğu ortaya konmuştur. Pimelik asit, bakterilerde biyotinin ilk öncülü olarak görev yaptığı belirlenmiştir. *Bacillus subtilis*'te pimelik asit, yağ asidi sentezi yoluyla oluşarak; BioW enzimi tarafından pimeloyl-CoA'ya dönüştürülerek biyotin üretiminde kullanılmıştır. Böylece pimelik asitin biyotin biosentezinde özgün ve aktif bir ara ürün olduğunu ortaya koymuştur (Manandhar & Cronan, 2017). Ayrıca *Pseudomonas* gibi bazı mikroorganizmalar tarafından azelaik asit yıkımı sonucu yan ürün olarak üretilerek; biyotin sentezini uyaran bir mekanizma olarak belirlenmiştir. Bununla birlikte bazı mikroorganizmalar: *Pseudomonas* ve *Aspergillus niger* azelaik asidin yıkımı sırasında pimelik asit oluşturarak; biyotin sentezini uyarıcı bir mekanizma olarak değerlendirilmiştir (Janota-Bassalik, 1964).

Hücresel Metabolizmadaki Önemi

Pimelik asidin hücresel metabolizmadaki önemi, amino asit lizin ve vitamin biyotinin biyosentezinde yer almasından kaynaklanmıştır. Ayrıca, pimelik asit türevleri, hücre zarında bulunan bazı proteinlerin sistein gruplarında bağlı olup, bu sayede proteinlerin zara takılı kalmasını sağlamıştır. *Escherichia coli*'de pimelat sentezi, yağ asidi sentez yolunun özgülüğünü aşarak gerçekleşmiştir. BioC enzimi, malonil-ACP'nin serbest karboksil grubunu metillendirerek malonil esterini oluşturmuştur. Bu sıra dışı başlatıcı madde, iki döngü boyunca yağ asidi sentezine girerek pimeloyl-ACP metil estere dönüştürmüştür. Bu metil ester zincirin uzamasını sağlar. Zincir

tamamlandıktan sonra metil ester çıkarılır; çünkü serbest karboksil daha sonra biyotin molekülüne bağlanmak üzere kullanılamıştır (Agarwal vd., 2012)

Biyotin, mikobakterilerin büyümesi için zorunlu bir koenzimdir ve *Mycobacterium tuberculosis*'in biyotin sentez yolundaki Tam proteinleri, *E. coli*'de BioC gibi işlev görmüştür. *Mycobacterium smegmatis* tam geni silindiğinde biyotin sentezi bozulur; dışarıdan biyotin verilmesi bu durumu düzeltir. Bu çalışma, mikobakterilerde pimelat grubu sentezinin, ancak *E. coli*'dekine benzer şekilde BioC işlevi gören Tam proteini aracılığıyla yürütüldüğünü ortaya koymuştur (Hu & Cronan, 2020).

Agrobacterium tumefaciens ve diğer α -proteobakteriler, pimeloyl-ACP sentezi için glutaryl-CoA kullanan sıra dışı bir yol izlemiştir. Glutaryl-CoA genellikle lizinin yıkım yoluyla oluşan bir ara ürün olmuştur. BioZ enziminin, *E. coli* BioC–BioH sistemini fonksiyonel olarak ikame ettiği ve bu organizmaların BioZ veya glutarat-CoA üretiminden sorumlu CaiB enzimi eksik mutantlarının biyotin auxotrofik fenotip gösterdiği bulunmuştur (Sirithanakorn ve Cronan, 2021).

Oksidatif Stresle İlişkili Fonksiyonları

Oksidatif stres, serbest radikallerin (özellikle reaktif oksijen türleri) üretiminin, antioksidan savunma sistemlerini aştığı biyolojik bir durum olmuştur. B vitaminleri, doğrudan antioksidan olmasalar da koenzim rollerinde bulundukları biyokimyasal süreçler sayesinde oksidatif stresle mücadelede kritik dolaylı görevler üstlenmiştir (Kennedy, 2016).

7. BİTKİLERDE B GRUBU VİTAMİNLER İLE İLGİLİ STRES ALTINDA YAPILAN ÇALIŞMALAR

B vitaminleri, esansiyel kofaktörlerin metabolik öncüleri oldukları için vazgeçilmezdir, ancak stres koşullarında yıkılma eğilimlidirler. Kofaktörler ve onların vitamin öncüleri doğaları gereği kimyasal olarak reaktiftir (Robin,

2013). Kimyasal olarak reaktif gruplar oksidasyon, hidroliz veya moleküle zarar veren ya da yok eden yan reaksiyonlara girmeye eğilimlidir ve stres koşulları bu tür yan reaksiyonları teşvik eder. Dolayısıyla stresli bitkilerin B vitamini eksikliklerine maruz kalması ve bu eksikliklerin metabolik etkilerinin olması kaçınılmazdır (Hanson vd., 2016).

Bitkilerde stres kaynaklı metabolitlerin tümü kofaktörlerin uğradığı hasarı hızlandırır (Baggott, 2000; Marbaix vd., 2011). Ayrıca abiyotik stresler, kofaktörleri parçalayan enzimleri indükleyip normalde diğer substratlara özgü enzimlerin de çalışma düzenini bozarlar ve yanlışlıkla kofaktörlere saldırdığı sert hücresel koşullar yaratıp kofaktör yıkımını teşvik edebilirler (Piedrafita vd., 2015; Higa vd., 2012).

Bitkilerde kofaktör olarak; tiamin (B₁ vitamini) tiamin difosfata; riboflavin (B₂ vitamini) FMN ve FAD'a; niasin (B₃ vitamini) NADH'a; pantotenat (B₅ vitamini) koenzim A'ya; piridoksin (B₆ vitamini) piridoksal 5'-fosfata; biyotin (B₈ vitamini) enzimlerin biyotinil yan zincirine ve tetrahidrofolat (B₉ vitamini) 1. karbondan ikameci çeşitli folatlara ve bunların poliglutamillenmiş türevlerine dönüşür (Hanson vd., 2016).

Abiyotik stres faktörlerinden biri olan tuzluluk stresinin bitkilerin çimlenmesini, büyümesini, gelişmesini ve ürün verimini önemli ölçüde sınırladığı bilinmektedir (Gul ve ark., 2024). Abiyotik stres (tuz , kuraklık su eksikliği, su baskını) maruz kalan Arabidopsis (*A. thaliana* L.) ayçiçeğinde (*Helianthus annuus*) ve bezelye (*Pisum sativum*), arpa (*Hordeum vulgare*), yulaf (*Avena sativa*), darı (*Pennisetum glaucum*), pamuk (*Gossypium hirsutum* L.), bezelye (*Vicia faba* L.), buğday (*Triticum aestivum* L.), asma (*Vitis vinifera* L.), arpa (*Hordeum vulgare* L.), fasulye (*Phaseolus vulgaris* L.), bamya (*Abelmoschus esculentus* L.), pirinç (*Oryza sativa* L.) bitkilerine dışardan farklı uygulama yolları (tohumdan topraktan, spreyleme ve hasat sonrası püskürtme) ile B grubu vitamin uygulamaları çimlenme ve büyüme parametrelerinde, fotosentez mekanizmasında, metabolik faaliyetlerde ve

ozmoregulasyonda düzenleme, pH ayarlaması, prolin, mineral madde miktarında iyileştirme, kalsiyum sinyal iletimini artırarak ve stres tepki genlerini aktive ederek; antioksidan savunma sisteminde enzim ve gen ifadelerinde, B vitamini sentez, ROS dengesini sağlayan iyon genler (NHXT, SOS)’ in ifadesinde artmaya neden olmuştur. Bunun yanında MDA miktarında ve etilen miktarında azalmaya neden olduğu bildirilmiştir (Sayed ve Gadallah, 2002 ; Kaya vd., 2015; Hamada vd., 2018 ; Hamada ve Jonsson, 2013 ; Pushpalatha vd., 2011; Tunç-Özdemir vd., 2009; İbrahim vd., 2020; Li vd., 2023; Kausar vd., 2023; Bashir vd., 2023; Jiadkong vd., 2023; Zhu vd., 2024; Alsamadany, 2022) (Şekil 7).

Vitamin	Bitki	Uygulama şekli ve stres	Etki mekanizması	Kaynak
B1(Tiamin)	Ay çiçeği (<i>Helianthus annuus</i> L.)	Tuz stresi altında spreyleme	Ağırlık ve uzunluk ile su potansiyeli ve iyon dengesini sağlama	Sayed ve Gadallah, 2002
Tiamin	<i>A. thaliana</i> L.	Herbisit uygulaması altında	TPP gen ifadesi artışına neden olarak antioksidan koruma	Tunç-Özdemir vd., 2009
Tiamin	Pamuk (<i>Gossypium hirsutum</i>)	Herbisit uygulaması altında	Ca sinyal iletimini artırarak ve stres tepki genlerini aktive ederek stres toleransı	Li vd., 2023
Tiamin	İki farklı bezelye (<i>Pisum sativum</i> L.)	Spreyleme, kuraklık stresi	Ozmoregülasyon, pH ayarlaması, prolin klorofil ve KAT 'da artma, POX' da azalma,	Kausar vd., 2023
Tiamin	Buğday (<i>Triticum aestivum</i> L.)	Su stresi, topraktan uygulama	H ₂ O ₂ , MDA, BEİ azalma, antioksidanlar, mineral madde miktarında iyileştirme	Bashir vd., 2023
Tiamin ve Riboflamin	Asma (<i>Vitis vinifera</i>)	<i>P.viticola</i> enfeksiyonuna karşı	Fenilpropanoid yol ile enzim genlerinin uyanması tiamin tarafından sağlanması	Boubakri vd., 2013'a, b
Tiamin ve Pirodoksın	Bakla (<i>Vicia faba</i> L.)	Tohumdan uygulama, tuz stresi	İyon dengesi, metabolik faaliyetlerde artma ve enzimaktivitelerinde iyileşme	Ahmed vd., 2024
Pirodoksın ve yosun özütü	Bamya	Tuz stresi	Reaktif oksijen türlerini azalttı, fotosentez mekanizmasını ve antioksidan enzim ve verimi artırdı	Khan vd., 2025
Riboflavin	Tütün (<i>Nicotiana tabacum</i> L.)	Herbisit uygulaması altında	Liposigenaz gen ifadesinde artış	Liu vd., 2010
Riboflamin	Pirinç (<i>Oryza sativa</i> L.)	Tohumdan, tuz stresi	Na ⁺ /K ⁺ dengesini ilgili gen ifadesi artışı ile sağlama	Jiadkong vd., 2023
Riboflavin	Mango (<i>Mangifera indica</i> L.)	Patojen enfeksiyon	Meyve kalitesini korurken reaktif oksijen türleri'ni aktive ederek patojenlerin büyümesini engelleme	Zhu vd., 2024

Şekil 7. B grubu vitaminler ile ilgili stres koşulları altında yapılmış çalışmalar

Bitkilerde; model bitki olan Arabidopsis’de biyotin sentezi, peroksizom organellerinde gerçekleşen karmaşık bir süreç içermiştir. Bu süreçte pimelik asit, biyotin biyosentez yolunun erken adımlarında kritik bir öncü molekül olarak görev almıştır. Özellikle biyotin sentezinde görevli olan enzimlerden olan AtBioF (Arabidopsis biyotin öncüsü faktör); pimelik asidi pimeloyl-

CoA'ya dönüştürerek sonraki biyotin sentez adımlarına katılımı sağlamıştır (Wang vd., 2020). Peroksizomlarda gerçekleşen bu biyokimyasal dönüşüm, bitkinin sağlıklı büyüme ve metabolik fonksiyonlarını sürdürebilmesi için gerekli olmuştur. Bu çalışma, bitkilerde biyotin sentezinin moleküler mekanizmalarının anlaşılmasına önemli katkılar sağlamıştır ve pimelik asidin biyosentez yolunda vazgeçilmez bir rol oynadığını göstermiştir (Pieuchot ve Jedd, 2012).

8. DEĞERLENDİRME VE GELECEĞE YÖNELİK PERSPEKTİFLER

Pimelik asit, biyotin sentez zincirinde kritik bir başlangıç bileşiğidir. BioC, BioH ve BioZ gibi enzimatik yolların karakterizasyonu, biyoteknolojik araştırmaların odak noktası hâline gelmiştir (Manandhar & Cronan, 2017). Endüstriyel ölçekte pimelik asit üretimi, biyotin verimliliğini doğrudan etkileyerek üretim süreçlerini ekonomik hâle getirebilmiştir (Zhang vd., 2011). Bununla birlikte, alım mekanizmalarının yetersizliği, toksisite, metabolik rekabet ve hücre içi stres gibi faktörler üretim verimliliğini sınırlandırmıştır. Gelecekte membran taşıyıcıları, enzim mühendisliği ve genom düzeyinde kontrollü ekspresyon sistemleri ile bu süreçlerin daha verimli hâle getirilmesi mümkün olmuştur Pimelik asit üzerine ilk sistematik çalışmalar, 20. yüzyılın ortalarında organik sentez ve poliamid üretimi hedefli araştırmalarla başlamıştır. Bu dönemde pimelik asit, naylon benzeri polimerlerin yapıtaşı olarak araştırılmış; sentezinde ise genellikle fosil kaynaklı öncüller ve sert kimyasal oksidanlar kullanılmıştır (Zhang vd., 2011). Ancak bu klasik yöntemler, yüksek enerji gereksinimi ve çevresel toksisite nedeniyle sürdürülebilir bulunmamıştır.

Günümüzde araştırmalar, pimelik asidin üretimini daha çevreci hâle getirmek için biyoteknolojik yollar üzerine yoğunlaşmıştır. Özellikle *Escherichia coli* ve *Bacillus subtilis* gibi mikroorganizmalar, genetik

mühendislik teknikleriyle modifiye edilerek yenilenebilir kaynaklardan (örneğin glikoz, gliserol) pimelik asit üretebilir hâle getirilmiştir (Li vd., 2020). Ayrıca, enzimatik dönüşüm yolları, süreç verimliliğini artırmakta ve endüstriyel ölçekli üretim için umut verici olmuştur.

Gelecekte pimelik asit üretiminin, özellikle biyoplastik, biyonyon ve yeşil kimya uygulamaları alanında daha fazla yer edinmiştir. Araştırmalar, karbon ayak izini azaltan ve döngüsel ekonomiye hizmet eden yeni üretim teknolojileri üzerine yoğunlaşmıştır (Beardslee ve Picataggio, 2012). Ayrıca, sentetik biyoloji sayesinde daha kısa sentez yolları geliştirilmektedir. Bu da üretim maliyetlerini düşürecek ve ticari ölçekte biyokimya ürünlerinin yaygınlaşmasını kolaylaştıracaktır (Li vd., 2020). Sonuç olarak pimelik asit araştırmaları, klasik sentezden biyolojik mühendisliğe doğru evrilmiş ve gelecekte yenilenebilir ekonomi hedeflerinin önemli bir parçası olmaya aday bir molekül hâline gelmiştir.

TEŞEKKÜRLER

Bu çalışmada Biyoloji Bölümü 4. sınıf öğrencilerinden Hilal ÇELEN ve Banu ÖZBİLEK'e katkılarından dolayı teşekkürlerimizi sunarız.

KAYNAKÇA

- Adams-Phillips, L., Briggs, A. G., & Bent, A. F. (2010). Disruption of poly (ADP-ribosyl) ation mechanisms alters responses of Arabidopsis to biotic stress. *Plant physiology*, 152(1), 267-280. DOI: 10.1104/pp.109.148049
- Agarwal, V., Lin, S., Lukk, T., Nair, S. K., & Cronan, J. E. (2012). Structure of the enzyme-acyl carrier protein (ACP) substrate gatekeeper complex required for biotin synthesis. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 109(43), 17406-17411. doi.org/10.1073/pnas.1207028109
- Alban, C., Job, D., & Douce, R. (2000). Biotin metabolism in plants. *Annual review of plant biology*, 51(1), 17-47. DOI: 10.1146/annurev.arplant.51.1.17
- Alsamadany, H., & Ahmed, Z. (2022). Assessing aging impact on growth potential of Vitamin E primed soybean seeds via biochemical profiling. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 29(5), 3717-3726. DOI: 10.1016/j.sjbs.2022.03.013
- Ashoori, M., & Saedisomeolia, A. (2014). Riboflavin (vitamin B2) and oxidative stress: a review. *British Journal of Nutrition*, 111(11), 1985–1991. DOI: 10.1017/S0007114514000178
- Bashir, R., Iqbal, S., Awais, M., et al. (2023). Thiamine (vitamin B₁) helps to regulate wheat growth and yield under water limited conditions by adjusting tissue mineral content, cytosolutes and antioxidative enzymes. *Plant Growth Regulation*, 101, 629–642. <https://doi.org/10.1007/s10725-023-01045-6> DOI:10.1007/s10725-023-01045-6
- Beardslee, T., & Picataggio, S. (2012). Bio-based adipic acid from renewable oils. *Lipid Technology*, 24(11), 251–254. <https://doi.org/10.1002/lite.201200207> DOI:10.1002/lite.201200230

- Boas, M. A. (1927). The effect of desiccation upon the nutritive properties of egg-white. *Biochemical Journal*, 21(3), 712. doi: 10.1042/bj0210712
- Boubakri, H., Gargouri, M., Mliki, A., Brini, F., Chong, J., & Jbara, M. (2016). Vitamins for enhancing plant resistance. *Planta*, 244(3), 529-543. Ahmed vd., 2024 DOI 10.1088/1755-1315/1371/3/032040
- Combs, G. F. (2008). *The vitamins: Fundamental aspects in nutrition and health* (3rd ed.). Academic Press.
- Collie, J. T., Greaves, R. F., Jones, O. A., Lam, Q., Eastwood, G. M., & Bellomo, R. (2017). Vitamin B₁ in critically ill patients: needs and challenges. *Clinical Chemistry and Laboratory Medicine (CCLM)*, 55(11), 1652-1668. DOI 10.1515/cclm-2017-0054
- Dakshinamurti, K. (2022). Biotin. In *Handbook of Vitamins* (5th ed.). CRC Press. da Fonseca-Pereira, P., Monteiro-Batista, R. D. C., Araújo, W. L., & Nunes-Nesi, A. (2023). Harnessing enzyme cofactors and plant metabolism: an essential partnership. *The Plant Journal*, 114(5), 1014-1036. DOI: 10.1111/tpj.16167
- Drewke, C., & Leistner, E. (2001). Biosynthesis of vitamin B₆ and structurally related derivatives. *Vitamins & hormones*, 61, 121-155. DOI: 10.1016/s0083-6729(01)61004-5
- Eggers, J., Strittmatter, C. S., Küsters, K., Biller, E., & Steinbüchel, A. (2020). Biotin synthesis in *Ralstonia eutropha* H16 utilizes pimeloyl coenzyme A and can be regulated by the amount of acceptor protein. *Applied and Environmental Microbiology*, 86(18), e01512-20. doi: 10.1128/AEM.01512-20
- Eisenberg, M. A. (2012). Biotin synthesis: Enzymology and regulation. *Advances in Enzymology and Related Areas of Molecular Biology*, 54, 157-218.
- Fan, D. L., Liu, S. K., & Bu, Y. Y. (2024). Progress of biotin research in plants. *Molecular Soil Biology*, 15(1), 1-7.

<https://doi.org/10.5376/msb.2024.15.0001>

doi:10.5376/msb.2024.15.0001

Fitzpatrick, T. B., Basset, G.J.C., Borel, P., Carrari, F., Della Penna, D., Fraser, P. D., Hellmann, H., Osorio, S., Rothan, C., Valpuesta, V., Caris-Veyrat, Ferniej, A. C., 2012. Vitamin Deficiencies in Humans: Can Plant Science Help? *The Plant Cell*, 24: 395–414. DOI: 10.1105/tpc.111.093120

Fitzpatrick, T. B., & Chapman, L. M. (2020). The importance of thiamine (vitamin B₁) in plant health: From crop yield to biofortification. *Journal of Biological Chemistry*, 295(34), 12002-12013. doi: 10.1074/jbc.REV120.010918

Gibson-Moore, H. (2021). Vitamin D: What's new a year on from the COVID-19 outbreak?. *Nutrition Bulletin*, 46(2), 195. doi: 10.1111/nbu.12499

Google Patents. (2021). US20130267012A1 – Genetic engineering of BioI systems.

Gul, V., Sefaoglu, F., Cetinkaya, H., & Dinler, B. S. (2024). The Effect of Different Doses of Salt Stress on Germination and Emergence in Cannabis (*Cannabis sativa* L.) Seed Treated with Pre-Salicylic Acid. *Brazilian Archives of Biology and Technology*, 67, e24240047. doi:10.1590/1678-4324-2024240047

Hamada, A. M., & Jonsson, L. M. (2013). Thiamine treatments alleviate aphid infestations in barley and pea. *Phytochemistry*, 94, 135-141. doi: 10.1016/j.phytochem.2013.05.012

Hamada, A. M., Farghaly, F. A., Salam, H. K., & Radi, A. A. (2023). Excess boron stress and alleviation of its toxicity in plants: mechanisms and strategies. *Journal of Plant Nutrition*, 46(11), 2724-2746. DOI:10.1080/01904167.2022.2160743

Hanson, A. D., West, J. A., Senegal, A., & Tabita, F. R. (2016). Does abiotic stress cause functional B vitamin deficiency? *Frontiers in Plant Science*. <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.00554>

- Hayashi, H., Do, B., Ahmed, M. H., Bettendorff, L., Shibata, K., Fukuwatari, T., ... & Clarke, R. (2012). B Vitamins and folate: chemistry, analysis, function and effects.
- Hopkins, M. H. (2012). Circulating Biomarkers of Inflammation and Oxidative Stress: Associations with Risk Factors for Colorectal Neoplasms and Response to Micronutrient-Based Chemopreventive Interventions (Doctoral dissertation, Emory University).
- Houben, A., Banaei-Moghaddam, A. M., Klemme, S., & Timmis, J. N. (2014). Evolution and biology of supernumerary B chromosomes. *Cellular and Molecular Life Sciences*, 71(3), 467-478 <https://doi.org/10.1007/s00018-013-1437-7>.
- Hu, Z., & Cronan, J. E. (2020). The primary step of biyotin synthesis in mycobacteria. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 117(38), 23794-23801. doi.org/10.1073/pnas.201018911
- Ibrahim, R. E., Ahmed, S. A., Amer, S. A., Al-Gabri, N. A., Ahmed, A. I., Abdel-Warith, A. W. A., ... & Metwally, A. E. (2020). Influence of vitamin C feed supplementation on the growth, antioxidant activity, immune status, tissue histomorphology, and disease resistance in Nile tilapia, *Oreochromis niloticus*. *Aquaculture Reports*, 18, 100545. <https://doi.org/10.1016/j.aqrep.2020.100545>
- Jabeen, M., et al. (2022). Thiamin stimulates growth, yield quality and key biochemical characteristics of cauliflower under water-deficit stress. *PLOS ONE*. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0266372>
- Janota-Bassalik, L., & Wright, L. D. (1964). Pimelic Acid as a By-product of Azelaic Acid Degradation by *Pseudomonas* sp. *Nature*, 204(4957), 501-502. DOI: 10.1038/204501a0

- Jarrett, J. T. (2005). Biotin synthase: Enzyme properties and mechanistic insights. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA)-Proteins and Proteomics*, 1754(1-2), 221–228.
- Jiadjkong, K., Fauzia, A. N., Yamaguchi, N., & Ueda, A. (2024). Exogenous riboflavin (vitamin B2) application enhances salinity tolerance through the activation of its biosynthesis in rice seedlings under salinity stress. *Plant Science*, 339, 111929. DOI: 10.1016/j.plantsci.2023.111929
- Jiang, Y., Maniar, D., Woortman, A. J., & Loos, K. (2016). Enzymatic synthesis of 2, 5-furandicarboxylic acid-based semi-aromatic polyamides: enzymatic polymerization kinetics, effect of diamine chain length and thermal properties. *RSC Advances*, 6(72), 67941-67953. DOI:10.1039/C6RA14585J
- Kausar, A., Zahra, N., Zahra, H., Hafeez, M. B., Zafer, S., Shahzadi, A., ... & Prasad, P. V. (2023). Alleviation of drought stress through foliar application of thiamine in two varieties of pea (*Pisum sativum* L.). *Plant Signaling & Behavior*, 18(1), 2186045. DOI: 10.1016/j.plantsci.2023.111929
- Kaya, C., Ashraf, M., Sonmez, O., Tuna, A.L., Polat, T., Aydemir, S., 2015. Exogenous application of thiamin promotes growth and antioxidative defense system at initial phases of development in salt-stressed plants of two maize cultivars differing in salinity tolerance. *Acta Physiol. Plant.*, 37:1–12. DOI:10.1007/s11738-014-1741-3
- Kennedy, D. O. (2016). B vitamins and the brain: mechanisms, dose and efficacy – a review. *Nutrients*, 8(2), DOI: 10.3390/nu8020068
- Khan, A., Raza, M. K., Abbas, K., Mansour, L., Ali, A., & Imran, M. (2025). Genetic insights into vitamin D deficiency: a case-control study of GC and CYP24A1 gene polymorphism. *Steroids*, 218, 10960 DOI:10.3390/nu171626737.

- Khan, M., Subramaniam, R., & Desveaux, D. (2021). Biotin-based proximity labeling of protein complexes in planta. In: *Arabidopsis Protocols*. (Protocol chapter). DOI: 10.1007/978-1-0716-0880-7_21
- Kennedy, D.O. (2016). B vitamins and the brain: mechanisms, dose and efficacy—a review. *Nutrients*, 8(2), 68.
- Kögl, F. & Tönnis, B. (1936). Über das Bios-Problem. Darstellung von kristallisiertem Biotin aus Eigelb. 20. Mitteilung über pflanzliche Wachstumsstoffe. *Biological Chemistry*, 242(1-2), 43-73.
- Lan, N., Mao, C., Chen, M., Wang, X., Bai, S., & Ren, J. (2025). Metagenomic insights into resistance trends related to microbial VB₁₂ synthesis in eutrophic urban lakes. *Scientific Reports*, 15(1), 20599. Doi.org/10.1038/s41598-025-06125-3
- Kilic, S., & Aca, H. T. (2016). Role of exogenous folic acid in alleviation of morphological and anatomical inhibition on salinity-induced stress in barley. *Italian Journal of Agronomy*, 11(4), 777. DOI:10.4081/ija.2016.777
- Li, L., Gao, T., Wu, X., Geng, M., Teng, F., & Li, Y. (2023). Investigation of soybean lipophilic proteins as carriers for vitamin B₁₂: Focus on interaction mechanism, physicochemical functionality, and digestion characteristics. *Food Chemistry*, 424, 136435. DOI: 10.1016/j.foodchem.2023.136435
- Li, W., Mi, X., Jin, X., Zhang, D., Zhu, G., Shang, X., ... & Guo, W. (2022). Thiamine functions as a key activator for modulating plant health and broad-spectrum tolerance in cotton. *The Plant Journal*, 111(2), 374-390. DOI: 10.1111/tpj.15793
- Li, X., Zhang, Y., Li, Y., & Xu, J. (2020). Biotechnological production of adipic and pimelic acid: Renewable pathways and metabolic engineering. *Biotechnology Advances*, 44, 107607. doi.org/10.1016/j.biotechadv.2020.107607

- Lin, S., & Cronan, J. E. (2011). Closing in on complete pathways of biyotin biosynthesis. *Molecular BioSystems*, 7(6), 1811-1821. DOI:10.1039/c1mb05022b
- Lin, S., Hanson, R. E., & Cronan, J. E. (2010). Biyotin synthesis begins by hijacking the fatty acid synthetic pathway. *Nature Chemical Biology*, 6(9), 682-688. DOI: 10.1038/nchembio.420
- Macknight, R. C., Laing, W. A., Bulley, S. M., Broad, R. C., Johnson, A. A., & Hellens, R. P. (2017). Increasing ascorbate levels in crops to enhance human nutrition and plant abiotic stress tolerance. *Current opinion in biotechnology*, 44, 153-160. DOI: 10.1016/j.copbio.2017.01.011
- Manandhar, M., & Cronan, J. E. (2017). Biosynthesis of pimelic acid and its role in biyotin production. *Molecular Microbiology*, 104(4), 590-602. DOI: 10.1111/mmi.13648
- Marbaix, A. Y., Chehade, G., Noël, G., Morsomme, P., Vertommen, D., Bommer, G. T., & Van Schaftingen, E. (2019). Pyridoxamine-phosphate oxidases and pyridoxamine-phosphate oxidase-related proteins catalyze the oxidation of 6-NAD (P) H to NAD (P)⁺. *Biochemical Journal*, 476(20), 3033-3052. DOI: 10.1042/BCJ20190602
- Maughon, B. R., Burdett, K. A., & Mokhtarzadeh, C. C. (2003). Olefin metathesis in polymer and fine chemical synthesis. *Chemical Reviews*, 103(8), 2837-2844. <https://doi.org/10.1021/cr020019f>
- Meir, S., Zilberstein, A., & Livneh, Z. (2010). Functional studies of fungal biyotin biosynthesis. *Fungal Genetics and Biology*, 47(9), 759-766.
- Mock, D. M. (2017). Biyotin. In B. Caballero, P. M. Finglas & F. Toldrá (Eds.), *Encyclopedia of Food and Health* (Vol. 1, pp. 416-421). Elsevier.
- Muralla, R., Sweeney, C., Stepansky, A., Leustek, T., & Meinke, D. (2008). Genetic dissection of biyotin biosynthesis in *Arabidopsis*. *Plant Physiology*, 146(2), 925-939.

- Patton, D. A., Schetter, A. L., Franzmann, L. H., Nelson, K., Ward, E. R., & Meinke, D. W. (1998). An embryo-defective mutant of *Arabidopsis* disrupted in the final step of biotin synthesis. *Plant Physiology*, 116(3), 935-946. DOI: 10.1104/pp.116.3.935
- Perli, T., Wronska, A. K., Ortiz-Merino, R. A., Pronk, J. T., & Daran, J. M. (2020). Vitamin requirements and biosynthesis in *Saccharomyces*. doi: 10.1002/yea.3461
- Piedrafita, G., Keller, M.A. & Ralser, M. (2015) The impact of non-enzymatic reactions and enzyme promiscuity on cellular metabolism during (oxidative) stress conditions. *Biomolecules*, 5, 2101–2122. DOI: 10.3390/biom5032101
- Pieuchot, L., & Jedd, G. (2012). Peroxisome assembly and functional diversity in eukaryotic microorganisms. *Annual Review of Microbiology*, 66(1), 237-263. DOI: 10.1146/annurev-micro-092611-150126
- Pinon, V., Ravanel, S., Douce, R., & Alban, C. (2005). Biotin synthesis in plants: The first committed step of the pathway is catalyzed by a cytosolic 7-keto-8-aminopelargonic acid synthase (AtbioF). *Plant Physiology*, 139(4), 1666–1676. <https://doi.org/10.1104/pp.105.070144> DOI: 10.1104/pp.105.070144
- PMC. (2023). BioC/BioH pathway analysis in *Corynebacterium glutamicum* and *E. coli*. pubChem,(2003). (<https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/pimelic%20acid>)
- Pushpalatha, H. G., Sudisha, J., Geetha, N. P., Amruthesh, K. N., & Shekar Shetty, H. (2011). Thiamine seed treatment enhances LOX expression, promotes growth and induces downy mildew disease resistance in pearl millet. *Biologia Plantarum*, 55(3), 522-527. DOI:10.1007/s10535-011-0118-3
- Robinson, F. A. (2013). The vitamin co-factors of enzyme systems. Elsevier.

- Roje, S. (2007). Vitamin B biosynthesis in plants. *Phytochemistry* 68:1904–1921. DOI: 10.1016/j.phytochem.2007.03.038
- Saedisomeolia, A., & Ashoori, M. (2015). Biochemical and physiological roles of B vitamins in humans. *Journal of Nutritional Biochemistry*, 26(4), 325–333. DOI: 10.3390/NU14030484
- Sayed, S. A., & Gadallah, M. A. (2002). Effects of shoot and root application of thiamin on salt-stressed sunflower plants. *Plant Growth Regulation*, 36(1), 71–80. DOI:10.1023/A:1014784831387
- Sirithanakorn, C., & Cronan, J. E. (2021). Biotin, a universal and essential cofactor: synthesis, ligation and regulation. *FEMS Microbiology Reviews*, 45(4), fuab003. DOI: 10.1093/femsre/fuab003
- Spinneker, A., Sola, R., Lemmen, V., Castillo, M., Pietrzik, K., & González-Gross, M. (2007). Vitamin B₆ status, deficiency and its consequences-an overview. *Nutricion hospitalaria*, 22(1), 7-24.
- Selhub, J. (2002). Folate, vitamin B₁₂ and vitamin B₆ and one carbon metabolism. *The Journal of Nutrition, Health and Aging*, 6(1), 39–42.
- Shome, M., & Mishra, N. (2016). Molecular recognition of carboxylic acids and carboxylates: A review. *Indian Journal of Advances in Chemical Science*, 4(1), 56.
- Shimizu, K. et al. Functional analysis of peroxisomal β -oxidation in *Aspergillus oryzae*. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2011. PMC3162405
- Smith, A. G., Croft, M. T., Moulin, M., & Webb, M. E. (2007). Plants need their vitamins too. *Current opinion in plant biology*, 10(3), 266-275. DOI: 10.1016/j.pbi.2007.04.009
- Smith, A. L., & Jones, B. R. (2018). Role of B-complex vitamins in energy metabolism and human health. *Nutrition Reviews*, 76(8), 590–602.
- Spinneker, A., Sola, R., Lemmen, V., Castillo, M. J., Pietrzik, K., & González-Gross, M. (2007). Vitamin B₆ status, deficiency and its consequences—an overview. *Nutrition & Metabolism*, 4(1), 1–17.

- Streit, W. R., & Entcheva, P. (2003). Biotin in microbes, the genes involved in its biosynthesis, its biochemical role and perspectives for biotechnological production. *Applied microbiology and biotechnology*, 61(1), 21–31. DOI: 10.1007/s00253-002-1186-2
- Suresh, D. & Sanderson, R. (2015). Synthesis of linear dicarboxylic acids via selective oxidation and carbonylation reactions. *Journal of Molecular Catalysis A: Chemical*, 408, 197–204.
- Tunc-Özdemir, M., et al. (2009). Thiamin confers enhanced tolerance to oxidative stress in plants. (PMC article; check original PDF for full author list and journal). DOI: 10.1104/pp.109.14004.
- Tunc-Ozdemir, M., Miller, G., Song, L., Kim, J., Sodek, A., Koussevitzky, S., ... & Shintani, D. (2009). Thiamin confers enhanced tolerance to oxidative stress in Arabidopsis. *Plant physiology*, 151(1), 421-432. DOI: 10.1104/pp.109.140046
- Wang, H., Zhang, X., Gao, M., Gong, S., Xu, Y., Wang, J., ... & Zhang, Z. (2025). Multi-omics insights of biyotin-enhanced astaxanthin and total fatty acid productivity in heterotrophic *Chromochloris zofingiensis* under stress conditions. *Algal Research*, 104158.
- Wang, M., Liu, Z., Sun, W., Yuan, Y., Jiao, B., Zhang, X., ... & Wang, J. (2020). Association between vitamins and amyotrophic lateral sclerosis: a center-based survey in mainland China. *Frontiers in neurology*, 11, 488., 11, DOI: 10.3389/fneur.2020.00488
- Wang, Y., Wang, M., Ye, X., Liu, H., Takano, T., Tsugama, D., ... & Bu, Y. (2020). Biotin plays an important role in Arabidopsis thaliana seedlings under carbonate stress. *Plant science*, 300, 110639. DOI: 10.1016/j.plantsci.2020.110639
- Wickramasinghe, P. (2012). Micronutrients in childhood nutrition. *Sri Lanka Journal of Child Health*, 41(4). DOI:10.4038/sljch.v41i4.4976

- Yao, R., Tan, Z., Wang, L., Liu, T., & Tao, Y. (2013). Engineering *E. coli* for biosynthesis of pimelic acid through an artificial fatty acid degradation pathway. *Metabolic Engineering*, 20, 99–106.
- Zempleni, J., Wijeratne, S. S. K., & Hassan, Y. I. (2009). Biotin. In A. C. Ross, B. Caballero, R. J. Cousins, K. L. Tucker, & T. R. Ziegler (Eds.), *Modern Nutrition in Health and Disease* (11th ed., pp. 381–390). Lippincott Williams & Wilkins.
- Zhang, W., Yang, Y., Liu, C., & Wang, J. (2011). Production of pimelic acid by recombinant *Bacillus subtilis*. *Electronic Journal of Biotechnology*, 14(4), 10–16. DOI: 10.2225/vol14-issue6-fulltext-1

BÖLÜM 3

SİNİR OTU: DOĞANIN ŞIFALI BİTKİSİ

Gamze BETÜL ÜNAL^{1*}, Fırat SEFAOĞLU¹

DOI: <https://dx.doi.org/10.5281/zenodo.17502337>

^{1*}YL., Doç. Dr., Kastamonu Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Genetik ve Biyomühendislik Bölümü, Kastamonu, Türkiye
E-mail: gbetulunal@gmail.com.tr, ORCID ID: 0009-0000-2318-2466
E-mail: fsefaoglu@kastamonu.edu.tr, ORCID ID 0000-0002-8485-6564

Giriş

Sinir otu (*Plantago major* L. ve *Plantago lanceolata* L.), Plantaginaceae familyasının en yaygın ve tıbbi açıdan en değerli üyelerindendir (Samuelson, 2020), (Şekil 1). Dünya genelinde 200’den fazla *Plantago* türü tanımlanmış olup bunların büyük çoğunluğu ılıman ve tropikal bölgelerde doğal olarak yetişmektedir (Brown, 2019). Anadolu’da “damar otu”, “yara otu”, “bağa yaprağı” veya “böcek otu” gibi halk arasındaki farklı isimleriyle bilinen bu bitki, çok yıllık ve dayanıklı yapısıyla dikkat çeker (Uslu ve ark., 2016). *Plantago major* geniş, yumurtamsı yapraklarıyla; *Plantago lanceolata* ise dar, mızrak şeklindeki yapraklarıyla ayırt edilir. Her iki türün yapraklarında belirgin damarlanma bulunur; bu özellik de bitkiye halk arasında “sinir otu” adının verilmesine yol açmıştır (López, 2020).



Şekil 1. a) Sinir otu (*Plantago major* L.) bitkisi b) Sinir otu (*Plantago major* L.) bitkisinin çiçek sapı (spika) detayı (Wikimedia Commons, 2020. “*Plantago major*.”).

Ekolojik açıdan sinir otu son derece uyumlu bir bitkidir. Yol kenarları, tarlalar, çimenlikler ve nemli topraklarda kolayca yetişir. Bu özelliği sayesinde “kozmpolit” türlerden biri olarak kabul edilir (Miller, 2018). Yayılış alanının genişliği hem biyolojik çeşitlilikteki önemini hem de insan kültürleriyle olan uzun süreli etkileşimini göstermektedir. Ayrıca yüzeysel fakat yaygın kök yapısı sayesinde erozyon kontrolünde doğal bir bariyer görevi görür (Garcia ve Lee, 2020).

Sinir otunun insanlık tarihindeki yeri de oldukça köklüdür. Antik Yunan ve Roma döneminde Dioscorides ve Plinius, eserlerinde bu bitkinin yara tedavisi, sindirim sistemi rahatsızlıkları ve solunum yolları hastalıkları için yaygın şekilde kullanıldığını belirtmiştir (Miller, 2018). Çin tıbbında ise sinir otu, özellikle idrar söktürücü, öksürük giderici ve kan temizleyici özellikleriyle önemli bir yer edinmiştir (Kumar ve Rao, 2020). Orta Çağ Avrupa’sında “dokuz kutsal ot” arasında sayılması, o dönem halk hekimliğinde taşıdığı değerli konumu göstermektedir (Lee, 2017). Osmanlı tıbbında da sinir otu, bal ve pekmez ile kaynatılarak öksürük şurubu hazırlanmasında ve yaraların üzerine lapa halinde uygulanmasında yaygın biçimde kullanılmıştır (Karapetian, 2021).

Fitokimyasal analizler, sinir otunun zengin bir biyolojik bileşen yelpazesine sahip olduğunu ortaya koymuştur. Yapraklarında iridoid glikozitler (aucubin, catalpol), flavonoidler, tanenler, müsilaj, fenolik asitler ve silika gibi maddeler bulunur (Zhang ve ark., 2021). Bu bileşenler farmakolojik olarak anti-inflamatuar, antibakteriyel, antiviral, antioksidan ve yara iyileştirici özellikler sergiler (Patel ve Verma, 2023). Örneğin aucubin, dokulardaki iltihaplanmayı azaltırken; flavonoidler serbest radikalleri nötralize ederek oksidatif stresi engeller (Singh & Gupta, 2021). Müsilaj yapısı ise solunum yollarını yumuşatarak öksürük ve boğaz tahrişine karşı koruma sağlar (Nguyen & Kim, 2022).

Günümüzde yapılan modern çalışmalar, sinir otunun yalnızca geleneksel tedavilerde değil, aynı zamanda fonksiyonel gıda takviyeleri ve farmasötik

ürünlerde de kullanılabileceğini göstermektedir. Genç yapraklarının salatalarda ve yemeklerde tüketilmesi, onu besleyici bir gıda haline getirirken; tohumlarının yüksek lif içeriği bağırsak sağlığını destekleyici önemli bir unsur olarak öne çıkmaktadır (Johnson & Smith, 2023). Ayrıca hayvancılıkta, sinir otu yapraklarının yara tedavisinde ve anti-parazitik uygulamalarda kullanımı da yaygınlaşmaktadır (Williams, 2021).

Bütün bu yönleriyle sinir otu hem geçmişin şifa kaynağı hem de günümüzün araştırma konusu haline gelmiştir. Doğal yayılışı, dayanıklılığı, zengin fitokimyasal bileşenleri ve farmakolojik potansiyeli sayesinde, halk arasında “şifa bitkisi” olarak anılması hiç de şaşırtıcı değildir. Bu bağlamda sinir otu, yalnızca etnobotanik öneme sahip bir bitki değil, aynı zamanda modern bilim için de güçlü bir doğal ilaç adayı olarak görülmektedir.

Sinir Otunun Tarihi

Sinir otu (*Plantago major* L. ve *Plantago lanceolata* L.), insanlık tarihinin en eski şifalı bitkilerinden biri olarak kabul edilmektedir. Arkeolojik bulgular, bu bitkinin Neolitik Çağ’da Avrupa’da tüketildiğini ve tarım toplumlarının erken döneminde gıda ve ilaç amaçlı kullanıldığını ortaya koymuştur (Anderson, 2016). *Plantago* tohumlarının, arkeobotanik araştırmalarda tahıl kalıntılarıyla birlikte bulunması, onun besin ve tedavi amaçlı işlevine işaret etmektedir (Behre, 2007).

Antik çağlarda sinir otu özellikle Yunan ve Roma medeniyetlerinde yaygın kullanıma sahipti. Dioscorides, *De Materia Medica* adlı eserinde bitkinin kanamayı durdurucu ve yara iyileştirici özelliklerini vurgulamıştır (Miller, 2018). Plinius da *Naturalis Historia*’da, sinir otunun mide rahatsızlıklarında ve deri yaralarında faydalı olduğunu kaydetmiştir (Karapetian, 2021). Bu dönemde sinir otu hem dahilen hem de haricen kullanılan çok yönlü bir tedavi bitkisi olarak görülmekteydi.

Orta Çağ Avrupa'sında, sinir otu “dokuz kutsal ot” (Nine Herbs Charm) arasında sayılmış ve özellikle Anglo-Sakson şifa metinlerinde önemli bir yere sahip olmuştur (Lee, 2017). Bu dönemde yara tedavisi, yılan sokmaları ve böcek ısırıkları için lapa veya macun şeklinde uygulanmış; aynı zamanda sindirim problemleri için de kullanılmıştır (Brown, 2019).

İslam tıbbı ve Osmanlı geleneğinde, sinir otu yaygın bir şekilde reçetelere girmiştir. İbn Sina'nın *El-Kanun fi't-Tıbb* adlı eserinde sinir otunun balgam söktürücü, idrar söktürücü ve mideyi yatıştırıcı özelliklerinden bahsedilmektedir. Osmanlı döneminde ise sinir otu yaprakları, özellikle bal veya pekmeze kaynatılarak öksürük şurubu hazırlanmasında; ayrıca yara üzerine ezilip sarılarak antiseptik bir tedavi yöntemi olarak kullanılmıştır (Karapetian, 2021).

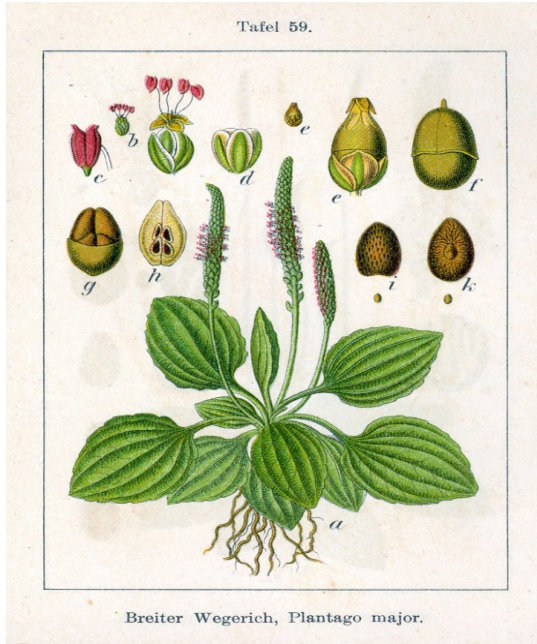
Yeni Çağ'da sinir otu, Avrupa'dan Amerika kıtasına göçlerle taşınmış ve kısa sürede yerel halk arasında da benimsenmiştir. Kuzey Amerika yerlileri, *Plantago major*'u “beyaz adamın ayak izi” (white man's footprint) olarak adlandırmış; çünkü Avrupalıların geçtiği her yerde bu bitkinin büyüdüğünü fark etmişlerdir (Mitich, 1994). Bu dönemden itibaren sinir otu hem gıda hem de tıbbi amaçlarla dünyanın birçok bölgesine yayılmıştır.

Modern dönemde, sinir otunun farmakolojik özellikleri üzerine çok sayıda bilimsel araştırma yapılmıştır. 20. yüzyıldan itibaren bitkinin yapraklarında bulunan aucubin, catalpol ve flavonoidler gibi bileşiklerin anti-inflamatuar, antimikrobiyal ve antioksidan özellikleri detaylı olarak ortaya konmuştur (Zhang ve ark., 2021). Ayrıca Avrupa Farmakopesi, *Plantago lanceolata* yapraklarını resmi bir tıbbi drog olarak tanımlamış ve solunum yolu enfeksiyonlarının tedavisinde kullanımını onaylamıştır (EMA, 2014). Günümüzde de sinir otu hem geleneksel tıp hem de modern fitoterapi uygulamalarında, geçmişten gelen köklü kullanımının bilimsel kanıtlarla desteklenmesi sayesinde güçlü bir konuma sahiptir (Patel ve Verma, 2023).

Sonuç olarak, sinir otunun tarihi; antik uygarlıklardan modern farmakolojiye uzanan bir süreklilik göstermektedir. Bitki, yara tedavisinden solunum yolu rahatsızlıklarına, gıda kaynağından farmasötik bileşenlere kadar geniş bir kullanım yelpazesiyle hem kültürel hem de bilimsel açıdan önemli bir miras bırakmıştır.

Botanik Tanım

Plantago türlerinin morfolojik özellikleri birbirinden farklılık göstermektedir. Örneğin, *Plantago major*'da yapraklar geniş, yumurtamsı formda olup rozet şeklinde dizilmekte ve 5–9 belirgin damar taşımaktadır. Buna karşılık, *Plantago lanceolata*'da yapraklar dar, mızrak şeklinde ve 3–5 paralel damara sahip olmasıyla ayırt edilmektedir (Zarzycki et al., 2019).



Şekil 2: *Plantago major* L.'nin morfolojik yapısı (yapraklar, kök, çiçek ve tohumlar), (Wikimedia Commons. 2020. “*Plantago major*”).

Bitkinin çiçekleri küçük, beyazımsı ya da kahverengi tonlarda olup uzun bir başak sapı üzerinde yoğun şekilde kümelenmiştir. Ayrıca bu çiçekler, rüzgâr aracılığıyla gerçekleşen tozlaşmaya morfolojik olarak uyum sağlamaktadır (Reardon ve ark., 2009). Kök sistemi yüzeysel olmakla birlikte geniş bir alana yayıldığından hem kuraklık koşullarına karşı dayanıklılığı artırmakta hem de toprak erozyonunun önlenmesinde önemli bir rol oynamaktadır (Garcia & Lee, 2020). Tohumları ise kahverengi-siyah renkte, oval yapıda ve oldukça küçük olup, bir bitkinin bir sezonda 10.000'in üzerinde tohum üretebilme kapasitesi bulunmaktadır. Bu yüksek tohum verimliliği, sinir otunun dünya genelinde geniş bir yayılım göstermesine katkı sağlamaktadır (Fenner ve Thompson, 2005).

Ekoloji ve Yayılım

Sinir otu, dünyanın en geniş yayılışa sahip bitkilerinden biridir. Avrupa, Asya ve Kuzey Afrika kökenli olmasına rağmen günümüzde Antarktika hariç tüm kıtalara yayılmıştır (Hodkinson ve ark., 2014).

- İklim: Ilıman iklimlerde yaygın olmakla birlikte, tropik ve subtropik bölgelerde de görülebilir. -20 °C'ye kadar düşük sıcaklıklara dayanabilir (Sabo et al., 2019).
- Toprak: Organik maddece zengin, iyi drene edilmiş, orta nemli toprakları tercih eder. Ancak fakir toprak koşullarına da uyum sağlar. pH 4,5–8,0 arasında yetişebilir (Grime ve ark., 2007).
- Habitat: Yol kenarları, çayırlar, tarlalar, bahçeler ve meralar en sık görüldüğü alanlardır. Yüksek tohum üretimi ve rüzgarla tozlaşma sayesinde istilacı bir tür niteliği de gösterebilir (Mitich, 1994).

Tarımsal Üretim

Sinir otu, doğal olarak yaygın bir yabani tür olsa da fitoterapi ve farmasötik endüstri için kontrollü yetiştiriciliği de yapılmaktadır.

- Ekim ve Çimlenme: Tohumları ilkbahar ve sonbaharda ekilir. Çimlenme için optimum sıcaklık 15–20 °C'dir. Tohumlar ışığa duyarlı olduğundan yüzeysel ekim tercih edilir (Samuelsen, 2000).
- Sulama ve Gübreleme: Düzenli sulama verimi artırır. Azotlu gübreler, yaprak biyokütlesini yükseltirken, fosfor ve potasyum uygulamaları tohum üretimini teşvik eder (Reardon ve ark., 2009).
- Hasat: Yapraklar, bitki çiçeklenme dönemine girmeden önce (Mayıs-Haziran) toplanır. Tohumlar ise yaz sonu-sonbahar başında olgunlaştığında hasat edilir (EMA, 2014).
- Verim: Uygun koşullarda hektar başına 1,5–2 ton kuru yaprak ve 500–700 kg tohum elde edilebilmektedir (Zhang et al., 2021).
- Hastalık ve Zararlılar: Genellikle dayanıklı bir türdür. Ancak nemli koşullarda yaprak lekesi (*Alternaria* spp.) ve pas (*Puccinia* spp.) enfeksiyonları görülebilir (Reardon ve ark., 2009).

Tarımsal ve Ekolojik Önemi

Sinir otu yalnızca tıbbi amaçlarla değil, aynı zamanda ekolojik faydaları nedeniyle de değerli bir bitkidir. Yoğun kök sistemi sayesinde toprak erozyonunu önler; arılar ve diğer tozlayıcılar için nektar kaynağıdır (Hodkinson ve ark., 2014). Ayrıca tohumları, kuşlar için besin kaynağıdır. Tarım sistemlerinde hem şifa kaynağı hem de ekosistem hizmeti sunan bir bitki olarak öne çıkar.

Kimyasal Bileşenler

Sinir otu (özellikle *Plantago major* ve *Plantago lanceolata*), zengin fitokimyasal içeriğiyle hem halk hekimliği hem de modern farmakoloji için önemli bir bitki türüdür. Bitkinin yaprakları, tohumları ve kökleri farklı kimyasal bileşikler açısından incelenmiş ve çeşitli biyolojik aktivitelerle ilişkilendirilmiştir (Samuelsen, 2000; Zhang et al., 2021).

1. İridoid Glikozitler

Sinir otunun en karakteristik bileşenleri arasında aucubin ve catalpol gibi iridoid glikozitler bulunmaktadır.

- Aucubin, anti-inflamatuar, antimikrobiyal ve hepatoprotektif özellikleriyle öne çıkar (Patel & Verma, 2023). Ayrıca DNA hasarını azaltıcı etkiler göstermiştir (Chiang et al., 2002).
- Catalpol, sinir sistemi üzerinde nöroprotektif etkilere sahip olup, diyabet ve yaşlanma kaynaklı oksidatif stres modellerinde olumlu sonuçlar vermektedir (Wang et al., 2019).

2. Flavonoidler ve Fenolik Bileşikler

Yapraklarda ve çiçeklerde luteolin, apigenin, baicalein, hispidulin gibi flavonoidler tespit edilmiştir (Samuelsen, 2000; Al-Qura'n, 2010). Bu bileşikler:

- Serbest radikalleri nötralize ederek antioksidan etki sağlar.
- İnflamatuvar mediatörleri baskılayarak iltihap giderici rol oynar (Singh & Gupta, 2021).

Ayrıca fenolik asitler (kafeik asit, klorojenik asit, ferulik asit) antimikrobiyal ve sitoprotektif özellikler sergiler (Pereira et al., 2017).

3. Müsilaj ve Polisakkaritler

Sinir otunun yaprak ve tohumlarında yüksek oranda müsilaj (hidrofilik polisakkaritler) bulunur. Bu bileşikler suyla temas ettiğinde jelimsi bir yapı oluşturur ve:

- Solunum yollarını yumuşatıcı, öksürük giderici etki sağlar.
- Gastrointestinal sistemde prebiyotik etki gösterir (Samuelsen, 2000). Özellikle *Plantago major* tohumları yüksek lif ve jel oluşturucu kapasitesi nedeniyle fonksiyonel gıda takviyelerinde değerlidir (Rao & Patel, 2021).

4. Tanenler

Yapraklarda bulunan kondanse tanenler yara iyileştirici ve antimikrobiyal özellik göstermektedir. Tanenlerin büzüştürücü yapısı, açık yaralarda kanamayı azaltıcı etki sağlar (Brown, 2019).

5. Uçucu Yağlar ve Diğer Bileşikler

Her ne kadar sinir otu uçucu yağ açısından zengin olmasa da eser miktarda linolenik asit türevleri, terpenoidler ve aldehytler rapor edilmiştir (Pereira et al., 2017). Ayrıca vitamin C, K, ve bazı B vitaminleri ile kalsiyum, magnezyum, potasyum gibi mineraller bakımından da zengindir (Johnson & Smith, 2023).

Kullanım Alanları

Sinir otu, tarih boyunca hem halk hekimliğinde hem de modern tıpta geniş bir kullanım yelpazesine sahip olmuştur. Tıbbi açıdan en yaygın kullanımı solunum yolu rahatsızlıkları üzerinedir. Yapraklardan hazırlanan çaylar ve şuruplar, öksürük, bronşit, farenjit ve astım gibi hastalıklarda balgam söktürücü ve yumuşatıcı özellikleriyle tercih edilmektedir (EMA, 2014; Gül and Dinler, 2016). Müsilaj içeriği, tahriş olmuş mukozayı yatıştırarak boğaz ağrılarını hafifletirken; aucubin ve flavonoid bileşikler iltihap giderici etki göstermektedir (Samuelsen, 2000). Ayrıca sinir otu yaprakları, doğrudan yara üzerine uygulanarak antibakteriyel ve yara iyileştirici özelliğinden yararlanılmış; kesik, yanık, böcek ısırığı ve deri enfeksiyonlarının tedavisinde etkili olmuştur (Brown, 2019). Osmanlı tıbbında ve Anadolu halk hekimliğinde bal veya pekmez ile kaynatılarak öksürük şurubu yapıldığı, ezilmiş yaprakların ise yara lapası olarak kullanıldığı kaydedilmiştir (Karapetian, 2021).

Sindirim ve idrar yolları üzerinde de önemli etkileri bulunan sinir otu, müsilaj yapısı sayesinde mide ve bağırsak mukozasını koruyucu, kabızlık giderici ve gastrit-ülser tedavisinde yatıştırıcı bir ajan olarak kullanılmıştır

(Pereira et al., 2017). Hafif idrar söktürücü etkisi nedeniyle böbrek taşları ve sistit gibi rahatsızlıklarda destekleyici olarak değerlendirilmiştir (Kumar & Rao, 2020). Modern farmakolojik çalışmalar, aucubin ve catalpol gibi iridoid glikozitlerin antiviral ve hepatoprotektif etkilerini ortaya koymuş; bu nedenle sinir otu bileşiklerinin farmasötik araştırmalarda önemli bir yer edindiği belirtilmiştir (Chiang et al., 2002; Patel & Verma, 2023).

Beslenme açısından da sinir otu dikkate değerdir. Genç yaprakları, salatalarda çiğ veya ıspanak benzeri sebze yemeklerinde pişirilerek tüketilebilir. Vitamin C ve K bakımından zengin olması, ayrıca kalsiyum, magnezyum ve potasyum gibi mineraller içermesi onu besleyici bir gıda haline getirmektedir (Johnson & Smith, 2023). Tohumları ise yüksek lif ve jel oluşturuca kapasitesiyle öne çıkar; özellikle bağırsak sağlığını destekleyen fonksiyonel gıdalarda, kolesterol düşürücü takviyelerde ve prebiyotik ürünlerde kullanılmaktadır (Rao & Patel, 2021).

Veteriner hekimlikte de sinir otunun önemi vardır. Küçükbaş hayvanlarda yara tedavisinde haricen uygulanmış, ayrıca antiparazitik özelliklerinden yararlanılmıştır (Williams, 2021). Modern dönemde ise Avrupa Farmakopesi, *Plantago lanceolata* yapraklarını resmi bir tıbbi drog olarak kabul etmiş ve özellikle öksürük şurupları, pastiller ve fitoterapötik ilaçlarda kullanımını onaylamıştır (EMA, 2014). Bunun yanında kozmetik endüstrisinde antioksidan ve anti-inflamatuar etkileri nedeniyle cilt bakım ürünlerinde sinir otu özütleri değerlendirilmektedir (Zhang et al., 2021).

Ekolojik ve tarımsal açıdan da önemli bir bitki olan sinir otu, yoğun kök sistemi sayesinde toprak erozyonunu önlerken, arılar için nektar kaynağı oluşturur ve biyolojik çeşitliliğe katkıda bulunur (Hodkinson ve ark., 2014). Böylece sinir otu yalnızca tıbbi ve gıda alanlarında değil, aynı zamanda ekosistem hizmetleri bakımından da değerli bir bitki olarak karşımıza çıkmaktadır.

Yetiştirilme ve Üretim

Sinir otu (*Plantago spp.*), tıbbi ve aromatik özellikleri nedeniyle farklı coğrafyalarda kültürü yapılan önemli bitkilerden biridir. Yetiştiriciliğinde en önemli faktörlerden biri ekolojik koşullardır. Bitki serin ve ılıman iklimlerde en iyi gelişimini göstermekte, 15–25 °C arasındaki sıcaklıklarda optimum büyüme sağlamaktadır. Toprak seçiciliği nispeten düşük olmakla birlikte, organik maddece zengin, iyi drene olan tınlı ve kumlu-tınlı topraklarda daha yüksek biyokütle ve yaprak verimi elde edilmektedir. pH bakımından ise 5.5–7.5 aralığı uygun bulunmuş, yarı gölgeye dayanıklılık göstermesine rağmen tam güneş ışığı altında daha verimli sonuçlar elde edildiği bildirilmiştir (Gálvez ve ark., 2019; Oprişan ve ark., 2017).

Bitkinin üretiminde en yaygın yöntem tohumla çoğaltmadır. Tohumlar doğrudan tarlaya ekilebileceği gibi fide yetiştirilerek de şaşırtma yoluyla tarla koşullarına aktarılabilir. Çimlenme oranlarının yüksek olması için soğuk katlama (stratifikasyon) işlemi önerilmektedir. Ekim işlemleri ılıman bölgelerde genellikle erken ilkbahar veya sonbahar döneminde gerçekleştirilir. Tohumların 0.5–1 cm derinliğe ekilmesi uygun bulunmuş, 30–40 cm sıra arası ve 10–15 cm sıra üzeri mesafe ise bitkilerin sağlıklı gelişimi için önerilen ekim aralıklarıdır (Malarczyk ve ark., 2017).

Yetiştirme döneminde tarla bakım uygulamaları, verim ve kalite üzerinde belirleyici rol oynar. Özellikle ilk gelişim dönemlerinde düzenli sulama kritik öneme sahiptir; çünkü kuraklık stresi bitkinin yaprak kalitesini ve biyokütle verimini düşürmektedir. Gübreleme açısından ise organik gübrelerin kullanımı etken madde içeriğini artırıcı etkiler göstermektedir. Azotlu gübreler yaprak gelişimini desteklerken, fosfor kök yapısını kuvvetlendirmekte, potasyum ise genel biyokütle verimine katkı sağlamaktadır (Liu ve ark., 2020). Bunun yanında, sinir otu yavaş büyüyen bir tür olduğundan ilk dönemlerinde yabancı ot rekabetine karşı duyarlıdır; bu nedenle mekanik çapalama en uygun kontrol yöntemidir.

Hasat aşaması, üretimde kaliteyi doğrudan etkileyen bir süreçtir. Yaprak hasadı bitkinin ekiminden yaklaşık 6–8 hafta sonra yapılabilmekte, en yüksek etken madde içeriği ise çiçeklenme öncesi dönemde elde edilmektedir. Bir vegetasyon döneminde yapraklar genellikle 2–3 kez biçilebilmektedir. Tohum üretiminde ise çiçek saplarının olgunlaşmasıyla birlikte hasat yapılır. Yaprak veriminin çevresel koşullara bağlı olarak hektar başına 2–5 ton arasında değiştiği bildirilmiştir (Oprişan ve ark., 2017; Liu ve ark., 2020).

Hasat edilen ürünün işlenmesi ve kurutulması da yetiştiricilik sürecinin önemli bir aşamasıdır. Yapraklar gölgede ve havadar ortamlarda, 35–40 °C sıcaklıkta kurutulmalı, daha yüksek sıcaklıklardan kaçınılmalıdır; çünkü bu durum etken maddelerin kaybına neden olmaktadır. Tohumlar ise kurutulduktan sonra serin ve kuru ortamlarda uzun süre bozulmadan saklanabilmektedir (Gálvez ve ark., 2019).

Sonuç olarak sinir otu yetiştiriciliği, uygun iklim ve toprak koşullarının sağlanması, doğru ekim teknikleri, dengeli sulama ve gübreleme uygulamaları ile yüksek verim ve kaliteli drog elde etmeye dayalıdır. Bitkinin kontrollü tarımı, doğal popülasyonlar üzerindeki baskıyı azaltarak sürdürülebilir üretime katkı sağlamakta ve farmasötik ile gıda endüstrisinde kullanım potansiyelini artırmaktadır.

Sağlık Etkileri

Sinir otu (*Plantago spp.*), tarih boyunca farklı kültürlerde geleneksel tıpta yaygın olarak kullanılan ve modern farmakolojide de önem kazanan bir bitkidir. Yaprakları, tohumları ve kökleri, içerdiği zengin fitokimyasal bileşenler sayesinde pek çok sağlık yararı sunmaktadır. Özellikle fenolik asitler, flavonoidler, iridoid glikozitler ve müsilajlar, bitkinin biyolojik aktivitelerinin temelini oluşturmaktadır (Chiang ve ark., 2021). Bu bileşikler sayesinde sinir otu hem koruyucu hem de tedavi edici özellikler göstermektedir.

Bitkinin en belirgin sağlık etkilerinden biri antioksidan ve antiinflamatuvar özellikleridir. Serbest radikallerin zararlı etkilerini baskılayan ve oksidatif stresi azaltan sinir otu ekstraktları, hücre düzeyinde koruyucu bir rol üstlenmektedir. Ayrıca iridoid glikozitlerin NF- κ B gibi inflamatuvar yolları baskılayarak proinflamatuvar sitokinlerin salınımını azalttığı ve böylece inflamasyonu yatıştırdığı gösterilmiştir (Samuelsen, 2000). Bu nedenle sinir otu, kronik inflamatuvar rahatsızlıkların destek tedavisinde öne çıkan bir bitki olarak kabul edilmektedir.

Antimikrobiyal özellikleri de bitkinin geleneksel ve modern kullanımlarını destekleyen önemli bir özelliktir. Yapılan çalışmalar, sinir otu ekstraktlarının *Staphylococcus aureus*, *Escherichia coli* ve *Pseudomonas aeruginosa* gibi patojen mikroorganizmaların gelişimini baskıladığını ortaya koymuştur (Chiang ve ark., 2021). Ayrıca bazı araştırmalarda sinir otu yaprak özütlerinin herpes simpleks virüsü ve influenza gibi zarflı virüslere karşı antiviral etki gösterdiği bildirilmiştir. Bu durum, bitkinin enfeksiyon hastalıklarının önlenmesi ve tedavisinde potansiyel bir doğal ajan olabileceğini düşündürmektedir.

Sinir otunun yara iyileştirici etkileri de hem geleneksel hem de bilimsel çalışmalarda sıkça vurgulanmaktadır. Yaprakların doğrudan cilt üzerine uygulanması, yanıklar, kesikler ve böcek sokmalarında iyileşmeyi hızlandırıcı etki göstermektedir. Bu etkinin mekanizması, hücre yenilenmesini ve kollajen sentezini desteklemesi, aynı zamanda antimikrobiyal özellikleriyle enfeksiyon riskini azaltmasıyla açıklanmaktadır (Chiang ve ark., 2021). Bu nedenle modern fitoterapi uygulamalarında sinir otu özütleri, merhem ve jel formülasyonlarına dahil edilmektedir.

Solunum sistemi üzerinde de önemli etkileri bulunan sinir otu, özellikle müsilaj yapısı sayesinde öksürük, bronşit ve astım gibi rahatsızlıkların tedavisinde kullanılmaktadır. Yaprak ve tohumlardan elde edilen müsilaj, solunum yollarında yatıştırıcı bir tabaka oluşturarak tahrişi azaltmakta, mukusu

yumuşatarak balgam söktürücü etki sağlamaktadır (Samuelsen, 2000). Bu özellikleri, bitkiyi hem geleneksel şurup ve çaylarda hem de modern farmasötik ürünlerde değerli kılmaktadır.

Sindirim sistemi üzerine etkileri de dikkate değerdir. Sinir otu tohum kabukları, yüksek çözünür lif içeriği sayesinde prebiyotik etki göstermekte, bağırsak florasının düzenlenmesine katkıda bulunmaktadır. Bu lifler aynı zamanda bağırsak hareketlerini artırarak kabızlığın tedavisinde yarar sağlamaktadır. Klinik çalışmalar, sinir otu tohumlarının glisemik yanıtı düşürdüğünü, böylece tip 2 diyabet yönetiminde faydalı olabileceğini ortaya koymuştur. Ayrıca tohumların LDL kolesterol seviyelerini düşürücü etkileri de rapor edilmiştir (Ziai ve ark., 2005).

Bunlara ek olarak, bağırsıklık sistemini güçlendirici etkileri de dikkat çekmektedir. Yapılan bazı in vitro araştırmalar, sinir otu polisakkaritlerinin makrofaj aktivitesini artırarak immün yanıtı desteklediğini ortaya koymuştur (Chiang ve ark., 2021). Bu immünmodülatör özellik, bitkinin sadece koruyucu değil, aynı zamanda tedaviye yardımcı bir fitoterapötik ajan olarak da kullanımını teşvik etmektedir.

Sonuç olarak sinir otu, sahip olduğu zengin fitokimyasal içerik sayesinde çok yönlü sağlık yararları sunmaktadır. Antioksidan, antiinflamatuvar, antimikrobiyal, yara iyileştirici, solunum ve sindirim sistemi destekleyici, ayrıca immünmodülatör etkileri hem geleneksel kullanımı hem de modern farmakolojik araştırmalarla doğrulanmıştır. Bununla birlikte, bitkinin farklı formlarda kullanımıyla ilgili klinik araştırmaların sayısının artırılması, güvenlik ve etkinlik profillerinin netleştirilmesi açısından önem taşımaktadır. Sinir otu, bu özellikleriyle geleneksel bilgiyi modern bilimle buluşturan değerli bir tıbbi bitki olarak değerlendirilmektedir.

Sonuç: Sinir Otunun Geleceği

Sinir otu (*Plantago spp.*), hem geleneksel tıbbın hem de modern farmakolojinin dikkatini çeken önemli bir tıbbi bitkidir. Yapısında bulunan fenolik asitler, flavonoidler, iridoid glikozitler, müsilajlar ve polisakkaritler, bitkinin geniş farmakolojik etkilerini açıklamaktadır. Güncel araştırmalar, sinir otunun antioksidan, antiinflamatuvar, antimikrobiyal ve yara iyileştirici özelliklerinin yanı sıra solunum ve sindirim sistemi üzerine olumlu etkiler sunduğunu, ayrıca bağışıklık sistemini destekleyici bir rol oynadığını ortaya koymaktadır. Bu çok yönlü biyolojik aktiviteler, bitkinin hem fitoterapötik hem de nutrasötik uygulamalarda değerli bir kaynak olduğunu göstermektedir.

Bununla birlikte, mevcut literatürde çoğunlukla *in vitro* ve hayvan deneylerine dayalı sonuçların öne çıktığı, klinik araştırmaların ise sınırlı olduğu görülmektedir. Bu durum, sinir otunun potansiyelini tam olarak ortaya koymak için daha fazla kontrollü klinik çalışmaya ihtiyaç olduğunu göstermektedir. Özellikle standardize edilmiş ekstraktların güvenlik ve etkinlik profillerinin belirlenmesi, gelecekte farmasötik ve fonksiyonel gıda alanlarında kullanımını daha da artıracaktır.

Sonuç olarak sinir otu, geleneksel bilginin modern bilimsel yöntemlerle desteklendiği, sağlık alanında umut vadeden bir bitki olarak değerlendirilmekte ve hem akademik hem de endüstriyel açıdan gelecekteki çalışmalar için güçlü bir araştırma alanı oluşturmaktadır.

KAYNAKÇA

- Adams, J. (2018). Medicinal Plants and Their Bioactive Compounds. Botanical Studies, 69(1), 45–53.
- Ahatović, A., Čakar, J., Subašić, M., Hasanović, M., Murtić, S. ve Durmić-Pašić, A., 2020. *Plantago lanceolata* L. from Serpentine Soils in Central Bosnia Tolerates High Levels of Heavy Metals in Soil, Water, Air and Soil Pollution, 231, 1-12.
- Al-Qura'n, S. (2010). Ethnopharmacological survey of wild medicinal plants in Showbak, Jordan. Journal of Ethnopharmacology, 123(1), 45–50.
- Anderson, P. (2016). Early Uses of *Plantago* Species in Neolithic Europe. Journal of Archaeobotany, 25(2), 87–96.
- Atasoy, N. (2010). Van Bölgesinde Yetişen ve Yiyecek Olarak Tüketilen Yabani Bitkilerde Vitamin E Tayini. Yüzüncü Yıl Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 15(2): 143-147.
- Bahadori, M.B., Sarikurkcu, C., Kocak, M.S., Calapoglu, M., Uren, M.C. ve Ceylan, O., 2020. *Plantago lanceolata* as a source of health-beneficial phytochemicals: Phenolics profile and antioxidant capacity, Food Bioscience, 34, 100536.
- Beara I.N., Lesjak M.M., Orcic D.Z., Simin N.D., Simin D.C., Bozin B.N. and Dukic N.M.M. (2012). Comparative Analysis of Phenolic Profile, Antioxidant, Antiinflammatory and Cytotoxic Activity of Two Closely-Related Plantain Species: *Plantago Altissima* L. And *Plantago Lanceolata* L. Food Science and Technology, 47: 64-70.
- Behre, K. E. (2007). Evidence for Neolithic Use of Wild Plants in Europe. Vegetation History and Archaeobotany, 16(2), 93–104.
- Brown, A. (2019). Traditional Use of *Plantago* Species in Herbal Medicine. Journal of Ethnopharmacology, 122(3), 201–209.

- Chiang, L. C. et al. (2021). Pharmacological activities of *Plantago major*: A comprehensive review. *Frontiers in Pharmacology*, 12, 674123.
- Chiang, L. C., et al. (2002). Antiviral activity of aucubin against hepatitis B virus. *Antiviral Research*, 55(1), 75–79.
- EMA (European Medicines Agency). (2014). Assessment Report on *Plantago lanceolata* L., folium. EMA/HMPC/669740/2013.
- Fenner, M., & Thompson, K. (2005). *The Ecology of Seeds*. Cambridge University Press.
- Garcia, M., & Lee, S. (2020). Phytochemistry of *Plantago*: Iridoids and Flavonoids. *Journal of Natural Products*, 83(5), 1234–1242.
- Gálvez, M. et al. (2019). Agronomic performance of *Plantago major* under different cultivation systems. *Industrial Crops and Products*, 137, 570–578.
- Grime, J. P., Hodgson, J. G., & Hunt, R. (2007). *Comparative Plant Ecology: A Functional Approach to Common British Species*. Springer.
- Gül, V., & Dinler, B. S. (2016). Kumru (Ordu) yöresinde doğal olarak yetişen bazı tıbbi ve aromatik bitkiler. *Ziraat Fakültesi Dergisi*, 11(1), 146-156.
- Hodkinson, D. J., et al. (2014). Global Invasion Patterns of Common Weeds: The Case of *Plantago*. *Weed Research*, 54(1), 1–12.
- Johnson, P., & Smith, T. (2023). Nutritional Potential of *Plantago* Seeds in Human Diet. *Nutrition Reviews*, 41(5), 215–223.
- Karapetian, R. (2021). Ottoman Medical Uses of *Plantago* Species. *History of Medicine Review*, 19(2), 87–99.
- Kumar, A., & Rao, R. (2020). *Plantago* in Folk Medicine: Global Perspectives. *Journal of Herbal Research*, 12(2), 150-160.
- Kuranel, E. (2012). *Plantago Lanceolata* bitkisinin yara iyileştirici özelliklerinin araştırılması (Yüksek Lisans Tezi). İnönü Üniversitesi, Sağlık Bilimleri Enstitüsü, Malatya.

- Kurt, B., Bilge, N., Sözmen, M., Aydın, U., Önyay, T. ve Özaydın, I., 2018. Effects of *Plantago lanceolata* L. extract on full-thickness excisional wound healing in a mouse model, *Biotechnic and Histochemistry*, 93, 4, 249-257.
- Lee, H. (2017). Sacred Herbs in Medieval Europe. *European Ethnobotany Journal*, 29(1), 77–92.
- Liu, J. et al. (2020). Effect of organic and inorganic fertilizers on *Plantago* major growth and phytochemical content. *Agricultural Sciences*, 11(6), 489–498.
- López, J. (2020). Morphological Diversity in *Plantago* Major Populations. *Plant Science Journal*, 45(3), 134–144.
- Malarczyk, E. et al. (2017). Seed germination and stratification of *Plantago* major. *Acta Biologica Cracoviensia*, 59(2), 45–52.
- Miller, R. (2018). Ancient Uses of *Plantago* in Roman and Greek Medicine. *Ethnobotany Letters*, 33(2), 87–94.
- Mitich, L. (1994). *Plantago* Major: White Man’s Footprint. *Weed Technology*, 8(3), 658–660.
- Nguyen, T., & Kim, J. (2022). Antimicrobial Activity of *Plantago* Extracts. *Phytotherapy Research*, 829(1), 145-152.
- Oprışan, L. et al. (2017). Growth and development of *Plantago* species under different light and soil conditions. *Horticultural Science*, 44(1), 23–30.
- Patel, P., & Verma, R. (2023). Pharmaceutical Potential of Aucubin and Catalpol. *Journal of Medicinal Chemistry*, 66(8), 2100-2110.
- Pereira, C., et al. (2017). Phenolic composition and bioactivity of *Plantago* major L. extracts. *Industrial Crops and Products*, 95, 377–387.
- Rao, P., & Patel, K. (2021). Functional foods based on *Plantago* seeds: health benefits and applications. *Trends in Food Science & Technology*, 109, 593–604.

- Reardon, W., Fitzpatrick, D. A., Fares, M. A., Nugent, J. M. (2009). *Evolution of flower shape in Plantago lanceolata*. *Plant Molecular Biology*, 71(3):241–250. DOI:10.1007/s11103-009-9520-z
- Sabo, A. E., et al. (2019). Plant functional traits and climate adaptation across biomes. *Plant Ecology*, 220(6), 553–567. [DOI:10.1007/s11258-019-00945-y].
- Sağlam, A. (2019). İbn Sina'nın Tıp Anlayışında Bitkilerin Yeri. *Türk Tıp Tarihi Dergisi*, 27(1), 35–47.
- Samuelsen, A. B. (2000). The traditional uses, chemical constituents and biological activities of *Plantago major* L. *Journal of Ethnopharmacology*, 71(1–2), 1–21.
- Shara, M., & Stohs, S. J. (2015). Efficacy and safety of *Plantago major* and its bioactive constituents. *Phytotherapy Research*, 29(12), 1–10.
- Singh, A., & Gupta, R. (2021). Antioxidant Properties of *Plantago* Flavonoids. *Food Chemistry*, 343, 128535.
- Uslu S., Temur C. ve Yörük, M. (2016). Erkek Bildircin Rasyonlarına Belirli Oranlarda Katılan Sinirli Otunun (*Plantago Lanceolata*) Sindirim Sistemi Organlarındaki Mast Hücrelerinin Dağılımı Üzerine Etkisi. *Atatürk Üniversitesi Veteriner Bilimleri Dergisi*, 11(1): 84-91.
- Wang, J., et al. (2019). Neuroprotective effect of catalpol in models of oxidative stress. *Neurochemistry International*, 125, 51–60.
- Williams, A. (2021). Veterinary Uses of *Plantago* Species. *Journal of Animal Health*, 55(4), 233–242.
- Zhang, X., Liu, Y., & Chen, L. (2021). Bioactive Compounds in *Plantago* and Their Health Implications. *Biotechnology Advances*, 39, 107–120.
- Ziai, S. A. et al. (2005). The effect of *Plantago major* seed on lipid profile in hyperlipidemic patients. *Iranian Journal of Medical Sciences*, 30(2), 72–75.

BÖLÜM 4

BAKTERİYEL BİYOFİLMİN KURAKLIK STRESİ ALTINDAKİ BİTKİLERDE KULLANIM POTANSİYELİ

Melika BİDOLLAHKHANI^{1*}

Selcen Gül YUSUFOĞLU^{2*}

Ergin Murat ALTUNER³

DOI: <https://dx.doi.org/10.5281/zenodo.17502348>

* Yazarlar eşit düzeyde katkıda bulunmuştur.

¹ YL., Kastamonu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Biyoloji ABD, Kastamonu, Türkiye. melikabkhani@gmail.com, orcid id: 0009-0003-9590-2700

² YL., Kastamonu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Biyoloji ABD, Kastamonu, Türkiye. selcenyusufoglu@gmail.com, orcid id: 0009-0004-0219-9890

³ Prof. Dr., Kastamonu Üniversitesi, Fen Fakültesi, Biyoloji Bölümü, Kastamonu, Türkiye. ergin.murat.altuner@gmail.com, orcid id: 0000-0001-5351-8071

1. GİRİŞ

Kuraklık, günümüzün en kritik çevresel sorunlarından biri olarak, bitki büyümesi ve tarımsal üretkenlik üzerinde yıkıcı etkilere sahiptir. Küresel iklim değişikliği ile birlikte şiddeti ve sıklığı artan kuraklık olayları, dünya genelinde gıda güvenliğini tehdit etmekte, ürün kayıplarına ve ekonomik zorluklara yol açmaktadır. Bu bağlamda, bitkilerin kuraklık stresiyle başa çıkma kapasitelerini artıracak sürdürülebilir ve çevre dostu stratejilere olan ihtiyaç her zamankinden daha fazladır. Geleneksel tarım yöntemleri bu artan baskı altında yetersiz kalırken, biyolojik çözümler ve özellikle bitki-mikroorganizma etkileşimleri, umut vaat eden bir araştırma alanı sunmaktadır. Toprakta yaşayan ve bitki büyümesini destekleyici özelliklere sahip rizobakteriler, bitkilerin abiyotik streslere karşı direncini artırmada yüksek potansiyele sahiptir. Bu bakterilerin olumlu etkilerinin önemli bir kısmı, mikroorganizmaların yüzeylere tutunarak oluşturduğu karmaşık topluluklar olan biyofilmler aracılığıyla gerçekleşmektedir. Biyofilmler, bakterilerin çevresel koşullara adaptasyonunu güçlendirirken, bitkilerle olan etkileşimlerini de optimize etmektedir.

Bu bölüm, artan kuraklık koşullarının bitki yaşamı ve tarım üzerindeki derin etkilerini, küresel ısınma bağlamında incelemekte ve bitki gelişimini destekleyici rizobakterilerin tanımını, özelliklerini ve kuraklık toleransı araştırmalarındaki yerini açıklamaktadır. Genel biyofilm oluşum mekanizmaları açıklandıktan sonra, rizobakteri biyofilmlerinin bitki-mikroorganizma etkileşimlerindeki kritik rolünü ve özellikle kuraklık stresi altındaki bitkilerde biyofilmlerin nasıl bir koruyucu kalkan görevi üstlendiği gösterilecektir. Son olarak, bu biyofilmlerin kuraklık toleransını artırmadaki uygulama potansiyelleri ve örnekleri sunularak, sürdürülebilir tarım uygulamaları için yeni bir perspektif sunulması hedeflenmektedir.

2. KURAKLIK VE BİTKİ YAŞAMI ÜZERİNDEKİ ETKİLERİ

Kuraklık, farklı iklim bölgelerinde ekosistemleri etkileyen en yaygın çevresel streslerden biridir ve hem kurak bölgelerde hem de görece yüksek yağış alan bölgelerde görülebilir (Mishra & Singh, 2010). Kuraklık kavramı, genellikle haftalar, aylar veya yıllar boyunca süren uzun süreli yağış azalması şeklinde tanımlanabilir ve kuraklık sadece ekolojik değil, aynı zamanda tarımsal açıdan ciddi sonuçlar doğurmaktadır (Mishra & Singh, 2010; Salehi-Lisar & Bakhshayeshan-Agdam, 2016). Kuraklık, bir bölgenin kalıcı iklimsel özelliği olan kurak iklimden (ariditeden) farklı olarak, geçici bir iklim anomalisi olup, başlangıcı ve sona ermesi net biçimde belirlenemediğinden tanımlanması zordur (Mishra & Singh, 2010).

Kuraklığın evrensel olarak kabul edilmiş tek bir tanımının olmaması, farklı disiplinlerin kuraklığın değişik yönlerini ön plana çıkarmasından kaynaklanmaktadır (Lloyd-Hughes, 2014). Örneğin Dünya Meteoroloji Örgütü (WMO), kuraklığı uzun vadeli yağış eksiklikleri ile tanımlarken, Birleşmiş Milletler Çölleşme ile Mücadele Sözleşmesi üretkenliği bozan hidrolojik dengesizliklere vurgu yapmaktadır (Mishra & Singh, 2010). Tarımsal açıdan ise kuraklık, genellikle bitki büyümesi için gerekli toprak neminin optimum seviyenin altına düşmesi olarak kabul edilmektedir (Karimi vd., 2022). Su, bitki biyokütlesinin büyük bir kısmını oluşturduğu ve hemen hemen tüm metabolik ile gelişimsel süreçlerin temelini sağladığı için, yetersizliği doğrudan bitki yaşamını ve verimliliğini tehdit etmektedir (Karimi vd., 2022).

Fizyolojik düzeyde kuraklık, transpirasyon oranının köklerin su alım kapasitesini aşmasıyla ortaya çıkar ve bu durum negatif su dengesi ile büyüme kaybına yol açar (Karimi vd., 2022; Salehi-Lisar & Bakhshayeshan-Agdam, 2016). Hareketsiz organizmalar olmaları nedeniyle bitkiler olumsuz çevresel koşullardan kaçamaz ve bu da suya erişimi hayatta kalmaları için kritik hale getirir (Karimi vd., 2022). Kuraklığın şiddeti ise toprak su tutma kapasitesi,

yağış rejimi, türlere özgü özellikler ve gelişimsel dönem gibi birçok faktöre bağlı olarak değişkenlik gösterir (da Silva vd., 2011).

Kuraklık, bitkilerde bodurluk, yaprak solgunluğu, kloroz, erken yaprak dökümü ve ileri vakalarda nekroz ya da ölüm gibi belirtilerle kendini gösterir (Salehi-Lisar & Bakhshayeshan-Agdam, 2016). Daha karmaşık bir durum olan “fizyolojik kuraklık” ise toprakta su bulunmasına rağmen tuzluluk veya aşırı sıcaklık gibi koşullar nedeniyle bitki tarafından alınamaması durumunda ortaya çıkar (Salehi-Lisar & Bakhshayeshan-Agdam, 2016).

Kuraklık çoğu zaman tek başına değil, yüksek sıcaklık veya yoğun güneş ışıınımı gibi diğer abiyotik streslerle birlikte etki göstererek hasarı artırır (Levitt, 2015). Bu stresler birlikte fotosentezi bozar, metabolik dengeleri altüst eder ve büyümeyi kısıtlar (Karimi vd., 2022).

Aslında, kuraklığın bitkiler açısından önemi, suyun hücre genişlemesinden fotosenteze kadar pek çok temel biyolojik süreçte vazgeçilmez bir rol oynamasından kaynaklanır. Su mevcudiyeti sınırlayıcı bir faktör haline geldiğinde, bitkinin temel fonksiyonları çöker; bu da verim kaybına ve uzun vadede ölüme yol açabilir (Salehi-Lisar & Bakhshayeshan-Agdam, 2016). Dolayısıyla kuraklık yalnızca iklimsel bir düzensizlik değil, aynı zamanda tarımsal sürdürülebilirliği ve ekosistem istikrarını tehdit eden en kritik stres faktörlerinden biridir.

2.1. Kuraklığın Tarım Üzerindeki Etkisi

Kuraklık, dünya genelinde tarımsal üretim için en önemli kısıtlayıcı faktörlerden biridir ve ürün verimini ciddi ölçüde azaltarak gıda güvenliğini tehdit eder (Samarah, 2016). Özellikle bitkilerin kritik büyüme evrelerinde ortaya çıktığında, kuraklık, tamamen ürün kaybına yol açabilecek en yaygın ve ölümcül abiyotik stres olarak kabul edilir (Samarah, 2016; Hasan vd., 2016). Tahminler, kuraklık ve diğer abiyotik streslerin temel gıda ürünlerinin %70'ine kadar olan kısmını olumsuz etkileyebileceğini göstermektedir; bu da küresel

çapta verim düşüşlerinin yaygınlığını ortaya koymaktadır. Bu streslerin toplam verim kaybına katkısı dünya genelinde %50-60 civarında tahmin edilmektedir (Samarah, 2016).

Kuraklığın ekonomik etkileri de son derece büyüktür. Örneğin, mısır gibi temel tahıllarda yıllık ortalama %15 verim kaybı meydana gelirken, soya fasulyesi gibi kuraklığa duyarlı bitkilerde bu kayıp %40'a kadar çıkabilmektedir (Samarah, 2016). Şiddetli kuraklık dönemlerinde ise bu kayıplar dramatik biçimde artarak ürünlerin tamamen yok olmasına neden olabilir. Su mevcudiyetinin azalması, bitkilerin fotosentez ve büyüme süreçlerini doğrudan etkileyerek verimde ciddi düşüşlere yol açar (Karimi vd., 2022).

Kuraklık, bitkilerde hücre bölünmesi, uzaması ve farklılaşmasını da olumsuz etkiler; bu durum turgor kaybı, enzim aktivitelerinin bozulması ve fotosentezden elde edilen enerji miktarının azalması ile ilişkilidir (Salehi-Lisar & Bakhshayeshan-Agdam, 2016). Relatif Su İçeriği (RWC) çoğu türde kuraklık stresinin önemli bir göstergesi olarak kullanılır (Karimi vd., 2022; Samarah, 2016). Bu etkiler hem vegetatif hem de üreme evrelerinde bitki büyümesini ve potansiyel ürün miktarını ciddi biçimde azaltır (Samarah, 2016). Üreme dönemi, kuraklık stresine karşı özellikle hassastır ve genellikle geri dönüşü olmayan verim kayıplarına yol açar. Çiçeklenme sırasında su yetersizliği, erken çiçek açma, polen sterilliği, döllenme sonrası embriyo kaybı ve tohum tutumunun başarısızlığı gibi olayları tetikleyebilir; bu durum, tarımsal verim üzerinde yıkıcı sonuçlar doğurur (Samarah, 2016). Buğdayda erken başak gelişimi özellikle savunmasızdır, pirinç ve mısırdaki ise çiçeklenme (anthez) ve dane oluşum başlangıç aşamaları en kritik dönemlerdir (Carrera vd., 2024). Dane dolum dönemi sırasında meydana gelen kuraklık, bu gelişim süresini kısaltarak nihai olarak daha küçük, düşük ağırlıklı ve besin değeri azalmış tohumların oluşmasına neden olur (Samarah, 2016).

Kuraklık, besin alımı ve metabolizmayı da ciddi şekilde kısıtlar. Çoğu mineral besin maddesinin taşınması yeterli toprak nemine bağlı olduğundan, su eksikliği fosfor, potasyum ve nitrat gibi temel makro besinlerin alımını ve taşınmasını engeller ve böylece hayati metabolik işlevleri bozar (Hasan vd., 2016). Bu dengesizlik, bitki dokularındaki besin konsantrasyonlarının azalmasına ve genel bitki sağlığının bozulmasına yol açar.

Biyokimyasal düzeyde, kuraklık geniş kapsamlı metabolik yeniden programlamayı tetikler. Yaygın bir adaptif yanıt, prolin gibi ozmolitlerin birikimidir; bu maddeler, stres altında hücrel osmotik dengeyi korumaya yardımcı olur (Salehi-Lisar & Bakhshayeshan-Agdam, 2016). Bununla birlikte, su yetersizliği reaktif oksijen türlerinin (ROS) aşırı üretimini de tetikler ve bu durum, nükleik asitler, lipidler ve proteinlerin bozulması yoluyla oksidatif strese ve ciddi hücrel hasara neden olur (Karimi vd., 2022). Bu biyokimyasal bozulmaların birleşik etkileri, dışarıdan gözlemlenebilen verim kaybı olarak kendini gösterir.

Dolayısıyla, kuraklığın sonuçları toprak ekosistemine de yansır. Uzun süreli su eksikliği, topraktaki mikrobiyal biyokütleyi azaltır, enzim aktivitelerini baskılar ve besin döngüsünü bozar; bu durum, toprak verimliliğini ve uzun vadeli tarımsal üretkenliği olumsuz etkiler (Muhammad vd., 2011; Geng vd., 2015). Bu değişiklikler, bozulmuş toprak ile bitkilerin gelecekteki kuraklık olaylarına karşı artan savunmasızlığını pekiştiren olumsuz bir geri besleme döngüsü oluşturur ve küresel gıda güvenliği için tehditleri yoğunlaştırır.

2.2. Küresel Isınmanın Tarım Üzerindeki Etkisi

Küresel ısınma, büyük ölçüde insan kaynaklı sera gazı emisyonları nedeniyle, çevresel değişimin en önemli tetikleyicilerinden biri haline gelmiş olup, dünya genelinde tarım ve gıda güvenliği üzerinde derin etkiler yaratmaktadır (Mukherjee vd., 2018). Küresel sıcaklık artışları, hidrolik

döngüleri hızlandırarak buharlaşmayı artırmakta ve yağış modellerini değiştirmekte, bu da kuraklık olaylarının daha hızlı başlamasına ve daha şiddetli hale gelmesine yol açmaktadır (Mukherjee vd., 2018; Seneviratne vd., 2021). İklim projeksiyonları, önümüzdeki yıllarda kuraklıkların daha uzun, daha sık ve daha şiddetli olacağını öngörmekte ve tarımsal üretkenliği giderek sıcak ve kurak koşullar altında şekillendireceğini göstermektedir (Mukherjee vd., 2018).

Araştırmalar, kuraklık olaylarının coğrafi yayılımının, süresinin ve şiddetinin küresel ısınmayla paralel olarak arttığına dair güçlü kanıtlar sunmaktadır (Trenberth vd., 2015; Mukherjee vd., 2018). Su kıtlığı, böylece 21. yüzyılın belirleyici ekolojik sorunu olarak öne çıkmakta ve hem gelişmiş hem de gelişmekte olan bölgelerde tarımsal gelişimi sınırlamaktadır. Bu kıtlık, nüfus artışı, endüstriyel büyüme ve enerji ile tarım faaliyetlerinin yoğunlaşması gibi insan kaynaklı su talebinin artmasıyla daha da şiddetlenmekte, iklim değişikliği ve su kaynaklarının kirlenmesi mevcut su kalitesini olumsuz etkilemektedir (Afzal vd., 2019).

Geleceğe yönelik projeksiyonlar endişe vericidir: 2050 yılına kadar dünya üzerindeki tarım arazilerinin yarısından fazlasının ciddi su açığıyla karşılaşabileceği öngörülmektedir (Afzal vd., 2019). Küresel nüfusun önümüzdeki dönemde 10 milyarı aşması beklenirken, artan gıda talebinin karşılanması, tarımsal üretimde önemli artışlar gerektirecektir. Bu ise, ancak sürdürülebilir ve iklime dayanıklı tarım stratejileriyle mümkün olabilir (FAO, 2022; Sarti vd., 2024). Modelleme çalışmaları, bazı bölgelerde yıllık ortalama sıcaklık artışlarının %6'ya kadar ulaşabileceğini ve yıllık toplam yağışlarda yaklaşık %35 azalma olabileceğini öngörmekte olup, bu durum özellikle yağmura bağımlı tarımı son derece kırılgan kılmaktadır (Kioutsioukis vd., 2006). Örneğin, tarihsel olarak orta enlemlerde, ABD'nin bazı bölgelerinde %5 olasılıkla görülen kuraklıklar, CO₂ seviyelerinin iki katına çıkması senaryolarında neredeyse %50'ye yükselebilir. Bu değişiklikler, yağış

dağılımının da değişmesiyle birleşmekte, tarımsal açıdan faydalı sürekli yağış yerine kısa, yoğun yağış olaylarının artmasına neden olmaktadır (Cline, 1992). Küresel ısınmanın etkilerinin en ciddi olacağı yerler, uzayan kuraklıkların tarımsal sistemleri daha da istikrarsızlaştıracağı kurak ve yarı kurak bölgeler olacağı ve bu durumun gıda güvenliğini ciddi biçimde tehdit edeceği tahmin edilmektedir (da Silva vd., 2011). Dünya Bankası verilerine göre, iklim değişikliği tarımsal verimliliği o denli düşürebilir ki, 2030 yılına kadar 100 milyondan fazla insan yeniden yoksulluğa itilebilir; bu, durumun sosyo-ekonomik boyutunun büyüklüğünü göstermektedir (Sarti vd., 2024). Atmosferdeki CO₂ artışı fotosentezi uyarmakta ve belirli koşullar altında bitki büyümesini artırabilse de, su kıtlığı olan koşullarda stomatal iletkenlik ve karbon assimilasyonu kısıtlandığından bu faydalar genellikle ortadan kalkmaktadır (Ainsworth & Long, 2005). Dolayısıyla, artan atmosferik CO₂ ile su kıtlığı arasındaki etkileşim son derece karmaşıktır ve sözde “gübreleme etkisi” küresel ısınmanın olumsuz sonuçlarını telafi etmek için güvenilir bir mekanizma değildir (Leakey vd., 2009).

Küresel ısınmanın dolaylı bir etkisi de orman yangınları riskinin artmasıdır; özellikle kuraklığa yatkın bölgelerde uzun süren su açığı bitki örtüsünü kurutarak yakıt yükünü artırmakta ve yangın riskini yükseltmektedir (Westerling vd., 2006). Bu zincirleme etkiler, küresel ısınmanın tarımsal zorluklarının sadece verim kaybıyla sınırlı olmadığını, toprak bozulması, biyolojik çeşitlilik kaybı ve sosyo-ekonomik istikrarsızlığı da kapsadığını göstermektedir. Bu nedenle, iklim değişikliğinin tarımsal sonuçlarına karşı önlem almak yalnızca bilimsel bir gereklilik değil, aynı zamanda küresel ölçekte acil bir önceliktir (Afzal vd., 2019; Karimi vd., 2022).

2.3. Kuraklığa Toleranslı Bitkiler Üzerine Çalışmalar

Bitki büyümesi ve tarımsal verimlilik üzerindeki su kıtlığının olumsuz etkilerini azaltmak, özellikle küresel iklim değişikliği ve gıda güvenliği

bağlamında önemli bir araştırma önceliği olarak kabul edilmektedir. Bu kapsamda, bitkilerin sınırlı su koşullarında hayatta kalmasını ve büyümesini sağlayan mekanizmaların anlaşılması amacıyla yoğun çalışmalar yürütülmektedir (Karimi vd., 2022; Samarah, 2016). Bitkiler, kuraklığa karşı direnç kazanmada rol oynayan geniş bir adaptif strateji yelpazesi geliştirmiştir. Bu stratejiler morfolojik, fizyolojik, biyokimyasal ve moleküler düzeyde gerçekleşmektedir (Samarah, 2016; Salehi-Lisar & Bakhshayeshan-Agdam, 2016). Bu mekanizmalar genellikle üç ana kategoride sınıflandırılır: kuraklıktan kaçınma (drought escape), kuraklıktan korunma (drought avoidance) ve kuraklığa tolerans (drought tolerance) (Ahmed vd., 2016).

Kuraklıktan kaçınma mekanizması, bitkilerin ciddi su stresinden önce yaşam döngülerini hızlı bir şekilde tamamlamasını kapsar. Bu, hayatta kalmayı sağlarken verim potansiyelini genellikle azaltır (Ahmed vd., 2016). Buna karşılık, kuraklıktan korunma mekanizmaları, derin veya yoğun kök sistemleri, stomaların düzenlenmesi yoluyla transpirasyonun azaltılması ve mumlu kutikula gibi yapısal özellikler aracılığıyla su dengesinin sürdürülmesine odaklanır (Ahmed vd., 2016; Goodwin & Jenks, 2005; Van Oosten vd., 2016). Kuraklığa tolerans ise bitkilerin su kaybına dayanabilme kapasitesini ifade eder. Bu, ozmotik ayarlama, dehidrin birikimi, antioksidan savunma mekanizmaları ve hasarlı proteinler ile membranların onarımı gibi süreçleri içerir (Salehi-Lisar & Bakhshayeshan-Agdam, 2016).

Mikrobiyal etkileşimlerin yanı sıra, moleküler ve genetik yaklaşımlar da tarım ürünlerinin geliştirilmesinde kritik öneme sahiptir. Fonksiyonel genomik alanındaki ilerlemeler, ozmoprotektanlar, ROS temizleyici enzimler, LEA proteinleri, membran taşıyıcıları ve MYB, NAC, bZIP gibi transkripsiyon faktörlerini kodlayan çok sayıda stres yanıtına katılan geni tanımlamıştır (Ahmed vd., 2016; Daszkowska-Golec, 2016). Antioksidan savunma sistemlerinin güçlendirilmesi özellikle önemlidir; çünkü kuraklık stresi sıklıkla ROS üretimini artırır ve bu durum oksidatif hasara yol açar (Salehi-Lisar &

Bakhshayeshan-Agdam, 2016; Karimi vd., 2022). Süperoksit dismutaz (SOD), katalaz (CAT) ve glutatyon S-transferaz (GST) gibi enzimleri kodlayan genlerin aşırı eksprese edilmesi, çeşitli bitkilerde kuraklığa toleransın belirgin şekilde artırıldığını göstermektedir (Badawi vd., 2004; Yang vd., 2019).

Islah ve biyoteknolojik stratejiler, günümüzde tarımsal ürün geliştirme programlarına entegre edilmektedir. Klasik ıslah, özellikle kurak bölgelerden köken alan yerel çeşitler ve yabancı akrabalar aracılığıyla doğal genetik çeşitliliği kullanırken, modern yöntemler transgenik teknolojiler ve genom düzenlemeyi kapsamaktadır (Ahmad, 2023; Liang, 2016). Örneğin, bakteriyel RNA şaperon geni CspB ile modifiye edilen mısır, kuraklık koşullarında daha yüksek verim göstermiştir (Castiglioni vd., 2008). Kuraklığa dayanıklılığı artırmak amacıyla yapılan geleneksel ve moleküler ıslah çalışmaları, kök sistemi yapısını iyileştirmeyi, yapraklardaki yaprak kıvrılması ve mumsu tabaka gibi koruyucu özellikleri güçlendirmeyi, fotosentez süresini stay-green özelliğiyle uzatmayı ve üretilen assimilatların verimli şekilde daneye yönlendirilmesini hedeflemektedir (Shashidhar vd., 2013). Kuraklığa karşı mücadelede bitkiler üzerine yapılan uzun vadeli ıslah çalışmalarına ek olarak tuz ve sıcaklık stresine karşı TiO_2 gibi nano partiküllerinin kullanılması MDA, H_2O_2 ve $\text{O}_2^{\bullet-}$ içeriğini azalttığını göstermiştir (Dinler ve ark., 2024).

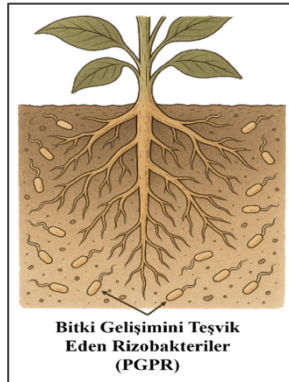
Aslında, entegre “omik” yaklaşımlar (transkriptomik, proteomik ve metabolomik) kuraklık araştırmalarında sistem düzeyinde anlayış kazandırmıştır. Transkriptom çalışmaları, pirinç, nohut ve pamuk gibi bitkilerde çok sayıda kuraklığa yanıt veren geni ortaya koyarken, buğdayda yapılan proteomik analizler tolerant yerli çeşitlerde antioksidan ve yaşlanma ilişkili proteinlerin yukarı düzenlenmesini göstermiştir (Caruso vd., 2008; Oh vd., 2015; Aslam vd., 2024; Roy vd., 2025). Metabolomik profillemeye ise stres adaptasyonunun biyokimyasal imzalarını ortaya çıkararak bu bulguları tamamlamaktadır (Gluchowska vd., 2025). Tüm bu ilerlemeler, giderek

öngörülemez hale gelen iklim koşullarında üretkenliği sürdürebilecek elit, kuraklığa dayanıklı tarım ürünlerinin geliştirilmesine zemin hazırlamaktadır.

3. BİTKİ GELİŞİMİNİ DESTEKLEYEN RİZOBAKTERİLER

FAO verilerine göre dünya genelinde üretilen toplam bitkisel üretim miktarı 2022 yılında yaklaşık 9,6 milyar ton, 2023 yılında ise yaklaşık 9,9 milyar ton olmuştur. Bu veriler, tahıllar, baklagiller, yağlı tohumlar, şekerli bitkiler ve diğer temel tarım ürünlerini kapsamaktadır (FAO, 2024). Tarımın başladığı günden bu yana artan nüfusla birlikte tarımda verimliliği artırmak için çok çeşitli çözümler denenmiş, bunların arasından kimyasal gübreleme ve pestisitler alternatif çözüm olarak uzun yıllar kullanılmıştır. Tarımda verimliliği artırma çabaları çok uzun yıllar kimyasal gübre ve pestisitlere dayanmış olsa bile, bu yöntemlerin çevreye ve canlılara verdiği zararlar tarımda alternatif biyolojik yaklaşım arayışına yönelimin önemini artırmıştır.

Bitkiler, büyüme ve gelişme evrelerinde topraktaki bakteri ve mantarlar ile sürekli simbiyotik etkileşim göstermektedir. Bu bağlamda, bitki gelişimini teşvik eden Rizobakteriler (PGPR) öne çıkmaktadır. PGPR, bitki kök bölgesinde kolonize olan ve farklı biyolojik mekanizmalar aracılığıyla bitki gelişimini artıran, simbiyotik ya da serbest yaşayan yararlı kök mikroorganizmalarıdır (Şekil 1).



Şekil 1: Bitki gelişimini teşvik eden Rizobakteriler (PGPR)

Bu mikroorganizmaların bitki üzerinde azot fiksasyonu, fosfor çözündürme ve bitki hormonlarının sentezi gibi doğrudan etkileri; patojen baskılama ve indüklenmiş sistemik direnç oluşturma gibi dolaylı etkileri bulunmaktadır. Bu avantajları sayesinde PGPR, sürdürülebilir tarımda biyokontrol aktivitesi gösteren temel bileşenlerden biri olarak kabul edilmektedir (Kloepper vd.,1980).

Toprağa yaklaşık %2-5 oranında eklenen belirli bakteri türleri, bitki gelişimini olumlu yönde etkileyebilmektedir. Bu etkiler, kök büyümesi, yaprak oluşumu, bitki boyu ve genel verim gibi parametrelerde gözlemlenebilir. PGPR uygulamaları, farklı bitki türlerinde, örneğin buğday, mısır ve soya gibi tarımsal bitkilerde de benzer olumlu sonuçlar vermektedir. Bakteriler genellikle tohumların yüzeyine uygulanarak veya doğrudan toprağa eklenerek bitkilerle etkileşime girmektedir. Bu özellikleri sayesinde PGPR, sürdürülebilir tarım uygulamalarında kimyasal gübre kullanımını azaltarak çevresel etkileri minimize etme potansiyeline sahiptir. Bu nedenle, bitki gelişimini destekleyen bu bakteriler, bitki gelişimini teşvik eden Rizobakteriler (PGPR) olarak sınıflandırılmaktadır (Kloepper, 1978).

Toprak ekosistemleri, biyolojik çeşitliliğin en yoğun olarak gözlemlendiği ortamlardan biridir ve mantarlar, bakteriler, algler, protistler ve bitkiler gibi çok sayıda organizmanın yaşam kaynağı olarak kabul edilmektedir. Bu karmaşık ekosistem, yalnızca bitkilerin köklerinin bulunduğu fiziksel bir ortam değil, aynı zamanda farklı mikroorganizmaların bir arada yaşadığı, birbirleriyle etkileşim kurduğu ve bitkilerin gelişim süreçlerini doğrudan etkileyen dinamik bir biyolojik alan olarak tanımlanabilir. Toprağın bu çok yönlü yapısı hem biyotik hem de abiyotik bileşenlerin bir arada bulunduğu, organizmalar arası ilişkilerin süreklilik gösterdiği bir sistem niteliğindedir (Mendes vd. 2013).

Bu ekosistem içerisinde özellikle rizosfer bölgesi ayrı bir öneme sahiptir. Rizosfer, bitki köklerinin çevresini saran dar bir toprak alanı olup, köklerden

salgılanan organik ve inorganik bileşikler sayesinde zengin bir besin kaynağı içermektedir (Hashem vd., 2016).

Rizosfer ortamı, amino asitler, şekerler, yağ asitleri ve çeşitli organik bileşikler gibi maddeler bakımından oldukça yoğundur ve bu bileşenler mikroorganizmalar için vazgeçilmez bir enerji ve karbon kaynağı oluşturmaktadır. Bu nedenle rizosfer, diğer toprak habitatlarıyla karşılaştırıldığında mikroorganizmaların çok daha yoğun şekilde kolonize olduğu bir bölge olarak dikkat çekmektedir. Dolayısıyla rizosfer, bitki ile mikroorganizmalar arasındaki biyolojik etkileşimlerin merkezinde yer alan, besin açısından zengin ve oldukça aktif bir mikroçevre olarak değerlendirilmektedir (Sgroy vd., 2009).

Rizosferde yer alan mikroorganizmalar, sadece burada yaşamlarını devam ettirmez, aynı zamanda bitkilerle simbiyotik ilişkiler kurabilirler. Bu mikroorganizmaların fitohormonlar (oksinler, sitokininler, gibberellinler ve absisik asit (ABA)) başta olmak üzere biyolojik olarak aktif bileşikler, antifungal maddeler ve çeşitli enzimler sentezlediği bilinmektedir. Yapılan araştırmalar, bu mikrobiyal metabolitlerin bitki büyümesinin düzenlenmesinde, besin maddelerinin daha etkin kullanılmasında ve bitki gelişiminin farklı aşamalarında kritik roller üstlendiğini ortaya koymuştur (Sorty vd., 2016; Egamberdieva vd., 2017).

Bu bağlamda, bu özelliklere sahip mikroorganizmalar, yalnızca bitki gelişimini teşvik etmekle sınırlı kalmayıp, aynı zamanda bitkilerin kuraklık, tuzluluk, sıcaklık gibi çeşitli abiyotik stres faktörlerine ve patojenler gibi biyotik stres faktörlerine karşı daha dirençli hale gelmesine katkıda bulunabilmektedir. Bununla birlikte, söz konusu mikroorganizmalar besin kazanımını artırarak bitkilerin toprak kökenli patojenlerden korunmasına da aracılık etmektedir (Cho vd., 2015).

Bitki ile ilişkili mikroorganizmaların bitki dokularında farklı yaşam biçimleri sergileyebildiği de yapılan çalışmalarla ortaya konulmuştur. Bu

mikroorganizmalar bitki dokusu içerisinde endofitik olarak yaşayabilmekte, simbiyotik birliktelikler kurabilmekte veya kök yüzeyini kolonize ederek metabolik açıdan aktif çeşitli bileşikler sentezleyebilmektedir. Ayrıca bu süreçte birbirleriyle iş birliği yaparak bitkinin gelişimine katkıda bulundukları da açıklanmıştır (Berg vd., 2013; Asaf vd., 2017).

Rizobakterilerin önemi ise bu noktada öne çıkmaktadır. Bazı rizobakterilerin, gibberellinler, sitokininler, absisik asit (ABA) ve oksin gibi bitki büyüme düzenleyicilerinin biyosentezinde görev aldığı ve bu sayede hem bitki büyümesinin uyarılmasında hem de besin elementlerinin alımının kolaylaştırılmasında rol oynadığı bildirilmektedir (Khan vd., 2014; Kudoyarova vd., 2014; Sgroy vd., 2009; Pereira vd., 2016).

Sonuç olarak, rizosfer bölgesinde yaşayan bakterilerin sentezlediği metabolitlerin ve bunların bitki gelişimi üzerindeki etkilerinin, yapılan araştırmalarda kapsamlı şekilde incelendiği görülmektedir. Elde edilen bulgular, rizosfer mikroorganizmalarının yalnızca toprak ekosisteminin bir parçası olmadığını, aynı zamanda bitki gelişimi, beslenmesi, streslere dayanıklılığı ve patojenlere karşı korunmasında da stratejik bir role sahip olduğunu göstermektedir.

Son yıllarda, PGPR, kuraklık toleransını artırmada çevre dostu ve umut vadeden bir yaklaşım olarak önem kazanmıştır. Bu mikroorganizmalar, genellikle yerel kurak bitkilerin rizosferinde bulunur ve büyüme düzenleme, besin maddelerinin çözünürlüğünü artırma ve stres azaltma gibi işlevler sunar (Karimi vd., 2022; Afzal vd., 2019). PGPR'lerin kuraklık azaltıcı mekanizmaları arasında oksin üretimi, etilen birikimini azaltarak stresi önleyen ACC deaminaz aktivitesi ve toprakta su tutma kapasitesini artıran ekzopolisakkarit (EPS) üretimi yer alır (Vardharajula vd., 2009; Ajijah vd., 2023). Buğday, mısır ve ayçiçeği ile yapılan deneysel çalışmalar, PGPR uygulamasının su yetersizliği koşullarında görece su içeriğini artırabildiğini,

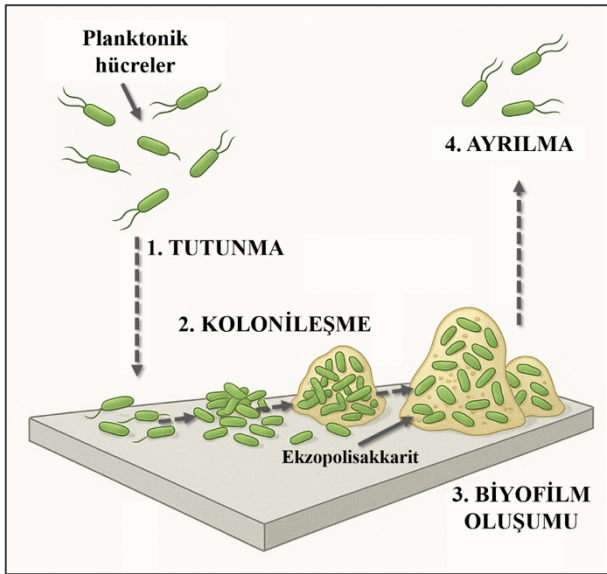
biyokütleyi çoğaltabildiğini, antioksidan enzim aktivitesini iyileştirebildiğini ve toprak yapısını dengeleyebildiğini göstermiştir (Karimi vd., 2022).

4. BAKTERİYEL BİYOFİLM

İlk olarak 17. yüzyılda Leeuwenhoek tarafından gözlemlenen biyofilmler, özellikle 1978'den sonra, 20. yüzyılın sonlarına kadar önemli bir bilimsel ilgi görmemiştir (Altınok vd., 2018). Bu mikrobiyal topluluklar, hücre dışı bir polimerik madde (EPS) matrisi içinde yer alır, bakterilerin yüzeylere yapışmasını kolaylaştırır ve çevresel stres faktörlerine karşı koruma sağlar. Biyofilmler, doğal ekosistemlerde ve insan vücudunda mikroorganizmalar için hayati bir hayatta kalma ve üreme stratejisi görevi görür.

Biyofilm oluşum süreci, planktonik bakterilerin bir yüzeye geri dönüşümlü olarak tutunmasıyla başlar, ardından geri dönüşümsüz tutunma ve ardından koruyucu bir polimerik matrisin üretilmesiyle devam eder (Şekil 2). Biyofilm olgunlaştıkça, bakterileri yeni ortamlara yayabilen karmaşık yapılara dönüşür (Samrot vd., 2021; Achinas vd., 2019).

Biyofilmler, ilaçlara, bağışıklık sistemi savunmalarına ve çevresel stres faktörlerine karşı artan direnç gibi bazı temel özelliklere sahiptir. EPS matriksi, fiziksel bir bariyer görevi görerek bakteri büyümesini yavaşlatmakta ve antibiyotik direncine katkıda bulunan persister hücreleri barındırmaktadır. Bunun yanı sıra biyofilmler; besinleri yakalayıp tutmakta, nem dengesini düzenlemekte ve ekstraselüler enzimatik aktiviteleri kolaylaştırarak adeta harici bir sindirim sistemi gibi işlev görmektedir. Bazı durumlarda ise biyofilm matriksi içerisinde zararlı maddeler birikebilmekte ve bu durum enfeksiyonların tedavi ve kontrolünü daha da güçleştirmektedir.



Şekil 2: Bitki gelişimini teşvik eden Rizobakteriler (PGPR) (Stanley & Lazazzera, 2004; Sauer vd., 2022 kaynaklarından değiştirilerek kullanılmıştır.)

Biyofilmler içerisinde bakteriyel iletişim, gen ekspresyonunu düzenleyen ve hücre yoğunluğuna bağlı bir sinyal mekanizması olan quorum sensing (QS) aracılığıyla gerçekleşmektedir. QS, biyofilm gelişimi ve virülans faktörlerinin üretimi de dahil olmak üzere temel fizyolojik süreçleri kontrol etmektedir. Ayrıca biyofilmler, bakterilerin olumsuz koşullara hızla uyum sağlamasına olanak tanıyan yatay gen transferi için elverişli bir ortam sunmaktadır. Özellikle plazmid aracılı gen aktarımı, ilaç direncinin gelişiminde kritik bir rol oynamaktadır. Bu adaptif yetenek, bakterilerin tıbbi ortamlar da dahil olmak üzere çok çeşitli çevrelerde kolonize olabildiğini mümkün kılmaktadır.

Ayrıca, biyofilmlerin özellikle sağlık alanında kullanılan tıbbi cihazların yüzeylerinde yaygın olarak geliştiği bilinmektedir. Kateterler, implantlar, protezler ve ventilatörler gibi cihazlar, mikroorganizmaların tutunması ve

biyofilm oluşturmaları için uygun yüzeyler sağlamaktadır. Bu durum, söz konusu cihazların kullanımına bağlı olarak ortaya çıkan enfeksiyon riskini artırmakta ve ciddi cihaz ilişkili sağlık sorunlarına yol açmaktadır. Nitekim biyofilm tabakası altında yer alan mikroorganizmaların antimikrobiyal ajanlara karşı daha dirençli hale gelmesi, tedavi süreçlerini zorlaştırmakta ve klinik açıdan önemli komplikasyonların gelişmesine neden olabilmektedir (Şenturan vd., 2023).

PGPR'ların biyofilm oluşturma potansiyeli, onların rizosferdeki yaşam sürekliliğini ve stres koşullarına dayanıklılığını artıran temel bir adaptasyon stratejisi olarak görülmektedir. Biyofilmler, hücrelerin çevresel dalgalanmalara karşı korunmasını sağlarken, aynı zamanda rizobakterilerin kök yüzeyinde tutunarak etkin kolonizasyon gerçekleştirmelerine olanak tanır (Ansari & Ahmad, 2018; Ansari vd., 2019). Bu özellik, kuraklık stresi altında bitki-mikroorganizma etkileşiminin sürdürülebilirliği açısından kritik öneme sahiptir. Ancak, biyofilm oluşturan ve strese dayanıklı *Pseudomonas* türlerinin buğday bitkilerinde kuraklık stresini hafifletmedeki rollerine ilişkin mevcut çalışmalar oldukça sınırlıdır ve daha fazla araştırmaya ihtiyaç duyulmaktadır (Kasim vd., 2013; Sarma & Saikia, 2014; Naveed vd., 2014).

5. BAKTERİYEL BİYOFİMLERİN KURAKLIK STRESİ ALTINDAKİ BİTKİLERDE KULLANIM POTANSİYELLERİ

Biyofilmler, bakterilerin EPS ile çevrelenmiş çok hücreli ve üç boyutlu yapılar oluşturduğu karmaşık mikrobiyal topluluklardır (Rather vd., 2021). Bu matris, bakterilerin hem bitkisel yüzeyler gibi biyotik hem de abiotik yüzeylere güçlü bir şekilde tutunmasını sağlar (Karimi vd., 2022). Dünyadaki bakterilerin yaklaşık %40-80'inin biyofilm oluşturma kapasitesine sahip olduğu tahmin edilmektedir (Flemming & Wuertz, 2019; Muhammad vd., 2020). Biyofilmler, yalnızca rastgele bir hücre yığını olmayıp, genellikle tek veya çoklu türlerden oluşan, planktonik (serbest yüzücü) bakterilere kıyasla farklı büyüme hızları ve

gen ekspresyon profillerine sahip organize mikrobiyal topluluklardır (Rather vd., 2021). Bu yapılandırılmış toplulukları oluşturabilme yeteneği, bakterilerin hayatta kalması ve özellikle zorlu çevresel koşullarda bitkilerle karmaşık etkileşimler geliştirmesi açısından kritik öneme sahiptir (Molina vd., 2003; Rather vd., 2021).

Biyofilmlerin temel yapısal bileşeni olan EPS matrisi, yüksek su içeriği sayesinde biyofilmin nemli kalmasını sağlar ve çevresel su içeriğindeki dalgalanmalara rağmen kuruma riskini azaltır (Rather vd., 2021; Bogino vd., 2013). Bu yapısal özellik, mikroorganizma hücrelerinin UV ışını, pH değişimleri, ozmotik stres ve dehidrasyon gibi çeşitli abiyotik stres koşullarına karşı dayanıklılığını artırır (Bogino vd., 2013; Mina vd., 2019). Ayrıca EPS oluşumu, mikrobiyal hücrelerde fizyolojik değişiklikler meydana getirerek stres toleransını güçlendirir (Gluchowska vd., 2025; Karimi vd., 2022). Bitki ile ilişkili bakteriler için farklı stres koşullarında biyofilm oluşturabilme kapasitesi, rizosferde hayatta kalmanın temel stratejilerinden biridir (Kasim vd., 2016; Karimi vd., 2022). Biyofilmlerin karmaşık yapısı, su kanalları ve yoğun hücre paketlenmesi dahil, gen ekspresyonunu ve metabolik faaliyetleri etkileyerek mikroorganizmaların çevresel koşullara daha iyi uyum sağlamasına olanak tanır (Rather vd., 2021).

PGPR'lerden özellikle biyofilm oluşturanlar, bitkilerde su kıtlığının bitki büyümesi üzerindeki olumsuz etkilerini hafifletmede giderek daha fazla önem kazanmaktadır (Karimi vd., 2022; Ngumbi & Kloepper, 2016; Afzal vd., 2019). Bakterilerdeki kuraklığa tolerans yeteneği sıklıkla biyofilm oluşturma kapasitesi ile ilişkilendirilmiştir (Karimi vd., 2022). Araştırmalar, kuraklık stresi sırasında bakteriyel biyofilm oluşumunun PGPR aktivitesindeki özgül rolünü incelemeyi amaçlamaktadır (Karimi vd., 2022). Örneğin, yerel kurak çayır bitkilerinin rizosferinden izole edilen biyofilm oluşturan bakteriler hem kuraklığa dayanıklılık göstermiş, hem de *in vitro* koşullarda biyofilm oluşturabilmiştir (Karimi vd., 2022). Bu bulgular, özellikle keşfedilmemiş ve

kuraklıktan etkilenen ortamlardan elde edilen mikroorganizmaların, su kıtlığı koşullarında bitki büyümesini desteklemede potansiyel taşıdığını vurgulamaktadır (Karimi vd., 2022).

Biyofilm oluşturan PGPR'ler, bitkilerin kuraklığa uyum sağlamasında; büyüme düzenlemesi, biyogübreleme ve biyokontrol gibi çeşitli doğrudan mekanizmalarla rol oynar (Karimi vd., 2022; Glick, 2014). Bu mikroorganizmaların birçoğu, kök sisteminin mimarisini modüle eden ve düşük konsantrasyonlarda ana kök uzamasını, yüksek konsantrasyonlarda ise yan kök ve kök tüyü yoğunluğunu artıran oksinler üretir (Karimi vd., 2022; Afzal vd., 2019; Glick, 2011). Ayrıca bu bakteriler, bitkilerin su stresine tolerans göstermesine yardımcı olan 1-aminosiklopropan-1-karboksilik asit (ACC) deaminaz aktivitesine sahiptir; bu enzim, stres altında bitkide biriken etilen hormonunu azaltarak olumsuz etkileri engeller (Karimi vd., 2022; Afzal vd., 2019; Glick, 2014). Biyofilm oluşturan PGPR'ler, fosfor ve potasyum gibi temel mineralleri çözünür hale getirerek bitki beslenmesine katkıda bulunur ve su kısıtlı koşullarda besin erişimini iyileştirir (Karimi vd., 2022; Afzal vd., 2019; Kour vd., 2019).

PGPR biyofilmlerinin bitkilere kuraklık altında sağladığı en kritik mekanizmalardan biri, EPS üretimidir (Vardharajula vd., 2009; Karimi vd., 2022; Afzal vd., 2019). Bu EPS'ler, toprağın su tutma kapasitesini artırarak bitkileri doğrudan su stresinden korur (Vardharajula vd., 2009; Karimi vd., 2022; Afzal vd., 2019). EPS açısından zengin biyofilmler, toprak agregasyonunu ve stabilitesini artırarak köklere yapışan toprak miktarını çoğaltır ve kök çevresinde nemli bir ortam sağlar (Vardharajula vd., 2009; Karimi vd., 2022; Afzal vd., 2019; Qurashi & Sabri, 2012; Ajijah vd., 2023). Bu durum, bitki yapraklarının bağıl su içeriğinin artmasına yol açar. Bu parametre, bitkilerin su durumu ve kuraklığa toleransı için temel bir göstergedir (Karimi vd., 2022; Naseem & Bano, 2014). EPS matrisi, bitkilerin iç su kaynaklarını daha etkin korumasına ve su kıtlığı dönemlerinde fizyolojik

işlevlerini sürdürebilmesine olanak tanıyan koruyucu bir katman işlevi görür (Afzal vd., 2019; Timmusk vd., 2014).

Kuraklık stresi, kaçınılmaz olarak bitki hücrelerinde oksidatif hasara yol açan son derece reaktif ve toksik moleküller olan ROS'nin aşırı üretimine neden olmaktadır (Karimi vd., 2022; Kaur & Asthir, 2017; Salehi-Lisar & Bakhshayeshan-Agdam, 2016). Biyofilm oluşturan PGPR'lar, bitkilerin antioksidan savunma sistemini güçlendirerek bu oksidatif stresi azaltmada kritik rol üstlenmektedir (Karimi vd., 2022; Sarkar vd., 2018). Araştırmalar, su kıtlığı koşullarında yapılan bakteriyel uygulamaların bitkilerde hidrojen peroksit düzeylerini düşürdüğünü ve glutatyon S-transferaz gibi antioksidan enzimlerin aktivitesini artırdığını ortaya koymuştur (Karimi vd., 2022). Bu içsel koruma mekanizması, zararlı ROS'un uzaklaştırılmasına yardımcı olarak nükleik asitler, lipitler ve proteinler gibi temel hücresel bileşenleri hasardan korumaktadır (Karimi vd., 2022; Hasan vd., 2016). Dolayısıyla, PGPR aşılması yoluyla antioksidan savunma kapasitesinin güçlendirilmesi, kuraklık toleransının geliştirilmesinde ve bitki yaşamının sürdürülmesinde temel bir strateji olarak değerlendirilmektedir (Ahmed vd., 2016).

Biyofilm oluşturan PGPR'ların kuraklık koşullarında etkinliğini gösteren birçok uygulama örneği bulunmaktadır. Örneğin, buğdayda yürütülen sera çalışmalarında, biyofilm oluşturan bakteri izolatlarının uygulanması hem orta hem de şiddetli su kıtlığı koşullarında yaprakların relatif su içeriğini artırmış ve hasat indeksini iyileştirmiştir (Karimi vd., 2022). Bu bakteriyel uygulamalar aynı zamanda hidrojen peroksit düzeylerinde azalma ve glutatyon S-transferaz aktivitesinde artış sağlayarak gelişmiş bir antioksidan savunma sistemini işaret etmiştir (Karimi vd., 2022). Ayçiçeğinde, EPS üreten *Pseudomonas putida* (GAP-P45) ile yapılan inokülasyon, toplam kuru biyokütleyi artırmış ve toprak agregasyonunu iyileştirmiştir (Vardharajula vd., 2009; Karimi vd., 2022). Benzer şekilde, mısırdaki uygulanan bir bakteri konsorsiyumu, yaprakların relatif su içeriğini %45 oranında artırmış, protein

içeriğini yükseltmiş ve toprak nemini %67-68 oranında iyileştirmiştir (Naseem & Bano, 2014; Karimi vd., 2022). Domateste *Bacillus amyloliquefaciens* 54 kök kolonizasyonunu ve kuraklık toleransını güçlendirirken, *Bacillus thuringiensis* AZP2 buğday kök tüyleri etrafında EPS matrisi oluşturarak kuraklık koşullarında %78 oranında daha yüksek biyokütle üretimi sağlamıştır (Wang vd., 2019; Timmusk vd., 2014).

Biyofilm oluşturan PGPR'ların olumlu etkileri, özellikle kuraklıkta su ve besin alımında kritik öneme sahip kök özelliklerinin geliştirilmesinde de görülmektedir (Karimi vd., 2022). Buğdayda yapılan çalışmalar, belirli bakteri inokülasyonlarının kök kuru ağırlığı, kök hacmi ve kök doku yoğunluğu gibi özelliklerde anlamlı değişikliklere yol açtığını göstermiştir (Karimi vd., 2022). Su kısıtı koşullarında kök kuru ağırlığı ve hacmi genellikle azalırken, bazı bakteri türleri bu parametreler üzerinde olumlu etkiler göstermiştir (Karimi vd., 2022). Örneğin, *Bacillus* inokülasyonu ile kök doku yoğunluğunun azalması, kökün su kıtlığı altında besin alım kapasitesini artırabilecek önemli bir uyum mekanizması olarak değerlendirilmektedir (Karimi vd., 2022). Çünkü topraktan köklere besin taşınımı büyük ölçüde yeterli toprak nemine bağlıdır ve kuraklık, bitki tarafından temel mineral besinlerin alımını ve taşınmasını genellikle olumsuz etkilemektedir (Hasan vd., 2016; da Silva vd., 2011).

Tarımsal açıdan bakıldığında, biyofilm oluşturan PGPR uygulamaları özellikle kurak ve yarı kurak bölgelerde bitkilerin kuraklıkla başa çıkabilmesi için sürdürülebilir ve alternatif bir yöntem sunmaktadır (Karimi vd., 2022; Afzal vd., 2019; de Vries vd., 2020). Orta düzeydeki kuraklık koşullarında elde edilen hasat indeksindeki ve toplam verimdeki artışlar, bu uygulamaların doğrudan ürün verimliliğine katkısını açıkça ortaya koymaktadır (Karimi vd., 2022). Kurak ekosistemlerden izole edilen ve doğal olarak konukçu bitkilerin stres yanıtlarına uyum sağlamış olan bakteri türleri, verim artışı için özellikle umut vaat etmektedir (Karimi vd., 2022; de Vries vd., 2020). Dahası, kuraklık genellikle yüksek sıcaklıklarla eş zamanlı olarak görüldüğünden, gelecekteki

saha araştırmalarında bu *Bacillus* türlerinin ısı ve kuraklık stresinin birlikte görüldüğü koşullarda buğday üretimini artırma potansiyeli daha detaylı incelenmelidir (Karimi vd., 2022). Bu tür uygulamalar, değişken iklim koşullarında artan küresel gıda talebini karşılamak açısından kritik önem taşımaktadır (Afzal vd., 2019; Samarah, 2016).

Dolayısıyla, özellikle PGPR'lar tarafından oluşturulan bakteriyel biyofilmlerin yaygınlığı ve işlevsel çeşitliliği, onları hem faydalı bakteriler için koruyucu bir kalkan, hem de sürdürülebilir tarım için stratejik bir araç haline getirmektedir (Ajijah vd., 2023; Afzal vd., 2019). PGPR uygulamalarının başarısı, büyük ölçüde kök kolonizasyonundaki etkinliklerine ve koruyucu mikro-koloniler ile biyofilm yapıları oluşturabilmelerine bağlıdır. Bu biyofilmler; olumsuz çevresel koşullara karşı dayanıklılığın artırılması, patojenlere karşı koruma sağlanması ve bitki çevresinde salınan besin elementlerinin alımının iyileştirilmesi gibi avantajlar sunarak bakteri-bitki etkileşimlerini güçlendirmektedir (Ajijah vd., 2023). İleriye dönük olarak, moleküler düzeyde bitki-mikroorganizma etkileşimlerinin araştırılması, farklı tarımsal alanlarda saha doğrulamaları yapılması ve nanoenkapsülasyon gibi yeni uygulama teknolojilerinin geliştirilmesi, biyofilm oluşturan PGPR'ların tarımsal üretimde etkin bir şekilde kullanılabilmesi ve iklim değişikliğinin artan zorlukları karşısında gıda güvenliğinin sağlanabilmesi açısından kritik öneme sahiptir (Afzal vd., 2019; Sarti vd., 2024).

Kuraklık stresine karşı bitkilerin desteklenmesinde yalnızca *Bacillus subtilis* değil, çok sayıda farklı bakteri türü de biyofilm oluşumunu stratejik bir adaptasyon olarak kullanmaktadır. Özellikle arid bölgelerden izole edilen *Peribacillus simplex* ve grubu üyeleri güçlü biyofilm üretimleri, yüksek oksin sentezi, 1-aminosiklopropan-1-karboksilik asit (ACC) deaminaz aktivitesi ve mineral fosfat ile potasyumu çözündürme yetenekleriyle dikkat çekmektedir (Karimi vd., 2022). Bu çok yönlü özellikler sayesinde bitkilerin kök yapısı, besin alımı ve kuraklığa karşı dayanıklılığı artmaktadır.

Biyofilm oluşumuyla öne çıkan bir diğer önemli cins ise *Pseudomonas*'tır. *Pseudomonas putida* ve *P. fluorescens* gibi türler, kök yüzeyinde nemi koruyan ve kök kolonizasyonunu artıran dış polimerik maddeler üretmektedir (Chang vd., 2007; Egamberdieva, 2010; Karimi vd., 2022). Daha yeni çalışmalar, *Pseudomonas azotoforman* FAP5 gibi türlerin biyofilm yoluyla fotosentetik pigment verimliliğini yükselttiğini, antioksidan enzim aktivitelerini güçlendirdiğini ve toprak agregasyonunu artırarak su tutma kapasitesini geliştirdiğini göstermektedir (Ajijah vd., 2023; Ansari vd., 2021). Bu bulgular, *Pseudomonas* türlerinin kuraklık stresinin hafifletilmesinde çok boyutlu bir rol üstlendiğini ortaya koymaktadır.

Ayrıca çok türlü bakteri birliktelikleri de kuraklık toleransında önemli katkılar sağlamaktadır. Örneğin *Microbacterium oxydans*, *Paenibacillus amylolyticus*, *Stenotrophomonas rhizophila* ve *Xanthomonas retroflexus*'tan oluşan bir dört türlü biyofilm birlikteliği, *Arabidopsis thaliana* üzerinde taze ağırlık, rozet çapı ve klorofil içeriğini belirgin şekilde artırmıştır (Ajijah vd., 2023; Yang vd., 2021). Bu etkinin, absisik asit (ABA) biyosentezinin uyarılması ve klorofil içeriğinin yükselmesiyle ilişkili olduğu rapor edilmiştir. Tek türlü inokulasyonlara kıyasla bu tür birlikteliklerin sinerjik etkileşimlerle daha güçlü biyofilm tabakaları oluşturduğu ve bitkilere daha kapsamlı faydalar sağladığı vurgulanmaktadır (Ren vd., 2015).

Bununla birlikte, biyofilm oluşturan rizobakterilerin katkıları yalnızca kuraklıkla sınırlı değildir. Bazı türler aynı zamanda tuzluluk stresıyla başa çıkmada da etkilidir. Örneğin *Pseudomonas plecoglossicida* PB5 ve *Bacillus licheniformis* AP6, ayçiçeğinde hem kuraklık hem de tuzluluk koşullarında biyofilm aracılığıyla kuru biyokütleyi, fotosentetik pigmentleri, gaz değişim aktivitelerini ve besin alımını artırmıştır (Ajijah vd., 2023; Yasmeen vd., 2020). Bu sonuçlar, biyofilmlerin çoklu abiyotik streslere karşı bitkilere geniş çaplı koruma sağlayabileceğini göstermektedir.

6. SONUÇ

Bu bölüm boyunca ele alınan bilgiler ışığında, günümüzün ve geleceğin en büyük çevresel tehditlerinden biri olan kuraklığın, tarımsal üretkenlik ve gıda güvenliği üzerindeki yıkıcı etkileri açıkça görülmektedir. Küresel ısınmanın şiddetlendirdiği bu sorun karşısında, bitkilerin abiyotik streslere karşı direncini artıracak yenilikçi ve sürdürülebilir çözümlere olan ihtiyaç ortadadır. Bitki gelişimini teşvik eden rizobakteriler (PGPR) ve özellikle bunların oluşturduğu biyofilmler, bu bağlamda umut vadeden biyolojik yaklaşımlar sunmaktadır. PGPR biyofilmleri, bitkilerin kök sistemlerinde kolonize olarak; su ve besin alımını optimize eden, stres hormonu dengesini düzenleyen, antioksidan üretimini artıran ve hatta patojenlere karşı koruma sağlayan çok sayıda mekanizma aracılığıyla bitkilerin kuraklık stresiyle başa çıkma kapasitesini önemli ölçüde artırabilir. İncelenen mekanizmalar ve uygulama örnekleri, bakteriyel biyofilmlerin yalnızca kuraklık değil, yüksek sıcaklık veya aşırı ışınım gibi çoklu abiyotik streslere karşı bitkilere geniş çaplı ve entegre bir koruma sağlayabileceğini açıkça göstermektedir. Bu biyolojik stratejilerin daha fazla araştırılması ve tarımsal uygulamalara entegrasyonu, iklim değişikliğinin getirdiği zorluklara karşı daha dayanıklı ve verimli tarım sistemleri geliştirmemizin anahtarı olacaktır.

KAYNAKÇA

- Achinas, S., Charalampogiannis, N., & Euverink, G. J. W. (2019). A brief recap of microbial adhesion and biofilms. *Applied Sciences*, 9(14), 2801. <https://doi.org/10.3390/app9142801>
- Afzal, M., Bano, A., & Fazal, A. (2019). Plant Growth Promoting Rhizobacterial Mitigation of Drought Stress in Crop Plants: Implications for Sustainable Agriculture. *Agronomy*, 9(11), 712. <https://doi.org/10.3390/agronomy9110712>
- Ahmad, M. (2023). Plant breeding advancements with “CRISPR-Cas” genome editing technologies will assist future food security. *Frontiers in Plant Science*, 14, 1133036. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1133036>
- Ahmed, I. M., Nadira, U. A., Zhang, G. P., & Wu, F. B. (2016). 17.2 Mechanism of Drought Stress Tolerance. In *Drought Stress Tolerance in Plants*, Vol 1 (pp. 401-426). *Springer*.
- Ainsworth, E. A., & Long, S. P. (2005). What have we learned from 15 years of free-air CO₂ enrichment (FACE)? A meta-analytic review of the responses of photosynthesis, canopy properties and plant production to rising CO₂. *The New Phytologist*, 165(2), 351-371. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2004.01224.x>
- Ajjah, N., Fiodor, A., Pandey, A. K., Rana, A., & Pranaw, K. (2023). Plant Growth-Promoting Bacteria (PGPB) with Biofilm-Forming Ability: A Multifaceted Agent for Sustainable Agriculture. *Diversity*, 15(1), 112. <https://doi.org/10.3390/d15010112>
- Altınok, Ö., Gürpınar, Ö., & Eser, Ö. (2018). Bakteriyel Biyofilmler. *Tıp Fakültesi Klinikleri Dergisi*, 1(2), 45-51.
- Ansari, F. A., & Ahmad, I. (2018). Biofilm development, plant growth promoting traits and rhizosphere colonization by *Pseudomonas*

- entomophila FAP1: a promising PGPR. *Advances in Microbiology*, 8(3), 235-251. <https://doi.org/10.4236/aim.2018.83016>
- Ansari, F. A., Ahmad, I., & Pichtel, J. (2019). Growth stimulation and alleviation of salinity stress to wheat by the biofilm forming *Bacillus pumilus* strain FAB10. *Applied Soil Ecology*, 143, 45-54. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2019.05.023>
- Ansari, F. A., Jabeen, M., & Ahmad, I. (2021). *Pseudomonas azotoformans* FAP5, a Novel Biofilm-Forming PGPR Strain, Alleviates Drought Stress in Wheat Plant. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 18, 3855-3870. <https://doi.org/10.1007/s13762-020-03045-9>
- Asaf, S., Khan, M. A., Khan, A. L., Waqas, M., Shahzad, R., Kim, A. Y., Kang, S.M., & Lee, I. J. (2017). Bacterial endophytes from arid land plants regulate endogenous hormone content and promote growth in crop plants: an example of *Sphingomonas* sp. and *Serratia marcescens*. *Journal of Plant Interactions*, 12(1), 31-38. <https://doi.org/10.1080/17429145.2016.1274060>
- Aslam, N., Li, Q., Bashir, S., Yuan, L., Qiao, L., & Li, W. (2024). Integrated review of transcriptomic and proteomic studies to understand molecular mechanisms of Rice's response to environmental stresses. *Biology*, 13(9), 659. <https://doi.org/10.3390/biology13090659>
- Badawi, G. H., Yamauchi, Y., Shimada, E., Sasaki, R., Kawano, N., Tanaka, K., & Tanaka, K. (2004). Enhanced tolerance to salt stress and water deficit by overexpressing superoxide dismutase in tobacco (*Nicotiana tabacum*) chloroplasts. *Plant Science*, 166(4), 919-928. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2003.12.007>
- Berg, G., Alavi, M., Schmidt, C. S., Zachow, C., Egamberdieva, D., Kamilova, F., & Lugtenberg, B. J. (2013). Biocontrol and osmoprotection for plants under salinated conditions. In *Molecular Microbial Ecology of the*

- Rhizosphere (pp. 587-592). Wiley.
<https://doi.org/10.1002/9781118297674.ch55>
- Bogino, P., Abod, A., Nievas, F., & Giordano, W. (2013). Water-limiting conditions alter the structure and biofilm-forming ability of bacterial multispecies communities in the alfalfa rhizosphere. *PLoS One*, 8(11), e79614.
- Carrera, C. S., Savin, R., & Slafer, G. A. (2024). Critical period for yield determination across grain crops. *Trends in Plant Science*, 29(3), 329-342.
- Caruso, G., Cavaliere, C., Guarino, C., Gubbiotti, R., Foglia, P., & Laganà, A. (2008). Identification of changes in *Triticum durum* L. leaf proteome in response to salt stress by two-dimensional electrophoresis and MALDI-TOF mass spectrometry. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 391(7), 381-390. <https://doi.org/10.1007/s00216-008-2008-x>
- Castiglioni, P., Warner, D., Bensen, R.J., Anstrom, D.C., Harrison, J., Stoecker, M., Abad, M., Kumar, G., Salvador, S., D'Ordine, R., & Navarro, S. (2008). Bacterial RNA chaperones confer abiotic stress tolerance in plants and improved grain yield in maize under water-limited conditions. *Plant Physiology*, 147(2), 446-455. <https://doi.org/10.1104/pp.108.118828>
- Chang, W. S., van de Mortel, M., Nielsen, L., Nino de Guzman, G., Li, X., & Halverson, L. J. (2007). Alginate production by *Pseudomonas putida* creates a hydrated microenvironment and contributes to biofilm architecture and stress tolerance under water limiting conditions. *Journal of Bacteriology*, 189(23), 8290-8299. <https://doi.org/10.1128/jb.00727-07>
- Cho, S. T., Chang, H. H., Egamberdieva, D., Kamilova, F., Lugtenberg, B., & Kuo, C. H. (2015). Genome analysis of *Pseudomonas fluorescens* PCL1751: a rhizobacterium that controls root diseases and alleviates salt

- stress for its plant host. *PLoS One*, 10(10), e0140231.
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0140231>
- Cline, W. R. (1992). The economics of global warming. *Institute for International Economics*. Washington, DC.
- da Silva, E. C., Nogueira, R. J. M. C., Da Silva, M. A., & De Albuquerque, M. B. (2011). Drought stress and plant nutrition. *Plant stress*, 5(1), 32-41.
- Daszkowska-Golec, A. (2011). Arabidopsis seed germination under abiotic stress as a concert of action of phytohormones. *OMICS: a journal of integrative biology*, 15(11), 763-774.
<https://doi.org/10.1089/omi.2011.0082>
- de Vries, F. T., Griffiths, R. I., Knight, C. G., Nicolitch, O., & Williams, A. (2020). Harnessing rhizosphere microbiomes for drought-resilient crop production. *Science*, 368(6488), 270-274.
<https://doi.org/10.1126/science.aaz5192>
- Dinler, B. S., Cetinkaya, H., Koc, F. N., Gül, V., & Sefaoğlu, F. (2024). Effects of titanium dioxide nanoparticles against salt and heat stress in safflower cultivars. *Acta Botanica Brasilica*, 38, e20230136.
<https://doi.org/10.1590/1677-941X-ABB-2023-0136>
- Egamberdieva, D. (2010). Growth response of wheat cultivars to bacterial inoculation in calcareous soil. *Plant Soil and Environment*, 56(12), 570-573.
- Egamberdieva, D., Wirth, S., Behrendt, U., Ahmad, P., & Berg, G. (2017). Antimicrobial activity of medicinal plants correlates with the proportion of antagonistic endophytes. *Frontiers in Microbiology*, 8, 199.
<https://doi.org/10.3389/fmicb.2017.00199>
- FAO. (2022). Agricultural production statistics 2000-2020. *FAOSTAT analytical brief series no. 41*.
- FAO. (2024). <http://www.fao.org/faostat/en/#data>, Erişim tarihi: 04.09.2025

- Flemming, H. C., & Wuertz, S. (2019). Bacteria and archaea on Earth and their abundance in biofilms. *Nature Reviews Microbiology*, 17(4), 247-260. <https://doi.org/10.1038/s41579-019-0158-9>
- Geng, S. M., Yan, D. H., Zhang, T. X., Weng, B. S., Zhang, Z. B., & Qin, T. L. (2015). Effects of drought stress on agriculture soil. *Natural Hazards*, 75(2), 1997-2011. <https://doi.org/10.1007/s11069-014-1409-8>
- Glick, B. R. (2014). Bacteria with ACC deaminase can promote plant growth and help to feed the world. *Microbiological Research*, 169(1), 30-39. <https://doi.org/10.1016/j.micres.2013.09.009>
- Głuchowska, A., Zieniuk, B., & Pawełkowicz, M. (2025). Unlocking Plant Resilience: Metabolomic Insights into Abiotic Stress Tolerance in Crops. *Metabolites*, 15(6), 384. <https://doi.org/10.3390/metabo15060384>
- Goodwin, S. M., & Jenks, M. A. (2005). Plant cuticle function as a barrier to water loss. In M. Riederer & C. Müller (Eds.), *Biology of the Plant Cuticle* (pp. 14-36). Wiley. <https://doi.org/10.1002/9780470988503.ch2>
- Hasan, M. R., Ghosh, A., Kaur, C., Pareek, A., & Singla-Pareek, S. L. (2016). 16.2 Effects of Drought on Plant Health. In *Drought Stress Tolerance in Plants*, Vol 1 (pp. 379-400). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-28899-4_16
- Hashem, A., Abd_Allah, E. F., Alqarawi, A. A., Al-Huqail, A. A., Wirth, S., & Egamberdieva, D. (2016). The interaction between arbuscular mycorrhizal fungi and endophytic bacteria enhances plant growth of *Acacia gerrardii* under salt stress. *Frontiers in Microbiology*, 7, 1089. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2016.01089>
- Karimi, E., Aliasgharzad, N., Esfandiari, E., Hassanpouraghdam, M. B., Neu, T. R., Buscot, F., Reitz, T., Breitzkreuz, C., & Tarkka, M. T. (2022). Biofilm forming rhizobacteria affect the physiological and biochemical responses of wheat to drought. *AMB Express*, 12(1), 93. <https://doi.org/10.1186/s13568-022-01432-8>

- Kasim, W. A., Osman, M. E., Omar, M. N., Abd El-Daim, I. A., Bejai, S., & Meijer, J. (2013). Control of drought stress in wheat using plant-growth-promoting bacteria. *Journal of Plant Growth Regulation*, 32(1), 122-130. <https://doi.org/10.1007/s00344-012-9283-7>
- Kasim, W., Osman, M., Omar, M., Abd El-Daim, I., Bejai, S., & Meijer, J. (2016). Effect of biofilm forming plant growth promoting rhizobacteria on salinity tolerance in barley. *Annals of Agricultural Sciences*, 61(2), 217-227. <https://doi.org/10.1016/j.aoas.2016.07.003>
- Kaur, G., & Asthir, B. (2017). Molecular responses to drought stress in plants. *Biologia Plantarum*, 61(2), 201-209. <https://doi.org/10.1007/s10535-016-0700-9>
- Khan, M. I. R., Asgher, M., & Khan, N. A. (2014). Alleviation of salt-induced photosynthesis and growth inhibition by salicylic acid involves glycinebetaine and ethylene in mungbean (*Vigna radiata* L.). *Plant Physiology and Biochemistry*, 80, 67-74. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2014.03.026>
- Kioutsoukakis, I., Rapsomanikis, S., & Loupa, R. (2006). Robust stochastic seasonal precipitation scenarios. *International journal of climatology*, 26(14), 2077-2096. <https://doi.org/10.1002/joc.1351>
- Kloepper, J. W. (1978). Plant growth-promoting rhizobacteria on radishes. In Proc. of the 4th Internat. Conf. on Plant Pathogenic Bacter, Station de Pathologie Vegetale et Phytobacteriologie (pp. 879-882). INRA, Angers, France.
- Kloepper, J. W., Leong, J., Teintze, M., & Schroth, M. N. (1980). Enhanced plant growth by siderophores produced by plant growth-promoting rhizobacteria. *Nature*, 286(5776), 885-886. <https://doi.org/10.1038/286885a0>
- Kour, D., Rana, K. L., Sheikh, I., Kumar, V., Yadav, A. N., Dhaliwal, H. S., et al. (2019). Alleviation of drought stress and plant growth promotion by

- Pseudomonas libanensis* EU-LWNA-33, a drought-adaptive phosphorus-solubilizing bacterium. *Proceedings of the National Academy of Sciences, India Section B: Biological Sciences*, 90(4), 785-795. <https://doi.org/10.1007/s40011-019-01151-4>
- Kudoyarova, G.R., Melentiev, A.I., Martynenko, E.V., Timergalina, L.N., Arkhipova, T.N., Shendel, G.V., Kuz'mina, L.Y., Dodd, I.C., & Veselov, S. Y. (2014). Cytokinin producing bacteria stimulate amino acid deposition by wheat roots. *Plant Physiology and Biochemistry*, 83, 285-291. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2014.08.015>
- Leakey, A. D. B., Ainsworth, E. A., Bernacchi, C. J., Rogers, A., Long, S. P., & Ort, D. R. (2009). Elevated CO₂ effects on plant carbon, nitrogen, and water relations: Six important lessons from FACE. *Journal of Experimental Botany*, 60(10), 2859-2876. <https://doi.org/10.1093/jxb/erp096>
- Levitt, J. (2015). *Water, radiation, salt, and other stresses* (Vol. 2). Elsevier.
- Liang, C. (2016). Genetically Modified Crops with Drought Tolerance: Achievements, Challenges, and Perspectives. In: Hossain, M., Wani, S., Bhattacharjee, S., Burritt, D., Tran, L.S. (eds) *Drought Stress Tolerance in Plants*, Vol 2. *Springer*. https://doi.org/10.1007/978-3-319-32423-4_19, 531-547.
- Lloyd-Hughes, B. (2014). The impracticality of a universal drought definition. *Theoretical and Applied Climatology*, 117(3), 607-611. <https://doi.org/10.1007/s00704-013-1025-7>
- Mendes, R., Garbeva, P., & Raaijmakers, J. M. (2013). The rhizosphere microbiome: significance of plant beneficial, plant pathogenic, and human pathogenic microorganisms. *FEMS Microbiology Reviews*, 37(5), 634-663. <https://doi.org/10.1111/1574-6976.12028>

- Mina, I. R., Jara, N. P., Criollo, J. E., & Castillo, J. A. (2019). The critical role of biofilms in bacterial vascular plant pathogenesis. *Plant Pathology*, 68(8), 1439-1447. <https://doi.org/10.1111/ppa.13073>
- Mishra, A. K., & Singh, V. P. (2010). A review of drought concepts. *Journal of Hydrology*, 391(1-2), 202-216. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.07.012>
- Molina, M. A., Ramos, J. L., & Espinosa-Urgel, M. (2003). Plant-associated biofilms. *Reviews in Environmental Science and Biotechnology*, 2(2), 99-108. <https://doi.org/10.1023/B:RESB.0000040458.35960.25>
- Muhammad, M. H., Idris, A. L., Fan, X., Guo, Y., Yu, Y., Jin, X., Qiu, J., Guan, X., & Huang, T. (2020). Beyond risk: Bacterial biofilms and their regulating approaches. *Frontiers in Microbiology*, 11, 928. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2020.00928>
- Mukherjee, S., Mishra, A., & Trenberth, K. E. (2018). Climate change and drought: A perspective on drought indices. *Current Climate Change Reports*, 4(2), 145-163. <https://doi.org/10.1007/s40641-018-0098-x>
- Naseem, H., & Bano, A. (2014). Role of plant growth-promoting rhizobacteria and their exopolysaccharide in drought tolerance of maize. *Journal of Plant Interactions*, 9(1), 689-701. <https://doi.org/10.1080/17429145.2014.902125>
- Naveed M, Hussain MB, Zahir ZA et al (2014) Drought stress amelioration in wheat through inoculation with Burkholderia phytofirmans strain PsJN. *Plant Growth Regulation*, 73, 121-131. <https://doi.org/10.1007/s10725-013-9874-8>
- Ngumbi, E., & Kloepper, J. (2016). Bacterial-mediated drought tolerance: current and future prospects. *Applied Soil Ecology*, 105, 109-125. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2016.04.009>

- Oh, M., & Komatsu, S. (2015). Characterization of proteins in soybean roots under flooding and drought stresses. *Journal of Proteomics*, 114, 161-181. <https://doi.org/10.1016/j.jprot.2014.11.008>
- Pereira, S. I. A., Monteiro, C., Vega, A. L., & Castro, P. M. (2016). Endophytic culturable bacteria colonizing *Lavandula dentata* L. plants: isolation, characterization and evaluation of their plant growth-promoting activities. *Ecological Engineering*, 87, 91-97. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2015.11.033>
- Qurashi, A. W., & Sabri, A. N. (2012). Bacterial exopolysaccharide and biofilm formation stimulate chickpea growth and soil aggregation under salt stress. *Brazilian Journal of Microbiology*, 43(3), 1183-1191. <https://doi.org/10.1590/S1517-83822012000300046>
- Rather, M. A., Gupta, K., & Mandal, M. (2021). Microbial biofilm: formation, architecture, antibiotic resistance, and control strategies. *Brazilian Journal of Microbiology*, 52(4), 1701-1718. <https://doi.org/10.1007/s42770-021-00624-x>
- Ren, D., Madsen, J. S., Sørensen, S. J., & Burmølle, M. (2015). High Prevalence of Biofilm Synergy among Bacterial Soil Isolates in Cocultures Indicates Bacterial Interspecific Cooperation. *The ISME Journal*, 9(1), 81-89. <https://doi.org/10.1038/ismej.2014.96>,
- Roy, N., Debnath, P., & Gaur, H. S. (2025). Adoption of multi-omics approaches to address drought stress tolerance in rice and mitigation strategies for sustainable production. *Molecular Biotechnology*, 1-13. <https://doi.org/10.1007/s12033-025-01400-0>
- 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*. https://doi.org/10.1007/978-3-319-28899-4_1

- Samarah, N. H. (2016). Understanding how plants respond to drought stress at the molecular and whole plant levels. In *Drought Stress Tolerance in Plants, Vol 2: Molecular and Genetic Perspectives* (pp. 1-37). Cham: *Springer International Publishing*. https://doi.org/10.1007/978-3-319-32423-4_1
- Samrot, A. V., Abubakar Mohamed, A., Faradjeva, E., Si Jie, L., Hooi Sze, C., Arif, A., Chuan Sean, T., Norbert Michael, E., Yeok Mun, C., Xiao Qi, N. and Ling Mok, P., & Kumar, S. S. (2021). Mechanisms and impact of biofilms and targeting of biofilms using bioactive compounds: A review. *Medicina*, 57, 839. <https://doi.org/10.3390/medicina57080839>
- Sarkar, J., Chakraborty, B., & Chakraborty, U. (2018). Plant growth promoting Rhizobacteria protect wheat plants against temperature stress through antioxidant signalling and reducing chloroplast and membrane injury. *Journal of Plant Growth Regulation*, 37(4), 1396-1412. <https://doi.org/10.1007/s00344-018-9789-8>
- Sarma, R. K., & Saikia, R. (2014). Alleviation of drought stress in mung bean by strain *Pseudomonas aeruginosa* GGRJ21. *Plant and Soil*, 377(1), 111-126. <https://doi.org/10.1007/s11104-013-1981-9>
- Sarti, G. C., Galelli, M. E., Cristóbal-Miguez, J. A. E., Cárdenas-Aguilar, E., Chudil, H. D., García, A. R., & Paz-González, A. (2024). Inoculation with Biofilm of *Bacillus subtilis* is a Safe and Sustainable Alternative to Promote Tomato (*Solanum lycopersicum*) Growth. *Environments*, 11(3), 54. <https://doi.org/10.3390/environments11030054>
- Sauer, K., Stoodley, P., Goeres, D. M., Hall-Stoodley, L., Burmølle, M., Stewart, P. S., & Bjarnsholt, T. (2022). The biofilm life cycle: expanding the conceptual model of biofilm formation. *Nature Reviews Microbiology*, 20(10), 608-620. <https://doi.org/10.1038/s41579-022-00767-0>

- Seneviratne, S. I., Zhang, X., Adnan, M., Badi, W., Dereczynski, C., Luca, A. D., Ghosh, S., Iskandar, I., Kossin, J., Lewis, S., Otto, F., Pinto, I., Satoh, M., Vicente-Serrano, S. M., Wehner, M., Zhou, B. and Allan, R. (2021) Weather and climate extreme events in a changing climate. In: Masson-Delmotte, V. P., Zhai, A., Pirani, S. L. and Connors, C. (eds.) *Climate Change 2021: The Physical Science Basis: Working Group I contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (pp. 1513-1766). *Cambridge University Press*, Cambridge, UK. <https://doi.org/10.1017/9781009157896.013>
- Şenturan, U. M., Akata, I., & Altuner, E. M. (2025). Antibiofilm effects of *Fomes fomentarius* (L.) Fr. extracts on some microorganisms. *Communications Faculty of Sciences University of Ankara Series C Biology*, 34(1), 58-75. <https://doi.org/10.53447/communc.1667669>
- Sgro, V., Cassán, F., Masciarelli, O., Del Papa, M. F., Lagares, A., & Luna, V. (2009). Isolation and characterization of endophytic plant growth-promoting (PGPB) or stress homeostasis-regulating (PSHB) bacteria associated to the halophyte *Prosopis strombulifera*. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 85(2), 371-381. <https://doi.org/10.1007/s00253-009-2116-3>
- Shashidhar, H. E., Kanbar, A., Toorchi, M., Raveendra, G. M., Kundur, P., Vimarsha, H. S., Soman, R., Kumar, N.G., Bekele, B.D., & Bhavani, P. (2013). Breeding for drought resistance using whole plant architecture-conventional and molecular approach. In *Plant breeding from laboratories to fields*. *IntechOpen*. <https://doi.org/10.5772/54983>
- Sorty, A. M., Meena, K. K., Choudhary, K., Bitla, U. M., Minhas, P. S., & Krishnani, K. K. (2016). Effect of plant growth promoting bacteria associated with halophytic weed (*Psoralea corylifolia* L) on germination and seedling growth of wheat under saline conditions. *Applied*

- Biochemistry and Biotechnology*, 180(5), 872-882.
<https://doi.org/10.1007/s12010-016-2139-z>
- Stanley, N. R., & Lazazzera, B. A. (2004). Environmental signals and regulatory pathways that influence biofilm formation. *Molecular Microbiology*, 52(4), 917-924. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2958.2004.04036.x>
- Timmusk, S., Abd El-Daim, I. A., Copolovici, L., Tanilas, T., Kännaste, A., Behers, L., Nevo, E., Seisenbaeva, G., Stenström, E., & Niinemets, Ü. (2014). Drought-tolerance of wheat improved by rhizosphere bacteria from harsh environments: Enhanced biomass production and reduced emissions of stress volatiles. *PLoS ONE*, 9(5), e96086. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0096086>
- Trenberth, K. E., Fasullo, J. T., & Shepherd, T. G. (2015). Attribution of climate extreme events. *Nature climate change*, 5(8), 725-730. <https://doi.org/10.1038/nclimate2657>
- Van Oosten, M. J., Costa, A., Punzo, P., Landi, S., Ruggiero, A., Batelli, G., & Grillo, S. (2016). Genetics of Drought Stress Tolerance in Crop Plants. In: Hossain, M., Wani, S., Bhattacharjee, S., Burritt, D., Tran, L.S. (eds) Drought Stress Tolerance in Plants, Vol 2. *Springer, Cham*. https://doi.org/10.1007/978-3-319-32423-4_2
- Vardharajula, S., Ali, S. Z., Grover, M., Reddy, G., & Venkateswarlu, B. (2009). Alleviation of drought stress effects in sunflower seedlings by exopolysaccharides producing *Pseudomonas putida* strain P45. *Biology and Fertility of Soils*, 46(1), 17-26. <https://doi.org/10.1007/s00374-009-0401-z>
- Wang, D. C., Jiang, C. H., Zhang, L. N., Chen, L., Zhang, X. Y., & Guo, J. H. (2019). Biofilms Positively Contribute to *Bacillus amyloliquefaciens* 54-Induced Drought Tolerance in Tomato Plants. *International Journal of*

- Molecular Sciences*, 20(24), 6271.
<https://doi.org/10.3390/ijms20246271>
- Westerling, A. L., Hidalgo, H. G., Cayan, D. R., & Swetnam, T. W. (2006). Warming and earlier spring increase western U.S. forest wildfire activity. *Science*, 313(5789), 940-943. <https://doi.org/10.1126/science.1128834>
- Yang, N., Nesme, J., Röder, H. L., Li, X., Zuo, Z., Petersen, M., Burmølle, M., & Sørensen, S. J. (2021). Emergent bacterial community properties induce enhanced drought tolerance in *Arabidopsis*. *NPJ Biofilms and Microbiomes*, 7(1), 82. <https://doi.org/10.1038/s41522-021-00253-0>
- Yang, Q., Liu, Y. J., & Zeng, Q. Y. (2019). Overexpression of three orthologous glutathione S-transferases from *Populus* increased salt and drought resistance in *Arabidopsis*. *Biochemical Systematics and Ecology*, 83, 57-61. <https://doi.org/10.1016/j.bse.2019.01.001>
- Yasmeen, T., Ahmad, A., Arif, M.S., Mubin, M., Rehman, K., Shahzad, S.M., Iqbal, S., Rizwan, M., Ali, S., Alyemeni, M.N., & Wijaya, L. (2020). Biofilm forming rhizobacteria enhance growth and salt tolerance in sunflower plants by stimulating antioxidant enzymes activity. *Plant Physiology and Biochemistry*, 156, 242-256. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2020.09.016>

BÖLÜM 5

BİTKİLERDE SEKONDER METABOLİZMA VE STRES YANITLARINA METABOLOMİK YAKLAŞIM

Kübra TEKŞEN^{1*}

Nezahat TURFAN²

Ergin Murat ALTUNER³

DOI: <https://dx.doi.org/10.5281/zenodo.17502352>

^{1*}Arş. Gör., Kastamonu Üniversitesi, Fen Fakültesi, Biyoloji Bölümü, Kastamonu, Türkiye. kubrateksenn@gmail.com, orcid id: 0009-0009-5010-4290

²Doç. Dr., Kastamonu Üniversitesi, Fen Fakültesi, Biyoloji Bölümü, Kastamonu, Türkiye. nturan@kastamonu.edu.tr, orcid id: 0000-0002 5753-0390

³Prof. Dr., Kastamonu Üniversitesi, Fen Fakültesi, Biyoloji Bölümü, Kastamonu, Türkiye. ergin.murat.altuner@gmail.com, orcid id: 0000-0001-5351-8071

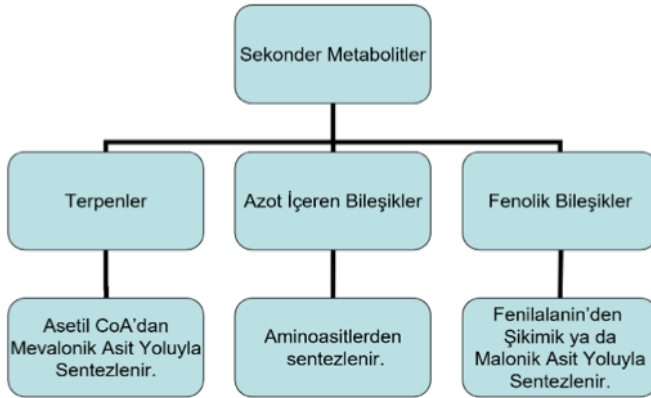
GİRİŞ

Bitkiler, büyük ölçüde yerleşik (sessile) yaşam formları olmaları ve aktif lokomasyon yeteneklerinin bulunmaması nedeniyle çevresel koşullara doğrudan maruz kalır ve bu koşullara uyum sağlayabilmek için oldukça geniş bir metabolik kapasite geliştirmişlerdir. Metabolizma, bitkilerin yaşamını sürdürebilmesi için gerekli biyokimyasal reaksiyonların bütünü olarak tanımlanır ve temelde primer (birincil) ve sekonder (ikincil) metabolizma olmak üzere iki ana kategoriye ayrılır. Primer metabolizma, hücrelerin yaşamsal faaliyetleri için zorunlu olan karbonhidrat, protein, nükleik asit ve lipidlerin sentezi ile enerji üretim süreçlerini kapsarken; sekonder metabolizma, doğrudan yaşamsal zorunluluk taşımayan ancak bitkilerin çevresel streslere uyum sağlaması, patojenlere ve herbivorlara karşı savunma geliştirmesi, aynı zamanda diğer organizmalarla ekolojik etkileşimlerini düzenlemesi açısından kritik öneme sahiptir (Dixon, 2024).

Sekonder metabolitler, bitkilerin çevre ile olan etkileşimlerinde kilit rol oynar. Alkaloidler, fenolik bileşikler, terpenoidler ve glukozinolatlar gibi çeşitli metabolit grupları (Şekil 1); patojenlere ve herbivorlara karşı savunmada, ultraviyole (UV) radyasyona karşı korumada, tozlayıcıların çekilmesinde ve rekabetçi avantaj sağlamada görev yaparlar. Bu nedenle, sekonder metabolizma yalnızca ekolojik bir adaptasyon mekanizması değil, aynı zamanda bitki biyolojisinin evrimsel başarısında belirleyici bir faktör olarak görülmektedir (Fraenkel, 1959 Gul ve ark., 2023).

Son yıllarda yapılan çalışmalar, sekonder metabolizmanın stres yanıtlarıyla doğrudan ilişkili olduğunu göstermektedir. Bitkiler abiyotik stres (kuraklık, tuzluluk, sıcaklık, ağır metaller) ve biyotik stres (patojenler, böcekler, otçullar) koşullarında metabolik profillerini yeniden düzenler. Bu yeniden düzenleme, çoğunlukla sekonder metabolitlerin biyosentezinde artış veya değişim şeklinde gözlenir. Örneğin, fenolik bileşikler oksidatif stresi azaltan antioksidan özellikleri ile öne çıkarken, terpenoidler ve alkaloidler

bitkilerin savunma yanıtlarını güçlendirir. Bu süreçler jasmonat, salisilik asit, etilen ve reaktif oksijen türleri (ROS) gibi sinyal yollarıyla entegre şekilde düzenlenmektedir (Agati & Tattini, 2010; Pieterse vd., 2012).



Şekil 1. Sekonder Metabolitlerin sınıflandırılması (Vura & Türker 2021)

Bu bağlamda, metabolomik yaklaşımlar bitki metabolizmasının stres altındaki dinamiklerini anlamada önemli bir araştırma alanı haline gelmiştir. Metabolomik, hücrelerdeki tüm küçük moleküllerin (metabolitlerin) yüksek verimli tekniklerle (LC-MS, GC-MS, NMR vb.) eşzamanlı olarak analiz edilmesini sağlar. Bu sayede hem primer hem de sekonder metabolitlerdeki değişimler kapsamlı bir şekilde ortaya konulabilir. Özellikle bitkilerde stres biyolojisi araştırmalarında metabolomik, hangi yolların aktive olduğunu, hangi metabolitlerin savunma veya adaptasyon süreçlerinde kritik rol üstlendiğini belirlemeye yardımcı olmaktadır (Fiehn, 2002). Omik verilerin (transkriptomik, proteomik ve metabolomik) bütünleştirilmesi, bitki metabolizmasının çok katmanlı düzenlenmesini daha net anlamamıza olanak tanımaktadır.

Dolayısıyla, sekonder metabolizma yalnızca normal büyüme koşullarında ekolojik işlevler üstlenmekle kalmaz, aynı zamanda bitkilerin stres adaptasyonunda merkezi bir role sahiptir. Bu bölümde, bitkilerde sekonder metabolizmanın temelleri, stres koşullarındaki işlevleri, sinyal yollarıyla ilişkisi ve metabolomik yaklaşımlar kullanılarak yapılan analizler ayrıntılı biçimde ele alınacaktır.

BİTKİSEL SEKONDER METABOLİZMANIN TEMELLERİ

Bitkilerin büyüme ve gelişmesi için zorunlu olmamakla birlikte çevresel değişimlere uyum sağlamalarında ve biyotik/abiyotik stres etmenlerine karşı tolerans geliştirmelerinde önemli rol oynayan ikincil metabolik süreçler, literatürde “non-enzimatik savunma mekanizmaları” olarak da tanımlanmaktadır. Bu sistemler, yalnızca savunma işlevleriyle değil, aynı zamanda ekolojik ve fizyolojik katkılarıyla da öne çıkar ve evrimsel olarak korunmuş adaptasyon stratejileri arasında yer alır (Wink, 2003).

Sekonder metabolitler yapısal ve biyosentetik yollarına göre çeşitli gruplara ayrılır:

- **Fenolik bileşikler:** Flavonoidler, tanenler, lignin ve stilbenler gibi bileşikler, antioksidan aktiviteleri ve UV koruması ile bilinir. Fenolikler, patojen saldırısına karşı fitoaleksinin görevi olarak görev alır (Cheynier vd., 2013). Ayrıca, özellikle flavonoidler farklı yapılara ve önemli terapötik potansiyele sahip önemli biyoaktif bileşiklerdir (Gür vd., 2017).
- **Terpenoidler:** Monoterpen, seskiterpen, diterpen ve karotenoidler gibi alt gruplara ayrılır ve aroma, renk ile savunma işlevleriyle öne çıkar. Ayrıca, uçucu bileşikler olarak bitki-bitki ve bitki-böcek etkileşimlerinde önemli roller üstlenirler (Gershenzon & Dudareva, 2007).

- **Alkaloidler:** Morfin, kafein, nikotin gibi azotlu bileşikler, herbivorlara karşı caydırıcıdır ve patojenlere karşı savunmada önemlidir (Ziegler & Facchini, 2008).
- **Kükürt içeren bileşikler:** Glukozinolatlar ve allil sülfürler, özellikle Brassicaceae familyasında bulunur ve hem patojen hem de otçullara karşı savunma sağlar (Halkier & Gershenzon, 2006).

Ekolojik ve fizyolojik rolleri ise, optimal koşullar ve stres durumları olmak üzere iki ana bağlamda değerlendirilebilir.

Optimal koşullarda rolleri:

- Bitki-bitki ve bitki-hayvan etkileşimlerinde sinyal molekülü olarak görev yapar.
- Tozlayıcıların çekme, tohum yayılımını sağlama, rekabetçi avantaj kazanma gibi ekolojik işlevler üstlenir.
- UV ışınlarından korunma ve fotosentetik dokuların stabilizasyonu için antioksidan görevi görür.

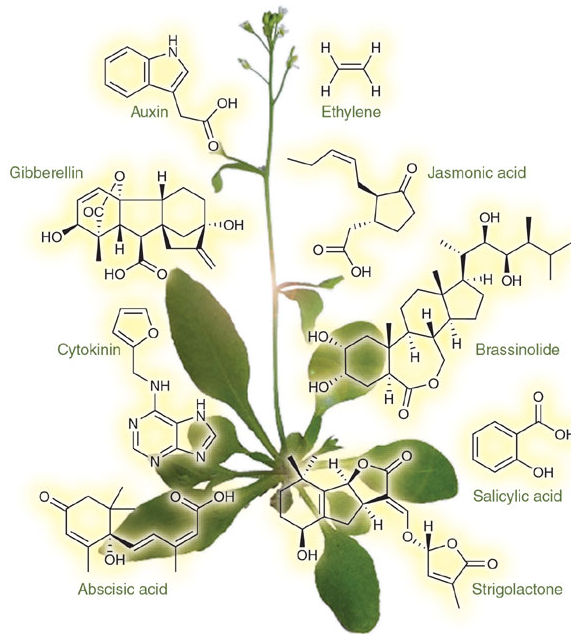
Stres koşullarındaki rolleri:

- Abiyotik stres (kuraklık, tuzluluk, sıcaklık, ağır metaller) sırasında fenolik bileşikler ve flavonoidler oksidatif stresi azaltarak bitkileri korur.
- Biyotik stres koşullarında alkaloidler ve terpenoidler patojen veya otçullara karşı savunma sağlar.
- Uçucu organik bileşikler çevresel uyarıları komşu bitkilere ileterek topluluk savunmasını güçlendirir.

Bu metabolik yanıtlar, genel olarak gen ekspresyonu ve jasmonat, salisilik asit ve etien gibi sinyal moleküller aracılığıyla koordine edilir (Howe & Jander, 2008).

SEKONDER METABOLİZMA VE SİNYAL YOLAKLARI

Bitkiler, çevresel streslere karşı savunmayı güçlendirmek için sekonder antioksidant savunma mekanizmasının düzenlenmesi gibi karmaşık sinyal iletim ağını devreye sokar. Bu sinyal ağları, jasmonik asit (JA), salisilik asit (SA) ve etilen (ET) gibi fitohormonlar dahil sayısız sekonder metabolit türevlerinin sentezini düzenleyerek bitkilerin stres etmenlerinin zararlı etkileriyle başa çıkmasında yardımcı olur (Howe & Jander, 2008) (Şekil 2).



Şekil 2. Bitkilerin Büyümesini ve gelişimini düzenleyen fitohormonlar (Santner ve ark., 2009).

JA ve türevleri, organ gelişimi, üreme (çiçek gelişimi, meyve tutumu ve meyve olgunlaşması) ve senesens gibi fizyolojik süreçlerin kontrol edilmesi; patojenler/zararlılar ataklarına direncin uyarılması; UV, tuzluluk, sıcaklık,

yaralanma gibi stresli koşullara yanıtta önemli sinyal bileşikleridir (Ghorbel vd., 2021).

Bu bağlamda, Guan vd. (2019), JA uygulamasının *Arabidopsis thaliana*'da, nektrotrofik patojen *Botrytis cinerea*'ya karşı oruma sağladığını ileri sürerken, Singh vd. (202) ise JA'nın (JA-IIe metabolizmasıyla ilişkili) domatese musallat olan zararlıların sindirim sistemini PIN II proteaz inhibitörü ile çökertip domates dokusundaki gelişimlerini büyükoranda baskıladığını kaydetmişlerdir. JA'ın, antioksidan sistemleri modüle ederek ağır metal stresıyla mücadele yöntemindeki başarısında Zhao vd. (2016) tarafından ortaya konulmuştur. Araştırmacılar Cd toksisitesine maruz *Vicia faba*'a dışsal JA takviyesinin klorofil biyosentezini uyararak, fotosentetik aktiviteyi yükselterk ve hücre içerisine alınan Cd'u bağlayabilen ve hatta onu etkisizleştirebilen antioksidant savunmayı harekete geçirdiğini gözlemlemişlerdir. Bu bağlamda JA, bitkilerin kendilerini böcek ve patojenler gibi biyotik, ağır metaller ve kuraklık gibi çevresel stres faktörleri gibi geniş bir tehdit yelpazesine karşı savunmalarını sağlayan bir fitohormondur.

Strese yanıt olarak sentezlenen bir diğer sinyal molekül ise SA (salisilik ast)'dır (Filgueiras vd., 2019). SA, patojenlere karşı kazanılmış sistemik direncin (SAR) oluşturulması; fungus, patojen ve bakteriler gibi PR (patojen-ilişkili) proteinlerin ekspresyonu; patjenlerle mücadelede etkin fitoalkesinlerin sentezi; çiçeklenme, meyve tutumu ve yaprak absisyonunun düzenlenmesi; fotosentetik ve genelmetabolik aktivitenin artırılması ve ayrıca stres koşullarında direncin yükseltilmesi gibi etkileriyle bitkilerde antioksidant savunmayı güçlendiren, büyüme ve gelişmeyi uyarıcı ve çevresel koşullar dayanıklılığında artıran çok yönlü bir fitohormondur.

Bitkilerde sistemik direncin SA ile uyarılması, uçucu bir sinyal molekül olan metillenmiş bir SA formuyla (MeSA) sistemik direncin uyarıldığı Durrant & Dong (2004) tarafından kanıtlanmıştır. SA'nın etkisi tütün üretiminde ciddi kayıplara neden olan tütün mozaik virüsüyle ilgili çalışmada (Gaffney vd.

(1993), Arabidopsis'e musallat olan *Pseudomonas* bakterisiyle ilişkili çalışmada (Yang vd. 2015) ve patates yumru gelişimine ciddi zarar veren Alternatif mantarıyla (Coquoz vd.1991) yapılan çalışmalarda detaylı olarak ortaya konulmuştur.

Literatürde SA, antimikrobiyal özelliklere sahip patojenlerle ilişkili (PR) proteinlerin sentezinin uyararak bitkinin savunmasını güçlendirdiği (Sudisha vd., 2012) ve ayrıca yaprak bitleriyle enfekte olan bitkilerde afitlere karşı SA temelli savunmanın tetiklediği rapor edilmiştir. Örneğin, Moran & Thompson (2001) yeşil şeftali afidini (*Myzus persicae*) Arabidopsis bitkilerine bulaştırdıklarında bitkide SA-ilişkili genlerin ekspre edildiğini belirlemişlerdir.

Gaz formunda bir fitohormon olan etilen de çevresel koşulların değişimlerine yanıt olarak sentezlenen en bilindik bitkisel sinyal moleküllerinden biridir. Ayrıca meyvelerde karbohidrat metabolizmasını kontrol ederek meyvelerde şekerleşmeyi ve pektin ve selülozu parçalayan doku olgunlaşmasını sağladığı için meyve hormonu olarak ta kabul edilmektedir. Meyve olgunlaşması, yaprak-çiçek dökümü; strese yanıtın başlatılması, fitoaleksinin rolü; özellikle de oksijen belirteci rolleriyle bitkisel gelişimde kalite ve üretimin artırılmasında aktif rol oynamaktadır.

Strese toleransı daha yüksek seviyeye çıkarmadaki etkisi tuz stresine maruz Arabidopsis tohum çilenmesi çalışmalarında kanıtlanmıştır (de Zélicourt vd., 2018). Fitoaleksinin özelliği sayesinde bakteri, mantar ve nematodlar gibi zararlılara karşı savunma yanıtını başlattığı *Pyrus pyrifolia* bitkisinde gösterilmiştir (Wang vd. 2017). Çalışmada bitkiye musallat olan *Alternaria alternata*'ya karşı direnci tetiklediği, doku içerisine mantarın nüfuzunu ve üretimini baskıladığı gösterilmiştir. Etilenin abiyotik stresle mücadeledeki faydalı etkileri, kuraklığa maruz mısır fidelerinde kök gelişimini teşvik etmesiyle doğrulanmıştır (Sahrma vd. 2019). Araştırmacılar ortamda etilen varlığında kök hücrelerinde mitotik aktivitenin, hücre genişlemesi ve

farklılaşmasının kolaylaştığını buna karşın otomda etilen yokluğunda bahsedilen olayların inhibe olduğunu tespit etmişlerdir.

Etilenin, JA ile etkileşime girerek ve ayrıca terpenler, alkoloitler, kükürtlü bileşikler, fitoaleksinler gibi sekonder metabolit türevlerinin sentezlerini teşvik ederek de non-enzimatik savunmanın modülasyonunda önemli etkileri vardır. Koniferlerde (*Pinophyta spp.*) terpen sentezini uyarak yaprak, gövde ve köklerde yaralanmaya bağlı (travmatik) reçine kanallarının oluşumunu sağladığı Ninkuu vd. (2021) tarafından yapılan bilimsel çalışmada ortaya konulmuştur.

Sonuç olarak, JA, SA ve ET gibi fitohormonlar, bitkilerin stres yanıtlarında sekonder metabolitlerin düzenlenmesinde merkezi aktörler olarak görev yapar. Bu sinyal yolları yalnızca savunma mekanizmalarını aktive etmekle kalmaz, aynı zamanda metabolik ağların yeniden programlanmasını da tetikler. Böylece bitkiler biyotik ve abiyotik stres koşullarına uyum sağlamak için fenilpropanoidler, alkaloidler, flavonoidler ve çeşitli uçucu organik bileşikler gibi metabolitlerin sentezini dinamik biçimde değiştirir. Ancak bu karmaşık metabolik değişimlerin kapsamlı bir şekilde anlaşılabilmesi için, klasik biyokimyasal analizlerin ötesine geçilmesi gerekir. Bu noktada metabolomik yaklaşımlar hem primer hem de sekonder metabolitlerin küresel ölçekte profillenmesine olanak sağlayarak stres biyolojisinde yeni biyomarkerların ve metabolik yolların keşfini mümkün kılar. Dolayısıyla, bitkisel metabolizmanın stres altındaki yeniden şekillenmesini anlamada metabolomik teknolojiler vazgeçilmez araçlar olarak öne çıkmaktadır.

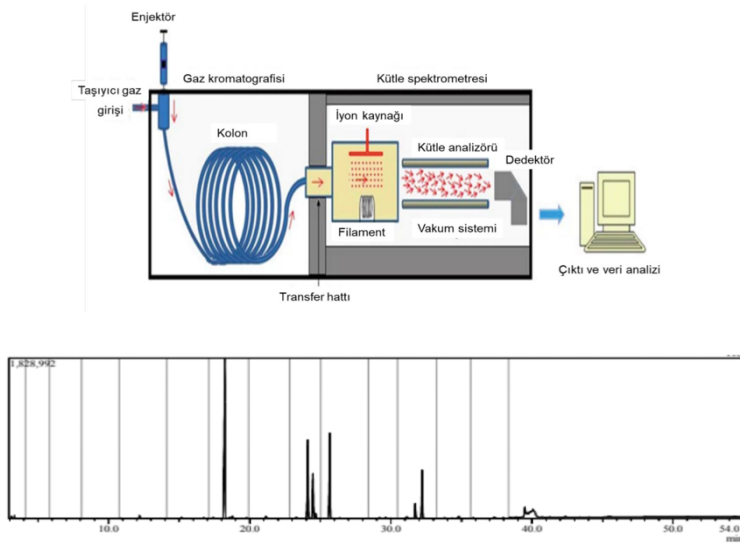
METABOLOMİK YAKLAŞIMLAR İLE STRES VE METABOLİZMA ANALİZİ

Bitkiler, çevresel koşullara uyum sağlamak için metabolik profillerinde dinamik değişiklikler gerçekleştirir. Bu değişimler, yalnızca primer metabolizmayı değil aynı zamanda sekonder metabolizmayı da kapsar.

Özellikle biyotik (patojenler, herbivorlar) ve abiyotik (kuraklık, tuzluluk, sıcaklık, ağır metaller) stres faktörleri, metabolit seviyelerinde yeniden düzenlenmelere yol açarak savunma ve adaptasyon mekanizmalarının bir parçasını oluşturur. Bu bağlamda metabolomik yaklaşımlar, bitkilerin stres yanıtlarını bütüncül bir düzeyde anlamak için güçlü araçlar sunar.

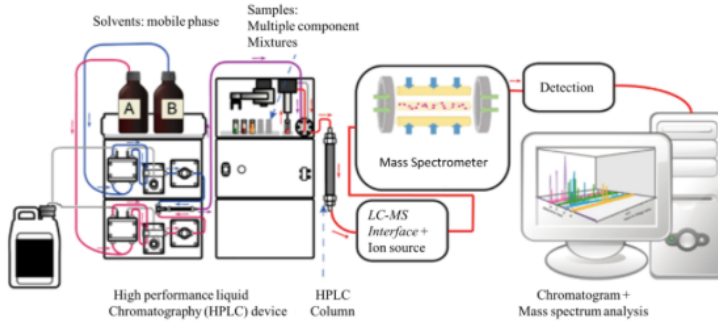
Bitkisel metabolitlerin keşfi için yaygın olarak gaz kromatografisi-kütle spektrometrisi (GC-MS), sıvı kromatografisi-kütle spektrometrisi (LC-MS) ve nükleer manyetik rezonans (NMR) teknikleri kullanılmaktadır (Farag vd., 2012).

Gaz Kromatografisi-Kütle Spektrometrisi (GC-MS), uçucu ve uçucu hale getirilebilen küçük moleküllerin analizi için kullanılan en yaygın yöntemlerden biridir (Şekil 3). Stres koşullarında şekerler, amino asitler, organik asitler gibi primer metabolitlerin belirlenmesi ve değişiminin incelenmesi için güçlü bir platformdur (Rohloff, 2015).



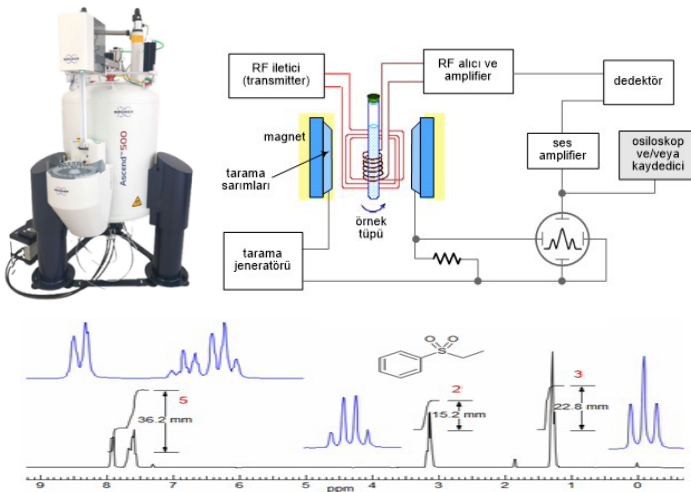
Şekil 3. Gaz Kromatografisi-Kütle Spektrometrisi (Emwas ve ark., 2015)

Sıvı Kromatografisi-Kütle Spektrometrisi (LC-MS), polar ve yüksek molekül ağırlıklı metabolitlerin analizi için idealdir. Özellikle flavonoidler, fenolik asitler, alkaloid gibi sekonder metabolitlerin analizi için uygundur ve bitkilerin biyotik streslere karşı savunma mekanizmalarının çözülmesinde yaygın olarak kullanılır (Richard vd., 2012).



Şekil 4. Sıvı Kromatografisi-Kütle Spektrometrisi (LC-MS) (Wikipedia, 2025)

Nükleer Manyetik Rezonans (NMR), kantitatif ve tekrarlanabilir analizler için güçlü bir yöntem olup metabolitlerin yapısal doğrulamasında eşsiz bir rol oynar.



Şekil 5. Nükleer Manyetik Rezonansı (NMR) (Beşergil, 2025).

Bu teknikler kullanılarak gerçekleştirilen metabolit profillemeye çalışmaları, farklı koşullarda elde edilen metabolik desenlerin karşılaştırılmasına dayanır.

Örneğin, Wei ve arkadaşları (2021) tarafından yapılan çalışmada, *Jacobaea vulgaris* ve *Jacobaea aquatica* yapraklarına metil jasmonat ve salisilik asit uygulanarak NMR spektroskopi tekniği ile metabolomik değişimler ve üç farklı otçul tür üzerindeki etkiler incelenmiştir. Metil jasmonat uygulaması yaprak metabolomunu belirgin şekilde değiştirmiş ve *Mamestra brassicae* ile *Liriomyza trifolii* bu yaprakları daha az tüketmiştir. SA uygulaması ise sadece *J. aquatica*'da *Frankliniella occidentalis*'in beslenmesini azaltmıştır. Yüksek treonin ve sitrik asit içeren bitkilerde otçul zararları azalmış, yüksek glukoz seviyeleri ise beslenmeyi artırmıştır.

Bitkiler, yaşamları boyunca çeşitli streslerle karşılaştıkça salisilik asit (SA), etilen (ET), jasmonat (JA), absisik asit (ABA), auxin (AUX), brassinosteroid (BR), gibberellik asit (GA), sitokinin (CK) ve strigolaktonlar (SL) gibi fitohormonlarla savunma genlerini aktive ederler (Li vd., 2018). Li ve arkadaşları (2018), *Arabidopsis thaliana* üzerinde yaptıkları çalışmalarla, SA'nın biyotrofik patojenlere, örneğin *Pseudomonas syringae*ye karşı yerel ve sistemik edinilmiş dirençte merkezi bir rol oynadığını göstermiştir. Öte yandan, ET ve JA yolları nekrotrofik patojenlere, örneğin *Botrytis cinerea*ya karşı savunmada önemli rol oynamaktadır. Diğer fitohormonlar (ABA, AUX, BR, GA, CK, SL), çoğunlukla bu ana yolları modüle ederek bitkinin bağışıklık yanıtını desteklediği bildirilmiştir (Li vd., 2018).

Verslues ve Juenger (2011) tarafından yapılan bir araştırmada, *Cyamopsis tetragonoloba* bitkisinde hem kuraklık hem de normal koşullar altında ortaya çıkan hedeflenmemiş (untargeted) kuraklık stresiyle ilişkili metabolitler, GC-MS analitik yöntemi kullanılarak belirlenmiştir. Metabolom analizleri sonucunda toplam 23 metabolitte değişim gözlenmiştir. Bu

metabolitlerden sekizi (prolin, valin, D-pinitol, palmitik asit, dodesanoik asit, treonin, glukoz ve gliserol monostearat) biyobelirteç olarak değerlendirilmiştir. Dikkat çekici olarak, üç metabolit (D-pinitol, valin ve gliserol monostearat) kundur bitkisinde kuraklık stresi altında ilk kez rapor edilmiştir. Ayrıca, dört amino asidin (alanin, valin, serin ve aspartik asit) kuraklığa toleransta önemli rol oynadığı belirlenmiştir.

Chen vd. (2021) tarafından gerçekleştirilen bir çalışmada Dongxiang yaygın yabani pirinci (DXWR)'nin tuz stresi altındaki metabolizma profili, potansiyel tuz toleranslı pirinç çeşitleri için farklılaşmış metabolitlerin tespiti ve biyobelirteçlerin taranması amacıyla yüksek performanslı sıvı kromatografisi-kütle spektrometresi (HPLC-MS) ile belirlenmiştir. Tuz uygulamasıyla 90 metabolitte anlamlı değişim gözlenmiş; amino asitler ve nükleer glikozitler çoğunlukla artarken, karbonhidratlar ve organik asitler azalmıştır. Fidelerin hayatta kalma oranlarına göre seçilen tuz toleranslı ve toleranssız soylar arasında yapılan analizde, L-asparagindeki 2,59 katlık değişim en belirgin fark olarak saptanmış ve bu metabolit, tuz toleransını değerlendirmek için potansiyel bir gösterge olarak önerilmiştir.

Metabolomik yaklaşımlar, bitkilerin biyotik ve abiyotik streslere verdikleri yanıtları kapsamlı bir şekilde anlamak için güçlü araçlar sunmaktadır. Literatürdeki çalışmalar, fitohormonlar ve metabolitlerin bitki savunmasında merkezi rol oynadığını ve belirli metabolitlerin biyobelirteç olarak kullanılabileceğini göstermektedir. Kuraklık ve tuz stresi gibi abiyotik koşullarda belirlenen metabolitler, bitkilerin stres tolerans mekanizmalarını anlamak ve potansiyel toleranslı çeşitlerin belirlenmesi açısından değerli bilgiler sağlar. Bu bulgular, metabolomik analizlerin bitki biyolojisi ve tarımsal uygulamalarda stres yanıtlarının incelenmesinde kritik bir yöntem olduğunu ve gelecekte stres toleransını artırmaya yönelik stratejilerin geliştirilmesinde temel bir rol oynayacağını ortaya koymaktadır.

SONUÇ VE GELECEK PERSPEKTİF

Bitkilerde stres adaptasyonu, metabolik değişimlerin ve özellikle sekonder metabolitlerin kritik rol oynadığını ortaya koymaktadır. Biyotik ve abiyotik streslere yanıt olarak ortaya çıkan metabolik yeniden düzenlemeler, bitkilerin hayatta kalma ve adaptasyon mekanizmalarını destekler. Sekonder metabolitler, yalnızca bitki savunmasında değil, aynı zamanda tarım ve endüstride biyobelirteçler ve değerli biyokimyasal ürünler olarak potansiyel uygulama alanları sunmaktadır. Gelecekteki araştırmalar, sistem biyolojisi ve metabolik mühendislik yaklaşımları ile metabolik ağların bütüncül olarak anlaşılmasını ve stres toleransını artırmaya yönelik stratejilerin geliştirilmesini hedeflemelidir. Bu perspektif, bitki metabolomik çalışmalarının hem temel bilim hem de uygulamalı biyoteknoloji alanında önemli katkılar sağlayacağını göstermektedir.

KAYNAKÇA

- Agati, G., & Tattini, M. (2010). Multiple functional roles of flavonoids in photoprotection. *New Phytologist*, 186(4), 786–793. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2010.03269.x>
- Beşergil, B. (2025). Nükleer Magnetik Rezonans; Deneysel Yöntemler (NMR; experimental methods). http://bilsenbesergil.blogspot.com/p/blog-page_683.html (Erişim Tarihi: 15.09.2025).
- Chen, Y., Huang, W., Zhang, F., Luo, X., Hu, B., & Xie, J. (2021). Metabolomic Profiling of Dongxiang Wild Rice Under Salinity Demonstrates the Significant Role of Amino Acids in Rice Salt Stress. *Frontiers in Plant Science*, 12, 729004. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.729004>
- Cheyrier, V., Comte, G., Davies, K. M., Lattanzio, V., & Martens, S. (2013). Plant phenolics: Recent advances on their biosynthesis, genetics, and ecophysiology. *Plant Physiology and Biochemistry*, 72, 1–20. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2013.05.009>
- Coquoz, J., Buchala, A., Meuwly, P., & Métraux, J. (1995). Arachidonic acid induces local but not systemic synthesis of salicylic acid and confers systemic resistance in potato plants to *Phytophthora infestans* and *Alternaria solani*. *Phytopathology*, 85(11), 1219–1224. <https://doi.org/10.1094/Phyto-85-1219>
- de Zélicourt, A., Synek, L., Saad, M. M., Alzubaidy, H., Jalal, R., Xie, Y., & Hirt, H. (2018). Ethylene induced plant stress tolerance by *Enterobacter* sp. SA187 is mediated by 2-keto-4-methylthiobutyric acid production. *PLoS Genetics*, 14(3), e1007273. <https://doi.org/10.1371/journal.pgen.1007273>
- Dixon, R. A., & Dickinson, A. J. (2024). A century of studying plant secondary metabolism-From "what?" to "where, how, and why?". *Plant physiology*, 195(1), 48–66. <https://doi.org/10.1093/plphys/kiad596>

- Durrant, W. E., & Dong, X. (2004). Systemic acquired resistance. *Annual Review of Phytopathology*, 42, 185–209. <https://doi.org/10.1146/annurev.phyto.42.040803.140421>
- Emwas, A. H. M., Al-Talla, Z. A., Yang, Y., & Kharbatia, N. M. (2015). Gas chromatography–mass spectrometry of biofluids and extracts. In *Metabonomics: Methods and Protocols* (pp. 91-112). New York, NY: Springer New York.
- Fraenkel G. S. (1959). The raison d'être of secondary plant substances; these odd chemicals arose as a means of protecting plants from insects and now guide insects to food. *Science* (New York, N.Y.), 129(3361), 1466–1470. <https://doi.org/10.1126/science.129.3361.1466>
- Farag, M. A., Porzel, A., & Wessjohann, L. A. (2012). Comparative metabolite profiling and fingerprinting of medicinal licorice roots using a multiplex approach of GC–MS, LC–MS and 1D NMR techniques. *Phytochemistry*, 76, 60-72. <https://doi.org/10.1016/j.phytochem.2011.12.010>
- Fiehn, O. (2002). Metabolomics—the link between genotypes and phenotypes. *Plant Molecular Biology*, 48(1–2), 155–171. <https://doi.org/10.1023/A:1013713905833>
- Filgueiras, C. C., Martins, A. D., Pereira, R. V., & Willett, D. S. (2019). The ecology of salicylic acid signaling: Primary, secondary and tertiary effects with applications in agriculture. *International Journal of Molecular Sciences*, 20(23), 5851. <https://doi.org/10.3390/ijms20235851>
- Gaffney, T., Friedrich, L., Vernooij, B., Negrotto, D., Nye, G., Uknes, S., Ward, E., Kessmann, H., & Ryals, J. (1993). Requirement of salicylic acid for the induction of systemic acquired resistance. *Science*, 261(5122), 754–756. <https://doi.org/10.1126/science.261.5122.754>

- Gershenzon, J., & Dudareva, N. (2007). The function of terpene natural products in the natural world. *Nature Chemical Biology*, 3(7), 408–414. <https://doi.org/10.1038/nchembio.2007.5>
- Ghorbel, M., Brini, F., Sharma, A., & Landi, M. (2021). Role of jasmonic acid in plants: the molecular point of view. *Plant Cell Reports*, 40(1), 1471–1494.
- Guan L, Denkertb N, Eisaa A, Lehmann M, Sjutsa I, Weiberga A, Solla J, Meinecke M, Schwenkert S (2019) JASSY, a chloroplast outer membrane protein required for jasmonate biosynthesis. *Proc Natl Acad Sci USA* 116:10568–10575. <https://doi.org/10.1073/pnas.1900482116>
- Gul, V., Cetinkaya, H., Dinler, B. S., & Sefaoglu, F. (2023). Comparative analysis of biochemical content, antimicrobial and antioxidant activities of *Hypericum perforatum* L. Species is grown in Türkiye. *Pak. J. Bot*, 55(4), 1277-1285. [http://dx.doi.org/10.30848/PJB2023-4\(38\)](http://dx.doi.org/10.30848/PJB2023-4(38))
- Gür, M., Verep, D., Güney, K., Güder, A., & Altuner, E. M. (2017). Determination of Some Flavonoids and Antimicrobial Behaviour of Some Plants' Extracts. *Indian Journal of Pharmaceutical Education and Research*, 51(3), S225–S229.
- Halkier, B. A., & Gershenzon, J. (2006). Biology and biochemistry of glucosinolates. *Annual Review of Plant Biology*, 57, 303–333. <https://doi.org/10.1146/annurev.arplant.57.032905.105228>
- Howe, G. A., & Jander, G. (2008). Plant immunity to insect herbivores. *Annual Review of Plant Biology*, 59, 41–66. <https://doi.org/10.1146/annurev.arplant.59.032607.092825>
- Li, N., Han, X., Feng, D., Yuan, D., & Huang, L. (2018). Signaling Crosstalk between Salicylic Acid and Ethylene/Jasmonate in Plant Defense: Do We Understand What They Are Whispering? *International Journal of Molecular Sciences*, 20(3), 671. <https://doi.org/10.3390/ijms20030671>

- Moran, P. J., & Thompson, G. A. (2001). Molecular responses to aphid feeding in *Arabidopsis* in relation to plant defense pathways. *Plant Physiology*, 125(2), 1074–1085. <https://doi.org/10.1104/pp.125.2.1074>
- Ninkuu, V., Zhang, L., Yan, J., Fu, Z., & Yang, T. (2021). Biochemistry of terpenes and recent advances in plant protection. *International Journal of Molecular Sciences*, 22(9), 4173. <https://doi.org/10.3390/ijms22094173>
- Pieterse, C. M. J., Van der Does, D., Zamioudis, C., Leon-Reyes, A., & Van Wees, S. C. M. (2012). Hormonal modulation of plant immunity. *Annual Review of Cell and Developmental Biology*, 28, 489–521. <https://doi.org/10.1146/annurev-cellbio-092910-154055>
- Richard, T., Tamsamani, H., Cantos-Villar, E., & Monti, J. (2012). Application of LC–MS and LC–NMR Techniques for Secondary Metabolite Identification. *Advances in Botanical Research*, 67, 67–98. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-397922-3.00002-2>
- Rohloff, J. (2015). Analysis of Phenolic and Cyclic Compounds in Plants Using Derivatization Techniques in Combination with GC-MS-Based Metabolite Profiling. *Molecules*, 20(2), 3431–3462. <https://doi.org/10.3390/molecules20023431>
- Santner, A., Calderon-Villalobos, L. I. A., & Estelle, M. (2009). Plant hormones are versatile chemical regulators of plant growth. *Nature Chemical Biology*, 5(5), 301–307. doi: 10.1038/nchembio.165
- Sharma, A., Kumar, V., Sidhu, G. P. S., Kumar, R., Kohli, S., Yadav, P., & Bhardwaj, R. (2019). Abiotic stress management in plants: Role of ethylene. In P. Ahmad (Ed.), *Ethylene signaling in plants* (pp. 185–199). Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816352-7.00015-2>
- Sudisha, J., Sharathchandra, R., Amruthesh, K. N., Kumar, A., & Shetty, H. S. (2012). Pathogenesis related proteins in plant defense response. In *Plant*

- Defence: Biological Control (pp. 379–403). Springer.
https://doi.org/10.1007/978-94-007-1933-0_14
- Singh S, Singh A, Kumar S, Mittal P, Singh IK (2020) Protease inhibitors: recent advancement in its usage as a potential biocontrol agent for insect pest management. *Insect Sci* 27:186–201. <https://doi.org/10.1111/1744-7917.12641>
- Verslues, P. E., & Juenger, T. E. (2011). Drought, metabolites, and Arabidopsis natural variation: a promising combination for understanding adaptation to water-limited environments. *Current opinion in plant biology*, 14(3), 240–245. <https://doi.org/10.1016/j.pbi.2011.04.006>
- Vuran, N. E., & Türker, M. (2021). Bitki doku kültürlerinde sekonder metabolit miktarını arttırmaya yönelik uygulamalar. *International Journal of Advances in Engineering and Pure Sciences*, 33(3), 487-498. <https://doi.org/10.7240/jeps.900129>
- Yang, L., Li, B., Zheng, X. Y., Li, J., Yang, M., Dong, X., He, G., An, C., & Deng, X. W. (2015). Salicylic acid biosynthesis is enhanced and contributes to increased biotrophic pathogen resistance in Arabidopsis hybrids. *Nature Communications*, 6, 7309. <https://doi.org/10.1038/ncomms8309>
- Wang, H., Lin, J., Chang, Y., & Jiang, C.-Z. (2017). Comparative transcriptomic analysis reveals that ethylene/H₂O₂-mediated hypersensitive response and programmed cell death determine the compatible interaction of sand pear and *Alternaria alternata*. *Frontiers in Plant Science*, 8, 195. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.00195>
- Wei, X., Vrieling, K., Kim, H. K., Mulder, P. P., & Klinkhamer, P. G. (2021). Application of methyl jasmonate and salicylic acid lead to contrasting effects on the plant's metabolome and herbivory. *Plant Science*, 303, 110784. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2020.110784>

- Wikipedia (2025). Sıvı kromatografisi-kütle spektrometrisi. https://en-wikipedia-org.translate.google/wiki/Liquid_chromatography-mass_spectrometry?_x_tr_sl=en&_x_tr_tl=tr&_x_tr_hl=tr&_x_tr_pto=tc (Erişim Tarihi: 15.09.2025).
- Wink, M. (2003). Evolution of secondary metabolites from an ecological and molecular phylogenetic perspective. *Phytochemistry*, 64(1), 3–19. [https://doi.org/10.1016/S0031-9422\(03\)00300-5](https://doi.org/10.1016/S0031-9422(03)00300-5)
- Ziegler, J., & Facchini, P. J. (2008). Alkaloid biosynthesis: Metabolism and trafficking. *Annual Review of Plant Biology*, 59, 735–769. <https://doi.org/10.1146/annurev.arplant.59.032607.092730>
- Zhao SY, Ma QF, Xu X, Li GZ, Hao L (2016) Tomato Jasmonic aciddeficient mutant spr2 seedling response to Cadmium stress. *J Plant Growth Regul* 35:603–610. <https://doi.org/10.1007/s00344-015-9563-0>

BÖLÜM 6

SÜRDÜRÜLEBİLİR TARIM İÇİN AZOLLA

Gökhan ÖZDEN⁴

DOI: <https://dx.doi.org/10.5281/zenodo.17502361>

⁴ Öğr. Gör. Gökhan ÖZDEN, Kastamonu Üniversitesi Araç Rafet Vergili Meslek Yüksekokulu, Kastamonu, Türkiye.
E-mail: gozden@kastamonu.edu.tr, ORCID: 0000-0003-3831-4139

1. AZOLLA SİSTEMATİĞİ VE DAĞILIMI

Azolla cinsi, ilk olarak Lamarck tarafından 1783 yılında tanımlanmıştır (Lumpkin, ve Plucknett, 1980; Adhikari, ve ark., 2020). Uzun yıllar Azollaceae familyasına dahil edilen bu cins, günümüzde taksonomistler tarafından Salviniaceae familyasına atanmıştır (Al-saadi, Abdullah, 2016).

Morfolojik ve üreme özellikleri açısından değerlendirildiğinde, Azolla cinsi iki ana bölüm altında sınıflandırılmıştır: Euazolla ve Rhizosperma.

- Euazolla bölümünde *Azolla caroliniana*, *Azolla filiculoides*, *Azolla mexicana*, *Azolla microphylla* ve *Azolla rubra* olmak üzere beş tür yer almaktadır (Lumpkin ve Plucknett, 1980; Kumar ve ark., 2019).
- Rhizosperma bölümüne ise *Azolla pinnata* ve *Azolla nilotica* olmak üzere iki tür dahildir (Kumar ve ark., 2019; Plazinski ve ark., 1988).

Azolla'nın küresel kökeni ve dağılımı Tablo 1'de sunulmuştur (Mosha, 2018). Bu taksonomik sınıflandırma, bitkinin ekolojik adaptasyonları ve biyoteknolojik uygulamaları açısından önem taşımaktadır (Tablo 1).

Tablo 1. Azolla Türlerinin Dünya Çapındaki Dağılımı.

Cins	Tür	Kökeni ve Dağılımı
Euazolla	<i>Azolla filiculoides</i>	Güney Amerika ve Batı Kuzey Amerika'dan Alaska'ya
	<i>Azolla caroliniana</i>	Doğu Kuzey Amerika, Orta Amerika, Kuzey Güney Amerika, Karayipler, Meksika ve Batı Hint Adaları
	<i>Azolla mexicana</i>	Kuzey Güney Amerika'dan British Columbia'ya, Batı Kuzey Amerika'dan Doğu Illinois'e
	<i>Azolla microphylla</i>	Batı ve Kuzey Güney Amerika'dan Güney Kuzey Amerika ve Batı Hint Adaları'na
Rhizosperma	<i>Azolla pinnata</i>	Tropikal Afrika ve Güney Afrika, Güney Doğu Asya, Japonya ve Avustralya
	<i>Azolla nilotica</i>	Orta Afrika, Yukarı Nil Sudanı, Uganda, Tanzanya, Kongo ve Namibya

Azolla, farklı türleri ve varyeteleri arasında değişen sıcaklık toleransına sahiptir. Özellikle tropikal bölgelerde, yüksek sıcaklıklara düşük tolerans göstermesi, tarımsal uygulamalardaki kullanımını sınırlandırmaktadır. Ancak, yüksek sıcaklık koşullarına uyum sağlayabilen belirli Azolla türleri bulunmaktadır.

Yapılan bir çalışmada, farklı Azolla türleri sıcaklığa dayanıklılık seviyelerine göre optimum büyüme sıcaklıklarına göre sıralanmıştır. Türlerin sıcaklık toleransları, en dayanıklıdan en az dayanıklıya doğru şu şekilde belirtilmiştir (Cagauan ve Pullin, 1994).

Azolla mexicana > *Azolla pinnata* var. *pinnata* > *Azolla microphylla* > *Azolla pinnata* var. *imbricata* > *Azolla caroliniana* > *Azolla filiculoides*

2. AZOLLA MORFOLOJİSİ

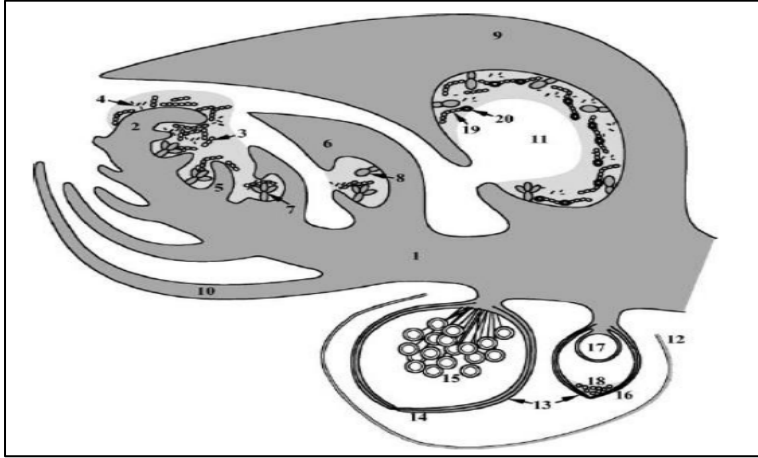
Azolla bitkisi, narin, hassas ve küçük yapraklara sahip bir morfolojik yapıya sahiptir. Bitkinin yaprakları, yaşına bağlı olarak farklı renk tonları sergilemektedir (Riaz ve ark., 2022).

Azolla, genellikle su yüzeyinde bulunur ve 3-4 cm uzunluğunda, dikey gelişen adventif köklere sahiptir. Yaprak anatomisi, üst ve alt lob olmak üzere iki ayrı bölümden meydana gelmektedir.

- Alt lobda klorofil bulunmaz ve bitkinin su yüzeyinde yüzmesini sağlayan yapısal özelliklere sahiptir.
- Üst lobda ise klorofil a ve klorofil b bulunur ve fotosentez sürecini gerçekleştiren hücresel mekanizmaları içerir. Üst lobun iç boşluklarında, Azolla ile simbiyotik yaşayan *Anabaena azollae* adlı siyanobakteri bulunmaktadır (Tyagi ve ark., 1981; Pabby ve ark., 2003; Kösesakal, 2012).

Azolla, geniş bir sıcaklık toleransına sahip olup, bazı türlerde optimum büyüme sıcaklığı 18 ile 23°C arasında değişmektedir. Ancak bazı Azolla türleri -5°C ile 35°C arasında yaşamını sürdürebilmektedir (Wagner, 1997).

Su yüzeyine aşılandıktan sonra, hızlı bir şekilde yayılmakta ve mevsimsel değişimlere bağlı olarak yaş ağırlığını 3-4 katına çıkarmaktadır (Gevrek, 2004; Gökçınar, 2010).



Şekil 1. Azolla'nın morfolojisi (boyuna kesit) (Van Hove, 1989).

Tablo 2: Azolla'nın Boyuna Kesit Tanımlanması

Sıra No	Adı	Sıra No	Adı
1	Stem (Kök, Baş)	11	Yaprak kavitesi, gaz içeren merkezi kısım ve çevresel müsilaajlı bölge
2	Stem Apex (Kök Tepe Noktası)	12	Involucre
3	Heterosistsiz Anabaena kolonileri	13	İndusyum
4	Diğer bakteriler	14	Mikrosporokarp
5	Yaprak primordiyumu	15	Mikrosporangia (Mikrosporlar)
6	Genç yaprak	16	Megasporokarp
7	Çok hücreli dallanmış tüy	17	Megaspor
8	İki hücreli yalın tüy	18	Anabaena akinetleri
9	Üst yaprak lobu	19	Anabaena'nın vejetatif hücreleri
10	Alt yaprak lobu	20	Heterosist

3. AZOLLA BESİN BİLEŞİMİ

Azolla, yüksek besin değerine sahip, karbonhidrat ve yağ içeriği düşük, sucul bir bitkidir. Hayvan yemi olarak kullanılan bu bitki, proteinler, esansiyel amino asitler (metiyonin, arginin, karoten, lizin), vitaminler (A vitamini, B₁₂ vitamini, β -karoten) ve mineraller (kalsiyum, fosfor, potasyum, demir, magnezyum) açısından oldukça zengindir (Mahanthesh ve ark., 2018; Rahal, 2019).

Kuru ağırlık bazında, Azolla'nın bileşimi %25 ile %35 protein, %10 ile %15 mineral içeriği ve %7 ile %10 oranında amino asitler, biyoaktif maddeler ve biyopolimerlerin bir kombinasyonu şeklinde belirlenmiştir (Pillai ve ark., 2002).

Besin profili açısından değerlendirildiğinde, Azolla'nın hayvansal beslenme, biyoteknoloji ve sürdürülebilir tarım uygulamalarında önemli bir biyokütle kaynağı olduğu görülmektedir.

Son dönemlerde gerçekleştirilen çalışmalar, Azolla'nın balık diyetlerinin önemli bir bileşeni olarak hem akvaryum hem de kapalı tank sistemlerinde etkili bir biçimde kullanılabildiğini göstermiştir. (Namiq ve ark., 2021).

Tablo 3: Azolla'nın Mineral Bileşimi

Kimyasal Bileşim (%)		ADF	35,11
Kuru Madde	35,98	HC	11,42
Organik Madde	82,01	Mineral Bileşim	
Ham Protein	23,58	Ca (%)	3,73
Ether Ekstrakt	3,75	P (%)	1,66
Ham Yağ	12,88	Zn (ppm)	133,98
Ham Lif	15,96	Cu (ppm)	62,08
NFE	44,13	Mn (ppm)	1.232,32
Toplam Kül	14,02	Fe (ppm)	1.386,98
NDF	46,46		

Çeşitli bilimsel çalışmalar doğrultusunda elde edilen veriler, Azolla'nın ortalama mineral bileşimi ve kimyasal kompozisyonunu detaylandırmaktadır. Bu bilgiler Tablo 3'te verilmiş olup, Azolla'nın besin değeri, biyo yararlanımı ve sucul canlılar üzerindeki etkilerinin değerlendirilmesinde değerli bir kaynak niteliği taşımaktadır.

Azollaceae familyasına ait yedi tür bulunmaktadır ve bu türlerin kimyasal bileşimleri ile besin içerikleri birbirinden farklılık göstermektedir. Bu farklılıklar, Azolla'nın gübre, yem ve diğer tarımsal faaliyetlerde kullanımını çeşitlendirmektedir.

Tablo 4. Azolla Spp. Türlerinin Kullanım Alanları

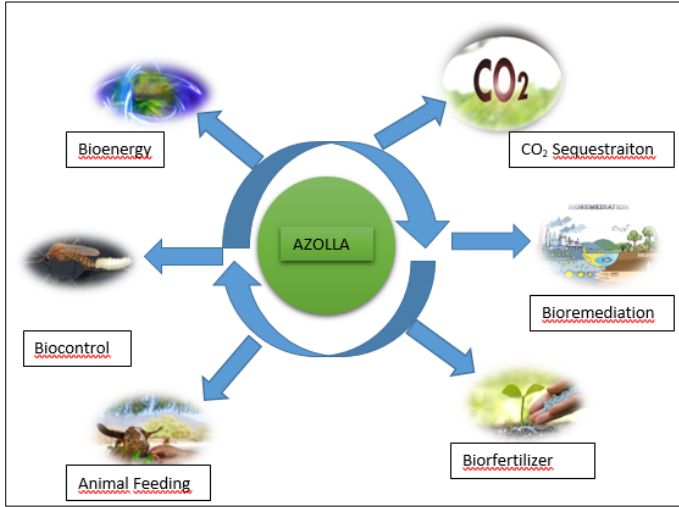
Tür	Tarımsal Faaliyetler
<i>Anabaena azollae</i>	• Toprağın fiziksel özelliklerini artırır.
<i>Azolla pinnata</i>	• Düşük lignin içeriği sayesinde hayvanlarda sindirim kolay olmakta ve hayvan yemi olarak kullanılmaktadır. • Yüksek organik madde ve ham protein nedeniyle bitki gelişimine olumlu etkide bulunmaktadır. • Yüksek protein içeriği nedeniyle balık yemi olarak kullanılmaktadır.
<i>Azolla filiculoides</i>	• Balıkların büyümesi ve bağışıklık sistemi üzerinde pozitif bir etki göstermektedir. • Büyük baş hayvan yeminde kullanılmakta ve süt veriminde artış sağlamaktadır.
<i>Azolla caroliniana</i>	• Yüksek protein içeriği sayesinde hayvan yemi olarak tercih edilmektedir.
<i>Azolla circinata</i>	• Protein içeriği yüksek olması nedeniyle balık yemi olarak kullanılmaktadır.
<i>Azolla rubra</i>	• Protein içeriği yüksek olması nedeniyle balık yemi olarak kullanılmaktadır.
<i>Azolla mexicana</i>	• Protein içeriği yüksek olması nedeniyle balık yemi olarak kullanılmaktadır.

Türlere göre belirlenen spesifik kullanım alanları, Tablo 4'te detaylandırılmış olup, ilgili türlerin tarımsal sürdürülebilirlik, biyogübre ve hayvansal beslenme açısından değerlendirilmesine yönelik önemli bilimsel veriler sağlamaktadır (Korsa ve ark., 2024).

4. FARKLI KULLANIM ALANLARI İÇİN AZOLLA BİTKİSİ

Azolla, sucul bir bitki olarak sürdürülebilir ekosistemlerin güçlendirilmesinde kritik bir görev üstlenmektedir. Çeşitli tarımsal ve çevresel uygulamalarda kullanılan Azolla (Resim 2), aşağıdaki alanlarda değerlendirilmektedir:

- **Tarımda gübre olarak kullanımı:** Azolla'nın atmosferik azotu fikse etme yeteneği, tarımsal verimliliği artırarak kimyasal gübre kullanımını azaltabilir.
- **Sera gazı emisyonlarının azaltılması:** Karbonu yüksek oranda tutma yeteneğiyle çevresel sürdürülebilirliğe anlamlı bir katkıda bulunmaktadır.



Şekil 2. Azola bitkisinin farklı kullanım alanları (Verma ve ark., 2022).

- **Hayvansal yem olarak değerlendirilmesi:** Zengin besin içeriği nedeniyle çeşitli hayvan türleri için yem kaynağı olarak kullanılmaktadır.

- **Su kalitesinin iyileştirilmesi:** Su yüzeyini kaplayarak ağır metallerin biyoremediasyonunu destekler ve ekosistem sağlığını korur.
- **Biyolojik mücadele:** Yabancı otların yayılmasını önleme ve sivrisinek popülasyonunun kontrol altına alınması gibi ekolojik hizmetler sunmaktadır (Korsa ve ark., 2024; Verma ve ark., 2022)

4.1.Hayvan Yemi Olarak Azolla

Azolla, yüksek besin içeriği ve çeşitli ekosistem hizmetleri sayesinde tarım ve biyoteknoloji alanlarında kayda değer bir öneme sahiptir. Yüksek protein oranı, ekonomik üretim potansiyeli, ağır metallerin biyoremediasyonu, atmosferik azotun fiksasyonu ve hayvan yemi olarak değerlendirilmesi, bu bitkinin çok yönlü kullanım olanaklarını ortaya koymaktadır.

Besin bileşimi açısından incelendiğinde, Azolla; proteinler, esansiyel amino asitler (metiyonin, arginin, karoten, lizin), vitaminler (A vitamini, B₁₂ vitamini, beta karoten) ve büyümeyi teşvik eden biyolojik ara bileşenler bakımından zengin bir içeriğe sahiptir. Bunun yanı sıra, kalsiyum, fosfor, potasyum, demir, bakır ve magnezyum gibi temel mineralleri de bünyesinde barındırmaktadır.

Azolla, besin içeriği açısından oldukça zengin bir sucul bitki olup yüksek protein ve düşük lignin içeriği sayesinde hayvan yemi olarak dikkat çekmektedir. Ayrıca, vitaminler (A vitamini, B₁₂ vitamini, β -karoten) ve kalsiyum (Ca), fosfor (P), potasyum (K), demir (Fe), bakır (Cu) ve magnezyum (Mg) gibi önemli mineraller bakımından da yüksek besin değerine sahiptir (Korsa ve ark., 2024; Mathur ve ark., 2013; Bhaskaran, Kannapan, 2015; Kamaruddin ve ark., 2019).

Azolla, büyükbaş, küçükbaş, kümes hayvanları ve balıkların büyüme ve gelişim performanslarını destekleyen, ekonomik açıdan avantajlı bir yem kaynağı olarak değerlendirilmektedir. Yapılan araştırmalar, endüstriyel yem yerine %15-25 oranında Azolla kullanımının süt verimini %7-13 oranında

artırdığını göstermektedir (Korsa ve ark., 2024; Kumar ve ark., 2020; Abo Rajab Jr, 2022).

Azolla, yüksek protein içeriği ve besin değerleri sayesinde hayvansal beslenme sistemlerinde önemli bir yem katkı maddesi olarak değerlendirilmektedir. Yapılan araştırmalar, endüstriyel yemlere %20 oranında Azolla ilavesinin ördek yumurtalarında verim, besin içeriği ve ağırlık açısından iyileşme sağladığını ortaya koymuştur (Swain ve ark., 2018).

Ayrıca, Azolla'nın hayvan beslenmesinde tercih edilme nedenlerinden biri, zengin protein içeriğinin büyüme ve gelişim performansına olan olumlu etkileridir.

Yapılan bir çalışmada, yemlere %2,5-5 oranında Azolla eklenebileceğini ve özellikle %2,5 oranında ilave edilmesinin büyüme oranı ile biyokimyasal parametreler açısından daha etkili sonuçlar sağladığını göstermektedir (Rana, 2017).

Sonuç olarak, endüstriyel yemlere %30-70 oranında Azolla ilavesi süt verimi, yumurta verimi, büyüme ve gelişim, yem rasyonu ve biyokimyasal parametreler üzerinde olumlu etkiler yaratmaktadır.

4.1 Biyogübre Olarak Azolla

Azolla, yüksek biyolojik azot fiksasyon kapasitesi sayesinde gübre olarak uygulandığında, topraktaki besin elementlerinin bitkiler tarafından alınabilirliğini artırmakta; aynı zamanda besin döngüsünü destekleyerek toprağın kimyasal ve fiziksel özelliklerinin iyileştirilmesine katkı sağlamaktadır.

Azolla gübrelemesinin pirinç verimini %15-19 oranında artırdığı, bitki büyüme parametrelerine olumlu etki ettiği ve pirinç zararlılarından koruma sağladığı belirlenmiştir (Feyisa ve ark., 2013). Benzer biçimde, uygulanan Azolla gübresinin tahıl veriminde %51–57, biyolojik verimde ise %21–37 oranında artış sağladığı belirlenmiştir. (Altai ve ark., 2019).

Atmosferik azotu fiksasyon yeteneği sayesinde Azolla, biyogübreler içerisinde stratejik bir konuma sahiptir. Azot tutma oranı %30-60 kg N/ha olup, kimyasal gübre kullanımını %25 oranında azaltarak sürdürülebilir tarıma katkıda bulunmaktadır (Malyan ve ark., 2019).

Bitki büyüme ve gelişimini destekleyen azot kaynağı olarak yeşil gübre şeklinde kullanım potansiyeli taşımaktadır (Yadav, Lakshman, 2022). Özellikle Azolla microphylla, içerdiği azot, potasyum, fosfor ve demir sayesinde mikroalg popülasyonunun artışı teşvik edebildiği belirlenmiştir (Korsa ve ark., 2024; Putra ve ark., 2022).

Yüksek organik madde içeriği sayesinde toprak düzenleyici olarak kullanılabilen Azolla, biyogübre olarak uygulandığında bitki verimi ve kaliteyi artırıcı etkiler göstermektedir (Korsa ve ark., 2024).

4.2 Karbon Tutucu Olarak Azolla

Azolla, atmosferik karbon dioksit (CO₂) tutma kapasitesi açısından önemli bir biyolojik kaynaktır. Büyüme hızı ve yüksek biyokütle üretim kapasitesi sayesinde Azolla, fotosentez süreci boyunca yüksek miktarda karbondioksit (CO₂) absorbe ederek çevresel sürdürülebilirliğe anlamlı düzeyde katkıda bulunmaktadır.

Azolla'nın özellikle endüstriyel alanlara yakın bölgelerde yetiştirilmesi, karbon ayak izinin azaltılmasına yönelik etkili bir strateji olarak değerlendirilmektedir. Ayrıca, biyogaz ve kompost üretimi gibi uygulamalar aracılığıyla karbonun uzun vadeli depolanmasını desteklemektedir (Hamdan, Hour, 2022).

Yapılan araştırmalar, Azolla filiculoides türünün birçok bitkiden daha fazla CO₂ tutabildiğini ortaya koymuştur. Bu türün karbon tutma kapasitesinin 32,5 ton/hektar (t/ha) seviyesinde olduğu belirtilmiştir. Yüksek karbondioksit (CO₂) absorpsiyon kapasitesi, Azolla'yı iklim değişikliğiyle mücadelede doğal bir çözüm aracı olarak öne çıkarmaktadır. Atmosferik CO₂'yi etkin biçimde

emme yeteneği sayesinde, Azolla karbon yönetimi ve ekolojik sürdürülebilirlik bağlamında önemli bir biyolojik kaynak olarak değerlendirilmektedir (Anonim, 2025a).

Bununla birlikte, atmosferik azotu fiksasyon yeteneği sayesinde biyogübre ve toprak düzenleyici olarak kullanımı, toprak verimliliğinin artırılmasına ve ürün kalitesinin iyileştirilmesine katkı sağlamaktadır. Bu özellikleri sayesinde, Azolla'nın kimyasal gübre üretimini ve kullanımını azaltarak sürdürülebilir tarımsal verimliliği desteklediği belirlenmiştir (Miller, Spoolman, 2012).

Karasal ekosistemlerde, Azolla kullanımı sayesinde atmosferdeki karbon yoğunluğunun %20-30 oranında azaltılabildiği belirlenmiştir. Bu etkiler, Azolla'nın hızlı büyüme kapasitesi, yüksek biyokütle üretimi ve karbon tutma mekanizmaları ile ilişkilidir (Ussiri, Lal, 2017).

Geniş karasal ekosistemler, özellikle ormanlar, insan kaynaklı karbon dioksit (CO₂) salınımını emerek atmosferdeki karbon seviyelerini dengeleyici bir rol oynamaktadır (Favero ve ark., 2020).

Azolla kullanımının %50 oranında artırılması durumunda, karbon emisyonlarının %35 oranında, sera gazlarından nitroz oksitin %22,32, metanın %4,74 oranında azalabileceği belirlenmiştir. Bu azalmanın, iklim değişikliği üzerinde %28,47 oranında düşüş sağladığı tespit edilmiştir (Espino, Bellotindos, 2020).

4.3 Biyoenerji (Biyoyakıt) Olarak Azolla

Azolla, yüksek biyokütle üretim potansiyeli ve siyanobakterilerle kurduğu simbiyotik ilişki sayesinde atmosferik azotu fiksleyebilme kapasitesine sahip bir sucul bitki türüdür. Bu özelliği nedeniyle biyolojik gübre olarak kullanılmakta, tarımsal verimliliği artırarak kimyasal gübre kullanımını azaltmaktadır.

Yüksek karbon tutma kapasitesi sayesinde çevresel sürdürülebilirliğe anlamlı katkılar sunan Azolla, aynı zamanda hidrojen gazı üretimi açısından temiz enerji kaynağı olarak değerlendirilmektedir. Bu özellikleri, Azolla'yı biyoenerji alanında yüksek potansiyele sahip bir biyokütle kaynağı konumuna taşımaktadır (Wagner, 1997).

Azolla, yüksek biyokütle üretimi ve siyanobakteri ile simbiyotik yaşamı sayesinde atmosferik azot fikse etme kapasitesine sahip sucul bir bitkidir. Bu özellik, onu biyolojik gübre olarak tarımsal üretimde önemli bir bileşen haline getirmektedir.

Yüksek karbon tutma kapasitesi dolayısıyla çevresel sürdürülebilirliğe katkı sunan Azolla, hidrojen gazı üretimi bakımından ise potansiyel bir temiz enerji kaynağı olarak değerlendirilmektedir. Bu yönleriyle biyoenerji sektörü açısından dikkate değer bir biyolojik kaynak niteliği taşımaktadır (Raja ve ak., 2012).

Mikroalgler, yenilenebilir enerji kaynağı olarak değerlendirilmekte ve biyodizel üretiminde etkin bir biyolojik hammadde olarak kullanılmaktadır. Ancak, hasat sürecinde yüksek enerji tüketimi ve ekonomik maliyetlerin yüksek olması, mikroalglerin sürdürülebilir bir enerji kaynağı olarak kullanımını sınırlandıran temel faktörler arasında yer almaktadır.

Azolla, mikroalglerle oranla daha düşük lipid içeriğine sahip olmasına karşın, sunduğu ekolojik avantajlar doğrultusunda potansiyel bir enerji kaynağı olarak değerlendirilmektedir. Özellikle:

- Hızlı büyüme oranı,
- Sucul ekosistemlerde biyoremediasyon kapasitesi,
- Düşük enerji tüketimli hasat süreci,

gibi özellikleri nedeniyle sürdürülebilir biyoyakıt üretimi açısından dikkate değer bir alternatif oluşturmaktadır (Chisti, 2007; Golzary ve ark., 2021).

4.4 Biyoremediasyon Olarak Azolla

Biyoremediasyon, endüstriyel süreçler, petrol sızıntıları ve diğer antropojenik veya doğal kirlilik kaynaklarından kaynaklanan toksik bileşenlerin çevresel yayılımını önlemek ve azaltmak amacıyla kullanılan biyoteknolojik bir arıtma yöntemi olarak tanımlanmaktadır (Anonim, 2025b). Bu süreçte, mikroorganizmalar, bitkiler ve enzimler, kirleticilerin biyolojik olarak parçalanmasını veya dönüştürülmesini sağlayarak ekosistem sağlığını koruma ve iyileştirme işlevi görmektedir (Uğurlu ve ark., 2019).

Civa, kadmiyum, arsenik ve kurşun gibi ağır metaller, oldukça düşük konsantrasyonlarda dahi ekosistemler üzerinde toksik etkilere yol açabilmektedir. Bu metaller, doğal süreçler veya antropojenik faktörler ile çevreye yayılım göstererek toprak, su ve hava kalitesini olumsuz yönde etkilemesinin yanı sıra bitkilerde toksik madde olarak birikerek insan sağlığını ciddi anlamda tehdit etmektedir (Kul ve ark., 2021).

Özellikle endüstriyel ve fabrikasyon kaynaklı atıklar, uzun vadede ekosistemlerin kimyasal dengesini bozarak çevresel sürdürülebilirliği ciddi biçimde tehdit etmektedir (CPCB, 2008; Sood ve ark., 2012).

Antropojenik emisyonlar ve çevresel bozulma faktörleri, bitki bazlı biyoremediasyon yöntemleri ile hafifletilebilir. Bu bağlamda, sucul bir eğrelti otu olan Azolla, kirleticileri ortamdaki uzaklaştırma kapasitesi sayesinde etkili bir iyileştirici ajan olarak değerlendirilmektedir. Azolla'nın ağır metal absorpsiyonu, özellikle su ekosistemlerinde biyoremediasyon süreçlerini hızlandırarak ekolojik restorasyonu desteklemektedir (Valdivia-Rivera ve ark., 2021).

4.5 Biyokontrol Olarak Azolla

Azolla bitkisi, biyokontrol açısından çeşitli ekolojik ve tarımsal avantajlar sunmaktadır. Bu avantajlar arasında zararlı yosunlar ve su

bitkilerinin kontrolü, doğal zararlı yönetimi, su kalitesinin iyileştirilmesi ve toprak sağlığının desteklenmesi yer almaktadır.

Azolla, su yüzeyini kaplayarak zararlı mikroorganizmaların, böceklerin ve istilacı bitkilerin etkisini azaltırken, ağır metal birikimini ve kimyasal gübre kullanımını düşürerek çevresel sürdürülebilirlik ve tarımsal verimliliğe önemli katkılar sağlamaktadır (Kütük, Akpınar, 2024).

Azolla, yaygın olarak sivrisinek eğrelti otu olarak bilinen sucul bir bitkidir. Su yüzeyini tamamen kaplama özelliği sayesinde sivrisineklerin yumurtlamasını, larvaların gelişimini ve üreme popülasyonunu %95'ten fazla azaltabilmektedir. Bu etkisi, sivrisinek kaynaklı hastalıkların önlenmesine önemli ölçüde katkı sağlamaktadır (Anonim, 2025a).

Hindistan'da gerçekleştirilen araştırmalar, su yüzeyinin tamamen Azolla ile kaplanmasının sivrisinek popülasyonunda anlamlı düzeyde azalmaya neden olduğunu ortaya koymuştur (Rajendran, Reuben, 1991).

Ayrıca, Azolla'nın kümes hayvanları için yem olarak kullanımı, çevresel koşulların iyileştirilmesine katkı sağlamakta, koku oluşumunu azaltarak sinek ve sivrisinek popülasyonlarının kontrol altına alınmasına yardımcı olmaktadır (Mahanthesh ve ark., 2018).

Bilimsel bir araştırmada, Azolla pinnata bitki özütünün belirli konsantrasyonlarda uygulandığında biyolojik kontrol mekanizması olarak etkili olduğunu ortaya koymaktadır. Yapılan deneysel çalışmalar, 1000–1500 ppm konsantrasyon aralığında uygulandığında söz konusu maddenin letal etki gösterdiğini ortaya koymuştur. Bu bulgular, hastalık taşıyan organizmaların popülasyonlarının kontrol altına alınmasında ve çevresel sürdürülebilirlik açısından biyolojik mücadele yöntemlerinin geliştirilmesinde önemli bir temel oluşturmaktadır. Gelecek yıllarda, spesifik konsantrasyonlarda Azolla pinnata bitki özütünün uygulanması, tarımsal ve ekolojik sistemlerin korunmasına yönelik alternatif çözümler sunabilir (Ravi ve ark., 2018).

5. SONUÇ

Azolla, sağladığı çok yönlü ekolojik ve ekonomik katkılar doğrultusunda sürdürülebilir tarım sistemleri içerisinde stratejik öneme sahip biyolojik bir kaynak olarak ön plana çıkmaktadır. Bunlar;

5.1 Tarımsal ve Ekolojik Faydaları

- Yüksek biyokütle üretimi ile verimli bir bitkidir.
- *Anabaena azollae* ile simbiyotik bir ilişki geliştirerek atmosferik azotun toprağa biyolojik olarak kazandırılmasını sağlar.
- Kimyasal gübre ihtiyacını azaltır, üretim maliyetlerini düşürür.
- Toprak organik maddesini artırarak toprak sağlığını iyileştirir.
- Zararlı organizmalara karşı doğal bir bariyer görevi görür.

5.2 İklim ve Su Yönetimi Katkıları

- Yüksek fotosentetik kapasitesi ile karbon fiksasyonu sağlar.
- İklim değişikliği ile mücadelede sera gazı salınımını azaltır.
- Su yüzeyini kaplayarak buharlaşmayı azaltır, sulama verimliliğini artırır.
- Işık geçirgenliğini sınırlayarak alg patlamalarını önler, su kalitesini korur.

5.3 Biyoçeşitlilik ve Ekosistem Desteği

- Sulak alanlarda mikrobiyal topluluklar, omurgasızlar ve balıklar için habitat sağlar.
- Sivrisinek larvalarının gelişimini baskılayarak hastalıkların yayılımını sınırlar.
- Yabancı otların gelişimini engelleyerek pestisit kullanımını azaltır.

5.4 Sosyal ve Ekonomik Katkılar

- Düşük maliyetli ve çevre dostu olmasıyla küçük ölçekli üreticiler için uygundur.
- Kırsal kalkınma stratejilerinde değerlidir.
- Ağır metal ve toksik madde içeren suları biyolojik olarak arındırabilir.
- Çevresel restorasyon projelerinde kullanılabilir.

Sonuç olarak, Azolla'nın sürdürülebilir tarım alanındaki faydaları ve kullanımının yaygınlaştırılması, çevresel yararların ötesinde ekonomik kalkınma ve toplumsal refahın artırılmasına da önemli ölçüde katkı sağlamaktadır. Özellikle küçük ölçekli üreticilere yönelik düşük maliyetli, çevreye duyarlı ve yenilenebilir bir kaynak olması, onu kırsal kalkınma stratejilerinde değerli kılmaktadır. Ayrıca ağır metal ve toksik madde birikimi bulunan sucul ortamların biyolojik olarak arındırılmasında kullanılabilmesi, Azolla'yı çevresel restorasyon projelerinde sürdürülebilir ve uygulanabilir bir çözüm alternatifi olarak öne çıkarmaktadır. Bu bağlamda, Azolla hem akademik literatürde hem de uygulamalı tarım pratiklerinde kapsamlı biçimde ele alınması gereken çok işlevli bir biyolojik ajan niteliği taşımaktadır.

KAYNAKÇA

- Abo Rajab Jr, A. (2022). Azolla Cultivation In Lebanon.
- Adhikari, K., Bhandari, S., & Acharya, S. (2020). An overview of azolla in rice production: a review. *Rev Food Agric*, 2(1), 04-08.
- Al-Saadi, S. A., Abdullah, J. N., Al-Mayah, S. A., Al-Saadi, A. A. M., & Abdulla, J. N. (2016). A New Generic Record (Azolla, Salviniaceae) to the Aquatic Pteridoflora of activities of Azolla pinnata extracts against Aedes (Diptera: Culicidae). *PLoS.*, One, 13, 1-18.
- Altai, D. S., Alhasany, A. R., Noaema, A. H., Idan, W. J., & Al-Farhan, I. M. (2019). Effectiveness of Azolla extract in reducing use of mineral fertilizers (NPK) and increasing productivity of wheat under new reclaimed soils. *Journal of Plant Production*, 10(10), 859-866.
- Anonim, 2025a. <https://theazollafoundation.org/azollas-uses/as-a-co2-sequester/> Erişim Tarihi:25.05.2025.
- Anonim, 2025b, <https://biyorem.com/biyoremediasyon.html> Erişim Tarihi: 03.0.2025, 13.59
- Bhaskaran, S. K., & Kannapan, P. (2015). Nutritional composition of four different species of Azolla. *European Journal of Experimental Biology*, 5(3), 6-12.
- Cagauan, A. G., & Pullin, R. S. V. (1994). Azolla in aquaculture: past, present and future.
- Central Pollution Control Board. 2008. Status of water quality in India 2007, New Delhi, India: CPCB.
- Chisti, Y. (2007). Biodiesel from microalgae. *Biotechnology advances*, 25(3), 294-306.
- Espino, M. T. M., & Bellotindos, L. M. (2020). Reduction of Greenhouse Gas Emissions of Azolla pinnata Inclusion in Backyard Chicken Production. *Nature Environment & Pollution Technology*, 19.

- Favero, A., Daigneault, A., & Sohngen, B. (2020). Forests: Carbon sequestration, biomass energy, or both?. *Science advances*, 6(13), eaay6792.
- Feyisa, T., Amare, T., Adgo, E. A., & Selassie, Y. G. (2013). Symbiotic blue green algae (Azolla): A potential bio fertilizer for paddy rice production in Fogera Plain, northwestern Ethiopia. *Ethiopian Journal of Science and Technology*, 6(1), 1-11.
- Gevrek, M. N. (2004). Akdeniz İklim Kuşağında Azola (Azolla mexicana-2026) Bitkisinin Aşılama Zamanı İle Kuru Madde Üretimi Arasındaki İlişkisi. *Journal of Agriculture Faculty of Ege University*, 41(2).
- Golzary, A., Hosseini, A., & Saber, M. (2021). Azolla filiculoides as a feedstock for biofuel production: cultivation condition optimization. *International Journal of Energy and Water Resources*, 5, 85-94.
- Gökçınar, N. C. (2010). Şabot (bıyıklı balık)(Tor grypus h. 1843) balığı yavru yemlerine balık unu yerine farklı oranlarda azolla (azolla sp.) ilavesinin büyüme parametrelerine etkisi. *Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Su Ürünleri Anabilim Dalı*.
- Hamdan, H. Z., & Hourri, A. F. (2022). CO2 sequestration by propagation of the fast-growing Azolla spp. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(12), 16912-16924.
- Kamaruddin, N. A., Yusuf, N. M., Ishak, M. F., & Kamarudin, M. S. (2019). Study on chemical composition of Azolla filiculoides and Hydrilla verticillata. *Journal of Agrobiotechnology*, 10(1S), 68-74.
- Korsa, G., Alemu, D., & Ayele, A. (2024). Azolla plant production and their potential applications. *International Journal of Agronomy*, 2024(1), 1716440.
- Kul, S., Gul, V., & Cengiz, I. (2021). Toprak ve Bitkilerde Ağır Metal Kirliliğinin Araştırılması: Bayburt İli Örneği. *J. Anatol. Environ. Anim. Sci*, 6(2), 195-203.

- Kumar, A. S., Murugesan, S. V. M., & Balamurugan, P. (2020). Feeding of Azolla as a green fodder feed supplement on productive performance and milk composition of crossbred dairy cows in Theni District of Tamil Nadu, India. *Int J Curr Microbiol Appl Sci*, 9.
- Kumar, U., Nayak, A. K., Panneerselvam, P., Kumar, A., Mohanty, S., Shahid, M., ... & Nayak, P. K. (2019). Cyanobiont diversity in six Azolla spp. and relation to Azolla-nutrient profiling. *Planta*, 249, 1435-1447.
- Kösesakal, T. (2012). Azolla–Anabaena ortaklığının biyolojisi. *Türk Bilimsel Derlemeler Dergisi*, (2), 38-43.
- Kütük, M., & Akpınar, A. (2024). *Fen ve Matematik Bilimlerinde Güncel Araştırmalar-2024*. Livre de Lyon.
- Lumpkin, T. A., & Plucknett, D. L. (1980). Azolla: botany, physiology, and use as a green manure. *Economic Botany*, 34(2), 111-153.
- Mahanthesh, M., Hebbar, A., Prasad, K., Barman, D., Badariprasad, P., Pradeepnag, B., & Narappa, G. (2018). Impact of Azolla (*Azolla pinnata*) as a feed ingredient in commercial broiler production. *Int. J. Livest. Res*, 8(4), 212-218.
- Malyan, S. K., Bhatia, A., Kumar, S. S., Fagodiya, R. K., Pugazhendhi, A., & Duc, P. A. (2019). Mitigation of greenhouse gas intensity by supplementing with Azolla and moderating the dose of nitrogen fertilizer. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 20, 101266.
- Mathur, G. N., Sharma, R., & Choudhary, P. C. (2013). Use of Azolla (*Azolla pinnata*) as cattle feed supplement. *Journal of Krishi Vigyan*, 2(1), 73-75.
- Miller, G. T., & Spoolman, S. (2012). *Living in the Environment*.
- Mosha, S. S. (2018). A review on significance of Azolla meal as a protein plant source in finfish culture. *Journal of Aquaculture Research and Development*, 9(7), 533-544.

- Namiq, K., Mahmood, S. S., Abdulrahman, N. M., Hassan, B. R., Sadraddin, A. A., & Rashed, R. M. (2021). Effect of feeding common carp (*Cyprinus carpio* (Linnaeus, 1758)) with water fern (*Azolla filiculoides* (Lam.)) on its fillet quality. *Рибогосподарська наука України*, (1), 94-111.
- Pabby, A., Prasanna, R., Nayak, S., & Singh, P. K. (2003). Physiological characterization of the cultured and freshly isolated endosymbionts from different species of *Azolla*. *Plant Physiology and Biochemistry*, 41(1), 73-79.
- Pillai, P. K., Premalatha, S., & Rajamony, S. (2002). *Azolla*: A suitable feed for livestock. *LEISA India*, 4(1).
- Plazinski, J., Franche, C., Liu, C. C., Lin, T., Shaw, W., Gunning, B. E. S., & Rolfe, B. G. (1988). Taxonomic status of *Anabaena azollae*: an overview. *Plant and soil*, 108(1), 185-190.
- Putra, M. A. K., Nurrachmi, I., & Effendi, I. (2022). Population growth and chlorophyll content of *Spirulina platensis* fertilized with *Azolla microphylla*. *Tropical Marine Environmental Sciences*, 1(1), 1-7.
- Rahal, A. (2019). *Azolla*-emerging animal feed. *International Research Journal of Natural and Applied Sciences*.
- Raja, W., Rathaur, P., John, S. A., & Ramteke, P. W. (2012). *Azolla*-*Anabaena* Association and Its Significance In Supportable Agriculture. *Hacettepe Journal of Biology and Chemistry*, 40(1), 1-6.
- Rajendran, R., & Reuben, R. (1991). Evaluation of the water fern *Azolla microphylla* for mosquito population management in the rice-land agro-ecosystem of south India. *Medical and Veterinary Entomology*, 5(3), 299-310.
- Rana, D., Katoch, S., Mane, B. G., Rani, D., & Sankhyan, V. (2017). Biological evaluation of *Azolla* in ration of commercial chicken broiler. *Journal of Animal Research*, 7(3), 601-607.

- Ravi, R., Husna Zulkrin, N. S., Rozhan, N. N., Nik Yusoff, N. R., Mat Rasat, M. S., Ahmad, M. I., ... & Mohd Amin, M. F. (2018). Evaluation of two different solvents for *Azolla pinnata* extracts on chemical compositions and larvicidal activity against *Aedes albopictus* (Diptera: Culicidae). *Journal of Chemistry*, 2018(1), 7453816.
- Riaz, A., Khan, M. S., Saeed, M., Kamboh, A. A., Khan, R. U., Farooq, Z., ... & Farid, M. U. (2022). Importance of *Azolla* plant in poultry production. *World's Poultry Science Journal*, 78(3), 789-802.
- Sood, A., Uniyal, P. L., Prasanna, R., & Ahluwalia, A. S. (2012). Phytoremediation potential of aquatic macrophyte, *Azolla*. *Ambio*, 41(2), 122-137.
- Swain, B. K., Naik, P. K., Sahoo, S. K., Mishra, S. K., & Kumar, D. (2018). Effect of feeding of *Azolla* (*Azolla pinnata*) on the performance of White Pekin laying ducks. *International Journal of livestock research*, 8(8), 248-253.
- Tyagi, V. V. S., Ray, T. B., Mayne, B. C., & Peters, G. A. (1981). The *Azolla*-*Anabaena azollae* relationship: XI. Phycobiliproteins in the action spectrum for nitrogenase-catalyzed acetylene reduction. *Plant physiology*, 68(6), 1479-1484.
- Ussiri, D. A., & Lal, R. (2017). Carbon sequestration for climate change mitigation and adaptation (pp. 287-325). Cham, Switzerland: Springer International Publishing.
- Uğurlu, E., Duysak, Ö., & Şereflişan, (2019). H. BİYOREMEDİASYON, BİYOREMEDİASYON TEKNİKLERİ VE SUCUL ORTAMDA KULLANIMI.
- Valdivia-Rivera, S., Ayora-Talavera, T., Lizardi-Jiménez, M. A., García-Cruz, U., Cuevas-Bernardino, J. C., & Pacheco, N. (2021). Encapsulation of microorganisms for bioremediation: Techniques and carriers. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 20(3), 815-838.

- Verma, G., Prakriti, K. A., Babu, S., Singh, R., Gudade, B. A., Bhatt, M., ... & Yadav, N. C. (2022). Implications and future prospects of Azolla as a low-cost organic input in agriculture. *Agriculture*, 1(6), 1-7.
- Van Hove, C. (1989). Azolla: and its multiple uses with emphasis on Africa.
- Wagner, G. M. (1997). Azolla: a review of its biology and utilization. *The Botanical Review*, 63(1), 1-26.
- Yadav, A. S., & Lakshman, K. M. (2022). Effect of Azolla on Crops and Weeds.

BÖLÜM 7

YEREL POPÜLASYONLARIN ÖNEMİ: TİR EKMEKLİK BUĞDAYI ÖRNEĞİ

Halit KARAGÖZ¹

DOI: <https://dx.doi.org/10.5281/zenodo.17502364>

¹Dr., T.C. Tarım ve Orman Bakanlığı, Doğu Anadolu Tarımsal Araştırma Enstitüsü Müdürlüğü, Erzurum, Türkiye
E-mail: halit.karagoz@tarimorman.gov.tr, ORCID ID: 0000-0002-4055-7984

1. GİRİŞ

Buğday, dünya genelinde en yaygın şekilde tüketilen, üretilen ve stoklanan temel tahıllardan biridir. Batı Avrupa'dan Hindistan'ın kuzeyine, İskandinavya ve Rusya'dan Mısır'a kadar uzanan geniş bir coğrafyada temel besin maddesi olarak önemli bir yer tutmaktadır (Atar, 2017). Buğday tarımının kökeni Neolitik Çağ'a yani yaklaşık 10.000 yıl öncesine dayanmaktadır. Tarıma alınan ilk buğday türleri diploid (AA genomlu) ve tetraploid (AABB genomlu) formlardır. Ekmeklik buğday olarak bilinen hekzaploid (AABBDD genomlu) tür ise yaklaşık 9.000 yıl önce ortaya çıkmış ve özellikle Yakın Doğu'da yaygınlaşmıştır (Huen ve ark., 1997; Nesbitt, 1998; Dubcovsky ve Dvorak, 2007). Genellikle karbonhidrat kaynağı olarak değerlendirilen buğday, insan beslenmesinde büyük bir rol oynamaktadır. Bununla birlikte, içerdiği proteinler, diyet lifi, lipitler, vitaminler, mineraller ve çeşitli fitokimyasallar sayesinde besleyici değeri oldukça yüksektir (Shewry ve Hey, 2015). Küresel ölçekte temel bir gıda ürünü olması nedeniyle, artan dünya nüfusu ve iklim değişikliğine bağlı olarak ortaya çıkan yeni koşullar, yüksek verimli ve çevresel streslere dayanıklı buğday çeşitlerinin geliştirilmesini ve üretimin sürdürülebilir biçimde artırılmasını zorunlu kılmaktadır (Khatodia ve Bhatotia, 2019).

Buğday, insan beslenmesindeki önemi nedeniyle hem Türkiye'de hem de dünya genelinde en geniş ekim alanına sahip tahıl ürünü olarak öne çıkmaktadır (FAO, 2019). Stratejik bir tarımsal ürün olarak kabul edilen buğday, dünya çapında yaygın biçimde yetiştirilmekte ve temel gıda güvenliği açısından da kritik bir rol oynamaktadır. Küresel buğday üretimi; iklimsel faktörler, toprak özellikleri ve tarımsal teknolojideki ilerlemelerle yakından ilişkilidir. 2020'li yıllarda dünya genelinde buğdayın ekim alanı yaklaşık 220 milyon hektar düzeyindedir. En fazla üretim yapan ülkeler arasında Çin, Hindistan, Rusya, Amerika Birleşik Devletleri ve Kanada yer almakta olup, bu ülkeler yalnızca kendi ulusal taleplerini karşılamakla kalmayıp, aynı zamanda

dünya buğday ticaretine de önemli katkılar sağlamaktadır. Küresel ölçekte ortalama buğday verimi ise, modern tarım uygulamaları ve yüksek verimli tohum çeşitlerinin kullanımı sayesinde yaklaşık 3 ton/hektar seviyesindedir (Tablo 1; FAO, 2023).

Tablo 1. Dünya buğday üretim miktarları (Milyon ton) (TÜİK, 2022)

S.N.	Ülkeler	2018/19	2019/20	2020/21	2021/22	2022/23
1	Çin	131,4	133,6	134,3	136,9	137,7
2	AB	123,1	138,8	126,7	138,2	134,7
3	Hindistan	99,9	103,6	107,9	109,6	103,0
4	Rusya	71,7	73,6	85,4	75,2	92,0
5	Avusturalya	17,6	14,5	31,9	36,2	38,0
6	Kanada	32,4	32,7	35,4	22,4	33,8
7	Pakistan	25,1	24,3	25,2	27,5	26,4
8	Ukrayna	25,1	29,2	25,4	33,0	21,0
9	Türkiye	19,0	17,5	18,3	16,0	17,3
10	İngiltere	13,6	15,6	9,7	14,0	15,5
11	Kazakistan	13,9	11,5	14,3	11,8	14,0
12	Dünya	730,9	761,5	774,5	779,3	783,8

2. TÜRKİYE’DE BUĞDAY ÜRETİMİ

2023 yılı verilerine göre Türkiye’de buğday tarımı yaklaşık 6,8 milyon hektarlık bir alanda yapılmış ve bu alanlardan toplamda 22 milyon ton buğday elde edilmiştir. Son beş yıl incelendiğinde, ekim yapılan arazilerin büyüklüğü 6,6 ile 6,9 milyon hektar arasında değişirken, yıllık üretim miktarının 17 ile 22

milyon ton arasında seyrettiği anlaşılmaktadır (TÜİK, 2024). Buğday üretimi bakımından Türkiye’de en yüksek verim alınan iller arasında Konya, Ankara ve Diyarbakır başı çekmektedir. Türkiye, buğday üretiminde hem iç tüketimini karşılayabilecek kapasiteye sahip olması hem de ihracat potansiyeli açısından önemli bir konumda bulunmaktadır. Ülke genelinde buğday tarımı yaklaşık 7 milyon hektarlık bir alanda yapılmakta olup, yıllık üretim miktarı ortalama 20 milyon ton düzeyindedir (Tablo 2, TÜİK, 2022).

Tablo 2. Türkiye’de İllere göre buğday üretiminin dağılımı (TÜİK, 2022)

S.N.	İller	Üretim Ton	Ekilen alan (da)	Verim (kg/da)
1	Konya	1.313.200	3.951.394	257
2	Ankara	822.387	3.360.855	400
3	Tekirdağ	811.950	1.927.820	213
4	Diyarbakır	545.436	1.944.340	330
5	Sivas	539.189	2.221.547	216
6	Adana	537.941	1.397.811	451
7	Edirne	522.535	1.284.930	323
8	Çorum	501.292	1.597.401	145
9	Şanlıurfa	459.409	1.383.412	141
10	Eskişehir	449.841	1.558.939	310
11	Kırklareli	448.115	1.121.187	250
12	Yozgat	417.266	1.841.955	204
13	Amasya	353.284	948.946	405
14	Afyonkarahisar	352.458	1.090.471	421
15	Muş	344.940	1.250.000	234
16	Bitlis	69.665	301.965	231
Toplam		16.000.00	54.237.790	296

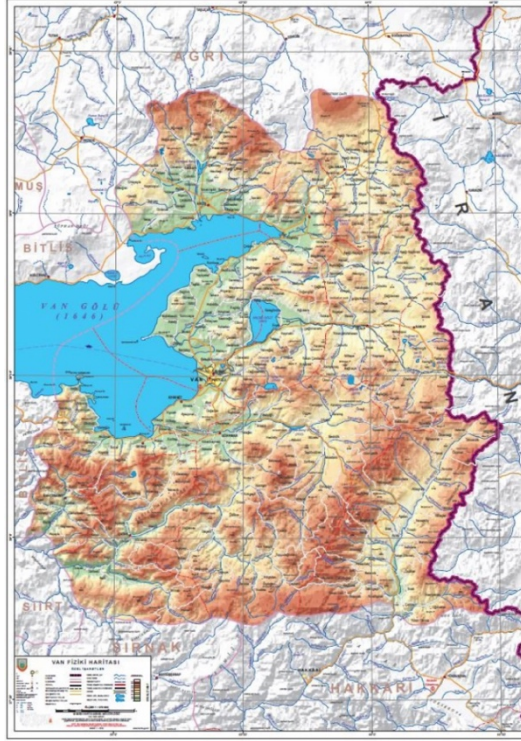
Türkiye'deki buğday verimliliği, coğrafi ve iklimsel koşullara bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Doğu Anadolu gibi yüksek rakımlı ve kısıtlı tarım olanaklarına sahip bölgelerde verim daha düşük seyrederken, İç Anadolu ve Batı Anadolu gibi bölgelerde ise daha yüksek üretim değerleri elde edilmektedir. Buğday üretiminin artırılmasına yönelik olarak; modern sulama

sistemlerinin yaygınlaştırılması, yüksek verimli ve iklim koşullarına dayanıklı tohum çeşitlerinin kullanımı ile birlikte çağdaş tarım tekniklerinin benimsenmesi, tarımsal üretim politikalarında öncelikli alanlar arasında yer almaktadır (TÜİK, 2022).

3. TİR BUĞDAY ÜRETİMİNİN EN YAYGIN OLDUĞU VAN İLİNİN TARIMSAL GENEL ÖZELLİKLERİ

Tarım arazilerinin etkin ve bilimsel temellere dayalı kullanımı, sürdürülebilir kırsal kalkınmanın sağlanması ve ulusal gıda güvenliğinin teminat altına alınması açısından kritik bir öneme sahiptir. Türkiye'nin doğusunda yer alan Van ili, sahip olduğu doğal kaynak zenginliğine rağmen, topoğrafik yapısı ve iklim koşullarının oluşturduğu sınırlamalar nedeniyle tarımsal üretim kapasitesi açısından çeşitli kısıtlarla karşı karşıyadır. Bu bağlamda, ilin arazi yapısının detaylı ve bilimsel yöntemlerle değerlendirilmesi, bölgesel tarım politikalarının planlanmasında ve doğal kaynakların verimli kullanılmasında önemli bir rol oynamaktadır (Şekil 1).

Çığ ve ark. (2012) tarafından gerçekleştirilen bir çalışmada, Van merkez ile Erciş, Gevaş, Gürpınar ve Muradiye ilçelerinde belirlenen 26 örnekleme noktasından alınan toprak ve buğday örnekleri analiz edilerek, toprakların fiziksel-kimyasal özellikleri, besin element düzeyleri ve ağır metal içerikleri incelenmiştir. Arazi analizleri sonucunda, toprak bünyesinin kil (2 nokta), kumlu-killi-tın (9 nokta), kumlu-tın (6 nokta), killi-tın (1 nokta) ve tın (4 nokta) şeklinde çeşitlilik gösterdiği saptanmıştır. Toprakların pH değeri 7,80 ile 8,59 arasında değişmekte olup, genel olarak alkali özellik taşımaktadır. Elektriksel iletkenlik değerleri (90–300 $\mu\text{S}/\text{cm}$) dikkate alındığında, bölgede tuzluluk sorununun bulunmadığı anlaşılmaktadır. Kireç içeriği %0,65 gibi çok düşük seviyelerden başlayarak %76'ya kadar ulaşabilmekte, bu da bölgeler arası ciddi bir farklılık olduğunu ortaya koymaktadır. Organik madde oranları ise %0,24 (çok az) ile %3,34 (yeterli) arasında değişmektedir.



Şekil 1. Van ili Fiziki haritası

Toprak örneklerinin analizinde, özellikle yarıyışlı fosfor ile mikro besin elementlerinden çinko bakımından eksikliklerin bulunduğu belirlenmiştir. Ayrıca, buğday bitkisi örneklerinde azot, fosfor, potasyum ve magnezyum elementlerinin tüm örnekleme noktalarında yetersiz düzeyde olduğu tespit edilmiştir. Diğer yandan, demir açısından örnek alanlarının %50'sinde, bakırda %57,7'sinde, çinkoda %30,8'inde ve selenyumda %50'sinde optimal seviyelerin altında değerler elde edilmiştir. Bu bulgular, bölgedeki tarımsal üretimin toprak besin dengesi açısından ciddi sorunlarla karşı karşıya olduğunu ortaya koymaktadır.

Van ilinde tarımsal üretim açısından değerlendirildiğinde, I. ile IV. sınıf arasında yer alan ve tarıma elverişli olarak sınıflandırılan arazi varlığı yaklaşık 573.000 hektardır (Şekil 1). Bu alan, ilin toplam yüzölçümünün yaklaşık

%30'unu oluşturmaktadır (Anonim, 2023). Söz konusu tarım arazileri, verimlilik ve kullanım özelliklerine göre sınıflandırılarak aşağıda detaylandırılmıştır.

Tablo 3. Van İline ait tarımsal arazilerin kullanım durumu

Sınıf	Alan (ha)	Tarımsal Kullanım Durumu
I.	41.000	Sulamalı tarım için çok uygun
II.	117.500	Düşük sınırlamalı verimli alanlar
III.	195.000	Orta düzeyde sınırlamalı, kuru tarım yapılabilir
IV.	219.500	Kontrollü kullanım ile tarım yapılabilir

Van Gölü havzasında yaygın olarak görülen tuzlu ve sodik karakterli topraklar, bölgedeki tarımsal faaliyetlerin sürdürülebilirliğini olumsuz yönde etkileyen başlıca doğal sınırlayıcı etmenlerden biridir. Bu tür toprakların kapladığı toplam alan yaklaşık 48.400 hektar olup, farklı tuzluluk derecelerine göre aşağıdaki şekilde gruplandırılmıştır (Anonim, 2023).

- **Hafif tuzlu topraklar:** 18.050 hektar
- **Hafif tuzlu-sodik topraklar:** 18.170 hektar
- **Tuzlu topraklar:** 3.775 hektar
- **Tuzlu-sodik topraklar:** 10.390 hektar

Bu toprak türleri, bitki gelişimini olumsuz etkileyerek tarımsal verimliliği önemli ölçüde azaltmakta; özellikle sulama uygulamalarının yapıldığı alanlarda ikincil tuzluluk oluşumu riskini artırarak uzun vadede toprak sağlığını tehdit etmektedir.

4. TARIM DIŞI ARAZİLER VE YEREL BUĞDAY GENETİK KAYNAKLARI

Tarım açısından düşük verimliliğe sahip olan V. ile VIII. sınıf topraklar, Van ilinin büyük bir bölümünü kaplamakta olup, bu arazilerin toplam büyüklüğü yaklaşık 1,3 milyon hektardır. Özellikle VII. sınıf araziler — yaklaşık 1.020.000 hektarlık alan— eğimli, taşlık ve sıg yapıları nedeniyle tarımsal üretim açısından oldukça sınırlı olup, genellikle mera veya ormanlık alanlar olarak değerlendirilmektedir.

Türkiye, özellikle de Doğu Anadolu Bölgesi, buğdayın ana gen merkezlerinden biri olarak kabul edilmekte olup, yerel buğday çeşitleri tarihsel süreç içerisinde önemli bir genetik kaynak olarak ön plana çıkmıştır (Aktaş, 2016). Bu yerel formlar, geniş bir genetik varyasyon yelpazesine sahip olmalarının yanı sıra, biyotik (hastalık ve zararlılar) ve abiyotik (kuraklık, tuzluluk, düşük sıcaklık vb.) stres koşullarına karşı doğal bir tolerans geliştirmişlerdir. Bu genotiplerin büyük bölümü, uzun yıllar boyunca yetiştirildikleri ekolojik koşullara adapte olmuş, herhangi bir modern ıslah programına dahil edilmeden, üreticilerin kendi seçim kriterlerine göre seleksiyon geçirmiştir (Kendal ve ark., 2019).

Bu süreçte, toprak özellikleri, iklimsel değişkenlik, hastalık ve zararlılar ile tarımsal uygulama biçimleri, söz konusu genotiplerin doğal seleksiyon yoluyla şekillenmesinde belirleyici olmuştur. Her ne kadar bu yerel çeşitler, günümüzde yaygın olarak kullanılan yüksek verimli modern çeşitlerle ekonomik rekabet gücüne sahip olmasalar da genetik ıslah programlarında yeni ve dirençli hatların geliştirilmesinde önemli bir kaynak teşkil etmektedirler. Bu nedenle, yerel buğday çeşitlerinin korunması, karakterizasyonu ve genetik çeşitliliğinin sürdürülebilir biçimde gelecek kuşaklara aktarılması amacıyla yürütülecek bilimsel çalışmalar büyük önem taşımaktadır (Jaradat, 2012; Tosun ve ark., 2018).

5. TİR BUĞDAYININ (*Triticum aestivum* var. *aestivum* L. spp. *leucospermum* Körn.) BÖLGE İÇİN ÖNEMİ VE GENEL ÖZELLİKLERİ

Van Gölü çevresinde en yaygın olarak yetiştirilen tahıl türü buğdaydır (Kaydan ve Yağmur, 2007). Bölge tarımında özellikle geleneksel ve yerel üretim şekillerine dayanan “Tir buğdayı” öne çıkmaktadır (Doğan ve ark., 1980; Kaydan ve Yağmur, 2008; Altuner ve ark., 2019). Van Gölü Havzası’nda “tir” terimi hem yerel buğday popülasyonunu hem de bu popülasyonla özdeşleşmiş geleneksel bir ekim yöntemini ifade etmektedir. “Tir” ifadesi, bu buğday türünün yetiştirilmesinde kullanılan ve karıklar şeklinde yapılan özgün bir ekim yöntemini tanımlamaktadır. Bu yöntemle üretilen buğdaylara da “Tir buğdayı” adı verilmektedir (Ülker ve ark., 2019).

Tir buğdayı (*Triticum aestivum* var. *aestivum* L. spp. *leucospermum* Körn.), morfolojik ve tarımsal özellikler bakımından geniş bir varyasyon yelpazesi sunmakta olup, heterojen bir popülasyon yapısına sahiptir (Şekil 2; Sönmez et al., 1999). Aynı zamanda yetiştirildiği ekolojik koşullara yüksek adaptasyon göstermekte ve bu çevresel koşullar altında tatmin edici verim düzeylerine ulaşabilmektedir (Doğan ve ark., 1980; Yılmaz ve ark., 1994) (Şekil 2).

Bölgedeki yoğun kar yağışı ve sert kış koşulları nedeniyle, Tir buğdayı genellikle derin ekim yöntemiyle yetiştirilmektedir. Bu uygulama, bitki köklerinin daha derinlere inmesini sağlamakta ve böylece düşük sıcaklık ve kuraklık gibi çevresel stres koşullarına karşı dayanıklılığı artırmaktadır. Bu yönüyle, Tir buğdayı diğer çeşitlere kıyasla zorlayıcı iklim koşullarında daha yüksek verim potansiyeli sunmaktadır. Van Gölü ve çevresinin Tir buğdayı açısından sahip olduğu bu özgün tarımsal ve ekolojik özelliklerin tanımlanması, korunması ve gelecek nesillere aktarılması bilimsel ve tarımsal açıdan büyük önem arz etmektedir (Furan ve ark., 2017).

Buğday hem dünya genelinde hem de Türkiye’de olduğu gibi Van ilinde de tarla bitkileri içerisinde en geniş ekim alanına ve en yüksek üretim oranına sahip üründür. Van Gölü Havzası’nda yürütülen buğday tarımında, genetik olarak heterojen yapıya sahip ve karışık bir popülasyon niteliği taşıyan Tir buğdayı yaygın olarak kullanılmaktadır (Kaydan ve ark., 2011; Sönmez ve ark., 1999). Bu yerel buğday tipi, bölgenin özgün ekolojik koşullarına yüksek düzeyde adaptasyon göstermekte ve bu nedenle önemli bir verim potansiyeli sunmaktadır.



Şekil 2. Tir buğday tarlalarından farklı görüntüler.

Yetiştiricilik alışkanlıklarının ve yerel tarım kültürünün etkisiyle, modern ve tescilli çeşitlerin bazı yıllarda iki katına kadar çıkan verim potansiyeline rağmen, bölgede üretimin yaklaşık %75’i Tir buğdayı ile gerçekleştirilmektedir (Olgun ve ark., 1998). Bölge koşullarına uygun, soğuğa, kuraklığa, hastalık ve zararlılara dirençli, yüksek verimli yeni çeşitlerin belirlenmesine yönelik çeşitli araştırmalar yapılmış olsa da stabilite analizleri sonucunda Tir buğdayının yerini alabilecek daha üstün bir genotip henüz tespit edilememiştir (Ülker ve ark., 1994; Yılmaz ve ark., 1994; Ege, 1996).

Bazı çalışmalar Tir buğdayı hatları içerisinde gelecek vaat eden genotiplerin seçilmesi ve bu hatların ıslah programlarında değerlendirilmesi yönünde yürütülmüştür (Sönmez ve Ülker, 1998). Ayrıca, buğdayın geleneksel

olarak ekmeklik kullanımının yanı sıra, belirli Tir hatlarının bisküvilik buğday olarak da değerlendirilebileceği ortaya konmuştur (Doğan ve Uğur, 2005). Tüm bu veriler, Tir buğdayının bölge tarımı açısından hem genetik kaynak hem de ekonomik ürün olarak stratejik önemini koruduğunu göstermektedir.

Kuru tarım koşullarında buğday ekiminde başarıyı etkileyen en önemli faktörlerden biri ekim derinliğidir. Bu derinlik, özellikle çim kını (koleoptil) uzunluğu temel alınarak belirlenmektedir. Araştırmalar, 8 ile 10 cm ekim derinliklerinde çim kını uzunluğu ile çıkış gücü arasında anlamlı bir ilişki bulunduğunu göstermektedir (Bayram ve ark., 2013). Kurak iklim kuşağında yer alan bölgelerde, alatav (tohum zararlısı) zararını en aza indirmek ve tohumun toprakta mevcut olan nemden yararlanmasını sağlamak amacıyla, tohumların daha derin katmanlara ekilmesi önerilmektedir (Yılmaz ve Sepetoğlu, 1996).

Bölge topraklarının volkanik yapısı nedeniyle, klasik güz ekimi (genellikle Ekim ayında) sonrasında meydana gelen yoğun yağışlar, yüzeyde sert bir kaymak tabakasının oluşmasına neden olmakta ve bu durum bitki çıkışlarında yaklaşık %50 oranında azalmaya yol açmaktadır. Buna karşın, “tir” yöntemiyle yapılan ekimde, özel olarak geliştirilmiş mibzerlerle toprakta 15–18 cm derinliğinde karıklar açılmakta ve tohumlar bu karıkların içine, ortalama 5–6 cm derinliğe yerleştirilmektedir. Bu uygulamayla tohumlar, yaz sonu döneminde (Ağustos ayı) toprağın gölgede kalan ve nemli olan kısımlarından faydalanarak çimlenmekte, böylece sonbahar yağmurları sonrası oluşan kaymak tabakasının olumsuz etkilerinden korunmaktadır (Altuner ve ark., 2019). “Tir” mibzerleri ile yapılan ekimlerde sıra aralarının daha geniş olması nedeniyle, tohumluk miktarı geleneksel yöntemlere kıyasla yaklaşık yarıya indirilmekte ve dekara 8–10 kg tohum kullanımı yeterli olmaktadır. Ayrıca, bu ekim yöntemi, standart mibzerle yapılan ekimlere göre tarla içerisindeki yabancı ot yoğunluğunu da azaltma eğilimindedir (Yılmaz ve Güncan, 1991).

Tir ekimi, yüzyıllardır Van Gölü Havzası'nda tir buğdayının doğal çimlenme döngüsüne uyum sağlayacak şekilde geliştirilen geleneksel bir tarım uygulamasıdır. Bu tarihsel süreç içerisinde, ekim yöntemi ile buğday popülasyonu arasında uyumlu bir evrimsel ilişki (senkronizasyon) oluşmuştur. Karık içerisinde yaklaşık 8 cm derinliğe ekilen tohumların, tir buğdayında koleoptil uzunluğunu artırdığı düşünülmektedir. Uzun koleoptil boyuna ek olarak güçlü sap yapısı, hastalık ve zararlılara karşı dayanıklılık, kurak koşullarda stabil verim kabiliyeti gibi özellikler, tir buğdayının başlıca adaptif ve karakteristik nitelikleri arasında yer almaktadır. Sanayi değeri açısından Tir buğdayı modern çeşitlerle kıyaslandığında daha düşük kabul edilse de yöre halkı tarafından özellikle geleneksel lavaş ekmeği yapımında tercih edilmekte ve kültürel açıdan önemli bir yer tutmaktadır (Ülker ve ark., 2019).

Altuner ve ark. (2020) gerçekleştirdiği araştırmada, Tir buğday popülasyonlarının kökçük kuru ağırlığı, gövde yaş ağırlığı ve gövde kuru ağırlığı bakımından diğer çeşitlere kıyasla daha yüksek değerler sergilediği tespit edilmiştir. Elde edilen korelasyon analizleri sonucunda, kök uzunluğundaki artışın kök yaş ağırlığı, gövde yaş ağırlığı ve gövde kuru ağırlığı üzerinde olumlu yönde etkili olduğu; benzer şekilde kök kuru ağırlığının gövde kuru ağırlığını pozitif olarak artırdığı ve gövde yaş ağırlığının da gövde kuru ağırlığına katkıda bulunduğu belirlenmiştir. Ayrıca, Altuner ve ark. (2021), Van Gölü Havzası'nda karışık popülasyon şeklinde yetiştirilen Tir buğdayının ekmeklik türler arasında yer aldığını ve biyolojik özellikleri bakımından geniş bir varyasyon gösterdiğini rapor etmişlerdir. Çalışmada, Tir buğdayının sahip olduğu karakteristik bitkisel özellikler sayesinde kuraklık stresine karşı diğer çeşit ve genotiplere kıyasla üstün performans sergilediği vurgulanmıştır.

Bitkisel özellikler açısından Sönmez ve Ülker (1998) tarafından yapılan araştırmada, seçilen Tir buğdayı hatlarının tane verimi 330,0 ile 422,0 kg/da arasında değişirken, metrekaresindeki başak sayısı 423,0 ile 528,0 adet aralığında olduğu bildirilmiştir. Bu hatlarda, birim alan verimiyle doğrudan ilişkili olan

başakta tane sayısı ise 23,2 ile 31,7 adet arasında değişim göstermiştir. Başakta tane ağırlığı 1,30 ile 1,75 gram arasında tespit edilirken, bin tane ağırlıkları 40,2 ile 51,2 gram arasında farklılık arz etmiştir. Başakta bulunan başakçık sayısı 15,5 ile 19,2 arasında değişirken, kısır başakçık oranı %8,7 ile %14,9 arasında değişen seviyelerde bulunmuştur. Ümit vadeden hatların başaklanma süresi 208 ile 216 gün, tane dolum süresi ise 43 ile 48 gün aralığında gerçekleşmiştir. Aynı hatların bitki boyu 72,5 ile 87,0 cm arasında, başak boyu ise 8,5 ile 10,1 cm arasında ölçülmüştür. Ekmeklik buğdaylar için önemli bir özellik olan beyaz tane rengi, beş hatta rastlanırken; geri kalan hatlardan üçü sarı, üçü ise kehribar renkli tanelere sahip bulunmuştur.

Kılçıklılık bakımından ise dört hat uzun, dört hat kısa ve üç hat orta uzunlukta kılçıklara sahip olduğu raporlanmıştır (Şekil 3). Ayrıca, Sönmez ve ark. (1999) tarafından Van Gölü havzasında yaygın şekilde yetiştirilen Tir buğdayı (*Triticum aestivum* var. *aestivum* L. spp. *leucospermum* Körn.) üzerinde yürütülen çalışmada, bu çeşidin morfolojik özellikler bakımından oldukça geniş bir varyasyon sergilediği belirtilmiştir. Başaktaki tane ağırlığı 3,08 ile 6,38 gram arasında değişirken, başakta tane sayısı ile tane ağırlığı arasında negatif bir korelasyon tespit edilmiştir. Araştırmada ayrıca tane verim değerleri 33,9 ile 78,3 kg/da arasında değişirken, tane verimi ile tane ağırlığı arasındaki ilişkinin denemenin ilk yılında olumsuz ($r = -0,025$), ikinci yılında ise olumlu ($r = 0,168$) olduğu gözlenmiştir.



Şekil 3. Tir buğday başağı

SONUÇ VE ÖNERİLER

Van bölgesine özgü bu genetik kaynağın varlığı, yerel koşullara uyum sağlamış çeşitlerin geliştirilmesi açısından önemli bir avantaj teşkil etmektedir. Islah çalışmaları genetik çeşitliliğe dayandığı için, genetik tabanı geniş olan populasyonlarda üstün niteliklere sahip hatların seçilme olasılığı daha yüksektir. Bu bağlamda, mevcut Tir buğdayı populasyonundan yeni çeşitler geliştirmek daha etkin ve verimli olacaktır.

Sönmez ve ark. (1997) tarafından gerçekleştirilen bir çalışmada, populasyon içerisinde yüksek verim potansiyeline sahip hatların yanı sıra, düşük verim gösteren bireylerin de bulunduğu ve bu düşük verimli hatların populasyonun ortalama tane verimini olumsuz etkilediği tespit edilmiştir. Bu nedenle, populasyon içerisinde yüksek verim, kaliteli ürün ve hastalıklara karşı dirençli hatların seçilmesi ve bunların bölgeye yeni çeşitler olarak

kazandırılması gerekmektedir. Nitekim (Dumlu 2024) Kırık buğday pupülasyonunda yapmış olduğu çalışmada, Kırık buğday hatlarının bazı bireyleri, verim, kalite ve düşük sıcaklığa dayanıklılık gibi temel tarımsal özellikler açısından modern çeşitlerin üzerinde performans sergilemiştir. Bu üstün özellikleriyle dikkat çeken hatlar, ön ıslah çalışmalarında genetik kaynak olarak değerlendirilmek üzere potansiyel taşımaktadır. Özellikle soğuk toleransı ve tane verimi yönünden elde edilen veriler, bu özelliklerle ilişkili genlerin moleküler markörler aracılığıyla belirlenebilmesine olanak tanıyacak ipuçları sunduğunu gelecekte yapılacak daha ayrıntılı araştırmalarda öne çıkan yerel Kırık genotiplerinin, verim parametreleri ve soğuğa dayanıklılık açısından araştırmacılara önemli kolaylıklar sağlayacağını ifade etmiştir. Ayrıca morfolojik açıdan modern çeşitlerden belirgin farklılıklar taşıdığı saptanan bu hatların, hem in-situ (yerinde) hem de ex-situ (koruma altına alınmış) yöntemlerle muhafaza edilmesi gerektiğini belirtmiştir.

Sonuç olarak yerel popülasyonlardan elde edilecek saf hatların buğday ıslahında adaptasyon kabiliyeti yüksek bir çeşit adayı olarak kullanılabilmesinin yanı sıra ıslah çalışmalarında genitör olarak kullanılmaları mümkün olabilmektedir.

KAYNAKÇA

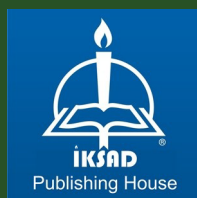
- Aktaş, H., 2016. Drought tolerance indices of selected landraces and bread wheat (*Triticum aestivum* L.) genotypes derived from synthetic wheats. *Applied Ecology and Environmental Research*, 14(4): 177-189.
- Altuner, F., Oral, E., & Baran, İ. (2020). Vangölü Havzası Yerel Tır Popülasyonları ile Bazı Buğday Çeşitlerinin Çimlenme Özellikleri ve Karakterler Arası İlişkilerin Belirlenmesi. *Journal of the Institute of Science and Technology*, 11(1), 753-762.
- Altuner, F., Tuncturk, R., Oral, E., & Tuncturk, M. (2021). Evaluation of pigment, antioxidant capacity and bioactive compounds in microgreens of wheat landraces and cereals. *Chilean journal of agricultural research*, 81(4), 643-654.
- Altuner, F.; Oral, E.; Ülker, M. (2019). Van ili buğday tarımının Türkiye ve bölgedeki yeri, sorunları ve çözüm önerileri. *Yüzüncü Yıl Üniversitesi Tarım Bilimleri Dergisi*, 29(2), 339-351.
- Anonim. (2023). *Van ili ekonomik durumu ve arazi yapısı*. <https://vangolu.com/ekonomikdurum.html>
- Atar, B., 2017. Gıdamız buğdayın, geçmişten geleceğe yolculuğu, Yalvaç Akademi Dergisi, 2 (1), 1-12.
- Bayram S, Öztürk A, Aydın M, 2013. Ekim Derinliğinin Ekmeklik Buğday Genotiplerinde Çim Kını Uzunluğu ve Sürme Gücüne Etkisi. Türkiye 10. Tarla Bitkileri Kongresi, 10-13 Eylül, s. 575-582. Konya.
- Doğan İS, Uğur T, 2005. Van ve çevresinde yetiştirilen bazı buğdayların bisküvilik kalitesi üzerine bir araştırma. Yüzüncü Yıl Üniversitesi Tarım Bilimleri Dergisi, 15(2): 139-148.
- Doğan, O.; Çöke, K.; Cimili, B. (1980). Van Gölü Bölgesinin tır tarım yönteminin uygulandığı yörelerde koşullara en uygun buğday çeşidi, tohum miktarı, gübre isteği, toprak hazırlama şekilleri ile tır mibzerinin

- geliştirilmesi ve uygun sıra aralığının saptanması. Ankara: Köy İşleri ve Koop. Bakanlığı, Genel Yayın No: 73–77.
- Dubcovsky, J., ve Dvorak, J., 2007. Genome plasticity a key factor in the success of polyploid wheat under domestication, *Science*, 316 (5833), 1862-1866.
- Dumlu, B. 2023. Kırık buğday genotiplerinin bazı tarımsal ve kalite özellikleri ile soğuğa dayanıklılık bakımından değerlendirilmesi. Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tarla Bitkileri Anabilim Dalı (Doktora Tezi), Erzurum.
- Ege, H. (1996). *ICARDA kökenli bazı ekmeklik ve makarnalık buğday hatlarının Van koşullarına adaptasyonu* (Yüksek Lisans Tezi, basılmamış). Van: Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Tarla Bitkileri Bölümü.
- FAO. (2019). *FAOSTAT statistical database*. Food and Agriculture Organization of the United Nations. <https://www.fao.org/faostat/en/#data/QC>
- FAO. (2023). *FAOSTAT statistical database*. Food and Agriculture Organization of the United Nations. <https://www.fao.org/faostat/en/#data/QC>
- Fatih, Ç. I. Ğ., SÖNMEZ, F., & ERMAN, M. (2020). Tir Buğdayı Yetiştiriciliği Yapılan Alanların (*Triticum aestivum* L. var. leucospermum (Körn.) Farw.) Toprak ve Bitki Analizleri ile Beslenme Durumlarının Ortaya Konulması. *ISPEC Journal of Agricultural Sciences*, 4(1), 136-153.
- Furan, M. A.; Gebeloğlu, M. D.; Arpalı, D. (2017). Dayanıklı R55 (6AL/6VS) translokasyon hattı ile lokusa özel SSR markerleri kullanılarak endemik tir buğday (*Triticum aestivum* L. ssp. vulgare Vill. v. leucospermum Körn) genotipinin Yr-26 sarı pas hastalık direncinin değerlendirilmesi. *Yüzüncü Yıl Üniversitesi Tarım Bilimleri Dergisi*, 27(4), 521-530.

- Huen, M., Shafer-Pregl, R., Klawan, D., Castagna, R., Accerbi, M., Borghi, B., Salamini, F., 1997. Site of einkorn wheat domestication identified by DNA fingerprinting, *Science*, 278, 1312-1314.
- Jaradat, A. A. (2012a). *Wheat Landraces: Genetic Resources for Sustenance and Sustainability*. USDA-ARS, 803 Iowa Ave., Morris, MN 56267 USA.
- Kaydan, D., Tepe, I., Yağmur, M., & Yergin, R. (2011). Effects of sowing methods and rates on weeds, grain yield and some yield components of wheat.
- Kaydan, D.; Yağmur, M. (2007). Van ekolojik koşullarında bazı iki sıralı arpa çeşitlerinin (*Hordeum vulgare* L. conv. *distichon*) verim ve verim öğeleri üzerine bir araştırma. *Tarım Bilimleri Dergisi*, 13(3), 269-278.
- Kaydan, D.; Yağmur, M. (2008). Van ekolojik koşullarında bazı ekmeklik buğday (*Triticum aestivum* L.) çeşitlerinin verim ve verim öğeleri üzerine bir araştırma. *Tarım Bilimleri Dergisi*, 14(4), 350-358.
- Kendal, E.; Doğan, Y.; Oral, E.; Koyuncu, M. (2019). Investigating the quality of durum wheat landraces and determination of parents to use in breeding programs. *Applied Ecology and Environmental Research*, 17(3), 6031-6049.
- Khatodia, S., ve Bhatotia, K. 2019. Prospects of advanced genomics for development of climate resilient wheat genotypes, *Ekin Journal of Crop Breeding and Genetics*, 5 (1), 54-55.
- Nesbitt M., 1998. Where was einkorn wheat domesticated? *Trends in Plant Science*, 3, 1360-1385.
- Nesbitt, M.; Samuel, D. (1996). From stable crop to extinction? The archaeology and history of the hulled wheats. In S. Padulosi, K. Hammer & J. Heller (Eds.), *Hulled Wheats* (pp. 41-100). Rome, Italy: International Plant Genetic Resources Institute.

- Olgun, M., Partigöç, F., Yıldırım, T., Taçoğlu, M., Kumlay, A.M., 1998. Doğu Anadolu Bölgesinde buğdayın verim potansiyeli, Doğu Anadolu Tarım Kongresi, 14-18 Eylül 1998, 172- 182, Samsun.
- Shewry, P.R., ve Hey, S.J., 2015. The contribution of wheat to human diet and health, *Food and energy security*, 4 (3), 178-202.
- Sönmez, F., M. Ülker, N. Yılmaz, H. Ege, B. Bürün ve R. Apak, 1997. Tir buğdayında tane verimi ile bazı 1 verim öğeleri arasındaki iliş kiler. *Türk Tar ı m ve Ormancılık Dergisi*.
- Sönmez, F.; Ülker, M. (1998). Tir buğdayı populasyonundan ümitvar hatların belirlenmesi. *Journal of Agricultural Sciences*, 4(01), 16-20.
- Sönmez, F.; Ülker, M.; Yılmaz, N.; Ege, H.; Bürün, B.; Apak, R. (1999). Tir buğdayında tane verimi ile bazı verim öğeleri arasındaki ilişkiler. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, 1, 23-45.
- Tarım ve Orman Bakanlığı. (2022). *Türkiye tarım stratejileri ve politikaları raporu*. <https://www.tarimorman.gov.tr/>
- Tosun, M.; Aykut Tonk, F.; Istiplile, D. (2018). Local populations and the importance. *Symposium of Wheat Landraces in Turkey*, 20–22 December 2018, Bolu, Turkey.
- Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK). (2022). *Bitkisel Üretim İstatistikleri* [Veri seti]. <https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=Bitkisel-Uretim-Istatistikleri-2010-8470>
- Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK). (2023). *Bitkisel Üretim İstatistikleri* [Veri seti]. <https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=Bitkisel-Uretim-Istatistikleri-2010-8470>
- Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK). (2023). *Bitkisel üretim istatistikleri*. <https://data.tuik.gov.tr/>
- Ülker, M., Sönmez, F., Yılmaz, N., Ege, H., 1994. Bazı buğday çeşit ve hatlarının Van şartlarına adaptasyonu, II. Verimlilik Kongresi 19-21 Ekim 1994, Ankara, Milli Prodüktive Merkezi Yayınları, 540, 560-568.

- Ülker, M.; Altuner, F.; Oral, E.; Özdemir, B.; Salih, S. J.; Najafi, S. (2019). “Tir as a landrace and a sowing method”. *International Conference on Wheat Diversity and Human Health*, 1(1), 26 s.
- Yılmaz N, Güncan A, 1991. Van yöresinde farklı ekim zamanlarında tir ekim yönteminin, değişik buğday çeşitlerinin ve farklı bitki sıklığının yabancı ot yoğunluğu üzerine etkisi. Selçuk Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi, 1(1): 5-13.
- Yılmaz N, Sepetoğlu H, 1996. Van Ekolojik Koşullarında Tir Ekim Yönteminde Üç Buğday Çeşidinde Verim ve Bazı Verim Öğelerinin Etkisi. Yüzüncü Yıl Üniversitesi Tarım Bilimleri Dergisi, 6(1): 69-80.
- Yılmaz, N.; Ege, H.; Ülker, M.; Sönmez, F.; Bürün, B.; Apak, R. (1994). Bazı kışlık buğday çeşitlerinin Van koşullarına adaptasyonu üzerine bir araştırma. III. Ulusal Nükleer Tarım ve Hayvancılık Kongresi, 19–21 Ekim 1994, Ankara. Tebliğ Özetleri, s. 57.



ISBN: 978-625-378-370-9