BİTKİLERDE STRES DİRENCİNİ ARTIRMA YÖNTEMLERİ

EDİTÖRLER
DOÇ. DR. ABDURRAHİM YILMAZ
ÖĞR. GÖR. DR. HİLAL YILMAZ

İKSAD Publishing House

BİTKİLERDE STRES DİRENCİNİ ARTIRMA YÖNTEMLERİ

EDİTÖRLER

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

YAZARLAR

Prof. Dr. Gülay KAÇAR
Prof. Dr. Mehmet Salih ÖZGÖKÇE
Prof. Dr. Müttalip GÜNDOĞDU
Prof. Dr. Remzi ATLIHAN
Prof. Dr. Şefik TÜFENKÇİ
Prof. Dr. Üstün ŞAHİN
Prof. Dr. Vahdettin ÇİFTÇİ
Doç. Dr. Abdurrahim YILMAZ
Doç. Dr. Çeknas ERDİNÇ
Dr. Öğr. Üyesi Abdurrahman Sami KOCA
Dr. Öğr. Üyesi Akgül TAŞ
Dr. Öğr. Üyesi Barış EREN
Dr. Öğr. Üyesi Fatih DEMİREL
Dr. Öğr. Üyesi Hilmi KARA
Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Zahit YEKEN
Dr. Öğr. Üyesi Sibel BOYSAN CANAL
Dr. Öğr. Üyesi Talip ÇAKMAKCI
Öğr. Gör. Dr. Hilal YILMAZ
Arş. Gör. Dr. Caner YERLİ
Arş. Gör. Dr. Mehmet Ramazan RİŞVANLI
Arş. Gör. Dr. Serap DEMİREL
Dr. Esra BULUNUZ PALAZ
Dr. Fatma Belkıs ESİMEK
Uzm. Biyolog Sümeyye ADALI
Arş. Gör. Sibel TURAN SİRKE
Yük. Ziraat Müh. Rufayi KARATAŞ

İKSAD Publishing House

Copyright © 2023 by iksad publishing house
All rights reserved. No part of this publication may be reproduced, distributed or transmitted in any form or by
any means, including photocopying, recording or other electronic or mechanical methods, without the prior written permission of the publisher,
except in the case of
brief quotations embodied in critical reviews and certain other
noncommercial uses permitted by copyright law. Institution of Economic Development and Social
Researches Publications®
(The Licence Number of Publicator: 2014/31220)
TÜRKİYE TR: +90 342 606 06 75
USA: +1 631 685 0 853
E mail: iksadyayinevi@gmail.com
www.iksadyayinevi.com

It is responsibility of the author to abide by the publishing ethics rules.
Iksad Publications – 2023©
ISBN: 978-625-367-360-4
Cover Design: Abdurrahim YILMAZ
October / 2023
Ankara / Türkiye
Size = 16 x 24 cm

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ.....1

BÖLÜM 1
BİTKİLERDE ABİYOTİK STRES DİRENCİNİ ARTIRMADA ÇİNKONUN ROLÜ
Öğr. Gör. Dr. Hilal YILMAZ
Prof. Dr. Vahdettin ÇİFTÇİ…….……3

BÖLÜM 2
FASULYE BİTKİSİNDEKİ BAZI TRANSKRİPSİYON FAKTÖRLERİN ABİYOTİK STRES ETMENLERİNE KARŞI TEPKİLERİ
Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Zahit YEKEN……..19

BÖLÜM 3
BİTKİLERDE STRES DİRENCİNİN ARTIRILMASINDA EPİGENETİK MODİFİKASYONLAR
Dr. Öğr. Üyesi Barış EREN……...57

BÖLÜM 4
TUZ STRESİ ALTINDAKİ BİTKİLERDE miRNA FONKSİYONLARI
Arş. Gör. Sibel TURAN SİRKE
Doç. Dr. Çeknas ERDİNÇ…….……77

BÖLÜM 5
TIBBİ VE AROMATİK BİTKİLERİN İNSEKTİSİT ETKİSİ
Dr. Öğr. Üyesi Abdurrahman Sami KOCA
Doç. Dr. Abdurrahim YILMAZ
Prof. Dr. Gülay KAÇAR……..…..91

BÖLÜM 6
BİTKİLERDE STRES DİRENCİNİ ARTIRMADA PROLİN BİRİKİMİNİN ETKİLERİ
Dr. Fatma Belkıs ESİMEK
Dr. Esra BULUNUZ PALAZ
Uzm. Biyolog Sümeyye ADALI……117

BÖLÜM 7
HERBİVOR BÖCEKLER İLE BİTKİ BÜYÜMESİNİ TEŞVİK EDEN RİZOBAKTERİLERİN (PGPR) ETKİLEŞİMLERİ
Dr. Öğr. Üyesi Hilmi KARA
Prof. Dr. Mehmet Salih ÖZGÖKÇE……...……137

BÖLÜM 8
BİTKİ - *TRICHODERMA* - BÖCEK İLİŞKİLERİ
Arş. Gör. Dr. Mehmet Ramazan RİŞVANLI
Prof. Dr. Mehmet Salih ÖZGÖKÇE
Prof. Dr. Remzi ATLIHAN……153

BÖLÜM 9
KURAKLIK STRESİ VE FİTOHORMONLAR
Dr. Öğr. Üyesi Sibel BOYSAN CANAL……179

BÖLÜM 10
ARITILMIŞ ATIK SU KULLANIMININ BİTKİ STRES FAKTÖRLERİNE ETKİSİ
Prof. Dr. Şefik TÜFENKÇİ
Dr. Öğr. Üyesi Talip ÇAKMAKCI
Arş. Gör. Dr. Caner YERLİ
Prof. Dr. Üstün ŞAHİN……...…….201

BÖLÜM 11
BİTKİ GELİŞİMİNİ TEŞVİK EDEN KÖK BAKTERİLERİNİN (PGPR) KURAKLIK STRESİNİ İYİLEŞTİRİCİ ETKİSİ
Dr. Öğr. Üyesi Sibel BOYSAN CANAL……221

BÖLÜM 12
MEYVE YETİŞTİRİCİLİĞİNDE KURAKLIK STRESİNİN FENOLİK BİLEŞİKLER ÜZERİNE ETKİSİ VE KURAKLIK DİRENCİNİ ARTIRAN UYGULAMALAR
Dr. Öğr. Üyesi Akgül TAŞ
Prof. Dr. Müttalip GÜNDOĞDU……245

BÖLÜM 13
BYDV VİRÜSÜNE KARŞI FLAVONOİDLERİN Anti-BYDV CP POTANSİYELLERİNİN *in silico* DOCKING İLE DEĞERLENDİRİLMESİ
Arş. Gör. Dr. Serap DEMİREL
Yük. Ziraat Müh. Rufayi KARATAŞ
Dr. Öğr. Üyesi Fatih DEMİREL……..277

ÖNSÖZ

İklim değişikliği ve küresel ısınma dünya çapında tarım faaliyetlerini olumsuz yönde etkilemekte ve hızla artan dünya nüfusunun gıda güvenliğini tehdit etmektedir. Artan sıcaklıklar, yükselen atmosferik CO^2 seviyeleri ve değişen yağış rejimleri tarım üretimini önemli ölçüde azaltmaktadır. Farklı biyotik ve abiyotik stres faktörlerine sürekli olarak maruz kalan bitkilerin büyüme ve gelişmesi ciddi oranlarda gerilemektedir. Gelecekteki gıda ve enerji taleplerini karşılamak amacıyla strese daha dayanıklı ve iklim açısından daha esnek mahsullerin sürdürülebilir verim artışlarını elde etmek için çeşitli yaklaşımların geliştirilmesi ve kullanılması konularında büyük çabalar sarf edilmektedir. Bitkilerin stres tepkileriyle ilişkili mekanizmaların aydınlatılması; stres faktörlerine dayanıklı bitki çeşitlerinin geliştirilmesi ve bunların bitki yetiştiriciliği programlarına entegrasyonu için oldukça önemlidir. Stres faktörlerinin küresel çapta sebep olduğu milyarlarca dolarlık kayıplar, bitkilerin toleranslı hale gelebilmesi adına yapılacak faaliyetlerin önemini artırmaktadır.

Biyotik ve abiyotik stres faktörlerine karşı dayanıklılığı artıran çeşitli uygulamalara dair kısmi bir genel bakış açısı sunmak amacıyla derlenen bu kitabı bilim camiası ve üreticilerin istifadesine sunmuş bulunmaktayız. Kitabımıza bilimsel çalışmaları ile katkı sunan tüm değerli yazarlarımıza ve editör paydaşlarımıza teşekkür ederiz.

Ekim 2023

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

BÖLÜM 1

BİTKİLERDE ABİYOTİK STRES DİRENCİNİ ARTIRMADA ÇİNKONUN ROLÜ

Öğr. Gör. Dr. Hilal YILMAZ[1*]

Prof. Dr. Vahdettin ÇİFTÇİ[2]

DOI: https://dx.doi.org/10.5281/zenodo.10031295

[1*] Kocaeli Üniversitesi, İzmit MYO Bitkisel ve Hayvansal Üretim Bölümü, Tıbbi ve Aromatik Bitkiler Programı, Kocaeli, Türkiye. hilalayhanyilmaz@gmail.com
[2] Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Tarla Bitkileri Bölümü, Bolu, Türkiye. vahdet2565@yahoo.com

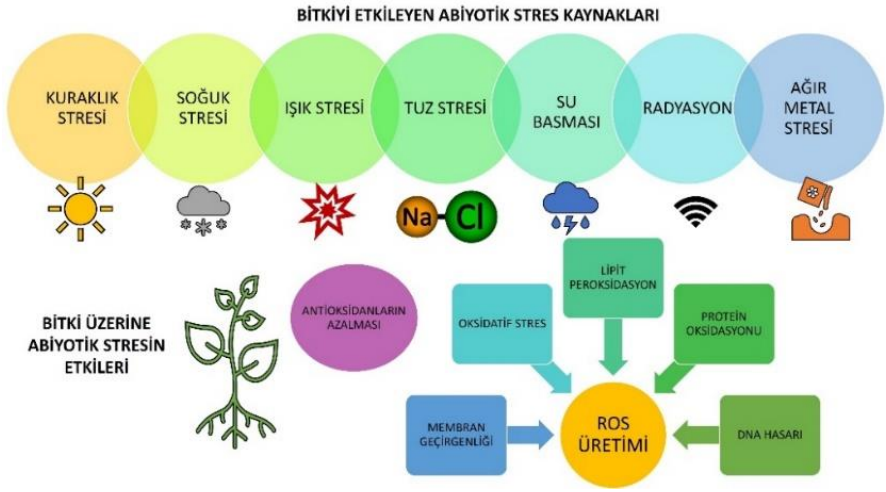
GİRİŞ

Birleşmiş milletler raporuna göre 2050 yılında dünya nüfusunun yaklaşık 9.7 milyar olacağı tahmin edilmektedir. Sanayi devriminin sonucu olarak tüketim hızının artması ile doğal kaynakların dengesi korunamamakta ve insanların aleyhine değişim göstermektedir. İklim değişikliği nedeniyle toplam tarımsal verimliliğin 1961'den bu yana %21 oranında azaldığı düşünülmektedir (Ortiz-Bobea ve ark., 2021). Dünya Gıda Programı tarafından, 2023 yılında 345 milyondan fazla insanın gıda güvensizliğiyle karşı karşıya kalacağı bildirilmiştir (WHO, 2022). Nüfusun hızla artışı ve iklim değişikliklerine bağlı olarak ortaya çıkan gıda talebini karşılamak için tarımsal üretim ve yönetim paradigmaları değiştirilmeli ve tarıma daha profesyonel yöntemlerle yaklaşılmalıdır (Yılmaz ve ark., 2021; Soydemir ve ark., 2022; Soysal ve ark., 2022).

Tarımda üretimin kalitesini ve miktarını etkileyen en önemli sorunlardan biri olan abiyotik stres; sanayileşme, kentleşme ve bazı insan müdahalelerinin doğal ekosistemi sürekli olarak işgal etmesinden kaynaklanmaktadır (Mantri ve ark., 2012). Kuraklık, sıcaklık değişimleri, toprak tuzluluğu, su basması, radyasyon, ışık stresi ve ağır metal stresleri gibi abiyotik stresler, farklı tarımsal ekosistemler altındaki mahsullerin verimi üzerinde azaltıcı etkilere sahiptir (Şekil 1). Bu stresler yalnızca bitki biyolojik çeşitliliğini ve üretkenliğini etkilemekle kalmamakta, aynı zamanda gıda ağını ve ekosistemi de tehlikeye atmaktadır (Tripathi ve ark., 2018).

Değişen iklim koşulları; sıcaklık, tuzluluk ve kuraklık gibi farklı abiyotik streslerin yoğunluğunu ve sıklığını oldukça arttırmıştır (Ikram ve ark., 2021). Artan abiyotik stresler, mahsul verimini düşürdüğü için dünya çapında gıda güvenliğini tehdit etmektedir (Cramer ve ark., 2011). Abiyotik streslerin tarımsal üretimde mahsule verdiği zararı, stres faktörünün hangi bitki gelişim döneminde ortaya çıktığı ve stresin süresi belirlemektedir (Kumari ve ark., 2022). Ayrıca bitkilerde yaygın olarak görülen mikro element eksikliği bitkilerin büyüme ve gelişmesinin yanı sıra stres savunma mekanizmalarını da zayıflatmaktadır. Bitkilerin stres savunma mekanizmaları üzerinde çinko (Zn) gibi mineral maddeler önemli bir etkiye sahiptir (Hajiboland, 2012).

Stresli koşullarda, iyi bir mahsul verimi almak için mikro besinlerin yönetimi çok önemlidir. Bitki besin maddeleri, stresle ilişkili genlerin aktivasyonunu, antioksidan enzimlerin biyosentezini, ozmoprotektanları, ısı şok proteinlerini (HSP'ler), ROS'un detoksifikasyonunu, proteinlerin fonksiyonel veya yapısal korunmasını, DNA onarımını, membran stabilitesini, fotosentetik aktivitenin artmasını ve ağır metal alımının azalmasını destekleyerek abiyotik stresleri hafifletmekte ve bitki savunma mekanizmalarını aktif hale getirmeye yardımcı olmaktadır (Kumari ve ark., 2022).



Şekil 1. Abiyotik stres kaynakları ve abiyotik stresin bitki üzerindeki etkileri

1. ABİYOTİK STRESLERİ AZALTMAYA YÖNELİK MİKROBESİN YAKLAŞIMLARI

Bitkilerin karmaşık organizmalar olması nedeniyle bir bitkideki toplam hücre sayısına ilişkin tahminde bulunmak oldukça zordur. Basit bir Arabidopsis yaprağının bile palizat mezofilindeki hücre sayısının 57.000 olduğu tahmin edilmektedir (Bemiss ve Torii,2007). Bitki gelişimindeki değişiklikler, hücre farklılaşması ve bitki-çevre etkileşimi göz önünde bulundurulduğunda, bu karmaşıklığın sonsuz sayıda permütasyonu olduğunu görmek kolaydır (Cramer ve ark., 2011). Bu nedenle hücrelerin çevrelerine verdikleri moleküler tepkiler son derece karmaşıktır.

Bitkinin abiyotik streslerle karşılaştığında verdiği en erken tepkilerden biri protein sentezlenmesinin engellenmesidir (Cramer ve ark., 2011). Stresin ortadan kalkmaması durumunda ise enerji metabolizması

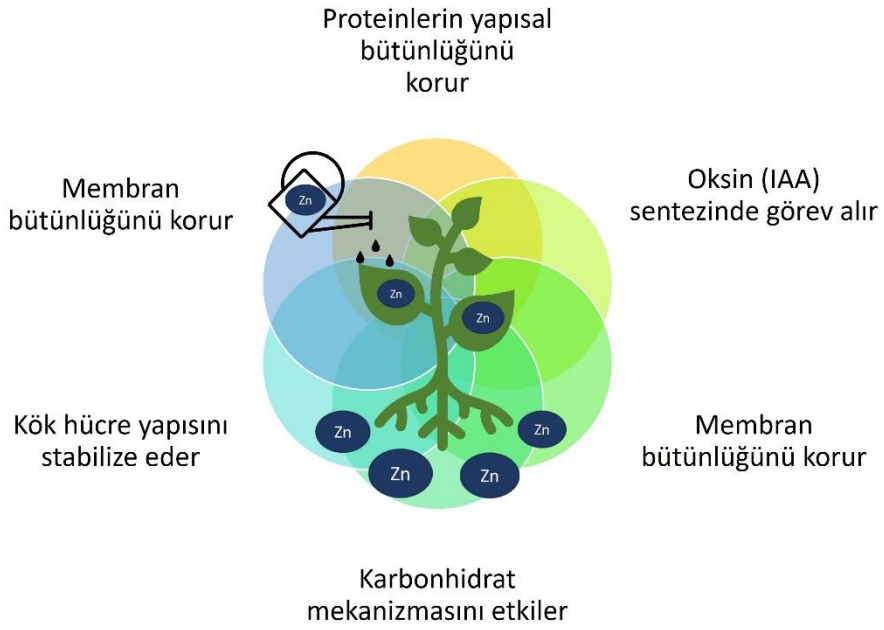
(şekerler, lipitler ve fotosentez) etkilenmektedir (Zhu ve ark., 2023). Dolayısıyla, strese yanıt olarak metabolizmada kademeli ve karmaşık değişiklikler olmaktadır. Bitki abiyotik strese maruz kaldığında, artan reaktif oksijen türleri (ROS) üretimi yoluyla oksidatif stresi indüklemekte, antioksidan aktiviteleri ve besin seviyelerini düşürmektedir. Bu durumda bitkinin anatomik yapıları değişmekte, gelişimleri zayıflamakta ve verimlerinde önemli azalmalar meydana gelmektedir (Hasanuzzaman ve ark., 2020). ROS, biyomoleküllerin (lipid, karbonhidratlar, proteinler, enzimler, DNA) oksidasyonuna bağlı olarak moleküler ve hücresel bileşenlere zarar vermekte ve bitki ölümüne neden olmaktadır (Bhuyan ve ark., 2020; Shah ve ark., 2019). ROS'un toksisitesini azaltmak için bitki hücreleri, askorbat, α-tokoferol, glutatyon ve karotenoidler gibi düşük moleküler ağırlıklı antioksidanların yanı sıra koruyucu enzimlerden oluşan bir antioksidatif sistem geliştirmiştir. Süperoksit radikalleri, süperoksit dismutaz (SOD) tarafından temizlenirken, ortaya çıkan hidrojen peroksit (H_2O_2), katalaz (CAT) ve peroksidaz (POD) ile suya indirgenmektedir (Sachdev ve ark., 2021). Kısacası, zararları önlemek için bitkiler tarafından, enzimatik ve enzimatik olmayan antioksidanların üretimi yoluyla ROS üretimi sıkı bir şekilde düzenlenmektedir (Kumar ve ark., 2017).

Günümüzde yapılan çalışmalarda, bitkide stres savunma mekanizması üzerinde etkili olan ajanlarla abiyotik stresin olumsuz etkilerinin azaltılması hedeflenmektedir. Bunun için kimyasal uygulamalar (salisik asit, nitrik oksit), büyümeyi teşvik eden hormonlar (oksin,

giberellin, stokininler vb.), enzimler ve makro-mikro besin yönetimi gibi çeşitli teknikler kullanılmaktadır (Tripathi ve ark., 2018). Abiyotik stresle mücadele amacıyla yetiştiricilikte kullanılan mikro besin ilaveleri uygun maliyetli ve çevre dostu teknik olarak ortaya çıkan önemli bir yaklaşımdır (Yadav ve ark., 2016; Hassan ve ark., 2005). Demir, çinko, bakır, manganez ve magnezyum gibi metal iyonları kofaktör olarak birçok antioksidan enzimin yapısına katılmakta olup, mikro besin eksikliği koşullarında antioksidan enzim aktiviteleri azalmakta ve bitkilerin çevresel streslere karşı duyarlılığı artmaktadır (Çakmak ve ark., 2010).

2. ÇİNKO (Zn) UYGULAMALARI

Çinko (Zn), bitkinin büyümesi ve gelişimi için gerekli olan önemli bir mikro besin elementidir. 300'den fazla enzimde kofaktör olan çinko, dehidrojenazlar, izomerazlar, transfosforilazlar, RNA ve DNA polimerazlar gibi enzimlerin üzerinde önemli rollere sahiptir (Krämer ve Clemens, 2006; Lee ve ark., 2020). Fotosentez, protein sentezi, büyüme düzenlemesi ve Cu/Zn-SOD gibi stres direnç mekanizmaları dahil olmak üzere çeşitli fizyolojik ve biyokimyasal süreçler için mutlak gereklidir (Broadley ve ark., 2007; Ma ve ark., 2017; Hafeez ve ark., 2013; Palmgren ve ark., 2008).



Şekil 2. Bitki stresini azaltmak için uygulanan Zn'nin bitki mekanizmalarına etkisi

Yer kabuğunun yaklaşık %0,02'sini oluşturan çinko toprakta düşük mobiliteye sahiptir (Singh ve ark., 2011). Bitki kökleri çinkoyu en fazla Zn^{2+} formunda absorbe etmektedir (Hassan ve ark., 2020). Özellikle kurak bölgelerde yüksek kalsiyum karbonat içeriği nedeniyle toprakların pH'sı yükselmekte ve bitki tarafından alınan yarayışlı çinko oranı azalmaktadır (Alloway, 2008). Ayrıca organik madde bakımından fakir olan kumlu topraklarda ve yüksek magnezyumlu killi topraklarda genellikle çinko eksikliği sıklıkla görülmektedir (Singh ve ark., 2011). Bitkinin çeşitli çevresel streslere karşı tolerans düzeyinin yükseltilmesinde önemli bir role sahip olan çinko eksikliğinde verimin azalttığı ve ürün kalitesinin bozulduğu

yapılan çalışmalarla kanıtlanmıştır (Chattha ve ark., 2017; Hassan ve ark., 2019).

Buğday üzerinde yapılan bir çalışmada çinko eksikliğinin bitki büyüme sürecini engellediği, çinko ilavesinin ise ısı stresinin olumsuz etkilerini en aza indirdiği gözlemlenmiştir. Ayrıca çinko ilave uygulamasının SOD (Süperoksit Dismutaz) enzim aktivitesini de arttırdığı ve bu sayede bitkinin ısı stresi karşısında daha stabil olduğu tespit edilmiştir (Peck ve McDonald, 2010). Yaygın abiyotik streslerden biri olan üşüme stresinin çeltik bitkisinin gelişimi ve antioksidatif savunma mekanizması üzerine etkisinin incelendiği çalışmada stresle mücadele amacıyla yapraktan nano-çinko uygulaması yapılmıştır. Zn oksit-nanopartiküllerin (NP), çeltik bitkisinin morfolojik özelliklerini iyileştirdiği, yaprakta klorofil birikimini arttırdığı, H_2O_2, MDA, prolin seviyelerini azalttığı ve dokularda majör antioksidatif enzimler olan süperoksit dismutaz (SOD), katalaz (CAT) ve peroksidazı (POD) arttırarak oksidatif hasarı önemli ölçüde iyileştirdiği bildirilmiştir (Song ve ark., 2021). Önemli bir abiyotik stres olan ağır metal stresinin etkisini azaltmak için buğdayda yapılan başka bir çalışmada ZnNP’nin (Zn oksit-nanopartiküllerin) kadmiyum toksisitesini hafifletebileceği saptanmıştır (Hussain ve ark., 2018). ZnNP'ler ağır metal stresinde antioksidan savunma enzimlerinin ve ilgili metabolitlerin seviyesini arttırarak bitkinin mücadelesine yardımcı olmaktadır (Venkatachalam ve ark., 2017). Zn’nin kuraklık stresinin olumsuz etkisini iyileştirdiği çalışmalara bakıldığında, buğday verimini önemli ölçüde arttırdığı

(Sultana ve ark., 2016), mısırın verimini ve hasat indeksini pozitif etkilediği (Chattha ve ark., 2017) ve su eksikliğinin olumsuz etkilerini azaltarak buğdayın büyüme ve verimini yükselttiği görülmektedir (Hera ve ark., 2018). Yürütülen bir başka çalışmada, çinko akümülasyon kabiliyeti düşük buğday genotipine ilave çinko uygulamasının fotosentetik aktiviteyi geliştirebileceği bildirilmiştir (Graham ve McDonald, 2001). Düşük Zn miktarının nohut türlerinde kuraklık ve ısı stresinin olumsuz etkilerini şiddetlendirdiği, bitki biyokütlesinde azalmaya, karbon asimilasyonuna ve antioksidan aktiviteye neden olduğu, ayrıca oksidatif hasarı da arttırdığı bildirilmiştir (Ullah ve ark., 2019). Ancak çalışmada yeterli çinko desteği nohut türlerinde kuraklık ve sıcaklık stresinin olumsuz etkilerini iyileştirmiştir. Kuraklık stresinin kötü etkilerini azaltmak ve kurak iklim koşulları altında nohut bitkilerinin büyümesini arttırmak için yeterli Zn beslenmesinin oldukça önemli olduğu ifade edilmiştir (Mahmood ve ark., 2019).

SONUÇ

Tarımsal üretimdeki en büyük sorunlardan biri gelecekteki gıda güvenliğinin tehlike altında olmasıdır. Bu sorunun en önemli sebebi iklim değişiklikleri sonucunda bitki gelişimini morfolojik, anatomik ve fizyolojik bakımdan etkileyen abiyotik stres kaynaklarıdır. Genel olarak abiyotik stresler klorofil sentezini, yaprak büyümesini, enzim aktivitesini, terlemeyi, stoma iletkenliğini, membran stabilitesini ve son olarak ürün verimliliğini etkilemektedir. Abiyotik streslere karşı dayanıklı çeşitlerin geliştirilmesi iklim değişiklikleriyle mücadele için

önemli bir adımdır. Bununla birlikte, mikro besin elementi programlarıyla da bitkilerin abiyotik stres toleransının geliştirilmesine yardımcı olunabilmektedir.

Çinko (Zn) uygulamalarının, reaktif oksijen türlerini (ROS) azaltabileceği, süperoksit dismutaz (SOD), peroksidaz (POD) ve katalaz (CAT) gibi antioksidan enzimlerin konsantrasyonunu ise arttırabileceği bilinmektedir. Çinko uygulamaları bitkilerde çeşitli fizyolojik değişikliklerin ve savunma mekanizmalarının etkinleştirilmesini sağlayarak, bitkilerde abiyotik streslere karşı stabilite sağlamaktadır. Yapılan birçok çalışma ile çinko uygulamalarının bitkilerde metabolik süreçlerin iyileştirilmesine destek olduğu tespit edilmiştir. Çinko uygulamaları, abiyotik stresi yönetmenin düşük maliyetli ve sürdürülebilir bir yoludur. Ancak stres altındaki rolü konusunda daha detaylı araştırmaların yapılması gerekmektedir.

KAYNAKÇA

Alloway, B. J. (2008). Zinc in soils and crop nutrition.

Bemis, S. M., & Torii, K. U. (2007). Autonomy of cell proliferation and developmental programs during Arabidopsis aboveground organ morphogenesis. *Developmental Biology*, *304*(1), 367-381.

Bhuyan, M. B., Hasanuzzaman, M., Parvin, K., Mohsin, S. M., Al Mahmud, J., Nahar, K., & Fujita, M. (2020). Nitric oxide and hydrogen sulfide: two intimate collaborators regulating plant defense against abiotic stress. *Plant Growth Regulation*, *90*, 409-424.

Broadley, M. R., White, P. J., Hammond, J. P., Zelko, I., & Lux, A. (2007). Zinc in plants. *New phytologist*, *173*(4), 677-702.

Bybordi, A., & Mamedov, G. (2010). Evaluation of application methods efficiency of zinc and iron for canola (Brassica napus L.). *Notulae Scientia Biologicae*, *2*(1), 94-103.

Cakmak, I., Pfeiffer, W. H., & McClafferty, B. (2010). Biofortification of durum wheat with zinc and iron. *Cereal chemistry*, *87*(1), 10-20.

Chattha, M. U., Hassan, M. U., Khan, I., Chattha, M. B., Mahmood, A., Chattha, M. U., ... & Khan, S. (2017). Biofortification of wheat cultivars to combat zinc deficiency. *Frontiers in plant science*, *8*, 281.

Chattha, M. U., Hassan, M. U., Khan, I., Chattha, M. B., Mahmood, A., Chattha, M. U., ... & Khan, S. (2017). Biofortification of wheat cultivars to combat zinc deficiency. *Frontiers in plant science*, *8*, 281.

Cramer, G. R., Urano, K., Delrot, S., Pezzotti, M., & Shinozaki, K. (2011). Effects of abiotic stress on plants: a systems biology perspective. *BMC plant biology*, *11*(1), 1-14.

Graham, A. W., & McDonald, G. K. (2001, January). Effect of zinc on photosynthesis and yield of wheat under heat stress. In *Proceedings of the 10th Australian Agronomy Conference* (Vol. 2).

Hafeez, B. M. K. Y., Khanif, Y. M., & Saleem, M. (2013). Role of zinc in plant nutrition-a review. *American journal of experimental Agriculture*, *3*(2), 374-391.

Hajiboland, R. (2012). Effect of micronutrient deficiencies on plants stress responses. *Abiotic stress responses in plants: metabolism, productivity and sustainability*, 283-329.

Hasanuzzaman, M., Bhuyan, M. B., Zulfiqar, F., Raza, A., Mohsin, S. M., Mahmud, J. A., ... & Fotopoulos, V. (2020). Reactive oxygen species and antioxidant defense in plants under abiotic stress: Revisiting the crucial role of a universal defense regulator. *Antioxidants*, *9*(8), 681.

Hassan, M. J., Zhang, G., Wu, F., Wei, K., & Chen, Z. (2005). Zinc alleviates growth inhibition and oxidative stress caused by cadmium in rice. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, *168*(2), 255-261.

Hassan, M. U., Chattha, M. U., Ullah, A., Khan, I., Qadeer, A., Aamer, M., ... & Khan, T. A. (2019). Agronomic biofortification to improve productivity and grain Zn concentration of bread wheat. *Int. J. Agric. Biol*, *21*, 615-620.

Ikram, M., Ur Rehman, H., Soysal, S., Aamir, M., Islam, M.S., Kumari, A., El Sabahgh, A (2021) Impact of Climate Change on Cotton Growth and Yield. E. Karademir ve Ç. Karademir (Ed) Cotton Production Under Abiotic Stress (pp. 3-22). IKSAD, Türkiye.

Hera, M. H. R., Hossain, M., & Paul, A. K. (2018). Effect of foliar zinc spray on growth and yield of heat tolerant wheat under water stress. *Int. J. Biol. Environ. Eng*, *1*, 10-16.

Hussain, A., Ali, S., Rizwan, M., ur Rehman, M. Z., Javed, M. R., Imran, M., ... & Nazir, R. (2018). Zinc oxide nanoparticles alter the wheat physiological response and reduce the cadmium uptake by plants. *Environmental Pollution*, *242*, 1518-1526.

Krämer, U., & Clemens, S. (2006). Functions and homeostasis of zinc, copper, and nickel in plants. *Molecular biology of metal homeostasis and detoxification: From microbes to man*, 215-271.

Kumar, V., Khare, T., Sharma, M., & Wani, S. H. (2017). ROS-induced signaling and gene expression in crops under salinity stress. *Reactive oxygen species and antioxidant systems in plants: role and regulation under abiotic stress*, 159-184.

Kumari, V. V., Banerjee, P., Verma, V. C., Sukumaran, S., Chandran, M. A. S., Gopinath, K. A., ... & Awasthi, N. K. (2022). Plant nutrition: An effective way to alleviate abiotic stress in agricultural crops. *International Journal of Molecular Sciences*, *23*(15), 8519.

Lee, J., Tatsumi, A., Tsukakoshi, K., Wilson, E. D., Abe, K., Sode, K., & Ikebukuro, K. (2020). Application of a glucose dehydrogenase-fused with zinc finger protein to label DNA aptamers for the electrochemical detection of VEGF. *Sensors*, *20*(14), 3878.

Ma, D., Sun, D., Wang, C., Ding, H., Qin, H., Hou, J., ... & Guo, T. (2017). Physiological responses and yield of wheat plants in zinc-mediated alleviation of drought stress. *Frontiers in plant science*, *8*, 860.

Mahmood, A., Kanwal, H., Kausar, A., Ilyas, A., Akhter, N., Ilyas, M., ... & Khalid, H. (2019). Seed priming with zinc modulate growth, pigments and yield of chickpea (Cicer arietinum L.) under water deficit conditions. *Applied Ecology & Environmental Research*, *17*(1).

Mantri, N., Patade, V., Penna, S., Ford, R., & Pang, E. (2012). Abiotic stress responses in plants: present and future. *Abiotic stress responses in plants: metabolism, productivity and sustainability*, 1-19.

Ortiz-Bobea, A., Ault, T. R., Carrillo, C. M., Chambers, R. G., & Lobell, D. B. (2021). Anthropogenic climate change has slowed global agricultural productivity growth. *Nature Climate Change*, *11*(4), 306-312.

Palmgren, M. G., Clemens, S., Williams, L. E., Krämer, U., Borg, S., Schjørring, J. K., & Sanders, D. (2008). Zinc biofortification of cereals: problems and solutions. *Trends in plant science*, *13*(9), 464-473.

Peck, A. W., & McDonald, G. K. (2010). Adequate zinc nutrition alleviates the adverse effects of heat stress in bread wheat. *Plant and soil*, *337*, 355-374.

Sachdev, S., Ansari, S. A., Ansari, M. I., Fujita, M., & Hasanuzzaman, M. (2021). Abiotic stress and reactive oxygen species: Generation, signaling, and defense mechanisms. *Antioxidants*, *10*(2), 277.

Shah, K., Chaturvedi, V., & Gupta, S. (2019). Climate change and abiotic stress-induced oxidative burst in rice. In *Advances in rice research for abiotic stress tolerance* (pp. 505-535). Woodhead Publishing.

Singh, K. K., Praharaj, C. S., Choudhary, A. K., Kumar, N., & Venkatesh, M. S. (2011). Zinc response in pulses. *Indian Journal of Fertilisers*, *7*(10), 118-126.

Song, Y., Jiang, M., Zhang, H., & Li, R. (2021). Zinc oxide nanoparticles alleviate chilling stress in rice (Oryza Sativa L.) by regulating antioxidative system and chilling response transcription factors. *Molecules*, *26*(8), 2196.

Soydemir, H. E., Yılmaz, A. & Çiftçi V. (2022). Su Kültürü Uygulamaları. A. Yılmaz ve S. Soysal (Ed) Modern Tarım Uygulamaları (pp. 77-99). IKSAD, Türkiye.

Soysal, S., Erman, M. & Çığ F. (2022) Biyoremediasyon Çalışmalarında Bitki Gelişimini Teşvik Eden Kök Bakterilerinin Rolü. A. Yılmaz ve S. Soysal (Ed) Modern Tarım Uygulamaları (pp. 151-167). IKSAD, Türkiye.

Sultana, S., Naser, H. Á., Shil, N. C., Akhter, S., & Begum, R. A. (2016). Effect of foliar application of zinc on yield of wheat grown by avoiding irrigation at different growth stages. *Bangladesh Journal of Agricultural Research*, *41*(2), 323-334.

Tripathi, D. K., Singh, S., Gaur, S., Singh, S., Yadav, V., Liu, S., ... & Sahi, S. (2018). Acquisition and homeostasis of iron in higher plants and their probable role in abiotic stress tolerance. *Frontiers in Environmental Science*, *5*, 86.

Ullah, A., Romdhane, L., Rehman, A., & Farooq, M. (2019). Adequate zinc nutrition improves the tolerance against drought and heat stresses in chickpea. *Plant Physiology and Biochemistry*, *143*, 11-18.

Umair Hassan, M., Aamer, M., Umer Chattha, M., Haiying, T., Shahzad, B., Barbanti, L., ... & Guoqin, H. (2020). The critical role of zinc in plants facing the drought stress. *Agriculture*, *10*(9), 396.

Venkatachalam, P., Jayaraj, M., Manikandan, R., Geetha, N., Rene, E. R., Sharma, N. C., & Sahi, S. V. (2017). Zinc oxide nanoparticles (ZnONPs) alleviate

heavy metal-induced toxicity in Leucaena leucocephala seedlings: a physiochemical analysis. *Plant Physiology and Biochemistry*, *110*, 59-69.

Yadav, V., Arif, N., Singh, S., Srivastava, P. K., Sharma, S., Tripathi, D. K., ... & Chauhan, D. K. (2016). Exogenous mineral regulation under heavy metal stress: advances and prospects. *Biochem. Pharmacol*, *5*(220), 2167-0501.

Yılmaz, A., Soysal, S., Emiralioğlu, O., Yılmaz, H., Soydemir, H. E. & Çiftçi, V. (2021). Sürdürülebilir Tarımda Anıza Ekimin Önemi. M.F. Baran, K. Bellitürk ve A. Çelik (Ed) Türkiye'de Sürdürülebilir Tarım Uygulamaları: Zorluklar ve Potansiyeller (221-230. ss.). Adıyaman; Turkey: İKSAD.

Zhu, F., Sun, Y., Jadhav, S. S., Cheng, Y., Alseekh, S., & Fernie, A. R. (2023). The Plant Metabolic Changes and the Physiological and Signaling Functions in the Responses to Abiotic Stress. In *Plant Abiotic Stress Signaling* (pp. 129-150). New York, NY: Springer US.

BÖLÜM 2

FASULYE BİTKİSİNDEKİ BAZI TRANSKRİPSİYON FAKTÖRLERİN ABİYOTİK STRES ETMENLERİNE KARŞI TEPKİLERİ

Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Zahit YEKEN[1*]

DOI: https://dx.doi.org/10.5281/zenodo.10031313

[1*] Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Tarla Bitkileri Bölümü, Bolu, Türkiye. yekenmehmetzahit@gmail.com

GİRİŞ

Fasulye (*Phaseolus vulgaris* L., 2n = 2x = 22), dünyanın birçok bölgesinde yetiştiriciliği yapılan önemli bir yemeklik baklagil bitkisidir. Yüksek oranda protein, mineral ve vitamin içerdiğinden dolayı insan beslenmesinde önemli bir yere sahiptir (Vaz Patto ve ark., 2015; Bitocchi ve ark., 2017; Yeken ve ark., 2023a). FAO verilerine göre 2021 yılında, dünya genelinde 35.920.593 ha alanda kuru fasulye yetiştiriciliği yapılmış ve 27.715.023 ton üretim gerçekleşmiştir. Türkiye'de ise aynı yıl 107.723 ha alanda kuru fasulye yetiştiriciliği yapılmış ve 305.000 ton üretim sağlanmıştır (FAO, 2023).

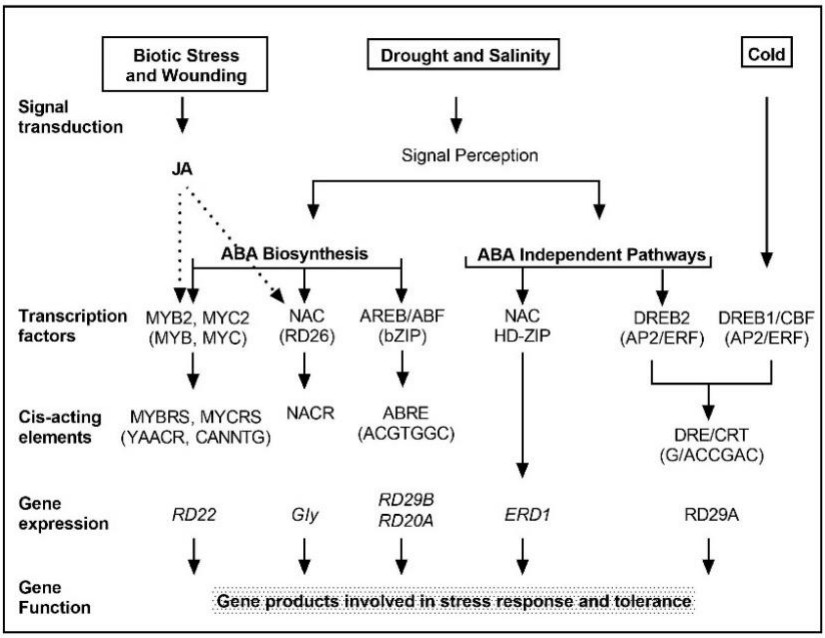
Fasulye fiziksel genetik haritası, RFLP (Restriction Fragment Length Polymorphism) ve RAPD (Random Amplified Polymorphic DNA) gibi moleküler markörler ile uzun yıllar önce oluşturulmuştur (Adam-Blondon ve ark., 1994; Nodari ve ark., 1993). Ancak son yıllarda özellikle yeni nesil dizileme gibi yüksek çözünürlüklü teknolojilerin yaygın kullanımı ile birlikte fasulye genomu hakkındaki bilgi birikimi oldukça artmıştır. Fasulye bitkisinin genom dizisi Schmutz ve ark. (2014) tarafından "whole-genome shotgun sequencing" tekniği ile "G19833" genotipinden elde edilmiştir. Ortaya çıkan diziler 11 kromozom üzerinde toplanmış ve 587-Mb fasulye genomunun yaklaşık %80'ini ifade etmiştir. Toplamda 31.632 protein kodlayan dizi tanımlanmıştır. Ayrıca, transpozon elementlerin büyük miktarlarda mevcut olduğu ve genomun neredeyse %45'ini oluşturduğu bildirilmiştir. Diğer bir çalışmada, Vlasova ve ark. (2016), BAT93 fasulye genotipinin genomunu "PhasIbeAm consortium"u altında

dizilemiştir. Fasulyenin ilk kromozom ölçekli versiyonu "The Joint Genome Institute, Department of Energy" (https://phytozome-next.jgi.doe.gov/info/Pvulgaris_v2_1) tarafından geliştirilmiştir. Bu gelişmeler, fasulye'de stres tepkileriyle ilişkili biyolojik süreçlerin düzenleyici kontrolü ve gen fonksiyonlarına ilişkin bilgilerin geliştirilmesi ile ilgili çalışmaların yapılmasını kolaylaştırmıştır.

Son yıllarda birçok üründe olduğu gibi kuru fasulyede de ıslah çalışmaları ve yeni geliştirilen çeşit sayıları artmaya başlamıştır. Türkiye'de 2023 yılı itibariyle 45 tescilli kuru fasulye çeşidi bulunmaktadır (Anonim, 2023). Ancak, tüketici taleplerindeki çeşitlilik ve abiyotik/biyotik stres faktörlerinin hızlı bir şekilde değişim göstermesinden kaynaklı olarak tescil edilen birçok çeşidin ekonomik ömrü oldukça kısa olmakta ve bundan dolayı sürekli yeni çeşit geliştirme ihtiyacı doğmaktadır. Fasulye yetiştiriciliğinde karşılaşılan abiyotik ve biyotik stres faktörleri ürün kalitesi ve verimini önemli ölçüde azaltmaktadır (Frei ve ark., 2005; Oblessuc ve ark., 2012; Keller ve ark., 2015; Diaz ve ark., 2018; Kamfwa ve ark., 2018; Dramadri ve ark., 2019, Sedlar ve ark., 2020, Palacıoğlu ve ark., 2021; Çelik ve ark., 2023a; Çelik ve ark, 2023b; Emiralioğlu ve ark., 2023; Yeken ve ark., 2023b; Yilmaz ve ark., 2023).

Bitkilerin farklı stres etmenlerine uyum sağlama kabiliyetleri türden türe değişse de abiyotik stresleri algılama ve bunlara uyum sağlama yetenekleri bulunmaktadır. Bu süreçte bitkiler stres etmenlerine bir dizi moleküler, hücresel, biyokimyasal ve fizyolojik reaksiyonlar yoluyla tepki vermekte, uyum sağlamakta ve abiyotik streslere karşı toleransı

artırmak için işlev gören bir dizi savunma mekanizmasını harekete geçirmektedir (Gujjar ve ark., 2014; Şekil 1). Hwang ve ark. (2005) abiyotik stres faktörleri ile ilişkili genlerin; hücrelerin ve dokuların korunmasında önemli rol oynayan protein ve metabolitleri oluşturduğunu, ayrıca bu genlerin sinyal moleküllerinin iletilmesi ile ilişkili olduğunu belirtmiştir. Nakashima ve ark. (2014) gen ve ürünleri olan proteinlerin rollerinin araştırılmasının, bitkilerin stres faktörlerine verdiği tepkinin anlaşılmasında temel rol oynadığı ifade etmiştir.



Şekil 1. Abiyotik stres sinyal ağı. (Şekil, Gujjar ve ark. (2014)'den alınmış ve GraphPad programında düzenlenmiştir)

Transkripsiyonel düzenleme, stres yanıtlarını kontrol eden hücre sinyal yollarının kritik adımlarındandır. Transkripsiyon faktörleri, abiyotik ve biyotik stres tepkileri sırasında sinyal iletimini ve genlerin ifadesini

yönetebilen önemli genlerdir. Bu genler, çeşitli abiyotik strese duyarlı genlerin promotör bölgesinde bulunan cis-elementlerle etkileşime girerek bitkilerde abiyotik stres etmenlerine karşı önemli düzenleyici roller oynamaktadır (Gujjar ve ark., 2014). Transkripsiyon faktörleri ile ilgili olarak, genellikle Plant Transcription Factor (http://planttfdb.gao-lab.org/,http://planttfdb.gao-lab.org/index.php?sp=Pvu) veritabanından yararlanılmaktadır (Jin ve ark., 2016). Strese bağlı genlerin düzenlenmesinde transkripsiyon faktörlerin önemi nedeniyle bu kapsamda yürütülen araştırmalar son yıllarda hızla artmaktadır. Nitekim abiyotik strese toleranslı çeşitlerin geliştirilmesinde trankripsiyon faktörlerinin önemli hedefler arasında olduğu belirtilmiştir (Yoon ve ark., 2020). Bu amaç doğrultusunda fasulye genomunda transkripsiyon faktörlerinin tanımlanması ve abiyotik stres koşullarında ifade düzeylerinin belirlenmesi amacıyla çeşitli araştırmalar gerçekleştirilmiştir. Bu bölümde, fasulye genomunda tanımlanan bazı transkripsiyon faktörlerine ait çalışmalar başlıklar altında kısaca özetlenmiş ve bitki ıslahındaki kullanımı ele alınmıştır.

1. BASIC REGION / LEUCINE ZIPPER (bZIP) TRANSKRİPSİYON FAKTÖRÜ

Bitkilerde bZIP transkripsiyon faktörleri, patojen savunması, sinyalizasyon, tohum olgunlaşması ve çiçek gelişimi gibi süreçlerde rol almaktadır (Jakoby ve ark., 2002). Transkripsiyon faktörlerine benzer şekilde sinyal iletim yollarında yer alan proteinlerin gen transkripsiyon seviyeleri de kuraklık stresi nedeniyle değişebilmektedir (Rodriguez-Uribe ve O'Connell, 2006). Bu kapsamda yürütülen bir çalışmada

Rodriguez-Uribe ve O'Connell (2006), su eksikliğine yanıt veren bZIP transkripsiyon faktörünün izolasyonu ve karakterizasyonunu gerçekleştirmiştir. Transkripsiyon faktörünün genleri, *Phaseolus acutifolius* ve *P. vulgaris*'den izole edilmiştir. Her iki türde de su eksikliğinde bZIP proteini hem epidermal hücrede hem de vasküler hücrenin çekirdeklerinde birikmiştir. Bu genin su stresine yanıt olarak muhtemelen ilgili genlerin düzenlenmesinde rol oynadığı ve köke özgü transkripsiyon faktörünü temsil ettiği ifade edilmiştir. Çalışma sonucunda bZIP'lerin adaptif bir yanıtta kök uzamasını artıracak şekilde modellenebileceği belirtilmiştir. *bZIP* genlerinin, aşırı sıcaklık ve yüksek tuzluluk gibi abiyotik stres tepkilerinin temel bileşenleri olduğu da iddia edilmektedir (Zhu ve ark., 2018). *bZIP* gen ailesi ile yürütülen başka bir çalışmada Zhang ve ark. (2022), fasulyede 84 *bZIP* geninin genom dizilerini ve konumlarını, evrimsel ilişkilerini, gen yapılarını, motiflerini ve özelliklerini belirlemiştir. Çalışmada *PvbZIP* genlerinin farklı dokulardaki ekspresyon seviyeleri ile çimlenme aşamasında tuz stresi altında 9 *PvbZIP* geninin ekspresyon seviyeleri incelenmiştir. Tuz stresi altında *PvbZIP*'lerin radikulada ifade düzeyine sahip olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca elde edilen RNA-seq verileri, qRT-PCR (Kantitatif gerçek zamanlı polimeraz zincir reaksiyonu) ve KEGG (Kyoto encyclopedia of genes and genomes) analizi, *PvbZIP*'lerin ABA (Absisik asit) sinyal yolunu hedef aldığını ve tuz stresi toleransının artmasında rol oynadığını ortaya çıkarmıştır. Diğer bir çalışmada Ayra ve ark. (2018) tuzluluğun neden olduğu iyonik, osmotik ve oksidatif stresle başa çıkabilen fasulye bitki hücrelerindeki gen ifadesini kontrol etmek için *PvbZIP* genlerinin diğer transkriptör faktörler (ERF,

WRKY, HB, ALFIN, NAC gibi) ile birlikte çalışan önemli düzenleyiciler olduğunu ifade etmiştir. Çalışmada sunulan veriler ile fasulye köklerinin/nodüllerinin tuzluluğa tepkisinde aday PvbZIP transkripsiyon faktörlerinin spesifik rollerini göstermeye yönelik daha ileri analizler için önemli bir temel oluşturmuştur. Ayrıca bu genlerin fasulyenin tuz stresine karşı daha dayanıklı hale getirilmesine potansiyel katkılar sağlanabileceği belirtilmiştir.

2. MYELOBLASTOSIS (MYB) TRANSKRİPSİYON FAKTÖRÜ

Topraktaki azot (N) ve fosfor (P) seviyelerindeki azlık ve asitli toprak koşulları gibi çevresel stres faktörleri, fasulye üretiminin yapıldığı alanlar için önemli problemler arasındadır. Fasulyenin tarımsal önemine rağmen, P noksanlığı ile ilgili bitki tepkilerinin düzenlenmesine ilişkin çalışmalar yeterli düzeyde değildir. Hernández ve ark. (2007), Orta Amerika orijinli fasulye genotipinde P eksikliği yaşayan fasulye köklerinde makro dizi analizi gerçekleştirmiş ve köklerde 124 farklı şekilde ifade edilen genin tespit edildiğini belirtmişlerdir. Valdes-Lopez ve ark. (2008), *AtPHR*1'e ortolog olan ve *PvPHR*1 olarak adlandırılan fasulye MYB transkripsiyon faktörünün, P eksikliği tepkisinin düzenleyicisi olup olmadığını araştırmıştır. P eksikliğinde fasulye köklerinde gen ifadesinin düzenlenmesinde *PvPHR*1'in olası rolünün ortaya çıkarılması için RNAi gen susturma yöntemi kullanılmıştır. Susturulmuş *PvPHR*1-transgenik köklerin P eksikliği altında kontrol kökleriyle karşılaştırıldığında serbest P içeriğinde %23'lük bir azalma gösterdiği belirtilmiştir. Sonuçlar, *PvPHR*1'in P eksikliği koşullarında gen ifadesini düzenlemede

potansiyel bir rol oynayabileceğini göstermektedir. MYB transkripsiyon faktörü ile farklı bitkilerde gerçekleştilen çalışmalarda, bu genlerin farklı abiyotik ve biyotik stres faktörlerinde de önemli roller oynadığı belirtilmiştir (Baldoni ve ark., 2015). Bu kapsamda fasulye bitkisinde farklı stres faktörlerinde MYB gen ailesinin olası rollerinin ortaya çıkarılması için daha fazla çalışmaya ihtiyaç duyulmaktadır.

3. TIFY TRANKRİPSİYON FAKTÖRÜ

TIFY, bitkiye özgü geniş bir transkripsiyon faktörü gen ailesidir. JAZ (Jasmonate-ZIM domain) adı verilen *TIFY* genleri alt grubu, *Arabidopsis* ve diğer bitkilerde jasmonat (JA) tarafından düzenlenen transkripsiyonun baskılayıcıları olarak tanımlanmıştır. Jasmonat, bitki büyüme/gelişimi, biyotik ve abiyotik streslere karşı savunma yanıtlarının birçok yönünü düzenleyen bir bitki hormonudur (Browse, 2009). Aparicio-Fabre ve ark. (2013), fasulye bitkisinde 19 *PvTIFY* geni tanımlamışlardır. Çalışma sonucunda kontrol bitkilerle karşılaştırıldığında *PvTIFY*10C'nin susturulmuş olduğu köklerin transkript profilleri, *PvTIFY*10C'nin doğrudan veya dolaylı olarak fosfora yanıt veren bazı genlerin tepkisini düzenlediğini göstermektedir. Bu düzenleme sürecinin, jasmonat ve diğer hormon sinyalizasyonları aracılığıyla gerçekleşebileceği belirtilmiştir.

4. APETALA2-ETHYLENE-RESPONSIVE FACTOR (AP2-ERF) TRANSKRİPSİYON FAKTÖRÜ

AP2/ERF ailesi, tuzluluk, kuraklık, sıcaklık gibi abiyotik streslere maruz kalma durumunda strese duyarlı gen ekspresyonunun

düzenlenmesinde önemli rollere sahip olan bitkiye özgü transkripsiyon faktörleri arasında yer almaktadır (Mizoi ve ark., 2012). AP2-ERF ailesi, dizi benzerliklerine ve sahip oldukları AP2 domainlerin sayısına göre beş alt gruba (AP2 [APETALA2], RAV [ABI3/VP1 ile ilişkili], ERF, DREB [dehydration-responsive element binding protein] ve diğerleri) ayrılmaktadır (Sakuma ve ark., 2002). Kavas ve ark. (2015) *AP2-ERF* gen ailesini fasulye bitkisinde tanımlamış ve tuz stresine maruz kalan yaprak/kök dokularında 9 *PvAP2-ERF* geninin ekspresyon seviyelerini belirlemiştir. Ayrıca, *AP2-ERF* genlerinin genomik yapılarının karakterizasyonu, kromozomal lokasyonları, promotör analizi, protein etkileşimi ve dizi homolojilerini incelemiştir. Çalışmada, *PvAP2-ERF* genlerinin genel olarak tuz stresinden etkilendiği ve bunların pozitif regülasyon yoluyla tuz stresi sinyal iletiminde rol aldıkları belirlenmiştir. Sonuçların, tuza toleranslı fasulye çeşitlerinde AP2-ERF ailesi üyelerinin rollerinin anlaşılmasına yardımcı olabileceği ve aynı zamanda genetik mühendisliği yaklaşımları için fonksiyonel gen kaynakları da sağlayabileceği ifade edilmiştir. Diğer bir çalışmada Nova-Franco ve ark. (2015), AP2-1 (APETALA2-1) tarafından baskılanan fasulye simbiyotik genlerin ve miR172 (Micro-RNA172c)'nin kökler ve nodüllerde artan ifadesi ile geliştirilmiş çeşitlerin sürdürülebilir tarım için potansiyel olarak önemli olabileceğini belirtmiştir. Konzen ve ark. (2019) fasulye genomunda 54 *PvDREB* genini karakterize etmişler ve dört genin (*PvDREB1F*, *PvDREB2A*, *PvDREB5A* ve *PvDREB6B*) abiyotik stresler (PEG [10%], tuzluluk [NaCl, 250 mM], soğuk [4°C] and absisik asit [100 μM]), altındaki ekspresyon profillerini analiz etmişlerdir. *PvDREB1F*'in

(kuraklık, tuzluluk ve soğuk), *PvDREB2A*'nın (kuraklık ve soğuk), *PvDREB5A*'nın (kuraklık, tuzluluk ve soğuk) ve *PvDREB6B*'nin (kuraklık ve soğuk) ana uyarılabilir faktörleri belirlenmiştir. Ancak, her bir transkriptin ifade düzeyleri zaman, doku ve genotipe bağlı olarak değişkenlik göstermiştir. Araştırma bulgularının, fasulye bitkisinde kuraklık, tuzluluk ve soğuğa dayanıklılıkla ilişkilendirilen moleküler mekanizmaları anlama amacıyla daha fazla araştırmaya temel oluşturulduğu belirtilmiştir.

5. BASIC HELIX-LOOP-HELIX (BHLH) TRANSKRİPSİYON FAKTÖRÜ

Tüm ökaryotlarda bulunan *bHLH* gen ailesi üyeleri, stres faktörlerine yanıtta önemli roller oynamaktadır. Fasulye bitkisinde genom çapında yürütülen çalışmada, Kavas ve ark. (2016) biyoinformatik araçlar kullanarak 155 *bHLH* genini sınıflandırmış ve 16 *PvbHLH* geninin kök/yaprak dokularında tuz stresine karşı ekspresyon düzeylerini qRT-PCR ile araştırılmıştır. *PvbHLH* genleri arasından, *PvbHLH-54* ve *PvbHLH-148*'in, RNA-seq ölçümleriyle korelasyon halinde olduğu ve her iki dokuda da yüksek düzeyde ifade edildiği belirlenmiştir. Araştırma sonuçları, fasulye bitkisinin kök ve yaprak dokularında tuz stresine yanıtta *bHLH* genlerinin önemini ortaya koymuş ve strese toleranslı bitkilerin geliştirilmesinde faydalı olabileceği ifade edilmiştir.

6. NAC (NAM, ATAF1/2 VE CUC2) TRANSKRİPSİYON FAKTÖRÜ

NAC genleri, bitki transkripsiyon faktörlerinin en büyük ailelerinden birini oluşturan bitkiye özgü transkripsiyon faktörlerdir. Bitkilerde *NAC* genleri çeşitli bitki gelişim süreçlerini düzenlemektedir. Bunlar arasında çiçek morfolojisi (Sablowski ve ark., 1998), kök gelişimi (Wang ve ark., 2015), yaprak yaşlanması (Kim ve ark., 2016), tohum gelişimi (Park ve ark., 2011) ve lif gelişimi (Zhao ve ark., 2014) yer almaktadır. Ayrıca NAC domain proteinlerinin bitkilerde, tuz (Yu ve ark., 2016; Zhao ve ark., 2016), yaralanma (Chen ve ark., 2016), kuraklık (Yu ve ark., 2016), soğuk (Guo ve ark., 2015) gibi abiyotik streslerde ve savunma tepkilerinde de rol oynadığı bilinmektedir. Wu ve ark. (2016) fasulye bitkisinde 11 kromozom üzerinde 86 *NAC* genini tanımlamış ve kuraklıkla ilişkili 20 *NAC* geninin ekspresyon modellerini doğrulamak için qRT-PCR gerçekleştirmiştir. Araştırma sonuçlarının fasulye bitkisinde NAC'ın işlevi hakkında daha fazla araştırma yapılması için faydalı bilgiler sağladığı ve fonksiyonel genomik çalışmalar ve moleküler ıslah programlarını hızlandıracağı ifade edilmiştir. Ayrıca, fasulyede tanımlanan kuraklığa duyarlı aday *NAC* genlerinin yemeklik baklagillerde moleküler ıslah için yeni bir kaynak sağlayacağı belirtilmiştir.

7. WRKY TRANSKRİPSİYON FAKTÖRÜ

WRKY proteinlerinin tohum gelişimi, dormansi, tohum çimlenmesi, gelişme ve stres yanıtlarında rol aldığı birçok çalışmada belirtilmiştir (Johnson ve ark., 2002; Zhang ve ark., 2004; Li ve ark., 2009; Li ve

ark., 2016; Tao ve ark., 2009; Qiu ve Yu, 2009). Wu ve ark. (2017) fasulye bitkisinde WRKY transkripsiyon faktörlerinin genom çapında tanımlamasını gerçekleştirmiştir. Çalışmada, *WRKY* genlerinin gen yapısı, genom dağılımı, korunmuş motifler ve kuraklık stresi altındaki ifade düzeyleri ayrıntılı olarak analiz edilmiştir. 19 *PvWRKY* geninin kuraklık stresi altında farklı ekspresyon seviyelerine sahip olduğu belirlenmiştir. Bunlar arasında 10 *PvWRKY* geninin (örneğin: *PvWRKY1, PvWRKY21, PvWRKY28, PvWRKY24* ve *PvWRKY52*) kuraklığın uyarılabilirliğinde rol oynayan MBS elementlerini içerdiği belirlenmiştir. Ayrıca, 6 *PvWRKY*'nin (*PvWRKY2, PvWRKY3, PvWRKY5, PvWRKY38, PvWRKY43* ve *PvWRKY58*) kuraklık stresi toleransında rol oynayan ABRE elementlerini içerdiği tespit edilmiştir. Çalışmada kuraklık stresiyle ilişkili aday genlerin tanımlanmasının ileride gerçekleştirilecek genetik çalışmalara kaynak oluşturabileceği vurgulanmıştır. Diğer taraftan, farklı *WRKY* genlerinin stres tepkilerindeki rolleri farklı olabileceğinden dolayı tuz ve soğuk stresi gibi farklı abiyotik stres koşullarında da *WRKY* genlerinin rollerinin belirlenmesi ile ilgili çalışmalara ihtiyaç duyulmaktadır.

8. YABBY TRANSKRİPSİYON FAKTÖRÜ

Bitki transkripsiyon faktörleri arasında yer alan *YABBY* gen ailesinin tohumlu bitkilere özgü olduğu bilinmektedir (Yang ve ark., 2016). Y*ABBY* gen ailesinin, *Arabidopsis*'te altı üyeye (*FIL, CRC, INO, YAB2, YAB3* ve *YAB5*), *Orzya sativa*'da sekiz üyeye ve *Lycopersicum esculentum*'da dokuz üyeye sahip olduğu bildirilmiştir (Huang ve ark.,

2013). Ayrıca YABBY transkripsiyon faktörünün, oksin, giberrelik asit ve diğer çeşitli hormonlardan etkilendiği ve soğuk stresinin düzenlenmesinde önemli rol oynadığı belirtilmiştir (Peng ve ark., 2015). İnal ve ark. (2017), fasulye bitkisinde genom çapında *C2C2-YABBY* gen ailesinin tanımlamasını ve karakterizasyonunu gerçekleştirmişlerdir. Tuz stresi altında (150mM NaCl) iki fasulye çeşidinin (toleranslı ve hassas) kök ve yaprak dokularında tanımlanan *PvulYABBY* genlerinin ekspresyon seviyelerini belirlemişlerdir. İncelenen 8 genden 6'sı yapraklarda ifade düzeyine sahip olurken, 8 genden yalnızca 4'ü köklerde ifade edilmiştir. Ayrıca, toleranslı Yakutiye çeşidinin yaprağındaki gen ifade düzeyi hassas Zülbiye yaprağından daha yüksek bulunmuş olup araştırma sonuçlarının ıslah çalışmalarında kullanılabileceği belirtilmiştir.

9. SQUAMOSA PROMOTER BINDING PROTEIN FAMILY (SBP) TRANSKRİPSİYON FAKTÖRÜ

SBP gen ailesi, çiçek gelişim sürecinde önemli bir rol oynayan bitkiye özgü transkripsiyon faktörlerinin önemli bir ailesi olarak kabul edilmektedir. *SBP* gen ailesinin rollerini tanımlamayı amaçlayan çalışmalar, bunların bitki gelişim süreçlerinde farklı rollerini ortaya koymuştur (Zhang ve ark., 2016). İlhan (2018), fasulye genomunda 23 *Pvul-SBP* genini tanımlamış ve *in silico* analizler ile 23 *Pvul-SBP* geninin kök, yaprak ve çiçek organları gibi farklı bitki dokularındaki ekspresyon seviyelerinin bazılarının yukarı bazılarının ise aşağı yönde düzenlendiğini ifade etmiştir.

10. CALMODULIN-BINDING TRANSCRIPTION ACTIVATORS (CAMTA) TRANSKRİPSİYON FAKTÖRÜ

Kalsiyum (Ca^{2+}) iyonları, bitkilerde evrensel ikincil haberci konumunda olup Ca^{2+} aracılı sinyal yoluyla biyotik ve abiyotik stres koşullarında bitkilerin biyolojik ve gelişimsel süreçlerini düzenlediği bilinmektedir. Ca^{2+}, CAMTA'lar gibi belirli transkripsiyon faktörlerine bağlanan kalmodulinler (CaM'ler) dahil olmak üzere çeşitli sensör proteinleri tarafından iletilmektedir. Nitekim, domates bitkisinde *CAMTA* gen ailesinin biyotik ve abiyotik etmenlerde farklı eksprese olduğu, *Arabidopsis*'te AP2-EREBP transkripsiyon faktörlerinin ekspresyonunu ve absisik asit tepkisini düzenleyerek kuraklığa karşı toleransta rol oynadığı bildirilmiştir (Yang ve ark., 2012; Pandey ve ark., 2013). Saeidi ve ark. (2019) fasulye genomunda 5 *CAMTA* genini tanımlamıştır. Kapsamlı ekspresyon analizleri *PhavuCAMTA1* geninin kuraklık stresinde farklı roller oynayabileceğini göstermiştir. Çalışmada, sera koşullarında fasulye genotiplerinin kuraklık stresi altında varyasyon gösterdiği belirlenmiştir. Araştırma bulgularının *CAMTA* gen ailesinin fasulye bitkisinde yürütülecek fonksiyonel çalışmalara temel olacağı bildirilmiştir.

11. GRAS TRANSKRİPSİYON FAKTÖRÜ

GRAS proteinleri, bitkilerde gelişimsel, fizyolojik ve sinyal iletimini düzenleyen bitkiye özgü transkripsiyon faktörü ailesidir (Hirsch ve ark., 2009; Bolle, 2016). Bu grup adını karakterize edilen ilk üç üyesinin baş harflerinden almaktadır: GAI, RGA ve SCR (Pysh ve ark., 1999; Bolle, 2004). GRAS proteinlerinin gibberellin kaynaklı sinyal iletiminde

(Peng ve ark., 1997; Li ve ark., 2010), fitokrom A sinyalinde (Bolle ve ark., 2000), nodüler sinyal iletiminde (Kaló ve ark., 2005; Hirsch ve ark., 2009), bitki stres tepkilerinde (Cenci ve Rouard, 2017) ve erkek gametogenezinde (Morohashi ve ark., 2003) rol oynadığı farklı araştırıcılar tarafından belirtilmiştir. Laskar ve ark. (2021) fasulye genomunda karakterize edilen ve filogenetik ilişkilerine göre 16 alt aileye ayrılan 55 *PvuGRAS* genini tanımlamıştır. Gen ifade analizleri, bazı genlerin doku/organa özgü olduğunu, bazılarının ise tuz, kuraklık ve soğuk gibi abiyotik stres koşullarından etkilendiğini ortaya koymuştur. Araştırma bulgularının gelecekte fasulye bitkisinin ıslahı ve genetik iyileştirmeleri için kullanılacak önemli bir kaynak olduğu öngörülmektedir. Bu verilerin abiyotik streslere karşı dayanıklılığı artırmak amacıyla transgenik yöntemlerle kullanılabilecek potansiyel *GRAS* gen adaylarını gösterdiği ve bitki genetiği/ıslahı çalışmalarına ışık tutarak yeni bitki çeşitlerinin geliştirilmesine katkı sağlayabileceği düşünülmektedir.

12. SHI-RELATED SEQUENCE (SRS) TRANSKRİPSİYON FAKTÖRÜ

SRS transkripsiyon faktörleri, bitki büyüme ve gelişmesinde önemli rollere sahip bir protein ailesinden oluşmaktadır. Singh ve ark. (2020), *A. thaliana*'da *SRS* genlerinin bitkilerin büyümesinde önemli rol oynadığını, yan kök gelişimi sırasında kromatin modifikasyonu ve oksin sinyalizasyonunda rol oynadığını tespit etmiştir. Diğer bir çalışmada Gomariz-Fernández ve ark. (2017) *SRS* genlerinin bitki organlarının büyümesinde, fotomorfojenezde, metabolizmayla ilişkili

bitki yapısında, fotoperiyodik kontrolde ve fitohormon tepkisi gibi birçok role sahip olduğunu belirtmiştir. Büyük ve ark. (2022) fasulye genomunda 10 *PvSRS* genini tanımlamışlar, *P. vulgaris* genomundaki *SRS* genlerinin biyolojik rollerini anlamak amacıyla çeşitli biyoinformatik yöntemler ve veri tabanları kullanmışlardır. Ayrıca *Pvul-SRS* genlerinin ekspresyon seviyeleri, tuz ve kuraklık stresi koşulları altında RNAseq verileri ve RT-qPCR analizi ile değerlendirilmiştir. Çalışmada, ana promotör elementler olan CAAT-box ve TATA-box *Pvul-SRS* genlerinin tamamında bulunmuştur. Ayrıca MYC, ARE, MYB, ERE ve Box 4 motiflerinin stresle ilişkili hormonlar (jasmonat, etilen, absisik asit vb.) tarafından benzer şekilde düzenlendiği ifade edilmiştir. Bu nedenle stresle ilişkili motiflerin bolluğu, Pvul-SRS'lerin stres yanıtındaki olası rollerini gösterebileceği belirtilmiştir (Chen ve ark., 2021; Sajjad ve ark,. 2021). Bulguların, *SRS* genlerinin ilk kez *P. vulgaris*'te tanımlanması ile farklı bitki türlerinde *SRS* genleriyle ilgili gelecekteki çalışmalara değerli bir rehber olacağı belirtilmiştir.

13. B3 TRANSKRİPSİYON FAKTÖRÜ

Bitkiye özgü B3 ailesi, bitki büyümesi ve gelişimini düzenleyen önemli transkripsiyon faktörleri arasında yer almaktadır (Swaminathan ve ark., 2008). B3 üyeleri, domain yapısına ve filogenetik analize dayalı olarak dört alt gruba (LAV, ARF, RAV ve REM) ayrılmaktadır. Tek bir B3 alanına sahip olan LAV ailesinin üyeleririnin, embriyogenezi, kallus indüksiyonunu ve faz geçişini düzenledikleri belirtilmiştir (Carbonero ve ark., 2017; Stone ve ark., 2001; Suzuki ve McCarty, 2008; Suzuki

ve ark., 2007; Tsukagoshi ve ark., 2007). *ARF* genleri, yan kök oluşumu (Cho ve ark., 2014; Wang ve ark., 2015), yaprak yaşlanması (Lim ve ark., 2010), çiçek morfogenezi (Ellis ve ark., 2005), meyve gelişimi (Sagar ve ark., 2013), abiyotik stres yanıtları (Jain ve Khurana, 2009; Wang ve ark., 2010), etilen gibi hormon sinyal yanıtları (Li ve ark., 2006) ve gibberellik asit (GA) (Richter ve ark., 2013) tepkileri dahil olmak üzere çeşitli oksin aracılı tepkilerde rol oynamaktadır. RAV ailesi üyeleri ise yan organ büyümesini, çiçeklenmeyi, yaprak yaşlanmasını, hormon sinyalini ve patojen enfeksiyonlarına ve abiyotik streslere verilen tepkileri düzenlemektedir (Fu ve ark., 2014; Lu ve ark., 2014; Woo ve ark., 2010; Zhao ve ark., 2017). *Arabidopsis*'te *REM* geninin vernalizasyon (*VRN1*) ve çiçeklenmede rol oynadığı bilinmektedir (Mylne ve ark., 2012). Du ve ark. (2022a) fasulye genomunda 110 *PvB3* genini tanımlamıştır. Çalışmada *PvB3*'ün cis-elementlerinin hormon üretimi, abiyotik stres tepkisi ve çimlenmede rol oynadığı ifade edilmiştir. Ayrıca tuz stresi ve indol asetik asit (IAA)'in *PvB3*'lerin ekspresyon seviyelerini etkilediği belirlenmiştir. *PvB3-27* geninin, IAA yanıt sinyal yolunun düzenlenmesinde bir transkripsiyonel aktivatör olarak görev yapabileceği görülmüştür. Ancak *PvB3* genlerinin fasulyede tuz stresindeki tepkisi ve IAA sinyal iletimi ve düzenlenmesindeki rollerinin ortaya çıkarılması için daha fazla çalışmaya ihtiyaç duyulduğu belirtilmiştir.

14. LATERAL ORGAN BOUNDARY DOMAINS (LBD) TRANSKRİPSİYON FAKTÖRÜ

AS2/LOB gen ailesi olarak da bilinen LBD, lateral organ gelişimini, morfogenezis ve metabolizmayı düzenleyen bitkiye özgü transkripsiyon faktörleridir (Iwakawa ve ark. 2002; Majer ve Hochholdinger 2011). Önceki çalışmalar, *LBD* gen ailesinin bitki embriyolarının, köklerinin, yapraklarının ve çiçeklerinin erken morfogenezinde, doku yenilenmesinde ve stres tepkilerinde çok önemli roller oynadığını göstermektedir (Semiarti ve ark., 2001; Iwakawa ve ark., 2007; Goh ve ark., 2019). Soya fasulyesinde yürütülen bir çalışmada, *GmLBD12*'nin abiyotik streslerde (kuraklık, tuz, soğuk), IAA, ABA ve salisilik asit (SA) uygulamalarında rol oynadığı belirtilmiştir (Yang ve ark., 2017). Du ve ark. (2022) fasulye genomunda 47 *PvLBD* geni tanımlamıştır. *PvLBD*'nin promotör bölgesinin, bitki gelişimi, hormon ve abiyotik stres tepkisi ile ilgili çok sayıda cis-etkili element içerdiği belirlenmiştir. NaCl, $CdCl_2$ ve $HgCl_2$ stresi altında kotiledon, hipokotil ve radikulada 47 *PvLBD* geninin ekspresyon seviyeleri qRT-PCR kullanılarak tespit edilmiştir. *PvLBD1,6,11,20,31,34,38,40,41* genleri NaCl, $CdCl_2$ ve $HgCl_2$ stresleri altında kotiledon, hipokotil ve radikulada yüksek düzeyde ifade edilmiştir. Özellikle *PvLBD6* ve *PvLBD11*'in NaCl stresi altında, *PvLBD1* ve PvLBD40'in $CdCl_2$ stresi altında, *PVLBD20,31,34,38,41*'in $HgCl_2$ stresi altında yüksek düzeyde ifade edildiği belirlenmiştir. Araştırma sonuçları, *PvLBD* genlerinin fasulyedeki farklı metal stres tepkilerinin düzenlenmesinde farklı roller oynadığını göstermektedir.

15. HEAT SHOCK TRANSCRIPTION FACTOR (HSF) TRANSKRİPSİYON FAKTÖRÜ

Hsf genleri, bitkilerde sinyal alımı ve iletimine, gen ifadesinin düzenlenmesine, strese karşı dirence ve sıcaklık toleransına katılmaktadır (Ohama ve ark., 2017). *Hsf* ailesinin 5 korunmuş domaini (DBD, OD, CTAD, NLS ve NES) bulunmaktadır (Scharf ve ark., 2012). Mallick ve ark. (2022) fasulye genomunda 29 *Hsf* genini tanımlamıştır. Proteinlerin yapısal özelliklerine ve filogeni analizine göre *Hsf* genleri üç sınıfa (A, B ve C) ve 14 gruba ayrılmıştır. qRT-PCR analizi, kontrol, 15, 30 ve 60 dakika ısı stresine tabi tutulan 10 günlük fasulye fideleri kullanılarak gerçekleştirilmiş ve ekspresyon analizi abiyotik stres sırasında A ve B sınıfı Hsf'lerin katılımını doğrulamıştır. Ayrıca analiz sonuçları, *PvHSFA8*'in ana düzenleyici olduğunu ve fasulyenin ısıya maruz kalma sırasında *PvHSFB1A* ve *PvHSFB2A* genlerinin indüksiyonunu ortaya çıkarmıştır. Diğer bir çalışmada Zhang ve ark. (2022), fasulye bitkisinde 30 Hsf transkripsiyon faktörünü tanımlamıştır. Çalışmada, bitkilerin tohumları çimlenme için inkübatöre yerleştirilmiş ve 5. günde bitkiler ayrı ayrı farklı stres uygulamalarına maruz bırakılmıştır. 4°C'de soğuk stresi, 45 °C'de sıcaklık stresi, 70 mmol/L'da tuz stresi, 0.5 mg/L'de CdCl2 stresi, 60 mg/L'de $HgCl^2$ stresi uygulanmıştır. *PvHsf'l*erin ekspresyonu farklı dokular arasında değişiklik göstermiştir. qRT-PCR analizi sonucunda soğuk, sıcaklık, tuz ve ağır metal stresi altında farklı şekillerde birçok *PvHsf* geninin eksprese olduğu tespit edilmiştir. Araştırma sonuçları fasulyede *PvHsf*'lerin abiyotik stresin türüne bağlı olarak farklı işlevler

oynayabileceğini ve daha ileri analizler için bir temel oluşturduğunu göstermektedir.

16. CYSTEINE-RIIH POLYCOMB-LIKE PROTEIN (CPP) TRANSKRİPSİYON FAKTÖRÜ

Bitkilerde ve hayvanlarda yaygın olarak bulunan ancak maya ve mantarlarda bulunmayan CPP transkripsiyon faktörleri, bitkilerde hücre bölünmesinin düzenlenmesinde ve üreme dokularının gelişmesinde ve ayrıca farklı abiyotik streslere yanıtta etkili rol oynamaktadır (Riechmann ve ark., 2000; Andersen ve ark., 2007). Rakhimzhanova ve ark. (2023) fasulye genomunda 7 *PvCPP* geni tanımlamışlardır. Melatonin (200 µM MEL) ve stres uygulamalarında (tuz: 150 mM NaCl ve kuraklık: 20% PEG6000) genlerin ekspresyon seviyeleri belirlenmiştir. Birçok *PvCPP* geninin ekspresyon seviyeleri, tek başına MEL uygulamasından etkilenmemiştir. Genel olarak *PvCPP* genlerinin ekspresyon seviyesi, tuz ve MEL uygulamaları eş zamanlı olarak gerçekleştiğinde artış göstermiştir. Benzer şekilde, kuraklık ve MEL uygulamalarının kombinasyonunda *PvCPP* genlerinin ifade düzeylerinde artış görülmüştür. Farklı fasulye çeşitlerindeki *CPP* genlerinin ekspresyon seviyelerinin değişiklik gösterdiği belirtilmiştir. Yukarıdaki bilgilerden de anlaşılacağı gibi *PvCPP* genlerinin fasulye bitkisinde abiyotik stres koşullarına karşı dirençte farklı rollere sahip olduğu ortaya konmuştur.

SONUÇ

Bu bölümde bilgimiz dahilinde fasulye genomunda tanımlanan bazı transkripsiyon faktörlere (bZIP, TIFY, AP2/ERF, bHLH, NAC, WRKY, YABBY, SBP, CAMTA, GRAS, SRS, B3, LBD, HSF ve CPP) odaklanılmış ve strese duyarlı transkripsiyon faktörlerinin abiyotik strese toleransı düzenlemedeki işlevleri özetlenmiştir. Son yıllarda yürütülen çalışmalar, fasulye bitkisinde birçok transkripsiyon faktörünün abiyotik stres etmenlerine karşı önemli rollere sahip olduğunu göstermiştir. Farklı stres etmenleri altında transkripsiyon faktörlerin tanımlanması ve moleküler olarak uyarlanması ile stres koşulları altında üstün özelliğe sahip bitkilerin geliştirilmesinde karşılaşılan bazı problemlerin üstesinden gelinmesine önemli potansiyel katkı sağlayacağı düşünülmektedir. Transkripsiyon faktörleri, bitkilerin fonksiyonel genetik yapısını daha iyi anlamamıza ve kullanmamıza olanak tanımakta, ayrıca ekstrem koşullarda bitkilerin hayatta kalmasını sağlayıp verim özelliğinin artmasına katkı sunmaktadır. Diğer taraftan, özellikle bitki savunma tepkilerini düzenleyen transkripsyon faktörler bitkilerin patojenlere karşı daha etkili bir şekilde savunma yapmasına yardımcı olmaktadır.

Literatür çalışmaları göz önüne alındığında birçok çalışmanın strese duyarlı transkripsiyon faktörlerinin bitki tepkisi ve abiyotik strese toleranstaki rollerini tanımladığı ve karakterize ettiği görülmektedir. Ancak laboratuvar koşullarında gerçekleştirilen çalışmaların tarla koşullarında da fonksiyonel olarak doğrulanmasının bitkilerde abiyotik stres toleransının iyileştirilmesi için strese duyarlı transkripsiyon

faktörlerinin potansiyel uygulamalarını genişleteceği ve önemli katkılar sağlayacağı düşünülmektedir.

KAYNAKÇA

Adam-Blondon, A. F., Sevignac, M., Dron, M., & Bannerot, H. (1994). A genetic map of common bean to localize specific resistance genes against anthracnose. *Genome*, *37*(6), 915-924.

Andersen, S. U., Algreen-Petersen, R. G., Hoedl, M., Jurkiewicz, A., Cvitanich, C., Braunschweig, U., ... & Jensen, E. Ø. (2007). The conserved cysteine-rich domain of a tesmin/TSO1-like protein binds zinc in vitro and TSO1 is required for both male and female fertility in Arabidopsis thaliana. *Journal of Experimental Botany*, *58*(13), 3657-3670.

Aparicio-Fabre, R., Guillén, G., Loredo, M., Arellano, J., Valdés-López, O., Ramírez, M., ... & Hernández, G. (2013). Common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) PvTIFY orchestrates global changes in transcript profile response to jasmonate and phosphorus deficiency. *BMC Plant Biology*, *13*, 1-22.

Anonim (2023). T.C. Tarım ve Orman Bakanlığı, Tohumluk Tescil ve Sertifikasyon Merkez Müdürlüğü, Milli Çeşit Listesi. https://www.tarimorman.gov.tr/BUGEM/TTSM/Sayfalar/Detay.aspx?SayfaId=85

Ayra, L., Ramírez, M., Íñiguez, L. P., Rodés, R., Ortega, E., & Hernández, G. (2018). The common bean (*Phaseolus vulgaris*) Basic Leucine Zipper (bZIP) transcription factor family: response to salinity stress in fertilized and symbiotic N2-fixing plants. *Agriculture*, *8*(10), 160.

Baldoni, E., Genga, A., & Cominelli, E. (2015). Plant MYB transcription factors: their role in drought response mechanisms. *International Journal of Molecular Sciences*, *16*(7), 15811-15851.

Bitocchi, E., Rau, D., Bellucci, E., Rodriguez, M., Murgia, M. L., Gioia, T., ... & Papa, R. (2017). Beans (*Phaseolus* ssp.) as a model for understanding crop evolution. *Frontiers in Plant Science*, *8*, 722.

Browse, J. (2009). Jasmonate passes muster: a receptor and targets for the defense hormone. *Annual Review of Plant Biology*, *60*, 183-205.

Bolle, C., Koncz, C., & Chua, N. H. (2000). PAT1, a new member of the GRAS family, is involved in phytochrome A signal transduction. *Genes & Development*, *14*(10), 1269-1278.

Bolle, C. (2004). The role of GRAS proteins in plant signal transduction and development. *Planta*, *218*, 683-692.

Bolle, C. (2016). Structure and evolution of plant GRAS family proteins. In *Plant transcription factors* (pp. 153-161). Academic Press. New York,

Büyük, İ., Behçet, İ., İlhan, E., & Sumer, A. (2019). Common Bean (*Phaseolus vulgaris* L.) Dof Transcription Factors Differentially Expressed under Salt Stress. *Communications Faculty of Sciences University of Ankara Series C Biology*, *28*(1), 43-66.

Büyük, İ., Okay, A., & Aras, S. (2022). Identification and characterization of SRS genes in *Phaseolus vulgaris* genome and their responses under salt stress. *Biochemical Genetics*, 1-22.

Carbonero, P., Iglesias-Fernández, R., & Vicente-Carbajosa, J. (2017). The AFL subfamily of B3 transcription factors: evolution and function in angiosperm seeds. *Journal of Experimental Botany*, *68*(4), 871-880.

Chen, S., Ren, H., Luo, Y., Feng, C., & Li, H. (2021). Genome-wide identification of wheat (*Triticum aestivum* L.) expansin genes and functional characterization of TaEXPB1A. *Environmental and Experimental Botany*, *182*, 104307.

Chen, Y., Qiu, K., Kuai, B., & Ding, Y. (2011). Identification of an NAP-like transcription factor BeNAC1 regulating leaf senescence in bamboo (*Bambusa emeiensis* 'Viridiflavus'). *Physiologia Plantarum*, *142*(4), 361-371.

Cho, H., Ryu, H., Rho, S., Hill, K., Smith, S., Audenaert, D., ... & Hwang, I. (2014). A secreted peptide acts on BIN2-mediated phosphorylation of ARFs to potentiate auxin response during lateral root development. *Nature Cell Biology*, *16*(1), 66-76.

Cenci, A., & Rouard, M. (2017). Evolutionary analyses of GRAS transcription factors in angiosperms. *Frontiers in Plant Science*, *8*, 273.

Çelik, A., Emiralioğlu, O., Yeken, M. Z., Çiftçi, V., Özer, G., Kim, Y., ... & Chung, Y. S. (2023a). A novel study on bean common mosaic virus accumulation

shows disease resistance at the initial stage of infection in *Phaseolus vulgaris*. *Frontiers in Genetics*, *14*, 1136794.

Çelik, A., Morca, A. F., Emiralioğlu, O., Yeken, M. Z., Özer, G., & Çiftçi, V. (2023b). The use of colorimetric loop-mediated isothermal amplification assay for naked-eye detection of bean common mosaic virus. *Physiological and Molecular Plant Pathology*, *125*, 102017.

Diaz, L. M., Ricaurte, J., Tovar, E., Cajiao, C., Teran, H., Grajales, M., ... & Raatz, B. (2018). QTL analyses for tolerance to abiotic stresses in a common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) population. *PLoS One*, *13*(8), e0202342.

Dramadri, I. O., Nkalubo, S. T., & Kelly, J. D. (2019). Identification of QTL associated with drought tolerance in Andean common bean. *Crop Science*, *59*(3), 1007-1020.

Du, Y. L., Zhang, Q., Li, W. J., Li, S. Q., Zhang, W. J., Wang, Q., ... & Zhao, Q. (2022a). Genome-and transcriptome-wide identification and analysis of B3 superfamily members and their association with salt stress response in the common bean (*Phaseolus vulgaris* L). *Scientia Horticulturae*, *305*, 111408.

Du, Y., Zhao, Q., Li, W., Geng, J., Li, S., Yuan, X., ... & Du, J. (2022b). Genome-wide identification of the LBD transcription factor genes in common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) and expression analysis under different abiotic stresses. *Journal of Plant Interactions*, *17*(1), 731-743.

Ellis, C. M., Nagpal, P., Young, J. C., Hagen, G., Guilfoyle, T. J., & Reed, J. W. (2005). AUXIN RESPONSE FACTOR1 and AUXIN RESPONSE FACTOR2 regulate senescence and floral organ abscission in Arabidopsis thaliana. *Development*, *132*, 4563–4574.

Emiralioğlu, O., Yeken, M. Z., Çelik, A., & Çiftçi, V. (2023). Exploring *I*, *bc-1*^{2} and *bc-3* Gene Locus in Promising Common Bean Lines. *Black Sea Journal of Agriculture*, *6*(5), 478-484.

FAO (2023). Food and Agriculture Statistics. Retrieved May 20, 2023 from: https://www.fao.org/faostat/en/#home.

Frei, A., Blair, M. W., Cardona, C., Beebe, S. E., Gu, H., & Dorn, S. (2005). QTL mapping of resistance to *Thrips palmi* Karny in common bean. *Crop Science*, *45*(1), 379-387.

Fu, M., Kang, H. K., Son, S. H., Kim, S. K., & Nam, K. H. (2014). A subset of Arabidopsis RAV transcription factors modulates drought and salt stress responses independent of ABA. *Plant and Cell Physiology*, *55*(11), 1892-1904.

Goh, T., Toyokura, K., Yamaguchi, N., Okamoto, Y., Uehara, T., Kaneko, S., ... & Fukaki, H. (2019). Lateral root initiation requires the sequential induction of transcription factors LBD16 and PUCHI in *Arabidopsis thaliana*. *New Phytologist*, *224*(2), 749-760.

Gomariz-Fernández, A., Sánchez-Gerschon, V., Fourquin, C., & Ferrándiz, C. (2017). The role of *SHI/STY/SRS* genes in organ growth and carpel development is conserved in the distant eudicot species Arabidopsis thaliana and Nicotiana benthamiana. *Frontiers in Plant Science*, *8*, 814.

Gujjar, R. S., Akhtar, M., & Singh, M. (2014). Transcription factors in abiotic stress tolerance. *Indian Journal of Plant Physiology*, *19*, 306-316.

Guo, W. L., Wang, S. B., Chen, R. G., Chen, B. H., Du, X. H., Yin, Y. X., ... & Zhang, Y. Y. (2015). Characterization and expression profile of *CaNAC2* pepper gene. *Frontiers in Plant Science*, *6*, 755..

Hernández, G., Ramírez, M., Valdés-López, O., Tesfaye, M., Graham, M. A., Czechowski, T., ... & Vance, C. P. (2007). Phosphorus stress in common bean: root transcript and metabolic responses. *Plant Physiology*, *144*(2), 752-767.

Hirsch, S., Kim, J., Munoz, A., Heckmann, A. B., Downie, J. A., & Oldroyd, G. E. (2009). GRAS proteins form a DNA binding complex to induce gene expression during nodulation signaling in Medicago truncatula. *The Plant Cell*, *21*(2), 545-557.

Huang, Z., Van Houten, J., Gonzalez, G., Xiao, H., & van der Knaap, E. (2013). Genome-wide identification, phylogeny and expression analysis of *SUN*, *OFP* and *YABBY* gene family in tomato. *Molecular Genetics and Genomics*, *288*(3-4), 111-129.

Hwang, Y. S., Bethke, P. C., Cheong, Y. H., Chang, H. S., Zhu, T., & Jones, R. L. (2005). A gibberellin-regulated calcineurin B in rice localizes to the tonoplast and is implicated in vacuole function. *Plant Physiology*, *138*(3), 1347-1358.

Ilhan, E. (2018). Genome-wide characterization and analysis of SBP transcription factor family in common bean (*Phaseolus vulgaris* L.). *Applied Ecology & Environmental Research*, *16*(5).

Iwakawa, H., Ueno, Y., Semiarti, E., Onouchi, H., Kojima, S., Tsukaya, H., ... & Machida, Y. (2002). The *ASYMMETRIC LEAVES2* gene of Arabidopsis thaliana, required for formation of a symmetric flat leaf lamina, encodes a member of a novel family of proteins characterized by cysteine repeats and a leucine zipper. *Plant and Cell Physiology*, *43*(5), 467-478.

Iwakawa, H., Iwasaki, M., Kojima, S., Ueno, Y., Soma, T., Tanaka, H., ... & Machida, C. (2007). Expression of the *ASYMMETRIC LEAVES2* gene in the adaxial domain of Arabidopsis leaves represses cell proliferation in this domain and is critical for the development of properly expanded leaves. *The Plant Journal*, *51*(2), 173-184.

Inal, B., Büyük, İ., Ilhan, E., & Aras, S. (2017). Genome-wide analysis of Phaseolus vulgaris C2C2-YABBY transcription factors under salt stress conditions. *3 Biotech*, *7*, 1-10.

Jain, M., & Khurana, J. P. (2009). Transcript profiling reveals diverse roles of auxin-responsive genes during reproductive development and abiotic stress in rice. *The FEBS journal*, *276*(11), 3148-3162.

Jakoby, M., Weisshaar, B., Dröge-Laser, W., Vicente-Carbajosa, J., Tiedemann, J., Kroj, T., & Parcy, F. (2002). bZIP transcription factors in Arabidopsis. *Trends in Plant Science*, *7*(3), 106-111.

Jin, J., Tian, F., Yang, D. C., Meng, Y. Q., Kong, L., Luo, J., & Gao, G. (2016). PlantTFDB 4.0: toward a central hub for transcription factors and regulatory interactions in plants. *Nucleic Acids Research*, gkw982.

Johnson, C. S., Kolevski, B., & Smyth, D. R. (2002). *TRANSPARENT TESTA GLABRA2*, a trichome and seed coat development gene of Arabidopsis, encodes a WRKY transcription factor. *The Plant Cell*, *14*(6), 1359-1375.

Kaló, P., Gleason, C., Edwards, A., Marsh, J., Mitra, R. M., Hirsch, S., ... & Oldroyd, G. E. (2005). Nodulation signaling in legumes requires NSP2, a member of the GRAS family of transcriptional regulators. *Science*, *308*(5729), 1786-1789.

Kavas, M., Baloğlu, M. C., Atabay, E. S., Ziplar, U. T., Daşgan, H. Y., & Ünver, T. (2016). Genome-wide characterization and expression analysis of common bean bHLH transcription factors in response to excess salt concentration. *Molecular Genetics and Genomics*, *291*, 129-143.

Kavas, M., Kizildogan, A., Gökdemir, G., & Baloglu, M. C. (2015). Genome-wide investigation and expression analysis of AP2-ERF gene family in salt tolerant common bean. *EXCLI journal*, *14*, 1187.

Kamfwa, K., Beaver, J. S., Cichy, K. A., & Kelly, J. D. (2018). QTL mapping of resistance to bean weevil in common bean. *Crop Science*, *58*(6), 2370-2378.

Keller, B., Manzanares, C., Jara, C., Lobaton, J. D., Studer, B., & Raatz, B. (2015). Fine-mapping of a major QTL controlling angular leaf spot resistance in common bean (*Phaseolus vulgaris* L.). *Theoretical and Applied Genetics*, *128*, 813-826.

Kim, S. G., Kim, S. Y., & Park, C. M. (2007). A membrane-associated NAC transcription factor regulates salt-responsive flowering via *FLOWERING LOCUS T* in *Arabidopsis*. *Planta*, *226*, 647-654.

Konzen, E. R., Recchia, G. H., Cassieri, F., Caldas, D. G. G., Berny Mier y Teran, J. C., Gepts, P., & Tsai, S. M. (2019). *DREB* genes from common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) show broad to specific abiotic stress responses and distinct levels of nucleotide diversity. *International Journal of Genomics*. 9520642.

Laskar, P., Bhattacharya, S., Chaudhuri, A., & Kundu, A. (2021). Exploring the GRAS gene family in common bean (*Phaseolus vulgaris* L.): characterization, evolutionary relationships, and expression analyses in response to abiotic stresses. *Planta*, *254*, 1-21.

Li, J., Dai, X., & Zhao, Y. (2006). A role for auxin response factor 19 in auxin and ethylene signaling in *Arabidopsis*. *Plant Physiology*, *140*(3), 899-908.

Li, S., Fu, Q., Huang, W., & Yu, D. (2009). Functional analysis of an *Arabidopsis* transcription factor *WRKY25* in heat stress. *Plant Cell Reports*, *28*, 683-693.

Li, W., Wang, H., & Yu, D. (2016). *Arabidopsis* WRKY transcription factors WRKY12 and WRKY13 oppositely regulate flowering under short-day conditions. *Molecular Plant*, *9*(11), 1492-1503.

Li, W., Wu, J., Weng, S., Zhang, Y., Zhang, D., & Shi, C. (2010). Identification and characterization of *dwarf 62*, a loss-of-function mutation in *DLT/OsGRAS-32* affecting gibberellin metabolism in rice. *Planta*, *232*, 1383-1396.

Lim, P. O., Lee, I. C., Kim, J., Kim, H. J., Ryu, J. S., Woo, H. R., & Nam, H. G. (2010). Auxin response factor 2 (ARF2) plays a major role in regulating auxin-mediated leaf longevity. *Journal of Experimental Botany*, *61*(5), 1419-1430.

Lu, Q., Zhao, L., Li, D., Hao, D., Zhan, Y., & Li, W. (2014). A *GmRAV* ortholog is involved in photoperiod and sucrose control of flowering time in soybean. *PLoS One*, *9*(2), e89145.

Mallick, B., Kumari, M., Pradhan, S. K., Acharya, G. C., Naresh, P., Das, B., & Shashankar, P. (2022). Genome-wide analysis and characterization of heat shock transcription factors (*Hsfs*) in common bean (*Phaseolus vulgaris* L.). *Functional & Integrative Genomics*, *22*(5), 743-756.

Majer, C., Xu, C., Berendzen, K. W., & Hochholdinger, F. (2012). Molecular interactions of ROOTLESS CONCERNING CROWN AND SEMINAL ROOTS, a LOB domain protein regulating shoot-borne root initiation in maize (*Zea mays* L.). *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, *367*(1595), 1542-1551.

Mizoi, J., Shinozaki, K., & Yamaguchi-Shinozaki, K. (2012). AP2/ERF family transcription factors in plant abiotic stress responses. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA)-Gene Regulatory Mechanisms*, *1819*(2), 86-96.

Mylne, J. S., Mas, C., & Hill, J. M. (2012). NMR assignment and secondary structure of the C-terminal DNA binding domain of *Arabidopsis thaliana* VERNALIZATION1. *Biomolecular NMR Assignments*, *6*, 5-8.

Nakashima, K., Jan, A., Todaka, D., Maruyama, K., Goto, S., Shinozaki, K., & Yamaguchi-Shinozaki, K. (2014). Comparative functional analysis of six drought-responsive promoters in transgenic rice. *Planta*, *239*, 47-60.

Nodari, R. O., Tsai, S. M., Guzman, P., Gilbertson, R. L., & Gepts, P. (1993). Toward an integrated linkage map of common bean. III. Mapping genetic factors controlling host-bacteria interactions. *Genetics*, *134*(1), 341-350.

Nova-Franco, B., Íñiguez, L. P., Valdés-López, O., Alvarado-Affantranger, X., Leija, A., Fuentes, S. I., ... & Hernández, G. (2015). The micro-RNA172c-APETALA2-1 node as a key regulator of the common bean-Rhizobium etli nitrogen fixation symbiosis. *Plant Physiology*, *168*(1), 273-291.

Oblessuc, P. R., Baroni, R. M., Garcia, A. A. F., Chioratto, A. F., Carbonell, S. A. M., Camargo, L. E. A., & Benchimol, L. L. (2012). Mapping of angular leaf spot resistance QTL in common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) under different environments. *BMC Genetics*, *13*, 1-9.

Ohama, N., Sato, H., Shinozaki, K., & Yamaguchi-Shinozaki, K. (2017). Transcriptional regulatory network of plant heat stress response. *Trends in Plant Science*, *22*(1), 53-65.

Palacıoğlu, G., Özer, G., Yeken, M. Z., Ciftci, V., & Bayraktar, H. (2021). Resistance sources and reactions of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) cultivars in Turkey to anthracnose disease. *Genetic Resources and Crop Evolution*, *68*(8), 3373-3381.

Pandey, N., Ranjan, A., Pant, P., Tripathi, R. K., Ateek, F., Pandey, H. P., ... & Sawant, S. V. (2013). CAMTA 1 regulates drought responses *in Arabidopsis thaliana*. *BMC Genomics*, *14*, 1-23.

Park, J., Kim, Y. S., Kim, S. G., Jung, J. H., Woo, J. C., & Park, C. M. (2011). Integration of auxin and salt signals by the NAC transcription factor NTM2 during seed germination in *Arabidopsis*. *Plant Physiology*, *156*(2), 537-549.

Peng, X., Wu, Q., Teng, L., Tang, F., Pi, Z., & Shen, S. (2015). Transcriptional regulation of the paper mulberry under cold stress as revealed by a comprehensive analysis of transcription factors. *BMC Plant Biology*, *15*(1), 1-14.

Peng, J., Carol, P., Richards, D. E., King, K. E., Cowling, R. J., Murphy, G. P., & Harberd, N. P. (1997). The *Arabidopsis GAI* gene defines a signaling pathway that negatively regulates gibberellin responses. *Genes & Development*, *11*(23), 3194-3205.

Pysh, L. D., Wysocka-Diller, J. W., Camilleri, C., Bouchez, D., & Benfey, P. N. (1999). The GRAS gene family in Arabidopsis: Sequence characterization and basic expression analysis of the *SCARECROW-LIKE* genes. *The Plant Journal*, *18*(1), 111-119.

Qiu, Y., & Yu, D. (2009). Over-expression of the stress-induced *OsWRKY*45 enhances disease resistance and drought tolerance in *Arabidopsis*. *Environmental and Experimental Botany*, *65*(1), 35-47.

Rakhimzhanova, A., Kasapoğlu, A. G., Sapakova, A., İlhan, E., Zharmukhametova, R., Turan, M., ... & Çiltaş, A. (2023). Expression analysis and characterization of the *CPP* gene family of Melatonin-treated common bean cultivars under different abiotic stresses. *South African Journal of Botany*, *160*, 282-294.

Richter, R., Behringer, C., Zourelidou, M., & Schwechheimer, C. (2013). Convergence of auxin and gibberellin signaling on the regulation of the GATA transcription factors *GNC* and *GNL* in *Arabidopsis thaliana*. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *110*(32), 13192-13197.

Riechmann, J. L., Heard, J., Martin, G., Reuber, L., Jiang, C. Z., Keddie, J., ... & -L. Yu, G. (2000). *Arabidopsis* transcription factors: genome-wide comparative analysis among eukaryotes. *Science*, *290*(5499), 2105-2110.

Rodriguez-Uribe, L., & O'Connell, M. A. (2006). A root-specific bZIP transcription factor is responsive to water deficit stress in tepary bean (*Phaseolus acutifolius*) and common bean (*P. vulgaris*). *Journal of Experimental Botany*, *57*(6), 1391-1398.

Saeidi, K., Zare, N., Baghizadeh, A., & Asghari-Zakaria, R. (2019). *Phaseolus vulgaris* genome possesses *CAMTA* genes, and *phavuCAMTA1* contributes to the drought tolerance. *Journal of Genetics*, *98*, 1-14.

Sagar, M., Chervin, C., Mila, I., Hao, Y., Roustan, J. P., Benichou, M., ... & Zouine, M. (2013). SlARF4, an auxin response factor involved in the control of sugar

metabolism during tomato fruit development. *Plant Physiology*, *161*(3), 1362-1374.

Sakuma, Y., Liu, Q., Dubouzet, J. G., Abe, H., Shinozaki, K., & Yamaguchi-Shinozaki, K. (2002). DNA-binding specificity of the ERF/AP2 domain of *Arabidopsis* DREBs, transcription factors involved in dehydration-and cold-inducible gene expression. *Biochemical and Biophysical Research Communications*, *290*(3), 998-1009.

Scharf, K. D., Berberich, T., Ebersberger, I., & Nover, L. (2012). The plant heat stress transcription factor (Hsf) family: structure, function and evolution. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA)-Gene Regulatory Mechanisms*, *1819*(2), 104-119.

Schmutz, J., McClean, P. E., Mamidi, S., Wu, G. A., Cannon, S. B., Grimwood, J., ... & Jackson, S. A. (2014). A reference genome for common bean and genome-wide analysis of dual domestications. *Nature Genetics*, *46*(7), 707-713.

Sedlar, A., Zupin, M., Maras, M., Razinger, J., Šuštar-Vozlič, J., Pipan, B., & Meglič, V. (2020). QTL mapping for drought-responsive agronomic traits associated with physiology, phenology, and yield in an Andean intra-gene pool common bean population. *Agronomy*, *10*(2), 225.

Semiarti, E., Ueno, Y., Tsukaya, H., Iwakawa, H., Machida, C., & Machida, Y. (2001). The *ASYMMETRIC LEAVES2* gene of *Arabidopsis thaliana* regulates formation of a symmetric lamina, establishment of venation and repression of meristem-related homeobox genes in leaves. *Development*, *128*(10), 1771-1783.

Silva, D. A. D., Tsai, S. M., Chiorato, A. F., da Silva Andrade, S. C., Esteves, J. A. D. F., Recchia, G. H., & Morais Carbonell, S. A. (2019). Analysis of the common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) transcriptome regarding efficiency of phosphorus use. *PloS one*, *14*(1), e0210428.

Singh, S., Yadav, S., Singh, A., Mahima, M., Singh, A., Gautam, V., & Sarkar, A. K. (2020). Auxin signaling modulates *LATERAL ROOT PRIMORDIUM1* (*LRP1*) expression during lateral root development in *Arabidopsis*. *The Plant Journal*, *101*(1), 87-100.

Suzuki, M., & McCarty, D. R. (2008). Functional symmetry of the B3 network controlling seed development. *Current Opinion in Plant Biology*, *11*(5), 548-553.

Suzuki, M., Wang, H. H. Y., & McCarty, D. R. (2007). Repression of the *LEAFY COTYLEDON 1/B3* regulatory network in plant embryo development by *VP1/ABSCISIC ACID INSENSITIVE 3-LIKE B3* genes. *Plant Physiology*, *143*(2), 902-911.

Stone, S. L., Kwong, L. W., Yee, K. M., Pelletier, J., Lepiniec, L., Fischer, R. L., ... & Harada, J. J. (2001). *LEAFY COTYLEDON2* encodes a B3 domain transcription factor that induces embryo development. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *98*(20), 11806-11811.

Swaminathan, K., Peterson, K., & Jack, T. (2008). The plant B3 superfamily. *Trends in Plant Science*, *13*(12), 647-655.

Tao, Z., Liu, H., Qiu, D., Zhou, Y., Li, X., Xu, C., & Wang, S. (2009). A pair of allelic *WRKY* genes play opposite roles in rice-bacteria interactions. *Plant Physiology*, *151*(2), 936-948.

Tsukagoshi, H., Morikami, A., & Nakamura, K. (2007). Two B3 domain transcriptional repressors prevent sugar-inducible expression of seed maturation genes in *Arabidopsis* seedlings. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *104*(7), 2543-2547.

Valdes-Lopez, O., Arenas-Huertero, C., Ramirez, M., Girard, L., Sanchez, F., Vance, C. P., ... Hernandez, G. (2008). Essential role of MYB transcription factor: PvPHR1 and microRNA: PvmiR399 in phosphorus-deficiency signalling in common bean roots. *Plant, Cell & Environment*, *31*(12), 1834-1843.

Vaz Patto, M. C., Amarowicz, R., Aryee, A. N., Boye, J. I., Chung, H. J., Martín-Cabrejas, M. A., & Domoney, C. (2015). Achievements and challenges in improving the nutritional quality of food legumes. *Critical Reviews in Plant Sciences*, *34*, 105–143.

Vlasova, A., Capella-Gutiérrez, S., Rendon-Anaya, M., Hernández-Oñate, M., Minoche, A. E., Erb, I., Câmara, F., Prieto-Barja, P., Corvelo, A., Sanseverino, W., & Westergaard, G. (2016). Genome and transcriptome analysis of the

Mesoamerican common bean and the role of gene duplications in establishing tissue and temporal specialization of genes. *Genome Biology*, *17*, 32.

Yang, T., Peng, H., Whitaker, B. D., & Conway, W. S. (2012). Characterization of a calcium/calmodulin-regulated SR/CAMTA gene family during tomato fruit development and ripening. *BMC plant biology*, *12*(1), 1-13.

Yang, C., Ma, Y., & Li, J. (2016). The rice *YABBY4* gene regulates plant growth and development through modulating the gibberellin pathway. *Journal of Experimental Botany*, *67*(18), 5545-5556.

Yang, H., Shi, G., Du, H., Wang, H., Zhang, Z., Hu, D., ... & Yu, D. (2017). Genome-Wide Analysis of Soybean *LATERAL ORGAN BOUNDARIES Domain*-Containing Genes: A Functional Investigation of *GmLBD12*. *The Plant Genome*, *10*(1).

Yeken, M. Z. (2023a). Investigation of Genotype× Environment Interactions for the Seed Mineral Composition in *Phaseolus vulgaris* L. *Journal of Food Composition and Analysis*, 105657.

Yeken, M. Z., Özer, G., & Çiftçi, V. (2023b). Genome-Wide Identification and Expression Analysis of DGK (Diacylglycerol Kinase) Genes in Common Bean. *Journal of Plant Growth Regulation*, *42*(4), 2558-2569.

Yilmaz, H., Özer, G., Baloch, F. S., Çiftçi, V., Chung, Y. S., & Sun, H. J. (2023). Genome-Wide Identification and Expression Analysis of MTP (Metal Ion Transport Proteins) Genes in the Common Bean. *Plants*, *12*(18), 3218.

Yoon, Y., Seo, D. H., Shin, H., Kim, H. J., Kim, C. M., & Jang, G. (2020). The role of stress-responsive transcription factors in modulating abiotic stress tolerance in plants. *Agronomy*, *10*(6), 788.

Yu, X., Liu, Y., Wang, S., Tao, Y., Wang, Z., Shu, Y., Peng, H., Mijiti, A., Wang, Z., Zhang, H., & Ma, H. (2016). CarNAC4, a NAC-type chickpea transcription factor conferring enhanced drought and salt stress tolerances in *Arabidopsis*. *Plant Cell Reports*, *35*, 613–627.

Wang, S., Bai, Y., Shen, C., Wu, Y., Zhang, S., Jiang, D., Guilfoyle, T. J., Chen, M., & Qi, Y. (2010). Auxin-related gene families in abiotic stress response in *Sorghum bicolor*. *Functional & Integrative Genomics*, *10*, 533–546.

Wang, F., Lin, R., Feng, J., Chen, W., Qiu, D., & Xu, S. (2015). *Triticum aestivum* variety *Chinese Spring* TaNAC1 acts as a negative regulator of stripe rust resistance in wheat, enhances susceptibility to *Pseudomonas syringae*, and promotes lateral root development in transgenic *Arabidopsis thaliana*. *Frontiers in Plant Science*, *6*,108.

Wang, Y., Li, K., Chen, L., Zou, Y., Liu, H., Tian, Y., ... & Li, X. (2015). MicroRNA167-directed regulation of the auxin response factors *GmARF8a* and *GmARF8b* is required for soybean nodulation and lateral root development. *Plant physiology*, *168*(3), 984-999.

Woo, H. R., Kim, J. H., Kim, J., Kim, J., Lee, U., Song, I. J., ... & Lim, P. O. (2010). The RAV1 transcription factor positively regulates leaf senescence in Arabidopsis. *Journal of Experimental Botany*, *61*(14), 3947-3957.

Wu, J., Wang, L., & Wang, S. (2016). Comprehensive analysis and discovery of drought-related NAC transcription factors in common bean. *BMC Plant Biology*, *16*, 1-13.

Zhao, S. P., Xu, Z. S., Zheng, W. J., Zhao, W., Wang, Y. X., Yu, T. F., ... & Zhang, X. H. (2017). Genome-wide analysis of the RAV family in soybean and functional identification of GmRAV-03 involvement in salt and drought stresses and exogenous ABA treatment. *Frontiers in Plant Science*, *8*, 905.

Zhang, Q., Geng, J., Du, Y., Zhao, Q., Zhang, W., Fang, Q., ... & Du, J. (2022). Heat shock transcription factor (*Hsf*) gene family in common bean (*Phaseolus vulgaris*): Genome-wide identification, phylogeny, evolutionary expansion and expression analyses at the sprout stage under abiotic stress. *BMC Plant Biology*, *22*(1), 1-15.

Zhang, Z. L., Xie, Z., Zou, X., Casaretto, J., Ho, T. H., & Shen, Q. J. (2004). A rice *WRKY* gene encodes a transcriptional repressor of the gibberellin signaling pathway in aleurone cells. *Plant Physiology*, *134*, 1500–1513.

Zhang, H. X., Jin, J. H., He, Y. M., Lu, B. Y., Li, D. W., Chai, W. G., Khan, A., & Gong, Z. H. (2016). Genome-wide identification and analysis of the SBP-box family genes under Phytophthora capsici stress in pepper (*Capsicum annuum L.*). *Frontiers in Plant Science*, *7*,504.

Zhang, Q., Zhang, W. J., Yin, Z. G., Li, W. J., Xia, C. Y., Sun, H. Y., ... & Zhao, Q. (2021). Genome-wide identification reveals the potential functions of the *bZIP* gene family in common bean (*Phaseolus vulgaris*) in response to salt stress during the sprouting stage. *Journal of Plant Growth Regulation*, 1-16.

Zhao, X., Yang, X., Pei, S., He, G., Wang, X., Tang, Q., Jia, C., Lu, Y., Hu, R., Zhou, G. (2016). The miscanthus NAC transcription factor MlNAC9 enhances abiotic stress tolerance in transgenic *Arabidopsis*. *Gene*, *586*, 158–69.

Zhu, M., Meng, X., Cai, J., Li, G., & DongLi, T. Z. (2018). Basic leucine zipper transcription factor SlbZIP1 mediates salt and drought stress tolerance in tomato. *BMC Plant Biology*, *18*, 83.

BÖLÜM 3

BİTKİLERDE STRES DİRENCİNİN ARTIRILMASINDA EPİGENETİK MODİFİKASYONLAR

Dr. Öğr. Üyesi Barış EREN[1*]

DOI: https://dx.doi.org/10.5281/zenodo.10031319

[1*] Iğdır Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Tarımsal Biyoteknoloji Bölümü, Iğdır, Türkiye. bariseren@gmail.com

GİRİŞ

Bitkiler, hareketsiz yapıları nedeniyle, sıcaklıktaki dalgalanmalar, sel olayları, ışık yoğunluğundaki değişimler, topraktaki yetersiz mineral bileşimi, zararlıların veya hastalıkların istilası ve otçullar veya parazitlerle etkileşimler dahil olmak üzere birçok çevresel pertürbasyona sürekli olarak maruz kalırlar. Bitkilerin olumsuz çevresel koşullara maruz kalması, büyümeleri, gelişmeleri ve toplam üretkenlikleri üzerinde olumsuz etkilere neden olabilir (Arnholdt-Schmitt, 2004). Sonuç olarak, bitkiler karşılaştıkları çevresel engellere uyum sağlamak için birçok mekanizma geliştirmiştir. Yukarıda bahsedilen taktikler, genlerin epigenetik düzenlemesinin yanı sıra transkripsiyonel ve transkripsiyon sonrası katmanlarda hızlı ve senkronize değişiklikleri içerir. (Singh ve ark., 2015). Verim, kuraklığa tolerans ve herbivor direnci gibi ekolojik ve ekonomik öneme sahip çok sayıda özelliğin, ifadelerinin önemli sayıda genin ortak etkisinden etkilendiği karmaşık bir yapıya sahip olduğu kabul edilmektedir. Bu olgu, bu özelliklerin önemli bir kısmında görülmektedir. Bitkiler çevresel güçlere maruz kaldıklarında biyotik ve abiyotik zorluklara karşı çeşitli tepkiler sergilerler (Robert-Seilaniantz ve ark., 2011).

Ortaya çıkan çalışmalar, altta yatan epigenetik varyasyonların ekonomik öneme sahip özelliklerdeki kalıtsal eşitsizlikleri muhtemelen açıklayabileceğini göstermektedir (Richards, 2011). Çok sayıda çalışma, stres tepkisi ile ilişkili genlerin düzenlenmesinde epigenetik mekanizmaların rol oynadığına dair deneysel destek sağlamıştır (Chinnusamy ve Zhu, 2009). Epigenetik, nükleotid dizilerindeki

değişikliklerden ziyade DNA ve ilişkili proteinlerdeki modifikasyonlardan kaynaklanan gen ifadesindeki değişikliklerin bilimsel çalışmasını ifade eder. Bu değişiklikler potansiyel olarak birbirini takip eden nesiller boyunca kalıtılabilir (Fazzari ve Greally, 2004). Epigenetik modifikasyonlar tersine çevrilebilirlik kapasitesine sahiptir ve hem gen deaktivasyonu hem de aktivasyonu ile ilişkili olabilir (Zemach ve ark., 2010). DNA'nın metilasyonu ve bitkilerdeki histonların değişimi, birlikte bitkinin esnekliğine katkıda bulunan çok sayıda abiyotik ve biyotik faktörden etkilenir (Zhang ve ark., 2012). Birçok mekanizma arasında, DNA metilasyonu şu anda en kapsamlı şekilde çalışılan epigenetik mekanizmadır.

Gen düzenlemesini yöneten epigenetik mekanizmaların kapsamlı bir şekilde anlaşılması, yalnızca stres koşulları altında gen ifadesinin modülasyonuna ilişkin değerli bilgiler sunmakla kalmaz, aynı zamanda bitkilerin çevresel olumsuzluklara karşı direncini artırmak için genetik mühendisliği tekniklerinin potansiyel kullanımı için umut verici bir yol sunar (Sahu ve ark., 2013). Bitkiler tarafından çevresel uyaranlara uyum sağlamak için kullanılan epigenetik sürecin araştırılması, bilim camiasında önemli bir çalışma alanı olarak ortaya çıkmıştır. Bitkilerin abiyotik stres faktörlerine maruz kalması, büyüme ve gelişmeleriyle ilişkili biyokimyasal ve fizyolojik süreçler üzerinde doğrudan ve zararlı etkilere sahip olabilir (Kumar ve ark., 2015). Abiyotik stres faktörlerinin DNA metilasyonunda kalıtsal değişikliklere neden olma ve böylece epiallellerin ortaya çıkmasına yol açma potansiyeli vardır (Karan ve ark., 2012). Epialleller, benzer genetik dizilere sahip olan

ancak epigenetik değişiklikler nedeniyle farklı gen ifadesi modellerine sahip olan genleri ifade eder. Epialleller, belirli lokuslarda kalıtsal DNA'nın metilasyonunu indükleyen çevresel stres faktörlerinin bir sonucu olarak ortaya çıkar ve bu metilasyon, başlangıçtaki çevresel uyaranın yokluğunda bile devam eder (Boyko ve Kovalchuk, 2011).
Gen ifadesinin stres kaynaklı epigenetik düzenlemesinin arkasındaki moleküler mekanizmaların anlaşılması, mahsul kalitesini artırmayı amaçlayan ıslah girişimlerinin etkinliğini artırma potansiyeline sahiptir, dolayısıyla tarımsal ürünlerin kapsamlı genetik değişiklik ihtiyacını azaltır (Yaish, 2013). DNA metilasyonunun gen ifadesini önemli ölçüde etkilediği gösterilen iki mekanizma, histon modifikasyonlarının indüklenmesi ve RNA'ya yönelik DNA metilasyonudur. 5-mC olarak adlandırılan metillenmiş sitozin, transpozon hareketliliği, genom baskılanması ve gen ifadesi düzenlemesi dahil olmak üzere birçok temel biyolojik mekanizmanın katılımcısı olarak kanıtlanmıştır (Yan ve ark., 2010).

Bir genotipin uyum yeteneğinin değerlendirilmesi büyük ölçüde iki kritik faktöre dayanır: genomuna gömülü bilgi içeriği ve bu bilginin strese yanıt olarak ortaya çıkma şekli. Genomun tezahürü, genellikle epigenetik kontrol ile ilişkili süreçler tarafından kolaylaştırılan kromatin konfigürasyonundan etkilenir. Yukarıda bahsedilen mekanizmalar arasında histon varyantları, histon post-translasyonel modifikasyonları ve DNA metilasyonu yer alır (Zhu, 2008). Kromatin şeklinin gen ifadesi üzerindeki etkisi de görülmektedir. Gelişimsel ve çevresel faktörlerin DNA içinde epigenetik değişikliklere neden olma

potansiyeli vardır. Sonuç olarak, bir bitki hücresi içinde tek bir genomun varlığı, çeşitli uyaranlara yanıt olarak birçok epigenomun gelişmesine yol açabilir. Bitkilerin stres toleransına katkıda bulunan stres kaynaklı epigenetik yollar hakkında fikir edinmek: DNA metilasyonu ve histon modifikasyon işaretlerindeki değişikliklerle ilişkili olan gen ifadesinde stres kaynaklı değişikliklerin oranını tespit etmek önemlidir. Buna ek olarak, iklimlendirme süreci boyunca veya stresle ilk karşılaşmada ortaya çıkan stres kaynaklı DNA ve histon değişikliklerinin kalıcılığı hakkında kapsamlı verilere ihtiyaç vardır. Bu nedenle, stresin epigenetik olarak tutulmasından kaynaklanan değişikliklerin anlaşılması çok önemlidir. Stres hafızasının depolanma süresi, stres kaynaklı proteinlerin, RNA'ların ve metabolitlerin yarı ömrüne bağlı olması nedeniyle kısa aralıklarla sınırlıdır. Buna karşılık, stres kaynaklı hafıza bitkilerin fenolojisi ve morfolojisindeki değişiklikleri içeriyorsa, uzun süreler boyunca muhafaza edilme potansiyeline sahiptir (Thomashow, 1999). Epigenetik mekanizmaların kullanımı, önceki stresli deneyimlerle ilgili bilgilerin uzun süre korunmasına katkıda bulunabilir. DNA metilasyonu ve histonlardaki değişiklikler dahil olmak üzere kararlı veya kalıtsal modifikasyonlar (Iba, 2002).

1. ÖNEMLİ BİR EPİGENETİK İŞARET: DNA METİLASYONU

Deoksiribonükleik asit (DNA) adenin (A), sitozin (C), guanin (G) ve timin (T) olmak üzere dört farklı nükleotid bazından oluşur. Buna karşılık RNA'da timin (T) yerine urasil (U) kullanılır. Bazen 5-mC olarak da bilinen metillenmiş sitozin, genomik DNA'nın yaygın olarak

bulunan bir bileşenidir (Wang, 2016). Bu özel baz alternatif olarak beşinci baz olarak adlandırılır. Bu keşif, DNA'nın genetik materyalin kendisi olarak hizmet ettiğinin kabul edilmesinden önce gerçekleşmiştir (Johnson ve Coghill, 1925). Ökaryotik türler, genomik DNA'nın 5-metilsitozin (5-mC) içeriğinde önemli farklılıklar sergiler. Memelilerde, DNA metilasyonu çoğunlukla simetrik CG içeriğine sahip bölgelerde meydana gelirken, CG olmayan metilasyon embriyonik kök hücrelerde daha yaygındır (Lister, 2009). Buna karşılık, yüksek bitkilerin nükleer genomunun üç farklı nükleotid dizisi boyunca yüzde elli 5-metilsitozin (5-mC) fazlalığı içerebileceği gösterilmiştir: CG, CHG ve CHH (Doerfler, 1983). CHG ve CHH bölgelerindeki metilasyon çoğunlukla aktarılabilir elementlerin (TE'ler) içinde gerçekleşirken, CG metilasyonu hem TE'lerde hem de genlerde kayda değer seviyelerde görülür (Feng, 2010).

Memeliler ve bitkilerdeki genomların sentromerik ve perisentromerik bölgelerinin yanı sıra diğer tekrarlayan elementlerde de yüksek düzeyde metilasyon varlığı görülmüştür. DNA metilasyonu, önceki çalışmalarda gösterildiği gibi, Arabidopsis bitkisinin genomu boyunca sentromerik bölgelerde ve tekrarlayan dizilerde belirgin bir zenginleşmeye sahiptir (Zilberman, 2007). DNA metilasyonu ve demetilasyonu, DNA molekülü içindeki 5-metilsitozin (5-mC) miktarını ve dağılımını düzenlemek için işbirliği yapan iki tamamlayıcı süreçtir. Steward'a (2002) göre, DNA'dan metilasyonu ortadan kaldırmak için aktif, pasif veya aktif ve pasif mekanizmaların bir kombinasyonu dahil olmak üzere birçok teknik potansiyel olarak kullanılabilir. Bazı durumlarda,

metiltransferazların aracılık ettiği hedeflenmiş metilasyon süreci ile genlerin spesifik metilasyon modelleri elde edilebilir, böylece demetilazlara olan ihtiyaç ortadan kalkar. Tersine, istenen sonuca ulaşmak için birkaç genin metilasyon modellerinin demetilasyonuna ihtiyacı vardır.

2. HİSTON MODİFİKASYONLARI

Histon değişiklikleri, kromatin yapısını modüle ederek gen ifadesinin düzenlenmesinde önemli bir rol oynar. Yukarıda bahsedilen değişiklikler, histon proteinlerinde, yani nükleozom çekirdek kompleksi içinde yapılan kovalent değişiklikleri içerir (Malagnac, 2002). Histon modifikasyonları, genlerin transkripsiyonel durumunu ve ifade derecelerini belirlemede çok önemli bir işlev üstlenen bir "histon kodu" olarak görülebilir. Histonlardaki bazı değişikliklerin gen transkripsiyonundaki artışla bağlantılı olduğu gösterilmiştir. Yukarıda bahsedilen değişiklikler kromatin yapısının gevşemesine ve dolayısıyla transkripsiyonel makineye erişilebilirliğinin artmasına neden olur (Zhang, 2007). Ayrıca, histonlardaki bazı değişiklikler genlerin ifadesini bastırma yeteneğine sahiptir. Yukarıda bahsedilen değişiklikler kromatin yoğunlaşma sürecini ve ardından gen ifadesinin baskılanmasını kolaylaştırır (Camporeale, 2007).

Histonların kuyruklarında bulunan belirli lizin veya arginin kalıntılarına bir metil grubunun eklenmesini içeren metilasyon süreci, meydana geldiği kesin ortama bağlı olarak transkripsiyonu aktive etme veya inhibe etme yeteneğine sahiptir. Trimetilasyona uğrayan lizin

4'teki bir histon H3 örneği, aktif transkripsiyon süreci ile ilişkilidir. Tersine, lizin 9 ve lizin 27'deki histon H3'ün dimetilasyonu, transkripsiyonun bastırılmasıyla bağlantılıdır (Zhang, 2007). Farklı histon varyasyonlarının kodlanmasından birden fazla gen sorumludur. Histon varyasyonları ve post-translasyonel modifikasyonların etkileşimiyle oluşan karmaşık histon kodu, kromatin yapısının yönetilmesinde ve gen ifade modellerinin düzenlenmesinde kritik bir rol oynar.

Stres koşullarına bağlı olarak belirli histon modifikasyonlarının indüklenmesinin gen ifadesi üzerinde bir etkisi olduğu gösterilmiştir. Su altı stresine maruz kalan pirinç bağlamında, önceki çalışmalar alkol dehidrojenaz 1 ve piruvat dekarboksilaz 1 dahil olmak üzere bazı genlerde histon H3K4 trimetilasyonu ve H3 asetilasyonunun (H3ac) meydana geldiğini göstermiştir. Bu histon modifikasyonları gelişmiş gen ifadesi ile ilişkilendirilmiştir (Tsuji, 2006). Bununla birlikte, bu değişiklikler dinamik bir yapıya sahiptir ve stres ortadan kalktığında orijinal seviyelerine geri dönerler. Stres tarafından oluşturulan histon değişiklikleri DNA metilasyonunu da etkileyebilir (Earley, 2006). Arabidopsis ve mısırda stres kaynaklı histon deasetilazları hedeflemek için nakavt mutantların ve RNA interferans hatlarının kullanılması, histon asetilasyonunda gözlenen bir artışa yol açmıştır. Buna, histon metilasyon modellerinde değişiklikler ve daha önce susturulmuş olan genlerin yeniden etkinleştirilmesi eşlik etmiştir (Rossi, 2007; Moritoh ve ark., 2012).

Histon değişiklikleri, stres tepkisi ve bunların gen ifadesi ve kromatin yapısı üzerindeki etkileri arasındaki karmaşık etkileşim çok yönlü bir olgudur. Yukarıda bahsedilen değişiklikler, DNA metilasyonu ve diğer epigenetik süreçlerle birlikte, hem dış hem de iç uyaranlara tepki olarak bitkilerde gen ifadesinin karmaşık modülasyonunda önemli bir rol oynamaktadır (Chinnusamy ve Zhu, 2009).

3. BİTKİLERDE EPİGENETİK MEKANİZMALARIN NEDEN OLDUĞU STRES HAFIZASI VE ADAPTİF TEPKİLER

Son zamanlarda yapılan araştırmalar, epigenetik sistemlerin stres hafızasında ve bitkilerin adaptasyon kabiliyetinde oynadığı önemli role ışık tutmuştur. (Ding, 2012) Ding ve arkadaşları, kuraklık stresine sık sık maruz kalmanın, bitkiler yeni bir stres yaşadığında gen ifade modellerinde daha hızlı adaptasyon değişikliklerine yol açtığı ilginç bir fenomen bulmuşlardır. Bu durum, bitkiler yeni bir strese maruz kaldığında meydana gelmiştir. Arabidopsis üzerinde yaptıkları çalışma sırasında RD29B ve RAB18 transkript seviyelerinin kademeli olarak arttığını ve sonunda daha önceki stres uygulamasına yanıt olarak kaydedilenlerden bile daha yüksek seviyelere ulaştığını buldular. Bu birikim, H3K4me3'teki kademeli artış ve stresten kurtulma aşaması boyunca meydana gelen RNA polimeraz II'nin serin 5 (Ser5P) fosforilasyonu ile bağlantılı görünüyordu. Özellikle, gen transkripsiyon seviyeleri strese maruz kalmamış bitkilerde gözlenen temel seviyelere geri döndükten sonra bile, RNA polimeraz II'de tespit edilen yüksek H3K4me3 ve Ser5P seviyeleri kalmıştır. Bu durum, bu yüksek

seviyelerin bir tür stres hafızası görevi görebileceğini düşündürmektedir.

Stres hafızası fikri, kuraklığın etkilerinden daha fazlasını kapsamaktadır. UV-C ışığı ve bitki savunma elisitörü flagellin kullanılarak yapılan deneyler sonucunda yüksek bir somatik homolog rekombinasyon sıklığı keşfedilmiştir. İlginç bir şekilde, bu hiper-rekombinasyon durumunun stresle tedavi edilen ebeveynlerin çocukları tarafından baskın olarak kalıtıldığı gösterilmiştir (Molinier, 2006), ki bu ilgi çekici bir bulgudur. Benzer şekilde, tütün mozaik virüsü (TMV) ile enfeksiyon, tütün bitkilerinde hem somatik hem de mayotik süreçler sırasında önemli oranlarda rekombinasyonla sonuçlanmıştır. TMV ile enfekte olmuş bitkilerin yavruları, çok sayıda lösin bakımından zengin tekrar (LRR) içeren lokuslarda hipometilasyon göstermiş ve hipometile LRR içeren TMV (N-geni) direnç genlerinde daha yüksek rekombinasyon sıklığı sergilemiştir (Boyko, 2007). Bu durum TMV ile enfekte olmuş bitkilerin döllerinde görülmüştür.

DNA sitozin metilasyonunun bir inhibitörü olan 5-aza-deoksisitidin ile muamele edilen pirinç tohumları, döllerinde stres kaynaklı epigenetik plastisitenin uyarlanabilir kapasitesini araştırmak için bir deneyde kullanıldı. Belirli bir yavruda, Xa21 benzeri bir protein için bir gen olan Xa21G geninde mevcut olan metilasyon tamamen kaldırıldı. Promotörün metilasyonu kaldırıldığından ve değişen epigenetik durum döl hattı yoluyla aktarıldığından, Xa21G geni artık otomatik olarak ifade edilmektedir. Bunun bir sonucu olarak, bu bitkiler Xanthomonas

oryzae pv. oryzae, ırk PR2 hastalığına karşı daha yüksek düzeyde direnç sergilemiştir (Akimoto 2007).

Bitkilerde stres hafızası, adaptasyon ve stres kaynaklı özelliklerin genetik aktarımında epigenetik süreçlerin önemini vurgulamaktadır. Heyecan verici bir konu olan epigenetik stres hafızası ve bunun bitkilerin hayatta kalması ve dayanıklılığı açısından sonuçları, tarımsal bitkiler üzerinde yürütülecek araştırma projeleri sayesinde gelecekte daha da fazla öngörü sağlayacaktır.

SONUÇ

Bitkilerde stres tepkilerinin ve hafızanın düzenlenmesinde epigenetik süreçlerin önemli bir rol oynadığını gösteren araştırmalar giderek artmaktadır (Demirel ve ark., 2023; Türkoğlu ve ark., 2023; Türkoğlu ve ark., 2023a; Karaca ve ark., 2019; Karaca ve ark., 2016). Bu durum, epigenetik mekanizmaların, görülen transgenerasyonel stres tepkilerinin çoğundan sorumlu olabileceğine inanılmasına yol açmaktadır. Son araştırmalar, eşeyli üreme sürecinde bitkilerde epigenetik işaretler için karmaşık bir yeniden programlama sisteminin varlığına ışık tutmuştur. Bu, özellikle gen bakımından zengin ökromatik bölgelerde nispeten daha yüksek tekrarlayan element popülasyonuna sahip kültür bitkilerinde epigenetik mekanizmanın potansiyel dinamik rollerini vurgulamaktadır. Özellikle pirinç üzerinde yapılan araştırmalar, DNA metiltransferazlar ve DNA demetilazlardaki mutasyonların Arabidopsis'teki karşılık gelen mutasyonlardan daha ciddi anormalliklere yol açtığını göstermiştir. Strese karşı dirençli

transgenik bitkiler yaratma sürecinde epigenetik süreçlerin potansiyelini fark etmek için metodik bir yaklaşım benimsemek gerekir. Bu, hedef genin dikkatli bir şekilde seçilmesiyle başlar ve ardından genin promotör dizisinin RNA'ya yönelik DNA metilasyonu ile ilişkili özellikler açısından değerlendirilmesiyle devam eder.

Epigenetik stres hafızasıyla ilişkilendirilen ekolojik adaptasyonların evrimsel dinamiklerini ve tepkilerini daha derinlemesine anlamak amacıyla son zamanlarda matematiksel modeller önerilmiştir. Bu modeller, atasal fenotiplerin aktarılma olasılığı, nesiller boyunca epigenetik sıfırlama şanslarının sıklığı ve epigenetik olarak düzenlenen özelliklerin çevresel indüksiyonuna ilişkin varsayımlar hakkındaki bilgileri dikkate almaktadır. Bu tür modeller, kalıtsal epigenetik varyasyonu ve aktarılabilirliği tespit etme potansiyeli göstermekte ve gelecekteki moleküler araştırmalar için yol açmaktadır (Kulak ve Aydin, 2023).

Sonuç olarak, stresin histon varyasyonlarında, histon N-kuyruk modifikasyonlarında ve DNA metilasyonunda değişiklikler yaratabileceği kanıtlanmıştır; bunların hepsi strese duyarlı gen ifadesini modüle etme ve strese maruz kaldıklarında bitkilerin büyümesini etkileme yeteneğine sahiptir. Kalıtsal epigenetik değişikliklerin nesil içi ve nesil ötesi stres hafızasına katkıda bulunması, geçici kromatin modifikasyonlarının ise iklimlendirme tepkilerine aracılık etmekten sorumlu olması mümkündür. Mitotik veya mayotik hücre bölünmesi sırasında DNA ve histonlarda strese bağlı değişikliklerin kalıtımı hakkında çok az şey bilindiğinden, bu değişikliklerin doğası gereği

gerçekten epigenetik olup olmadığını kesin olarak söylemek mümkün değildir. Buna rağmen, abiyotik stresin yol açtığı epigenetik değişiklikler organizmanın uyum sağlama kabiliyetine fayda sağlayabilir. Ancak, stres hafızasının bir bitkinin maksimum potansiyeline ulaşmasını engelleyerek tarımsal verimliliği kısıtlayabileceğini akılda tutmak önemlidir. Bu, stresin mahsul verimini sınırlayabileceği yollardan biridir. Bu nedenle, stres hafızası hakkında daha iyi bilgi sahibi olmanın tarımda tohum kullanımı, strese dayanıklı ürün çeşitlerinin ıslahı ve bitki türlerinin bulundukları doğal ortamlarda korunması açısından önemli sonuçları vardır.

Epigenetik alanındaki son gelişmeler bize DNA metilasyonu, histon modifikasyonları, sofistike araştırma araçlarının mevcudiyeti hakkında daha derin bir kavrayış sağlamıştır. Bu gelişmeler, epigenetik stres hafızasının kapsamlı bir analizini yapmak ve bunu ürün yönetimi ve tarımsal uygulamaları geliştirmek için kullanmak için umut verici beklentiler sunmaktadır.

KAYNAKÇA

Akimoto, K., Katakami, H., Kim, H. J., Ogawa, E., Sano, C. M., Wada, Y., & Sano, H. (2007). Epigenetic inheritance in rice plants. Annals of botany, 100(2), 205-217.

Arnholdt-Schmitt, B. (2004). Stress-induced cell reprogramming. A role for global genome regulation?. Plant physiology, 136(1), 2579-2586.

Boyko, A., & Kovalchuk, I. (2011). Genome instability and epigenetic modification—heritable responses to environmental stress?. Current opinion in plant biology, 14(3), 260-266.

Boyko, A., Kathiria, P., Zemp, F. J., Yao, Y., Pogribny, I., & Kovalchuk, I. (2007). Transgenerational changes in the genome stability and methylation in pathogen-infected plants: (Virus-induced plant genome instability). Nucleic acids research, 35(5), 1714-1725.

Camporeale, G., Oommen, A. M., Griffin, J. B., Sarath, G., & Zempleni, J. (2007). K12-biotinylated histone H4 marks heterochromatin in human lymphoblastoma cells. The Journal of nutritional biochemistry, 18(11), 760-768.

Chinnusamy, V., & Zhu, J. K. (2009). Epigenetic regulation of stress responses in plants. Current opinion in plant biology, 12(2), 133-139.

Chinnusamy, V., & Zhu, J. K. (2009). Epigenetic regulation of stress responses in plants. Current opinion in plant biology, 12(2), 133-139.

Demirel, F., Türkoğlu, A., Haliloğlu, K., Eren, B., Özkan, G., Uysal, P., ... & Bocianowski, J. (2023). Mammalian Sex Hormones as Steroid-Structured Compounds in Wheat Seedling: Template of the Cytosine Methylation Alteration and Retrotransposon Polymorphisms with iPBS and CRED-iBPS Techniques. Applied Sciences, 13(17), 9538.

Ding, Y., Fromm, M., & Avramova, Z. (2012). Multiple exposures to drought'train'transcriptional responses in Arabidopsis. Nature communications, 3(1), 740.

Doerfler, W. (1983). DNA methylation and gene activity. Annual review of biochemistry, 52(1), 93-124.

Earley, K., Lawrence, R. J., Pontes, O., Reuther, R., Enciso, A. J., Silva, M., ... & Pikaard, C. S. (2006). Erasure of histone acetylation by Arabidopsis HDA6 mediates large-scale gene silencing in nucleolar dominance. Genes & development, 20(10), 1283-1293.

Fazzari, M. J., & Greally, J. M. (2004). Epigenomics: beyond CpG islands. Nature Reviews Genetics, 5(6), 446-455.

Feng, S., Cokus, S. J., Zhang, X., Chen, P. Y., Bostick, M., Goll, M. G., ... & Jacobsen, S. E. (2010). Conservation and divergence of methylation patterning in plants and animals. Proceedings of the National Academy of Sciences, 107(19), 8689-8694.

Iba, K. (2002). Acclimative response to temperature stress in higher plants: approaches of gene engineering for temperature tolerance. Annual review of plant biology, 53(1), 225-245.

Johnson, T. B., & Coghill, R. D. (1925). Researches on pyrimidines. C111. The discovery of 5-methyl-cytosine in tuberculinic acid, the nucleic acid of the tubercle bacillus1. Journal of the American Chemical Society, 47(11), 2838-2844.

Karaca, M., Aydin, A., & Ince, A. G. (2019). Cytosine methylation polymorphisms in cotton using TD-MS-RAPD-PCR. Modern Phytomorphology, 13, 13-19.

Karaca, M., Ince, A. G., Gocer, E., & Aydin, A. (2016). Exonic and intronic DNA methylation differences in a fiber specific gene of Pima cotton (Gossypium barbadense L.). Journal of Scientific and Engineering Research, 3, 478-486.

Karan, R., DeLeon, T., Biradar, H., & Subudhi, P. K. (2012). Salt stress induced variation in DNA methylation pattern and its influence on gene expression in contrasting rice genotypes. PloS one, 7(6), e40203.

Kulak, M., Aydin, A. (2023). Role of Beneficial Elements in Epigenetic Regulation of Plants in Response to Abiotic Stress Factors. Sangeeta Pandey, Durgesh Kumar Tripathi, Vijay Pratap Singh, Shivesh Sharma, Devendra Kumar Chauhan (Yay. Haz.). Beneficial Chemical Elements of Plants: Recent

Developments and Future Prospects, 22-37. John Wiley & Sons Ltd. https://doi.org/10.1002/9781119691419.ch2

Kumar, M., Hasan, M., Arora, A., Gaikwad, K., Kumar, S., Rai, R. D., & Singh, A. (2015). Sodium chloride-induced spatial and temporal manifestation in membrane stability index and protein profiles of contrasting wheat (Triticum aestivum L.) genotypes under salt stress. Indian Journal of Plant Physiology, 20, 271-275.

Lister, R., Pelizzola, M., Dowen, R. H., Hawkins, R. D., Hon, G., Tonti-Filippini, J., ... & Ecker, J. R. (2009). Human DNA methylomes at base resolution show widespread epigenomic differences. nature, 462(7271), 315-322.

Malagnac, F., Bartee, L., & Bender, J. (2002). An Arabidopsis SET domain protein required for maintenance but not establishment of DNA methylation. The EMBO journal, 21(24), 6842-6852.

Molinier, J., Ries, G., Zipfel, C., & Hohn, B. (2006). Transgeneration memory of stress in plants. Nature, 442(7106), 1046-1049.

Moritoh, S., Eun, C. H., Ono, A., Asao, H., Okano, Y., Yamaguchi, K., ... & Terada, R. (2012). Targeted disruption of an orthologue of DOMAINS REARRANGED METHYLASE 2, OsDRM2, impairs the growth of rice plants by abnormal DNA methylation. The Plant Journal, 71(1), 85-98.

Richards, E. J. (2011). Natural epigenetic variation in plant species: a view from the field. Current opinion in plant biology, 14(2), 204-209.

Robert-Seilaniantz, A., Grant, M., & Jones, J. D. (2011). Hormone crosstalk in plant disease and defense: more than just jasmonate-salicylate antagonism. Annual review of phytopathology, 49, 317-343.

Rossi, V., Locatelli, S., Varotto, S., Donn, G., Pirona, R., Henderson, D. A., ... & Motto, M. (2007). Maize histone deacetylase hda101 is involved in plant development, gene transcription, and sequence-specific modulation of histone modification of genes and repeats. The Plant Cell, 19(4), 1145-1162.

Sahu, P. P., Pandey, G., Sharma, N., Puranik, S., Muthamilarasan, M., & Prasad, M. (2013). Epigenetic mechanisms of plant stress responses and adaptation. Plant cell reports, 32, 1151-1159.

Singh, A., Bhushan, B., Gaikwad, K., Yadav, O. P., Kumar, S., & Rai, R. D. (2015). Induced defence responses of contrasting bread wheat genotypes under differential salt stress imposition.

Steward, N., Ito, M., Yamaguchi, Y., Koizumi, N., & Sano, H. (2002). Periodic DNA methylation in maize nucleosomes and demethylation by environmental stress. Journal of Biological Chemistry, 277(40), 37741-37746.

Thomashow, M. F. (1999). Plant cold acclimation: freezing tolerance genes and regulatory mechanisms. Annual review of plant biology, 50(1), 571-599.

Tsuji, H., Saika, H., Tsutsumi, N., Hirai, A., & Nakazono, M. (2006). Dynamic and reversible changes in histone H3-Lys4 methylation and H3 acetylation occurring at submergence-inducible genes in rice. Plant and cell physiology, 47(7), 995-1003.

Türkoğlu, A., Haliloğlu, K., Tosun, M., Bujak, H., Eren, B., Demirel, F., ... & Niedbała, G. (2023). Ethyl Methanesulfonate (EMS) Mutagen Toxicity-Induced DNA Damage, Cytosine Methylation Alteration, and iPBS-Retrotransposon Polymorphisms in Wheat (Triticum aestivum L.). Agronomy, 13(7), 1767.

Türkoğlu, A., Haliloğlu, K., Tosun, M., Szulc, P., Demirel, F., Eren, B., ... & Niedbała, G. (2023a). Sodium Azide as a Chemical Mutagen in Wheat (Triticum aestivum L.): Patterns of the Genetic and Epigenetic Effects with iPBS and CRED-iPBS Techniques. Agriculture, 13(6), 1242.

Wang, X., Li, Q., Yuan, W., Cao, Z., Qi, B., Kumar, S., ... & Qian, W. (2016). The cytosolic Fe-S cluster assembly component MET18 is required for the full enzymatic activity of ROS1 in active DNA demethylation. Scientific Reports, 6(1), 26443.

Yaish, M. W. (2013). DNA methylation-associated epigenetic changes in stress tolerance of plants. In Molecular stress physiology of plants (pp. 427-440). India: Springer India.

Yan, H., Kikuchi, S., Neumann, P., Zhang, W., Wu, Y., Chen, F., & Jiang, J. (2010). Genome-wide mapping of cytosine methylation revealed dynamic DNA

methylation patterns associated with genes and centromeres in rice. The Plant Journal, 63(3), 353-365.

Zemach, A., Kim, M. Y., Silva, P., Rodrigues, J. A., Dotson, B., Brooks, M. D., & Zilberman, D. (2010). Local DNA hypomethylation activates genes in rice endosperm. Proceedings of the National Academy of Sciences, 107(43), 18729-18734.

Zhang, K., Sridhar, V. V., Zhu, J., Kapoor, A., & Zhu, J. K. (2007). Distinctive core histone post-translational modification patterns in Arabidopsis thaliana. PloS one, 2(11), e1210.

Zhang, L., Wang, Y., Zhang, X., Zhang, M., Han, D., Qiu, C., & Han, Z. (2012). Dynamics of phytohormone and DNA methylation patterns changes during dormancy induction in strawberry (Fragaria× ananassa Duch.). Plant cell reports, 31, 155-165.

Zhu, J. K. (2008). Epigenome sequencing comes of age. Cell, 133(3), 395-397.

Zilberman, D., Gehring, M., Tran, R. K., Ballinger, T., & Henikoff, S. (2007). Genome-wide analysis of Arabidopsis thaliana DNA methylation uncovers an interdependence between methylation and transcription. Nature genetics, 39(1), 61-69.

BÖLÜM 4

TUZ STRESİ ALTINDAKİ BİTKİLERDE miRNA FONKSİYONLARI

Arş. Gör. Sibel TURAN SİRKE[1*]

Doç. Dr. Çeknas ERDİNÇ[2]

DOI: https://dx.doi.org/10.5281/zenodo.10031333

[1*] Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Tarımsal Biyoteknoloji Bölümü, Van, Türkiye. sibelturan@yyu.edu.tr
[2] Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Tarımsal Biyoteknoloji Bölümü, Van, Türkiye. ceknaserdinc@yyu.edu.tr

GİRİŞ

Tuzluluk, dünya çapında 950 milyon hektarlık tarım alanını etkileyen önemli bir abiyotik stres faktörüdür (Uçar ve Soysal, 2021). Tuzluluk, toprakta bitki büyümesi için zararlı olan yüksek Na^+ birikmesine yol açan aşırı çözünür tuz konsantrasyonlarının birikmesidir. Yüksek tuzluluk hiper-iyonik ve hiper-osmotik strese neden olarak bitki türlerinde potansiyel hasara yol açan fizyolojik kuraklık koşullarına yol açar (Chaves vd., 2009; Hasanuzzaman vd., 2013). Hasar, metabolizma ve büyümenin geri dönüşümlü olarak engellenmesi veya hücrelerin ölümünü içeren geri dönüşümsüz bir hasar olabilir. Toprak tuzluluğu bu nedenle en önemli abiyotik stres faktörlerinden biri olarak ortaya çıkmaktadır. Tuzlanma sorunu, su döngüsündeki dengesizlik ve sulanan arazilerin drenajının yetersiz olması nedeniyle ortaya çıkar ve tuz birikimine neden olur (Amirjani, 2010). Tuzluluktan kaynaklanan stres, tuzluluğa maruz kalma seviyesi, süresi ve zamanlamasının bir kombinasyonundan kaynaklanır ve mahsulün miktarını ve kalitesini olumsuz yönde etkiler (Blumwald ve Grover, 2006; Gepstein vd., 2006).

1. BİTKİLERDE miRNA AİLESİ

Genetik çalışmaların artmasıyla bitkilerin stresleri tolere etme ve hayatta kalma yeteneğini yönetecek mekanizmalar keşfedilmiştir. Bu bağlamda, RNAi veya gen susturmanın temelini oluşturan düzenleyici mekanizmalar önem kazanmıştır (Pumplin ve Voinnet, 2013). Belirli mesajcı RNA'ları (mRNA'lar) transkripsiyon sonrası seviyelerde bloke eden (transkripsiyon sonrası gen susturma) veya transkripsiyonel

seviyede epigenetik değişiklikleri etkileyen (transkripsiyonel gen susturma) düzenleyici küçük RNA moleküllerinin keşfi, gen ifadesi düzenlemesinde yeni bir yolun kilidini açmıştır. İş gücü, boyutları, biyogenezleri, etki şekilleri, düzenleyici rolleri vb. temelinde birbirinden ayrılan birçok RNA molekülü türü tarafından temsil edilen küçük ribonükleotid dizilerinin geniş bir ailesini oluşturur (Axtell ve Bowman, 2008; Carthew ve Sontheimer, 2009). Küçük RNA'ların en bol bulunan sınıflarından biri, 21-24 nükleotid uzunluğunda endojen olarak transkribe edilen moleküller olan mikroRNA'ları (miRNA'lar) içerir ve bunlar, diziye bağlı bir şekilde ilgili hedef transkriptlerine bağlanarak gen ekspresyonunu düzenler (Carrington ve Ambros, 2003; Bartel, 2004; Eldem vd., 2013). miRNA'lar çimlenmeden çiçeklenmeye kadar bitki biyolojisinde çeşitli roller oynar.

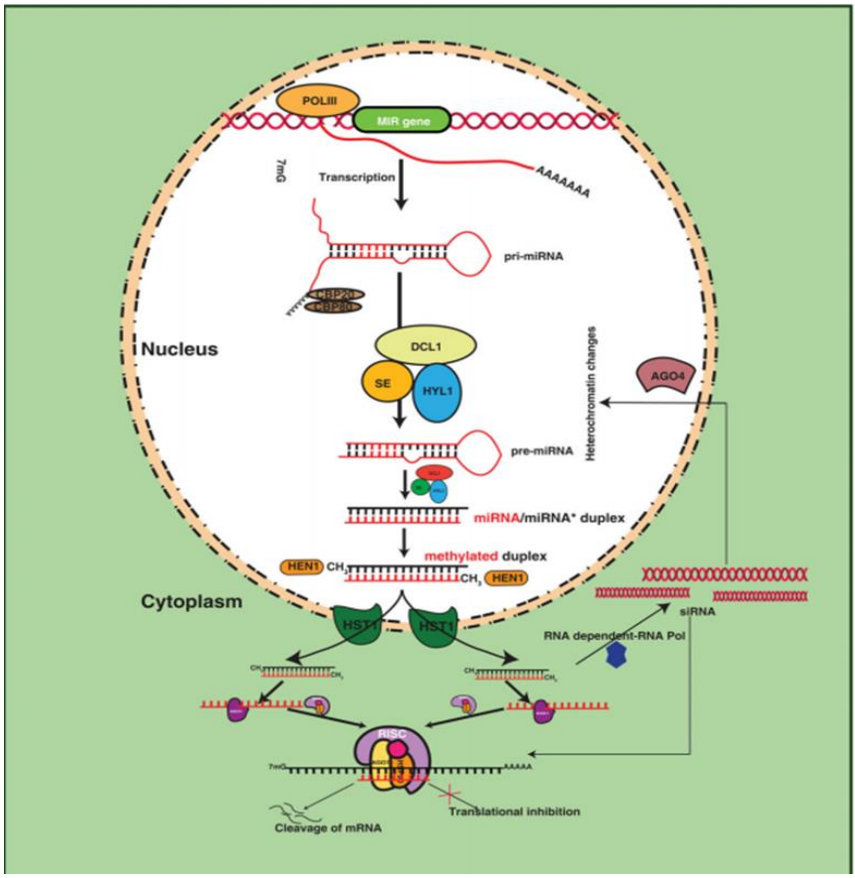
Keşfedilen ilk miRNA'lar *Caenorhabditis elegans'*taki lin-4 ve let-7'dir (Pasquinelli vd., 2000). Bitki miRNA ailelerinin (miRNA 156, miRNA 159, miRNA 164, miRNA 171 vb.) tanımlanması 2000 yılında başlamıştır (Llave vd., 2002; Reinhart vd., 2002). Doğrudan klonlama ve ardından dizileme ve hesaplamalı tahminleri içeren klasik deneysel yaklaşımlar, bitki miRNA 'larının klonlanmasındaki zorluklar nedeniyle çok başarılı olamamıştır. Bununla birlikte, moleküler teknolojilerin ve biyoinformatik yazılımların hızla ilerlemesiyle, giderek daha fazla miR tanımlanmış ve işlevsel olarak analiz edilmiştir. miRNA araştırmasının ilerlemesi, yeni nesil dizileme (NGS) tekniklerinin (derin dizileme olarak da adlandırılır) ve karmaşık hesaplama algoritmalarının geliştirilmesiyle hızlanmıştır

(Lai vd., 2003; Rajagopalan vd., 2006; Rosewick vd., 2013). Şu anda, 73 bitki türünden 8496 miRNA miR-Base'de (sürüm 21) listelenmiştir (Kozomara ve Griffiths-Jones, 2014).

Genel olarak miRNA genleri DNA bağımlı RNA polimeraz II tarafından büyük primer transkriptler (pri- miRNA) olarak transkribe edilir ve bunlar miRNA dublekslerinin sonunda işlendiği saç tokası ilmek benzeri bir yapıya sahip öncü moleküllere (pre- miRNA) işlenir (Şekil 1). Her miRNA, tıpkı diğer RNA polimeraz II kodlu genler gibi kendi promotörü, transkripsiyon bölgesi ve terminatöründen oluşan bağımsız bir transkripsiyon biriminden ortaya çıkar (Lee vd., 2004; Yang vd., 2009). Bitki miRNA genleri genom boyunca mevcuttur, ancak bitkilerdeki lokusların çoğu genellikle protein kodlamayan genomik bölgelerde bulunur (Jones-Rhoades vd., 2006). Az sayıda bitki miR'si intronik kökenlidir (Nozawa vd., 2010) ve nadiren ekzonik bölgelerde bulunur (Sunkar vd., 2005). miRNA genlerinin yukarı akış dizi analizi, protein kodlayan genlerin promotörlerinde bulunan TATA-box ve diğer motifler gibi karakteristik unsurları ortaya çıkarmıştır (Zhou vd., 2007).

miRNA 'ların, anahtar genlerin ve transkripsiyon faktörlerinin (Palatnik vd., 2003) ifadesini kontrol ederek meristem sınırlarının belirlenmesi, meristem bakımı ve başlatılması, yaprak morfogenezi, stoma gelişimi, ışık tepkileri, cinsiyet belirleme ve benzeri bitki gelişiminin çeşitli yönlerinde çok belirleyici roller oynadığı bulunmuştur. miR'ler gen ifadesini üç farklı mekanizma ile düzenleyebilir: (a) tamamlayıcı hedef mRNA'nın bölünmesi, (b) hedef

mRNA'nın translasyonunun baskılanması ve (c) hedef mRNA'nın transkripsiyonel susturulması. Bitki miR'leri genellikle hedef mRNA bölünmesi ve translasyonel baskılamanın bir kombinasyonu ile hedef ifadesini düzenler.



Şekil 1. Bitkilerde miRNA biyogenezi. miRNA genleri Pol II tarafından birincil miRNA 'lara (Pri- miRNA 'lar) transkribe edilir. Pol II'nin miRNA genlerine bağlanması Mediator kompleksi tarafından desteklenir. Pri- miRNA 'ların miRNA'lara işlenmesi DICER-LIKE 1 (DCL1) tarafından iki ardışık bölünme gerektirir ve pri- miRNA 'ların farklı kısımlarını tanıyan ve/veya işleme kompleksinin temel bileşenleriyle ilişkilendirilen RNA-bağlayıcı proteinler tarafından desteklenir. Üretimden sonra miRNA /miR* dupleksi HEN1 tarafından metillenir ve miRNA ipliği ARGONAUTE 1 (AGO1) içeren RNA-indüklenmiş susturma kompleksine (RISC) yüklenir (Mittal vd., 2013).

2. STRES YANITLARININ miRNA'LAR TARAFINDAN DÜZENLENMESİ

Bitkiler tuzluluk, kuraklık, sıcaklık dalgalanmaları gibi abiyotik streslerle mücadele etmek için moleküler programlamaya başvurur ve bu sırada birden fazla genin ifadesi aynı anda değiştirilir. Farklı çevresel streslere ve hastalıklara yanıt olarak gen ifadesinin ayarlanmasında miR'lerin güçlü bir rolü olduğu tespit edilmiştir (Sunkar ve Zhu, 2004; Pérez-Quintero vd., 2010). Toplam 1511 miR'nin farklı bitki türlerinde çeşitli abiyotik streslerle ilişkili olduğu bilinmektedir (Zhang vd.,2013). Ayrıca, miRNA'ların abiyotik ve biyotik stresleri yönetmede yakınsak bir işlevsel rolü olduğuna dair kanıtlar da vardır (Sanan-Mishra vd., 2009).miRNA 'lar, belirli hedef genlerin ifadesini seçici olarak düzenleyerek işlev görür (Sunkar vd., 2012). miRNA 'ların çoğu bitki türleri arasında korunmuş olduğundan, tüm bitkilerde benzer hedefleri düzenlemeleri muhtemeldir. Korunmuş miRNA 'ların hedefleri arasında MYB, NAC1 ve homeodomain-leucine zipper protein (HD-ZIP) gibi bitki gelişimi ve organ oluşumunda rol oynayan çeşitli TF'ler bulunmaktadır (Jones-Rhoades ve Bartel, 2004). Bu proteinlerin birçoğu bitkilerde strese duyarlı aktörler olarak rapor edilmiştir (Fang vd., 2006; Xu vd., 2008). Ayrıca miR'ler, tuz stresi tepkilerinde rol oynadığı bilinen NADP'ye bağlı malik enzim (NADP-ME) ve sitokrom oksidaz gibi bitkilerin çeşitli metabolik yollarında veya fizyolojik süreçlerinde yer alan proteinlerin transkriptlerini hedef alır (Yan vd., 2005; Cheng ve Long, 2007). Bunun en iyi örneği, tuz stresiyle düzenlenmiş enginar miRNA 'ları için iki varsayılan hedef, lakkaz gen ailesinin üyeleriyle homolog

olan Cca-miR397 ve Cca-miR399'dur. Lakkaz genlerinin ifade seviyesinin domates, mısır ve Arabidopsis köklerinde yüksek NaCl konsantrasyonları ile arttığı bildirilmiştir (Liang vd., 2006). Bu da miR'lerin stres altında hedef gen ifadesinin korunmasında önemli bir rol oynadığını göstermektedir.

Son yıllarda, tuz stresi altındaki bitki miRNA 'ları üzerine yapılan yoğun araştırmalar, karmaşık çok hedefli düzenlemeye sahip bir dizi düzensiz türün keşfedilmesine yol açmıştır. Bugüne *kadar Arabidopsis, Glycine max, Glycine soja, Gossypium hirsutum, Medicago truncatula, Nicotiana tabacum, Oryza sativa, Panicum virgatum, Phaseolus vulgaris, Populus euphratica, Saccharum officinarum, Triticum aestivum* ve *Zea mays* gibi farklı bitki türlerinde tuzluluk stresinde 217 miRNA rapor edilmiştir. Keşfedilen miRNA'lar sonrasında biyoteknolojik yöntemler kullanılarak pek çok iyileştirme ve geliştirme çalışmaları yapılmıştır. miRNA'ların işlevlerinin tanımlanması ve düzenlenmesi için gen düzenleme teknolojileri günümüzde oldukça fazla kullanılmaya başlanmıştır. Bu teknolojilerden CRISPR/Cas9, ZFN ve TALEN' e göre en çok kullanılan teknik olmuştur. CRISPR/Cas9 teknolojisinde hedefin spesifikliği protein/DNA algısına değil ribonükleotid kompleks organizasyonuna bağlı olduğundan, CISPR/Cas9, nakavt bölgelerini kolayca bulabildiği ve aynı zamanda birden fazla geni etkisiz hale getirebildiği için TALEN'lere ve ZFN'lere göre çeşitli avantajlara sahiptir. Zhao vd. (2017) CRISPR-Cas9 tabanlı bir yaklaşım kullanarak MIR169a ve MIR827a'yı miRNA bölgesinin her iki ucunu

da hedefleyen sgRNA'lar tasarlayarak Arabidopsis'te tuz stresine toleranslı %20 verimle kararlı mutant bitkiler elde etmiştir. Benzer şekilde, soya fasulyesinde miR1509 ve miR1514 knockout mutantları oluşturulurken, olgun miRNA dizisi dışında prekürsör dizisinde çok sayıda ekleme/silme olayı gözlemlemişler ve soya fasulyesinde miR1514 mutant bitkilerinde de hedef dışı mutasyonlar olduğunu belirlemişlerdir (Jacobs vd., 2015). miR159, miR164, miR166, miR169, miR393 ve miR397 gibi miRNA'ların birçoğunun tuz stresine yanıt olarak çeşitli kültür bitkilerinde farklı şekilde ifade edildiği bulunmuştur (Gao vd., 2011). İlginç bir şekilde, bu miRNA'ların diğer biyotik veya abiyotik streslere yanıt olarak da diferansiyel ekspresyon gösterdiği belirlenmiştir. Bu tür miRNA'ların CRISPR-Cas9 tabanlı gen düzenlemesi, moleküler rollerini anlamaya ve böylece daha dayanıklı bitkileri üretmeye olanak sağlayacaktır.

SONUÇ

miRNA'ların bitki gelişiminde ve abiyotik stres tepkilerinde farklı düzenleyici mekanizmalar geliştirdiği belirlenmiştir. Yeni miRNA'lar ve bunların hedeflerini düzenleyen mekanizmaların tanımlanması, gen ifadesi düzenleyici yöntemlere daha fazla karmaşıklık katmıştır. Bu nedenle, miRNA-hedef etkileşimlerinin neredeyse eksiksiz tanımlanması, miRNA'ların çeşitliliğini ve rolünü anlamak için temel öneme sahip olacaktır. Strese duyarlı miRNA'ların ve bunların hedef gen ifadelerinin tek tek hücre tiplerinde incelenmesi, stres sırasında hücreye veya dokuya özgü bir şekilde çalışan miRNA hedef ağları hakkında daha fazla bilgi sağlayacaktır. Stres sırasında miRNA'ların

rollerine ilişkin anlayışımız derinleştikçe, bitki stres toleransını artırmak için miRNA aracılı gen düzenlemesini kullanma olanakları muazzam hale gelecektir.

KAYNAKÇA

Amirjani M.R. (2010) Effect of NaCl on some physiological parameters of rice. *European Journal of Biological Sciences*, 3, 6–16.

Axtell, M. J., & Bowman, J. L. (2008). Evolution of plant microRNAs and their targets. *Trends in plant science*, *13*(7), 343-349.

Bari, R., Datt Pant, B., Stitt, M., & Scheible, W. R. (2006). PHO2, microRNA399, and PHR1 define a phosphate-signaling pathway in plants. *Plant physiology*, *141*(3), 988-999.

Bartel, D. P. (2004). MicroRNAs: genomics, biogenesis, mechanism, and function. *cell*, *116*(2), 281-297.

Blumwald, E., & Grover, A. (2006). Salt tolerance. *Plant Biotechnology: Current and Future Applications of Genetically Modified Crops*, 206-224.

Carrington, J. C., & Ambros, V. (2003). Role of microRNAs in plant and animal development. *Science*, *301*(5631), 336-338.

Carthew, R. W., & Sontheimer, E. J. (2009). Origins and mechanisms of miRNAs and siRNAs. *Cell*, *136*(4), 642-655.

Chaves, M. M., Flexas, J., & Pinheiro, C. (2009). Photosynthesis under drought and salt stress: regulation mechanisms from whole plant to cell. *Annals of botany*, *103*(4), 551-560.

Cheng, Y., & Long, M. (2007). A cytosolic NADP-malic enzyme gene from rice (*Oryza sativa* L.) confers salt tolerance in transgenic Arabidopsis. *Biotechnology Letters*, *29*, 1129-1134.

Eldem, V., Okay, S., & Ünver, T. (2013). Plant microRNAs: new players in functional genomics. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, *37*(1), 1-21.

Fang, Q., Xu, Z., & Song, R. (2006). Cloning, characterization and genetic engineering of FLC homolog in *Thellungiella halophila*. *Biochemical and Biophysical Research Communications*, *347*(3), 707-714.

Gao, P., Bai, X., Yang, L., Lv, D., Pan, X., Li, Y., ... & Zhu, Y. (2011). osa-MIR393: a salinity-and alkaline stress-related microRNA gene. *Molecular biology reports*, *38*, 237-242.

Gepstein, S., Grover, A., & Blumwald, E. (2005). Producing biopharmaceuticals in the desert: building an abiotic stress tolerance in plants for salt, heat, and drought. *Modern biopharmaceuticals: design, development and optimization*, 967-994.

Hasanuzzaman, M., Nahar, K., & Fujita, M. (2013). Plant response to salt stress and role of exogenous protectants to mitigate salt-induced damages. *Ecophysiology and responses of plants under salt stress*, 25-87.

Jacobs, T. B., LaFayette, P. R., Schmitz, R. J., & Parrott, W. A. (2015). Targeted genome modifications in soybean with CRISPR/Cas9. *BMC biotechnology*, *15*, 1-10.

Jones-Rhoades, M. W., & Bartel, D. P. (2004). Computational identification of plant microRNAs and their targets, including a stress-induced miRNA. *Molecular cell*, *14*(6), 787-799.

Jones-Rhoades, M. W., Bartel, D. P., & Bartel, B. (2006). MicroRNAs and their regulatory roles in plants. *Annu. Rev. Plant Biol.*, *57*, 19-53.

Kozomara, A., & Griffiths-Jones, S. (2014). miRBase: annotating high confidence microRNAs using deep sequencing data. *Nucleic acids research*, *42*(D1), D68-D73.

Lai, E. C., Tomancak, P., Williams, R. W., & Rubin, G. M. (2003). Computational identification of DrosophilamicroRNA genes. *Genome biology*, *4*(7), 1-20.

Lee, Y. S., Park, S. R., Park, H. J., & Kwon, Y. W. (2004). Salt stress magnitude can be quantified by integrating salinity with respect to stress duration. In *Proc 4th Intl Crop Sci Congress* (Vol. 653).

Liang, M., Haroldsen, V., Cai, X., & Wu, Y. (2006). Expression of a putative laccase gene, ZmLAC1, in maize primary roots under stress. *Plant, cell & environment*, *29*(5), 746-753.

Llave, C., Xie, Z., Kasschau, K. D., & Carrington, J. C. (2002). Cleavage of Scarecrow-like mRNA targets directed by a class of Arabidopsis miRNA. *Science*, *297*(5589), 2053-2056.

Mittal, D., Mukherjee, S. K., Vasudevan, M., & Mishra, N. S. (2013). Identification of tissue-preferential expression patterns of rice miRNAs. *Journal of Cellular Biochemistry*, *114*(9), 2071-2081.

Nozawa, M., Miura, S., & Nei, M. (2010). Origins and evolution of microRNA genes in Drosophila species. *Genome biology and evolution*, *2*, 180-189.

Palatnik, J. F., Allen, E., Wu, X., Schommer, C., Schwab, R., Carrington, J. C., & Weigel, D. (2003). Control of leaf morphogenesis by microRNAs. *Nature*, *425*(6955), 257-263.

Pasquinelli, A. E., Reinhart, B. J., Slack, F., Martindale, M. Q., Kuroda, M. I., Maller, B., ... & Ruvkun, G. (2000). Conservation of the sequence and temporal expression of let-7 heterochronic regulatory RNA. *Nature*, *408*(6808), 86-89.

Pérez-Quintero, Á. L., Neme, R., Zapata, A., & López, C. (2010). Plant microRNAs and their role in defense against viruses: a bioinformatics approach. *BMC plant biology*, *10*(1), 1-12.

Pumplin, N., & Voinnet, O. (2013). RNA silencing suppression by plant pathogens: defence, counter-defence and counter-counter-defence. *Nature Reviews Microbiology*, *11*(11), 745-760.

Rajagopalan, R., Vaucheret, H., Trejo, J., & Bartel, D. P. (2006). A diverse and evolutionarily fluid set of microRNAs in Arabidopsis thaliana. *Genes & development*, *20*(24), 3407-3425.

Reinhart, B. J., Weinstein, E. G., Rhoades, M. W., Bartel, B., & Bartel, D. P. (2002). MicroRNAs in plants. *Genes & development*, *16*(13), 1616-1626.

Rosewick, N., Momont, M., Durkin, K., Takeda, H., Caiment, F., Cleuter, Y., ... & Van den Broeke, A. (2013). Deep sequencing reveals abundant noncanonical retroviral microRNAs in B-cell leukemia/lymphoma. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *110*(6), 2306-2311.

Sanan-Mishra, N., Kumar, V., Sopory, S. K., & Mukherjee, S. K. (2009). Cloning and validation of novel miRNA from basmati rice indicates cross talk between abiotic and biotic stresses. *Molecular Genetics and Genomics*, *282*, 463-474.

Sunkar, R., & Zhu, J. K. (2004). Novel and stress-regulated microRNAs and other small RNAs from Arabidopsis. *The Plant Cell*, *16*(8), 2001-2019.

Sunkar, R., Girke, T., Jain, P. K., & Zhu, J. K. (2005). Cloning and characterization of microRNAs from rice. *The Plant Cell*, *17*(5), 1397-1411.

Sunkar, R., Li, Y. F., & Jagadeeswaran, G. (2012). Functions of microRNAs in plant stress responses. *Trends in plant science*, *17*(4), 196-203.

Uçar., Ö & Soysal, S. (2021) Effect, Tolerance Mechanisms and Management of Salt Stress in Grain Legumes. M. Erman (Ed) Grain Legumes Under Abiotic Stress: Yield, Quality, Enhancement and Acclimatization (pp. 163-188). IKSAD, Türkiye.

Yan, S., Tang, Z., Su, W., & Sun, W. (2005). Proteomic analysis of salt stress-responsive proteins in rice root. *Proteomics*, *5*(1), 235-244.

Yang, X. C., Sullivan, K. D., Marzluff, W. F., & Dominski, Z. (2009). Studies of the 5′ exonuclease and endonuclease activities of CPSF-73 in histone pre-mRNA processing. *Molecular and cellular biology*, *29*(1), 31-42.

Zhang, S., Yue, Y., Sheng, L., Wu, Y., Fan, G., Li, A., ... & Wei, C. (2013). PASmiR: a literature-curated database for miRNA molecular regulation in plant response to abiotic stress. *BMC Plant Biology*, *13*(1), 1-8.

Zhou, J., Deng, K., Cheng, Y., Zhong, Z., Tian, L., Tang, X., ... & Zhang, Y. (2017). CRISPR-Cas9 based genome editing reveals new insights into microRNA function and regulation in rice. *Frontiers in Plant Science*, *8*, 1598.

Zhou, X., Ruan, J., Wang, G., & Zhang, W. (2007). Characterization and identification of microRNA core promoters in four model species. *PLoS computational biology*, *3*(3), e37.

BÖLÜM 5

TIBBİ VE AROMATİK BİTKİLERİN İNSEKTİSİT ETKİSİ

Dr. Öğr. Üyesi Abdurrahman Sami KOCA[1*]

Doç. Dr. Abdurrahim YILMAZ[2]

Prof. Dr. Gülay KAÇAR[3]

DOI: https://dx.doi.org/10.5281/zenodo.10031378

[1*] Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Bitki Koruma Bölümü, Bolu, Türkiye. a.samikoca@yahoo.com.tr
[2] Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Tarla Bitkileri Bölümü, Bolu, Türkiye. abdurrahimyilmaz@ibu.edu.tr
[3] Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Bitki Koruma Bölümü, Bolu, Türkiye. gulaysahan@yahoo.com

GİRİŞ

Modern tarım, dünya nüfusunun hızla artmasından kaynaklanan birçok çevresel zorluk karşısında köklü değişimlerle şekillenmektedir (Yilmaz ve ark., 2023). Tarım sisteminin geleceği, yeni beslenme trendleri ve zararlı çevresel etkileri azaltacak çözümler ile önemli değişikliklere olan talebi karşılayacaktır. Bu nedenle, gıda güvenliği ve çevrenin korunmasında doğal ürünlerin araştırılmasına giderek daha fazla önem verilmektedir (Catani ve ark., 2022). İnsanların doğal kaynaklara olan ilgisinin her geçen gün artmasıyla birlikte tıbbi ve aromatik bitkilere olan yönelim de artmaktadır (Yılmaz ve ark, 2021). Tıbbi ve aromatik bitkiler; hastalıkları önlemek, tedavi etmek ve sağlığı korumak amacıyla ilaçlarda, kozmetik alanında, vücut bakımında, tütsü olarak veya beslenmede doğal yan ürünler olarak kullanılmaktadır (Yilmaz ve ark., 2022). Gelişmekte olan ülkelerde tıbbi ve aromatik bitkiler yalnızca geleneksel ve alternatif tıpta kullanılmaktadır (Aftab, 2019). Uygun şekilde işlenmiş olan tıbbi bitkiler; kalite, saflık ve kimlik açısından değerlerini artırmaktadır. Bitkisel ürün girişimcileri için yeni bir cazibe haline dönüşen katma değerli tıbbi bitkilerin üretilmesine yardımcı olmak ve bunun sonucunda toplum için çeşitli kaliteli ürün kategorilerinin ortaya çıkmasına ve sürece dahil olanlara ekonomik fayda sağlanmasına yardımcı olmak amacıyla tıbbi ve aromatik bitkilerin yardımcı madde türleri ve işleme parametrelerinin daha iyi tanımlanması gerekmektedir (Rao ve ark., 2022).

Tıbbi ve aromatik bitkiler, bitkisel ürün girişimcileri için yeni bir cazibe merkezi haline gelmiş ve üretim amaçları sınırlı olan çeşitli ürünlerin

ortaya çıkmasına neden olmuştur (Rao ve ark., 2022). Günümüzde tıbbi ve aromatik bitki ekstraktları modern tüketicinin doğal, güvenli ve yüksek kaliteli ürünlere yönelik taleplerini karşılamayı amaçlamaktadır (Giannenas ve ark., 2020). Bitki ekstraktları, çözünmemiş bitki materyallerinden ekstraksiyon solventleri kullanılarak ayrılan ürünleri ifade etmektedir (Monagas ve ark., 2022). Üretim maliyetlerinin düşük olması ve uygulama kolaylığı nedeniyle bitki ekstraktları pek çok kullanım alanı ile günümüzde yaygın olarak değerlendirilmektedir (Ong ve ark., 2021). Uçucu yağlar, tek bir bitki türünün yaprakları, tohumları, meyveleri, tomurcukları, kökleri, rizomları, kabukları ve çiçekleri gibi farklı bitki materyallerinden elde edilen güçlü kokulara sahip aromatik ve uçucu sıvılardır (Yilmaz, 2022). Neredeyse 3000'den fazla bitki türünden izole edilmiş ve tanımlanmış olan uçucu yağların yüzlercesi ticari üretim için kullanılmaktadır (Cadena ve ark., 2018). Uçucu yağlar gıda aroması, takviye ürünleri, insan sağlığı, kozmetik sanayi ve parfümeride bileşik oluşturma gibi birçok şekilde kullanıldığı için hayatımızın vazgeçilmezi haline gelmiştir. Farmasötik özelliklerinden dolayı çeşitli geleneksel şifa sistemlerinde kullanılmakta olan uçucu yağların, olumsuz yan etkileri olan sentetik ürünlerin yerine uygun bir alternatif olduğu bildirilmiştir (Al-Khayri ve ark., 2023).

Bitkiler, insanlar ve hayvanlar gibi zararlı organizmalara karşı kendilerini korumak için çeşitli savunma mekanizmaları geliştirmişlerdir. Bu savunma mekanizmaları, bitkilerin morfolojik özelliklerinden kaynaklanabileceği gibi, ürettikleri çeşitli kimyasal

bileşiklerden de oluşabilmektedir. Bitkilerin biyokimyasal süreçlerinin bir sonucu olarak ürettikleri sekonder metabolitler, zararlılara karşı direnç göstermede önemli bir roller oynamaktadır (Güncan ve Durmuşoğlu, 2004; Zoubiri ve Baaliouamer, 2011). Bu sekonder metabolitler, tarım alanlarında çeşitli şekillerde kullanılmaktadır. Bitkiler, doğal insektisitlerin kaynağı olarak büyük öneme sahiptir ve sentetik insektisitlerin insanlar, hayvanlar ve çevre üzerindeki olumsuz etkilerini azaltmanın yolu, bitki kaynaklı insektisitlerin araştırılmasından geçmektedir. Birçok araştırmacı, bitkilerin insektisit geliştirmek için önemli bir potansiyel kaynak olduğunu vurgulamıştır (Villani and Gould, 1985; Erler, 2004; Zibaee ve Bandani, 2009; Soummane ve ark., 2011).

Günümüzde, tarımsal alanlarda hastalık, zararlı ve yabancı otlar sebebiyle meydana gelen ürün kayıplarını en aza indirebilmek amacıyla birçok mücadele yöntemi geliştirilmiştir. Bu mücadele yöntemleri arasında ise kimyasal mücadele ön plana çıkmaktadır. Pestisitler gelişmekte olan dünyada yaygın olarak kullanılmakta ve yüksek tarımsal verimi ön planda tutan mevcut bitkisel üretim sistemi nedeniyle pestisitlere olan talep artmaktadır (Sarkar ve ark., 2021). Kimyasal mücadelenin diğer mücadele yöntemlerine oranla daha fazla tercih edilmesinin nedenleri; etkisinin kısa sürede görülmesi, hızlı bir şekilde sonuca ulaşılması ve uygulanmasının kolay olmasıdır (Tavares ve ark., 2021). Ancak kimyasal mücadelenin uygulanmasında görülen kolaylıkların yanı sıra hedef olmayan organizmalar üzerinde birçok olumsuz etkisi bulunmaktadır. Zararlıların mücadelesinde bilinçsiz ve

fazla kimyasal kullanımı sonucu potansiyel zararlı türlerin ana zararlı konumuna geçmesi, doğal düşmanları yok etmesi, hedef organizmalarda dayanıklılık problemi, çevre ve insan sağlığı üzerinde olumsuz etkilerinin olmasının yanı sıra süreklilik sağlanamaması gibi birçok probleme yol açmaktadır (Hua ve ark., 2012; Bolzonella ve ark., 2019; Braak ve ark., 2019; Syromyatnikov ve ark., 2020; Thompson ve ark., 2020; Malhotra ve ark., 2021; Parven ve ark., 2021). Bu gibi problemler nedeniyle zararlılar ile mücadele için alternatif mücadele yöntemlerine ihtiyaç duyulmakta olup zararlı popülasyonlarını ekonomik zarar seviyesinin altında tutabilmek amacıyla uygun, daha güvenli pestisitlere yönelik arayışlar her geçen gün artmaktadır. Bu sebeple biyolojik kökene dayalı zararlı mücadele yöntemlerinin araştırılması ve biyopestisitlerin geliştirilmesi giderek daha fazla önem kazanmaktadır (Saha ve Basak, 2020). Son yıllarda, bazı bitki ekstraktlarının sentetik insektisitlere alternatif olarak kullanılabilirliğini değerlendirmek amacıyla yapılan araştırmalar dikkat çekici sonuçlar vermektedir (Tavares ve ark., 2021).

Bitki ekstraktlarından elde edilen ürünlerin, zararlıların mücadelesinde kullanımı giderek artmaktadır. Bu bitkilerin zaten doğada bulunuyor olmaları, kısa sürede dekompoze olarak su ve toprak kirliliklerine neden olmamaları, tarımsal ürünlerde insan sağlığını olumsuz yönde etkileyecek uzun süreli kalıntılar meydana getirmemeleri, birçok hayvan ve canlı grubunun bunların yan etkilerinden kendilerini koruyacak mekanizmalar geliştirme fırsatını sağlamaktadır (Elma, 2012). Diğer taraftan tıbbi ve aromatik bitki ürün kalıntılarının

antioksidan ve farmakolojik aktiviteleri üzerine yapılan çalışmalarla karşılaştırıldığında, geri kazanılan biyoaktif bileşiklerin biyopestisit aktivitelerine ilişkin çok az bilgi mevcuttur. Çeşitli çalışmalar, uçucu yağ damıtma endüstrisinin hem katı kalıntılarının hem de sıvı atıklarının (hidrosollerin) pestisit aktivitelerine sahip olduğunu ortaya çıkarmaktadır (Saha ve Basak, 2020). Genel pestisit pazarının %5'ine sahip olan uçucu yağ ve bitki ekstraktı bazlı biyopestisit kullanımının son yıllarda hızlı bir büyüme yaşadığı ve yıllık ortalama %9-20 büyüme oranıyla kimyasal pestisitleri geride bırakacağı tahmin edilmektedir (Kumar ve ark, 2021; Rakshit ve ark., 2021; Lahlali ve ark., 2022).

BİTKİ EKSTRAKTLARININ ZARARLILARA KARŞI ETKİ MEKANİZMALARI VE BİYOLOJİK ETKİNLİĞİ

Tarımda insektisitlerin yaygın kullanımının eko-toksikolojik, çevresel ve sosyal sonuçları, araştırmacıları sentetik kimyasallardan daha çevre dostu olan uygulanabilir alternatiflere yönlendirmiştir. Bu bağlamda bitkisel ekstraktlara dayalı insektisitlerin kullanımı hem araştırmacıların hem de tüketicilerin ilgisini çekmektedir. İnsektisit olarak kullanılan bitki ekstraktları arasında uçucu yağlar, dünya çapında bulunabilirliği ve göreceli maliyet etkinliği nedeniyle umut verici bir alternatif olarak görülmektedir (Compolo ve ark., 2018). Uçucu yağlar üreten aromatik bitkiler sınırlı sayıda familyaya ait olup bu familyalar Lauraceae, Lamiaceae, Asteraceae, Cupressaceae, Myrtaceae, Rutaceae, Piperaceae ve Poaceae'dir (Abo ve ark., 2022; Sing ve Saini, 2022). Bitkiler tarafından hem dahili olarak (bitkilerin bünyesindeki salgı bezleri) hem de harici olarak (bitki yüzeyinde bulunan salgı

bezleri) sentezlenen uçucu yağlar; çiçekler, otlar, tomurcuklar, yapraklar, meyveler, ince dallar, ağaç kabuğu, tohumlar, odun, rizomlar ve kökler gibi farklı bitki organları tarafından üretilmekte ve belirli histolojik yapılarda (bezler, salgı boşlukları ve reçine kanalları) birikebilmektedir (El Asbahani ve ark., 2015; Compolo ve ark., 2018). Uçucu yağlar hidrofobik ve genellikle lipofiliktir, yoğunlukları genellikle suyun yoğunluğundan daha düşüktür ve organik çözücülerde çözünebilmektedir (Compolo ve ark., 2018). Uçucu yağlar genellikle terpenoidlerin karışımları olmakla birlikte bunların biyoaktiviteleri, bileşenler arasındaki sinerjinin sonucu oluşabilmektedir (Isman ve ark., 2017).

Uçucu yağlar ve bitki ekstraktları kullanılarak zararlıların mücadelesine odaklanan son yıllardaki araştırmalar, bunların hedef organizmalar üzerindeki insektisidial etkilerinde yer alan çeşitli mekanizmaları ortaya çıkarmaktadır (Ni ve ark., 2021). Bitki ekstraktları ve uçucu yağlar, kimyasal bileşenlerin farklı şekillerde etkileşime girmesinin sonucu olarak farklı etki mekanizmaları göstermekte olup zararlılarda temas toksisitesine, mide zehirlemesine ve sistemik aktivitelere yol açabilmektedir (Upadhyay, 2016). Uçucu yağlar böceklerin sinir sistemini etkilemektedir. Sinir sistemi, vücudun kontrol merkezi olmakla birlikte sinirlerin aktivitesini davranışa dönüştüren bir işlev görmektedir. Sinir hücreleri; koku, tat, dokunma, işitme ve ışık gibi dış uyaranlara yanıt verirken aynı zamanda hormonlar, vücut sıcaklığı ve uzuv pozisyonu sensörleri gibi içsel kaynaklardan gelen sinyallere de tepki vermekte ve bu şekilde böcek davranışını düzenleyen bir kontrol

koordinasyonu oluşturmaktadır (Salgado, 2013). Böylelikle uçucu yağların zararlılara karşı beslenmeyi engelleyici (antifeedant), uzaklaştırıcı (repellent), gelişme ve çoğalmayı engelleyici ve toksik etkiler gösterdiği bildirilmiştir (Topuz ve Madanlar, 2006).

Böceklerde bulunan asetilkolin ve octopamine gibi bileşiklerin çeşitli biyolojik rolleri bulunmakta olup bu bileşikler nörotransmitter olarak işlev görmektedirler. Bu bileşikler herhangi bir nedenle kesintiye uğrarsa, böceklerin sinir sistemi zarar görebilmektedir (Chand ve ark., 2017). Düşük moleküler ağırlıklı terpenoidler, laboratuvar biyoanalizlerinde asetilkolinesteraz (AChE) enzim aktivitesini inhibe edebilmektedir. Ancak bu tür biyoaktivitenin, hedef böcek türlerinde in vivo toksisite ile nadiren ilişkili olduğu görülmektedir (Tak ve ark., 2017). Asetilkolin (ACh), farklı sinir hücrelerinden ve istemsiz kaslardan sinir uyarılarının iletilmesinden sorumlu olan ana bileşenlerden biridir. Asetilkolin, asetilkolinesteraz enzimi tarafından kolin ve asetata dönüştürülmektedir. AChE aktivitesinin inhibisyonu, sinaptik boşluklarda nörotransmitter olan asetilkolinin birikmesini oluşturmakta, bu da sürekli uyarı durumuna yol açmakta ve sinir kas sisteminde koordinasyon eksikliği sonucunda böceğin ölümüne neden olmaktadır (Siegfried ve Scott, 1992; López ve Pascual-Villalobos, 2010; Dambolena vd., 2016). *Sitophilus oryzae* L. (Coleoptera: Curculionidae), *Rhyzopertha dominica* Fabricius (Coleoptera: Bostrichidae) ve *Cryptolestes pusillus* Schönherr (Coleoptera: Cucujidae) gibi depolanmış ürün zararlılarında AChE inhibisyonunun, linalool, kamfor, γ-terpinen, geraniol, S-karvon, E-anetol, fenchon ve

estragol gibi monoterponoidlerin bir etki biçimi olduğu bildirilmiştir (López ve Pascual-Villalobos, 2010). *Alphitobius diapering* Panzer (Coleoptera: Tenebrionidae)'in *Illicium verum*'un uçucu yağına maruz kalmasının ardından AChE aktivitesinde bir azalma gözlenmiş ve bu durum böcekte sığınma arama kapasitesi kaybı ve lokomotor kapasitesi kaybıyla ilişkilendirilmiştir (Peter ve ark., 2022). *Tribolium castaneum* Herbs. (Coleoptera: Tenebrionidae)'da AChE, glutatyon S-transferaz (GST) ve katalazın (CAT) katalitik aktivitesinin inhibisyonu, *Piper nigrum* ve *Rosmarinus officinalis*'ten elde edilen uçucu yağlar için rapor edilmiştir. *Citrus sinensis*, *Piper aduncum* ve *Zanthoxylum monophyllum*'un GST aktivitesini ve *Lavandula angustifolia*, *Citrus sempervirens* ve *Eucalyptus* spp.'nin de CAT aktivitesini inhibe ettiği tespit edilmiştir (Oviedo-Sarmiento ve ark., 2021). Octopamine reseptörleri de bu terpenoidlerin bazıları için hedef olarak tanımlanmıştır (Enan, 2001; Kostyukovsky ve ark., 2002; Price ve Berry, 2006). Octopamine reseptörleri, arthropodların sinir sisteminde bulunmaktadır ve octopaminin sinir-kas etkileşimini modüle ettiği veya nöromusküler iletimde rol oynadığı bildirilmiştir (Candy, 1978; Enan, 2001).

Uçucu yağların toksik etkilerine bakıldığında, bu yağların böceklerde fizyolojik açıdan önemli proteinleri ve enzimleri aktive edebildiği ortaya konulmuştur. *Mentha arvensis*'in uçucu yağı, *Sitophilus granarius* L. (Coleoptera: Curculionidae) erginlerinde yüksek temas toksisitesine neden olmuş ve maruz kalan böceklerde kantitatif proteomik analizle ortaya çıkan belirgin fizyolojik değişikliklere yol

açtığı belirlenmiştir. Diferansiyel olarak eksprese edilen proteinlerin (DEP'ler) çoğu aktive edilmiş ve kas ve sinir sistemlerinin gelişimi ve işleyişi, hücresel solunum, protein sentezi ve detoksifikasyon ile ilişkilendirilmiştir (Renoz ve ark., 2022). Yine *Mentha longifolia*'nın uçucu yağlarının *Aphis craccivora* Koch. (Hemiptera: Aphididae) üzerinde toksik etkiye sahip olduğu ve uçucu yağın 8 µl ml^{-1} konsantrasyonunda repellent etkisinin %84.37 ve yaprakbitleri bireylerinde meydana getirdiği ölüm oranının ise %80.66 olduğu bildirilmiştir (Saıfı ve ark., 2023). Benzer şekilde Gül yaprakbiti *Macrosiphum rosae* L. (Hemiptera: Aphididae)'ye karşı aloe vera (*Aloe barbadensis*), çay ağacı (*Melaleuca alternifolia*), okaliptus (*Eucalyptus globulus*), sarımsak (*Allium sativum*) yağlarının %1'lik dozlarında 96 saat sonra yaprakbitleri üzerindeki ölüm oranlarının sırasıyla aloe verada %80.8, çay ağacında ve okaliptüste %78.72, sarımsakta %74.46 oranında olduğu tespit edilmiş ve bu yağların *M. rosae*'nin mücadelesinde etkili olabileceği bildirilmiştir (Budak ve ark., 2022). Ayrıca insektisitlere dirençli böceklerde uçucu yağlar, detoksifikasyon enzimlerini inhibe ederek insektisit toksisitesini sinerji haline getirebilmektedir. Deltametrin ve bireysel uçucu yağların veya bunların ana bileşenlerinin deltametrine dirençli ve duyarlı tahtakuruları, *Cimex lectularius* L. (Hemiptera: Cimicidae) üzerindeki ikili karışımları ile yapılan topikal biyolojik analizler sonucunda dirençli tahtakurularındaki uçucu bileşenler tarafından P450 aktivitesinin inhibisyonu yoluyla ölüm oranlarında önemli bir artışa neden olmuştur (Gaire ve ark., 2021).

Uçucu yağların ve bitki ekstraktlarının aktif bileşiklerinin tanımlanması ve bunların etki tarzlarını incelenmesi, etkili biyopestisit ürünleri geliştirmek için oldukça önemlidir. Son zamanlarda bitki ekstraktlarının ve uçucu yağların biyokimyasal etkileri detaylı olarak araştırılmaktadır. Bir çalışmada *Thymus proximus* uçucu yağının %85.9'unun karvakrol, p-cymene ve γ-terpinen içerdiği ve bu ana bileşenlerin hem bitki baskılayıcı etkisinin hem de insektisit aktivitesinin olduğu tespit edilmiştir (Zhou ve ark., 2021). Diğer bir çalışmada, üç aromatik bitkiden (*Monodora myristica, Xylopia aethiopica* ve *Aframomum citratum*) elde edilen uçucu yağların insektisidal potansiyeli değerlendirilmiş, çalışma sonucunda *M. myristica* ve *X. aethiopica* uçucu yağlarının *Musca domestica* L. (Diptera: Muscidae) erginlerine karşı hem erkeklerde (22.1 µg ergin^{-1}) hem de dişilerde (LD_{50}: 29.1 µg ergin^{-1}) etkili olduğu belirlenmiştir. *Monodora myristica* uçucu yağı ve içeriğindeki geraniolün sırasıyla 29.3 ve 25.3 µg larva^{-1} LD_{50} değerleriyle *Spodoptera littoralis* Boisd. (Lepidoptera: Noctuidae) üzerinde en yüksek toksisite gösterdiği bildirilmiştir. Ayrıca *M. myristica* ve *X. aethiopica*'dan elde edilen uçucu yağların bileşenleri olan p-cymene ve α-phellandrene, *Culex quinquefasciatus* Say. (Diptera: Culicidae) larvalarına karşı en fazla toksik özellikte olan bileşenler olarak belirlenmiştir (Wandjou ve ark., 2022). Fesleğen (*Ocimum basilicum*) uçucu yağının antioksidan, antimikrobiyal ve insektisit aktivitesinin in vitro ve in situ olarak rapor edildiği bir diğer çalışmada, uçucu yağ ana bileşenlerinin metil chavicol (%88.6), 1,8-sineol (%4.2) ve a-trans-bergamoten (%1.7) olduğu tespit edilmiştir. Uçucu yağın *Pyrrhocoris apterus* L. (Hemiptera: Pyrrhocoridae)'a

karşı %100 konsantrasyonda gözlenen en yüksek insektisit aktivite, zararlıların %80'inin ölümüne neden olmuştur. Çalışma sonucunda geniş faaliyet yelpazesi nedeniyle fesleğen uçucu yağının meyve ve sebzelerin korunması için ideal bir aday olduğu bildirilmiştir (Kačániová ve ark., 2022). Aralarında *Piper aduncum, P. marjinatum, P. gaudichaudianum, P. crassinervium* ve *P. arboreum*'un da bulunduğu beş biber türünden elde edilen uçucu yağların ana bileşenleri tanımlanmış ve bunlar arasında β-asarone, (E)-anethole, (E)- β-caryophyllene, g-terpinene, p-cymene, limonene, α-pinene ve β-pinene yer almıştır. Bu bileşenlerden oluşan uçucu yağın 100 µg ml^{-1} tarama konsantrasyonunda %90'a varan ölüm oranıyla larvisid aktivite gösterdiği tespit edilmiştir. Bu sonuç çalışmada kullanılan uçucu yağları *Aedes aegypti* L. (Diptera: Culicidade) larvalarının kontrolü için potansiyel alternatifler haline getirmiştir (Pereira Filho ve ark., 2021). Başka bir araştırmada Tütün beyazsineği, *Bemisia tabaci* Genn. (Hemiptera: Aleyrodidae) Q biyotipinin çeşitli bitkilerden elde edilen uçucu yağlara karşı potansiyel uzaklaştırıcı veya cezbedici etkisini değerlendirmek için Y tipi olfaktometre testlerinde ergin beyazsineğin davranışsal tepkileri gözlemlenmiştir. Çalışma sonuçlarına göre *Thymus pulegioides* uçucu yağının yanı sıra test edilen dört ana alt bileşenden üçünün (thymol %36.18, p-cymene %10.85 ve thymol metil eter %7.45) *B. tabaci*'nin Q biyotipine karşı önemli repellent etki gösterdiği bildirilmiştir. Benzer şekilde, *Artemisia absinthium* uçucu yağının yanı sıra test edilen iki ana alt bileşenin (Linalool %23.41 ve (-)-β-Pinene %27.88) *B. tabaci*'nin Q biyotipine karşı önemli düzeyde repellent etkisi tespit edilmiş olup hedef zararlıları uzaklaştırmak için

aromatik bitkilerin kullanıldığı daha çevre dostu mücadele seçenekleri adına önemli sonuçlar elde edildiği bildirilmiştir (Li ve ark., 2022). Farklı *Artemisia* (*A. dalailamae, A. tangutica, A. sieversiana, A. tanacetifolia* ve *A. ordosica*) bitkilerinin uçucu yağ bileşenlerinin GC-MS (Gas Chromatography-Mass Spectrometry) ile tanımlandığı bir çalışmada, toplam 56 bileşen analiz edilerek her türün 9 ila 24 bileşenden oluştuğu tespit edilmiştir. Uçucu yağların temas toksisitesi ve repellent özelliği biyoanalizlerle değerlendirilmiş; *A. ordosica* yağı, *Liposcelis bostrychophila* (Psocoptera: Liposcelididae)'ya karşı (LD_{50} = 52.11 µg cm^{-2}) ve *A. tangutica* yağı, *Tribolium castaneum* Herbst. (Coleoptera: Tenebrionidae)'a karşı en güçlü temas toksisitesini (LD_{50} = 17.42 µg $ergin^{-1}$) sergilemiştir. Çalışma sonucunda, bu beş *Artemisia* türünün yüksek kimyasal çeşitliliğe sahip olduğu ve daha etkili ve çevre dostu insektisidial maddelere dönüştürülme konusunda büyük potansiyele sahip olduğu bildirilmiştir (Zhang ve ark., 2022). Başka bir çalışmada birbirleriyle etkileşimde bulunan bitki türleri (companion plant species-CP) tarafından yayılan uçucu organik bileşiklerin (volatile organic compounds-VOC) repellent özellikleri, Elma yaprakbiti *Dysaphis plantaginea* Passerini (Hemiptera: Aphididae) üzerinde, olfaktometrelerde test edilmiş ve çalışma sonucunda üç türün (nane/*Mentha piperita*, lavandin/*Lavandula* × *intermedia* ve biberiye/*Salvia rosmarinus*) uçucu yağlarının *D. plantaginea*'ya karşı güçlü repellent özellik gösterdiği tespit edilmiştir. Ek olarak, çeşitli biberiye kemotipleri üzerinde yapılan testler, kemotip içinde repellent özelliğin değişebileceğini göstermiş olup okaliptol, β-ocimene, allo-ocimene, piperitone, l-menton-1 ve l-menton-2 en yüksek repellent

indeks ile ilişkilendirilmiş, ancak bunların hepsi repellent olarak tanımlanmamıştır. Bu nedenle, bir CP'nin repellent etkisinin öncelikle, belirli uçucu organik bileşiklerin miktarının repellent etkinliğini modüle edebilirliğine ve üretilen koku karışımına bağlı olduğu sonucuna varılmıştır (Dieudonné ve ark., 2022). Yine potansiyel bir biyopestisit kaynağı olarak kullanılan bir tıbbi ve aromatik bitki türü olan *Pistacia lentiscus*'un farklı kısımlarından elde edilen ekstraktların, Bağ salkım güvesi *Lobesia botrana* Den. & Schiff. (Lepidoptera: Tortricidae)'ya karşı larvisid etkileri değerlendirilmiş olup yaprak ve ağaç kabuğu ekstraktlarının böceklerin larvalarına karşı herhangi bir etkisi olmasa da meyve ekstraktlarının güçlü biyoaktiviteye sahip olduğu ve yaklaşık %90 oranında larva ölümü sağladığı bildirilmiştir. Sonuçlar, *P. lentiscus* meyvesinden üretilen ekstraktların ve bunların oleik asit ve linoleik asit gibi yağ asitleri açısından zengin fraksiyonlarının, güçlü insektisidial aktivite sergilediğini göstermiş; bu da Akdeniz havzasında yaygın olarak görülen bir tür olan *P. lentiscus* meyvelerinin bölgedeki bağ alanlarında doğal bir insektisit kaynağı olarak kullanılma potansiyeli olduğunu göstermiştir (Desenaki ve ark., 2022). Son olarak uçucu yağ karışımının patent alınarak sonuçlandığı bir çalışmada lepidopter türlerini cezbetmek ve öldürmek için fesleğen yağı (*Ocimum basilicum*), kişniş yağı (*Coriandrum sativum*), kimyon yağı (*Cuminum cyminum*) ve papatya yağı (*Matricaria chamomilla*) olmak üzere dört uçucu yağın karışımı şeffaf bir kapsüle yerleştirilerek Pamuk yaprakkurdu *Spodoptera littoralis* Boisd. (Lepidoptera: Noctuidae)'in feromon tuzağına konulmuştur. Çalışma sonucunda uçucu yağ kapsüllerinin bulunduğu tuzaklarda yakalanan Pamuk

yaprakkurdu erginlerinin kontrole kıyasla yüksek sayıda olduğu bildirilmiştir (Ibrahim ve ark., 2022).

Uçucu yağların zararlılara karşı repellent ya da insektisidial etkisinin doğal düşmanlara da benzer etkiler gösterebileceği veya tam aksine doğal düşman popülasyonlarını teşvik edici özellik gösterebileceği yapılan birçok çalışma ile ortaya konulmuştur. Doğal düşmanların korunması ve desteklenmesi, entegre mücadele programlarının önemli bir parçası olarak pestisit kullanımının azaltılmasına katkıda bulunabilen sürdürülebilir bir yaklaşım olup tarımsal üretim alanlarında bulunan doğal düşmanların popülasyonlarını destekleyerek etkinliklerini arttırmaktadır (Ehler, 1998; Uygun ve ark., 2010; Seastedt, 2014). Yapılan bir çalışmada iki aromatik bitki türünün elma içkurdu *Cydia pomonella* L. (Lepidoptera: Tortricidae)'nın parazitizmi ve predatör arthropodların (Örümcekler, Kulağakaçanlar) toplanması üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Bu bağlamda elma bahçelerine fesleğen (*Ocimum basilicum*), Fransız kadife çiçeği (*Tagetes patula*) ve İtalyan çimi (*Lolium perenne*) bitkileri ekilmiş olup elma ağaçları ile *O. basilicum* arasındaki ilişkinin Elma içkurdunun parazitizmini arttırdığı ancak predatör varlığını etkilemediği tespit edilmiştir. Ancak *T. patula*'nın zararlı ve doğal düşmanları da dahil olmak üzere arthropod çeşitliliği ve bolluğu üzerinde genel bir olumsuz etkisinin olduğu da bildirilmiştir (Laffon ve ark., 2022). Bir diğer çalışmada portakal bahçesi kenarlarında kekik, biberiye, adaçayı ve fesleğen gibi Akdeniz aromatik bitki türlerinden oluşturulan çit bitkilerinin, toprak ve yabancı ot bitki örtüsünün turunçgil zararlılarının doğal düşmanlarının inaktif

dönemlerinde barınak olarak işlev görme potansiyeli değerlendirilmiş ve fesleğen bitkilerinin, yabancı otlar ve diğer aromatik bitkilerle karşılaştırıldığında daha fazla parazitoit barındırdığı (fesleğen > organik biberiye > adaçayı > kekik), predatör türlerin ise kekik ve adaçayı bitkilerini tercih ettiği bildirilmiştir (Stathakis ve ark., 2023). Yapılan çalışmalar ile aromatik bitkilerin böcekleri uzaklaştırma ve doğal düşmanlara barınak olabilmesi üzerindeki etkileriyle ilgili mekanizmaları (uçucu organik bileşiklerin bileşimi, çiçek kaynağı temini veya zararlı yoğunluğuna bağlılık) belirlemek için daha fazla çalışmaya ihtiyaç olduğu öngörülmektedir (Laffon ve ark., 2022). Bu çalışmalar sonucunda yararlı böceklerin korunması için özel birer kaynak oluşturacak olan aromatik bitki türlerinin kullanımının teşvik edilmesi ve aynı zamanda doğal yabancı bitki türlerinin de bu amaç için kullanılmasının oldukça faydalı sonuçlar doğuracağı düşünülmektedir (Stathakis ve ark., 2023).

SONUÇ

Küresel nüfus artışı ve insanların gıda maddelerine olan talebinin artmasıyla birlikte, bitki zararlılarını azaltmak için yoğun pestisit kullanımının insan ve çevre sağlığı üzerindeki olumsuz etkileri oldukça tehlikeli hale gelmiştir. Bu zararlıların zamanla kimyasal maddelere karşı direnci de giderek artmaktadır. Yapılan birçok araştırma sonucunda bitkisel kökenli insektisitlerin zararlılar üzerine etkili oldukları, çevre ve insan sağlığı açısından birçok avantajının olduğu ortaya konulmuştur. Doğada hala içeriği ve etkileri tam olarak bilinmeyen pek çok bitki türünün mevcut olduğu göz önünde

bulundurularak, zararlı organizmalar üzerindeki etkilerini araştırmak amacıyla uçucu yağ bileşenlerinin çeşitli kaynaklardan incelenmesi gerekmektedir. Ayrıca, bu çalışmalar sonucunda başarılı sonuçlar veren bitkilerin tarım alanlarında yetiştirilmesi ve bu bitkilerin içerdikleri bileşenlerin miktarlarının artırılması amacıyla laboratuvar ve saha çalışmaları yapılmalıdır. Bununla birlikte, bu uçucu yağ bileşenlerinin kimyasal yapısının ayrıntılı olarak incelenmesi, sentetik üretimlerinin mümkün olup olmadığının araştırılması ve bu yapıların zararlı organizmalara karşı etkinliğini artırmak amacıyla yapısal modifikasyonlarının gerçekleştirilip gerçekleştirilemeyeceğinin belirlemesi gerekmektedir. Bu nedenle bu içeriği destekleyen çalışmalar artırılmalı ve insektisitlere alternatif ürünlerin yaygınlaşmasına yönelik girişimlerin desteklenmesi oldukça önem arz etmektedir.

KAYNAKÇA

Aftab, T. (2019). A review of medicinal and aromatic plants and their secondary metabolites status under abiotic stress. *Journal of Medicinal Plants, 7*(3), 99-106.

Al-Khayri, J. M., Banadka, A., Nandhini, M., Nagella, P., Al-Mssallem, M. Q., & Alessa, F. M. (2023). Essential oil from *Coriandrum sativum*: A review on its phytochemistry and biological activity. *Molecules*, *28*(2), 696.

Bolzonella, C., Lucchetta, M., Teo, G., Boatto, V., & Zanella, A. (2019). Is there a way to rate insecticides that is less detrimental to human and environmental health? Glob. *Ecol. Conserv., 20*, e00699.

Budak, E., Yiğit, Ş., Aşkin, A. K., İzzet, A. K. Ç. A., & Saruhan, İ. (2022). Bazı Uçucu Yağların *Macrosiphum rosae* (L.) (Hemitera: Aphididae)'ya İnsektisidal Etkilerinin Belirlenmesi. *Tekirdağ Ziraat Fakültesi Dergisi, 19*(1), 101-107.

Cadena, M. B., Preston, G. M., Van der Hoorn, R. A., Townley, H. E., & Thompson, I. P. (2018). Species-specific antimicrobial activity of essential oils and enhancement by encapsulation in mesoporous silica nanoparticles. *Industrial Crops and Products, 122*, 582-590.

Candy, D. J. (1978). The regulation of locust flight muscle metabolism by octopamine and other compounds. *Insect Biochem., 8*, 177-181.

Catani, L., Grassi, E., di Montanara, A. C., Guidi, L., Sandulli, R., Manachini, B., & Semprucci, F. (2022). Essential oils and their applications in agriculture and agricultural products: A literature analysis through VOSviewer. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 102502.

Chand, R. R., Jokhan, A. D., & Gopalan, R. D. (2017). A mini-review of essential oils in the South Pacific and their insecticidal properties. *Advances in Horticultural Science*, *31*(4), 295-310.

Dambolena, J. S., Zunino, M. P., Herrera, J. M., Pizzolitto, R. P., Areco, V. A., & Zygadlo, J. A. (2016). Terpenes: natural products for controlling insects of importance to human health. A structure-activity relationship study. Psyche J. Entom., 2016, 1-16.

Dasenaki, I., Betsi, P. C., Raptopoulos, D., & Konstantopoulou, M. (2022). Insecticidal effect of *Pistacia lentiscus* (Anacardiaceae) metabolites against *Lobesia botrana* (Lepidoptera: Tortricidae). *Agronomy*, *12*(4), 755.

Dieudonné, E., Gautier, H., Dardouri, T., Staudt, M., Costagliola, G., & Gomez, L. (2022). Establishing repellent effects of aromatic companion plants on *Dysaphis plantaginea*, using a new dynamic tubular olfactometer. *Entomologia Experimentalis et Applicata, 170*(8), 727-743.

Ehler, L. (1998). Conservation biological control: past, present, and future. In *Conservation biological control* (pp. 1-8). Academic Press.

El Asbahani, A., Miladi, K., Badri, W., Sala, M., Addi, E. A., Casabianca, H., ... & Elaissari, A. (2015). Essential oils: From extraction to encapsulation. *International journal of pharmaceutics, 483*(1-2), 220-243.

Elma, F. N. (2012). Bazi bitki ekstraktlarının Avrupa sünesi, *Eurygaster maura* L. (Heteroptera: Scutellaridae)'ne etkileri üzerinde araştırmalar. Doktora Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Enan, E. (2001). Insecticidal activity of essential oils: octopaminergic sites of action. *Comparative Biochemistry and Physiology Part C: Toxicology & Pharmacology*, *130*(3), 325-337.

Erler, F. (2004). Laboratory evaluation of a botanical natural product (AkseBio2) against the pear psylla Cacopsylla pyri, *Phytoparasitica 32*(4), 351-356.

Gaire, S., Zheng, W., Scharf, M. E., & Gondhalekar, A. D. (2021). Plant essential oil constituents enhance deltamethrin toxicity in a resistant population of bed bugs (*Cimex lectularius* L.) by inhibiting cytochrome P450 enzymes. *Pesticide Biochemistry and Physiology, 175*, 104829.

Giannenas, I., Sidiropoulou, E., Bonos, E., Christaki, E., & Florou-Paneri, P. (2020). The history of herbs, medicinal and aromatic plants, and their extracts: Past, current situation and future perspectives. In *Feed additives* (pp. 1-18). Academic Press.

Güncan, A., & Durmuşoglu, E. (2004). Bitkisel kökenli doğal insektisitler üzerine bir değerlendirme, *Hasad Dergisi, 233*, 26-32.

Hua, J.; Relyea, R.A. (2012). East Coast vs West Coast: Effects of an insecticide in communities containing different amphibian assemblages. *Freshw. Sci. 31*, 787–799.

Ibrahim, S. S., Eldeeb, Y. A., Omer, E. A., Fouad, R., & El Gendy, A. G. (2022). Field study for control insect pests by innovation formulated of essential oil. *Journal of Plant Protection and Pathology, 13*(12), 311-318.

Isman, M. B. & Tak, J. H. (2017). Inhibition of acetylcholinesterase by essential oils and monoterpenoids: A relevant mode of action for insecticidal essential oils? *Biopestic. Int., 13*, 71–78.

Kačániová, M., Galovičová, L., Borotová, P., Vukovic, N. L., Vukic, M., Kunová, S., ... & Kowalczewski, P. Ł. (2022). Assessment of *Ocimum basilicum* essential oil anti-insect activity and antimicrobial protection in fruit and vegetable quality. *Plants, 11*(8), 1030.

Kostyukovsky, M., Rafaeli, A., Gileadi, C., Demchenko, N., & Shaaya, E. (2002). Activation of octopaminergic receptors by essential oil constituents isolated from aromatic plants: possible mode of action against insect pests. *Pest Management Science: formerly Pesticide Science*, *58*(11), 1101-1106.

Laffon, L., Bischoff, A., Gautier, H., Gilles, F., Gomez, L., Lescourret, F., & Franck, P. (2022). Conservation biological control of codling moth (*Cydia pomonella*): effects of two aromatic plants, basil (*Ocimum basilicum*) and french marigolds (*Tagetes patula*). *Insects, 13*(10), 908.

Lahlali, R., El Hamss, H., Mediouni-Ben Jemâa, J., & Barka, E. A. (2022). Editorial: The Use of Plant Extracts and Essential Oils as Biopesticides. *Frontiers in Agronomy, 4* (June), 1–3.

Li, S., Li, H., Zhou, Q., Zhang, F., Desneux, N., Wang, S., & Shi, L. (2022). Essential oils from two aromatic plants repel the tobacco whitefly *Bemisia tabaci*. *Journal of Pest Science*, 1-12.

López, M. D., & Pascual-Villalobos, M. J. (2010). Mode of inhibition of acetylcholinesterase by monoterpenoids and implications for pest control. *Ind. Crops Prod., 31*, 284-288.

Malhotra, N., Chen, K. H. C., Huang, J. C., Lai, H. T., Uapipatanakul, B., Roldan, M. J. M., ... & Hsiao, C. D. (2021). Physiological effects of neonicotinoid insecticides on non-target aquatic animals—an updated review. *International Journal of Molecular Sciences, 22*(17), 9591.

Monagas, M., Brendler, T., Brinckmann, J., Dentali, S., Gafner, S., Giancaspro, G., ... & Marles, R. (2022). Understanding plant to extract ratios in botanical extracts. *Frontiers in Pharmacology, 13*, 981978.

Ni, Z.-J., Wang, X., Shen, Y., Thakur, K., Han, J., Zhang, J.-G., et al. (2021). Recent updates on the chemistry, bioactivities, mode of action, and industrial applications of plant essential oils. *Trends Food Sci. Technol. 110*, 78–89.

Ong, G., Kasi, R., & Subramaniam, R. (2021). A review on plant extracts as natural additives in coating applications. *Progress in Organic Coatings, 151*, 106091.

Oviedo-Sarmiento, J. S., Cortes, J. J. B., Ávila, W. A. D., Suárez, L. E. C., Daza, E. H., Patiño-Ladino, O. J., & Prieto-Rodríguez, J. A. (2021). Fumigant toxicity and biochemical effects of selected essential oils toward the red flour beetle, Tribolium castaneum (Coleoptera: Tenebrionidae). *Pesticide Biochemistry and Physiology, 179*, 104941.

Parven, A., Khan, M. S. I., Prodhan, M. D. H., Venkateswarlu, K., Megharaj, M., & Meftaul, I. M. (2021). Human health risk assessment through quantitative screening of insecticide residues in two green beans to ensure food safety. *Journal of Food Composition and Analysis, 103*, 104121.

Pereira Filho, A. A., Pessoa, G. C. D. Á., Yamaguchi, L. F., Stanton, M. A., Serravite, A. M., Pereira, R. H., ... & Kato, M. J. (2021). Larvicidal activity of essential oils from Piper species against strains of *Aedes aegypti* (Diptera: Culicidae) resistant to pyrethroids. *Frontiers in plant science, 12*, 685864.

Peter, R., Josende, M. E., da Silva Barreto, J., da Costa Silva, D. G., da Rosa, C. E., & Maciel, F. E. (2022). Effect of *Illicium verum* (Hook) essential oil on cholinesterase and locomotor activity of *Alphitobius diaperinus* (Panzer). *Pesticide Biochemistry and Physiology, 181*, 105027.

Price, D. N., & Berry, M. S. (2006). Comparison of effects of octopamine and insecticidal essential oils on activity in the nerve cord, foregut, and dorsal

unpaired median neurons of cockroaches. *Journal of insect physiology, 52*(3), 309-319.

Rao, K. S., Haran, R. H., & Rajpoot, V. S. (2022). Value addition: A novel strategy for quality enhancement of medicinal and aromatic plants. *Journal of Applied Research on Medicinal and Aromatic Plants, 31*, 100415.

Renoz, F., Demeter, S., Degand, H., Nicolis, S. C., Lebbe, O., Martin, H., ... & Hance, T. (2022). The modes of action of *Mentha arvensis* essential oil on the granary weevil *Sitophilus granarius* revealed by a label-free quantitative proteomic analysis. *Journal of Pest Science, 95*(1), 381-395.

Saha, A., & Basak, B. B. (2020). Scope of value addition and utilization of residual biomass from medicinal and aromatic plants. *Industrial Crops and Products, 145*, 111979.

Salgado, V. L. (2013). The insect neuromuscular system, pp. 8-15. - In: Company B.C. (ed.) Insecticide mode of action technical training manual. BASF Corporation, NC, USA, pp. 72.

Saıfı, R., Saıfı, H., Akca, İ., Benabadelkader, M., Askın, A. K., & Belghoul, M. (2023). Insecticidal and repellent effects of Mentha longifolia L. essential oil against *Aphis craccivora* Koch (Hemiptera: Aphididae). *Chemical and Biological Technologies in Agriculture, 10*(1), 18.

Sarkar, S., Gil, J. D. B., Keeley, J., & Jansen, K. (2021). The use of pesticides in developing countries and their impact on health and the right to food. European Union, Wageningen University & Research, Record Number: 583698.

Seastedt, T. R. (2014). Biological control: perspectives for maintaining provisioning services in the anthropocene. *Integrated Pest Management: Pesticide Problems, Vol. 3*, 269-280.

Siegfried, B. D., & Scott, J. G. (1992). Biochemical characterization of hydrolytic and oxidative enzymes in insecticide resistant and susceptible strains of the German cockroach (Dictyoptera: Blattellidae). *Journal of Economical Entomology, 85*, 1092-1098.

Soummane, H., Larhsini, M., Naamani, K., & Coll, J. (2011). Studies of larvicidal and adulticidal activities of some halophyte plant extracts against *Ceratitis capitata* Wiedemann, *Journal of Entomology, 8*(6), 548-556.

Stathakis, T., Economou, L., Barda, M., Angelioudakis, T., Kati, V., & Karamaouna, F. (2023). Potential of Hedgerows with Aromatic Plants as Reservoirs of Natural Enemies of Pests in Orange Orchards. *Insects, 14*(4), 391.

Syromyatnikov, M. Y., Isuwa, M. M., Savinkova, O. V., Derevshchikova, M. I., & Popov, V. N. (2020). The effect of pesticides on the microbiome of animals. *Agriculture, 10*(3), 79.

Tak, J. H., & Isman, M. B. (2017). Acaricidal and repellent activity of plant essential oil-derived terpenes and the effect of binary mixtures against *Tetranychus urticae* Koch (Acari: Tetranychidae). *Industrial Crops and Products, 108*, 786-792.

Tavares, W. R., Barreto, M. D. C., & Seca, A. M. (2021). Aqueous and ethanolic plant extracts as bio-insecticides-Establishing a bridge between raw scientific data and practical reality. *Plants, 10*(5), 920.

Thompson, D. A., Lehmler, H. J., Kolpin, D. W., Hladik, M. L., Vargo, J. D., Schilling, K. E., ... & Field, R. W. (2020). A critical review on the potential impacts of neonicotinoid insecticide use: current knowledge of environmental fate, toxicity, and implications for human health. *Environmental Science: Processes & Impacts, 22*(6), 1315-1346.

Topuz, E., & Madanlar, N. (2006). Bitkisel kökenli eterik yağlar ve zararlilara karşi kullanim olanaklari. *Derim, 23*(2), 54-66.

Upadhyay, R. K. (2016). Botanicals; its safe use in pest control and environmental management. *International Journal of Zoological Investigations, 2*, 58-102.

Villani, M., & Gould, F. (1985). Screening of crude plant extracts as feeding deterrent of the wireworm *Melanotus communis*, *Entomologia Experimentalis et Applicata, 37*, 69-75.

Wandjou, J. G. N., Baldassarri, C., Ferrati, M., Maggi, F., Pavela, R., Tsabang, N., ... & Benelli, G. (2022). Essential oils from Cameroonian aromatic plants as

effective insecticides against mosquitoes, houseflies, and moths. *Plants, 11*(18), 2353.

Yilmaz, A. (2022). Mixed consortium of microbial inoculants improves yield and essential oil profile of coriander. *Journal of bioscience and bioengineering, 134*(5), 462-470.

Yilmaz, A., & Karik, Ü. (2022). AMF and PGPR enhance yield and secondary metabolite profile of basil (*Ocimum basilicum* L.). *Industrial Crops and Products, 176*, 114327.

Yilmaz, A., Guler, E., Soydemir, H.E., Demirel, S., Mollahaliloglu, S., Karadeniz, T., & Ciftci, V., (2021). Miracle plant: Black Chokeberry (*Aronia melanocarpa*). *MAS J. Appl. Sci. 6*, 83–94.

Yilmaz, A., Yildirim, E., Yilmaz, H., Soydemir, H. E., Güler, E., Ciftci, V., & Yaman, M. (2023). Use of Arbuscular Mycorrhizal Fungi for Boosting Antioxidant Enzyme Metabolism and Mitigating Saline Stress in Sweet Basil (*Ocimum basilicum* L.). *Sustainability, 15*(7), 5982.

Zhang, J. W., Li, B. Y., Lu, X. X., Zheng, Y., Wang, D., Zhang, Z., ... & Du, S. S. (2022). Chemical Diversity and Anti-Insect Activity Evaluation of Essential Oils Extracted from Five Artemisia Species. *Plants, 11*(13), 1627.

Zibaee, A., & Bandani, A. R. (2009). Effect of five different type pesticides on the sunn pest, *Eurygaster integriceps*, *Munis Entomology & Zoology, 4*(2), 542-550.

BÖLÜM 6

BİTKİLERDE STRES DİRENCİNİ ARTIRMADA PROLİN BİRİKİMİNİN ETKİLERİ

Dr. Fatma Belkıs ESİMEK[1]

Dr. Esra BULUNUZ PALAZ[2*]

Uzm. Biyolog Sümeyye ADALI[3]

DOI: https://dx.doi.org/10.5281/zenodo.10031382

[1] Alata Bahçe Kültürleri Araştırma Enstitüsü Müdürlüğü, Mersin, Türkiye, belkisdolek@hotmail.com

[2*] Doğu Akdeniz Geçit Kuşağı Tarımsal Araştırma Enstitüsü Müdürlüğü, Kahramanmaraş, Türkiye. bulunuzesra@hotmail.com

[3] Doğu Akdeniz Geçit Kuşağı Tarımsal Araştırma Enstitüsü Müdürlüğü, Kahramanmaraş, Türkiye, sumeyye.adali@tarimorman.gov.tr

GİRİŞ

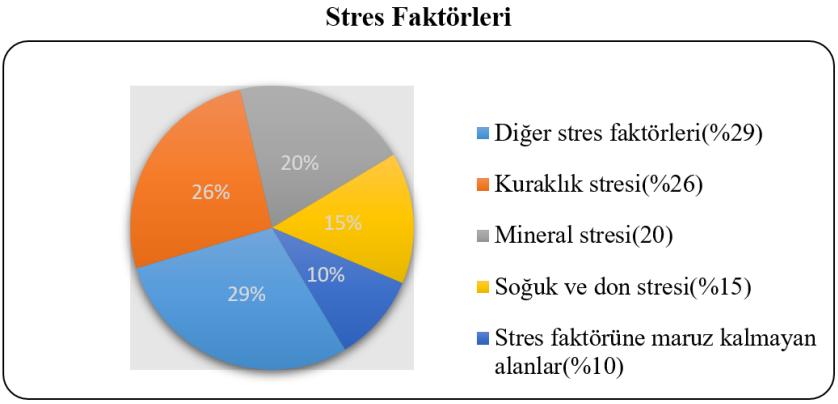
Bitki metabolizmasını, gelişimini, büyümesini engelleyen veya etkileyen herhangi olumsuz durum ve etmen stres olarak kabul edilir (Lichtenthaler 1998). Bitkiler yaşamları boyunca birçok stres faktörü ile karşılaşmaktadırlar. Bu stres faktörleri, bitkiler üzerindeki genellikle etkilerini genellikle eş zamanlı olarak gerçekleştirmektedirler. Biyotik (diğer organizmalarla rekabet, patojen vb.) ve abiyotik (radyasyon, tuzluluk, kuraklık, don veya yüksek sıcaklık vb.) stresler ekonomik önemi olan tahıllar dahil olmak üzere tüm bitkilerin normal yaşam süreçlerinde değişikliklere neden olmaktadır. Tüm bu stres etmenleri bitkilerin normal fonksiyonlarını değiştirir, biyosentetik kapasitelerini azaltır ve bitkinin ölümüne yol açabilecek zararlara neden olabilir (Lichtenhaler, 1996).

Blum (1986)'a göre, Dünya üzerindeki tarımsal kullanılabilir alanlar stres faktörlerine göre sınıflandırıldığında doğal stres faktörlerinden olan kuraklık stresi %26'lık oran ile en büyük dilimi oluşturmaktadır. Bunu %20 ile mineral stresi ve %15 ile soğuk ve don stresi takip etmektedir. Bunların dışında kalan diğer tüm stresler %29'luk bir pay alırken, yalnızca %10'luk bir alan herhangi bir stres faktörüne maruz kalmamaktadır (Şekil 1).

1. STRES FAKTÖRLERİ

Günümüz koşullarında bitkilerin çevresel stres faktörlerine karşı fizyolojik tepkileri ve özellikle küresel ısınma karşısında kaçınılmaz olan su kıtlığı ve buna bağlı olarak gelişen ozmotik stresin

iyileştirilmesi konularında çalışmalar hız kazanmıştır. Stres uyarısı, bitki hücre zarlarındaki reseptörler tarafından tanınmaktadır ve üretilen herhangi bir sinyal, spesifik genlerin aktivasyonu ile kademeli olarak iletilir ve yükseltilir. Bu gen ifadeleri ise strese karşı bitkinin tepkisidir. Bu sinyalleşme süreci enzimler ve reseptörler tarafından etkinleştirilir veya devre dışı bırakılır.



Şekil 1. Dünya üzerindeki ekilebilir alanlarda görülen stres faktörleri (Blum, 1986)

2. BİTKİLERDE BİYOTİK VE ABİYOTİK STRES KOŞULLARINDA PROLİN BİRİKİMİ

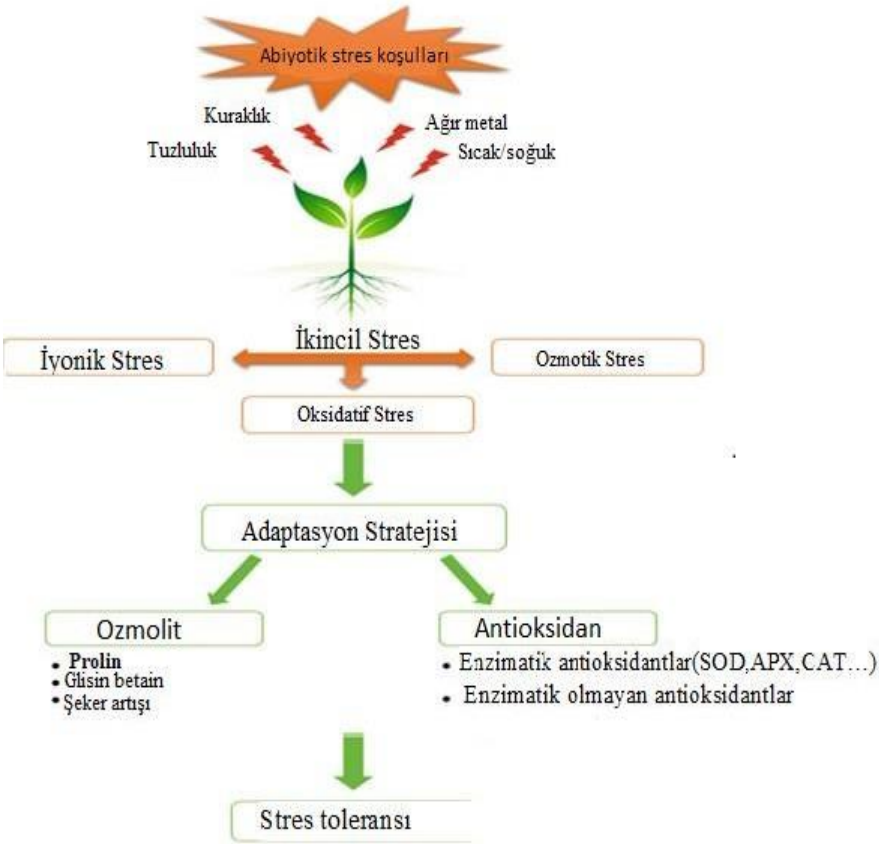
Bir osmolit veya ozmoprotektan olarak sınıflandırılan prolin, çeşitli organizmalar tarafından stresle mücadele etmek için kullanılan önemli bir moleküldür. Yürütülen çalışmalar, prolin metabolizmasının mitokondride reaktif oksijen türlerinin (ROS) oluşumunu artırarak sinyal yollarını etkilediğini göstermiştir. Prolinin stres adaptasyonundaki işlevi genellikle su stresini dengeleme yeteneği ile açıklanmaktadır. Prolin metabolizmasına bağlı olarak artan ROS

üretiminin, bitkilerde aşırı duyarlılık verilen tepkilerde, solucanlarda yaşam süresinin uzatılmasında, hayvanlarda tümör baskılanmasında ve hücrelerin hayatta kalmasında rol oynadığı yapılan çalışmalarla açıklanmıştır. Kuraklık, soğuk ve tuz stresi toprakta aşırı tuz birikmesine neden olur ve bu da ozmotik stresin artmasıyla sonuçlanır. Toprağın su potansiyeli ve suyun köklerden sürgünlere akışı azalır. Meydana gelen ozmotik stres stomaların kapanmasına, fotosentez hızının azalmasına ve büyümenin engellenmesine neden olur (Trovato ve ark. 2008).

Bitki hücreleri, kuraklık, tuzluluk gibi stres faktörlerini tolere edebilmek amacıyla çeşitli organik maddelerin sentezi ve birikimi gibi stratejiler kullanmaktadır. Stres esnasında sentezi ve birikimi gerçekleşen moleküller arasında mannitol, threaloz, galaktinol gibi şeker alkolleri; glisin, betain ve prolin gibi aminler sayılabilir (Hayat ve ark., 2012; Yaish., 2015). Bitkinin abiyotik strese karşı toleransında prolin birikimi önemli bir role sahiptir. Bitkilerde prolin biyosentezi ilk olarak 1952 yılında *E. Coli* vasıtasıyla açıklanmıştır (Vogel ve Davies 1952). Prolin akademik çalışmalarda Pro veya P olarak kısaltılarak yazılır. Protein sentezi için kullanılan 21 amino asitten biri olmasından dolayı prolinin bitki gelişiminde aktif rol oynadığı geçtiğimiz yüzyıl sonunda bilimsel bir gerçek olarak kabul edilmiştir. Normal yetiştirme şartlarında bazı bitki türlerinin organlarında büyük miktarlarda prolin tespit edilmiştir. Benzer şekilde, bitkilerin çiçek, meyve ve tohumlarında prolin biyosentez genleri bildirilmiştir. Vegetatif ve generatif organlar arasındaki prolin konsantrasyonu farkı

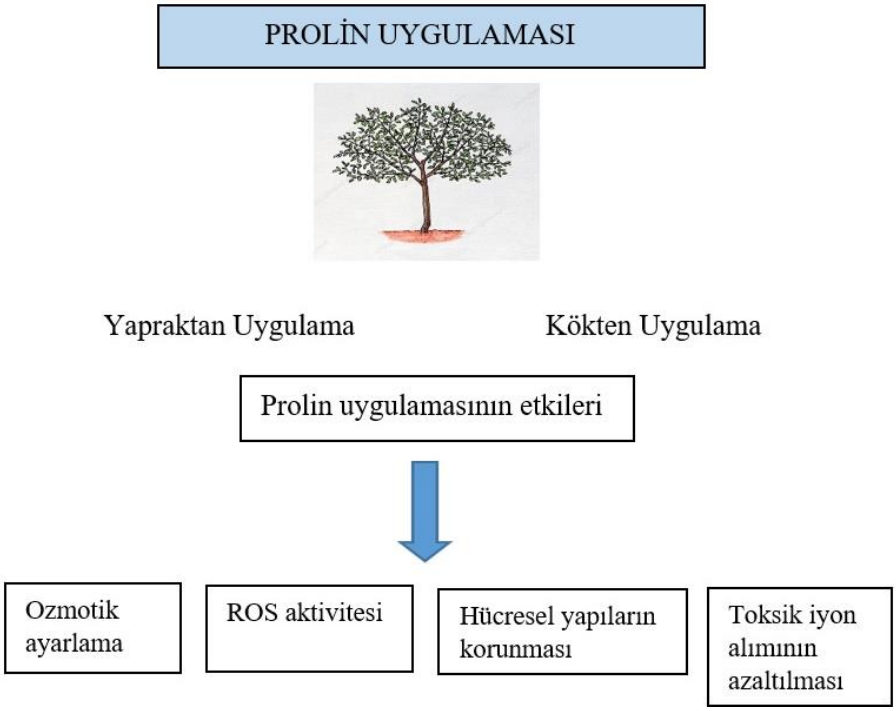
da prolinin bitki üremesinde özel bir rol oynayabildiğini gösterir. Yapılan araştırmalar kök uzaması, çiçek oluşumu, polen canlılığı ve embriyo gelişimi gibi bir dizi gelişimsel süreçte prolinin etkisini ortaya koymuştur. Bitkilerin çeşitli çevresel kısıtlamalara maruz kalması, bitki büyümesini ve verimi sınırlar. Bitki morfolojik, fizyolojik ve moleküler değişiklikler yoluyla sınırlamalara tepki verir. Prolin, proliddin iskeletinde beş karbon atomu taşıyan 20 α-amino asitten biri olup proteinlerin yapısında bulunmaktadır. Strese karşı toleransın oluşturulmasına önemli etki yaparak hücredeki membran bütünlüğünün ve ozmotik dengenin sağlanmasına yardımcı olur. Birikimi veya dışarıdan bitkiye uygulanması, stres koşulları altında bitki büyümesini ve gelişimini sürdürmek için birçok düzeyde ayarlamalar sağlamaktadır (Srivastava ve ark., 2017). Stres koşullarına maruz kaldığında, bitkiler bir dizi metabolit, özellikle de amino asitler biriktirir. Amino asitler geleneksel olarak proteinlerin öncüleri ve bileşenleri olarak kabul edilirler ve bitki metabolizması ve gelişiminde önemli bir rol oynarlar. Yapılan araştırmalar, prolin birikimi ile bitkinin strese girmesi arasında pozitif bir ilişki olduğunu göstermektedir. Bir amino asit olan prolin, çeşitli stres koşullarına maruz kalan bitkilerde oldukça faydalı bir rol oynar. Ozmolit olarak hareket etmesinin yanı sıra, prolin stres sırasında metal şelatör, antioksidatif savunma molekülü ve sinyal molekülü olarak rol alır. Ozmolitler bitkinin kuraklık stresine toleransına yaprak içindeki su basıncını dengeleyerek, stoma iletkenliğini yükselterek ve fotosentezin devamlılığını sağlayarak olumlu katkıda bulunurlar. Kuraklık koşullarında ilk biriken molekül prolindir. Prolinin hücre içi

konsantrasyonunda meydana gelen artışlar bu birikimi desteklemektedir (Yüksel ve Aksoy, 2017). Stresli bir ortamın bitkilerde aşırı prolin üretimine yol açtığını ve bunun da hücre turgorunu veya ozmotik dengeyi koruyarak stres toleransı kazandırdığını araştırmalar göstermektedir (Hayat, 2012). Prolin birikimi, çeşitli abiyotik streslere maruz kalan bitkilerde yaygın bir fizyolojik tepkidir. Prolin stres sırasında elektrolit sızıntısını önler ve ROS konsantrasyonlarını normal aralıklara getirmek stresten kaçınmayı sağlar (Kaur ve Asthır,2015). Bir amino asit olan prolin, NaCl stresi altında ozmotik regülasyonda rol oynadığı gibi, hücreler arası yapının ve proteinlerin bütünlüğünün korunması, sitozolik pH ayarlanması ve stres durumunda enzim aktivitelerinin harekete geçirilmesinde de rol oynamaktadır (Büyük ve ark., 2012). Yapraktan prolin uygulamasının ağır metal stresi altında etkili olduğu görülmüştür. Bitkilerde metallerin toksisitesini azaltarak bitkilerde koruyucu mekanizmayı harekete geçirir (Emamverdian ve ark., 2015). Prolin, DNA tarafından kodlanan 20 amino asitten biridir. Genetik kod olarak: CCU, CCC, CCA ve CCG şeklinde tanımlanır. Bitki tepkilerinde önemli rolü olan bir amino asittir. Birçok bitki ozmotik tepki olarak yüksek seviyelerde serbest prolini sitozol ve kloroplastlarda biriktirir. Moleküler bir şaperon olarak, prolin ayrıca protein bütünlüğünü koruduğu ve enzimi arttırdığı gösterilmiştir. Prolinin ayrıca bir antioksidan rolü taşıdığı öne sürülmektedir. Bitkilere dışarıdan ekzojen olarak uygulandığında strese maruz kalan prolin, büyümede artışa neden olur (Saibi ve Brini, 2020; Suprasanna ve ark.,2014).



Şekil 2. Abiyotik streslere karşı bitki tepkileri (Zouari, 2019).

Bitkilere yapraktan veya kök bölgesinden prolin uygulanması toksik ROS'u azaltarak bir antioksidatif savunma görevi görür. Oksidatif hasarları azaltır ve antioksidan enzimleri düzenler. Stres altındaki hücrelerin şişkinliğini koruyarak bitki-su ilişkilerini etkiler ve fotosentez hızını arttırır. Bitki büyümesini ve nihai mahsul verimini arttırır (Zouari, 2019) (Şekil 3).



Şekil 3. Prolin uygulamasının bitkiler üzerindeki yararlı etkileri (Zouari, 2019).

İklim değişikliği ve küresel ısınmanın neden olduğu birçok stres faktörüne karşı bitkinin başa çıkabilmesi için prolin uygulamaları ana anahtar olarak görülmektedir. Bitkilerin uygun olmayan çevre koşullarına uyum sağlamalarına yardımcı olmak, mahsul üretimini kabul edilebilir bir seviyede tutmak amacıyla bu konuda çalışmaların devamı önemlidir. Hücresel stres yanıtının yeni düzenleyici ve sinyal ağlarını ortaya çıkarmak için prolin moleküllerinin diğer metabolik enzimler ile etkileşimini ortaya koyacak çalışmaların devamı gerekmektedir. Türkiye'de ve yurtdışında otsu ve odunsu bitki türlerinde stres faktörlerine karşı prolin uygulamaları ile bu bitki türlerinin tepkisinin araştırıldığı çalışmalar mevcuttur.

3. ODUNSU BİTKİ TÜRLERİNDE PROLİN UYGULAMALARI

Tuz stresine karşı PRO ve GB uygulamalarının Gemlik ve Memecik zeytin (*Olea europaea* L.) çeşidinin gelişimi üzerine etkilerinin değerlendirilmesi amacıyla yürütülen bir çalışmada tuz stresi altındaki zeytin fidanlarına uygulanan osmoprotektanların yaprakların mikro element konsantrasyonlarında kontrole kıyasla artışa neden olduğunu belirtilmiştir. Benzer şekilde Bor elementi de pasif olarak alınan ve taşınan bir element olduğu için osmoprotektan uygulamalarına paralel olarak azalan stres düzeyi sonucu giderek artan dozlarda bitki tarafından alınmıştır (Küçük, 2013). Özden ve ark. (2011), tuza maruz kalan üzümde (*Vitis vinifera*) tuz varlığında artan prolin içeriğinin prolin uygulaması ile azaldığını ve uygulamanın stres koşullarına toleranslı bitki yetiştirmede etkili olacağını bildirmişlerdir. Üç turunçgil türünde (*C. reticulata, C. sinensis ve C. paradisi*) (0, 15, 20 mM) doz prolin uygulamasının etkileri incelenmiştir. Sonuçlar, uygulamanın üç turunçgil türünde hem hidrojen peroksiti hem de lipit peroksidasyonunu azalttığını göstermiştir. -3°C'deki yüksek performanslı sıvı kromatografi kromatogramları, eksojen prolinin fenolik asitlerden klorojenik, gallik, p-kumarik ve ferulik asitin yanı sıra flavonoidlerden naringin, kersetin ve rutini artırdığını göstermiştir. Prolin konsantrasyonunun artmasıyla oksalik, sitrik ve askorbik asit miktarı artmış ancak tartarik asit miktarı azalmıştır. Düşük sıcaklık ve prolin uygulamaları, *C. reticulata*'da endojen prolin, katalaz ve APX düzeylerinin diğer iki türe göre daha yüksek olduğunu ve sıcaklığın düşmesiyle miktarlarının arttığını göstermiştir (Mohammadrezakhani, 2019).

Ahmet ve ark. (2010), çalışmalarında bir yaşında üç zeytin çeşidinde 50 mM prolin uygulamasında fotosentetik performanstaki değişiklikler, osmolit birikimi ve süperoksit dismutaz, askorbat peroksidaz, katalaz ve polifenol oksidaz aktiviteleri araştırılmıştır. Prolin uygulaması antioksidatif savunma sistemini iyileştirmiştir, fotosentetik aktivite ve bitki büyümesi artırmıştır. Aktaş ve Akça (2014), defne (*Laurus nobilis* L.) fidelerinde prolin uygulamasının hormon içeriği üzerindeki etkilerini ve kuraklık toleransının uyarılmasını yarı-kontrollü sera koşullarında çalışmıştır. Çalışmada su stresi koşullarında fidelere prolin uygulaması ile bağıl su içeriği ve taze ağırlığın korunduğu, yaprak fotokimyasal etkinliğinin arttığı ve fidelerin hayatta kalma oranının (%52) yükseldiği belirlenmiştir. Su stresi, defne fidelerinde absisik asit (ABA) içeriğinde ise artışa, içsel zeatin (Z), indol-3-asetik asit (IAA) ve giberellik asit (GA3) içeriğinde ise azalmaya neden olmuştur. Stres koşullarında fidelere prolin uygulaması oksin miktarını kontrole göre yaklaşık 2 kat artırmış, tarla kapasitesinde sulanan kontrol fidelerine dışarıdan prolin uygulanması IAA içeriğini %88 oranında azaltmıştır. Elde edilen veriler, prolin uygulaması ile defnenin fide döneminde kuraklığa toleransının oluşabileceğini ortaya koymaktadır. Bir diğer çalışmada kuraklık stresine karşı prolin uygulamasının karaçam tohumlarının çimlenmesine etkileri araştırmıştır. Çalışmada karaçam tohumları belirli konsantrasyonlarda (kontrol, 0,1 mM, 0,5 mM, 1 mM, 5 mM ve 10 mM) prolin solüsyonu içeren petri kaplarına ekilmiştir. Ekimden yedi gün geçtikten sonra çimlenme ortamına kuraklık stresi

uygulanmıştır. Çimlenme periyodunun sonunda elde edilen örneklerde kök boyu uzunluğu, nisbi su içeriği, taze ağırlık, çimlenme oranı, çimlenme hızı, prolin içeriği hidrojen peroksit, lipid peroksidasyonu ve bazı antioksidan enzim aktiviteleri (CAT, SOD, APX ve GPX) ölçülmüştür. Çalışmada elde edilen ulaşılan bulgular incelendiğinde belirli bir konsantrasyonda dışardan uygulanan prolinin (1 mM) kuraklık stresine karşı çimlenmeyi teşvik ederek büyüme ve gelişmeyi arttırdığı tespit edilmiştir (Kılıç, 2010).

4. OTSU BİTKİ TÜRLERİNDE PROLİN UYGULAMALARI

Embriyo kültüründe yetiştirilen fasulye (*Phaseolus vulgaris* L.) fideleri- nin kullanıldığı çalışmada NaCl (0, 50, 100 ve 150 mM), prolin (0, 5 ve 10 mM) ve NaCl + prolin kombinasyonlarının etkisi araştırılmıştır. Prolin ve NaCl + prolin kombinasyonuna maruz kalan dokularda protein içeriği oldukça yüksek bulunmuş ancak NaCl tek başına kök ve yaprak dokularında protein içeriğini azaltmıştır. Sonuçlar prolinin tuz stresinde enzim stabilize edici bir madde olarak rol oynayabileceğini göstermektedir (Demir ve Kocaçalışkan, 2001). Sıcaklık stresi altındaki bamya (*Abelmoschus esculentus* L) genotiplerinin morfo-fizyolojik, biyokimyasal ve su ile ilgili özellikleri üzerinde prolin uygulamalarının iyileştirici etkisini araştırmak için bir çalışma yürütmüşlerdir. Dört haftalık fidehayaler, bir büyüme odasının sıcaklığının 28/22 °C'den 45/35 °C'ye (gündüz/gece) kademeli olarak arttırılmasıyla ısı stresine maruz bırakılmış ve 2,5 mM prolin uygulanmıştır. Sonuçlar, sürgün uzunluğunda (%32,7), kök uzunluğunda (%58,9) ve taze sürgünde

(%85,7) maksimum artış olduğunu göstermiştir (Hüseyin ve ark., 2021). Güngör (2022), kısıtlı sulama koşullarında salisilik asit ve prolin uygulamalarının karpuzda verim, kalite ve bitki su tüketimi üzerine etkilerini araştırılmıştır. Bu amaçla, 5 farklı prolin dozu kullanılarak sera ortamında etiştirilen karpuz bitkisine 3 farklı dışsal uygulama (K: Kontrol, SA: Salisilik Asit, P: Prolin) yapılmıştır. Dışsal uygulamalar bitkiyi toleranslı hale getirmiştir. Yenilikçi yetiştirme koşullarının, incelenen hem su kullanımına bağlı parametrelerde hem de fizyolojik parametrelerde kontrol konularına göre olumlu katkı sağladığı istatistiksel olarak belirlenmiştir. Çalışmadan elde edilen sonuçlar, salisilik asit ve prolinin kuraklık stresi koşulları altında bitki büyüme ve gelişmesini, bitki üretkenliğini, meyve kalitesini geliştirerek olumlu bir şekilde yansıtmıştır. Dört farklı sulama seviyesi ve prolin uygulamasının Fortuna çilek çeşidinin üzerine etkilerini belirlemek amacıyla yüksek tünel koşulları altında yürütülen çalışmada yapraktan aralık ayından başlayarak ayda 1 kere olacak şekilde 5 kez 20 mM prolin uygulanmıştır. Ortalama meyve ağırlığı kısıtlı sulama seviyeleri olan %50 ve %75 sulama seviyelerinde prolin uygulamaları ile artış olduğu görülmüştür. Meyve dış renginde uygulanan prolinin olumsuz etkisi olmadığı tesbit edilmiştir. Sonuç olarak prolin uygulaması su stresi koşullarında olumlu etki göstermesinin yanı sıra farklı sulama suyu seviyelerinde de verimin artmasına neden olmuş ve kalite parametreleri değerlerinde olumsuz sonuçlar göstermemiştir (Aksoy, 2021). Koç (2013), çalışmasında biber bitkilerinde soğuğa toleransta prolin ve salisilik asit uygulamasının soğuğa tolerans üzerine etkisini araştırmıştır. En düşük

sıcaklıkta (4°C) ve en yüksek sıcaklıkta (24°C) prolin düzeyindeki maksimum artışların sırasıyla 24 mM prolin + 0,25 mM SA ve 24 mM prolin + 0,50 mM SA uygulamalarında olduğu gözlendi. Bulgular, prolin ve salisilik asit uygulamasının prolin ve protein birikimine yol açarak biber bitkisinin soğuğa toleransını arttırdığını göstermiştir.

Maş fasulyesi bitkisinde (*Vigna radiata* L.*)* soğuk stresine karşı 6 saat süre ile uygulanan 5 mM ve 150 mM prolin dozu prolin içeriğinde artış, çimlenme yüzdesinde artış, hipokotil uzaması, lipid peroksidasyonunda azalma görülmüştür (Posmyk ve Janas, 2007). Shin ve ark. (2018), çalışmasında ıspanak bitkilerinde 10 mM prolinin uygulamasının soğuğa tolerans üzerine etkisi araştırılmıştır. Prolin birikiminin 2.6 kat arttığı görülmüştür. Prolin, arginaz, lizin ve prolin gibi amino asit üretiminin artması yoluyla donma toleransını arttırmıştır. Bununla birlikte, amino asit içerikleri açısından anlamlı bir fark görülmemiştir. Prolin uygulamasının börülcenin kuraklık toleransı üzerindeki etkisini araştırmak için yürüttüğü çalışmadan alınan sonuçlar su stresinin, verim ve verim bileşenlerinin, biyokütlenin, hasat indeksinin ve bitki boyunun azaldığını göstermiştir. Prolin uygulamasının normal ve su stresi koşullarında ölçülen özellikler üzerinde olumlu etkisi görülmüştür. En yüksek tohum verimi (1008. 20 mM prolin konsantrasyonunda 6 yapraklı ve çiçeklenme olmak üzere iki aşamada 50 mm buharlaştırma ve prolin püskürtme sonrası sulama ve ilaçlama kombinasyonu uygulamasında 96 g m-2) elde edilmiş ve en düşük tohum verimi (489,88 g m-2) elde edilmiştir (Sadeghipour, 2020). Pirinç (*Oryza sativa* L.) bitkisinde

tuzluluk stresine karşı 12 saat süre ile uygulanan 1,5 ve 10 mM prolin dozu, kök ve sürgün uzunluğunun ve klorofil konsantrasyonunun artmasını sağlanmıştır (Deivanai ve ark, 2011). Ali ve ark. (2007), çalışmalarında iki mısır çeşidinin dört haftalık bitkileri %60 tarla kapasitesine eşdeğer nem içeriği korunarak su stresine maruz bırakılmıştır. Su stresi, her iki mısırın büyümesini ve fotosentetik kapasitesini azaltmıştır. Yapraktan 30 mM prolin uygulamasının diğer seviyeye kıyasla su stresi toleransını tetiklemede daha etkili olduğu ifade edilmiştir.

Çinko (Zn) uygulamalarının, reaktif oksijen türlerini (ROS) azaltabileceği, süperoksit dismutaz (SOD), peroksidaz (POD) ve katalaz (CAT) gibi antioksidan enzimlerin konsantrasyonunu ise arttırabileceği bilinmektedir. Çinko uygulamaları bitkilerde çeşitli fizyolojik değişikliklerin ve savunma mekanizmalarının etkinleştirilmesini sağlayarak, bitkilerde abiyotik streslere karşı stabilite sağlamaktadır. Yapılan birçok çalışma ile çinko uygulamalarının bitkilerde metabolik süreçlerin iyileştirilmesine destek olduğu tespit edilmiştir. Çinko uygulamaları, abiyotik stresi yönetmenin düşük maliyetli ve sürdürülebilir bir yoludur. Ancak stres altındaki rolü konusunda daha detaylı araştırmaların yapılması gerekmektedir.

KAYNAKÇA

Aksoy, F., (2021). *Farklı Sulama Seviyeleri ve Prolin Uygulamasının Çilek Bitkisindeki Verim ve Morfo-Fizyolojisi Üzerine Etkileri.* Ç. Ü. Tarımsal Yapılar ve Sulama Bölümü. Yüsek Lisans tezi, 77 sayfa

Aktaş, L. (2015). Prolin Uygulamasının Defne Fidelerinin Kuraklık Toleransının Uyarılması Üzerine Etkileri. *Cumhuriyet Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Fen Bilimleri Dergisi*, *36*(1), 17-27.

Ali, Q., Ashraf, M., & Athar, H. U. R. (2007). Exogenously applied proline at different growth stages enhances growth of two maize cultivars grown under water deficit conditions. *Pakistan Journal of Botany*, *39*(4), 1133-1144.

Ben Ahmed, C., Ben Rouina, B., Sensoy, S., Boukhriss, M., & Ben Abdullah, F. (2010). Exogenous proline effects on photosynthetic performance and antioxidant defense system of young olive tree. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, *58*(7), 4216-4222.

Blum, A., & Jordan, W. R. (1985). Breeding crop varieties for stress environments. *Critical Reviews in Plant Sciences*, *2*(3), 199-238.

Büyük, İ., Soydam-Aydın, S., & Aras, S. (2012). Bitkilerin stres koşullarına verdiği moleküler cevaplar. *Turkish Bulletin of Hygiene & Experimental Biology/Türk Hijyen ve Deneysel Biyoloji*, *69*(2).

Deivanai, S., Xavier, R., Vinod, V., Timalata, K., & Lim, O. F. (2011). Role of exogenous proline in ameliorating salt stress at early stage in two rice cultivars. *Journal of Stress Physiology & Biochemistry*, *7*(4), 157-174.

Demir, Y., & Kocaçalişkan, İ. (2001). Effects of NaCl and proline on polyphenol oxidase activity in bean seedlings. *Biologia Plantarum*, *44*, 607-609.

Emamverdian, A., Ding, Y., Mokhberdoran, F., & Xie, Y. (2015). Heavy metal stress and some mechanisms of plant defense response. *The scientific world journal*, *2015*.

Güngör, A. (2022). *Farklı Su Kısıtı Koşullarında Salisilik Asit ve Prolin Uygulamalarının Karpuz Bitkisinin (Citrullus lanatus) Verim, Kalite Parametreleri ve Enzim Aktiviteleri Üzerine Etkisi.* Samsun Ondokuz Mayıs Üniversitesi Fen Bilimleri Ens., Doktora Tezi. 138 s.,

Hare, P.D., Cress, W.A. (1997) Bitkilerde strese bağlı prolin birikiminin metabolik etkileri. *Bitki Büyüme Yönetmeliği*, *21*:79–102

Hayat, S., Hayat, Q., Alyemeni, M. N., Wani, A. S., Pichtel, J., & Ahmad, A. (2012). Role of proline under changing environments: a review. *Plant signaling & behavior*, *7*(11), 1456-1466.

Hussain, R., Ayyub, C. M., Shaheen, M. R., Rashid, S., Nafees, M., Ali, S., ... & Mora-Poblete, F. (2021). Regulation of osmotic balance and increased antioxidant activities under heat stress in *Abelmoschus esculentus* L. triggered by exogenous proline application. *Agronomy*, *11*(4), 685.

Kaur, G., & Asthir, B. J. B. P. (2015). Proline: a key player in plant abiotic stress tolerance. *Biologia plantarum*, *59*, 609-619.

Kılıç, B. (2020). *Prolin ön uygulamasının kuraklık stresi koşullarındaki karaçam tohumlarının çimlenmesi üzerine etkilerinin araştırılması* (Master's thesis, Artvin Çoruh Üniversitesi/Lisansüstü Eğitim Enstitüsü).

Koç, E. (2013). The effect of exogenous proline and salicylic acid application on proline and apoplastic protein in cold tolerance of pepper callus cultures. *International Journal of Agriculture and Biology*, *15*(2).

Küçük, S. (2013). *Yapraktan Glisin Betain ve Prolin Uygulamasının Tuz Stresi Altındaki Zeytin Bitkisine Etkilerinin İncelenmesi.* . ADÜ. Fen Bilimleri Ens., Y. Lisans Tezi. 93 s., Aydın.

Lichtenthaler, H. K. (1996). Vegetation stress: an introduction to the stress concept in plants. *Journal of plant physiology*, *148*(1-2), 4-14.

Lichtenthaler, H. K. (1998). The stress concept in plants: an introduction. *Annals of the new York Academy of sciences*, *851*, 187-198.

Mohammadrezakhani, S., Hajilou, J., Rezanejad, F., & Zaare-Nahandi, F. (2019). Assessment of exogenous application of proline on antioxidant compounds in three Citrus species under low temperature stress. *Journal of Plant Interactions*, *14*(1), 347-358.

Özden, M., Dikilitaş, M., Gürsöz, S., & Bekir, A. K. (2014). 110r Anacı Üzerine Aşılı Şiraz Üzüm (*Vitis Vinifera* L.) Çeşidinin Nacl Ve Prolin

Uygulamalarına Karşı Fizyolojik Ve Biyokimyasal Tepkileri. *Harran Tarım ve Gıda Bilimleri Dergisi*, *15*(1), 1-9.

Posmyk, M. M., & Janas, K. M. (2007). Effects of seed hydropriming in presence of exogenous proline on chilling injury limitation in *Vigna radiata* L. seedlings. *Acta Physiologiae Plantarum*, *29*, 509-517.

Sadeghipour, O. (2020). Cadmium toxicity alleviates by seed priming with proline or glycine betaine in cowpea (Vigna unguiculata (L.) Walp.). *Egyptian Journal of Agronomy*, *42*(2), 163-170.

Saibi, W., Brini, F., & Brini, F. (2020). Proline, a peculiar amino acid with astucious functions in development and salt tolerance process in plants. *J. Food Nutr. Metab*, *3*, 1-8.

Saibi, W., Feki, K., Yacoubi, I., & Brini, F. (2015). Bridging between proline structure, functions, metabolism, and involvement in organism physiology. *Applied biochemistry and biotechnology*, *176*, 2107-2119.

Shin, H., Oh, S., Kim, D., Hong, J. K., Yun, J. G., Lee, S. W., & Son, K. H. (2018). Induced freezing tolerance and free amino acids perturbation of spinach by exogenous proline. *Journal of Plant Biotechnology*, *45*(4), 357-363.

Srivastava, A., Gupta, M., & Srivastava, S. (2017). Os (VIII) Catalyzed Oxidative Cleavage of Pyrrolidine Ring in L-Proline by Sodium Periodate (NaIO4) in Alkaline Medium.

Suprasanna, P., Rai, A. N., Kumari, P. H., Kumar, S. A., & Kishor, P. K. (2014). Modulation of proline: implications in plant stress tolerance and development. In *Plant adaptation to environmental change: significance of amino acids and their derivatives* (pp. 68-96).

Trovato, M., Maras, B., Linhares, F., & Costantino, P. (2001). The plant oncogene rolD encodes a functional ornithine cyclodeaminase. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *98*(23), 13449-13453.

Vogel, H. J., & Davis, B. D. (1952). Glutamic γ-semialdehyde and Δ1-pyrroline-5-carboxylic acid, intermediates in the biosynthesis of proline1, 2. *Journal of the American chemical Society*, *74*(1), 109-112.

Yaish, M. W. (2015). Proline accumulation is a general response to abiotic stress in the date palm tree (Phoenix dactylifera L.). *Genet Mol Res*, *14*(3), 9943-9950.

Yüksel, B., & Aksoy, Ö. (2017). Su stresi koşullarında bitkilerde gözlenen değişimler. *Türk Bilimsel Derlemeler Dergisi*, *10*(2), 1-5.

Zouari, M., Hassena, A. B., Trabelsi, L., Rouina, B. B., Decou, R., & Labrousse, P. (2019). Exogenous proline-mediated abiotic stress tolerance in plants: Possible mechanisms. *Osmoprotectant-Mediated Abiotic Stress Tolerance in Plants: Recent Advances and Future Perspectives*, 99-121.

BÖLÜM 7

HERBİVOR BÖCEKLER İLE BİTKİ BÜYÜMESİNİ TEŞVİK EDEN RİZOBAKTERİLERİN (PGPR) ETKİLEŞİMLERİ

Dr. Öğr. Üyesi Hilmi KARA[1*]

Prof. Dr. Mehmet Salih ÖZGÖKÇE[2]

DOI: https://dx.doi.org/10.5281/zenodo.10031396

[1*] Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Ziraat Fakültesi; Bitki Koruma Bölümü, Van, Türkiye. *hilmikara@yyu.edu.tr
[2] Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Ziraat Fakültesi; Bitki Koruma Bölümü, Van, Türkiye. msozgokce@yyu.edu.tr

GİRİŞ

Birçok farklı ekosistemde yaşayabilen böcekler (Arthropoda: Hexapoda), hayvanlar âlemi içerisinde bir milyondan fazla sayıda türe sahip (Stork, 2018) en büyük ve en kalabalık sınıfı oluşturmaktadır (Redak, 2023). Yüksek tür yoğunluğuna sahip olan böceklerin %1'den daha azı bitkilerde zarar oluşturmakta ve ürün kaybına neden olmaktadır (Disi ve ark., 2019).

Herbivor böceklerin oluşturduğu maddi kayıpların önlenmesinde çeşitli mücadele yöntemleri uygulanmaktadır. Bunlar arasında, kimyasal mücadele, uygulama kolaylığı, düşük maliyet ve hızlı sonuç alabilme gibi avantajları nedeniyle üreticiler tarafından en sık kullanılan yöntemdir (Gupta ve ark., 2019). Ancak bu mücadele yönteminin insan ve çevre sağlığına, doğal kaynaklara birçok olumsuz etkileri vardır. Dünyada yıllık yaklaşık olarak iki milyon ton böcek ilacı kullanılmaktadır (Aktar ve ark., 2009). Yoğun kullanılan böcek ilaçları insan ve hayvanlarda toksik etki, çevre kirliliği, su ve toprak kirliliği, hedef dışı organizmalara etkisi ve direnç gelişimi gibi olumsuzluklara yol açtığı belirlenmiştir (Isman, 2008). Doğal dengenin insan eliyle yok edilmesinin acı tablosu son yıllarda oldukça belirgin bir şekilde hem çevresel-iklimsel değişiklikler hem de kanser gibi ölümcül hastalıkların oranlarının artması ile üreticileri ve tüketicileri kimyasal mücadeleden uzaklaştırma eğilimine iterek daha doğal mücadele yöntemlerinin kullanılmasına yönlendirmiştir.

Kimyasal maddelerden uzaklaşmak ve doğal dengeyi korumak için geçerli ve etkili mücadele yöntemlerinden biri olarak kullanılan biyolojik mücadele, kısaca zararlıların popülasyonlarını düşürmek için diğer canlıların kullanılması olarak açıklanabilir. Uluslararası Biyokontrol Üreticileri Derneği'ne göre biyokontrol terimi içerisinde makrobiyal (parazitoitler, predatörler, entomopatojen nematodlar), mikrobiyal (bakteri, virüs, toprak mikroorganizmaları), doğal ürünler (doğal ve biyokimyasal ürünler) ve semiyokimyasallar (feromonlar) olarak dört gruba ayrılmıştır (Mishra ve ark., 2015).

Mikrobiyal etmenlerden PGPR, bitkilerin köklerini kolonize eden spesifik bakteri türleri olan "Bitki Büyümesini Teşvik Eden Rizobakteri" anlamına gelir. Bu bakterilerin bitkiler üzerinde artan büyüme oranları, toprak patojenlerinin baskılanması sonucunda hastalıklara ve böcek zararlılarına karşı sistemik direncin uyarılması (induce systemic resistance, ISR) dahil olmak üzere çeşitli yararlı etkileri olduğu belirlenmiştir (Bezemer ve Dam, 2005; Van Oosten ve ark.,2008; Valenzuela ve ark., 2010; Pineda, 2010). ISR'nin birçok bitki türünde patojen bakterilere, mantarlara, virüslere, nematodlara ve son zamanlarda böceklere karşı etkinliği kanıtlanmıştır (Van Oosten ve ark., 2008; Friman ve ark., 2021).

PGPR'nin herbivor zararlılar üzerindeki etkisi dolaylı veya doğrudan olabilmektedir (Şekil 1). Dolaylı etkisi sistemik direncin uyarılması (ISR) yoluyla meydana gelirken, doğrudan etkisi ise bakterilerin entomopatojen (böcek patojenleri) olarak hareket etmesiyle meydana gelmektedir. PGPR'nin böceklere karşı dolaylı etkisi,

mikroorganizmanın konukçu bitki tarafından tanınmasıyla başlatılır. Bu tanıma, savunmayla ilgili kimyasal bileşiklerin, enzimlerin, proteinlerin, ikincil metabolitlerin ve uçucu organik bileşiklerin (volatile organic compound, VOC) herbivor böceklere karşı biyosentezine yol açabilecek spesifik hormonal sinyal yollarının ortaya çıkmasına yol açar (Pineda ve ark., 2010; Pineda ve ark., 2013; Van Oosten ve ark., 2008; Zamioudis ve Pierterse, 2012; Zebelo ve ark., 2016). Savunmayla ilgili bu bileşikler terpenleri, sideroforları, hidrojen siyanürü ve böcekler için toksik olan diğer ikincil metabolitleri içerebilir. Bu bileşiklerin oluşumu, bitkilerin böceklere karşı koyabilmesi için toksik olan bileşikleri üreterek patojen veya böcek saldırısına yanıt vermesini sağlayan bir savunma mekanizması oluşturmasıdır.

PGPR'nin böceklere karşı doğrudan etkisi ise, bakterilerin entomopatojen olarak hareket etmesiyle ortaya çıkar. Bu durumda, bakteriler toksin veya böcek için doğrudan toksik olan diğer bileşikleri üretir ve üzerine ya da içine yerleştiği böceğin ölümüne neden olur. Zararlı böcek kontrolünde yaygın olarak kullanılan PGPR cinsleri arasında *Pseudomonas, Bacillus, Burkholderia, Xenorhabdus, Photorhabdus, Agrobacterium, Streptomyces* vb. bulunur (Dey ve ark. 2014). Bu bölümde PGPR bakterilerinin herbivor böcekler üzerindeki dolaylı ve doğrudan etkileri ile bitkilerin zararlılara karşı bağışıklık sisteminin tetiklenmesi üzerine bilgiler verilmektedir.

1. PGPR'NİN BİTKİ ARACILI BÖCEK ETKİLEŞİMLERİ

Bitki büyümesini teşvik eden rizobakteri (PGPR), atmosferik nitrojeni sabitleyerek ve besin yarayışlılığını artırarak (Spaink, 2000) bitki büyümesini ve sağlığını geliştirmektedirler. Ayrıca indol-3-asetik asit (IAA), sitokininler, oksinler, giberellinler vb. dahil olmak üzere bitki büyümesiyle ilgili temel hormonların biyosentezinde yer alırlar. Bu hormonların bitkideki görevleri kısaca şu şekilde açıklanabilir. Indol-3-Asetik asit (IAA) bitkilerde doğal olarak sentezlenebilen tek hormondur. IAA çoğunlukla bitkilerin genç yapraklarının apikal tohumcuklarında üretilip, hücre bölünmesi ve uzamasını indükleyicilerden biri olarak bilinir. Sitokininler, hücre bölünmesini başlatan hormonlardır. Aktif hücre bölünmesine sahip tüm dokular yüksek miktarda sitokinin içermektedir. Oksinler büyüme düzenleyiciler içinde ilk keşfedilen olup, bu hormonlar hücrelerin uzamasını ve bölünmesini arttırarak büyümeyi teşvik etmektedir. Giberillinler de oksinler gibi düşük dozlarda büyümeyi ve gelişmeyi teşvik edici hormonlardır. Bazı PGPR türleri, ikincil metabolitlerin ve enzimlerin biyosentezi yoluyla bitki büyümesini destekler (Vacheron ve ark., 2013; Zhang ve ark., 2008). Rizobakteri ayrıca bitki sağlığını arttırır ve ISR yoluyla bitki patojenlerine ve herbivor böceklere karşı direnci tetikler (Hossain ve ark. 2016; Rashid ve Chung 2017).

PGPR bitki büyümesini teşvik ederek bitkilerin besin bileşiminin iyileşmesine neden olmaktadır (Pandey ve ark. 2018). PGPR, artan besin ve su alımının bir sonucu olarak herbivor böceklerin yaraladığı

bitki dokusunun yenilenmesi yoluyla bitki toleransını arttırır (Rashid ve Chung 2017). Bu nedenle PGPR, besin mevcudiyetini ve emilimini, ikincil bitki metabolitlerinin ve büyüme hormonlarının üretimini artırarak böceklere, hastalıklara ve yabancı otlara karşı bitkinin direncini arttırır; bu değişimler bitkilerde doğrudan veya dolaylı olarak savunmayı tetiklemektedir.

2. HERBİVOR BÖCEKLERE KARŞI BİTKİDE PGPR ETKİLEŞİMİ İLE ISR OLUŞUMU

Sistemik Edinilmiş Direnç (SAR), salisilik asite (SA) bağımlı sinyal yolu tarafından kontrol edilir ve başlangıcı endojen olarak sentezlenen SA'da lokal ve sistemik artışları içerir, bu da düzenleyici protein NPR1'in aktivasyonuna ve ardından patogenezle ilişkili (PR) proteinlerin (PR1, PR2 ve PR5) harekete geçmesine sebep olur (Hammerschmidt 2009; Van Loon ve Van Strien 1999).

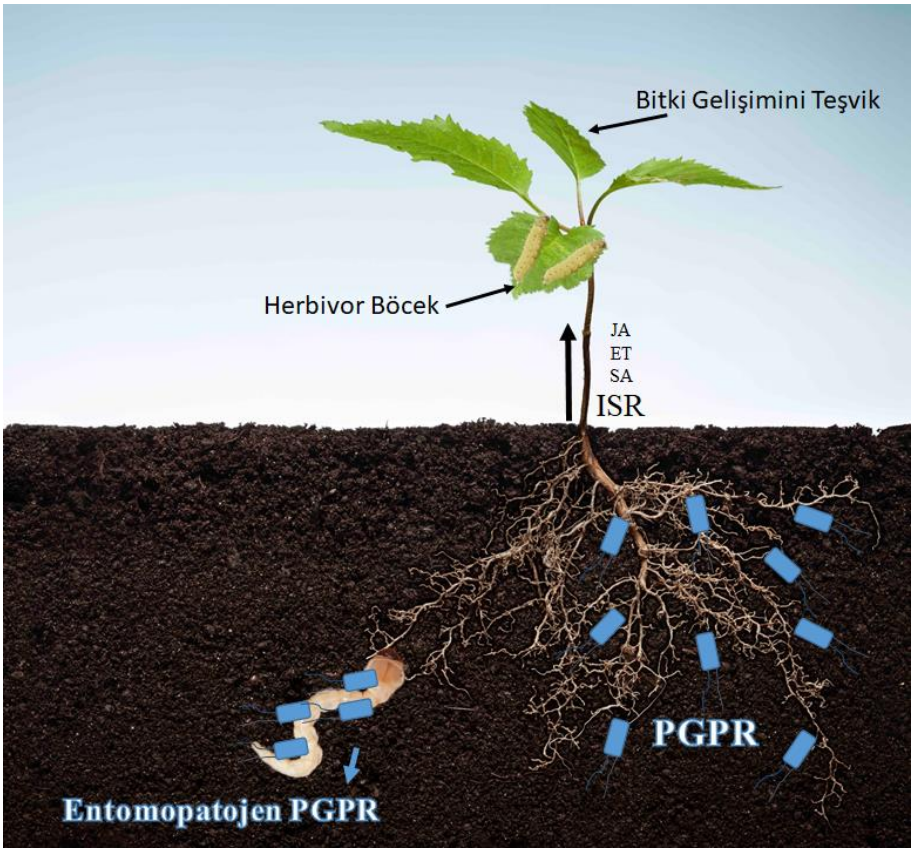
PGPR ile tetiklenen uyarılmış sistemik direnç (ISR), JA/ET'ye bağımlı sinyal yolu tarafından düzenlenir ve bitki defensin 1.2'yi (PDF1.2) kodlayan genin ekspresyonuyla ilişkilidir (Van Oosten ve ark. 2008). *Pseudomonas fluorescens* WCS417r tarafından tetiklenen ISR'nin, *Arabidopsis* jasmonat tepkisi mutant jar1'de, etilen tepkisi mutantı etr1'de ve PR genlerini eksprese etmeyen mutant npr1'de bloke edilmektedir (Pieterse ve ark., 1998). Bu, WCS417r (*Pseudomonas fluorescens*, PGPR) aracılı ISR'nin JA/ET sinyal yoluna ve düzenleyici protein NPR1'e bağlı olduğunu göstermektedir (Niu ve ark., 2011).

Yararlı rizobakteriler, bitkiyi çeşitli hücresel savunma yanıtlarının güçlendirilmiş aktivasyonu için hazırlayarak ISR'yi tetikler ve bunlar daha sonra patojen saldırısı üzerine hazırlanır (Conrath ve ark. 2006). Güçlendirilmiş tepkiler arasında oksidatif patlama (Iriti ve ark. 2003), hücre duvarı takviyesi, savunmayla ilişkili enzimlerin birikmesi ve ikincil metabolitlerin üretimi (Benhamou ve Belanger 1998) yer alır (Yedidia ve ark., 2003).

Bitkiye yerleşmiş olan PGPR bakterilerinin bitkide sistemik direncin uyarılması (ISR) olayının temelinde priming vardır. Priming, bitkilerin patojenlere ve herbivor böceklere karşı savunma yapabilmesi için hazırlandığı fizyolojik bir süreç olarak tanımlanmaktadır (Conrath 2011). Bu fizyolojik süreç sonrasında bitkinin çeşitli patojenlere ve herbivor zararlılara karşı toleranslı olduğu görülmüştür (Pieterse ve ark., 2014).

Herbivor böceklere karşı etkili olan uyarılmış sistemik direnç (ISR), bitkilerin doğuştan gelen bağışıklığını güçlendirerek çalışır. Isırıcı-çiğneyici ağız parçalarına sahip bir böcek jasmonik asite bağımlı olan indüklenmiş sistemik dirence benzer yanıtları bitkide oluşturur. Bu sayede aynı bitkiye daha sonra gelen herbivor böceklere karşı indüklenmiş direnci teşvik edebilir (Gatehouse 2002). Bitkideki sinyal yolları aracılığıyla PGPR, herbivor böceklerin konukçu bitkilerle etkileşimine göre bitki hormonlarını (JA, ET ve SA) artış ya da azalışlarını düzenler (Shavit ve ark., 2013). Çiğneyici ağız yapısındaki böceklere karşı PGPR uygulanmış bitkilerde yüksek düzeyde JA ve JA ile ilişkili genlerin eksprese olduğu bildirmiştir (Zebelo ve ark., 2016).

Üstünde sokucu emici ağız yapısındaki böceklerin beslendiği bitkilerde ise PGPR'nin ortaya çıkardığı ISR, hem JA/ET hem de SA sinyal yollarına bağlıdır (Niu ve ark., 2011).



Şekil 1. PGPR'ın doğrudan ve dolaylı olarak bitkide oluşturduğu savunma ile PGPR bakterilerinin bitki gelişimine katkısı. Priming ile herbivor zararlılara karşı ISR'nin oluşması ve savunmada görev alan bitki hormonlarının üretilmesi.

Lepidoptera, Coleoptera ve Diptera gibi böcek takımlarının üyelerine ait ısırıcı-çiğneyici böceklerinin davranışlarına ilişkin PGPR aracılı bitki savunmalarına bazı örnekler verilebilir. Simmons-Elliott ve ark., (2023) PGPR suşlarının tekli ve karışımlarının *Helicoverpa zea*'nın tatlı

mısır bitkileri üstünde beslenme ve ovipozisyon davranışı üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Bitkilerin PGPR suşları ile muamele edilmesinin, ergin böcekler tarafından bırakılan yumurta sayısını önemli ölçüde düşürdüğünü ve zararlının larvalarının neden olduğu yaprak alanı hasarını azalttığı belirlenmiştir. Van Oosten ve ark. (2008), *P. fluorescens* WCS417r'nin ısırıcı-çiğneyici ağız yapısındaki larvalara sahip olan *Spodoptera exigua* üzerinde olumsuz etkisinin olduğunu beyan etmiştir. Pangesti ve ark. (2015), *Mamestra brassicae*'nin, *P. fluorescens* WCS417r ile muamele edilmiş *Arabidopsis thaliana*'nın kökleriyle beslendiğinde daha az ağırlığa sahip olduğunu ve gelişmesinin de geri kaldığını belirlemişlerdir.

Sokucu-emici ağız parçalarına sahip böcekler, beslenme yoluyla sınırlı doku hasarına neden olma eğilimindedir ve genellikle yaranın neden olduğu savunma tepkisinden kaçabilirler. Bu böcekler, bir sinyal molekülü olarak salisilik asite bağımlı olan sistemik olarak kazanılmış direnç (SAR) tepkilerine benzer savunmaları aktive edebilir (Walling 2000).

Sokucu-emici böceklerde PGPR tarafından indüklenen sistemik direnç, bitkiye veya PGPR'ın cinsine bağlı olarak olumlu ya da olumsuz olarak değişiklikler gösterebilmektedir. Bu etki aynı zamanda hedeflenen böceklerin ana zararlı mı yoksa genel zararlı mı olduğuna da bağlı olmaktadır (Pineda ve ark., 2012). Örneğin Camelot isimli dolmalık biber çeşidine uygulanan ticari *Bacillus subtilis* GB03 ve *Bacillus amyloliquefaciens* IN937a suşlarının yüksek populasyon yoğunluğunda *Myzus persicae* (Sulzer)'ye karşı bitki toleransını arttırdığı beyan

edilmiştir (Herman ve ark. 2008). Ancak yine aynı çeşit dolmalık bibere uygulanan *Paenobacillus macerans* GB122 ve *Bacillus amyloliquefaciens* GB99 suşlarının yerleştiği bitki üstünde beslenen *M. persicae*'nin gelişmesinde ve üremesinde herhangi bir olumsuz etkinin görülmediği beyan edilmiştir (Boutard-Hunt ve ark., 2009). *Pseudomonas fluorescens* WCS417r suşu'nun *Arabidopsis thaliana*'ya uygulanması ve ardından *M. persicae* ile beslenmesi sonucunda afidin vücut ağırlığında ve kalıtsal üreme yeteneği değerinde istatistiksel olarak önemli derecede artış olduğu kaydedilmiştir. Burada PGPR'ın herbivor böceğe karşı olumsuz bir etkisi görülmezken aynı denemede aynı uygulama yapılmış bitki üstünde beslenen *Brevicoryne brassicae* için kontrol grubuna kıyasla hem ağırlık artışı hem de kalıtsal üreme yeteneği değerinde olumlu ya da olumsuz bir etkisinin olmadığı bildirilmiştir (Pineda ve ark., 2012).

SONUÇ

Bu bölümde PGPR bakterilerinin bitki aracılığında herbivor böcekler ile olan etkileşimleri üzerine durulmuştur. PGPR bakterilerinin bitkinin gelişimine olan olumlu katkıları, herbivor böceklere karşı entomopatojen olarak etkileri ve bitkide uyarılmış sistemik dirence katkıları ele alınmıştır. Geçmiş yıllarda PGPR bakterilerinin patojenlere karşı neden olduğu sistemik direncin etkisi birçok çalışmada farklı şekillerde ele alınarak detaylandırılırken, bu direncin herbivor böcekler üzerindeki etkisinin ayrıntıları ise son yıllarda yapılan çalışmalar ile henüz aydınlatılmaktadır. PGPR'nin bitkide meydana getirdiği hormonal değişiklikler ile böceklere karşı oluşan savunmanın kanıtları

ortaya konulurken bir yandan da bitkinin uçucu organik bileşikler salgılaması ile doğal düşman aktivitesini arttırması üzerine de durulmaktadır. Bu bağlamda yapılacak olan yeni çalışmalarda farklı PGPR bakteri suşlarının farklı zararlı ya da yararlı böcek gruplarına olan etkilerinin belirlenmesi sürdürülebilir tarım doğrultusunda entegre zararlı yönetimi programında PGPR bakterilerinin yerini doğru şekilde almasını sağlayacaktır.

KAYNAKÇA

Aktar, M. W., Sengupta, D., & Chowdhury, A. (2009). Impact of pesticides use in agriculture: their benefits and hazards. Interdisciplinary toxicology, 2(1), 1.

Benhamou, N., & Bélanger, R. R. (1998). Benzothiadiazole-mediated induced resistance to *Fusarium oxysporum* f. sp. radicis-lycopersici in tomato. Plant physiology, 118(4), 1203-1212.

Bezemer, T.M. & Van Dam, N.M., (2005) Linking aboveground and belowground interactions via induced plant defenses. Trends Ecol. Evol. 20, 617–624

Boutard-Hunt, C., Smart, C. D., Thaler, J., & Nault, B. A. (2009). Impact of plant growth-promoting rhizobacteria and natural enemies on *Myzus persicae* (Hemiptera: Aphididae) infestations in pepper. Journal of economic entomology, 102(6), 2183-2191.

Conrath, U. (2011). Molecular aspects of defence priming. Trends in plant science, 16(10), 524-531.

Conrath, U., Beckers, G. J., Flors, V., García-Agustín, P., Jakab, G., Mauch, F., & Mauch-Mani, B. (2006). Priming: getting ready for battle. Molecular plant-microbe interactions, 19(10), 1062-1071.

Dey, R., Pal, K. K., & Tilak, K. V. B. R. (2014). Plant growth promoting rhizobacteria in crop protection and challenges. In Future challenges in crop protection against fungal pathogens (pp. 31-58). New York, NY: Springer New York.

Disi, J., Simmons, J., & Zebelo, S. (2019). Plant growth-promoting rhizobacteria-induced defense against insect herbivores. Field crops: sustainable management by PGPR, 385-410.

Friman, J., Pineda, A., van Loon, J. J., & Dicke, M. (2021). Bidirectional plant-mediated interactions between rhizobacteria and shoot-feeding herbivorous insects: a community ecology perspective. Ecological Entomology, 46(1), 1-10.

Gatehouse, J. A. (2002). Plant resistance towards insect herbivores: a dynamic interaction. New phytologist, 156(2), 145-169.

Gupta, R. C., Mukherjee, I. R. M., Malik, J. K., Doss, R. B., Dettbarn, W. D., & Milatovic, D. (2019). Insecticides. In Biomarkers in toxicology (pp. 455-475). Academic Press.

Hammerschmidt, R. (2009). Systemic acquired resistance. Advances in botanical research, 51, 173-222.

Herman, M. A. B., Nault, B. A., & Smart, C. D. (2008). Effects of plant growth-promoting rhizobacteria on bell pepper production and green peach aphid infestations in New York. Crop Protection, 27(6), 996-1002.

Hossain, M. T., Khan, A., Chung, E. J., Rashid, M. H. O., & Chung, Y. R. (2016). Biological control of rice bakanae by an endophytic *Bacillus oryzicola* YC7007. The plant pathology journal, 32(3), 228.

Iriti, M., Rabotti, G., De Ascensao, A., & Faoro, F. (2003). Benzothiadiazole-induced resistance modulates ozone tolerance. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 51(15), 4308-4314.

Isman, M. B. (2008). Botanical insecticides: for richer, for poorer. Pest Management Science: formerly Pesticide Science, 64(1), 8-11

Mishra J., S. Tewari, S. Singh & N.K. Arora 2015. Biopesticides: where we stand?. (Editor: N. K. Arora, Plant Microbes Symbiosis. Springer, India, pp. 37-75

Niu, D. D., Liu, H. X., Jiang, C. H., Wang, Y. P., Wang, Q. Y., Jin, H. L., & Guo, J. H. (2011). The plant growth–promoting rhizobacterium *Bacillus cereus* AR156 induces systemic resistance in *Arabidopsis thaliana* by simultaneously activating salicylate-and jasmonate/ethylene-dependent signaling pathways. Molecular plant-microbe interactions, 24(5), 533-542.

Pandey, C., Bajpai, V. K., Negi, Y. K., Rather, I. A., & Maheshwari, D. K. (2018). Effect of plant growth promoting *Bacillus* spp. on nutritional properties of *Amaranthus hypochondriacus* grains. Saudi Journal of Biological Sciences, 25(6), 1066-1071.

Pangesti, N., Pineda, A., Dicke, M., & Van Loon, J. J. A. (2015). Variation in plant-mediated interactions between rhizobacteria and caterpillars: potential role of soil composition. Plant Biology, 17(2), 474-483.

Pieterse, C. M., Van Wees, S. C., Van Pelt, J. A., Knoester, M., Laan, R., Gerrits, H., ... & Van Loon, L. C. (1998). A novel signaling pathway controlling induced systemic resistance in Arabidopsis. The Plant Cell, 10(9), 1571-1580.

Pieterse, C. M., Zamioudis, C., Berendsen, R. L., Weller, D. M., Van Wees, S. C., & Bakker, P. A. (2014). Induced systemic resistance by beneficial microbes. Annual review of phytopathology, 52, 347-375.

Pineda, A. N. A., Soler, R., Weldegergis, B. T., Shimwela, M. M., Van Loon, J. J., & Dicke, M. (2013). Non-pathogenic rhizobacteria interfere with the attraction of parasitoids to aphid-induced plant volatiles via jasmonic acid signalling. Plant, Cell & Environment, 36(2), 393-404.

Pineda, A., Zheng, S. J., Van Loon, J. J. A., & Dicke, M. (2012). Rhizobacteria modify plant–aphid interactions: a case of induced systemic susceptibility. Plant Biology, 14, 83-90.

Pineda, A., Zheng, S. J., van Loon, J. J., Pieterse, C. M., & Dicke, M. (2010). Helping plants to deal with insects: the role of beneficial soil-borne microbes. Trends in plant science, 15(9), 507-514

Rashid, M. H. O., & Chung, Y. R. (2017). Induction of systemic resistance against insect herbivores in plants by beneficial soil microbes. Frontiers in Plant Science, 8, 1816.

Redak, R. (2023). Introduction to and Importance of Insects. In Forest Entomology and Pathology: Volume 1: Entomology (pp. 1-17). Cham: Springer International Publishing.

Shavit, R., Ofek-Lalzar, M., Burdman, S., & Morin, S. (2013). Inoculation of tomato plants with rhizobacteria enhances the performance of the phloem-feeding insect *Bemisia tabaci*. Frontiers in plant science, 4, 306.

Simmons-Elliott, J., Tolosa, T., & Zebelo, S. (2023). Plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR) modulates sweet corn-corn earworm interactions. Crop Protection, 169, 106246.

Spaink, H. P. (2000). Root nodulation and infection factors produced by rhizobial bacteria. Annual Reviews in Microbiology, 54(1), 257-288.

Stork, N. E. (2018). How many species of insects and other terrestrial arthropods are there on Earth?. Annual review of entomology, 63, 31-45.

Valenzuela-Soto, J. H., Estrada-Hernández, M. G., Ibarra-Laclette, E., & Délano-Frier, J. P. (2010). Inoculation of tomato plants (*Solanum lycopersicum*) with growth-promoting *Bacillus subtilis* retards whitefly *Bemisia tabaci* development. Planta, 231(2), 397-410.

Van Loon, L. C., & Van Strien, E. A. (1999). The families of pathogenesis-related proteins, their activities, and comparative analysis of PR-1 type proteins. Physiological and molecular plant pathology, 55(2), 85-97.

Van Oosten, V.R. et al. (2008) Differential effectiveness of microbially induced resistance against herbivorous insects in *Arabidopsis*. Mol. Plant-Microbe Interact. 21, 919–930

Walling, L. L. (2000). The myriad plant responses to herbivores. Journal of plant growth regulation, 19, 195-216.

Yedidia, I., Shoresh, M., Kerem, Z., Benhamou, N., Kapulnik, Y., & Chet, I. (2003). Concomitant induction of systemic resistance to *Pseudomonas syringae* pv. lachrymans in cucumber by *Trichoderma asperellum* (T-203) and accumulation of phytoalexins. Applied and Environmental Microbiology, 69(12), 7343-7353.

Zamioudis, C., & Pieterse, C. M. (2012). Modulation of host immunity by beneficial microbes. Molecular Plant-Microbe Interactions, 25(2), 139-150.

Zebelo, S., Song, Y., Kloepper, J. W., & Fadamiro, H. (2016). Rhizobacteria activates (+)-δ-cadinene synthase genes and induces systemic resistance in cotton against beet armyworm (*Spodoptera exigua*). Plant, Cell & Environment, 39(4), 935-943.

Zhang, H., Xie, X., Kim, M. S., Kornyeyev, D. A., Holaday, S., & Paré, P. W. (2008). Soil bacteria augment *Arabidopsis* photosynthesis by decreasing glucose sensing and abscisic acid levels in planta. The Plant Journal, 56(2), 264-273.

BÖLÜM 8

BİTKİ - *TRICHODERMA* - BÖCEK İLİŞKİLERİ

Arş. Gör. Dr. Mehmet Ramazan RİŞVANLI[1*]

Prof. Dr. Mehmet Salih ÖZGÖKÇE[2]

Prof. Dr. Remzi ATLIHAN[3]

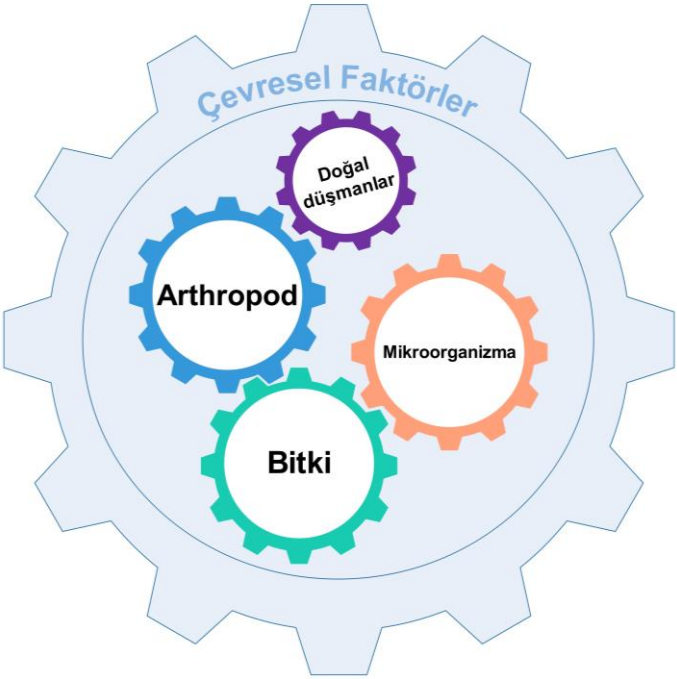
DOI: https://dx.doi.org/10.5281/zenodo.10031404

[1*] Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Ziraat Fakültesi Bitki Koruma Bölümü, Van, Türkiye. *risvanli@yyu.edu.tr
[2] Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Ziraat Fakültesi Bitki Koruma Bölümü, Van, Türkiye. msozgokce@yyu.edu.tr
[3] Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Ziraat Fakültesi Bitki Koruma Bölümü, Van, Türkiye. ratlihan@yyu.edu.tr

GİRİŞ

Dünya nüfusunun sürekli artışı, gıda talebini de istikrarlı bir şekilde artırmaktadır (FAO, 2021). Bu talebe karşılık vermek için tarımsal üretim alanlarında yoğun ve bilinçsiz şekilde kimyasal pestisitler kullanılmaktadır. Pestisitlerin artan kullanımı, canlılara ve toprak, hava ve su gibi doğal kaynaklara zarar vermektedir (Le Goff ve Giraudo, 2019; DeClerck ve ark., 2023). Bu nedenle modern tarım, ekolojik ve moleküler yaklaşımların entegre edildiği yeni bir sürece girmiştir (Pineda ve ark., 2010). Hâlihazırda bitkilerin ıslah edilmesi ile elde edilen yeni çeşitlerin üstünde belenen böceklere karşı aynı tür bitkilerin farklı çeşitlerinde aynı zararlı böcek türüne ait beslenme ve üreme değerlerinde olumlu farklılıklar olduğu belirlenmiştir (Özgökçe ve ark., 2018; Chi ve ark., 2022; Özgökçe ve ark., 2023). Tarımsal üretimde pestisit, kimyasal gübre gibi girdilerin sınırlandırılarak zararlıları kontrol altında tutmak ve elde edilecek ürün miktarını korumak amacıyla sürdürülebilir yeni yöntemlerin geliştirilmesine yönelim artmıştır (Çetintaş ve Kara, 2016; El-Maraghy ve ark., 2021). Son yıllarda zararlılara karşı biyolojik savaş etmenlerinin kullanımına ilaveten, zararlı biyolojisini olumsuz etkileyen ve doğal düşmanları cezbeden toprak kökenli yararlı mikroorganizmaların böcek-bitki etkileşimlerine dahil edilmesi üzerine yeni bir konsept gelişmiş, bitkinin faydalı mikroorganizmalar ile interaksiyonunun herbivorlara karşı toleransını ve direncini artırmada yararlı olabileceği görüşü yaygınlık kazanmıştır (Noman ve ark., 2020).

Bitkiler, mikroorganizmalar ve arthropodlar, tarımsal ekosistemlerde birbirleriyle sürekli etkileşim halindedir. Bu etkileşimler bir makinenin dişlileri gibi birbirine bağlıdır (Şekil 1). Bileşenlerdeki herhangi bir değişiklik, tüm canlıları etkiler ve verim ve zararın artmasına neden olabilir (Pineda ve ark., 2010). Çevresel faktörler, türler arası etkileşimlerin çeşitliliği ve diğer trofik seviyeler gibi diğer faktörler bu etkileşimin anlaşılmasını zorlaştırmaktadır. Bu karmaşanın anlaşılması, tarımsal üretimin sürdürülebilirliği için büyük önem taşımaktadır. Doğadaki karmaşık yapı içerisinde önemli bir yere sahip olan bitkilerin sağlıklı bir şekilde büyümesi için mikroorganizmalarla etkileşimi oldukça önemlidir (Panpatte ve ark., 2017). Bu etkileşimler ekosistemlerin işleyişi için hayati öneme sahiptir.



Şekil 1. Bitki-mikroorganizma-arthropod etkileşimleri

Günümüzde bitki büyümesini teşvik eden toprak kökenli yararlı mikroorganizmaların bitki gelişimini ve verimini artırdığı, bitkiyi patojen organizmalardan koruduğu ve toprak sağlığının korunmasına yardımcı olduğu yaygın olarak kabul edilen bir gerçektir (Kumar ve ark., 2019). Bitkilerdeki çeşitli hastalık etmenleriyle mücadelede bitki-patojen-mikroorganizma interaksiyonundan uzunca bir süredir yararlanılmakta ve başarılı sonuçların elde edildiği çok sayıda çalışma bulunmaktadır (Senthilraja ve ark., 2013; S. Woo ve ark., 2014; Sharma, 2019; Adeleke ve Babalola, 2021; Alınç ve ark., 2021; Grabka ve ark., 2022; Hagh-Doust ve ark., 2022). Ancak toprak kökenli yararlı mikroorganizmaların herbivorlar üzerindeki doğrudan ve bitki aracılı etkilerine ilişkin çalışmalara son zamanlarda odaklanılmıştır (Fernandez-Conradi ve ark., 2018; Grabka ve ark., 2022; Risvanli, 2022). Bitkinin toprakaltı mikrobiyotasında doğal olarak bulunan endofitik funguslar, mikorhizalar, rizobialar, rizobakteriler gibi yararlı mikroorganizmalar, bitki sağlığı ve zararlılara karşı savunmada da önemli rol oynamaktadırlar (Harman, 2006; Lugtenberg ve Kamilova, 2009; Weyens ve ark., 2009; Pieterse ve ark., 2014; Pineda ve ark., 2015; Wielkopolan ve Obrępalska, 2016; Verma ve ark., 2019; Sheridan ve ark., 2023). Toprak kökenli yararlı mikroorganizmalar, zararlı saldırısı altında olan bitkinin savunma tepkisine katkıda bulunmak için çeşitli mekanizmalar geliştirmişlerdir. Bu etmenler genellikle bitki fizyolojisini "bitki gelişiminin desteklenmesi/teşvik edilmesi ve uyarılmış sistemik direnç (ISR)" olarak tanımlanan iki temel mekanizma ile değiştirerek etki göstermektedirler (Lugtenberg ve Kamilova, 2009; Pieterse ve ark., 2014; Noman ve ark., 2020). ISR,

uygun bir uyarıcı ile uyarılan bitkinin sonradan gelen patojen ve herbivor saldırısına karşı bazal direncinin hızlı ve güçlü bir şekilde aktive olmasını tanımlamaktadır (Van Wees ve ark., 2008; El-Maraghy ve ark., 2021; van Dijk, 2021). Toprak kökenli yararlı mikroorganizmalar bitkiye herhangi bir zarar vermeden sistemik dokularda bitki direncini uyarıcı yeteneğe sahiptir. Bu yönleriyle çalışmalarda sıklıkla kullanılan yararlı mikroorganizmalar genellikle *Bacillus* spp., *Azotobacter* spp., *Trichoderma* spp., *Rhizobium* spp., *Azospirillum* spp. *ve Saccharomyce*s spp.'den seçilmektedir. Bitki gelişimini teşvik eden (Plant growth promoting fungi – PGPF) toprak kökenli yararlı funguslardan biri olan *Trichoderma* türlerinin ISR'yi tetiklemekte çok başarılı oldukları bilinmektedir (Wardle ve ark., 2004; Bezemer ve van Dam, 2005; van Loon, 2007; Van Der Heijden ve ark., 2008; Gehring ve Bennett, 2009; Lugtenberg ve Kamilova, 2009; Pineda ve ark., 2015; S. L. Woo ve Pepe, 2018).

Trichoderma (teleomorph Hypocrea), neredeyse tüm ortamlarda (tarım, orman, dağ, çayır ve çöl ekosistemleri ile tatlı ve deniz suları) bulunan bazı suşları serbest yaşayan, bazıları ise bitkilerle yakın ilişkiler gösteren mikroorganizmalardır (Chaverri ve ark., 2003; Sheridan ve ark., 2023). *Trichoderma* türleri bitkiler ve hayvanlar için patojenik olmadıkları, zararlı kalıntılar veya ikincil metabolitler üretmediği ve çevre kirliliğine veya hedef patojenlerde dirence neden olmadığı için güvenli ve çevre dostu biyokontrol ajanları olarak kabul edilmektedirler (Bardin ve ark., 2015). Ayrıca, *Trichoderma* spp. bakteriler, virüsler ve nematodlar gibi diğer biyolojik kontrol ajanlarıyla uyumlu

olduklarından, bu organizmalar ile sinerjik etkiler elde ederek kimyasalların uygulama oranlarını azaltmak için kimyasal pestisitler ve gübrelerle entegre edilebilirler (Harman ve ark., 2004; Sheridan ve ark., 2023). Uzun yıllardır bu mikroorganizmalar, mikoparazitizm ve antibiyoz özelliklerine dayalı olarak fitopatojenlerin biyolojik kontrolü için potansiyel ajanlar olarak görülmüştür (Macías-Rodríguez ve ark., 2020). Bununla birlikte, son yıllarda elde edilen çok sayıda kanıt, bu fungusların diğer mikroorganizmalar, arthropodlar ve bitkiler ile (hem olumlu hem de olumsuz) etkileşime girebildiğini göstermektedir. *Trichoderma* spp., çeşitli mekanizmalar aracılığıyla bitkiler için faydalı olabilir ve geniş bir yelpazede kullanım potansiyeline sahiptir (Poveda, 2021). *Trichoderma* spp., bitki büyümesini desteklemesi ve abiyotik streslere karşı toleransını artırması (Poveda, 2020), biyo gübre olarak kullanılması (Zhang ve ark., 2018), biyoteknoloji alanında gen kaynağı olarak değerlendirilmesi (Poveda ve ark., 2019) veya mikomediatör olması nedeniyle trofik etkileşimli ağların önemli bir parçasını oluşturmaktadır (Solanki ve ark., 2019; Poveda, 2021).

Yararlı mikroorganizmaların büyük bir çoğunluğunun zararlıya spesifik olmasının yanında insan ve çevre üzerindeki negatif etkilerinin minimum olması, araştırmacıların bu etkileşimleri incelemeye yönelmesini sağlamıştır (Noman ve ark., 2020; Ortiz ve Sansinenea, 2022). Bu etkileşimleri tam olarak anlayabilmek için toprak altı ve toprak üstü organizmalar arasındaki bitki aracılı etkileşimler ve bitki savunmasının moleküler mekanizmaları son yıllarda giderek daha fazla ilgi çekmektedir. Son olarak, Birleşmiş Milletler 2030 yılı

hedefleri doğrultusunda sürdürülebilir kalkınma amaçlarını destekleyecek potansiyelinden dolayı bu etkileşimlerinin bitki koruma için kullanılmasını önermiştir. Öyle ki, bu etkileşimlerin altında yatan mekanizmaları anlamak ve yönetmek bazı kaynaklar tarafından 'ikinci yeşil devrim' olarak görülmektedir (Pineda ve ark., 2015; Noman ve ark., 2020; Grabka ve ark., 2022; Ortiz ve Sansinenea, 2022). Bahsedilen bu harika özellikler bize yakın gelecekte kimyasal insektisitlerin yerini bu biyolojik etmenlerin alabileceğinin ipuçlarını vermektedir.

1. *TRICHODERMA* TÜRLERİNİN BİTKİ GELİŞİMİNİ DESTEKLEME SÜRECİ VE UYGULAMALARININ ETKİLERİ

Trichoderma spp. tarafından bitki gelişiminin desteklenmesi süreci karmaşık bir süreçtir ve çoğu zaman tek bir mekanizmaya atfedilemez. Bu süreçte, çeşitli enzimlerin kullanılması, besin alımındaki etkiler, abiyotik streslerin iyileştirilmesi ve zararlı fitopatojenlerin baskılanması dâhil olmak üzere çeşitli doğrudan ve dolaylı mekanizmalar söz konusudur. Bu geniş ve birbirine bağlı mekanizma dizileri, *Trichoderma* spp.'nin rizosfer yetkinliğini ve istikrarını sürdürmesine yardımcı olmaktadır (Lyn ve ark., 2010; Al-Ani, 2018; Sheridan ve ark., 2023).

Trichoderma çeşitli mekanizmalar yoluyla topraktaki besin elementlerini bitkiye yarayışlı hale getirmenin yanında bitki gelişimi için önemli olan birçok parametrenin iyileştirilmesi konusunda önemli katkılar sunmaktadır. Örneğin, sera koşullarında *Trichoderma viride* ve

mikorhizal fungus uygulamalarının soğan bitkisinin (*Allium cepa*) biyokimyasal parametreleri ile mineral ve besin içerikleri üzerine etkisinin incelendiği bir çalışmada, bitkilerde toplam çözünür karbonhidrat, protein içerikleri, toplam serbest amino asitler, asit ve alkalilik gibi biyokimyasal parametrelerin iyileştiği, ayrıca bitkinin mineral ve besin içeriğinde (N, P, K^+, Ca^{2+}, Mg^{2+} ve Zn) de artış olduğunu belirlenmiştir (Metwally (2020). *Trichoderma* türlerinin ürettikleri uçucu organik bileşikler ile patojenlerin gelişimini sınırlayarak bitki sağlığının korunmasına yardımcı oldukları bilinmektedir. *Trichoderma koningiopsis* T-51'in önemli bazı patojenler ve *Arabidopsis thaliana*'nın gelişimi üzerindeki etkilerinin araştırıldığı çalışmada, T-51 tarafından üretilen uçucu organik bileşiklerin, önemli patojen türler olan *Botrytis cinerea* ve *Fusarium oxysporum*'a karşı yüksek inhibitör aktivite gösterdiği bulunmuştur. Ayrıca, T-51 uygulamasının *A. thaliana* gelişimini ve direncini önemli ölçüde artırdığı bildirilmiştir (You ve ark., 2022). Benzer şekilde, Colla ve ark. (2015), *Glomus intraradices* BEG72 (G) ve *T. atroviride* MUCL 45632 (T)'nin tek başına veya kombinasyon halinde çeşitli bitkilere uygulanmasının; bitki büyüme parametreleri, verim, klorofil ve mineral bileşimi üzerindeki etkilerini değerlendirmişlerdir. *T. atroviride*'nin, bitki gelişimi ile doğrudan bağlantılı sideroforlar ve oksin benzeri bileşikler üretme yeteneğine sahip olduğu ortaya konmuştur. Sera koşullarında, kontrole kıyasla her iki faydalı mikroorganizma bitkilere birlikte verildiğinde, sürgün kuru ağırlığı marul, kavun, biber, domates ve kabakta sırasıyla %167, %56, %115, %68 ve %58 oranında artmıştır. Kök ve sürgün ağırlığındaki bu artış, artan besin alımı seviyesi ile

ilişkilendirilmiştir (örneğin, P, Mg, Fe, Zn ve B). Tarla koşullarında mikroorganizma uygulaması ile marul sürgün ve kök kuru ağırlığı sırasıyla %61 ve %57 oranında artmıştır. Kabak fideleri her iki mikroorganizma ile inokule edildiğinde, erken ve toplam verimin sırasıyla %59 ve %15 oranında arttığı belirtilmiştir.

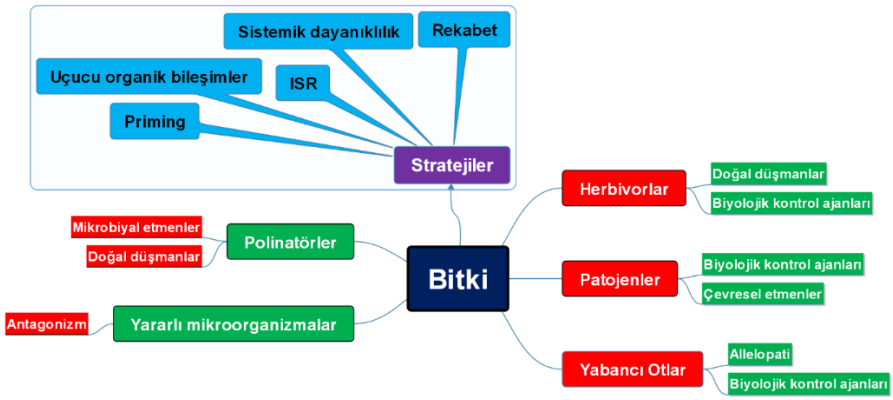
Tarımda *Trichoderma* türlerinin kullanılmasının, toprak verimliliğini artırmak ve korumak, bitki büyümesini teşvik etmek ve elde edilen ürün miktarını artırmak, hepsinden önemlisi üretim maliyetlerini ve kimyasal gübrelemeyle ilişkili çevresel etkileri azaltmak için çekici biyoteknolojik alternatiflerden biri olabileceği düşünülmektedir (Ortiz ve Sansinenea, 2022).

2. *TRICHODERMA* TÜRLERİNİN BİTKİLERİ ZARARLI BÖCEKLERE KARŞI KORUMADAKİ ROLÜ

Bitkiler herbivor, patojen ve yabancı otlar tarafından sürekli tehdit altındadır. Bu organizmalara karşı bitkilere yararlı mikroorganizmalar ve polinatörler destek olurken priming, ISR, sistemik dayanıklılık ve rekabet gibi birçok strateji ile de bitkiler kendilerini savunurlar (Şekil 2). Özellikle ürünlere ciddi zarar veren böcekler nedeniyle bitkiler her zaman biyotik stres altındadırlar. Nitekim böcek zararlıları nedeniyle meydana gelen kayıpların dünya ortalaması %18 ile %25 arasındadır (Savary ve ark., 2019; Poveda, 2021). Bitkiler kendilerini bu herbivorlara karşı savunmak için çok çeşitli fiziksel ve kimyasal mekanizmalar geliştirmişlerdir (War ve ark., 2012; Sharma, 2019). Bitki kökleriyle simbiyoz halinde yaşayan toprak mikroorganizmaları, bitki büyümesine sağladıkları yararın yanında hem abiyotik hem de

biyotik streslere karşı savunma tepkisi üzerindeki etkileri sayesinde faydalı olabilmektedirler (Lorito ve Woo, 2014; Coppola ve ark., 2017).

Trichoderma türlerinin bitkide ISR'ı uyardığı, biyotik ve abiyotik stres koşullarına dayanıklılığı artırdığı ve verimde artışa yol açtığı bilinmektedir (Harman, 2006; Verma ve ark., 2019; Macías-Rodríguez ve ark., 2020; Noman ve ark., 2020; Adeleke ve Babalola, 2021). ISR'ın etkinliği çoğu bitki türünü; patojen bakteri, fungus, virüs, nematod ve hatta zararlı böceklere karşı koruma şeklindedir (Pineda ve ark., 2010; Saharan ve Nehra, 2011; Pineda ve ark., 2015; Agbessenou ve ark., 2022). Bu etkinlikler yapılan çalışmalar ile ortaya çıkarılmaya devam etmektedir (Silva ve ark., 2019; Caccavo ve ark., 2022). Toprak kökenli yararlı mikroorganizmalar tarafından uyarılan bitki, patojen veya böcek saldırısından sonra priming durumuna geçmektedir (Pineda ve ark., 2010). Priming durumu, bitkilerin biyotik veya abiyotik strese maruz kaldıktan sonra karşılaşabilecekleri muhtemel saldırılara karşı daha hızlı ve etkili bir savunma tepkisinin oluşturulmasını ifade etmektedir (Aranega-Bou ve ark., 2014). Priming ile oluşturulan savunma yapısal savunmalara kıyasla harcanan enerji bakımından daha tasarruflu olmaktadır (Steppuhn ve Baldwin, 2008). Ayrıca, uyarılabilir savunmada bitki, herbivorun spesifik izlerini tanıdıktan sonra zararlıya özelleşip tepki vereceğinden bu durum daha avantajlıdır (Maffei ve ark., 2012).



Şekil 2. Bitkilerin çevreleriyle etkileşimlerinin şematik bir diyagramı.

Trichoderma spp. Ca^{+2} ve reaktif oksijen türlerinin aracılık ettiği erken savunma tepkilerini tetikleyebilmekte ve fitohormonlar tarafından düzenlenen direnç mekanizmalarını güçlendirerek bitki bağışıklığını uyarabilmektedir (Macías-Rodríguez ve ark., 2020). Salisilik asit (SA) ve jasmonik asit (JA) başlıca savunma fitohormonları olarak kabul edilmektedir (Browse, 2009; Pieterse ve ark., 2012). Etilen (ET) ise, biyotik strese yanıt olarak etkinleştirilen ve hormonla düzenlenen bitki savunma yollarında önemli bir modülatör olarak bildirilmiştir (van Loon ve ark., 2006; Ponzio ve ark., 2013). Ayrıca, diğer hormonlardan etilen, absisik asit, sitokinin, giberallik asit ve oksin ise sinyal sisteminin diğer bilinen modülatörleridir (Pangesti ve ark., 2013; Jafarbeigi ve ark., 2020; El-Maraghy ve ark., 2021). Savunma ile ilişkili hormonların bol miktardaki antagonistik veya sinerjistik etkileşimleri, bitkiye belirli savunmaların aktivasyonunu mümkün kılan ve aynı zamanda bitkinin zindeliği için harcanan enerjiyi en aza indiren

kapsamlı bir düzenleyici potansiyel sağlar (Pieterse ve ark., 2012; Vos ve ark., 2013).

Böceklere karşı oluşturulan uyarılmış sistemik dirençte JA ve SA bitkide kompleks sinyal yollarının kordinasyonunu sağlayan ana unsurlardır (Pangesti ve ark., 2013; Jafarbeigi ve ark., 2020; El-Maraghy ve ark., 2021) SA aktivasyonu biotrof ve floemden beslenen sokucu emici herbivorlar üzerinde etkili bir savunmaya yol açmakta, JA ve ET aktivasyonu ise nekrotrof patojen ve ısırıcı-çiğneyici böcekler üzerinde etkili olmaktadır. Fakat uyarılmış dayanıklılığın başarısı, dayanıklılığı uyaran zararlının özellikleri (beslenme şekli) ve dayanıklılıkta görev alan hormonların etkileşimi sonucu belirlenmektedir (Pineda ve ark., 2013). Bu sinyal yollarının aktivasyonu sonucunda herbivorun uyarılmış bitkide beslenmeye başlaması ile doğrudan (proteinaz inhibitörleri, polyphenol oksidaz, kitinaz gibi beslenmeyi engelleyen proteinler, toksin üretimi ve diğer ikincil metabolitlerin üretimi) veya dolaylı savunma mekanizmalarının (uçucu kimyasallar ile doğal düşmanların çağrılması) aktivasyonu ile bitki kendini korumaya çalışır (Pineda ve ark., 2010; Dubey ve ark., 2013; Pineda ve ark., 2015). Nitekim, *Lansium domesticum* bitkisine *Trichoderma* sp. uygulamasına bağlı olarak JA aracılı sistemik direncin aktivasyonu sayesinde *Unaspis mabili*'in beslenmesi engellenmiş, ayrıca bitkilerin gelişiminin arttığı ve zararlı popülasyonunun da azaldığı görülmüştür (Silva ve ark., 2019). Benzer şekilde, Di Lelio ve ark. (2021) *Trichoderma* sp. uygulamasının domates bitkilerinde JA ve SA genleri üzerindeki etkilerinden dolayı *Spodoptera littoralis*

larvalarının büyümesi, gelişmesi ve ergin üremesi üzerindeki olumsuz etkilerini ortaya koymuşlardır. Domates bitkilerine *T. atroviride* uygulamasının etkilerinin incelendiği bir çalışmada ise uygulama sayesinde JA aracılı sistemik savunmanın aktive edilerek yapraklarda proteinaz inhibitörlerinin üretimi gözlenmiştir. Bu sayede denemede kullanılan *S. littoralis* popülasyonu 25 günde %100 ölüm oranına ulaşmıştır (Coppola ve ark., 2019a) Bu çalışmaya ek olarak, *T. harzianum* T22'nin pamuk ve patates bitkilerinin gelişim parametrelerine ve bitki üzerinde zarar yapan *S. exigua*'nın popülasyon performansı ve beslenme kapasitesi üzerine etkilerinin incelendiği başka bir çalışmada ise *T harzianum* T22 uygulamasının her iki bitkinin de gelişim parametrelerini olumlu etkilediği bulunurken *T. harzianum*'un bitkide yol açtığı fizyolojik ve moleküler değişikliklerin zararlının gelişme, üreme, canlılık oranı ve bunlara bağlı olarak popülasyon parametreleri üzerinde kayda değer seviyede negatif etkisinin olduğu bildirilmiştir (Risvanli, 2022). *Trichoderma* spp. bitki aracılığı ile savunma ile ilgili bu genlerin aktivasyonu ve bitki direncinin artırılması gibi doğrudan etkilerinin yanında predatör ve parazitoidler gibi doğal düşmanların bitkilere çekilmesini de önemli ölçüde etkileyebilir. Mikrobiyal kolonizasyon, bitkinin böcek zararından en az kayıpla çıkması için bitkiden salınan uçucu organik bileşiklerin salınımına etki etmektedir (Pineda ve ark., 2010; Pineda ve ark., 2013). Bitkiler tarafından yayılan uçucu organik bileşikler, bitki, mikroorganizma ve böcek arasındaki spesifik etkileşimlere bağlı olarak doğal düşmanları çekilmesini veya uzaklaştırılmasını sağlayan kimyasal sinyaller olarak etki göstermektedirler (Noman ve ark., 2020;

van Dijk, 2021). Bu konuda yapılan bir araştırmada, domates bitkilerine *T. harzianum* T22 uygulamasının *Macrosiphum euphorbiae* üzerine olan etkilerinin incelendiği bir çalışmada, *Trichoderma* sp. uygulamasının herbivorlara karşı oluşturulan savunmayla alakalı birçok transkripsiyon faktörünü (bZIP, MYB, NAC, AP2-ERF, WRKY) eksprese ettiği bulunmuştur. Ayrıca yaprakbiti parazitoidi *Aphidius ervi*' nin çekiliminin de arttığı, dolayısıyla bitkide oluşan bu trankriptomik ve metabolik değişikliklerin hem doğrudan hem de dolaylı savunmayı uyardığı açığa ortaya çıkarılmıştır (Coppola ve ark., 2019b). Benzer şekilde, Contreras-Cornejo ve ark. (2021) mısır alanlarına *Trichoderma* sp. uygulamasının çeşitli yaprakbiti türleri üzerine etkisini inceledikleri çalışmada *Trichoderma'*nın JA aracılı sistemik direncin aktivasyonu ile bitkide zararlının doğal düşmanını (*Harmonia axyridis*) çeken organik uçucu bileşiklerden (Z)-3-heksen-1-ol üretimini indüklediğini ortaya koymuştur.

Bazı *Trichoderma* türleri böcekler üzerinde bitkiye ihtiyaç duymadan mikoparazit özellikler de gösterebilmektedir. Bu durum *Trichoderma'*nın böcekler üzerindeki etkinliğini artıran bir unsur olarak karşımıza çıkmaktadır (Poveda, 2021). *Trichoderma*'nın kendi başına biyolojik kontrol ajanları olarak kullanılmasına ek olarak, bu funguslar tarafından üretilen bazı bileşiklerin biyolojik mücadelede kullanılabileceği de önerilmiştir. Bu bağlamda yapılan kimyasal analizler sonucunda *T. citrinoviride* ITEM 4484'ün 1-pentadecanol ($C_{15}H_{32}O$), 1-heksadekanol ($C1_6H_{34}O$), 1-heptadecanol ($C_{17}H_{36}O$) ve 1-oktadekanol ($C_{18}H_{38}O$) ürettiği tespit edilmiştir. Bu moleküllerin yulaf

yaprak biti *Rhopalosiphum padi*'nin beslenme tercihini etkileyebildiği ortaya çıkarılmıştır Ganassi ve ark. (2016). Ayrıca, *T. atroviride* AT10 varlığında buğday (*Triticum aestivum* L.) bitkilerinin bir dizi farklı fenolik bileşik, terpenoid, lipid, amino asit ve karbonhidrat salgıladığı da bildirilmektedir (Lucini ve ark., 2019).

Mevcut bilgiler, *Trichoderma* spp.'nin bitki direncini artırmasının ve bitki sağlığı ve büyümesi üzerine pozitif etkilere sahip olmasının yanı sıra, farklı çevresel koşullar altında zararlı böcek türlerinin gelişimi ve hayatta kalması üzerinde negatif etkiler gösterebileceğini ortaya çıkarmıştır (Verma ve ark., 2019; Contreras-Cornejo ve ark., 2020; Risvanli, 2022). Bu nedenle, bu yararlı mikroorganizmalardan en iyi şekilde yararlanabilmek için "Bitki-*Trichoderma*-Böcek" etkileşimlerinin temelini oluşturan mekanizmaları ve bu karmaşık simbiyozun çevresel faktörler tarafından nasıl modüle edildiğini anlamak önemlidir. Bu bağlamda, bitkilerin hastalık ve zararlılara karşı geliştirdiği uyarılmış savunma sinyalizasyon ağlarının haritasını ortaya çıkarmak için moleküler ve genomik araçlar kullanılmaktadır (Noman ve ark., 2020). Bu konuyla ilgili yapılan çalışmalar son dönemlerde hızla artmasına rağmen mikroorganizmaların zararlılar üzerindeki doğrudan ve bitki aracılı etkilerine ilişkin anlayışımız hala sınırlıdır (Fernandez-Conradi ve ark., 2018; Caccavo ve ark., 2022).

SONUÇ

Böcekler veya mikroorganizmalar birbirlerinden bağımsız olarak düşünülürse bitki gelişimine ve verime olan etkileri hiçbir zaman tam

olarak anlaşılmayacaktır. Bitki-mikrorganizma-arthropod arasındaki etkileşimler tam anlaşılabilir ve yönetilebilirse ürün kayıplarının azaltılması ve veriminin arttırılması konularında büyük yarar sağlayacaktır. Bu konudaki ilerlemeler sayesinde modern anlayışlar sürekli olarak etkileşimlerin karmaşıklığını ortaya çıkarmaktadır. Bu yaklaşımlar artan gıda talebini karşılamanın yanında küresel değişimler ve artan çevre kirliliği ile mücadele etmek için de alınacak yeni önlemler için büyük katkıda bulunacaktır.

Son zamanlarda yapılan çalışmalardan da anlaşılabileceği gibi, dalgalanan ekolojik ve çevresel koşullar altında bu üçlü etkileşimi içeren karmaşık modelleri çözmek için bütünsel bir yaklaşıma ihtiyaç duyulmaktadır. Nitekim son yıllarda disiplinler arası araştırmalar, bu mikroorganizmaların konukçu bitkilerle nasıl etkileşime girdiğinin anlaşılmasında önemli ilerlemeler sağlamıştır. Fakat, laboratuvar ve arazi çalışmaları arasındaki büyük fark nedeniyle, böcek bitki ve mikroorganizmaların entegrasyonu için farklı iklim ve ekolojik değişkenler altında daha fazla araştırma yapılması gerekmektedir. Ayrıca bitki ve böcek direncini düzenleyen genetik yolların mikrobiyal özelliklerin seçimini nasıl koordine ettiğini ortaya çıkarmak gelecekteki önemli bir araştırma hedefi olacaktır. Araştırmacıları bu alandaki mevcut ve gelecekteki sorunları ele almaya teşvik etmek amacıyla, bu konunun bitki-böcek etkileşimlerinin mikrobiyal aracılığına ilişkin çalışmaların yaygınlaşması bu alandaki zorlukların giderilmesi konusunda büyük önem arz etmektedir.

KAYNAKÇA

Adeleke, B. S. ve Babalola, O. O. (2021). Roles of plant endosphere microbes in agriculture-a review. Journal of Plant Growth Regulation, 1-18.

Agbessenou, A., Akutse, K. S., Yusuf, A. A. ve Khamis, F. M. (2022). The Endophyte *Trichoderma asperellum* M2RT4 Induces the Systemic Release of Methyl Salicylate and (Z)-jasmone in Tomato Plant Affecting Host Location and Herbivory of Tuta absoluta. Frontiers in plant science, 13, 860309-860309.

Al-Ani, L. K. T. (2018). *Trichoderma*: beneficial role in sustainable agriculture by plant disease management. In Plant microbiome: stress response (pp. 105-126): Springer.

Alınç, T., Cusumano, A., Peri, E., Torta, L. ve Colazza, S. (2021). *Trichoderma harzianum* strain T22 modulates direct defense of tomato plants in response to *Nezara viridula* feeding activity. Journal of Chemical Ecology, 47(4), 455-462.

Aranega-Bou, P., de la O Leyva, M., Finiti, I., García-Agustín, P. ve González-Bosch, C. (2014). Priming of plant resistance by natural compounds. Hexanoic acid as a model. Frontiers in plant science, 5, 488.

Bardin, M., Ajouz, S., Comby, M., Lopez-Ferber, M., Graillot, B., Siegwart, M. ve Nicot, P. C. (2015). Is the efficacy of biological control against plant diseases likely to be more durable than that of chemical pesticides? Frontiers in plant science, 6, 566.

Bezemer, T. M. ve van Dam, N. M. (2005). Linking aboveground and belowground interactions via induced plant defenses. Trends in Ecology & Evolution, 20(11), 617-624. doi:10.1016/j.tree.2005.08.006

Browse, J. (2009). Jasmonate passes muster: a receptor and targets for the defense hormone. Annual Review of Plant Biology, 60, 183-205.

Caccavo, V., Forlano, P., Mang, S. M., Fanti, P., Nuzzaci, M., Battaglia, D. ve Trotta, V. (2022). Effects of *Trichoderma harzianum* Strain T22 on the Arthropod Community Associated with Tomato Plants and on the Crop Performance in an Experimental Field. Insects, 13(5), 418.

Chaverri, P., Castlebury, L. A., Overton, B. E. ve Samuels, G. J. (2003). Hypocrea/*Trichoderma*: species with conidiophore elongations and green conidia. Mycologia, 95(6), 1100-1140.

Chi, H., Kara, H., Özgökçe, M. S., Atlihan, R., Güncan, A., Rişvanlı, M. R. (2022). Innovative application of set theory, Cartesian product, and multinomial theorem in demographic research. Entomologia Generalis, 42(6).

Colla, G., Rouphael, Y., Di Mattia, E., El-Nakhel, C. ve Cardarelli, M. (2015). Co-inoculation of Glomus intraradices and *Trichoderma atroviride* acts as a biostimulant to promote growth, yield and nutrient uptake of vegetable crops. Journal of the Science of Food and Agriculture, 95(8), 1706-1715.

Contreras-Cornejo, H. A., Macías-Rodríguez, L., del-Val, E. ve Larsen, J. (2020). Interactions of Trichoderma with plants, insects, and plant pathogen microorganisms: chemical and molecular bases. Co-evolution of secondary metabolites, 263-290.

Contreras-Cornejo, H. A., Viveros-Bremauntz, F., del-Val, E., Macías-Rodríguez, L., López-Carmona, D. A., Alarcón, A., González-Esquivel, C. E. ve Larsen, J. (2021). Alterations of foliar arthropod communities in a maize agroecosystem induced by the root-associated fungus *Trichoderma harzianum*. Journal of Pest Science, 94(2), 363-374.

Coppola, M., Cascone, P., Chiusano, M. L., Colantuono, C., Lorito, M., Pennacchio, F., Rao, R., Woo, S. L., Guerrieri, E. ve Digilio, M. C. (2017). *Trichoderma harzianum* enhances tomato indirect defense against aphids. Insect science, 24(6), 1025-1033.

Coppola, M., Cascone, P., Lelio, I. D., Woo, S. L., Lorito, M., Rao, R., Pennacchio, F., Guerrieri, E. ve Digilio, M. C. (2019a). *Trichoderma atroviride* P1 colonization of tomato plants enhances both direct and indirect defense barriers against insects. Frontiers in physiology, 813.

Coppola, M., Diretto, G., Digilio, M. C., Woo, S. L., Giuliano, G., Molisso, D., Lorito, M., Pennacchio, F. ve Rao, R. (2019b). Transcriptome and metabolome reprogramming in tomato plants by *Trichoderma harzianum* strain T22 primes

and enhances defence responses against aphids. Frontiers in physiology, 10, 745.

Çetintaş, R. ve Kara, H. (2016). The effects of Arthrobacter (ROA) and Marrygold (Tagetes patula) plant extracts against *Meloidogyne incognita* (Kofoid & White) populations. Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Doğa Bilimleri Dergisi, 19(2), 221-226.

DeClerck, F. A., Koziell, I., Benton, T., Garibaldi, L. A., Kremen, C., Maron, M., Del Rio, C. R., Sidhu, A., Wirths, J. ve Clark, M. (2023). A whole earth approach to nature-positive food: biodiversity and agriculture. In Science and Innovations for Food Systems Transformation (pp. 469-496): Springer.

Di Lelio, I., Coppola, M., Comite, E., Molisso, D., Lorito, M., Woo, S. L., Pennacchio, F., Rao, R. ve Digilio, M. C. (2021). Temperature Differentially Influences the Capacity of *Trichoderma* Species to Induce Plant Defense Responses in Tomato Against Insect Pests. Frontiers in plant science, 12. doi:10.3389/fpls.2021.678830

Dubey, N. K., Goel, R., Ranjan, A., Idris, A., Singh, S. K., Bag, S. K., Chandrashekar, K., Pandey, K. D., Singh, P. K. ve Sawant, S. V. (2013). Comparative transcriptome analysis of *Gossypium hirsutum* L. in response to sap sucking insects: aphid and whitefly. BMC genomics, 14(1), 1-20.

El-Maraghy, S., Tohamy, A. ve Hussein, K. (2021). Plant protection properties of the Plant Growth-Promoting Fungi (PGPF): Mechanisms and potentiality. Current Research in Environmental & Applied Mycology (Journal of Fungal Biology), 11(1), 391-415.

FAO. (2021). The state of food security and nutrition in the world 2021,. In https://policycommons.net/artifacts/1850109/the-state-of-food-security-and-nutrition-in-the-world-2021/2596732/ 12.05.2022. CID: 20.500.12592/p0dx35.

Fernandez-Conradi, P., Jactel, H., Robin, C., Tack, A. J. ve Castagneyrol, B. (2018). Fungi reduce preference and performance of insect herbivores on challenged plants. Ecology, 99(2), 300-311.

Ganassi, S., Grazioso, P., De Cristofaro, A., Fiorentini, F., Sabatini, M. A., Evidente, A. ve Altomare, C. (2016). Long chain alcohols produced by *Trichoderma citrinoviride* have phagodeterrent activity against the bird cherry-oat aphid *Rhopalosiphum padi*. Frontiers in Microbiology, 7, 297.

Gehring, C. ve Bennett, A. (2009). Mycorrhizal Fungal-Plant-Insect Interactions: The Importance of a Community Approach. Environmental Entomology, 38(1), 93-102. doi:10.1603/022.038.0111

Grabka, R., d'Entremont, T. W., Adams, S. J., Walker, A. K., Tanney, J. B., Abbasi, P. A. ve Ali, S. (2022). Fungal Endophytes and Their Role in Agricultural Plant Protection against Pests and Pathogens. Plants, 11(3), 384.

Hagh-Doust, N., Färkkilä, S. M., Moghaddam, M. S. H. ve Tedersoo, L. (2022). Symbiotic fungi as biotechnological tools: methodological challenges and relative benefits in agriculture and forestry. Fungal Biology Reviews.

Harman, G. E. (2006). Overview of mechanisms and uses of *Trichoderma* spp. Phytopathology, 96(2), 190-194.

Harman, G. E., Howell, C. R., Viterbo, A., Chet, I. ve Lorito, M. (2004). Trichoderma species—opportunistic, avirulent plant symbionts. Nature Reviews Microbiology, 2(1), 43-56.

Jafarbeigi, F., Samih, M., Alaei, H. ve Shirani, H. (2020). Induced tomato resistance against *Bemisia tabaci* triggered by salicylic acid, β-Aminobutyric Acid, and *Trichoderma*. Neotropical Entomology, 49(3), 456-467.

Kumar, V., Joshi, S., Pant, N. C., Sangwan, P., Yadav, A. N., Saxena, A. ve Singh, D. (2019). Molecular approaches for combating multiple abiotic stresses in crops of arid and semi-arid region. In Molecular approaches in plant biology and environmental challenges (pp. 149-170): Springer.

Le Goff, G. ve Giraudo, M. (2019). Effects of pesticides on the environment and insecticide resistance. Olfactory Concepts of Insect Control-Alternative to insecticides: Volume 1, 51-78.

Lorito, M. ve Woo, S. L. (2014). *Trichoderma*: a multi-purpose tool for integrated pest management. In Principles of plant-microbe interactions: microbes for sustainable agriculture (pp. 345-353): Springer.

Lucini, L., Colla, G., Moreno, M. B. M., Bernardo, L., Cardarelli, M., Terzi, V., Bonini, P. ve Rouphael, Y. (2019). Inoculation of *Rhizoglomus irregulare* or *Trichoderma atroviride* differentially modulates metabolite profiling of wheat root exudates. Phytochemistry, 157, 158-167.

Lugtenberg, B. ve Kamilova, F. (2009). Plant-Growth-Promoting Rhizobacteria. *In Annual review of microbiology* (Vol. 63, pp. 541-556).

Lyn, M. E., Burnett, D., Garcia, A. R. ve Gray, R. (2010). Interaction of water with three granular biopesticide formulations. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 58(3), 1804-1814.

Macías-Rodríguez, L., Contreras-Cornejo, H. A., Adame-Garnica, S. G., Del-Val, E. ve Larsen, J. (2020). The interactions of *Trichoderma* at multiple trophic levels: Inter-kingdom communication. Microbiological Research, 240, 126552.

Maffei, M. E., Arimura, G.-I. ve Mithöfer, A. (2012). Natural elicitors, effectors and modulators of plant responses. Natural product reports, 29(11), 1288-1303.

Metwally, R. A. (2020). Arbuscular mycorrhizal fungi and *Trichoderma viride* cooperative effect on biochemical, mineral content, and protein pattern of onion plants. Journal of Basic Microbiology, 60(8), 712-721. doi:https://doi.org/10.1002/jobm.202000087

Noman, A., Aqeel, M., Qasim, M., Haider, I. ve Lou, Y. (2020). Plant-insect-microbe interaction: A love triangle between enemies in ecosystem. Science of the Total Environment, 699, 134181.

Ortiz, A. ve Sansinenea, E. (2022). The role of beneficial microorganisms in soil quality and plant health. Sustainability, 14(9), 5358.

Özgökçe, M. S., Chi, H., Atlıhan, R., Kara, H. (2018). Demography and population projection of *Myzus persicae* (Sulz.) (Hemiptera: Aphididae) on five pepper (*Capsicum annuum* L.) cultivars. Phytoparasitica, 46, 153-167.

Özgökçe, M. S., Kuşoğlu, D., Konuş, M., Kara, H., Rişvanlı, M. R., Çetin, D. (2023). The effects of different Charleston pepper cultivars on the demographic parameters and the antioxidant levels of *Myzus persicae* (Sulzer, 1776) (Hemiptera: Aphididae). Turkish Journal of Entomology, 47(2), 133-147.

Pangesti, N., Pineda, A., Pieterse, C. M., Dicke, M. ve Van Loon, J. J. (2013). Two-way plant mediated interactions between root-associated microbes and insects: from ecology to mechanisms. Frontiers in plant science, 4, 414.

Panpatte, D. G., Jhala, Y. K., Vyas, R. V. ve Shelat, H. N. (2017). Microorganisms for Green Revolution: Microorganisms for Sustainability, (MICRO, volume 6), Springer.

Pieterse, C. M. J., Christos, Z., Roeland, L. B., David M., W., Saskia C.M., V. W. ve Peter A.H.M., B. (2014). Induced Systemic Resistance by Beneficial Microbes. Annual Review of Phytopathology, 52(1), 347-375. doi:10.1146/annurev-phyto-082712-102340

Pieterse, C. M. J., van der Does, A., Zamioudis, C., Leon Reyes, H. ve Van Wees, S. C. (2012). Hormonal modulation of plant immunity. Annual review of cell and developmental biology, 28, 489-521.

Pineda, A., Dicke, M., Pieterse, C. M. ve Pozo, M. J. (2013). Beneficial microbes in a changing environment: are they always helping plants to deal with insects? Functional Ecology, 27(3), 574-586.

Pineda, A., Soler, R., Pozo, M. J., Rasmann, S. ve Turlings, T. C. (2015). Above-belowground interactions involving plants, microbes and insects. Frontiers in plant science, 6, 318.

Pineda, A., Zheng, S.-J., Van Loon, J. J., Pieterse, C. M. ve Dicke, M. (2010). Helping plants to deal with insects: the role of beneficial soil-borne microbes. Trends in Plant Science, 15(9), 507-514.

Ponzio, C., Gols, R., Pieterse, C. M. ve Dicke, M. (2013). Ecological and phytohormonal aspects of plant volatile emission in response to single and dual infestations with herbivores and phytopathogens. Functional Ecology, 27(3), 587-598.

Poveda, J. (2020). *Trichoderma parareesei* favors the tolerance of rapeseed (*Brassica napus* L.) to salinity and drought due to a chorismate mutase. Agronomy, 10(1), 118.

Poveda, J. (2021). *Trichoderma* as biocontrol agent against pests: New uses for a mycoparasite. Biological control, 159, 104634.

Poveda, J., Hermosa, R., Monte, E. ve Nicolás, C. (2019). The *Trichoderma harzianum* Kelch protein ThKEL1 plays a key role in root colonization and the induction of systemic defense in *Brassicaceae* plants. Frontiers in plant science, 10, 1478.

Risvanli, M. R. (2022). Determination of Population Performance and Feeding Capacity of *Spodoptera Exigua* on *Trichoderma harzianum* Applied Potato and Cotton Plant. (Ph.D. Thesis), Van Yuzuncu Yil University, Department of Plant Protection, pp. 131,

Saharan, B. ve Nehra, V. (2011). Plant growth promoting rhizobacteria: a critical review. Life Sci Med Res, 21(1), 30.

Savary, S., Willocquet, L., Pethybridge, S. J., Esker, P., McRoberts, N. ve Nelson, A. (2019). The global burden of pathogens and pests on major food crops. Nature ecology & evolution, 3(3), 430-439.

Senthilraja, G., Anand, T., Kennedy, J., Raguchander, T. ve Samiyappan, R. (2013). Plant growth promoting rhizobacteria (PGPR) and entomopathogenic fungus bioformulation enhance the expression of defense enzymes and pathogenesis-related proteins in groundnut plants against leafminer insect and collar rot pathogen. Physiological and molecular plant pathology, 82, 10-19.

Sharma, A. (2019). Fungi as biological control agents. Biofertilizers for sustainable agriculture and environment, 395-411.

Sheridan, W., Hermosa, R., Lorito, M. ve Monte, E. (2023). *Trichoderma*: A multipurpose, plant-beneficial microorganism for eco-sustainable agriculture. Nature Reviews Microbiology, 21(5), 312-326.

Silva, B. B., Banaay, C. G. ve Salamanez, K. (2019). Trichoderma-Induced Systemic Resistance Against the Scale Insect (*Unaspis Mabilis* Lit Barbecho) in Lanzones (*Lansium Domesticum* CORR.). Agriculture & Forestry/Poljoprivreda i Sumarstvo, 65(2).

Solanki, M. K., Kashyap, B. K., Solanki, A. C., Malviya, M. K. ve Surapathrudu, K. (2019). Helpful Linkages of *Trichoderma* in the process of Mycoremediation and Mycorestoration. Plant Health Under Biotic Stress: Volume 2: Microbial Interactions, 51-64.

Steppuhn, A. ve Baldwin, I. T. (2008). Induced defenses and the cost-benefit paradigm. Induced plant resistance to herbivory, 61-83.

Van Der Heijden, M. G., Bardgett, R. D. ve Van Straalen, N. M. (2008). The unseen majority: soil microbes as drivers of plant diversity and productivity in terrestrial ecosystems. Ecology letters, 11(3), 296-310.

van Dijk, L. J. (2021). Interactions between plants, microbes and insects. Department of Ecology, Environment and Plant Sciences, Stockholm University,

van Loon, L. C. (2007). Plant responses to plant growth-promoting rhizobacteria. In New Perspectives and Approaches in Plant Growth-Promoting Rhizobacteria Research (pp. 243-254): Springer.

van Loon, L. C., Geraats, B. P. ve Linthorst, H. J. (2006). Ethylene as a modulator of disease resistance in plants. Trends in Plant Science, 11(4), 184-191.

Van Wees, S. C., Van der Ent, S. ve Pieterse, C. M. (2008). Plant immune responses triggered by beneficial microbes. Current Opinion in Plant Biology, 11(4), 443-448.

Verma, P. P., Shelake, R. M., Das, S., Sharma, P. ve Kim, J.-Y. (2019). Plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR) and fungi (PGPF): potential biological control agents of diseases and pests. In Microbial interventions in agriculture and environment (pp. 281-311): Springer.

Vos, I. A., Pieterse, C. M. ve Van Wees, S. C. (2013). Costs and benefits of hormone-regulated plant defences. Plant Pathology, 62, 43-55.

War, A. R., Paulraj, M. G., Ahmad, T., Buhroo, A. A., Hussain, B., Ignacimuthu, S. ve Sharma, H. C. (2012). Mechanisms of plant defense against insect herbivores. Plant signaling & behavior, 7(10), 1306-1320.

Wardle, D. A., Bardgett, R. D., Klironomos, J. N., Setala, H., van der Putten, W. H. ve Wall, D. H. (2004). Ecological linkages between aboveground and belowground biota. Science, 304(5677), 1629-1633. doi:10.1126/science.1094875

Weyens, N., van der Lelie, D., Taghavi, S., Newman, L. ve Vangronsveld, J. (2009). Exploiting plant–microbe partnerships to improve biomass production and remediation. Trends in biotechnology, 27(10), 591-598.

Wielkopolan, B. ve Obrępalska, A. (2016). Three-way interaction among plants, bacteria, and coleopteran insects. Planta, 244(2), 313-332.

Woo, S., Ruocco, M., Vinale, F., Nigro, M., Marra, R., Lombardi, N., Pascale, A., Lanzuise, S., Manganiello, G. ve Lorito, M. (2014). *Trichoderma*-based products and their widespread use in agriculture. The Open Mycology Journal, 8(1).

Woo, S. L. ve Pepe, O. (2018). Microbial consortia: promising probiotics as plant biostimulants for sustainable agriculture. Frontiers in plant science, 9, 1801.

You, J., Li, G., Li, C., Zhu, L., Yang, H., Song, R. ve Gu, W. (2022). Biological Control and Plant Growth Promotion by Volatile Organic Compounds of *Trichoderma koningiopsis* T-51. Journal of Fungi, 8(2), 131.

Zhang, F., Huo, Y., Cobb, A. B., Luo, G., Zhou, J., Yang, G., Wilson, G. W. ve Zhang, Y. (2018). *Trichoderma* biofertilizer links to altered soil chemistry, altered microbial communities, and improved grassland biomass. Frontiers in Microbiology, 9, 848.

BÖLÜM 9

KURAKLIK STRESİ VE FİTOHORMONLAR

Dr. Öğr. Üyesi Sibel BOYSAN CANAL[1*]

DOI: https://dx.doi.org/10.5281/zenodo.10031416

[1*] Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi Ziraat Fakültesi Toprak Bilimi ve Bitki Besleme Bölümü Van, Türkiye. sibelboysancanal@yyu.edu.tr

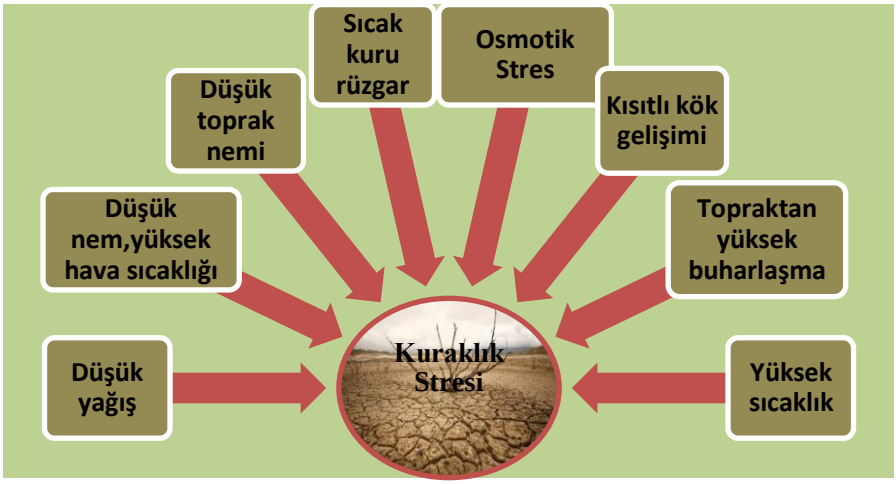
GİRİŞ

Tarımsal üretim, tohum, insan ve iklim olmak üzere dört faktörün etkisi altındadır. İklim faktörü dışındaki diğer faktörler değiştirilebilir ya da kontrol altına alınabilir. Ancak iklim faktörü, tarımsal uygulama yöntemleri ve teknolojisi ne kadar gelişirse gelişsin, üretim üzerinde doğrudan etkiye sahiptir (Şimşek, 2010). Yeryüzünde sanayinin ve artan nüfusun artışı ile sera gazlarının etkisi hayat koşullarını güçlendirmektedir. Artan sera gazlarının atmosferde yoğunlaşması sıcaklık, nem, yağış ve rüzgâr gibi iklim olaylarında bölgesel ve küresel ölçekte değişikliğe sebep olmaktadır (Anonymous 2007). Küresel ısınma tarımsal verimliliği önemli oranlarda etkilemekte ve küresel tarım için büyük bir zorluklar teşkil etmektedir. Son iklim değişikliği modelleri dünya çapında bitkisel üretimde ciddi kayıpların olacağını öngörmektedir (Soysal ve Erman, 2021). Yapılan iklim modelleme çalışmalarında, yüzyılın sonuna kadar hava sıcaklığındaki tahmini artışın mevcut seviyelerin yaklaşık 2^0C üzerinde olacağı varsayılmaktadır. Bu durumda dünya nüfusunun beşte biri su kıtlığından etkilenecektir (Ray ve ark., 2019) Dünya genelinde yağmurla beslenen tarım bölgelerinde küresel ısınmanın bir sonucu olarak yıllık kümülatif yağış azalmıştır (Warner ve ark., 2014). Küresel ısınma sonucu giderek kısıtlı hale gelen su kaynaklarına hızlı talep artışı tarımda kullanılan su miktarını kısıtlamaktadır. Kuraklık etkisinden dolayı, 2050 yılına kadar kuraklıkların dünya nüfusunun dörtte üçünden fazlasını etkileyebileceği, 216 milyon kadar insanın göç etmek zorunda kalabileceğini bunun sonucu olarak da 2050'ye kadar 4,8 ile 5,7 milyar insandan her biri en az bir ay su kıtlığı

yaşayan bölgelerde yaşayacağı tahmin edilmektedir (Clement et al., 2021; UN Water, 2021). Kuraklıktan etkilenen bitkilerin yüzdesi son 40 yılda iki katından fazla arttı. Kuraklık ve çölleşme nedeniyle her yıl yaklaşık 12 milyon hektar arazi kaybedildi **(**FAO, 2017). Dünya üzerinde yer alan karaların %45'i kurak alanlardan oluşmaktadır. Bu alanların %34'lük kısmında 2 milyarı geçen bir nüfus yaşamaktadır. Kurak alanların %90'lık kısmını ise gelişmekte olan ülkelerin oluşturduğu görülmektedir (FAO, 2019). Küresel iklim değişikliğinin etkisiyle birlikte günümüzde abiyotik (canlının etken olmadığı) stresler arasında yer alan kuraklık stresi daha yaygın görülmektedir. Kuraklık stresinin tarımsal ürünlerin elde edilmesinde azalmaya neden olması genel anlamda gıda güvenliğini tehdit eden en önemli faktörlerdendir (Srinivasa Rao ve ark., 2000). Kuraklığın yoğunluğu ve süresi, küresel olarak mahsul verimini önemli ölçüde tehdit etmektedir. Artan kuraklık dönemleriyle birlikte, bitkilerin kuraklığa verdiği fizyolojik tepkileri anlamak tarımsal ekosistemlerin üretkenliğini sürdürmek için önemlidir (Gupta ve ark., 2020). Bu bölümde kuraklık stresinin bitkiler üzerindeki etkisini ortaya koyarak, bu etkiyi azaltmak için yapılan uygulamaların ortaya konması bir nebzede olsa kuraklık stresini dindirici etkiler günümüzde önem arz etmektedir. Bu dindirici etkileri artırmak ürün ve üretici açısından fayda sağlayabileceği umulmaktadır.

1. BİTKİLERDE KURAKLIK STRESİNİN MORFOLOJİK, FİZYOLOJİK VE OKSİDATİF ETKİLERİ

Kuraklık stresi ile eş anlamlı olan su stresi, bitkilerde buharlaşma yoluyla dışarı verilen su miktarının kökler vasıtasıyla alınan su miktarından fazla olması ile oluşmaktadır. Su stresi, durumunda topraktaki porlar su ve hava ile doludur. Bitki kökleri tarafından su alındıkça, buharlaşma (evaporasyon) ve drenaj ile su kaybı oluştukça, toprakta sıvı şeklindeki su miktarı azalır. Bu durumun devam etmesi durumunda toprak boşluklarında tutulan su miktarı daha büyük bir kuvvetle tutulur. Bu durum bitki köklerinin su almasına engel olur ve bitkide solma başlar (Yüksel ve Aksoy, 2017). Kuraklık etkisine bağlı olarak bitkiler üzerinde ortaya çıkan etkiler bitkilerin strese olan tepkilerini belirlemekte önemli rol oynamaktadır (Şekil.1).



Şekil 1. Kuraklık stresi koşullarında bitkilerin tepkilerini etkiyen faktörler

Abiyotik stres etmenlerinden olan kuraklık stresi; değişen iklim koşullarının etkisi sonucunda sınırlı su seviyesinin bitki büyüme ve gelişmesini olumsuz yönde etkileyerek, ürünün nitelik ve niceliği üzerinde önemli etki yapar. Kuraklık stresine karşı oluşan bitkisel tepkiler fizyolojik, morfolojik ve biyokimyasal mekanizmalar ile gerçekleşmektedir Her iki çeltik bitkisi 20 gün boyunca iyi sulanan koşullarda yetiştirildi. Birinci saksıda bulunan çeltik bitkisine 20 gün boyunca kuraklık stresi uygulanmıştır. Toprak nemindeki azalma kısmi olarak kontrol edilmiştir. Tahıllar arasında çeltik bitkisi diğer bitki türlerine göre kuraklık stresine karşı daha fazla hassas bir bitkidir (Jaleel ve ark., 2009). Kuraklık stresinin en önemli belirtisi; bitkiler stomalarını kapatarak su kaybını azaltır, bu sadece transpirasyonu azaltmaz, aynı zamanda CO_2 alımını da azaltarak fotosentezin kısıtlanması ile birleşir. Kuraklık stresi, kloroplastların iç yapılarındaki değişimler nedeniyle, klorofil miktarının ve işlevinin azalması fotosentezin olumsuz etkilenmesine sebep olur (Deepak ve ark., 2019). Fotosentezin azalması bitkinin gelişimi için gerekli mevcut metabolitlere duyulan gereksinimi azaltır. Bunun sonucunda bitki gelişimi ve verim üzerinde olumsuz etkiler gözlenir. Bitkilerin fotosentetik aktivitesi verimi etkileyen önemli faktörlerden biridir. Kuraklık özellikle meyve ve dane oluşumu evrelerinde önemli etkiye sahiptir. Yeterli su bulunmaması ksilem iletim borularında su potansiyelinin azalması fotosentez sonucu oluşan ürünlerin bitki organlarına taşınmasını engeller. Bunun neticesinde meyveler küçük kalır ve tahıllarda dane dolumu yeterli düzeyde gerçekleşmez (Bahadur ve ark., 2011). Bitkide enerji gereksinimi yeterince

sağlanamadığı için solunumda olumsuz etkilenir. Ksilem iletim borularında taşınan nitrat (NO^-_3) içeriğinin azalması nitrat redüktaz enzim aktivitesini azalttığı bulunmuştur (Kacar, 2006; Kamanga ve ark., 2018; Nemeskiri ve ark., 2019). Kloroplast bileşenlerinden olan klorofil fotosentezde hayati bir rol oynar. Kuraklık stresi altında fotosentezin azalması klorofil içeriğinin de azalmasına neden olur. Fizyolojik olarak kuraklık stresine bağlı olarak, kloroplast membranlarında deformasyon, ileri seviyede şişme, lameller kolankima bozulması ve lipit damlacıklarının ortaya çıkmasına bağlı olarak bitkinin klorofil içeriğinde azalma meydana gelmektedir (Kaiser ve ark., 1981). Klorofil içeriğindeki azalma bitkisel üretimde azalmaya neden olur (Muller ve ark., 2011). Kuraklık stresinin sebep olduğu su, kısıtlı hale gelerek bitki daha fazla su kaybetmemek adına genelde stomalarını kapatmakta ve bu da fotosentezle fiksasyon için gerekli CO_2'in alımının kısıtlanmasına neden olmaktadır (Kalefetoglu ve Ekmekçi, 2005). Bu durumda; $NADP^+$ (fotosentezdeki e-akseptörü) kısıtlı hale gelir ve ferrodoksin $NADP^+$ yerine oksijeni redükler; böylece, fotosistem I (PSI)'in elektronları O_2'ye transferi sonucunda reaktif O^{2-} radikali üretilir. Kuralık stresi diğer abiyotik stres etmenlerin olduğu gibi, bitkilerde (ROS) reaktif oksijen radikallerinin [süperoksit molekülü (O^{2-}), singlet oksijen (* O), hidrojen peroksit (H_2O_2) ve hidroksil radikallerini (OH.)] üretiminde artışa neden olduğu için, bitki hücrelerinde hasara ve nekroz oluşumuna neden olur (Petrov ve ark., 2015). Birçok türde kuraklık stresi altında artan süperoksit radikali ($O^{2\ -}$) oluşum hızı; lipid peroksidasyonuna, yağ asidi doygunluğuna ve sonuçta membranların

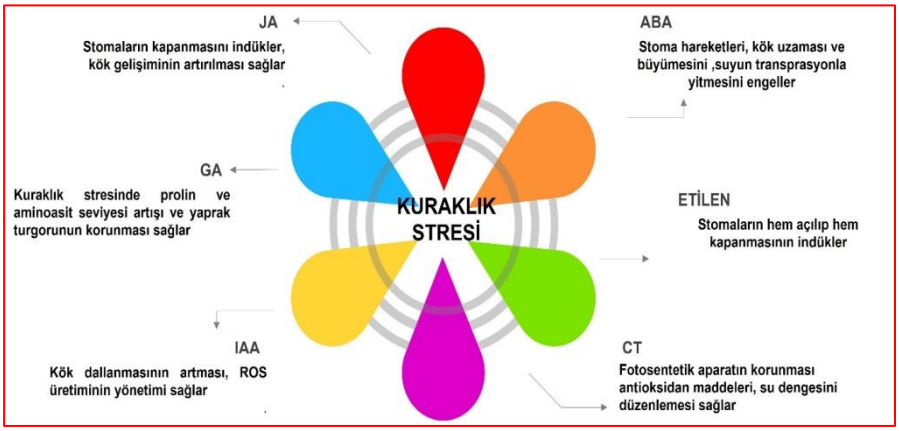
bütünüyle zarar görmesine neden olur (Sgherry ve ark., 1996). Bitkilerde, oksidatif zararın yol açtığı yıkıcı etkilerle mücadele etmek için; yağda çözünen ve membrana bağlı antioksidantlar [doğrudan lipid peroksidasyonunun serbest radikallerini gideren β-karoten, α-tokoferol, suda çözünen antioksidantlar [H_2O_2ve O^{2-}'nin detoksifikasyonunda rol oynayan askorbat ve glutatyon] ve enzimatik antioksidantlar [katalaz (CAT), süperoksit dismutaz (SOD), askorbat peroksidaz (APX), peroksidaz (POD) ve glutatyon redüktaz (GR)]'dan oluşan karmaşık bir antioksidant koruyucu sistemine sahiplerdir (Ramachandra ve ark., 2004; Pinheiro ve ark.,2004).

2. KURAKLIK STRESİNE KARŞI FİTOHORMONLAR

Kuraklık stresi altında, bitkiler morfo- fizyolojik yapılarındaki değişimlerin sonucu olarak çeşitli tepkiler gösterir. Kuraklık stresi durumunda, absisik asit (ABA), etilen (ET), oksin (AUX), sitokininler (CK'ler), salisilik asit (SA), jasmonik asit (JA), gibberellik asit (GA), brassinosteroidler (BR'ler) gibi çeşitli fitohormonlar bitkilerde kuraklık stres sinyalinin algılanmasından sonra bitkinin toleransının artışına neden olur. Fitohormonlar stomaların kapanmasını, kök büyümesini, kuraklık koşullarından kaçınmak için ozmaolitlerin birikmesine sebep olurlar (Fahad ve ark., 2015, Fahad ve ark 2016; Ullah ve ark., 2018). Kuraklık stresi durumunda, bitkinin su eksikliği koşullarına uyum sağlaması için büyüme ve gelişiminin düzenlenmesinde önemli role sahip fitohormonların üretimi artar.

Bitkiler kuraklık stresine karşı koymak için ozmatik ayarlama yapabildikleri gibi, fitohormonlar kuraklığa bitkinin toleransını

artırmak için morfo-fizyolojik ve biyokimyasal süreçlerin düzenlenmesinde önemli role sahiptir. (Nezhadahmadi ve ark., 2013). Kuraklık stresi fitohormonların sentezini değiştirebilir. Başta ABA olmak üzere SA, AUX, ET ve GA başlıca strese duyarlı hormonlardır (Şekil 2).



Şekil 2. Fitohormonların kuraklık stresi koşullarında bitki metabolizması üzerine etkileri

Absisik asit: Bitkinin kuraklık stres koşullarına karşı dayanıklılığını artıran fitohormondur. ABA 15 karbon halkasına sahiptir (Fernando ve Schroeder, 2016). Stres hormonu olarak da bilenen ABA bitkinin kuraklık koşullarına dayanımını artıran ve uyum sağlamasına ve hayatta kalmasına yardımcı olur. ABA suyun transpirasyonla yitmesini ve stomaların kapanmasını önler. Bitkinin tepe organlarında gelişme ve büyümede azalmaya giderek suyun kök sisteminde kullanılmasına dolayısıyla kökün derinlere uzamasına neden olur Su stresi görülmeyen bitkide ise toprak üstü ve toprak altı organlarındaki gelişme dengeli şekildedir (Kacar ve ark., 2006; Wilkinson ve ark.,

2012). ABA, bitkilerin farklı çevresel koşullara uyum sağlama yeteneğini düzenlemek için aracı görev yapan önemli bir habercidir. ABA seviyesi stresli durumlarda artar. Ayrıca genç yapraklarda ABA seviyesi yaşlı yapraklara göre daha fazladır (Chater ve ark., 2014). Başta kuraklık stresi koşullarında sinyal algısı ile ABA sentezlenir. ABA ya bekçi hücreleri yanıt verir. Stoma düzenlenmesi ile su kaybı azaltılır. Stoma hareketlerine, iyonların mebranlar boyunca taşınmasıyla kontrol edilen hücre turgoru aracılık eder ABA potasyum (K^+) ve anyon akışı (A^-) yoluyla stoma gözeneklerini tetikler (Misra ve ark. 2015). ABA vakuol ve plazma membranlarındaki iyon kanallarının açılmasına yardımcı olur. Buda iyonları hücreden serbest bırakır ve bir proton-ATP' yi inaktive eder (Pandey ve Assmann, 2007). Rowe ve ark. (2016), ABA'nın ozmotik stres koşulları altında kök büyümesini düzenlediğini bildirmiştir. Düşük su potansiyelinde, mısır kökü uzaması için ABA birikimi esastır. Düşük su mevcudiyetinde ABA sentez inhibitörü olan fluridon, birincil kök uzamasını inhibe eder. ABA kuraklık sinyali algılandıktan sonra, ağırlıklı olarak köklerde üretilir. ve daha sonra stoma açıklığının düzenlenmesi için yapraklara aktarılır. (Kazan, 2015; Mori ve ark., 2006). Bununla birlikte, ABA' nın dışarıdan uygulanması ile de bitkilerin kuraklık stresi ile başa çıkmasına yardımcı olur. ABA tedavisi ayrıca kuraklık koşulları altında net fotosentetik hızı, stoma iletkenliğini ve terleme hızını artırır.

Oksin: Oksin hormonu Indol-3-asetik asit, (IAA) yapısına sahip (Fernando ve Schroeder, 2016), tohum dormansisi, kök deseni, hücre

farklılaşması ve çiçek organı geliştirme vb. bitki büyüme ve gelişmesinde düzenleyici role sahip olduğu gibi çeşitli stres koşullarına yanıt vermesinde rol oynayan fito hormondur (Singh ve ark. 2017a; Brumos et al., 2018). Oksin biyosentezi çoğunlukla genç yapraklarda gerçekleşir. Genç yapraklardan floem yolu ile yada veya hücreden hücreye taşınma yoluyla uzak mesafelere taşınır (Chai ve Subudhi 2016). Kuraklık stresi koşullarında bitkilerin kök dallanmasını artıran oksin hormonu strese karşı toleransın artmasına neden olur (Ullah ve ark., 2018). IAA 'nın, diğer strese duyarlı hormonların aktivasyonu ve ROS üretimi yoluyla kuraklık stresi yönetimine aktif olarak yer almaktadır (Chhaya Yadav ve ark., 2020).

Sitokinin: Bitkide kuraklığa töleransı artırmada sitokinin hormonun beş mekanizması vardır. Fotosentetik aparatın korunması antioksidan maddeler, su dengesini düzenler, Bitki büyümesi ve stresle ilgili hormonları düzenler (Sahebi ve ark. 2018). Yapılan çalışmalarda sitokinin hormonun kuraklık stresi durumunda hem pozitif hemde negatif etki ye sahiptir. Çünkü sitokinin hormonu düzeyi kuraklığın yoğunluğuna ve süresine göre azalabilir ya da artabilir (Zwack ve Rashotte 2015). Sitokinin hormonunun negatif ve pozitif etkisi aynı zamanda bitkinin gen yapısı ile ilgilidir (Nishiyama ve ark., 2013).

Jasmonik asit: Kuraklık stresine yanıt veren diğer önemli hormon jasmonik asittir. Jasmonik asit α-Linolenik asitten elde edilir (Fernando ve Schroeder, 2016). Jasmonik asit ve Metil Jasmonat (MeJ) gibi türevleri ve yağlar yardımıyla bitkide kuraklık stres etkisini önemli düzeyde azalttığı ortaya konmuştur (Sánchez-Martín ve ark.,

2018). Jasmonik asit ve jasmonatlar bitkilerde kuraklık stresine karşı ABA ya benzer şekilde stomaların kapanma hareketini indükler Jasmonik asit ROS'un temizlenmesi ve kök gelişiminin artırılması yolu ile kuraklık stresine töleransı artırır (Riemann ve ark., 2015). Jasmonik asit kuraklık stresine maruz kalan Brassica bitkisinde klorofil içeriğini antioksidatif enzim aktivitesinin yanında bitki su içeriğinde, klorofil içeriğinde ve bitki yaş ağırlığında artışa neden olduğu tespit edilmiştir (Alam ve ark., 2014). Kuraklık stresi koşullarında pamuk bitkisinin kökleri osmotik strese maruz kalır. Jasmonik asit plazma mebranın içsel protein birikimini artırmak için tekrar köklere taşınır. Böylece köklerin su absorbsiyon kapasitesini artırır (Luo ve ark., 2019).

Etilen: Tüm bitki hormonları arasında gaz halinde bulunan tek hormondur (Fernando ve Schroeder, 2016). Meyve olgunlaşması, büyüme, yaşlanma, yaprakların dökülmesi, tohum çimlenmesi ve çeşitli stres durumlarında tepkiyi ortaya koyan bitki hormonudur. Benzer şekilde kuraklık stresi koşullarında bir savunma mekanizması olarak hayati rol oynar. Etilen fitohormonu Jasmonik asit ve salisilik asit gibi bitki hormonları ile birleştiğinde etkili bir şekilde çalışır. Çünkü tüm bu fito hormonların birleşimi kuraklık stresinde etkin rol oynamaktadırlar. Su stresinde stomaların sadece kapanmasında Jasmonik asit rol alırken etilen stomaların hem kapanmasında hem de açılmasında rol alırlar (Daszkowska-Golec ve Szarejko, 2013).

Giberrilik Asit: Giberrilinler büyüme hormonu olarak görev yapan ve stres koşullarına cevap veren tetrasiklik diterpenoid karboksiliktir

(Fernando ve Schroeder, 2016). Bitkinin yaşam döngüsü boyunca hücre uzaması yoluyla çoğu organın büyüme ve gelişmesini uyarır. Hücre bölünmesi, vejetatif büyümeyi gelişimsel faz geçişlerinin uyarır (Colebrook ve ark. 2014). Örneğin kuraklık stresi koşullarında, azaltılmış Giberrilik Asit içeriğine sahip domates bitkileri, prolin ve diğer amino asit seviyelerini artırarak, yaprak turgorunu daha uzun süre koruyarak su eksikliği toleransını teşvik ederek su yoksunluğu ile baş eder (Omena-Garcia ve ark., 2019). Genel olarak, yüksek bir GA seviyesi kuraklık toleransının azalmasına neden olurken, düşük seviye daha iyi kuraklık toleransı sağlar.

3. FİTO-HORMONLARIN KURAKLIK STRESİ KOŞULLARINDA ETKİLEŞİMİ

Bitkiler zorlu çevre koşullarında büyümeyi ve gelişmeyi sürdürebilmesi için, sayısız stratejiler geliştirirler. Genel olarak Jasmonik asit, etilen ve salisilik asit bitki savunma hormonları olarak bilinirken sitokininler, brassinosteroidler, giberilinler bitki gelişim hormonları olarak sayılmaktadır. ABA stres koşullarına karşı bitkinin tepkilerini düzenleyen temel fitohormondur. Kuraklık stresi koşullarında ABA ve JA sinyal yolları etkileşime girebilir (de Ollas ve Dodd 2016). ABA ve diğer stres hormonları arasındaki etkileşim kuraklık stresine bitkinin uyum sağlamasını ve hızlı tepki vermesine sebep olur. Absisik asit (ABA) en iyi sinyal molekülüdür. Toprakta su eksikliği köklerde ABA biyosentezini artırır. ABA daha sonra yapraklara taşınır. Bununla birlikte JA, SA, BR gibi diğer fitohormonlar, CK'ler veya ET de stoma gelişimini ve işlevini

düzenlemek için stres sinyallerini entegre etmek sureti ile stoma tepkisinde yer alır. (Brodribb ve McAdam 2017). Kuraklık stresi altında, fitohormonlardan BR'ler, JA ve SA arasındaki olası etkileşimler, antioksidatif sistemi uyararak oksidatif hasarı hafifletebilir ve bitkilerdeki su içeriğini artırabilir (Zhu ve ark., 2016; Wank ve ark.,2016). Bitkiler stres koşullarına çok çeşitli morfo-fizyolojik ve biyokimyasal süreçlerle yanıt verirler. Buna göre ABA ve diğer fitohormonlar kuraklık stresi durumunda hücresel dengeyi korumak için birbiriyle etkileşim içinde bulunmaktadırlar (Shinozaki and Yamaguchi-Shinozaki 2000). ABA ve metil jasmonik asit (MeJA) kuraklık stresi koşullarında reaktif oksijen çeşitleri (ROS), NO (nitrik oksit) ve stomanın açılıp kapanmasına neden olan S-tipi anyon kanallarının üretimini sağlarken, MeJA stomanın hareketlerine etki etmez. Ancak ROS ve NO üretimine etki etmektedir (Singh et al. 2017b). Diğer taraftan ABA kuraklık stresi koşullarında kök gelişimini düzenler. Jasmonik asit ise kuraklık koşullarında kalsiyum ve ABA ya bağlı sinyal yolları ile etkileşime girerek köklerin hidrolik iletkenliğini artırır Sánchez-Romera ve ark., 2014). Hoffmann ve ark., 2011 kuraklık stresi altında ABA artışı için Jasmonik asit birikiminin gerekliliği ifade edilmiştir. Bununla birlikte osmotik stres koşullarında Jasmonik asitin yanında oksin, etilen ve sitokininler ABA ile etkileşime girerek kök gelişimini düzenler (Rowe ve ark., 2016).

SONUÇ

Küresel ısınmanın sonucu olarak kuraklık mahsul verimini sınırlandıran önemli bir faktördür. Muhtemelen yakın gelecekte artan

küresel ısınma nedeniyle mahsül üretiminde zorluklar artacaktır. Kuraklığa dayanıklı ürünlerin bulunması için bilimsel çalışmalar devam etmektedir. Özellikle bitkilerin kuraklık töleransını teşvik konusunda moleküler ve fiyolojik olarak yapılan çalışmalar devam etmektedir. Amaç kuraklık koşullarına dayanıklı olanları belirlemek ve teşvik etmektir. Fito-hormonlar kuraklığa toleransı teşvik eden önemli sinyal molekülleridir. Bu konunun derinlemesine anlaşılması özellikle abiyotik stres faktörlerinden olan kuraklık başta olmak üzere olumsuz koşullarda verimlilikten ödün vermeden mahsul almakta bize yol gösterici olacaktır.

KAYNAKÇA

Alam, M. M.; Nahar, K., Hasanuzzaman, M. ve Fujita, M. (2014) Exogenous jasmonic acid modulates the physiology, antioxidant defense and glyoxalase systems in imparting drought stress tolerance in different Brassica species. *Plant Biotechnology Reports*, 8, 279−293.

Anonymous. (2007) Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovermental Panel on Climate Change, Summary for Policy Makers, Paris

Bahadur, A., Chatterjee, A., Kumarm, R., Singh, M. ve Naik, P. S. (2011) Physiological and biochemical basis of drought tolerance in vegetables. *Vegetable. Science*., 38, 1-16.

Bansal, S., Thakur, A., Singh, S., Bakshi, M., & Bansal, S. (2019). Changes in crop physiology under drought stress: A review. *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*, *8*(4), 1251-1253.

Brodribb, T. J., & McAdam, S. A. (2017). Evolution of the stomatal regulation of plant water content. *Plant physiology*, *174*(2), 639-649.

Brumos, J., Robles, L. M., Yun, J., Vu, T. C., Jackson, S., Alonso, J. M., & Stepanova, A. N. (2018). Local auxin biosynthesis is a key regulator of plant development. *Developmental cell*, *47*(3), 306-318.

Chai, C., & Subudhi, P. K. (2016). Comprehensive analysis and expression profiling of the OsLAX and OsABCB auxin transporter gene families in rice (Oryza sativa) under phytohormone stimuli and abiotic stresses. *Frontiers in plant science*, *7*, 593.

Chater, C. C., Oliver, J., Casson, S., & Gray, J. E. (2014). Putting the brakes on: abscisic acid as a central environmental regulator of stomatal development. *New Phytologist*, *202*(2), 376-391.

Clement, V., Rigaud, K. K., De Sherbinin, A., Jones, B., Adamo, S., Schewe, J., ... & Shabahat, E. (2021). *Groundswell part 2: Acting on internal climate migration*. World Bank.

Colebrook, E. H., Thomas, S. G., Phillips, A. L., & Hedden, P. (2014). The role of gibberellin signalling in plant responses to abiotic stress. *Journal of experimental biology*, *217*(1), 67-75.

Dai, A. (2013). Increasing drought under global warming in observations and models. *Nature climate change*, *3*(1), 52-58.

Daszkowska-Golec, A., & Szarejko, I. (2013). Open or close the gate–stomata action under the control of phytohormones in drought stress conditions. *Frontiers in plant science*, *4*, 138.

de Ollas, C., & Dodd, I. C. (2016). Physiological impacts of ABA–JA interactions under water-limitation. *Plant molecular biology*, *91*, 641-650.

Fahad, S., Hussain, S., Saud, S., Hassan, S., Chauhan, B. S., Khan, F., ... & Huang, J. (2016). Responses of rapid viscoanalyzer profile and other rice grain qualities to exogenously applied plant growth regulators under high day and high night temperatures. *PLoS One*, *11*(7), e0159590.

Fahad, S., Hussain, S., Saud, S., Tanveer, M., Bajwa, A. A., Hassan, S., ... & Huang, J. (2015). A biochar application protects rice pollen from high-temperature stress. *Plant Physiology and Biochemistry*, *96*, 281-287.

FAO. (2017). Drought & Agriculture. http://www.fao.org/3/i7378e/i7378e.pdf

FAO. (2019) Proactive Approaches to Drought Preparedness. ErişimTarihi,01.06.2020.http://www.fao.org/3/ca5794en/ca5794en.pdf

Fernando, V. D., & Schroeder, D. F. (2016). Role of ABA in Arabidopsis salt, drought, and desiccation tolerance. In *Abiotic and biotic stress in plants-recent advances and future perspectives*. IntechOpen.

Gupta, A., Rico-Medina, A., & Caño-Delgado, A. I. (2020). The physiology of plant responses to drought. *Science*, *368*(6488), 266-269.

Hoffmann, M., Hentrich, M., & Pollmann, S. (2011). Auxin-Oxylipin Crosstalk: Relationship of Antagonists F. *Journal of integrative plant biology*, *53*(6), 429-445.

Jaleel, C. A., Manivannan, P, Wahid, A., Farooq, M., Al-Juburi, H. J., Somasundaram, R. Y., & Panneerselvam, R. (2009). Drought stress in plants:

a review on morphological characteristics and pigments composition. *Int. J. Agric. Biol*, *11*(1), 100-105.

Kaçar, B., Katkat, A. V., & Öztürk, Ş. (2006). Bitki Fizyolojisi. Nobel Yayınları. 2. *Baskı. Ankara*.

Kaiser, W. M., Kaiser, G., Schöner, S., & Neimanis, S. (1981). Photosynthesis under osmotic stress: differential recovery of photosynthetic activities of stroma enzymes, intact chloroplasts, protoplasts, and leaf slices after exposure to high solute concentrations. *Planta*, *153*(5), 430-435.

Kalefetoğlu, T., & Ekmekci, Y. (2005). The effects of drought on plants and tolerance mechanisms. *Gazi University Journal of Science*, *18*(4), 723-740.

Kamanga, R. M., Mbega, E. ve Ndakidemi, P**. (**2018) Drought Tolerance Mechanisms in Plants: Physiological Responses Associated with Water Deficit Stress in *Solanum lycopersicum. Adv Crop Sci Tech.*, Vol 6(3): 362.

Kazan, K. (2015). Diverse roles of jasmonates and ethylene in abiotic stress tolerance. *Trends in plant science*, *20*(4), 219-229.

Luo, Z., Kong, X., Zhang, Y., Li, W., Zhang, D., Dai, J., ... & Dong, H. (2019). Leaf-derived jasmonate mediates water uptake from hydrated cotton roots under partial root-zone irrigation. *Plant physiology*, *180*(3), 1660-1676.

McKersie, B. D., & Lesheim, Y. (2013). *Stress and stress coping in cultivated plants*. Springer Science & Business Media.

Misra, B. B., Acharya, B. R., Granot, D., Assmann, S. M., & Chen, S. (2015). The guard cell metabolome: functions in stomatal movement and global food security. *Frontiers in Plant Science*, *6*, 334.

Mori, I. C., Murata, Y., Yang, Y., Munemasa, S., Wang, Y. F., Andreoli, S., ... & Schroeder, J. I. (2006). CDPKs CPK6 and CPK3 function in ABA regulation of guard cell S-type anion-and Ca2+-permeable channels and stomatal closure. *PLoS biology*, *4*(10), e327.

Muller, B., Pantin, F., Génard, M., Turc, O., Freixes, S., Piques, M., & Gibon, Y. (2011). Water deficits uncouple growth from photosynthesis, increase C content, and modify the relationships between C and growth in sink organs. *Journal of experimental botany*, *62*(6), 1715-1729.

Nemeskéri, E., Neményi, A., Bőcs, A., Pék, Z., & Helyes, L. (2019). Physiological factors and their relationship with the productivity of processing tomato under different water supplies. *Water*, *11*(3), 586.

Nezhadahmadi, A., Prodhan, Z. H., & Faruq, G. (2013). Drought tolerance in wheat. *The Scientific World Journal*, *2013*.

Nishiyama, R., Watanabe, Y., Leyva-Gonzalez, M. A., Van Ha, C., Fujita, Y., Tanaka, M., ... & Tran, L. S. P. (2013). Arabidopsis AHP2, AHP3, and AHP5 histidine phosphotransfer proteins function as redundant negative regulators of drought stress response. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *110*(12), 4840-4845.

Omena-Garcia, R. P., Martins, A. O., Medeiros, D. B., Vallarino, J. G., Ribeiro, D. M., Fernie, A. R., ... & Nunes-Nesi, A. (2019). Growth and metabolic adjustments in response to gibberellin deficiency in drought stressed tomato plants. *Environmental and experimental botany*, *159*, 95-107.

Pandey, S., Zhang, W., & Assmann, S. M. (2007). Roles of ion channels and transporters in guard cell signal transduction. *FEBS letters*, *581*(12), 2325-2336.

Petrov, V., Hille, J., Mueller-Roeber, B., & Gechev, T. S. (2015). ROS-mediated abiotic stress-induced programmed cell death in plants. *Frontiers in plant science*, *6*, 69.

Pinheiro, H. A., DaMatta, F. M., Chaves, A. R., Fontes, E. P., & Loureiro, M. E. (2004). Drought tolerance in relation to protection against oxidative stress in clones of Coffea canephora subjected to long-term drought. *Plant science*, *167*(6), 1307-1314.

Ray, D. K., West, P. C., Clark, M., Gerber, J. S., Prishchepov, A. V., & Chatterjee, S. (2019). Climate change has likely already affected global food production. *PloS one*, *14*(5), e0217148.

Reddy, A. R., Chaitanya, K. V., Jutur, P. P., & Sumithra, K. (2004). Differential antioxidative responses to water stress among five mulberry (Morus alba L.) cultivars. *Environmental and experimental botany*, *52*(1), 33-42.

Riemann, M., Dhakarey, R., Hazman, M., Miro, B., Kohli, A., & Nick, P. (2015). Exploring jasmonates in the hormonal network of drought and salinity responses. *Frontiers in plant science*, *6*, 1077.

Rowe, J. H., Topping, J. F., Liu, J., & Lindsey, K. (2016). Abscisic acid regulates root growth under osmotic stress conditions via an interacting hormonal network with cytokinin, ethylene and auxin. *New Phytologist*, *211*(1), 225-239.

Sahebi, M., Hanafi, M. M., Rafii, M. Y., Mahmud, T. M. M., Azizi, P., Osman, M., ... & Atabaki, N. (2018). Improvement of drought tolerance in rice (Oryza sativa L.): genetics, genomic tools, and the WRKY gene family. *BioMed research international*, *2018*.

Sánchez-Martín, J., Canales, F. J., Tweed, J. K., Lee, M. R., Rubiales, D., Gómez-Cadenas, A., ... & Prats, E. (2018). Fatty acid profile changes during gradual soil water depletion in oats suggests a role for jasmonates in coping with drought. *Frontiers in plant science*, *9*, 1077.

Sánchez-Romera, B., Ruiz-Lozano, J.M., Li, G., Luu, D. T., Martínez-Ballesta, M. C. ve Carvajal, M. (2014) Enhancement of root hydraulic conductivity bymethyl jasmonate and the role of calcium and abscisic acid in this process. *Plant Cell Environ.*, 37, 995–1008.

Sgherri, C., Pinzino, C., & Nvari Izzo, F. (1996). Sunflower seedlings subjected to increasing stress by water deficit: changes in superoxide production related to the composition of thylakoid membranes. *Physiologia Plantarum*, *96*(3), 446-452.

Sharp, R. E., Wu, Y., Voetberg, G. S., Saab, I. N., & LeNoble, M. E. (1994). Confirmation that abscisic acid accumulation is required for maize primary root elongation at low water potentials. *Journal of Experimental Botany*, *45*(Special_Issue), 1743-1751.

Shinozaki, K., & Yamaguchi-Shinozaki, K. (2000). Molecular responses to dehydration and low temperature: differences and cross-talk between two stress signaling pathways. *Current opinion in plant biology*, *3*(3), 217-223.

Singh, R., Parihar, P., Singh, S., Mishra, R. K., Singh, V. P., & Prasad, S. M. (2017b). Reactive oxygen species signaling and stomatal movement: Current updates and future perspectives. *Redox Biology*, *11*, 213-218.

Singh, V. P., Prasad, S. M., Munné-Bosch, S., & Müller, M. (2017). Phytohormones and the regulation of stress tolerance in plants: current status and future directions. *Frontiers in plant science*, *8*, 1871.

Soysal, S., & Erman, M. (2022) Net Photosynthesis of Wheat under Abiotic Stress: A Review. M. Karaman (Ed) Theoretical and Practical New Approaches in Cereal Science and Technology (pp. 131-146). IKSAD, Türkiye.

Srinivasa Rao, N. K., Bhatt, R. M., & Sadashiva, A. T. (2000). Tolerance to water stress in tomato cultivars. *Photosynthetica*, *38*, 465-467.

Şimşek O., (2010) Türkiye'de tarım yılı kuraklık değerlendirmesi ve bitki gelişim modeli ile buğdayda kuraklık-verim analizi. (Doktora tezi) Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enst. Ankara.

Ullah, A., Manghwar, H., Shaban, M., Khan, A. H., Akbar, A., Ali, U., ... & Fahad, S. (2018). Phytohormones enhanced drought tolerance in plants: a coping strategy. *Environmental Science and Pollution Research*, *25*, 33103-33118.

Ullah, A., Sun, H., Hakim, Yang, X., & Zhang, X. (2018). A novel cotton WRKY gene, GhWRKY6-like, improves salt tolerance by activating the ABA signaling pathway and scavenging of reactive oxygen species. *Physiologia Plantarum*, *162*(4), 439-454.

UN, Water. (2021) Water Facts – Scarcity. https://www.unwater.org/water-facts/scarcity/

Wang, Z., Wang, F., Hong, Y., Huang, J., Shi, H., & Zhu, J. K. (2016). Two chloroplast proteins suppress drought resistance by affecting ROS production in guard cells. *Plant physiology*, *172*(4), 2491-2503.

Warner, K., & Afifi, T. (2014). Where the rain falls: Evidence from 8 countries on how vulnerable households use migration to manage the risk of rainfall variability and food insecurity. *Climate and Development*, *6*(1), 1-17.

Wilkinson, S., Kudoyarova, G. R., Veselov, D. S., Arkhipova, T. N., & Davies, W. J. (2012). Plant hormone interactions: innovative targets for crop breeding and management. *Journal of experimental botany*, *63*(9), 3499-3509.

Yadav, B., Jogawat, A., Gnanasekaran, P., Kumari, P., Lakra, N., Lal, S. K., ... & Narayan, O. P. (2021). An overview of recent advancement in phytohormones-mediated stress management and drought tolerance in crop plants. *Plant Gene*, *25*, 100264.

Yüksel, B., & Aksoy, Ö. (2017). Su stresi koşullarında bitkilerde gözlenen değişimler. *Türk Bilimsel Derlemeler Dergisi*, *10*(2), 1-5.

Zhu, J. K. (2016). Abiotic stress signaling and responses in plants. *Cell*, *167*(2), 313-324.

Zwack, P. J., & Rashotte, A. M. (2015). Interactions between cytokinin signalling and abiotic stress responses. *Journal of experimental botany*, *66*(16), 4863-4871.

BÖLÜM 10

ARITILMIŞ ATIK SU KULLANIMININ BİTKİ STRES FAKTÖRLERİNE ETKİSİ

Prof. Dr. Şefik TÜFENKÇİ[1*]

Dr. Öğr. Üyesi Talip ÇAKMAKCI[2]

Arş. Gör. Dr. Caner YERLİ[3]

Prof. Dr. Üstün ŞAHİN[4]

DOI: https://dx.doi.org/10.5281/zenodo.10031418

[1*]Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Biyosistem Mühendisliği Bölümü, Van, Türkiye, *sefiktufenkci@yyu.edu.tr
[2] Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Biyosistem Mühendisliği Bölümü, Van, Türkiye, talipcakmakci@yyu.edu.tr
[3] Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Biyosistem Mühendisliği Bölümü, Van, Türkiye, caneryerli@yyu.edu.tr
[4] Atatürk Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Tarımsal Yapılar ve Sulama Bölümü, Erzurum, Türkiye, ussahin@atauni.edu.tr

GİRİŞ

Su, tarih boyunca göçebe yaşamından yerleşik tarımsal üretime dayalı yaşam biçimine geçişte önemli bir rol oynamıştır. Bugün dünya üzerinde birçok ülkede olduğu gibi sulu tarım toplumun tarımsal üretiminin temelini oluşturmaktadır. Dünya nüfusunun %40'ından fazlasının su stresi yaşadığını ve önümüzdeki 50 yıl içinde su kıtlığı ile karşı karşıya kalacağını tahmin edilmektedir (Mancosu ve ark., 2015). 2015 Birleşmiş Milletler Dünya Su Kalkınma raporuna göre, tarımın 2050 yılına kadar küresel olarak %60 daha fazla gıda üretmesi gerekecektir (Connor, 2017). Bu yüzden tarımsal sulama için tatlı su kaynaklarının yetersizliği halihazırda dünyanın birçok bölgesinde karşılaşılan kritik bir sorundur.

Dünya genelindeki su kıtlığı sorunu nedeniyle, artan tatlı su talebini karşılamak için geleneksel olmayan su kaynakları üzerinde düşünmek gerekmektedir. Dünyadaki bazı ülkeler, tarımsal üretim için yeni alternatif kaynakların bulunması yönünde önemli adımlar atmıştır. Alternatif su kaynakları arasında arıtılmış atık su, drenaj suyu, deniz suyunun ve tuzlu yeraltı suyunun tuzdan arındırılması ve yağmur suyu hasadı sayılabilir (Rygaard ve ark., 2011; Chen ve ark., 2017). Ancak tuzdan arındırma yöntemlerinin büyük miktarda enerji gerektirmesi hem çevre kirliliği hem de maddi açıdan maliyetli olması, bu teknolojiyi evsel amaçlar için sınırlı hale getirmektedir (Karagiannis ve Soldatos, 2008). Avustralya, Şili, Çin, Kıbrıs, Hindistan, İsrail, İtalya ve Meksika gibi birçok ülke arıtılmış veya kısmen arıtılmış atık

sularının bir kısmını bitkisel üretim için kullanmaktadır (Jaramillo ve Restrepo, 2017; Angelakis ve ark., 2018).

Dünya çapında üretilen atık su hacmi, nüfus artışı ve kentleşmeyle birlikte artmaya devam edecektir, bu nedenle tarımsal ürünlerin sulanması için arıtılmış atık suların yeniden kullanılması yoluyla tatlı su talebini azaltmaya yönelik alternatifleri değerlendirmek akıllıca görünmektedir.

Atık suyun tarımsal sulamada yeniden kullanımı, kentsel kullanıcılara, çiftçilere ve çevreye sağladığı üçlü fayda nedeniyle tatlı su kıtlığına bir çözüm olarak görülmektedir (Winpenny ve ark., 2010). Arıtılmış atık su ile sulama, tatlı su kaynaklarının yetersiz olduğu birçok bölgede yaygın bir uygulama olmuştur. Örneğin İsrail'de yıllık sulama suyu tedarikinin %50'den fazlası arıtılmış atık sudan sağlanmaktadır (Navon ve ark., 2011). Fakat tarımda atık suyun yeniden kullanımını teşvik etmek için temel zorluk, belirli yerlerdeki farklı ürün türlerini göz önünde bulundurarak mevcut arıtılmış atık su kaynaklarını miktar, kalite ve erişilebilirlik açısından belirlemektir. Buna ek olarak, tarımsal kullanımda atık suyun yeniden kullanımının güvenli ve rasyonel bir şekilde uygulanması için düzenlemeler, halk sağlığı riskleri ve çevresel etkiler değerlendirilmelidir.

ATIK SU KULLANIMININ BİTKİLERDE OLUŞTURDUĞU ETKİ MEKANİZMALARI

Arıtılmış atık sular, bitki büyümesi için gerekli besin maddelerini ve temel elementleri içermeleri nedeniyle sulama amacıyla yaygın olarak

kullanılmaktadır (FAO, 2013). Atık suyun sulamada kullanılması, çoğu ürünün potansiyel verimini artırarak gerekli kimyasal gübre miktarını azaltacak ve çiftçilere net maliyet tasarrufu sağlayacaktır. Ancak, atık su ile sulama yoluyla bitkilere, başta toplam azot olmak üzere, gereksinimlerini aşan besin ve elementlerin uygulanması, aşırı vejetatif büyümeye ve ürünün olgunlaşmasında gecikmeye yol açabilir veya diğer bazı ekstrem koşullarda verim kaybına neden olabilir.

Tuzluluk bitki büyümesini iki mekanizma aracılığıyla etkiler. Birincisi, tuzlar kök bölgesinde biriktikçe toprak gözenek suyunun yüksek ozmotik potansiyeli nedeniyle su mevcudiyetinin azalmasıdır. Su, bitki köklerine ozmoz yoluyla girer; bu süreçte su, bitkinin mineral iyonları alımına yanıt olarak kök hücrelerine doğru hareket eder. Suyun mevcudiyeti, matris potansiyeli ve ozmotik potansiyeli içeren kuvvetlerin toplamı olarak ölçülür (Ekmekçi ve ark., 2005; Yakıt ve Tuna, 2006). Toprak gözenek suyunun su potansiyeli, kök dokularındaki mineral iyon tuzlarının varlığıyla belirlenen su potansiyelinden daha negatif hale geldiğinde, su artık bitki tarafından alınamaz (Yılmaz ve ark., 2011; Dölarslan ve Çakırlar, 2012). İkincisi ise spesifik iyon toksisiteleridir.

Sodyum iyonları killi topraklarda kil parçacıklarının dağılmasına, toprağın sızdırmaz hale gelmesine ve drenajın bozulmasına neden olur (Ayers ve Westcott, 1984). Mikro ölçekte, kil parçacıklarını birbirinden ayırır; makro ölçekte ise, toprak agregat stabilitesini azaltır ve sert bir zemin oluşturur (Doğan, 2006). Bu zemin suyun daha yavaş infiltrasyonuna, su akışının artmasına, toprak erozyonuna ve zayıf

toprak havalanmasına neden olur, bu da bitki kökleri için kuraklığa neden olabilir. Arıtılmış atık suyun arıtım kalitesine göre de içeriğinde sodyum oranı değişiklik gösterebilmektedir. Joy (2013), arıtılmış atık su kullanımının bitki yapraklarında daha yüksek miktarda klorür biriktirdiğini bildirmiştir. Topraktaki yüksek sodyum konsantrasyonları bitkinin kalsiyum ve potasyum alımını tehdit etmekte, kök bölgesinde ozmotik stres yaratmakta ve toksik olabilmektedir (Yokoi ve ark., 2002; Demirtaş ve ark., 2012). Toprakta yüksek tuzluluk ve sodyum birikimi, daha az yağış alan bölgelerde daha büyük bir sorun olma eğilimindedir.

Arıtılmış atık suyun en önemli özelliklerinden biri ihtiva ettiği besin maddeleridir. Arıtılmış atık suların sulama için kullanılmaya devam edilmesi bitki besin maddelerinin önemli miktarda bitkiye geçmesine neden olabilir. Fakat aşırı besin elementi girişine de dikkat edilmelidir. Aşırı azot, meyve verimi üzerinde yüksek klorür gibi olumsuz bir etkiye sahip olabilir. Fazla azot yaprak kenarlarını koyu yeşil bir renge, bazen de gri veya kahverengi kenarlara dönüştürür ve bu durum gübre yanığı olarak bilinir. Yüksek azot konsantrasyonları bitki dokusunda daha yüksek protein içeriğine eşittir, bu da böcekler için yüksek kaliteli gıda anlamına gelir. Böcekler düşük karbon/azot oranına sahiptir, bu da protein gibi azot kaynaklarına yüksek talepleri olduğu anlamına gelir (Dreistadt, 2008). Bu nedenle verimli bir yetiştiricilik için azot seviyesinin kontrol edilmesi gerekmektedir. Jones (2013) temel besin maddelerinin ve minerallerin bitkiler üzerindeki olumlu ve olumsuz etkilerini araştırmış ve bitkilerin

büyümesini etkileyen başlıca minerallerin azot, fosfor, potasyum, kalsiyum, magnezyum ve sülfür olduğunu bildirmiştir. Ancak, su ortamına deşarj edildiklerinde, azot ve fosfor istenmeyen su canlılarının büyümesine yol açacaktır. Amino asitler, üre ve ürik asitler organik azot için ana kaynaklar olarak düşünülebilir (Kadlec ve Knight, 1996), inorganik azot ise amonyum, nitrit ve nitrat olarak bulunabilir (Saeed ve Sun, 2012). Arıtılmış atıksularda, bu azot formlarının miktarı arıtma proseslerine bağlı olarak değişiklik göstermektedir.

Fosfor genellikle azottan sonra bitkiler için en sınırlayıcı ikinci besin maddesidir (Horuz ve ark., 2017). Fosfor, DNA moleküllerinin ve enerji için moleküler para birimi olan adenozin trifosfatın (ATP) temel bir bileşenidir (Taiz ve Zeiger, 2006). Toprakta genellikle bol miktarda bulunmasına rağmen fosfor oldukça hareketsizdir, bu nedenle toprak çözeltisindeki çözünebilir fosfor konsantrasyonu topraktaki rezerve kıyasla düşüktür.

Potasyum, azot ve fosfordan sonra bitkiler için önemli üçüncü besin maddesidir. Potasyum iyonları, karbondioksit alımı ve su salınımı için stomaların açılıp kapanmasını düzenler (Klein ve ark., 2003; Prajapati ve Modi, 2012). Potasyum eksikliği yaprak kıvrılması ve renksiz veya nekrotik lekeler de yaygın semptomlardır ve verim ve meyve büyüklüğü azalabilir (Bolat ve Kara, 2017). Potasyum fazlalığı kalsiyum ve magnezyum eksikliğine neden olabilir (Buchelt ve ark., 2020). Potasyum eksikliği durumunda, toprak çözeltisine istenmeyen

klorür iyonları eklediği için potasyum klorür gübre olarak kullanılmasında dikkat edilmelidir.

Magnezyum, fotosentezin ayrılmaz bir parçası olan temel bir elementtir (Yan ve Hou, 2018). Magnezyum eksikliği, yaşlı yapraklarda damarlar arası kloroz olarak tanımlanırken, magnezyum fazlalığı potasyum içeriğini azaltır (Tränkner ve ark., 2018). Klorofil yapısını tamamlamak için magnezyum gerektiğinden, düşük magnezyum seviyeleri doğrudan klorofil içeriğini azaltır ve bu da fotosentetik kapasitenin azalması, büyümenin azalması ve verimin düşmesi gibi zincirleme bir reaksiyona yol açabilir.

Kalsiyum bitki hücre duvarlarına dahil edilir ve hücre bölünmesi ve büyümesi için gereklidir (Somerville ve ark., 2004; Cosgrove, 2005). Düşük kalsiyum, düşük kaliteli meyve ve meyvede hücre duvarlarının daha hızlı parçalanması nedeniyle hızlandırılmış olgunlaşma ile ilişkilidir (Bolat ve Kara, 2017). Urbano ve ark., (2017), arıtılmış atık suyun marul bitkisi sulamasında kullanımıyla bitki yapraklarındaki kalsiyum seviyesinin azaldığını tespit etmişlerdir. Alobaidy ve ark. (2010), arıtılmış atık su kullanımının bitkilerde kalsiyum alımında değişiklik gösterebileceğini bildirmişlerdir.

FAO (2003) arıtılmış atık sudaki en toksik iyonların sodyum, klorür ve bor olduğunu belirtmiştir. Belirli bir iyondan kaynaklanan toksisite, bu iyon bitki tarafından alındığında ve hasara veya verim azalmasına neden olacak miktarlarda biriktiğinde meydana gelir.

Atık suyun sulamada kullanımı ile ilgili bir diğer önemli sorun da arıtılmış atık sudaki aşırı klor kalıntısıdır. Yeniden kullanılan sudaki aşırı klor, özellikle yağmurlama sulama sistemi kullanıldığında bitki yapraklarını etkileyebilir. Kalıntı klor konsantrasyonunun 1 mg/l olması bitki yapraklarını etkilemezken, 5 mg/l'den fazla olması bitkilerde ciddi hasara yol açacaktır (FAO, 2003). Hassas ürünler için toksisitenin, ürünü veya sulama suyu kaynağını değiştirmeden düzeltilmesi zordur. Sorun genellikle şiddetli (sıcak) iklim koşullarında ortaya çıkmaktadır (Ayers ve Westcot, 1985). Sulama için arıtılmış atık su kalitesine ilişkin Gıda ve Tarım Örgütü (FAO) ve Ayers ve Westcot referansları literatürde sıkça kullanılmaktadır.

Bor, bitkiler için önemli bir mikro besin maddesidir. Bor eksikliği anormal derecede küçük, genç, soluk yeşilden sarıya değişen yapraklarda böcek zararı sanılabilecek deliklerle kendini gösterir (Whiley ve ark., 1996). Borun kaynağı genellikle ev tipi deterjanlar veya endüstriyel tesislerden gelen deşarjlardır (Hameed ve ark., 2020). Arıtılmış atık su kullanımında bitki yapraklarında borun zamanla biriktiğine dair belirti yoktur fakat bor toksisitesi atık su ile sulanan topraklarda tehdit oluşturabilir (Dreistadt, 2008). Borun biyoyararlanımı 7,5-8,5 gibi orta derecede yüksek pH değerlerinde azalır. Yüksek pH nedeniyle bor eksikliği olasılığı, atık suda bulunan bor fazlalığı ile kısmen dengelenebilir (Lauchli ve Gratan, 2012). Topraktaki borun ölçülmesi, sulama suyundaki konsantrasyonunun topraktaki bor konsantrasyonunun göstergesi olmaması ve toprak mineralojisine bağlı olması nedeniyle karmaşıktır. Sulama suyundaki

klorür ve sülfat gibi diğer iyonların aksine bor kolayca süzülmez ve kil partikülleri üzerindeki anyon değişim bölgelerinde tutulduğu kök bölgesi boyunca yavaşça hareket eder. Bitki kökleri tarafından işgal edilen toprak yüksek seviyelerde bor ile dolduğunda, giderek daha toksik hale gelir ve iyileştirilmesi çok zorlaşır. Topraklarda bor birikim oranı en çok toprağın kil içeriği ile yakından ilişkilidir. Topraktaki kil yüzdesi ne kadar yüksekse bor birikim oranı da o kadar hızlıdır.

Küçük miktarlarda bitkiler için faydalı olan mikro besinler ve atık suda bulunabilen ağır metallerden bazıları demir (Fe), bakır (Cu), çinko (Zn), Kadmiyum (Cd), molibden (Mo) ve nikel (Ni) sayılabilir (Jones, 2013). Bu metallerin fazla miktarda bulunması insan sağlığı, hayvanlar ve hatta sulanan ürünler için ciddi bir risk oluşturmaktadır. Çünkü bu metaller ürün dokusunda birikebilir ve daha sonra bu tarımsal ürünlerle beslenen insanları veya hayvanları etkileyebilir (FAO, 2003; Bakhshayesh ve ark., 2014).

Demir, mitokondri ve kloroplastlardaki sitokromlara dahil edilir ve ayrıca klorofil sentezinde de rol oynar (Heldt ve Heldt, 2005). Demir eksikliğinde genç yaprakları damarlar arasında beyazdan sarıya kadar değişen renkte olur, yaprak uçları ve yaprak kenarları nekrotiktir, ilerleyen aşamada yapraklar düşer (Uchida, 2000; Karthika ve ark., 2018). Bitkide fazla demirin bulunması ise manganez eksikliğine neden olur ve ironik bir şekilde manganez eksikliği demir eksikliğiyle aynı belirtileri gösterir (Kaiser ve ark., 2005; Kirk ve ark., 2022).

Çinko bitkiler için önemli bir mikro besin maddesidir ve uygun enzim fonksiyonu, hormon üretimi ve boğum arası uzaması için gereklidir (Hafeez ve ark., 2013). Çinko eksikliği birçok üründe verimi düşürmektedir. Çinko eksikliği belirtileri genç yaprakları etkiler ve damarlar arası kloroz, kompakt rozet benzeri yapraklar, nekrotik kenarlı azalmış yaprak yüzey alanı ve yuvarlak kırmızı meyve olarak görülür (Stemke, 2016).

FAO'ya (2003) göre, Yakın Doğu ülkelerinde atık sulardaki ağır metal ve eser elementler ciddi bir sorun olarak görülmemektedir. Bunun nedeni, bu tür bölgelerde yüksek kalsiyum karbonat ($CaCo_3$) içeren çoğunlukla alkali topraklara (pH>7) ek olarak endüstriyel faaliyetlerin düşük seviyelerde olması nedeniyle kentsel atık sulardaki ağır metal konsantrasyonlarının düşük olmasıdır. Bu alkali toprak, ağır metallerin aktivitesini engelleyecek ve bunların hareketliliğini ve mahsuller için kullanılabilirliğini azaltacaktır. Bu nedenle, ağır metal içeren atık suyun kireçli topraklara uygulanması düşünülmezken, asit topraklarda, ağır metaller hassas bitkiler için bir sorun olabilir (Ayers ve Westcot; 1985; FAO, 2003).

Arıtılmış atık suyun sulamada kullanımıyla bitki yapraklarında klorofil içeriği artış göstermiştir (Al-Khamisi ve ark., 2017; Cakmakci ve Sahin, 2021). Cakmakci ve Sahin (2021), bitki yapraklarında klorofil içeriğinin demir içeriğiyle doğrusal ilişkisi olduğunu belirtmişlerdir. Benzer şekilde, arıtılmış atık su kullanımıyla klorofil içeriğinin azalması düşük demir ve magnezyum konsantrasyonları ile açıklanabilir. Arıtılmış atık su, daha yüksek mineral içeriği nedeniyle

toprak pH'ını yükseltme eğilimindedir ve bazik topraklar bitki alımı için demir kullanılabilirliğini azaltır. Demir, klorofil moleküllerinin biyosentezinde yer alır ve demir aynı zamanda fotosentez ve hücresel solunum için önemli olan sitokromların bir bileşenidir (Heldt ve Heldt, 2005). Dolayısıyla demir eksikliği yaprak klorofil içeriğini doğrudan azaltabilir ve enerji üretimi ve tüketimine müdahale edebilir.

Arıtılmış atık suda sulama suyuna kıyasla daha yüksek tuzluluk, azot, fosfor, bor, klorür ve sodyum bulunmaktadır. Bu yüzden arıtılmış atık su, toprak pH'ını yükselten daha yüksek bir mineral içeriğine sahip olma eğilimindedir. Toprak pH'ı daha bazik hale geldikçe, çinko ve demir gibi mikro besin maddelerinin çözünürlüğü azalır (Fageria ve ark., 2002). Yapraklardaki yüksek fosfor seviyeleri, kalsiyum ve magnezyumun yaprak konsantrasyonlarını artırmak için sinerjik olarak hareket eder. Topraktaki yüksek nitrat toprak pH'ını yükseltir ve böylece bitki alımı için kalsiyum ve magnezyumun kullanılabilirliğini artırır (Neina, 2019). Topraktaki yüksek amonyum konsantrasyonu toprak pH'ını düşürür ve böylece kalsiyum ve magnezyumun kullanılabilirliğini azaltır (Yerli ve ark., 2020). Yüksek fosfor mevcudiyeti yapraklardaki klorür konsantrasyonlarını artırma eğilimindeyken, yüksek azot seviyeleri klorür ve bor asimilasyonunu azaltır. Azot gübrelemesi bazen stratejik olarak bor ve/veya klorür oranı yüksek sularla sulamayı hafifletmek için kullanılır (Hofman ve ark., 2005; Uçgun ve ark., 2019).

Arıtılmış atık suyun kullanımında önemsenmeyen fakat dikkat edilmesi gereken diğer bir etkende patojendir (Salmonella enterica).

Çünkü Salmonella hücreleri bitkilerin hem yüzeyinde hem de iç kısmında kolonize olma kabiliyetine sahiptir. Salmonella hücreleri çeşitli bitki yüzeylerine bağlanabilmektedir (Solomon ve Matthews, 2006). Simko ve ark. (2015), marulda oomycete *Bremia lactucae*'nin neden olduğu tüylü küf hastalığının yapraklarda Salmonella üremesini teşvik ettiğini bildirmişlerdir. Ayrıca Salmonella yapraklardaki stomalardan, kök bağlantılarından ve yaprak ve köklerdeki çatlaklardan geçerek bitki dokularının içine ulaşabilir (Kroupitski ve ark., 2009). Salmonella'nın bitki içlerine girme yolu, bitkileri arıtılmış atık suyla sulamak için kullanılan sulama yöntemlerinden etkilenir. Su ile bitkilerin toprak üstü kısımları arasında doğrudan temas yaratan sprey/yağmurlama sulama yöntemi, arıtılmış atık su ile sulama için tavsiye edilmemektedir (EPA, 2012). Su ile bitkilerin toprak üstü kısımları arasında doğrudan teması önleyen yüzey sulama, damla sulama ve alt sulama gibi diğer sulama yöntemlerinin arıtılmış atık su sulamasında kullanılmasına izin verilmektedir (EPA, 2012; Gorbatsevich ve ark., 2013).

SONUÇ

Dünya nüfus artışı, küresel ısınma ve iklim değişikliğinin de etkisiyle mevcut su kaynakları üzerinde baskı arttıkça, arıtılmış atık suyun ve diğer geri kazanılmış suların (drenaj suyu, yağmur suyu vb.) kullanımı giderek artan bir öneme sahip olacaktır. Ülkemizde şehirleşmenin yüksek olmasından dolayı atık suların arıtılması potansiyeli yüksektir. Arıtılan sularında çevreye, doğaya, bitkiye ve insanlara zarar vermeden bertaraf edilmesi gerekmektedir. Bu yüzden hem

ekonomiklik hem de çevreci bir şekilde arıtılmış atık suların tarımda sulama amaçlı kullanımı ön plana çıkmaktadır. Arıtılmış atık suların kontrollü ve yeterli bir şekilde arıtılması gerekmektedir. Aksi taktirde topraklarımız, gıdalarımız, çevremiz ve sağlığımız tehdit altındadır. Arıtılmış atık sudan kaynaklı toprak kirliliği, toprağın tamponlama özelliği sayesinde uzun yıllar sürmektedir. Her ne kadar uzun yıllar sürse de zamanla ıslah edilemez hale gelecektir. Arıtılmış atık suyun bitkiye geçişi ise hızlı bir şekilde gerçekleşmektedir. Bitkide fiziksel, fizyolojik ve kimyasal (bitki boyu, gövde çapı, yaprak klorofil içeriği, besin element içeriği, ağır metaller, hastalıklar) olarak birçok etki altında kalmaktadır. Bu sebeple atık suyun arıtılması yeterli ve kontrollü bir şekilde olmalıdır. Gelecek yıllarda mevcut su kaynaklarına alternatif en uygun ve ekonomik olan su kaynağının arıtılmış atık suların olacağı düşünülmektedir. Gelecekte temiz su arz-talep boşluğunun doldurulması için arıtılmış atık suyun kullanımının artmasına yönelik yaptırımların yapılması, gerekli kontrollerin sağlanması ve tüketicilerinde bu çerçeve dahilinde entegre edilmelidir. Ayrıca, elde edilen arıtılmış atık suyun zararlı etkilerden arındırılarak kalitesinin arttırılması için yüksek kalitede atık su arıtma teknolojisinin kullanılması, atık su toplama oranlarının iyileştirilmesi ve arıtılmış atık suyun yeniden kullanım politikasının ayarlanması gibi yeni senaryolar düşünülmelidir.

KAYNAKÇA

Alobaidy, A. H. M. J., Al-Sameraiy, M. A., Kadhem, A. J., & Majeed, A. A. (2010). Evaluation of treated municipal wastewater quality for irrigation. *Journal of Environmental Protection*, *1*(3), 216

Al-Khamisi, S. A., Ahmed, M., Al-Wardy, M., Prathapar, S. A., & Choudri, B. S. (2017). Effect of reclaimed water irrigation on yield attributes and chemical composition of wheat (Triticum aestivum), cowpea (Vigna sinensis), and maize (Zea mays) in rotation. *Irrigation Science*, 35(2), 87-98.

Ayers, R. S., & Westcott, D. W. (1985). Water quality for agriculture (No. 29): food and agriculture Organization of the United Nations. *Rome, Italy*.

Angelakis, A. N., Asano, T., Bahri, A., Jimenez, B. E., & Tchobanoglous, G. (2018). Water reuse: from ancient to modern times and the future. *Frontiers in Environmental Science*, 26.

Bakhshayesh, B. E., Delkash, M., & Scholz, M. (2014). Response of vegetables to cadmium-enriched soil. *Water*, *6*(5), 1246-1256.

Bolat, İ., & Kara, Ö. (2017). Bitki besin elementleri: Kaynakları, işlevleri, eksik ve fazlalıkları. *Bartın Orman Fakültesi Dergisi*, *19*(1), 218-228.

Buchelt, A. C., Teixeira, G. C. M., Oliveira, K. S., Rocha, A. M. S., de Mello Prado, R., & Caione, G. (2020). Silicon contribution via nutrient solution in forage plants to mitigate nitrogen, potassium, calcium, magnesium, and sulfur deficiency. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, *20*, 1532-1548.

Cakmakci, T., & Sahin, U. (2021). Improving silage maize productivity using recycled wastewater under different irrigation methods. *Agricultural Water Management*, *255*, 107051.

Chen, Y., Ale, S., Rajan, N., & Munster, C. (2017). Assessing the hydrologic and water quality impacts of biofuel-induced changes in land use and management. *GCB Bioenergy*, *9*(9), 1461-1475.

Connor, R., Renata, A., Ortigara, C., Koncagül, E., Uhlenbrook, S., Lamizana-Diallo, B. M., & Sjödin, J. (2017). Wastewater: the untapped resource. *The United Nations World Water Development Report*.

Cosgrove, D. J. (2005). Growth of the plant cell wall. *Nature Reviews Molecular Cell Biology*, *6*(11), 850-861.

Demirtaş, E., Asri, F. Ö., Özkan, C., & Arı, N. (2012). Organik ve kimyasal gübre uygulamalarının örtüaltı domates yetiştiriciliğinde toprak verimliliği ve bitkinin beslenmesine etkileri. *Derim*, *29*(1), 9-22.

Doğan, N. (2006). *Su stresi altındaki fasulye (Phaseolus vulgaris L.) bitkisinin iyon alım mekanizmasının araştırılması* (Doctoral dissertation, Marmara Universitesi (Turkey).

Dreistadt, S. H. (2007). *Integrated pest management for avocados* (Vol. 3503). UCANR Publications.

Dölarslan, M., & Gül, E. (2012). Toprak bitki ilişkileri açısından tuzluluk. *Türk Bilimsel Derlemeler Dergisi*, (2), 56-59.

Ekmekçi, E., Apan, M., & Kara, T. (2005). Tuzluluğun bitki gelişimine etkisi. *Anadolu Tarım Bilimleri Dergisi*, *20*(3), 118-125.

EPA, (2012). Guidelines for water reuse, in U. S. E. P. Agency, ed., Washington, D.C.

FAO, (2003). Users Manual for Irrigation with Treated Wastewater. Food and Agriculture Organization (FAO) of the United Nations, FAO Regional Office of the Near East, Cairo, Egypt

FAO, (2013). World food and agriculture. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome 15.

Fageria, N. K., Baligar, V. C., & Clark, R. B. (2002). Micronutrients in crop production. *Advances in Agronomy*, *77*, 185-268.

Gorbatsevich, E., Sela, S., Pinto, R., & Bernstein, N. (2013). Root internalization, transport and in-planta survival of Salmonella enterica serovar Newport in sweet basil: *Environmental Microbiology Reports*, v. 5, p. 151-159

Hafeez, B., Khanif, Y. M., Saleem, M. (2013). Role of zinc in plant nutrition-A Review. American Journal of Experimental Agriculture, 3(2), 374-391.

Hameed, S., Awad, H. A., & AL-Uqaily, R. A. (2020). Boron removal from seawater using adsorption and Ion exchange techniques. *Ecology, Environment and Conservation*, *26*(2), 10-17.

Heldt, H. W. & Heldt, F. (2005). Plant Biochemistry. 3rd ed. Elsevier Academic Press. Amsterdam.

Hofman, P., Marques, J. R., Searle, C., Stubbings, B., & Moody, P. (2005, September). Improving avocado fruit quality through tree nutrition-present knowledge. In *Proceedings of the New Zealand and Australia Avocado Grower's Conference, Tauranga, New Zealand* (pp. 20-22).

Horuz, A., Ekberli, İ., Korkmaz, A., Akınoğlu, G., & Özdemir, N. (2017). Terme ve Çarşamba'daki bazı fındık bahçelerinde toprakların fosfor adsorpsiyon kapasitelerinin belirlenmesi. *Anadolu Tarım Bilimleri Dergisi*, *32*(2), 249-257.

Jaramillo, M. F., & Restrepo, I. (2017). Wastewater reuse in agriculture: A review about its limitations and benefits. *Sustainability*, *9*(10), 1734.

Jones, Jr. (2013). Instructions for Growing Tomatoes in the Garden and Greenhouse. GroSystems, Anderson, SC, USA

Joy, J. (2013). Impact of Boron in Irrigation Water Supplies on Citrus Orchards in Riverside County. *Eastern Municipal Water District*.

Kadlec, R.H. & Knight, R.L. (1996). Treatment Wetlands. Lewis Publishers, Boca Raton, 893 p.

Kaiser, B. N., Gridley, K. L., Ngaire Brady, J., Phillips, T., & Tyerman, S. D. (2005). The role of molybdenum in agricultural plant production. *Annals of botany*, *96*(5), 745-754.

Karagiannis, I. C., & Soldatos, P. G. (2008). Water desalination cost literature: review and assessment. *Desalination*, *223*(1-3), 448-456.

Karthika, K. S., Rashmi, I., & Parvathi, M. S. (2018). Biological functions, uptake and transport of essential nutrients in relation to plant growth. *Plant Nutrients and Abiotic Stress Tolerance*, 1-49.

Kirk, G. J., Manwaring, H. R., Ueda, Y., Semwal, V. K., & Wissuwa, M. (2022). Below-ground plant–soil interactions affecting adaptations of rice to iron toxicity. *Plant, Cell & Environment*, *45*(3), 705-718.

Klein, M., Perfus-Barbeoch, L., Frelet, A., Gaedeke, N., Reinhardt, D., Mueller-Roeber, B., & Forestier, C. (2003). The plant multidrug resistance ABC

transporter AtMRP5 is involved in guard cell hormonal signalling and water use. *The Plant Journal*, *33*(1), 119-129.

Kroupitski, Y., Golberg, D., Belausov, E., Pinto, R., Swartzberg, D., Granot, D., & Sela, S. (2009). Internalization of Salmonella enterica in leaves is induced by light and involves chemotaxis and penetration through open stomata. *Applied and environmental microbiology*, *75*(19), 6076-6086.

Läuchli, A., & Grattan, S. R. (2012). Soil pH extremes. In *Plant stress physiology* (pp. 194-209). Wallingford UK: CABI.

Mancosu, N., Snyder, R. L., Kyriakakis, G., & Spano, D. (2015). Water scarcity and future challenges for food production. Water, 7(3), 975-992.

Navon, R., Hernandez-Ruiz, S., Chorover, J., & Chefetz, B. (2011). Interactions of carbamazepine in soil: effects of dissolved organic matter. *Journal of Environmental Quality*, *40*(3), 942-948.

Neina, D. (2019). The role of soil pH in plant nutrition and soil remediation. *Applied and environmental soil science*, *2019*, 1-9.

Prajapati, K., & Modi, H. A. (2012). The importance of potassium in plant growth–a review. *Indian Journal of Plant Sciences*, *1*(02-03), 177-186.

Rygaard, M., Binning, P. J., & Albrechtsen, H. J. (2011). Increasing urban water self-sufficiency: New era, new challenges. *Journal of environmental management*, *92*(1), 185-194.

Saeed, T., & Sun, G. (2012). A review on nitrogen and organics removal mechanisms in subsurface flow constructed wetlands: dependency on environmental parameters, operating conditions and supporting media. Journal of Environmental Management, 112, 429-448.

Simko, I., Zhou, Y., & Brandl, M. (2015). Downy mildew disease promotes the colonization of romaine lettuce by Escherichia coli O157:H7 and Salmonella enterica: *Bmc Microbiology*, v. 15.

Solomon, E. B., & Matthews, K. R. (2006). Interaction of live and dead Escherichia coli O157: H7 and fluorescent microspheres with lettuce tissue suggests bacterial processes do not mediate adherence. *Letters in applied microbiology*, *42*(2), 88-93.

Somerville, C., Bauer, S., Brininstool, G., Facette, M., Hamann, T., Milne, J., & Youngs, H. (2004). Toward a systems approach to understanding plant cell walls. *Science*, *306*(5705), 2206-2211.

Stemke, J. A. (2016). *Field Evaluation of Recycled Water for Avocado Irrigation*. University of California, Riverside.

Taiz, L., & Zeiger, E. (2006). Secondary metabolites and plant defense. *Plant physiology*, *4*, 315-344.

Tränkner, M., Tavakol, E., & Jákli, B. (2018). Functioning of potassium and magnesium in photosynthesis, photosynthate translocation and photoprotection. *Physiologia plantarum*, *163*(3), 414-431.

Uchida, R. (2000). Essential nutrients for plant growth: nutrient functions and deficiency symptoms. *Plant Nutrient Management in Hawaii's soils*, *4*, 31-55.

Uçgun, K., Kelebek, C., Cansu, M., Altındal, M., & Yalçın, B. (2019). Toprak pH'sını etkileyen bazı materyallerin hububat tarımında kullanımı. *Toprak Su Dergisi*, 94-100.

Urbano, V. R., Mendonça, T. G., Bastos, R. G., & Souza, C. F. (2017). Effects of treated wastewater irrigation on soil properties and lettuce yield. *Agricultural Water Management*, *181*, 108-115.

Yakıt, S., & Tuna, A. L. (2006). Tuz stresi altındaki mısır bitkisinde (Zea mays L.) stres parametreleri üzerine Ca, Mg ve K'nın etkileri. *Akdeniz University Journal of the Faculty of Agriculture*, *19*(1), 59-67.

Yan, B., & Hou, Y. (2018). Effect of soil magnesium on plants: a review. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 170, p. 022168). IOP Publishing.

Yerli, C., Çakmakcı, T., Sahin, U., & Tüfenkçi, Ş. (2020). Ağır metallerin toprak, bitki, su ve insan sağlığına etkileri. *Türk Doğa ve Fen Dergisi*, *9*(Özel Sayı), 103-114.

Yılmaz, E., Tuna, A. L., & Bürün, B. (2011). Bitkilerin tuz stresi etkilerine karsı gelistirdikleri tolerans stratejileri-tolerance strategıes developed by plants to

the effects of salt stress. *Celal Bayar University Journal of Science*, *7*(1), 47-66.

Yokoi, S. Bressan, R. A., & Hasegawa, P. M. (2002). Salt Stress Tolerance of Plants. JIRCAS Work. Rep. 25–33.

Whiley, A. W., Smith, I. E., Wolstenholme, B. N., & Saranah, J. B. (1996). Boron nutrition of avocados. South African Avocado Growers' Association Yearbook 1996. 19: 1-7.

Winpenny, J., Heinz, I., & Koo-Oshima, S. (2010). The wealth of waste: the economics of wastewater use in agriculture. FAO Water Report 35, Rome.

BÖLÜM 11

BİTKİ GELİŞİMİNİ TEŞVİK EDEN KÖK BAKTERİLERİNİN (PGPR) KURAKLIK STRESİNİ İYİLEŞTİRİCİ ETKİSİ

Dr. Öğr. Üyesi Sibel BOYSAN CANAL[1*]

DOI: https://dx.doi.org/10.5281/zenodo.10031684

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

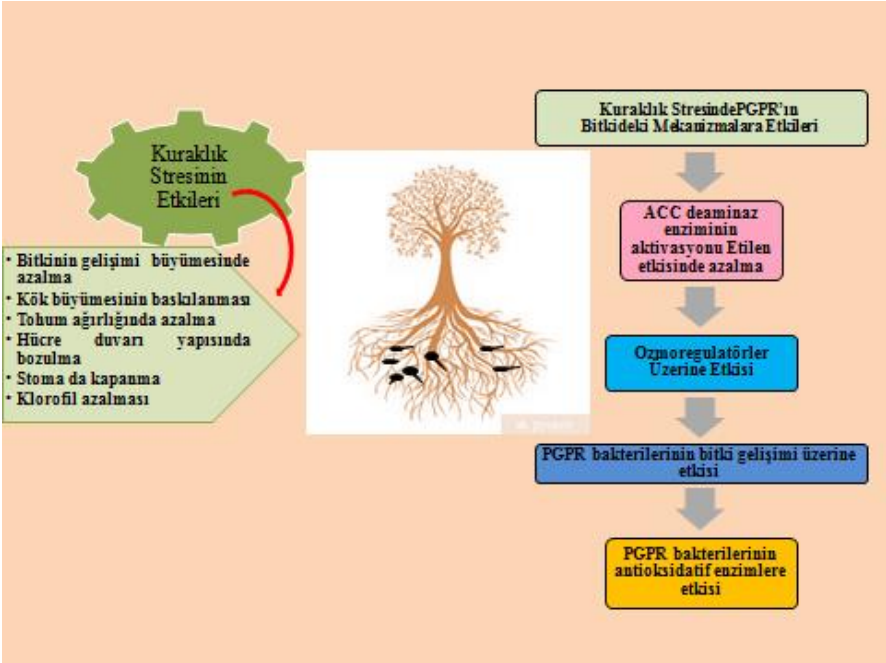
GİRİŞ

Kuraklık, ürünün verimliliği üzerinde diğer abiyotik stres faktörlerinden daha fazla etkilidir. Bitkinin büyüme hızında ve yaş ağırlığında önemli düşüşlerle birlikte hücre bölünmesi ve genişleme oranında, yaprak boyutu ve kök büyümesinde azalma ile bitkinin büyüme ve gelişimini ciddi şekilde etkiler (Li ve ark., 2009; Soysal ve Erman, 2021). Kuraklık stresine karşı farklı bitki çeşitleri farklı tepkiler verir. Örneğin kuraklık stresine maruz kalan mısır bitkisinde çiçeklenme de gecikme olurken (Abrecht ve Carberry 1993), Kinoa (Geerts ve ark. 2008) ve pirinç (Fukai 1999) soya fasulyesinde ise (Desclaux ve Roumet 1996) çiçeklenmeyi ve fizyolojik olgunluğu hızlandırmıştır. Su eksikliği, protein denatürasyonu ile azalan su potansiyeline ve turgor kaybına, stoma kapanmasına ve membran bütünlüğünün bozulmasına neden olur. Su eksikliğine yanıt olarak stoma kapanması, fotosentez hızında düşüşe neden olur (Yang ve ark., 2010; Alcazar ve ark., 2011). Bitki büyümesini teşvik eden rizobakteriler (PGPR), su yoksunluğuna bitkinin fizyolojik tepkisini ayarlamak için muazzam bir potansiyele sahiptir, böylece kuraklık stresi koşullarında bitkinin hayatta kalmasını teşvik eder (Marasco ve ark., 2012). PGPR bakterilerinin etkinliği bitki çeşidi, bakterinin türünün yanı sıra toprak özellikleri ve toprak organik madde miktarına bağlı olarak değişmektedir (Çakmakçı ve ark., 2006). PGPR bakterileri bitki ile yeterince iletişime geçerek kök bölgesinde kolonize olarak bitkinin büyüme ve gelişmesinde teşvik eden bakterilerdir. PGPR bakterileri çok çeşitli toprak

mikroorganizmalarını içerir. Bunların bir kısmı bitki ile simbiyotik ilişki içinde serbest azotun bitki için kullanılmasını sağlarken bir kısmı da simbiyotik ilişki için de bulunmayanlar vardır. Örneğin Pseudomonas spp., Bacillus spp., Azospirilum spp., and Burkholderia spp. PGPR bakterilerinin kök bölgesinde koloni oluşturma yeteneği, organik asitlerde faydalanmaya, lipopolisakkaritler ve protein üretimine bağlı olarak belirlenir. Yani PGPR bakteri bitki kökleri tarafında salgılanan organik maddeler sayesindedir (Miransari, 2011). Ayrıca bu bakteriler rizosferdeki bitki besin maddelerin kullanılabilirliğini arttırmasının yanı sıra bitkilerin kök hacmini ve besin emilimini de arttırmaktadır (Soysal ve ark., 2022). Abiyotik stres koşullarında PGPR bakterileri bitkisel gelişimi çeşitli mekanizmalarla bitkinin hayatta kalabilmesine yardımcı olmaktadır. (1) Ozmolitlerin gelişmiş üretimi (2) bitki aktivitelerinin artması stres ürünlerini katabolize edebilen antioksidanlar, (3) simbiyotik ilişkinin bir sonucu PGPR veya bitki tarafından farklı metabolitlerin üretimi (4) aminosiklopropan-1-karboksilat (ACC) deaminaz, bitkinin stres altında hayatta kalmasına yardımcı olabilecek, (5) çözünmeyen P(fosfor) bileşiklerinin çözülmesi, (6) siderofor üretimi, (7) patojenlerin inhibisyonu (Chebotar ve ark., 2009). Bu bölümde kuraklık stres koşullarına karşı PGPR bakterilerinin bitkilerin direncini artırmadaki etkinlikleri üzerinde durularak, tarımsal ürünlerde kuraklık toleransının sağlanmasında yeni yaklaşımlar ele alınmıştır.

1. KURAKLIK STRESİNE KARŞI PGPR BAKTERİLERİNİN ROLÜ

Bitki gelişimini teşvik eden kök bakterileriler anlamına gelen "Plant Growth Promoting Rhizobacteria" sözcüklerinin kısaltılması ile dilimize ilk defa PGPR terimi 1978 yılında girmeye başlamıştır. (Kloepper, 1978).



Şekil 1. Kök bakterilerinin (PGPR) kuraklık stres koşullarında bitkideki metabolizmalara etkisi

PGPR bakterileri kuraklık stresine engel olmak için çeşitli mekanizmalar etki ederek bitkinin strese karşı koyma yani savunma mekanizmasına yardımcı olur. Bitkilerin PGPR ile aşılanması, kuraklık stresi ortamında mahsullerin üretkenliğini artırabilir (Chanway ve Holl 1994). Bresson ve ark., (2013) yaptıkları

çalışmada, PGPR bakterilerinden *Phyllobacterium brassicacearum STM196* ile aşılanan turp (*Arabidopsis thaliana*) bitkisinde, üremeyi geciktirmek ve terleme hızındaki değişikliklere neden olmak suretiyle orta düzeydeki kuraklık stresine karşı direnci artırmıştır. Çam (*Pinus halepensis*) bitkisine PGPR bakteri çeşitlerinden olan *Pseudomonas fluorescens* ile aşılandığında (Rincon ve ark. 2008) çeltik bitkisinin de Azospirillum ile aşılanması (Ruiz-Sanchez ve ark. 2011) kuraklık stresi altındaki bitkilerin fotosentez düzeyinde artışa neden olmuştur. *Phyllobacterium brassicacearum* STM196'nın bitki lateral kök uzunluğunu artırmanın yanı sıra kök kıllarının yoğun artışı toprakla değinim alanında artışa sebebiyet vermiştir. Bu durum kök sistemi boyunca bitkinin yapraklarına daha yüksek bir su akışına neden olmuştur (Kechid ve ark. 2013). PGPR bakterileri bitkide kuraklık stres koşullarına karşı çeşitli mekanizmalar üzerinde önemli etkiye sahiptirler (Şekil 1). Bu mekanizmalar sırasıyla:1-PGPR bakterilerinin kök sistemi üzerine etkisi 2- PGPR bakterilerinin ozmoregilatörler üzerin etkisi 3-Bitki hormonları üzerine etkisi 4 PGPR bakterilerinin bitki gelişim üzerine etkisi 5 PGPR bakterilerinin antioksidatif enzimler üzerine etkisidir.

2. PGPR BAKTERİLERİNİN KÖK SİSTEMİ ÜZERİNE ETKİSİ

PGPR bakterileri bitkilerde kök uzunluğunu, kök yüzey alanını ve kök uçlarının sayısını artıran ABA, IAA, giberellinler ve diğer fitohormonları üretir (Egamberdieva ve Kucharova, 2009). Geniş bir kök yüzeyine sahip bir kök sistemi, kuraklığa karşı bitki toleransını

artırmak için çok önemlidir. Benzer şekilde, rhizodermis gibi özelleşmiş dokuların varlığı ve köklerdeki kortikal tabakaların sayısındaki azalma, bitkilerin kuraklık stresinden sağ çıkmaları için uyum sağlayan faydalar olarak kabul edilir (Goswami ve Deka, 2020). PGPR bakterilerinin bitki hormonlarını örneğin İndol asetik asit (IAA) üretimini artırarak kök gelişmesini ve lateral kök büyümesini artırması kuraklık stresi altındaki bitkinin besin elementi ve su alımını artırabilir. PGPR kök duvar hücrelerinin kimyasal yapısında oluşturdukları değişiklikler bitkinin büyüme ve gelişimine etki etmektedir. IAA hormonu bitkinin büyümesini artırırken kök gelişimi, yan kök ve kök kıllarının oluşumu bitkinin kuraklık şartlarında su alımını artırmaktadır (Egamberdieva and Kucharova, 2009).

3. PGPR BAKTERİLERİNİN BİTKİ HORMONLARI ÜZERİNE ETKİSİ

PGPR bakterilerinin kuraklık stresi altında bitkinin hayatta kalmasını sağlamak için kullandığı mekanizmalardan biri, oksinler, gibberellinler, sitokininler, etilen ve absisik asit (ABA) gibi bakteriyel fitohormonların içeriğinde meydana getirdiği değişikliklerdir. ABA hormonu bitkide kuraklık stresini azaltmada önemli role sahip fitohormondur. ABA kuraklık stresi altındaki bitkilerde klorofil içeriğinde artışa neden olduğu gibi, nisbi yaprak su içeriğini, fotosentetik ve fito-koruyucu pigmentler, tohum verimi, kök büyümesi ve bitki adaptasyonu üzerinde önemli etkinliğe sahip bitki hormonudur (Giuliani ve ark., 2005). Benzer şekilde, Ghosh ve ark.

(2019) Turpgiller ailesinden (*Arabidopsis thaliana*) tohumlarının *Pseudomonas aeruginosa, Bacillus endophyticus, Bacillus tequilensis* PGPR bakteri ile aşılanması sonucunda aşılanmayan bitkilere göre kuraklık stresi koşullarında bitki taze ve kuru ağırlığının su içeriğinde önemli düzeyde artışa neden olmuştur. Bu durum aşılama yapılan bitkide Gibberrilik Asit, Oksin ve Sitokinin büyüme hormolarındaki artıştan kaynaklandığı ifade edilmiştir. *Azospirillum lipoferum* ile aşılanan mısır bitkisinde ABA üretiminde artışın yanı sıra IAA üretimindeki artış kuraklık stresinin hafifletilmesinde etkili olduğu ifade edilmiştir (Cohen ve ark., 2009). ABA 'nın kuraklık stres koşullarında stres sinyallerinin iletilmesi ve stomaların açılıp kapanmasında önemli role sahiptir (Mori ve ark., 2006; Kazan, 2015). Brasica napus bitkisinin köklerinden izole edilmiş PGPR bakteri gurubunda yer alan *Phyllobacterium brassicacearum* Arabidopsis ailesindeki bitkilere aşılandığında ABA içeriğindeki yükselmeye bağlı olarak, terlemeyi azaltması bitkinin kuraklık stresine karşı direncini artırmıştır (Bresson ve ark., 2013). Biber bitkisine aşılanan *Bacillus licheniformis* K11 kök bakterisi bitkinin kuraklığa karşı direncini artırmada 1-aminosiklopropan 1- karboksilik asit (ACC) deaminaz enzimine bağlı olduğu ortaya konulmuştur (Hui and Kim 2013). Kuraklık stresi koşullarında, kök ve sürgün büyümesinde azalmaya neden olan etilen üretimi artış gösterir(Arshad ve ark., 2007). PGPR bakterilerinin de farklı türlerinde etilen seviyesini düşürmeye neden olabilecek ACC deaminaz enzimine sahip olduğunu göstermiştir (Glick, 2007). ACC deaminaz enzimi kök den rizosfer bölgesine salgılandığında etilen'in stres koşullarında neden aynı zamanda sürgün

ve kök büyümesini de iyileştirebilir. Kök bakterileri bitki kök salgılarını kullanırken, Öte yandan kök bakterileri tarafından salgılanan metabolitleri bitkiler stres koşullarına karşı kök sistemini güçlenmek için kullanırlar (Maleki ve ark., 2023). Kuraklık stresine maruz kalan bazı bitkilerin PGPR ile aşılandıktan sonra bitki hormonlarının etkilerinin gözlendiği bazı çalışmalar tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Kuraklık stres koşullarına PGPR ile aşılanan farklı bitki çeşitlerinde bitki hormonlarının etkileri

PGPR	BİTKİ ÇEŞİDİ	ETKİLERİ	KAYNAKLAR
A. brasilense	Domates	IAA bir sinyal molekülü olarak nitrik oksit üretimi kök tüyünde ve yanal kökün güçlendirilmesi.	Molina-Favero ve ark., (2008)
A. lipoferum	Mısır	Gibberellinlerin ABA seviyesini artırması kuraklık stresini hafifletti.	Cohen ve ark,. (2009)
Azospirillum sp.	Buğday	IAA geliştirilmiş kök büyümesi, yanal kökler oluşumu su alımı ve kuraklık stresi altındaki besinlerin alımını artırdı.	Arzanesh ve ark., (2011)
P. brassicacearum	Tere	ABA sentezindeki artış yapraklardaki terlemeyi azalttı.	Bresson ve ark., (2013)
Bacillus subtilis	Doğu Mazısı	PGPR ile sitokinin üretimi sürgünlerde ABA sentezini artırdı. Stoma iletkenliğini artırdı.	Liu ve ark., (2013)
P. putida H-2–3	Soya	PGPR ile gibberellinlerin salgılanması bitki büyümesini iyileştirdi.	Sang-Mo ve ark., (2014)
B. thuringiensis	Lavanta	IAA sentezi glutatyon redüktazı (GR) ve askorbat peroksidaz (APX) sentezini azalttı	Armada ve ark., (2014)
R. leguminosarum (LR-30), *M. ciceri (CR-30 ve CR-39)* *R. phaseoli (MR-2)*	Buğday	IAA sentezi kuraklık tolerans indeksinde, bitki büyüme ve gelişmesinde iyileşme gerçekleşti.	Hussain ve ark., (2014)

4. PGPR BAKTERİLERİNİN OSMOTİK DÜZENLEYİCİLER ÜZERİNE ETKİSİ

Kuraklığa eğilimli ortamlarda yetersiz su mevcudiyeti, doku su durumunu ve turgoru düşürerek mahsullerin büyümesini ve üretkenliğini etkiler (Kiani ve ark., 2007; Hussain ve ark, 2009). Kuraklık stresi bitkinin adaptasyonuna uyumlu bileşiklerin örneğin: şekerler, şeker alkolleri proline, poliaminler, glisin-betain (GB), organik asitler, kuaterner amonyum bileşikleri, polihidrik alkoller ve diğer amino asitler ve su stresi proteinleri hücre içinde birikmesine yol açar. Bu bileşiklerin hücre içerisinde birikmesi hücrenin işlevini doğrudan etkilemediği gibi hücrenin fizyolojisi üzerinde de zararlı bir etkiye sahip değildir (Cechin ve ark. 2006; Kiani ve ark. 2007; Farooq ve ark. 2008, 2009). Bu çözünen maddeler hücrede su moleküllerini tutarak ve hapsederek su potansiyelini artırır. Bu anlama gelen osmoregülatör ya da uyumlu çözünenler denir (Dar ve ark., 2018). Bu uyumlu çözünen maddeler sadece turgor basıncını korumaya yardımcı olmakla kalmaz, aynı zamanda hücrelerin enzimlerini ve makro moleküllerini de korur. Osmotik uyum, ekin bitkilerinde kuraklığın neden olduğu hasarın etkilerini en aza indirmek için hücresel düzeyde bitkilerin temel adaptasyonudur (Blum 2005) ve kuraklık altındaki bitkilere iki şekilde yardımcı olur: (1) stoma iletkenliğini iyileştirmek için yaprak turgorunun korunmasına yardımcı olur. Verimli CO_2 alımı(Kiani ve ark. 2007) ve kökün daha fazla su alma yeteneğini destekler (Chimenti ve ark. 2006). Yüksek düzeyde serbest prolin, bitkinin düşük su potansiyellerini korumasına (Jalil ve ark., 2007; Sankar ve diğerleri 2007) ve suyu çevreden almasına olanak tanır.

Kuraklık stres koşullarında PGPR bakterilerinden *Pseudomonas putida* GAP-P45 ile aşılama yapılan mısır bitkisinde prolin içeriğindeki artışa bağlı olarak, bitki biyokütlesini, yaprak su potansiyelini iyileştirdiği tespit edilmiştir (Sandhya ve ark., 2010). Lavanta (*Lavandula dentata*) bitkisinin kuraklık toleransı araştırıldığında PGPR bakterilerinden *B. thuringiensis* (Bt) aşılamasının, kuraklık stresi altındaki bitkinin sürgün kısmında, prolin birikiminin artışına neden olduğu bulunmuştur (Armada ve ark., 2014). PGPR ile aşılanmış olan ve kuraklık stresine maruz kalan bazı bitki çeşitlerinde ozmoregülatörlerin etkisinin verildiği bazı çalışmalar tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2. Kuraklık stres koşullarında PGPR ile aşılanan farklı bitki çeşitlerinde ozmoregülatörlerin etkisi

PGPR	Bitki çeşidi	Etkileri	Kaynaklar
P. putida GAP-P45	Mısır	PGPR ile prolin birikimi, bitkide bağıl su potansiyelini, yaprak suyu potansiyelini, bitki yaş ağırlılığını iyileştirdi.	Sandhya ve ark., (2010)
P. fluorescens	Mısır	PGPR ile artan prolin, absisik asit, oksin, gibberellin ve sitokinin içeriği bitkinin büyümesini iyileştirildi.	Ansary ve ark., (2012)
B. thuringiensis	Lavanta	PGPR ile IAA kaynaklı yüksek düzeyde prolin ve K içeriği metobolik aktiviteyi, beslenmeyi ve fizyolojiyi iyileştirdi. Glutatyon redüktaz (GR) ve askorbat peroksidaz (APX) aktivitesi azaldı.	Armada ve ark., (2014)
Bacillus polymyxa	Domates	PGPR ile prolin birikimi, fizyolojik ve biyokimyasal parametreleri iyileştirdi.	Shintu ve Jayaram (2015)
P. jessenii, R62, P.synxantha, R81 A.nitroguajacolicus strainYB3, YB5	Pirinç	PGPR ile prolin birikimindeki artış osmatik ayarlamayı sağlar ve bitki büyümesini artırdı.	Gusain ve ark., (2015)
A. lipoferum	Mısır	PGPR ile çözünebilir şekerlerin ve serbest aminoasitlerin birikimindeki artış bitki gelişimi iyileştirdi.	Bano ve ark., (2013)
Bacillus subtilis GB03	Tere	PGPR bakterileri ile glisin,betin ve kolin yüksek düzeyi osmotik stres de bitkilerin bağıl su içeriğini kuru ağırlığı iyileştirdi.	Zhang ve ark., (2010)
K. variicola F2, P. fluorescens YX2 R. planticola YL2	Mısır	PGPR bakterileri ile kolin ve glisin ve betin'in yüksek düzeyde birikimi bitkide bağıl su içeriğini, kuru ağırlığını iyileştirdi.	Gou ve ark., (2015)
A. brasilense Az39	Pirinç	PGPR bakterilerinin sayesinde kadeverin üretimindeki artış osmatik stresi hafifletti ve kök gelişimini artırdı.	Cassan ve ark., (2009)

5. PGPR BAKTERİLERİNİN BİTKİ GELİŞİMİ ÜZERİNE ETKİSİ

Bitki gelişimini teşvik eden kök bakterileri, konukçu bitki ile bakteriler arasındaki bazı sinyal iletişimlerinin bir sonucu olarak kök yüzeyin de kolonize edebilirler. Böylece köklere iyon taşınımı ve kök bölgesine besin elementinin sağlanmasını teşvik edebilir. Besin elementlerinin artırılması ile ilgili iki ana bakteri türü düşünülebilir. İlk olarak fosfat çözünürlüğü üzerine PGPR bakterilerinin etkinliği; Düzenli gübrelenen topraklarda aslında geniş ölçüde fosfor içerir. Ancak çok küçük bir kısmını bitkiler kullanabilir. Bununla birlikte organik veya çözünemeyen formdaki fosforu mikroorganizmalar tarafından inorganik ya da çözünebilir hale getirmesi gereklidir (Ramaekers ve ark., 2010). *Pseudomonas, Bacillus, Rhizobium* gibi birçok PGPR bakterileri çözünmeyen fosfat bileşiklerinin çözünürlüğünü artırabilir (Richardson ve ark., 2009). Bu artış düşük moleküler ağırlığa sahip olan organik asitlerin salgılanmasına bağlı olarak asidik bir ortam oluşturularak ve glukonik asit gibi fosfata bağlı katyonları şellatlayarak gerçekleştirilir.(Miller ve ark., 2009). İkinci olarak azot'un bitki tarafından alımında PGPR bakterilerinin etkinliği başta şekerkamışı olmak üzere birçok bitki için örnek verilmiştir (Boddey ve ark., 2003). Kuraklık stresi koşullarında, su eksikliği nedeniyle mineral besin elementlerinin (makro ve mikro besin elementleri) alınımı olumsuz yönde etkilenir. Suyun hareketi ile köklere geçen mineral besin elementlerinin eksikliği bitkinin büyüme ve gelişimini olumsuz etkiler (Rouphael ve ark., 2012). PGPR

bakterileri ile aşılanan yerli çalıların kuraklık koşullarında bitkide besin elementi alımını ve büyümeyi artırdığı bulunmuştur (Armada ve ark., 2018).

6. PGPR BAKTERİLERİNİN ANTİOKSİDATİF ENZİMLER ÜZERİNE ETKİSİ

Abiyotik stres arasında yer alan kuraklık stresi, reaktif oksijen radikallerinin üretimi için uygun ortam oluşturmaktadır. serbest radikaller örneğin; Hidroksil (OH^-), hidrojen peroksit (H_2O_2) ve süperoksit (O^{2-}), nükleik asitleri, DNA, proteinleri, pigmentleri ve enzimlerin aktivitelerine engel olarak Lipit peroksidasyona ve hücre zarı yıkımına neden olur. Serbest radikallerin metabolizma üzerindeki yıkıcı etkisi oksidatif stresi oluşturur (Miller ve ark., 2010; Maleki ve ark., 2017). Bitkiler enzimatik ve enzimatik olmayan antioksidan yolları kullanarak, oksidatif stresin zararlı etkisini hafifletmeye çalışırlar (Habib v ark., 2016). Antioksidatif sistem için enzim yapısı bulunanlara örnek olarak süperoksit dismutaz (SOD), ascorbat peroksidaz (APX), katalaz (KAT), glutatayon peroksidaz (GPX) vb. enzim yapısına sahip olmayan antioksidan maddeler ise glutatyon, flavonoidler, karotenoidler ve tokoferoller olarak sınıflandırılmaktadır (Mittler, 2002). Kuraklık stres koşullarında, bitkide yer alan antioksidatif savunma sistemi aktif hale geçmektedir. Ancak kuraklık stresi koşullarında, PGPR bakterileri ile aşılanan bitkilerin antioksidatif savunma sistemi üzerinde olumlu etkiye sahip olduğu yapılan çalışmalarda tespit edilmiştir. Salatalık bitkilerinin, bitki gelişimini destekleyen üç kök bakterisi ile aşılanması sonucunda,

kuraklık stresi şartlarında, yapraklarında malondialdehit (MDA) içeriğinde azalmaya neden olurken, süperoksit dismutaz (SOD) aktivitesini, yaprak prolin içeriğini ve fotosentetik aktiviteyi artırdığı tespit edilmiştir (Wang ve ark. 2012). Ghorbanpour ve ark., (2013) bildirdiğine göre, Kuraklık stresi koşullarında, Banotu (*Hyoscyamus niger*) bitkilerinin PGPR bakterilerinden: *P. fluorescens* ve *P. putida,* ile aşılanması sonucu hiç aşı yapılmayan ve kuraklık stresine maruz kalan bitkilere göre, toplam fenolik içeriğinin daha yüksek olduğu bulunmuştur.

SONUÇ

Abiyotik stres faktörleri arasında önemli yere sahip olana kuraklık stresi ürün üretimini ve verimini önemli düzeyde düşüren bir etkiye sahiptir. Kuraklık stres etkilerini gidermede PGPR uygulamaları önemli ölçüde başarılı olduğu göz ardı edilemez. PGPR bakterilerinin küresel olarak da kuraklıktan etkilenen birçok tarımsal alanda önemli ölçüde verim kayıplarının önlenmesinde etkili olacağı tahmin edilmektedir. PGPR bakterilerinin bu anlamada ticari boyutunun geliştirilmesi ve tarımsal alanda kullanılabilirliğine yani suşun sağlamlılığına, maliyetine önem verilmelidir. PGPR 'ler, kuraklık stres koşullarında, birden fazla etki mekanizması kullanabilir. Genel olarak, ACC deaminaz ve IAA üreten bakteriler, bitkilerde tuzluluk, kuraklık, besin dengesizliği ve ağır metal toksisitesi streslerini hafifletmede çok sayıda potansiyele sahip oldukları için gelecekte optimum mahsul üretimi için iyi bir seçenek olabilir. PGPR'lerin özellikle endofitik

bakterilerin birlikte kullanımı, farklı streslerin hafifletilmesinde sinerjistik bir etkiye sahip olabilir. Tarımsal ortamlarda PGPR'lerin birlikte kullanımı, kimyasal gübrelerle sürdürülebilir bir şekilde bütünleştirmek tarımsal girdiler açısından uygun bir yaklaşım olacaktır. PGPR' lerin kullanımı, sürdürülebilir tarımsal üretkenlik elde etmek için kimyasal miktarını azaltmada önemli bir rol oynamasının yanı sıra bitki sağlığını iyileştirmede de önemli rol oynar. Bu nedenle, tarım bilimcileri için gelecekte en ilgi çekici araştırma alanlarından birinin, bitkiler üzerindeki çevresel stresleri azaltmada rol oynayan bakteriyel mekanizmaları araştırmak olacağı tahmin edilmektedir. PGPR bakterilerinin kullanımı mahsul elde edilecek alanlardan su tüketimi ve su kullanımını da azaltıcı etkiye sahiptir. Birlikte ele alındığında, tarla koşullarında (bu bakterilerin ana kullanım yeri) bitki büyümesini iyileştirebilecek en etkili PGPR' leri elde etmek için, deneylerin uzun sürelerde (en az iki yıl), geniş bir alanda yürütülmesi gerekir. Ürün verimliliği ve sürdürülebilirlik üzerine iklim değişikliğinin olumsuz sonuçlarını azaltmak için bitkiler ile ilgili mikroorganizmalar ve çevre arasındaki etkileşimlerin çok iyi anlaşılması ile gerçekleştirilecektir.

KAYNAKÇA

Abrecht, D. G., & Carberry, P. S. (1993). The influence of water deficit prior to tassel initiation on maize growth, development and yield. *Field Crops Research*, *31*(1-2), 55-69.

Alcázar, R., Bitrián, M., Bartels, D., Koncz, C., Altabella, T., & Tiburcio, A. F. (2011). Polyamine metabolic canalization in response to drought stress in Arabidopsis and the resurrection plant Craterostigma plantagineum. *Plant signaling & behavior*, *6*(2), 243-250.

Ansary, M. H., Rahmani, H. A., Ardakani, M. R., Paknejad, F., Habibi, D., & Mafakheri, S. (2012). Effect of Pseudomonas fluorescent on proline and phytohormonal status of maize (*Zea mays* L.) under water deficit stress. *Ann Biol Res*, *3*(2), 1054-1062.

Armada, E., Leite, M. F., Medina, A., Azcón, R., & Kuramae, E. E. (2018). Native bacteria promote plant growth under drought stress condition without impacting the rhizomicrobiome. *FEMS microbiology ecology*, *94*(7), fiy092.

Armada, E., Roldán, A., & Azcon, R. (2014). Differential activity of autochthonous bacteria in controlling drought stress in native Lavandula and Salvia plants species under drought conditions in natural arid soil. *Microbial ecology*, *67*, 410-420.

Arshad, M., Saleem, M., & Hussain, S. (2007). Perspectives of bacterial ACC deaminase in phytoremediation. *TRENDS in Biotechnology*, *25*(8), 356-362.

Arzanesh, M. H., Alikhani, H. A., Khavazi, K., Rahimian, H. A., & Miransari, M. (2011). Wheat (*Triticum aestivum* L.) growth enhancement by Azospirillum sp. under drought stress. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, *27*, 197-205.

Bano, Q., Ilyas, N., Bano, A., Zafar, N., Akram, A., Ul Hassan, F., (2013). Effect of Azospirillum inoculation on maize (*Zea mays* L.) under drought stress. *Pak. J. Bot.* 45, 13–20.

Blum, A. (2005). Drought resistance, water-use efficiency, and yield potential—are they compatible, dissonant, or mutually exclusive?. *Australian Journal of Agricultural Research*, *56*(11), 1159-1168.

Blum, A. (2005). Drought resistance, water-use efficiency, and yield potential—are they compatible, dissonant, or mutually exclusive?. *Australian Journal of Agricultural Research*, *56*(11), 1159-1168.

Bresson, J., Varoquaux, F., Bontpart, T., Touraine, B., & Vile, D. (2013). The PGPR strain P hyllobacterium brassicacearum STM 196 induces a reproductive delay and physiological changes that result in improved drought tolerance in Arabidopsis. *New Phytologist*, *200*(2), 558-569.

Cassan, F., Maiale, S., Masciarelli, O., Vidal, A., Luna, V., & Ruiz, O. (2009). Cadaverine production by *Azospirillum brasilense* and its possible role in plant growth promotion and osmotic stress mitigation. *european journal of soil biology*, *45*(1), 12-19.

Cechin, I., Rossi, S. C., Oliveira, V. C., & Fumis, T. D. F. (2006). Photosynthetic responses and proline content of mature and young leaves of sunflower plants under water deficit. *Photosynthetica*, *44*, 143-146.

Chanway, C. P., & Holl, F. B. (1994). Growth of outplanted lodgepole pine seedlings one year after inoculation with plant growth promoting rhizobacteria. *Forest Science*, *40*(2), 238-246.

Chebotar', V. K., Makarova, N. M., Shaposhnikov, A. I., & Kravchenko, L. V. (2009). Antifungal and phytostimulating characteristics of *Bacillus subtilis* Ch-13 rhizospheric strain, producer of bioprepations. *Applied Biochemistry and Microbiology*, *45*, 419-423.

Chimenti, C. A., Marcantonio, M., & Hall, A. J. (2006). Divergent selection for osmotic adjustment results in improved drought tolerance in maize (*Zea mays* L.) in both early growth and flowering phases. *Field Crops Research*, *95*(2-3), 305-315.

Cohen, A. C., Travaglia, C. N., Bottini, R., & Piccoli, P. N. (2009). Participation of abscisic acid and gibberellins produced by endophytic Azospirillum in the alleviation of drought effects in maize. *Botany*, *87*(5), 455-462.

Çakmakçi, R., Dönmez, F., Aydın, A., & Şahin, F. (2006). Growth promotion of plants by plant growth-promoting rhizobacteria under greenhouse and two different field soil conditions. *Soil Biology and Biochemistry*, *38*(6), 1482-1487.

Dar, Z. M., Masood, A., Mughal, A. H., Asif, M., & Malik, M. A. (2018). Review on drought tolerance in plants induced by plant growth promoting rhizobacteria. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, *7*(5).

Desclaux, D., & Roumet, P. (1996). Impact of drought stress on the phenology of two soybean (*Glycine max* L. Merr) cultivars. *Field Crops Research*, *46*(1-3), 61-70.

Egamberdieva, D., & Kucharova, Z. (2009). Selection for root colonising bacteria stimulating wheat growth in saline soils. *Biology and fertility of soils*, *45*, 563-571.

Farooq, M., Basra, S. M. A., Wahid, A., Cheema, Z. A., Cheema, M. A., & Khaliq, A. (2008). Physiological role of exogenously applied glycine betaine to improve drought tolerance in fine grain aromatic rice (*Oryza sativa* L.). *Journal of Agronomy and Crop Science*, *194*(5), 325-333.

Farooq, M., Basra, S., Wahid, A., Ahmad, N., & Saleem, B. A. (2009). Improving the drought tolerance in rice (*Oryza sativa* L.) by exogenous application of salicylic acid. *Journal of Agronomy and Crop Science*, *195*(4), 237-246.

Fukai, S. (1999). Phenology in rainfed lowland rice. *Field Crops Research*, *64*(1-2), 51-60.

Geerts, S., Raes, D., Garcia, M., Mendoza, J., & Huanca, R. (2008). Crop water use indicators to quantify the flexible phenology of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) in response to drought stress. *Field Crops Research*, *108*(2), 150-156.

Ghorbanpour, M., Hatami, M., & Khavazi, K. (2013). Role of plant growth promoting rhizobacteria on antioxidant enzyme activities and tropane alkaloid production of *Hyoscyamus niger* under water deficit stress. *Turkish Journal of Biology*, *37*(3), 350-360.

Ghosh, D., Gupta, A., & Mohapatra, S. (2019). A comparative analysis of exopolysaccharide and phytohormone secretions by four drought-tolerant rhizobacterial strains and their impact on osmotic-stress mitigation in *Arabidopsis thaliana*. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, *35*, 1-15.

Giuliani, S., Sanguineti, M. C., Tuberosa, R., Bellotti, M., Salvi, S., & Landi, P. (2005). Root-ABA1, a major constitutive QTL, affects maize root architecture and leaf ABA concentration at different water regimes. *Journal of Experimental Botany*, *56*(422), 3061-3070.

Glick, B. R., Todorovic, B., Czarny, J., Cheng, Z., Duan, J., & McConkey, B. (2007). Promotion of plant growth by bacterial ACC deaminase. *Critical Reviews in Plant Sciences*, *26*(5-6), 227-242.

Goswami, M., Deka, S. (2020). Plant growth-promoting rhizobacteria—alleviators of abiotic stresses in soil: a review. *Pedosphere*, 30, 40–61.

Gou, W., Tian, L., Ruan, Z., Zheng, P., Chen, F., Zhang, L., Cui, Z., Zheng, P., Li, Z., Gao, M., Shi, W., Zhang, L., Liu, J., Hu, J. (2015). Accumulation of choline and glycinebetaine and drought stress tolerance induced in maize (*Zea mays*) by three plant growth promoting rhizobacteria (PGPR) strains. *Pak. J. Bot*. 47, 581–586.

Gusain, Y. S., Singh, U. S., & Sharma, A. K. (2015). Bacterial mediated amelioration of drought stress in drought tolerant and susceptible cultivars of rice (*Oryza sativa* L.). *African Journal of Biotechnology*, *14*(9), 764-773.

Habib, S. H., Kausar, H., & Saud, H. M. (2016). Plant growth-promoting rhizobacteria enhance salinity stress tolerance in okra through ROS-scavenging enzymes. *BioMed Research International*, *2016*.

Hussain, M. B., Zahir, Z. A., Asghar, H. N., & Asgher, M. (2014). Can catalase and exopolysaccharides producing rhizobia ameliorate drought stress in wheat. *Int J Agric Biol*, *16*(1), 3-13.

Jaleel, C. A., Gopi, R., Sankar, B., Manivannan, P., Kishorekumar, A., Sridharan, R., & Panneerselvam, R. (2007). Studies on germination, seedling vigour,

lipid peroxidation and proline metabolism in *Catharanthus roseus* seedlings under salt stress. *South African Journal of Botany*, *73*(2), 190-195.

Kang, S. M., Radhakrishnan, R., Khan, A. L., Kim, M. J., Park, J. M., Kim, B. R., ... & Lee, I. J. (2014). Gibberellin secreting rhizobacterium, *Pseudomonas putida* H-2-3 modulates the hormonal and stress physiology of soybean to improve the plant growth under saline and drought conditions. *Plant Physiology and Biochemistry*, *84*, 115-124.

Kazan, K. (2015). Diverse roles of jasmonates and ethylene in abiotic stress tolerance. *Trends in plant science*, *20*(4), 219-229.

Kechid, M., Desbrosses, G., Rokhsi, W., Varoquaux, F., Djekoun, A., & Touraine, B. (2013). The NRT 2.5 and NRT 2.6 genes are involved in growth promotion of Arabidopsis by the plant growth-promoting rhizobacterium (PGPR) strain *Phyllobacterium brassicacearum* STM 196. *New Phytologist*, *198*(2), 514-524.

Kiani, S. P., Talia, P., Maury, P., Grieu, P., Heinz, R., Perrault, A., ... & Sarrafi, A. (2007). Genetic analysis of plant water status and osmotic adjustment in recombinant inbred lines of sunflower under two water treatments. *Plant Science*, *172*(4), 773-787.

Kloepper, J. W. (1978). Plant growth-promoting rhizobacteria on radishes. In *Proc. of the 4th Internet. Conf. on Plant Pathogenic Bacter, Station de Pathologie Vegetale et Phytobacteriologie, INRA, Angers, France, 1978* (Vol. 2, pp. 879-882).

Li, Y., Ye, W., Wang, M., & Yan, X. (2009). Climate change and drought: a risk assessment of crop-yield impacts. *Climate research*, *39*(1), 31-46.

Lim, J. H., & Kim, S. D. (2013). Induction of drought stress resistance by multi-functional PGPR *Bacillus licheniformis* K11 in pepper. *The plant pathology journal*, *29*(2), 201.

Liu, F., Xing, S., Ma, H., Du, Z., & Ma, B. (2013). Cytokinin-producing, plant growth-promoting rhizobacteria that confer resistance to drought stress in

Platycladus orientalis container seedlings. *Applied microbiology and biotechnology*, *97*, 9155-9164.

Maleki, M., Fatehi, F., & Ghorbanpour, M. (2023). PGPR reduces the adverse effects of abiotic stresses by modulating morphological and biochemical properties in plants. In *Plant Stress Mitigators* (pp. 201-208). Academic Press.

Maleki, M., Ghorbanpour, M., & Kariman, K. (2017). Physiological and antioxidative responses of medicinal plants exposed to heavy metals stress. *Plant Gene*, *11*, 247-254.

Marasco, R., Rolli, E., Ettoumi, B., Vigani, G., Mapelli, F., Borin, S., ... & Daffonchio, D. (2012). A drought resistance-promoting microbiome is selected by root system under desert farming. *PloS one*, *7*(10), e48479.

Miller, G., Susuki, N., Ciftci-Yilmaz, Mittler, S. R. (2010). Reactive oxygen species homeostasis and signalling during drought and salinity stresses. *Plant Cell Environment.* 33, 453-467.

Miransari, M. (2011). Soil microbes and plant fertilization. *Applied microbiology and biotechnology*, *92*, 875-885.

Mittler, R. (2002). Oxidative stress, antioxidants and stress tolerance. *Trends in Plant Sciences*, 7, 405–410.

Molina-Favero, C., Creus, C. M., Simontacchi, M., Puntarulo, S., & Lamattina, L. (2008). Aerobic nitric oxide production by *Azospirillum brasilense* Sp245 and its influence on root architecture in tomato. *Molecular plant-microbe interactions*, *21*(7), 1001-1009.

Mori, I. C., Murata, Y., Yang, Y., Munemasa, S., Wang, Y. F., Andreoli, S., ... & Schroeder, J. I. (2006). CDPKs CPK6 and CPK3 function in ABA regulation of guard cell S-type anion-and Ca2+-permeable channels and stomatal closure. *PLoS biology*, *4*(10), e327.

Ramaekers, L., Remans, R., Rao, I. M., Blair, M. W., & Vanderleyden, J. (2010). Strategies for improving phosphorus acquisition efficiency of crop plants. *Field Crops Research*, *117*(2-3), 169-176.

Richardson, A. E., Barea, J. M., McNeill, A. M., & Prigent-Combaret, C. (2009). Acquisition of phosphorus and nitrogen in the rhizosphere and plant growth promotion by microorganisms.

Rincón, A., Valladares, F., Gimeno, T. E., & Pueyo, J. J. (2008). Water stress responses of two Mediterranean tree species influenced by native soil microorganisms and inoculation with a plant growth promoting rhizobacterium. *Tree physiology*, *28*(11), 1693-1701.

Rouphael, Y., Cardarelli, M., Schwarz, D., Franken, P., & Colla, G. (2012). Effects of drought on nutrient uptake and assimilation in vegetable crops. *Plant responses to drought stress: from morphological to molecular features*, 171-195.

Ruíz-Sánchez, M., Armada, E., Muñoz, Y., de Salamone, I. E. G., Aroca, R., Ruíz-Lozano, J. M., & Azcón, R. (2011). Azospirillum and arbuscular mycorrhizal colonization enhance rice growth and physiological traits under well-watered and drought conditions. *Journal of plant physiology*, *168*(10), 1031-1037.

Sandhya, V. S. K. Z., Ali, S. Z., Grover, M., Reddy, G., & Venkateswarlu, B. (2010). Effect of plant growth promoting Pseudomonas spp. on compatible solutes, antioxidant status and plant growth of maize under drought stress. *Plant growth regulation*, *62*, 21-30.

Sankar, B., Jaleel, C. A., Manivannan, P., Kishorekumar, A., Somasundaram, R., & Panneerselvam, R. (2007). Drought-induced biochemical modifications and proline metabolism in *Abelmoschus esculentus* (L.) Moench. *Acta Botanica Croatica*, *66*(1), 43-56.

Shintu, P. V., & Jayaram, K. M. (2015). Phosphate solubilising bacteria (*Bacillus polymyxa*)-An effective approach to mitigate drought in tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.). *Trop. Plant Res*, *2*(1), 2349-9265.

Soysal, S., Erman, M. & Çığ F. (2022) Biyoremediasyon Çalışmalarında Bitki Gelişimini Teşvik Eden Kök Bakterilerinin Rolü. A. Yılmaz ve S. Soysal (Ed) Modern Tarım Uygulamaları (pp. 151-167). IKSAD, Türkiye.

Soysal, S., & Erman, M. (2022) Net Photosynthesis of Wheat under Abiotic Stress: A Review. M. Karaman (Ed) Theoretical and Practical New Approaches in Cereal Science and Technology (pp. 131-146). IKSAD, Türkiye.

Wang, C. J., Yang, W., Wang, C., Gu, C., Niu, D. D., Liu, H. X., ... & Guo, J. H. (2012). Induction of drought tolerance in cucumber plants by a consortium of three plant growth-promoting rhizobacterium strains. *Plos one*, *7*(12), e52565.

Yang, S., Vanderbeld, B., Wan, J., & Huang, Y. (2010). Narrowing down the targets: towards successful genetic engineering of drought-tolerant crops. *Molecular plant*, *3*(3), 469-490.

Zhang, H., Murzello, C., Sun, Y., Kim, M. S., Xie, X., Jeter, R. M., ... & Paré, P. W. (2010). Choline and osmotic-stress tolerance induced in Arabidopsis by the soil microbe *Bacillus subtilis* (GB03). *Molecular plant-microbe interactions*, *23*(8), 1097-1104.

BÖLÜM 12

MEYVE YETİŞTİRİCİLİĞİNDE KURAKLIK STRESİNİN FENOLİK BİLEŞİKLER ÜZERİNE ETKİSİ VE KURAKLIK DİRENCİNİ ARTIRAN UYGULAMALAR

Dr. Öğr. Üyesi Akgül TAŞ[1*]

Prof. Dr. Müttalip GÜNDOĞDU[2]

DOI: https://dx.doi.org/10.5281/zenodo.10031690

[1*] Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi, Seben İzzet Baysal Meslek Yüksekokulu, Bitkisel ve Hayvansal Üretim Bölümü, Bolu, Türkiye. akgulltas@gmail.com

[2] Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Bahçe Bitkileri Bölümü, Bolu, Türkiye. mgundogdu@ibu.edu.tr

GİRİŞ

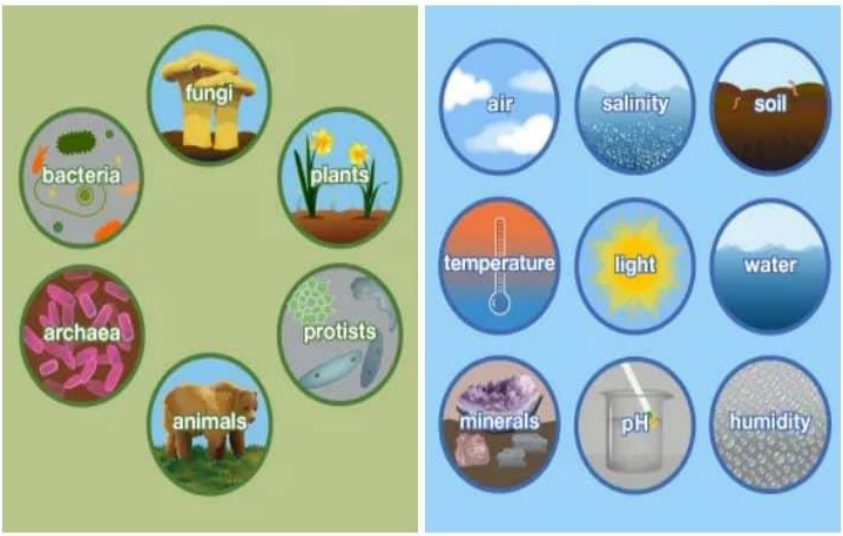
Başta insanlar olmak üzere tüm canlıların yaşamlarını idame ettirebilmeleri için en elzem gereksinimler 'su' gereksiniminin yanı sıra kuşkusuz ki 'gıda' ihtiyacıdır. İnsanlar tarafından tüketilen 'hayvansal içerikli ürünler' dışında, en son gıda olarak soframıza gelen ürünlerin büyük bir çoğunluğunu 'bitkisel ürünler' oluşturmaktadır. İnsanların beslenmesinde oldukça önemli olan bitkisel ürünlerin başında ise 'meyveler' gelmektedir (Foley ve ark., 2011; Gregory ve George, 2011).

Dünya'da tarımsal üretim, otomatik araç-gereçler aracılığıyla, tamamen kontrollü şartların (sıcaklık ve nem ayarlarının yapılması) ayarlanabildiği 'sera ortamlarında yapılmakla birlikte, üretimin büyük bir çoğunluğu, 'açık arazi ve bahçe ortamlarında yapılmaktadır. Arazi veya bahçe koşullarında yapılan bitkisel üretimde, meyve ağaçları, canlı etmenlerin rol aldığı 'biyotik koşullar' ve cansız çevre koşullarının yer aldığı 'abiyotik koşulların devamlı baskısı altında bulunmaktadır (Şekil 1).

Bu her iki koşullar altında bitkiler gelişmelerini devam ettirmektedirler (Daryanto ve ark., 2016; Farooq ve ark., 2017). Açık alanlarda bitki ve meyve ağaçlarını etkileyen biyotik sınırlayıcılar içerisinde, bakteriler, funguslar ve virüsler gibi bitkide hastalık yapıcı organizmalar, böcekler gibi bitki zararlıları yer almaktadır (Dreher ve Callis, 2007). Doğada kendiliğinden var olan 'temel besin piramidi'ne göre bitkiler temel üreticilerdir ve en alt basamakta yer alırlar. Bitki

hastalıkları-zararlıları ve onların doğal düşmanları ise sırasıyla 2. ve 3. besin basamağında yer almaktadır.

Tabiatın şaşmaz bir kanunu olarak, bitkiler, bitki hastalıkları-zararlıları ve onların doğal düşmanları arasında temelde 'besin' ilişkisine dayalı kendiliğinden bir doğal denge bulunmakta ve bu denge çerçevesinde bitkiler büyüyüp gelişebilmektedirler (Dreher ve Callis, 2007). Doğa koşullarında, bitkiler ve meyve ağaçları için bir diğer önemli faktör olan abiyotik sınırlayıcılar içerisinde ise kuraklık, tuzluluk, sıcaklık, nem, ışık ve besin gibi parametreler yer almaktadır (Wang ve ark., 2003; Vinocur ve Altman, 2005; Nakabayashi ve ark., 2014). İklim koşullarının değişmesi ile sıcaklık, kuraklık ve tuzluluk gibi farklı abiyotik streslerin yoğunluğu ve sıklığı oldukça arttırmıştır (Ikram ve ark., 2021).



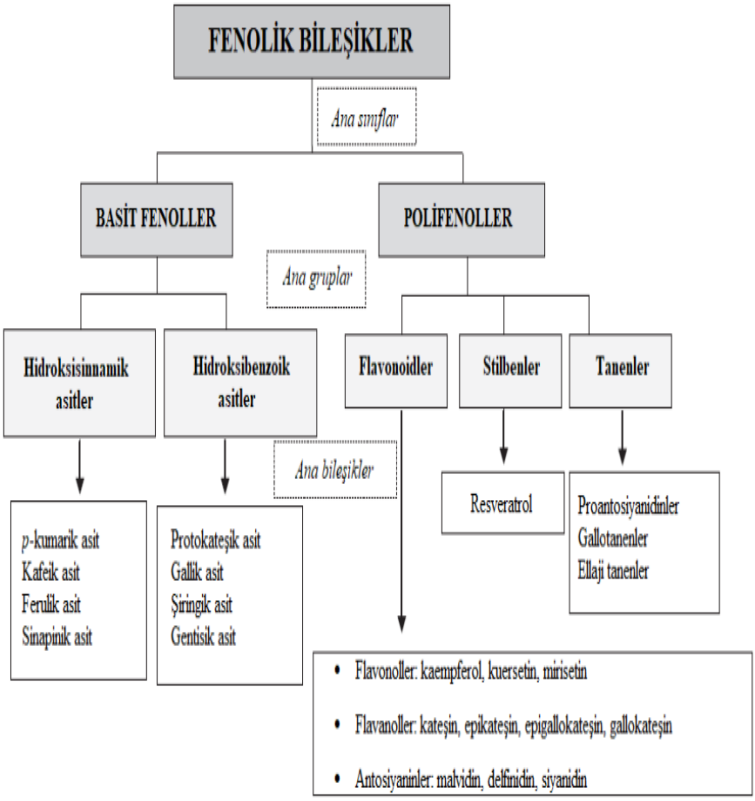
Şekil 1. Biyotik faktörler ve abiyotik faktörler (Anonim, 2023a)

1. FENOLİK BİLEŞİKLER VE KURAKLIK FİZYOLOJİSİ

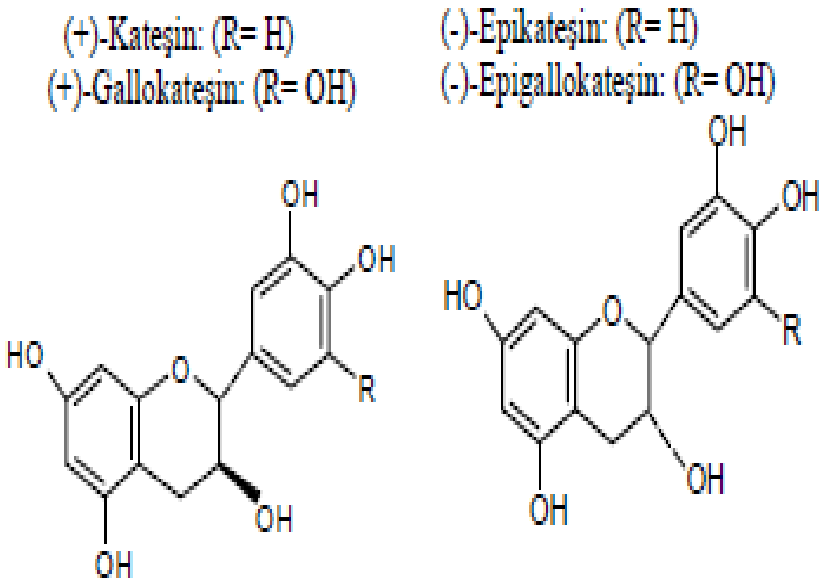
Kuraklık stresi, fizyolojik değişiklik olarak, sadece fotosentez ve solunum gibi olayları etkilemekle kalmayıp, ağaçların içerdikleri biyokimyasal parametreleri de önemli ölçüde etkileyebilmektedir (Jiang ve ark., 2010; Varshney ve ark., 2012; Cardenas-Manriquez ve ark., 2016; Radwan ve ark., 2017; Martinez-Nicolas ve ark., 2019; Tatari ve ark., 2020; Adiba ve ark., 2021a, 2021b).

Meyve ağaçlarında, çeşitli ölçülerde etkilenebilen biyokimyasal parametreler arasında, önemli bir grup olan 'fenolik bileşikler' yer almaktadır. Temel açıdan, basit fenoller ve polifenoller olarak iki ana başlığa ayrılabilen fenolik bileşikler, içerisinde flavonoidler, hidroksibenzoik asitler, tanenler gibi birçok önemli bileşenleri barındırmaktadır (Şekil 2, Şekil 3).

Bu konu, oldukça geniş olmakla birlikte, bitkiler tarafından doğal olarak kendiliğinden üretilen fenolik bileşikler arasında, başta insanlar olmak üzere tüm canlıların üzerinde etkili olan 'antosiyaninler' ve 'antioksidanlar' gibi oldukça önemli gruplar da bulunmaktadır. Bu iki grup, fenolik bileşiklerin insanlar için ne kadar önemli olduğunu kanıtlamaktadır.



Şekil 2. Fenolik bileşikler ve bulundukları gruplar (Beres ve ark., 2017)



Şekil 3. Yaygın olarak görülen bazı flavan-3-oller (Shahidi ve Naczk, 1995)

Antosiyaninler, bitki ve meyve ağaçlarına doğal rengini veren önemli bir bileşik grubudur. Günümüzde, tüketilen birçok gıda ürünlerinde, özellikle de ürünlerin yapım aşamasında, çeşitli renklendiriciler yaygın olarak kullanılmaktadır.

İnsan sağlığına oldukça önem veren birçok gıda üretim kuruluşları, artık sağlığa oldukça zararlı etkileri olduğu bilinen yapay renklendiricilerin yerine, içinde kendiliğinden doğal antosiyanin barındıran bitkisel ürünleri, doğal renklendirici bileşenler olarak, daha fazla tercih etmeye başlamışlardır (Hoekstra ve ark., 2001). İnsanlar için bir diğer önemli fenolik bileşikler grubunda bulunan

antioksidanlar, özellikle de insan sağlığı için oldukça yarayışlı olan gruplardandır.

Bilimsel ölçüde antioksidan aktivitenin tanımına kısaca değinilecek olunursa, antioksidanlar, insan vücudunda serbest radikalleri nötralize eden, oksidatif stresi azaltan, hücrelerdeki oluşabilecek DNA hasarlarını önleyen çok önemli bileşiklerdir (Erim Köse, 2020).

Günümüzde, özellikle de bağışıklık sisteminin zayıflığıyla ilişkilendirilen birçok hastalıklarda ve kanser gibi daha ciddi hastalıklarda, antioksidan aktiviteli ilaç ve ürünlerin kullanımı, alternatif bitkisel tıp kapsamında, giderek yaygınlaşmaktadır (Erim Köse, 2020).

3. KURAKLIK FİZYOLOJİSİNİN MEYVE AĞAÇLARI ÜZERİNDEKİ ETKİLERİ

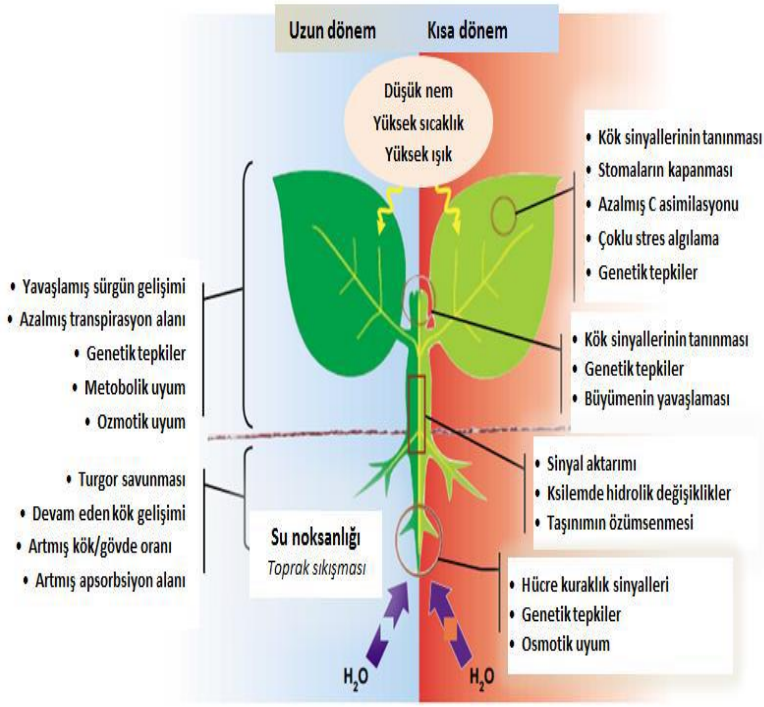
Sadece bitkiler için değil tüm canlılar için zorunlu bir gereksinim olan kaynaklar arasında ‘su ihtiyacı’ gelmektedir. Bitkiler için bu ihtiyaç, ‘nem durumu’ ile ilişkilendirilmektedir. Doğal bir ortamda her canlı gibi bitkiler de gereksinim duyduğu nem / su ihtiyacını tam olarak karşılayabilirlerse, istedikleri gibi büyüyüp gelişebilmekte, verim ve kaliteleri yükselebilmektedir. Ancak, bu zorunlu gereksinimin baskılanması, ‘kuraklık’ stresi ile ilişkilendirilmektedir (Farooq ve ark., 2009). Kuraklık, dünya genelinde kullanılabilir tarım alanlarında stres faktörleri arasında en yüksek paya (%26) sahiptir (Soysal ve Erman, 2021).

Kuraklık, tüm canlılarda olduğu gibi bitkiler için de çok önemli bir çevresel abiyotik stres kaynağıdır. Eğer tabiatta yağmur ve kar gibi yağış şekilleri oluşmazsa, dört tarafı sularla kaplı ülkelerde bile, zamanla kuraklık stresinin oluşma ihtimali her zaman vardır. Nitekim, yağış üretimi döngüsü devam etmezse, var olan su kaynakları insanlar tarafından içme suyu veya enerji üretimleri gibi çeşitli şekillerde değerlendirildiğinde, su kaynaklarının hızlıca tükenmesi kaçınılmaz bir gerçektir (Öztürk, 2015).

Özellikle de günümüzde tüm Dünya'da yaşanan küresel iklim değişiklikleri ile bu gerçek, daha çarpıcı bir şekilde gün yüzüne çıkmaktadır. Dolayısıyla kuraklık, tüm canlılar için yakın bir gelecekte kapıyı çalması beklenen yüksek ihtimalli bir durumdur. Bu duruma ilişkin olarak, birçok donanıma sahip çoğu gelişmiş ülkeler bile daha şimdiden çeşitli çareler ve çözüm önerileri arama yoluna girmişlerdir. Çünkü bu durum, ister gelişmiş isterse de gelişmeye devam eden bir ülke olsun, tüm insanlığı ilgilendiren oldukça önemli bir konudur (Kalefetoğlu ve Ekmekçi, 2005; Kasim ve ark., 2013; Luz ve ark., 2023).

Meyve ağaçları, yaşayan organizmalar olarak 'kuraklık' stresinden önemli ölçüde etkilenebilmektedirler. Meyve ağaçları arasında ise bu stres kaynağından belki de en çok ve en hızlı şekilde etkilenenler, suyu çok seven ve suya çok gereksinim duyan çilek, dut ve muz gibi meyve gruplarıdır. Bitkiler aleminde hemen hemen çoğu meyve türü, kuraklık stresine karşı risk gurubunda yer almaktadır (Terry ve ark., 2007; Keutgen ve Pawelzik, 2008; Giné-Bordonaba ve ark., 2016).

Kuraklık stresi altında, meyve ağaçlarında uzun dönem ve kısa dönem etkiler şeklinde, hem 'morfolojik' hem de 'fizyolojik' değişiklikler yaşanabilmektedir (Şekil 4). Yaşanabilecek bu değişimlerin yoğunluğu ve ciddiyet boyutu; bitki ve meyve türleri, kuraklığın şiddeti ve süresi gibi birçok faktörlere göre değişebilmektedir (Rejskova ve ark., 2007; Conde ve ark., 2011; Fernandez, 2014; Pereira ve ark., 2016; Dutra ve ark., 2018; Jamshidi Goharrizi ve ark., 2020a, 2020b, 2020c; 2021).



Şekil 4. Meyve ağaçlarında kuraklık stresinin uzun dönem (sol) ve kısa dönem (sağ) reaksiyonları (Chaves ve ark., 2003)

Temel bir çerçeveden bakıldığında, yaşanan yoğun bir kuraklık stresinde, bitkisel organizmalarda morfolojik değişimler açısından en

başta meyve ağaçlarının büyüyüp gelişmeleri önemli ölçüde zarar görebilmektedir.

Bu zararın tabloya yansımasında ağaçlarda, su-besin döngüsü ve akışının hızlıca bozulması nedeniyle kök, yaprak, çiçek, meyve ve tohum gibi temel hayati organlar, düzgün ve normal zamanda olması gereken ölçülerde oluşamamaktadır. Sonuç olarak ise biyotik-abiyotik tehlike ve zararlara daha açık olan, bu zararlardan daha fazla etkilenebilen, normalden daha kısa boylu ve cılız şekilli ağaçlar meydana gelebilmektedir (Baghalian ve ark., 2011; Ripoll ve ark., 2014; Santos ve ark., 2015; Anjorin ve ark., 2017; Abdelrahman ve ark., 2018; Nouraei ve ark., 2018; Ma ve ark., 2020).

Bundan sonraki safhada ağaçlarda, kalite, biyokütle ve verim faktörlerinin büyük oranlarda düşmesi yüksek bir olasıdır. Böyle yüksek bir olasılıktan ise elbette ki sadece meyve ve ağaçlar etkilenmeyecektir.

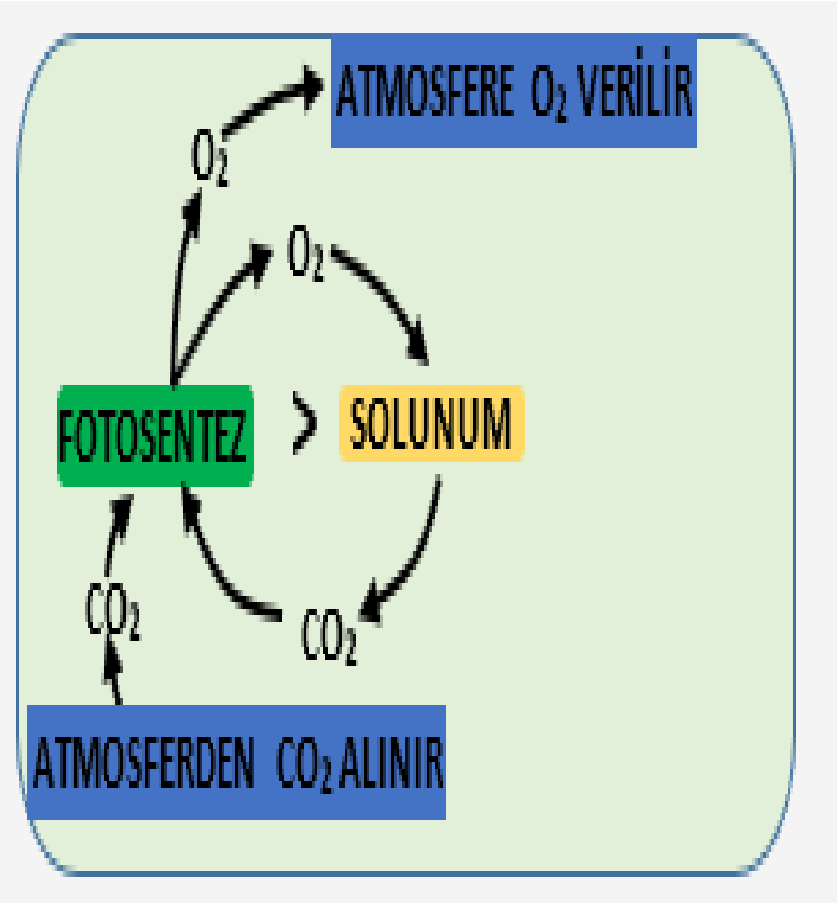
Bitkilere ve onlardan elde edilecek ürünlere zorunlu gereksinim duyan insanların da sofralarına gelecek ürünlerde azalmalar yaşanacak, dolayısıyla, en kötü olasılık olarak, gıda krizlerinin yaşanması hiç de sürpriz bir durum olmayacaktır (Lissner ve ark.,1999; Serpe ve Matthews, 2000; Osakabe ve ark., 2013; Galindo ve ark., 2014; Rejeb ve ark., 2014; Galli ve ark., 2016; Adak ve ark., 2018; Zhang ve ark., 2018).

Kuraklık stresi altında meyve ağaçlarında ortaya çıkabilen morfolojik değişikliklerin yanı sıra bir diğer önemli değişiklikler de fizyolojik

değişimlerdir. Ağaçlardaki kuraklık stresi altında meydana gelebilecek fizyolojik değişiklikler ile ilgili olarak literatürde çok sayıda inceleme ve çalışmalar bulunmaktadır. Ancak, genel bir bakış açısıyla bakıldığında, bitkisel organizmalarda belki de en hayati olan fizyolojik olaylar hiç kuşkusuz ki, 'fotosentez' ve 'solunum' olaylarıdır (Şekil 5).

Meyve ve ağaçları için oldukça önemli olan bu iki parametreler, yaşanabilecek kuraklık stresinden oldukça yoğun etkilenmektedirler. Genel olarak değerlendirildiğinde, ağaçlar yoğun bir kuraklık stresine maruz kaldıklarında, hızla bozulan hücrelerini onarabilmek için solunum olaylarını hızlandırmaktadırlar (Farooq ve ark., 2009; Abdul-Jaleel ve ark., 2008a, b).

Fotosentez konusu ise sadece bitkiler için değil tüm canlılar için elzem bir konudur. Çünkü, bir bitki dahi fotosentez yapamazsa, dünyadaki yaşam, hızlıca-tersine çevrilemez ölçülerde olumsuz etkilenecektir. Fotosentez demek, bitkilerin canlılar için oksijen üretmesi demektir. Fotosentez aracılığıyla oksijen üretilemezse, canlılar için yaşam da yok demektir. Böylesine önemli bir konuda, yaşanabilecek yoğun kuraklık stresi altında ağaçlar, fotosentez yapabilmek için ihtiyaç duydukları suyu alamayacak CO_2 fiksasyonları engellenecek, klorofil düzeyleri hızlıca düşecek, dolayısıyla da fotosentez olayları hızlıca azalacaktır (Moriana ve ark., 2002; Bloch ve Hoffimann, 2005; Pei ve ark., 2010; Chen ve ark., 2011; Ghaderi ve Siosemardeh, 2011; Gong ve Chen, 2012; Orsini ve ark., 2012).



Şekil 5. Bitkilerde gerçekleşen fotosentez ve solunum olayları (Anonim, 2023c)

Uzun sürelerde, şiddetli bir kuraklığın yaşanması durumunda, meyvelere doğal rengini veren antosiyaninlerde önemli bir rol alan renk pigmentlerinin işlevselliği kaybolmaya başlamakta ve sonuç olarak antosiyaninler, bu durumdan oldukça olumsuz etkilenmektedirler (Hoekstra ve ark., 2001; Xiong ve ark., 2006).

Antioksidanlar açısından ise meyve ağaçlarında yaşanacak yoğun bir kuraklık stresi, doğrudan veya dolaylı olarak, oksijen radikallerinin üretimine yol açabilmekte, bu durum ise ağaçlarda lipid peroksidasyonunda ve oksidatif streste artışlara neden olabilmektedir. Ağaçlarda oldukça yoğun bir kuraklık stresi durumunda, antioksidanların aktiviteleri, ciddi zarar görebilmekte ve oksidatif stresi artan ağacın stresinin giderilmesine yardımcı olan antioksidan aktivitesi düzgün bir şekilde çalışamamaktadır. Böyle bir durumun yaşanması, meyve ağaçlarında bazı olayların ters gittiğinin ve yoğun bir stres altına girildiğinin güçlü bir habercisidir (Xiong ve ark., 2006; Gong ve ark., 2008; Krol ve ark., 2014).

Ancak, meyvelerde hafif bir kuraklık durumunda, meyve fenolik bileşiklerinde artışlar gözlenebilmekte, dolayısıyla bu durum meyvelerde pozitif etkileri oluşturabilmektedir. Yapılan bir araştırmada, çilek meyvesinde hafif bir kuraklık stresinin meyvede antosiyaninlerin ve antioksidanların yanı sıra, bazı fenolik bileşik düzeylerini artırarak olumlu bir etkide bulunduğu bildirilmektedir (Perin ve ark., 2019).

Çilek üzerindeki başka bir çalışmada, orta derecede yaşanan bir kuraklığın meyvelerde toplam fenolik ve toplam antosiyanin düzeylerini artırdığı belirtilmiştir (Ünal ve Okatan, 2023). Nar (*Punica granatum* Linnaeus) suyunun polifenolik bileşik içeriğinin hafif bir kuraklık stresinde artış gösterdiği (Faraji ve ark., 2020), özellikle ellajik asit gibi bazı fenolik bileşiklerin miktarlarını önemli ölçüde

pozitif yönlü bir değişim gösterdiği kaydedilmiştir (Zahedi ve ark., 2022).

Kuraklık stresinin zeytinlerin biyoaktif bileşikleri üzerine etkisine yönelik yapılan bir araştırmada, hafif bir kuraklık stresinin zeytin yapraklarında oleuropein, verbascoside, luteolin ve apigenin gibi bazı önemli fenolik bileşiklerin miktarlarını olumlu ölçüde artırabildiği belirtilmiştir (Mechri ve ark., 2020).

Kuzeybatı İspanya'da kestane üzerinde yapılan bir çalışmada, orta şiddetli bir kuraklığın, kestanelerde antioksidan kapasiteyi artırarak, toplam fenolik ve toplam flavonoid bileşiklerin içeriklerini yükselttiği bildirilmiştir (Martínez ve ark., 2022). 'Maradol' çeşitli papaya (*Carica papaya* Linnaeus) meyvesi üzerinde yapılan bir çalışmada, hafif kuraklık stresinin, meyvede antioksidan kapasiteyi, fenolik bileşiklerin içerik ve çeşitliliğini artırdığı ifade edilmiştir (Espadas ve ark., 2019). Gonzalez-Villagra ve ark. (2018), çeşitli meyve türlerinde yaşanan hafif bir kuraklık stresinin, meyvelerin antosiyanin ve toplam fenolik bileşik içeriklerinde artışlar yaptığını belirtmişlerdir.

Dolayısıyla yapılan birçok araştırma sonucunda meyvelerde, hafif bir kuraklık stresi altında, sekonder metabolit ürünlerin yoğun olarak sentezlendiği ve daha fazla fenolik bileşik konsantrasyonlarını bitki bünyesinde biriktiği ortaya konulmuştur (Nascimento ve Fett-Neto, 2010; Selmar ve Kleinwächter, 2013; Kleinwächter ve Selmar, 2015).

4. MEYVELERİN KURAKLIĞA OLAN DAYANIKLILIĞINI ARTIRAN UYGULAMALAR

Çeşitli meyvelerde başta kuraklık olmak üzere ısı, donma ve çözülme gibi ortaya çıkan zararlı çevresel etkiler sonucunda meyvelerin morfolojisi ve biyolojisinde olumsuz aksaklıklar ve işlevsel bozukluklar yaşanabilmektedir. Meyvelerde yaşanabilen bu olumsuzlukları engelleyebilmek veya azaltabilmek amacıyla kayda değer bir seçenek olarak kullanılabilecek çeşitli uygulamalara başvurulduğu birçok literatürde bildirilmektedir.

Önemli bir çevresel etki olan kuraklığa karşı meyvelerin dayanıklılığını artırabilmek için meyvelerde eksojen olarak uygulanabilen bileşikler arasında 'ozmotik koruyucular ve bazı büyüme düzenleyicileri' gelmektedir (Travaglia ve ark., 2007).

Terimi ilk defa 'Brown' adlı araştırmacı tarafından adlandırılan ozmotik koruyucular, 'meyvelerin hücre fonksiyonlarını bozmadan ozmotik ayarlamalar için kullanılabilen küçük organik bileşikler' olarak tanımlanmaktadır (Brown, 1990). Bu bileşikler; iyonik karakterde olmayan, suda çözünebilen, uygulandıklarında metabolizmayı bozmayan, toksik yapıda olmayan ve kendi yapısı bozulmayan bileşiklerdir (Mevarech ve ark., 1977; Ventosa ve ark., 1998). Bu avantajlı özelliklerine ek olarak ozmotik koruyucuların, meyvelerde kullanıldıklarında protein, karbonhidratlar ve membranlar gibi makromolekülleri de koruyabilmesi, bu bileşiklerin diğer önemli bir olumlu özelliğini oluşturmaktadır (Luzardo ve ark., 2000; Hincha ve Hagemann, 2004).

Meyvelerde kuraklık stresine dayanıklılığı artırabilmek amacıyla kullanılan ozmotik koruyucular arasında, prolin, glisin betain ve poliamin gibi bileşikler bulunmaktadır. Naser ve ark. (2010), İran'da ceviz ağaçlarında yaptıkları prolin uygulamasının meyvede kuraklık stresini önemli ölçüde azalttığını bildirmişlerdir. Zahedi ve ark. (2020), çilek meyvesinde prolin uygulamasının meyvede kuraklık hasarlarını azalttığını belirtmişlerdir. Delfani ve ark. (2023), Thomson Navel adlı çeşide sahip portakal meyvesinde yaptıkları 200 µM glisin betain uygulamasının, su kıtlığı altındaki meyvenin verim ve kalitesinde önemli ölçüde iyileştirmeler yaptığını ifade etmişlerdir. Zhang ve ark. (2013), Çin'de elma üzerinde yaptıkları çalışmalarında, 100 µM glisin betain uygulamasının, meyvede fotosentetik oranı artırarak kuraklık stresini azalttığını belirtmişlerdir. Wang ve Steffens (1985), elma meyvesinde poliamin uygulamasının meyveyi kuraklık hasarına karşı koruduğunu bildirmişlerdir.

Ek olarak; sitokinin, absisik asit, jasmonik asit ve salisilik asit gibi büyüme düzenleyicileri, hem meyvelerde büyüme ve gelişmeyi desteklemekte, hem de meyvelerde kuraklık stresi kaynaklı olarak meydana gelebilecek olumsuzlukları en aza indirgemeye yardımcı olabilmektedir (Travaglia ve ark., 2007).

Liao ve ark. (2017), transgenik elma meyvesinde yaptıkları sitokinin uygulamasının meyvede kök büyümesini artırarak, kuraklık hasarını önemli ölçüde azalttığını belirtmişlerdir. Mahouachi ve ark. (2012), büyüme düzenleyicilerinden absisik asit ve jasmonik asidi

uyguladıkları papaya meyvesinde fotosentez özelliklerinin arttığını ve böylece meyvenin kuraklık hasarına karşı güçlendiğini bildirmişlerdir. Ghaderi ve ark. (2015), çilek meyvesinde yapmış oldukları salisilik asit uygulamasının, meyvede toplam yaprak alanı ve yaprak kuru madde oranını artırarak kuraklık stresi zararlarını azalttığını ifade etmişlerdir. Mozafari ve ark. (2018), çilekte salisilik asit uygulamasının kuraklık stresi çeken meyve üzerindeki olumsuz etkileri telafi ettiğini ve meyvenin büyüme parametrelerini iyileştirdiğini raporlamışlardır. Youssef ve ark. (2023), Washington portakalında yapmış oldukları 750 ppm salisilik asit uygulamasının, meyvede kuraklık hasarlarını önemli ölçüde azalttığını belirtmişlerdir.

SONUÇ

Kuraklık, tüm canlılarda olduğu gibi meyve ağaçlarında da üretimi, verim ve kaliteyi, büyüme ve gelişimi olumsuz yönde etkileyebilen oldukça önemli bir abiyotik stres etmenidir. Bu etmen, ağaçlarda morfolojik ve fizyolojik olarak değişikliklere sebebiyet verir. Bitki ve ağaçlarda yaşamın önemli bir parçası olan fenolik bileşikler, kuraklık etmeninden yoğun bir şekilde etkilenebilmektedir. Bu çalışmada incelenen tüm literatürler dikkate alındığında, meyveler ve kuraklık stresi açısından genel bir tespit yapılacak olunursa, çoğu meyve türlerinin hafif bir kuraklık stresi yaşadıklarında, fenolik bileşik konsantrasyonlarında önemli artışlar meydana geldiği görülmüştür. Meyveler, yaşadıkları bu strese bir tepki olarak, doğal savunma mekanizmalarını harekete geçirip tepkisini fenolik bileşik oranlarını artırarak gösterebilmektedir. Öte yandan, yaşanan kuraklığın oldukça

şiddetli ve uzun sürelerde olması ise meyvelerde fenolik bileşikler de dahil olmak üzere birçok parametrelerde ciddi ölçüde olumsuz sonuçlara neden olabilmektedir. Bu çalışmada, meyve yetiştiriciliğinde yaşanabilecek kuraklık stresinin, meyvelerdeki fenolik bileşikleri hangi koşullarda, nasıl etkilediği detaylı bir şekilde irdelenmiştir. Sonuç olarak, hafif bir kuraklık stresinin meyvelerde pozitif bir döngüye yol açarak, meyveler tarafından fenolik bileşiklerin sentezlenmesini daha da artırdığı kanaatine varılmıştır. Özellikle de günümüzde yaşanan iklim değişiklikleriyle birlikte kuraklığın tüm canlılar için ne denli önemli olduğu göz önüne alındığında, her bir meyve türü özelinde bu konuyla ilgili daha fazla araştırmanın yapılması önem arz etmektedir. Bu doğrultuda kuraklık stresinin yönetilebilmesi ve su kaynaklarının etkili olarak kullanılması için meyve yetiştiriciliğinde modern sulama sistemlerinin kullanılması gerekmektedir. Ayrıca uygun kültürel uygulama teknikleri ve ıslah programları ile kuraklığa dayanıklı yeni çeşitlerin geliştirilmesi, bu stres faktörünü yönetebilmede olumlu yönde katkı sağlayacaktır.

KAYNAKÇA

Abdelrahman, M., Burritt, D. J., Tran, L. P. (2018). The use of metabolomic quantitative trait locus mapping and osmotic adjustment traits for the improvement of crop yields under environmental stresses. *Semin. Cell Dev. Biol.*, 83: 86–94.

Abdul-Jaleel, C., Gopi, R., Panneerselvam, R. (2008a). Growth and photosynthetic pigments responses of two varieties of *Catharanthus roseus* to triadimefon treatment. *C. R. Biol.*, 331: 272–277.

Abdul-Jaleel, C., Gopi, R., Sankar, B., Gomathinayagam, M., Panneerselvam, R. (2008b). Differential responses in water use efficiency in two varieties of *Catharanthus roseus* under drought stress. *C. R. Biol.*, 331: 42–47.

Adak, N., Gubbuk, H., Tetik, N. (2018). Yield, quality and biochemical properties of various strawberry cultivars under water stress. *J. Sci. Food Agric.*, 98: 304–311.

Adiba, A., Hssaini, L., Haddioui, A., Hamdani, A., Charafi, J., Iraqui, S. E., Razouk, R. (2021a). Pomegranate plasticity to water stress: Attempt to understand interactions between cultivar, year and stress level. *Heliyon*, 7: e07403.

Adiba, A., Razouk, R., Charafi, J., Haddioui, A., Hamdani, A. (2021b). Assessment of water stress tolerance in eleven pomegranate cultivars based on agronomic traits. Agric. *Water Manag.*, 243: 106419.

Agathokleous, E., Kitao, M., Komatsu, M., Tamai, Y., Harayama, H., Koike, T. (2022). Single and combined effects of fertilization, ectomycorrhizal inoculation, and drought on container-grown Japanese larch seedlings. *J. Forest. Res.*, 1–18 pp.

Anjorin, F. B., Adejumo, S. A., Are, K. S., Ogunniyan, D. J. (2017). Seedling establishment, biomass yield and water use efficiencies of four maize varieties as influenced by water deficit stress, in *Cercetari agronomice* in Moldova. pp. 21–34.

Anonim (2023a). Biyotik ve abiyotik fakyörler nedir? https://www.mortilki.com/yasam/33932/biyotik-ve-abiyotik-faktorler-nedir.htm. Erişim tarihi: 20.04.2023.

Anonim (2023b). Severe drought badly affects forest trees in Daikundi. https://pajhwok.com/2022/07/18/severe-drought-badly-affects-forest-trees-in-daikundi/. Erişim tarihi: 22.04.2023.

Anonim (2023c). Fotosentez solunum ilişkisi. http://www.biyolojiportali.com/konu-anlatimi/8/27/fotosentez-solunum-iliskisi. Erişim tarihi: 22.04.2023.

Baghalian, K., Abdoshah, S., Khalighi-Sigaroodi, F., Paknejad, F. (2011). Physiological and phytochemical response to drought stress of *German chamomile*. *Plant Physiol. Biochem.*, 49: 201-207.

Beres, C., Costa, G. N., Cabezudo, I., Da Silva-James, N. K., Teles, A. S., Cruz, A. P., Mellinger-Silva, C., Tonon, R. V., Cabral, L. M. C., Freitas, S. P. (2017). Towards integral utilization of grape pomace from winemaking process: A review. *Waste Management*, 68: 581-594.

Bloch, D., Hoffimann, C. (2005). Seasonal development of genotypic differences in sugar beet (*Beta vulgaris* L.) and their interaction with water supply. *J. Agron. Crop Sci.*, 191: 263e272.

Brown, A. D. (1990). Microbial water stress physiology: Principles and perspectives. *New York: John Wiley and Sons, Chicester*.

Cardenas-Manriquez, G., Vega-Munoz, I., Villagomez-Aranda, A. L., Leon-Galvan, M. F., Cruz-Hernandez, A., Torres-Pacheco, I., Rangel-Cano, R. M., Rivera-Bustamante, R. F., Guevara-Gonzalez, R. G. (2016). Proteomic and metabolomic profiles in transgenic tobacco (*N. tabacum* xanthi nc) to CchGLP from *Capsicum chinense* BG-3821 resistant to biotic and abiotic stresses. *Environ. Exp. Bot.*, 130: 33–41.

Chaves, M. M., Maroco, J. P., Pereira, J. S. (2003). Understanding plant responses to drought – from genes to the whole plant. *Functional Plant Biology*, 30: 239–264.

Chen, W., Yao, X. Q., Cai, K. Z., Chen, J. (2011). Silicon alleviates drought stress of rice plants by improving plant water status, photosynthesis and mineral nutrient absorption. *Biol. Trace Elem. Res.*, 142: 67e76.

Conde, A., Silva, P., Agasse, A., Conde, C., Geros, H. (2011). Mannitol transport and mannitol dehydrogenase activities are coordinated in olea Europaea

under salt and osmotic stresses. *Plant Cell Physiol.*, https://doi.org/10.1093/pcp/pcr121.

Daryanto, S., Wang, L., Jacinthe, P. A. (2016). Global synthesis of drought effects on maize and wheat production. *PLoS ONE,* 11: e0156362.

Delfani, K., Asadi, M., Golein, B. et al. (2023). Foliar application of glycine betaine affects morpho-physiological, biochemical and fruit quality traits of Thomson Navel orange under deficit ırrigation. *J. Plant Growth Regul.,* 42: 2867-2883.

Dreher, K., Callis, J. (2007). Ubiquitin, hormones and biotic stress in plants. *Ann. Bot.,* 99: 787–822.

Dutra, W. F., Guerra, Y. L., Ramos, J. P. C., Fernandes, P. D., Silva, C. R. C., Bertioli, D. J., Leal-Bertioli, S. C. M., Santos, R. C. (2018). Introgression of wild alleles into the tetraploid peanut crop to improve water use efficiency, earliness and yield. *PLoS ONE,* 13: e0198776.

Erim Köse, Y. (2020). Kavut ununun besinsel bileşimi ve antioksidan kapasitesinin belirlenmesi. *Journal of the Institute of Science and Technology,* 10 (4): 2639-2648.

Espadas, J. L., Castaño, E., Marina, M. L. et al. (2019). Phenolic compounds increase their concentration in *Carica papaya* leaves under drought stress. *Acta Physiol Plant,* 41 (180).

Faraji, S., Hadadinejad, M., Abdoosi, V., Basaki, T., Karami, S. (2020). Effects of drought stress on the phenol, flavonoid and cyanidin 3-glocoside content of juice and fruit yield in native pomegranate genotypes (*Punica granatum* L.). *Iranian Journal of Medicinal and Aromatic Plants Research,* 35 (6): 889-901.

Farooq, M., Gogoi, N., Barthakur, S., Baroowa, B., Bharadwaj, N., Alghamdi, S. S., Siddique, K. H. M. (2017). Drought stress in grain legumes during reproduction and grain filling. *J. Agron. Crop. Sci.,* 203: 81–102.

Farooq, M., Wahid, A., Kobayashi, N., Fujita, D., Basra, S. M. A., et al. (2009). Plant drought stress: Effects, mechanisms and management. In: Lichtfouse,

E. (Ed.), In Sustainable Agriculture. *Springer Netherlands, Dordrecht*, 153–188 pp.

Fernandez, J. E. (2014). Understanding olive adaptation to abiotic stresses as a tool to increase crop performance. *Environ. Exp. Bot.*, 103: 158–179.

Foley, J. A., Ramankutty, N., Brauman, K. A., Cassidy, E. S., Gerber, J. S., Johnston, M., Mueller, N. D., O'Connell, C., Ray, D. K., West, P. C., Balzer, C., Bennett, E. M., Carpenter, S. R., Hill, J., Monfreda, C., Polasky, J., Rockström, J., Sheehan, J., Siebert, S., Tilman, D., Zaks, D. P. M. (2011). Solutions for a cultivated planet. *Nature*, 478: 337–342.

Galindo, A., Rodríguez, P., Collado-Gonzalez, J., Cruz, Z. N., Torrecillas, E., Ondono, S., Corell, M., Moriana, A., Torrecillas, A. (2014). Rainfall intensifies fruit peel cracking in water stressed pomegranate trees. *Agric. Meteorol.*, 194: 29–35.

Galli, V., Da Silva Messias, R., Perin, E. C., Borowski, J. M., Bamberg, A. L., Rombaldi, C. V. (2016). Mild salt stress improves strawberry fruit quality. *LWT – Food Science and Technology*, 73: 693–699.

Ghaderi, N., Normohammadi, S., Javadi, T. (2015). Morpho-physiological responses of strawberry (*Fragaria×ananassa*) to exogenous salicylic acid application under drought stress. *J. Agr. Sci. Tech.*, 17: 167-178.

Giné-Bordonaba, J., Echeverría, G., Ubach, D., Larrigaudière, C. (2016). Biochemical and phsysiological changes during fruit developmente and ripening of two sweet cherry varieties with different levels os cracking tolerance. *Plant Pshysiology and Biochemistry*, 111: 216–225.

Ghaderi, N., Siosemardeh, A. (2011). Esponse to drought stress of two strawberry cultivars (cv. Kurdistan and Selva). *Horticulture Environment and Biotechnology*, 52 (1): 6–12.

Gong, H. J., Chen, K. M., Zhao, Z. G., Chen, G. C., Zhou, W. J. (2008). Effects of silicon on defense of wheat against oxidative stress under drought at different developmental stages. *Biol. Plant*, 52: 592e596.

Gong, H. J., Chen, K. M. (2012). The regulatory role of silicon on water relations, photosynthetic gas exchange, and carboxylation activities of wheat leaves in field drought conditions. *Acta Physiol. Plant,* 34: 1589e1594.

Gonzalez-Villagra, J., Cohen, J. D., Reyes-Diaz, M. M. (2018). Abscisic acid (ABA) is involved in phenolic compounds biosynthesis, mainly anthocyanins, in leaves of *Aristotelia chilensis* plants (Mol) subjected to drought stress. *Physiol. Plant.,* 165: 855–866.

Gregory, P. J., George, T. S. (2011). Feeding nine billion: The challenge to sustainable crop production. *Journal of Experimental Botany,* 62: 5233–5239.

Hincha, D. K., Hagemann, M. (2004). Stabilization of model membranes during drying by compatible solutes involved in the stress tolerance of plants and microorganisms. *Biochem. J.,* 383: 277–283.

Hoekstra, F. A., Golovina, E. A., Buitink, J. (2001). Mechanisms of plant desiccation tolerance. *Trends Plant Sci.,* 6: 431–438.

Ikram, M., Ur Rehman, H., Soysal, S., Aamir, M., Islam, M.S., Kumari, A., El Sabahgh, A (2021) Impact of Climate Change on Cotton Growth and Yield. E. Karademir ve Ç. Karademir (Ed) Cotton Production Under Abiotic Stress (pp. 3-22). IKSAD, Türkiye.

Jamshidi Goharrizi, K., Baghizadeh, A., Kalantar, M., Fatehi, F. (2020a). Assessment of changes in some biochemical traits and proteomic profile of UCB-1 pistachio rootstock leaf under salinity stress. *J. Plant Growth Regul.,* 39: 608–630.

Jamshidi Goharrizi, K., Fatehi, F., Nazari, M., Salehi, F., Maleki, M. (2020b). Assessment of changes in the content of sulforaphane and expression levels of CYP79F1 and myrosinase genes and proteomic profile of *Lepidium draba* plant under water-deficit stress induced by polyethylene glycol. *Acta Physiol. Plant,* 42: 101.

Jamshidi Goharrizi, K., Moosavi, S. S., Amirmahani, F., Salehi, F., Nazari, M. (2020c). Assessment of changes in growth traits, oxidative stress parameters, and enzymatic and non-enzymatic antioxidant defense mechanisms in

Lepidium draba plant under osmotic stress induced by polyethylene glycol. *Protoplasma*, 257: 459–473.

Jamshidi Goharrizi, K., Meru, G., Ghotbzadeh Kermanic, S., Heidarinezhadd, A., Salehi, F. (2021). Short-term cold stress affects physiological and biochemical traits of pistachio rootstocks. *S. Afr. J. Bot.*, 141: 90–98.

Jiang, Y., Watkins, E., Liu, S., Yu, X., Luo, N. (2010). Antioxidative responses and candidate gene expression in prairie Junegrass under drought stress. *J. Am. Soc. Hortic. Sci.*, 135 (4): 303–309.

Kalefetoğlu, T., Ekmekçi, Y. (2005). The effects of drought on plants and tolerance mechanisms. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi,* 18 (4): 723–740.

Kasim, W. A., Osman, M. E., Omar, M. N., El-Daim, I. A. A., Bejai, S., Meijer, J. (2013). Control of drought stress in wheat using plant-growth-promoting bacteria. *J. Plant Growth Regul.*, 32: 122–130.

Keutgen, A. J., Pawelzik, E. (2008). Quality and nutritional value of strawberry fruit under long term salt stress. *Food Chemistry*, 107 (4): 1413–1420.

Kleinwächter, M., Selmar, D. (2015) New insights explain that drought stress enhances the quality of spice and medicinal plants: Potential applications. *Agron Sustain Dev.*, 35: 121–131.

Krol, A., Amarowicz, R., Weidner, S. (2014). Changes in the composition of phenolic compounds and antioxidant properties of grapevine roots and leaves (*Vitis vinifera* L.) under continuous of long-term drought stress. *Acta Physiol Plant*, 36: 1491–1499.

Liao, X., Guo, X., Wang, Q., Wang, Y., Zhao, D., Yao, L., Wang, S., Liu, G., Li, T. (2017). Overexpression of MsDREB6.2 results in cytokinin-deficient developmental phenotypes and enhances drought tolerance in transgenic apple plants. *The Plant Journal*, 89(3):510-526.

Lissner, J., Schierup, H. H., Comin, F. A., Astorga, V. (1999). Effect of climate on the salt tolerance of two *Phragmites australis* populations. I. Growth, inorganic solutes, nitrogen relations and osmoregulation. *Aquat. Bot.*, 64: 317e337.

Luzardo, M. C., Amalfa, F., Nunez, A. M., Diaz, S., Biondi De Lopez, A. C., Disalvo, E. A. (2000). Effect of trehalose and sucrose on the hydration and dipole potential of lipid bilayers. *Biophys. J.*, 78: 2452–2458.

Luz, L. M., Alves, E. C., Vilhena, N. Q., Oliveira, T. B., Silva, Z. G., Freitas, J. M., Costa, L. C. (2023). Distinct physiological mechanisms underpin growth and rehydration of *Hymenaea courbaril* and *Hymenaea stigonocarpa* upon short-term exposure to drought stress. *J. Forestry Res.*, 34 (1): 113–123.

Mahouachi, J., Argamasilla, R., Gómez-Cadenas, A. (2012). Influence of exogenous glycine betaine and abscisic acid on papaya in responses to water-deficit stress. *J. Plant Growth Regul.*, 31: 1-10.

Martinez-Nicolas, J. J., Galindo, A., Grinan, I., Rodríguez, P., Cruze, Z. N., Martínez- Font, R., Carbonell-Barrachina, A. A., Nouri, H., Melgarejo, P. (2019). Irrigation water saving during pomegranate flowering and fruit set period do not affect Wonderful and Mollar de Elche cultivars yield and fruit composition. *Agric. Water Manag.*, 226: 105781.

Martínez, S., Fuentes, C., Carballo, J. (2022). Antioxidant activity, total phenolic content and total flavonoid content in sweet chestnut (*Castanea sativa* Mill.) cultivars grown in Northwest Spain under different environmental conditions. *Foods*, 11 (3519).

Ma, Y., Dias, M. C., Freitas, H. (2020). Drought and salinity stress responses and microbe-induced tolerance in plants. *Front. Plant Sci.*, 11: 591911.

Mechri, B., Tekaya, M., Hammami, M., Chehab, H. (2020). Effects of drought stress on phenolic accumulation in greenhouse-grown olive trees (*Olea europaea*). *Biochemical Systematics and Ecology*, 92: 104112.

Mevarech, M., Eisenberg, H., Neumann, E. (1977). Malate dehydrogenase isolated from extremely halophilic bacteria of the Dead Sea. 1. Purification and molecular characterization. *Biochemistry*, 16: 3781-3785.

Moriana, A., Villalobos, F. J., Fereres, E. (2002). Stomatal and photosynthetic responses of olive (*Olea europaea* L.) leaves to water deficits. *Plant Cell Environ.* https://doi.org/ 10.1046/j.0016-8025.2001.00822.x.

Mozafari, A., Havas, F., Ghaderi, N. (2018). Application of iron nanoparticles and salicylic acid in in vitro culture of strawberries (*Fragaria* × *ananassa* Duch.) to cope with drought stress. *Plant Cell Tiss Organ Cult.,* 132: 511-523.

Nakabayashi, R., Yonekura-Sakakibara, K., Urano, K., Suzuki, M., Yamada, Y., Nishizawa, T., Matsuda, F., Kojima, M., Sakakibara, H., Shinozaki, K., Michael, A. J., Tohge, T., Yamazaki, M., Saito, K. (2014). Enhancement of oxidative and drought tolerance in *Arabidopsis* by overaccumulation of antioxidant flavonoids. *Plant J.,* 77: 367–379.

Nascimento, N. C., Fett-Neto, F. (2010) Plant secondary metabolism and challenges in modifying its operation: An overview. *Methods Mol Biol.,* 643: 1–13.

Naser, L., Kourosh, V., Bahman, K., Reza, A. (2010). Soluble sugars and proline accumulation play a role as effective indices for drought tolerance screening in Persian walnut (*Juglans regia* L.) during germination. *Fruits,* 65(2): 97-112.

Naumann, G., Alfieri, L., Wyser, K., Mentaschi, L., Betts, R. A., Carrao, H., Feyen, L. (2018). Global changes in drought conditions under different levels of warming. Geophys. *Res. Lett.,* 45 (7): 3285–3296.

Nouraei, S., Rahimmalek, M., Saeidi, G. (2018). Variation in polyphenolic composition, antioxidants and physiological characteristics of globe artichoke (*Cynara cardunculus* var. *scolymus* Hayek L.) as affected by drought stress. *Sci. Hortic.,* 233: 378–385.

Orsini, F., Alnayef, M., Bona, S., Maggio, A., Gianquinto, G. (2012). Low stomatal density and reduced transpiration facilitate strawberry adaptation to salinity. *Environmental and Experimental Botany,* 81: 1–10.

Osakabe, Y., Yamaguchi-Shinozaki, K., Shinozaki, K., Phan Tran, L. S. (2013) Sensing the environment: Key roles of membrane-localized kinases in plant perception and response to abiotic stress. *J. Exp Bot.,* 64: 445–458.

Öztürk, N. Z. (2015). Literature review and new approaches on plant drought stress response. *Turkish J. Agric. - Food Sci. Technol.,* 3 (5): 307–315.

Pei, Z. F., Ming, D. F., Liu, D., Wan, G. L., Geng, X. X., Gong, H. J., Zhou, W. J. (2010). Silicon improves the tolerance to water-deficit stress induced by

polyethylene glycol in wheat (*Triticum aestivum* L.) seedlings. *J. Plant Growth Regul.,* 29: 106e115.

Pereira, J. W. D. L., Albuquerque, M. B., Filho, P. A. M., Nogueira, R. J. M. C., De Lima, L. M., Santos, R. C. (2016). Assessment of drought tolerance of peanut cultivars based on physiological and yield traits in a semiarid environment. *Agric. Water Manag.,* 166: 70–76.

Perin, E. C., Messias, R. Da. S., Borowski, J. M., Crizel, R. L., Schott, I. B., Carvalho, I. R., Rombaldi, C. V., Galli, V. (2019). ABA-dependent salt and drought stress improve strawberry fruit quality. *Food Chemistry,* 271: 516–526.

Radwan, A., Kleinwächter, M., Selmar, D. (2017). Impact of drought stress on specialised metabolism: Biosynthesis and the expression of monoterpene synthases in sage (*Salvia officinalis*). *Phytochemistry,* 141: 20–26.

Rejeb, I., Pastor, V., Mauch-Mani, B. (2014). Plant responses to simultaneous biotic and abiotic stress: Molecular mechanisms. *Plants,* 3(4): 458–475.

Rejskova, A., Patkova, L., Stodulkova, E., Lipavska, H. (2007). The effect of abiotic stresses on carbohydrate status of olive shoots (*Olea europaea* L.) under in vitro conditions. *J. Plant Physiol.,* https://doi.org/10.1016/j.jplph.2005.09.011.

Ripoll, J., Urban, L., Staudt, M., Lopez-Lauri, F., Bidel, L. P. R., Bertin, N. (2014). Water shortage and quality of fleshy fruits-making the most of the unavoidable. *Journal of Experimental Botany,* 65 (15): 4097–4117.

Santos, M. R., Neves, B. R., Silva, B. L., Donato, S. L. R. (2015). Yield, water use efficiency and physiological characteristic of “Tommy Atkins” mangounder partial rootzone drying irrigation system. *J. Water Res. Protec.,* 7: 1029e1037.

Selmar, D., Kleinwächter, M. (2013) Stress enhances the synthesis of secondary plant products: the impact of stress-related over-reduction on the accumulation of natural products. *Plant Cell Physiol.,* 54: 817–826.

Serpe, M. D., Matthews, M. A. (2000). Turgor and cell wall yielding in dicot leaf growth in response to changes in relative humidity. *Funct. Plant Biol.,* 27: 1131–1140.

Shahidi, F., Naczk, M. (1995). Food phenolics, sources, chemistry, effects, applications. *Technomic Publishing Company Book, Lanchester, USA,* 199-225pp.

Sircelj, H., Tausz, M., Grill, D., Batic, F. (2007). Detecting different levels of drought stress in apple trees (*Malus domestica* Borkh.) with selected biochemical and physiological parameters. *Sci. Hortic.,* 113 (4): 362–369.

Soysal, S., & Erman, M. (2022) Net Photosynthesis of Wheat under Abiotic Stress: A Review. M. Karaman (Ed) Theoretical and Practical New Approaches in Cereal Science and Technology (pp. 131-146). IKSAD, Türkiye.

Tatari, M., Jadidi, E., Shahmansouri, E. (2020). Study of some physiological responses of different pomegranate (*Punica granatum* L.) cultivars under drought stress to screen for drought tolerance. *Int. J. Fruit. Sci.,* 20 (2): 1798–1813.

Terry, L. A., Chope, G. A., Bordonaba, J. G. (2007). Effect of water deficit irrigation and inoculation with Botrytis cinerea on strawberry (*Fragaria* x *ananassa*) fruit quality. *Journal of Agricultural and Food Chemistry,* 55 (26): 10812–10819.

Travaglia, C., Cohen, A. C., Reinoso, H., Castillo, C., Bottini, R. (2007). Exogenous abscisic acid increases carbohydrate accumulation and redistribution to the grains in wheat grown under field conditions of soil water restriction. *J. Plant Growth Regul.,* 26: 285–289.

Ünal, N., Okatan, V. (2023). Effects of drought stress treatment on phytochemical contents of strawberry varieties. *Scientia Horticulturae,* 316 (112013).

Varshney, R. K., Ribaut, J. M., Buckler, E. S., Tuberosa, R., Rafalski, J. A., Langridge, P. (2012). Can genomics boost productivity of orphan crops? *Nat. Biotechnol.,* 30: 1172–1176.

Ventosa, A., Marquez, M. C., Garabito, M. J., Arahal, D. R. (1998). Moderately halophilic Gram-positive bacterial diversity in hypersaline environments. *Extremophiles*, 2: 297-304.

Vinocur, B., Altman, A. (2005) Recent advances in engineering plant tolerance to abiotic stress: achievements and limitations. *Curr Opin Biotechnol.*, 16: 123–132.

Wang, S. Y., Steffens, G. L. (1985). Effect of paclobutrazol on water stress-induced ethylene biosynthesis and polyamine accumulation in apple seedling leaves. *Phytochemistry*, 24(10): 2185-2190.

Wang, W., Vinocur, B., Altman, A. (2003). Plant responses to drought, salinity and extreme temperatures: towards genetic engineering for stress tolerance. *Planta.*, 218: 1–14.

Xiong, L., Wang, R. G., Mao, G., Koczan, J. M. (2006) Identification of rought tolerance determinants by genetic analysis of root response to drought stress and abscisic acid. *Plant Physiol.*, 142: 1065–1074.

Youssef, E. A., Mahmoud, T. A., Abo-Eid, M. A. M. (2023). Effect of foliar application of different concentrations of salicylic acid on Washington navel orange trees under water stress. *Bull. Natl. Res. Cent.*, 47: 98.

Zahedi, S. M., Hosseini, M. S., Meybodi, N. D. H., Abadía, J., Germ, M., Gholami, R., Abdelrahman, M. (2022). Evaluation of drought tolerance in three commercial pomegranate cultivars using photosynthetic pigments, yield parameters and biochemical traits as biomarkers. *Agricultural Water Management*, 26: 107357.

Zahedi, S. M., Moharrami, F., Sarikhani, S. et al. (2020). Selenium and silica nanostructure-based recovery of strawberry plants subjected to drought stress. *Sci. Rep.* 10: 17672.

Zhang, J., Zhang, S., Cheng, M., Jiang, H., Zhang, X., Peng, C., Lu, X., Zhang, M., Jin, J. (2018). Effect of drought on agronomic traits of rice and wheat: A meta-analysis. *Int. J. Environ Res.*, 15 (5): 839.

Zhang, L., Gao, M., Zhang, L., Li, B., Han, M., Alva, A. K., Ashraf, M. (2013). Role of exogenous glycinebetaine and humic acid in mitigating drought

stress-induced adverse effects in *Malus robusta* seedlings. *Turkish Journal of Botany*, 37(5): 13.

BÖLÜM 13

BYDV VİRÜSÜNE KARŞI FLAVONOİDLERİN Anti-BYDV CP POTANSİYELLERİNİN *in silico* DOCKING İLE DEĞERLENDİRİLMESİ

Arş. Gör. Dr. Serap DEMİREL[1]

Yük. Ziraat Müh. Rufayi KARATAŞ[2]

Dr. Öğr. Üyesi Fatih DEMİREL[3*]

DOI: https://dx.doi.org/10.5281/zenodo.10031702

[1] Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Fen Fakültesi, Moleküler Biyoloji ve Genetik Bölümü, Van, Türkiye. serapdemirel@yyu.edu.tr
[2] Atatürk Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Tarla Bitkileri Bölümü, Erzurum, Türkiye. rufayik.1@gmail.com
[3*] Iğdır Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Tarımsal Biyoteknoloji Bölümü, Iğdır, Türkiye. drfdemirel@gmail.com

GİRİŞ

Tarımsal üretim çeşitli abiyotik, biyotik stresler ve bunların kombinasyonları tarafından sürekli tehdit altındadır (Eren, 2023). Biyotik stresler arasında toplam ürün kayıplarının yaklaşık %40'ının viral enfeksiyondan kaynaklandığı tahmin edilmektedir. Tarımsal bitkileri enfekte eden virüslerin çoğunluğu (en az 450 farklı tür) RNA virüsleridir (Pandey ve ark., 2017). Luteoviridae familyasında ait arpa sarı cücelik virüsü (barley yellow dwarf virus;BYDV) buğday, arpa, mısır ve yulaf gibi *Poaceae* familyasının üyelerini enfekte etmekte ve hastalığa neden olarak dünya çapında tahıllarda ekonomik kayıplara neden olmaktadır. Arpa sarı cüclik hastalığna Luteovirus (barley yellow dwarf virus-BYDV spp. PAV, PAS, MAV ve Kerll) ya da Polerovirus (cereal yellow dwarf virus: CYDV-RPV; CYDV-RPS; maize yellow dwarf virus- RMV) cinsine ait bir grup tek iplikli RNA virüsü neden olmaktadır (Jarošová ve ark., 2016). BYDV, semptomların ortaya çıkışı, vektör iletim verimliliği, konakçı tercihi ve serolojik ve moleküler özellikler açısından büyük ölçüde farklılık gösterebilir. Virüs floem ile sınırlıdır ve 25'ten fazla yaprak biti türü tarafından kalıcı bir şekilde aktarılmaktadır (Deligöz ve ark., 2011). BYDV'lerin başlıca vektörlerinin *Rhopalosiphum padi* (kuş-kiraz-yulaf yaprak biti), *Sitobion avenae* (ingiliz tahıl yaprak biti), *Rhopalosiphum maidis* (mısır yaprağı yaprak biti) ve *Schizaphis graminum* (yeşil böcek) olduğu belirlenmiştir (Chapin ve ark., 2001). Ayrıca yapılan çalışmalar BYDV hastalık etmenlerinin taşınımında belirli yaprak biti türlerinin belirli BYDV türlerini taşıdığını ve vektöre özelleşmenin söz konusu olduğunu ortaya koymuştur

(Krueger ve ark., 2013). Viral enfeksiyona karşı bitki tepkileri, uyumlu etkileşimler, konakçı enfeksiyonuna yol açan etkileşimler (bulaşıcı), uyumsuz etkileşimler ve konakçı enfeksiyonuyla sonuçlanmayan etkileşimler (konakçı olmayan, bağışıklık) dahil olmak üzere farklı türde konakçı-virüs etkileşimlerine neden olabilir (Jarošová ve ark., 2016). Konakçı-virüs etkileşimlerinde yer alan proteinlerin analizi, bu proteinlerin konakçı enfeksiyonundaki benzersiz ve bilinmeyen rollerinin açığa kavuşturulmasında önemli rol oynayabilir (Kuznetsov ve ark., 2011). Virüs ile konak bileşeni arasındaki spesifik bir etkileşim, konakçıda fizyolojik semptomlara neden olmaktadır. Bu viral bileşenlere semptom belirleyicileri veya patojenite belirleyicileri adı verilmektedir (Culver ve ark., 2007). Viral protein semptom belirleyicileri arasında kılıf proteini (Coat protein; CP), hareket proteini (movement protein; MP), genom ilişkili viral protein (genome-linked viral protein; VPg), RNA'ya bağımlı RNA polimeraz (RNA-dependent RNA polymerase; RdRp), replikazlar, metiltransferaz ve helikaz gibi farklı proteinler yer almaktadır (Osterbaan ve ark., 2019). Araştırmacılar CP ile konakçı proteinler arasındaki etkileşimi araştırmış ve bu etkileşimin enfeksiyonun ilerlemesi açısından önemli olduğunu bildirmişlerdir (Culver ve ark., 2007; Li ve ark., 2005). Örneğin, domates mozaik virüsünün (ToMV) CP proteinin ve konakçı faktör olan CP ile etkileşime giren protein-L (IP-L) arasındaki interaksiyon virüsün tütün bitkisinde uzun mesafeli hareketini teşvik etmektedir (Li ve ark., 2005). Başka bir çalışmada Patato virus x'e CP proteinin tütün bitkisinde (*Nicotiana benthamiana*) bulunan ER ilişkili NBPCIP1 proteinine bağlanmasının

konak hücrelerde viral replikasyonu teşfik ettiği ortaya konulmuştur (Qiao ve ark., 2009). Dolayısıyla viral CP'lerin transkripsiyon ve translayon aşamasında üretiminin engellenmesi, translayon sonrası oluşturulan modifikasyonlar ve CP ile interaksiyona giren moleküller viral enfeksiyonun seyrini değiştirmede etkili olabilir. BYDV enfekteli bitkilerde başlıca bodurlaşma ile birlikte yapraklarda kızarma ve sararma gibi renk değişimi, kök gelişiminde gerileme ve sürgün sayısında azalma şeklinde semptomlar görülmektedir. BYDV tarafından etkilenen alanlarda ortalama %30 olmak üzere %5 ila %80 arasında değişen verim kayıpları görülmektedir (Perry ve ark., 2000). Son yıllarda ülkemizde Luteovirus familyasına ait viral etmenin neden olduğu arpa sarı cücelik virüs hastalığı (BYDV) tahıl üretim alanlarında görülen önemli bir problem haline gelmiştir. Son yıllarda araştırmacılar viral enfeksiyonları kontrol altına alabilmek adına etkili bir yöntem bulmak için yoğun çaba harcamaktadırlar. Dolayısıyla bu konuda gerçekleştirilen hem biyolojik hem de kimyasal yaklaşımları ele alan çalışmaların her biri önem arz etmektedir. Flavonoidler, bitki dokularının tipik renkli pigmentleri olarak tanınan bitki sekonder metabolitleridir (Winkel-Shirley, 2001). Flavonoidler farklı fenolik kalıntılara sahip kimyasallardır ve bitkilerin çeşitli kısımlarında bulunurlar (Sarwar ve ark., 2022). Flavonoidlerin başlangıç malzemeleri fenilalanin ve malonil-CoA'dır (Kumar ve Pandey, 2013). Flavonoidlerin biyosentezinde yer alan enzimler oksoglutarata bağımlı dioksijenazlar, glikosil transferazlar ve diğer flavonoidlerdir (Tanaka ve ark., 2008).

Flavonoidler iyi bilinen terapötik, organik bileşiklerdir ve antivirüs potansiyelleri yakın zamanda tespit edilmiş olmasına rağmen anti-BYDV olarak işlevleri henüz araştırılmamıştır. Bu çalışmada bazı flavonoidler ile viral kapsidin CP monomerleri arasındaki interaksiyon *in silico* docking yaklaşımı ile araştırılarak flavonoidlerin anti-BYDV potansiyelleri ortaya konmaya çalışılmıştır.

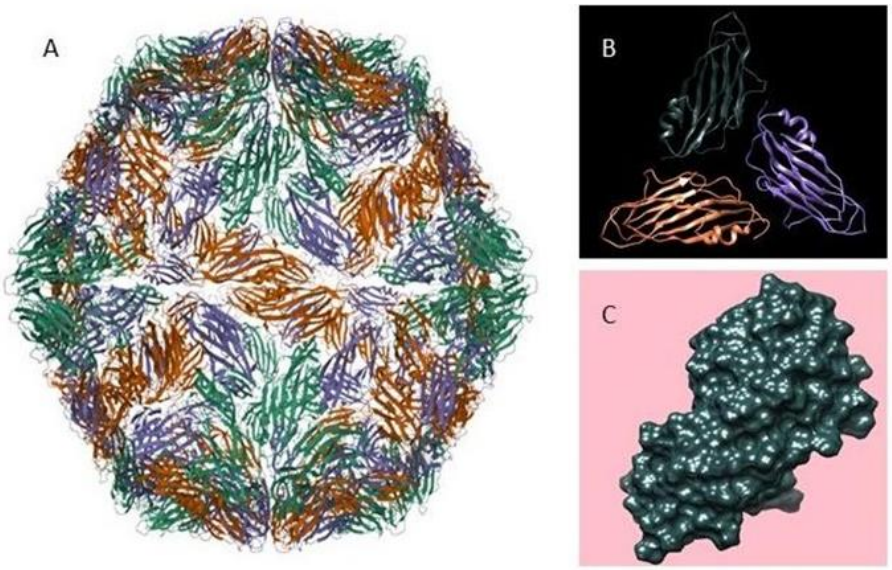
1. MATERYAL VE METOT

"*In silico* analiz" terimi, ampirik deneylerin aksine, bilgisayar simülasyonları, modelleme ve analiz kullanılarak bilimsel araştırmaların yürütülmesi uygulamasıyla ilgilidir (Korkmaz ve ark., 2022). Bu metodoloji, masraflardan tasarruf etme, zaman kullanımını optimize etme ve bazen deneme yapmanın zorlu veya tehlikeli olduğu durumlarda geçerli bir alternatif sağlama potansiyeline sahiptir (Cairns ve ark.,2016; Usta ve ark., 2023, Demirel, 2021). Çalışmada kullanılan BYDV CP proteini için protein kordinatları 6SCL erişim numarası ile Protein Data Bank'dan (http://www.rcsb.org/, 01 Temmuz 2023) pdb. formatında indirildikten sonra UCSF Chimera programı kullanılarak CP monomerleri elde edilmiştir. Elde edilen BYDV CP monomerin 3D yapısı UCSF Chimera ile görselleştirilmiştir (Şekil 1). Tablo 1'de yer alan ligandlar PubChem web sitesinden (https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/, 01 Temmuz 2023) SDF formatında indirildikten sonra, ligand yapıları ve atomlar üzerindeki formal yükleri 2 boyutlu gösterimle doğrulandıktan sonra enerji minimizasyonuna tabi tutulmuştur. BYDV CP protein reseptörü su moleküllerinin ve hidrojen bağlarının ortadan kaldırılması, polar

olmayan atomların birleştirilmesi Kollman ve Gasteiger yüklerinin atanması yoluyla üretilmiştir. Docking analizi için hazır hale getirilen reseptör ve liganlar *in silico* analiz için UCSF Chimera programı kullanılarak AutoDock Vina ile docking analizine tabi tutulmuştur.

2. BULGULAR VE TARTIŞMA

Fitovirüsler, bitki hastalıklarının en yaygın etiyolojik ajanlarından biridir (Pennazioet ve ark., 1996) ve dünya çapında tarıma büyük bir tehdit oluşturmaktadır (Rubio ve ark., 2020). Literatür verileri, bazı virüslerin 85'ten fazla aileyi kapsayan 1000'den fazla farklı bitki türünü enfekte edebildiğini ve subtropikal ve tropikal bölgelerde viral bir enfeksiyonun, mahsulün %98'ine kadar kaybına yol açabileceğini bildirmektedir (Nazarov ve ark., 2020; Jones, 2021; Chauhan ve ark., 2019). Günümüzde viral hastalıklara karşı mücadelede etkin bir kimyasalın bulunmaması sebebiyle BYDV hastalıklarını taşıyan vektörlere karşı kimyasal mücadele ön plana çıkmaktadır. Bitki virüslerini tamamen engelleyebilecek bir antiviral ajan henüz bulunamamış ve yüksek verimli antiviral ajanların geliştirilmesinde hala büyük zorluklarla karşı karşıya kalınmaktadır (Gan ve ark., 2021). BYDV CP proteini Protein Data Bank'dan elde edildikten sonra monomer yapısına ait 3D yapısı, ribbon ve hidrofobik yüzeye dayalı olarak UCSF Chimera programı ile görselleştirilmiştir (Şekil 1).



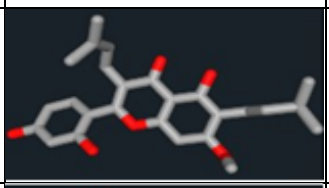
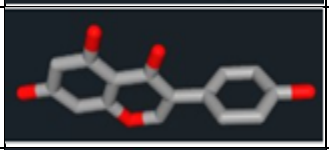
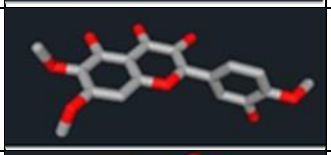
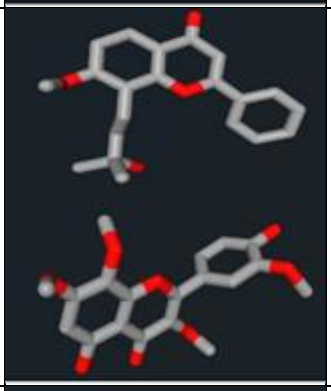
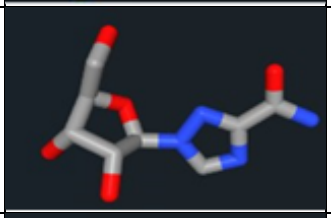
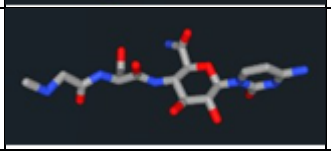
Şekil 1. BYDV kılıf proteininin yapısı. A: CYDV CP'nin kriyo-EM yapısı (Breyne et al., 2019); B: BYDV CP monomerinin ribbon görüntüsü; C: BYDV CP monomerinin hidofobiklik yapısı.

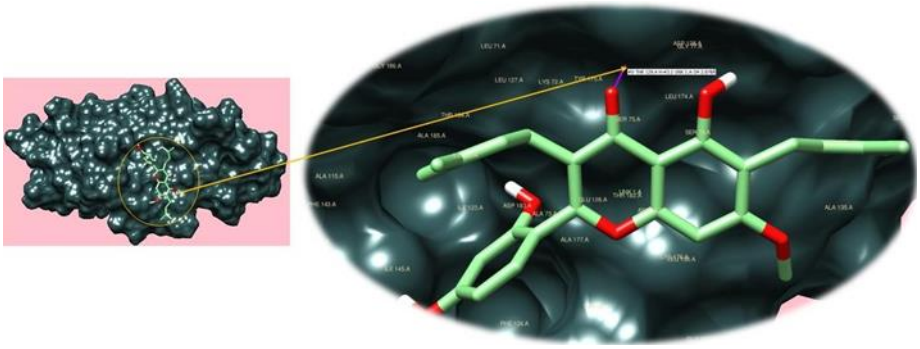
Doğal ürünler bilinmeyen birçok kimyasal yapı ve farmakoforları sağlayarak ilaç tasarımı için uzun süredir ilham kaynağı olarak kabul edilmektedir (Eschenbrenner-Lux ve ark., 2014). Ayrıca doğal ürünler biyolojik hedeflerle kolaylıkla etkileşime girerek spesifik biyolojik aktiviteler sergileyebilir (Lowe, 2014; Bauer ve Bränstrup, 2014). Doğal bileşiklere dayalı bitki virüs karşıtı ajanların keşfi, bitki virüsü hastalıklarının önlenmesi ve kontrolünde önemli bir araştırma yönüdür ve son zamalarda büyük ilgi görmektedir (Katayama ve ark., 2013; Wang ve ark., 2015).

Çalışma kapsamında BYDV CP'ye karşı anti viral potansiyelleri araştırılan flavonoidler arasında Eupatin en yüksek docking enerjisine (- 6.2) sahipken, Genistein en düşük docking enerjisi (-5.1)

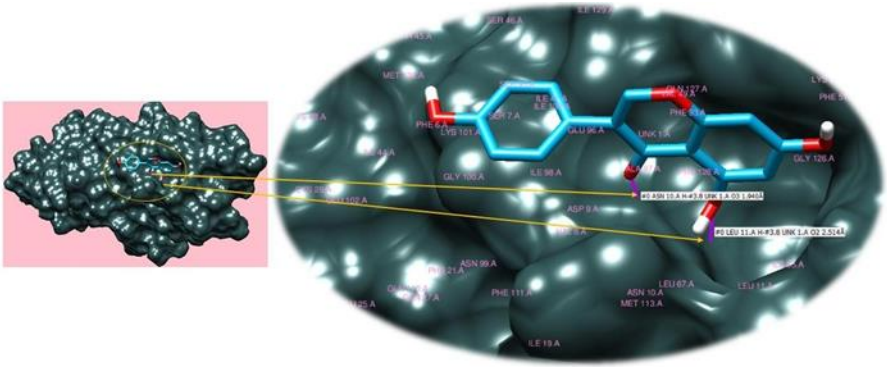
sergilemiştir (Tablo 1). Çalışmada flavonoidlerin anti-BYDV potansiyllerini karşılaştırmak adına antiviral özelliği daha önceki çalışmalar ile ortaya konmuş iki ticari kimyasal (Ribavirin ve Ningnanmycin) BYDV CP ile docking analizine tabi tutulmuştur. Docking sonucunda çalışmada kullanılan molekülerin BYDV CP proteinine bağlandıkları kısımlar ve amino asitler Şekil 2, Şekil 3, Şekil 4, Şekil 5, Şekil 6, Şekil 7 ve Şekil 8'de gösterilmektedir. Docking sonucuna göre sırasıyla Eupatin, Lanceolatin A ve Artocarpin her iki ticari kimyasaldan daha fazla docking enerjisine sahipken, Genistein ticari kimyasallardan düşük docking enerjisi sergilemiştir. Ternatin ise Ningnanmycin ile aynı docking skoruna sahip olmakla birlikte bu değer ribavirinin docking skorundan düşüktür. Birçok araştırmacı farklı virüslere karşı bitkisel kökenli bileşiklerin yanı sıra Ribavirin ve Nignamycinin antiviral özelliğini araştırmış ve doğal bileşenlerin sentetik kimysallara göre yüksek antiviral potansiyellerini ortaya koymuştur (Zhao ve ark., 2015; Gan ve ark., 2017; Lu ve ark., 2019; Usta ve ark., 2023). Flavonoidlerden Eupatin ve Lanceolatin A, BYDV CP'ye karşı ticari iki kimyasaldan yüksek bağlanma afinitesi sergilemiştir. Bu bulgular daha önceki araşırmacıların rapor etttiği sonuçları destekler niteliktedir (Jeyaraj ve ark., 2021).

Tablo 1. Çalışmada kullanılan flavonoid ve kimyasalların BYDV CP'ye bağlanma afinitesi

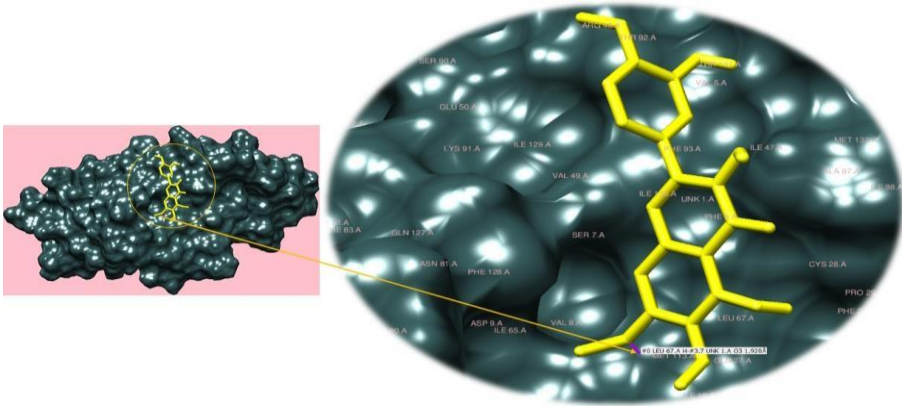
Flavonoid adı	**PubChem No**	**2D yapısı**	**AutoDockVina değeri**
Artocarpin	5458461		-5.9
Genistein	5280961		-5.1
Eupatin	5317287		-6.2
LanceolatinA	6442389		-6.0
Ternatin	5459184		-5,5
Ribavirin	37542		-5.7



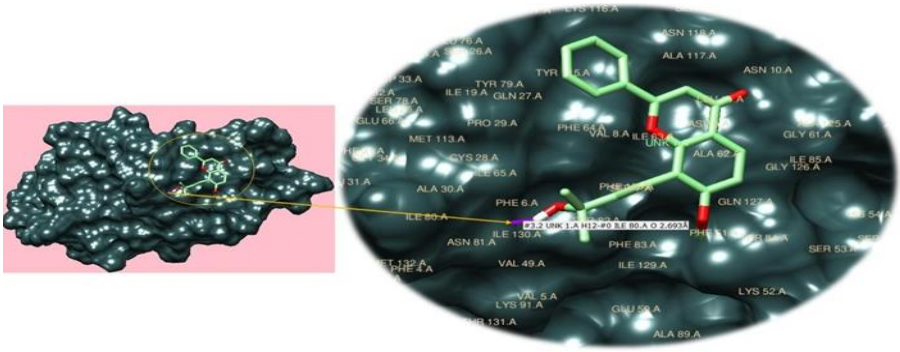
Şekil 2. Atrocarpin'in docking sonucunda pozisyonunu ve yerleşimini gösteren BYDV CP'nin yüzey gösterimi



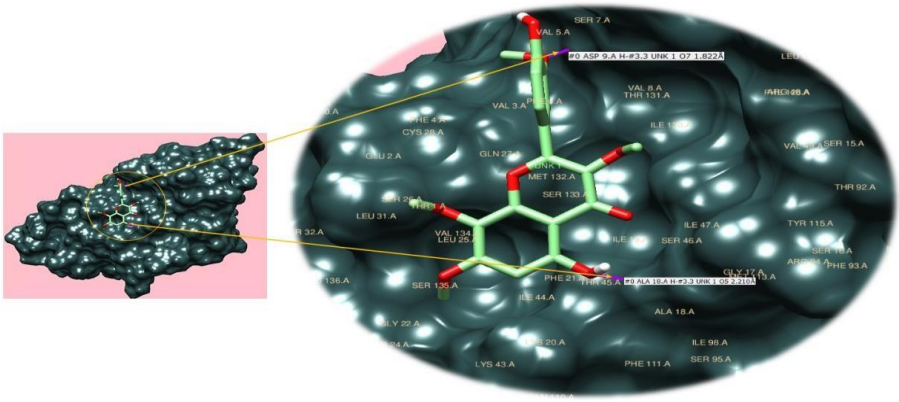
Şekil 3. Genistein'in docking sonucunda pozisyonunu ve yerleşimini gösteren BYDV CP'nin yüzey gösterimi



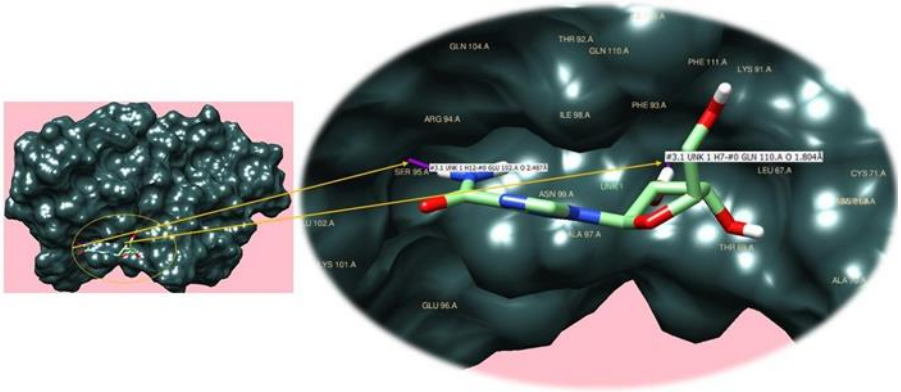
Şekil 4. Eupatin'in docking sonucunda pozisyonunu ve yerleşimini gösteren BYDV CP'nin yüzey gösterimi



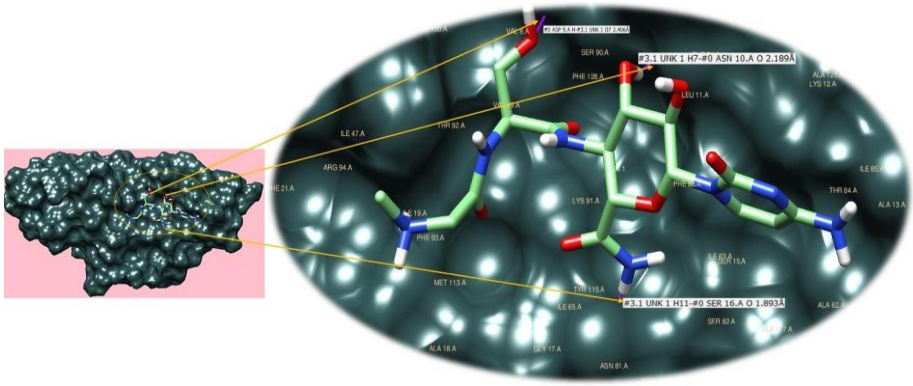
Şekil 5. Lanceolatin A'nın docking sonucunda pozisyonunu ve yerleşimini gösteren BYDV CP'nin yüzey gösterimi



Şekil 6. Ternatin'in docking sonucunda pozisyonunu ve yerleşimini gösteren BYDV CP'nin yüzey gösterimi



Şekil 7. Ribavirin'in docking sonucunda pozisyonunu ve yerleşimini gösteren BYDV CP'nin yüzey gösterimi



Şekil 8. Ningnanmycin'in docking sonucunda pozisyonunu ve yerleşimini gösteren BYDV CP'nin yüzey gösterimi

SONUÇ

Son yıllarda bitki virüs karşıtı ajanların araştırılması ve geliştirilmesinde büyük ilerlemeler kaydedilmiştir (Carli ve ark., 2010; Li ve Song, 2017; Park ve ark., 2021; Usta ve ark., 2023). Özel doğal moleküler yapılar, antiviral ajanların türetilmesi için köprü görevi sağlamaktadır (Jassbi ve ark., 2017; Chen ve ark., 2020), bu da araştırmacılara yeni antiviral ajanların keşfi için yenilikçi çözümler sunmaktadır. Çalışmamız BYDV CP proteininin bitki flavonoidleri ile yapısı ve etkileşimleri hakkında fikir vermektedir. Bu çalışma ile bitki flavonoidlerinin BYDVV CP proteininin potansiyel inhibitörleri olması ilk kez rapor edilmektedir. Bu çalışma ileride BYDV'ye yönelik flavonoid türevli antiviral ilaçların geliştirilmesine ışık tutabilecektir.

KAYNAKÇA

Bauer, A., & Brönstrup, M. (2014). Industrial natural product chemistry for drug discovery and development. *Natural product reports*, *31*(1), 35-60.

Byrne, M. J., Steele, J. F., Hesketh, E. L., Walden, M., Thompson, R. F., Lomonossoff, G. P., & Ranson, N. A. (2019). Combining transient expression and cryo-EM to obtain high-resolution structures of luteovirid particles. *Structure*, *27*(12), 1761-1770.

Cairns, T. C., Studholme, D. J., Talbot, N. J., & Haynes, K. (2016). New and improved techniques for the study of pathogenic fungi. *Trends in microbiology*, *24*(1), 35-50.Chapin, J. W., Thomas, J. S., Gray, S. M., Smith, D. M. ve Halbert, S.

Chapin, J. W., Thomas, J. S., Gray, S. M., Smith, D. M., & Halbert, S. E. (2001). Seasonal abundance of aphids (Homoptera: Aphididae) in wheat and their role as barley yellow dwarf virus vectors in the South Carolina coastal plain. *Journal of economic entomology*, *94*(2), 410-421.

Chauhan, P., Singla, K., Rajbhar, M., Singh, A., Das, N., & Kumar, K. (2019). A systematic review of conventional and advanced approaches for the control of plant viruses. *Journal of Applied Biology and Biotechnology*, *7*(4), 89-98.

Culver, J. N., & Padmanabhan, M. S. (2007). Virus-induced disease: altering host physiology one interaction at a time. *Annu. Rev. Phytopathol.*, *45*, 221-243.

Deligöz, İ., Caner, Y. K., & Akyol, H. (2011). Preliminary investigations of Barley yellow dwarf virus-PAV and Barley yellow dwarf virus-MAV in wheat fields of Samsun and Amasya Provinces in Turkey. *Plant Protection Bulletin*, *51*(2), 187-193.

Demirel, F. (2021). Soyada Protein Disülfit İzomeraz'ların İn Silico Analizi. *Journal of Agriculture*, *4*(1), 48-56.

Eren, B. (2023). Yonca (*Medicago Sativa* L.)'Da strese dayali çalışmalar: Yonca bitkisinin tepkisini anlamak. Ed: Erdal Çaçan, Hava Şeyma İnci. Bitkisel Üretim. *İksad Yayınevi,* Ankara, Türkiye, pp. 151-176.

Eschenbrenner-Lux, V., Küchler, P., Ziegler, S., Kumar, K., & Waldmann, H. (2014). An Enantioselective inverse-electron-demand imino Diels–Alder reaction. *Angewandte Chemie International Edition*, *53*(8), 2134-2137.

Gan, X., Hu, D., Wang, Y., Yu, L., & Song, B. (2017). Novel trans-ferulic acid derivatives containing a chalcone moiety as potential activator for plant resistance induction. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, *65*(22), 4367-4377.

Gan, X., Wang, Z., & Hu, D. (2021). Synthesis of Novel Antiviral Ferulic Acid–Eugenol and Isoeugenol Hybrids Using Various Link Reactions. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, *69*(46), 13724-13733.Gan, X. H., Hu, D. Y., Wang, Y. J., Yu, L. ve Song, B. A. (2017). Novel

Jarošová, J., Beoni, E., & Kundu, J. K. (2016). Barley yellow dwarf virus resistance in cereals: approaches, strategies and prospects. *Field Crops Research*, *198*, 200-214.

Jeyaraj, G., Mohideen, H. S., & Geetanjali, A. S. (2021). Ab-initio modelling and docking evaluation of geographically derived coat proteins of chilli leaf curl virus with flavonoids and chemical compounds. *Journal of Applied Biology and Biotechnology*, *9*(1), 40-51.

Jones, R. A. (2021). Global plant virus disease pandemics and epidemics. *Plants*, *10*(2), 233.

Katayama, S., Ohno, F., Yamauchi, Y., Kato, M., Makabe, H., & Nakamura, S. (2013). Enzymatic synthesis of novel phenol acid rutinosides using rutinase and their antiviral activity in vitro. *Journal of agricultural and food chemistry*, *61*(40), 9617-9622.

Korkmaz, G., Usta, M., & Demirel, S. (2022). Potato virus S (PVS)-Bitlis izolatının kılıf proteinin in silico karakterizasyonu ve konak proteini ile Docking analizi. *Journal of Agriculture*, *5*(1), 57-67.

Krueger, E. N., Beckett, R. J., Gray, S. M., & Miller, W. A. (2013). The complete nucleotide sequence of the genome of Barley yellow dwarf virus-RMV reveals it to be a new Polerovirus distantly related to other yellow dwarf viruses. *Frontiers in Microbiology*, *4*, 205.

Kumar, S., & Pandey, A. K. (2013). Chemistry and biological activities of flavonoids: an overview. *The scientific world journal*, *2013.*

Kuznetsov, Y. G., & McPherson, A. (2011). Atomic force microscopy in imaging of viruses and virus-infected cells. *Microbiology and molecular biology reviews*, *75*(2), 268-285.Li, Y., Wu, M. Y., Song, H. H., Hu, X. ve Qiu, B. S. (2005).

Li, Y., Wu, M. Y., Song, H. H., Hu, X., & Qiu, B. S. (2005). Identification of a tobacco protein interacting with tomato mosaic virus coat protein and facilitating long-distance movement of virus. *Archives of virology*, *150*, 1993-2008.

Lowe, D. B. (2014). Combichem all over again. *Nature Chemistry*, *6*(10), 851-852.

Lu, A., Wang, T., Hui, H., Wei, X., Cui, W., Zhou, C., ... & Wang, Q. (2019). Natural products for drug discovery: discovery of gramines as novel agents against a plant virus. *Journal of agricultural and food chemistry*, *67*(8), 2148-2156.

Nazarov, P. A., Baleev, D. N., Ivanova, M. I., Sokolova, L. M., & Karakozova, M. V. (2020). Infectious plant diseases: Etiology, current status, problems and prospects in plant protection. *Acta naturae*, *12*(3), 46.

Osterbaan, L. J., & Fuchs, M. (2019). Dynamic interactions between plant viruses and their hosts for symptom development. *Journal of Plant Pathology*, *101*, 885-895.Pandey, P., Irulappan, V., Bagavathiannan, M. V. ve Senthil-Kumar,

Pandey, P., Irulappan, V., Bagavathiannan, M. V., & Senthil-Kumar, M. (2017). Impact of combined abiotic and biotic stresses on plant growth and avenues for crop improvement by exploiting physio-morphological traits. *Frontiers in plant science*, *8*, 537.

Pennazio, S., Roggero, P., & Conti, M. (1996). Yield losses in virus-infected crops. *Archives of Phytopathology & Plant Protection*, *30*(4), 283-296.

Perry, K. L., Kolb, F. L., Sammons, B., Lawson, C., Cisar, G., & Ohm, H. (2000). Yield effects of barley yellow dwarf virus in soft red winter wheat. *Phytopathology*, *90*(9), 1043-1048.

Qiao, Y., Li, H. F., Wong, S. M., & Fan, Z. F. (2009). Plastocyanin transit peptide interacts with Potato virus X coat protein, while silencing of plastocyanin reduces coat protein accumulation in chloroplasts and symptom severity in host plants. *Molecular plant-microbe interactions*, *22*(12), 1523-1534.

Rubio, L., Galipienso, L., & Ferriol, I. (2020). Detection of plant viruses and disease management: Relevance of genetic diversity and evolution. *Frontiers in plant Science*, *11*, 1092.

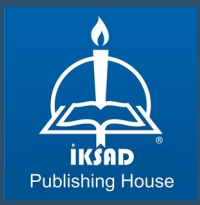
Tanaka, Y., Sasaki, N., & Ohmiya, A. (2008). Biosynthesis of plant pigments: anthocyanins, betalains and carotenoids. *The Plant Journal*, *54*(4), 733-749.

Usta, M., Güller, A., Demirel, S., Korkmaz, G. & Kurt, Z. (2023). New insights into tomato spotted wilt orthotospovirus (TSWV) infections in Türkiye: Molecular detection, phylogenetic analysis, and *in silico* docking study. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*, *51*(3), 13245-13245.

Wang, J., Yu, G., Li, Y., Shen, L., Qian, Y., Yang, J., & Wang, F. (2015). Inhibitory effects of sulfated lentinan with different degree of sulfation against tobacco mosaic virus (TMV) in tobacco seedlings. *Pesticide Biochemistry and Physiology*, *122*, 38-43.

Winkel-Shirley, B. (2001). Flavonoid biosynthesis. A colorful model for genetics, biochemistry, cell biology, and biotechnology. *Plant physiology*, *126*(2), 485-493.

Zhao, L., Feng, C., Hou, C., Hu, L., Wang, Q., & Wu, Y. (2015). First discovery of acetone extract from cottonseed oil sludge as a novel antiviral agent against plant viruses. *PloS one*, *10*(2), e0117496.



ISBN: 978-625-367-360-4