

TARLA BİTKİLERİNDE GÜBRELEME, AZOT YÖNETİMİ VE İKLİM DEĞİŞİKLİĞİ



EDİTÖRLER

Prof. Dr. Fatih ÇIĞ

Dr. Öğr. Üyesi Sipan SOYSAL



Publishing House

TARLA BİTKİLERİNDE GÜBRELEME, AZOT YÖNETİMİ VE İKLİM DEĞİŞİKLİĞİ

EDİTÖR

Prof. Dr. Fatih ÇİĞ

Dr. Öğr. Üyesi Sipan SOYSAL

YAZARLAR

Prof. Dr. Fatih ÇİĞ

Prof. Dr. Murat ERMAN

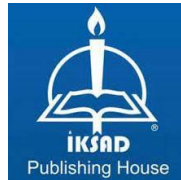
Dr. Öğr. Üyesi Özge UÇAR

Dr. Öğr. Üyesi Sipan SOYSAL

Dr. Çağdaş Can TOPRAK

Dr. Zeki ERDEN

Öğr. Gör. Fatih ERDİN



Copyright © 2025 by iksad publishing house
All rights reserved. No part of this publication may be reproduced, distributed or
transmitted in any form or by
any means, including photocopying, recording or other electronic or mechanical
methods, without the prior written permission of the publisher, except in the case of
brief quotations embodied in critical reviews and certain other noncommercial uses
permitted by copyright law. Institution of Economic Development and Social
Researches Publications®

(The Licence Number of Publicator: 2014/31220)

TÜRKİYE TR: +90 342 606 06 75

USA: +1 631 685 0 853

E mail: iksadyayinevi@gmail.com

www.iksadyayinevi.com

It is responsibility of the author to abide by the publishing ethics rules.

Iksad Publications – 2025©

ISBN: 978-625-378-565-9

Cover Design: Fatih ÇİĞ

December / 2025

Ankara / Türkiye

Size: 16x24cm

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ.....1

BÖLÜM 1

YEMEKLİK BAKLAGİLLERDE BRASSİNOSTEROİD UYGULAMASININ ABİYOTİK STRES KOŞULLARINDA TANE VERİMİ ÜZERİNE ETKİSİ

Dr. Zeki ERDEN

Dr. Çağdaş Can TOPRAK

Prof. Dr. Fatih ÇİĞ.....3

BÖLÜM 2

YEMEKLİK TANE BAKLAGİLLERDE SÜRDÜRÜLEBİLİR AZOT YÖNETİMİ: RHİZOBİYAL AŞILAMA VE TOPRAK AZOT DİNAMİKLERİ

Dr. Öğr. Üyesi Özge UÇAR

Dr. Öğr. Üyesi Sıpan SOYSAL.....21

BÖLÜM 3

KURAKLIK STRESİNİN BUĞDAYDA VERİM VE KALİTE ÜZERİNE ETKİLERİ: FİZYOLOJİK MEKANİZMALAR VE UYUM STRATEJİLERİ

Prof. Dr. Fatih ÇİĞ

Dr. Çağdaş Can TOPRAK

Dr. Zeki ERDEN.....49

BÖLÜM 4

FASULYE YETİŞTİRİCİLİĞİNE İKLİM DEĞİŞİKLİĞİNİN ETKİLERİ

Öğr. Gör. Fatih ERDİN.....67

BÖLÜM 5

SÜRDÜRÜLEBİLİR TARIMDA AZOT KAYNAĞI OLARAK KULLANILAN BOKAŞI UYGULAMALARI

Dr. Öğr. Üyesi Sıpan SOYSAL

Dr. Öğr. Üyesi Özge UÇAR.....85

BÖLÜM 6

TARLA BİTKİLERİ ÜRETİMİNDE

SÜRDÜRÜLEBİLİR GÜBRELEME YAKLAŞIMLARI

Dr. Öğr. Üyesi Sıpan SOYSAL

Prof. Dr. Murat ERMAN

Prof. Dr. Fatih ÇİĞ.....95

ÖNSÖZ

Dünya nüfusundaki hızlı artış, iklim değişikliğinin tarımsal üretim üzerindeki baskısı ve doğal kaynakların giderek azalması, tarım sektöründe sürdürülebilirlik kavramını her zamankinden daha önemli hâle getirmiştir. Özellikle bitkisel üretimde verim artışının çevresel etkiler gözetilerek sağlanması, günümüz tarım biliminin temel hedeflerinden biridir. Bu bağlamda toprak verimliliğinin korunması, bitki besleme stratejilerinin iyileştirilmesi ve stres koşullarına dayanıklı üretim sistemlerinin geliştirilmesi büyük önem taşımaktadır.

Bu kitap; sürdürülebilir tarım uygulamalarında öne çıkan güncel yaklaşımları, özellikle azot yönetimi, biyolojik gübreleme, bitki hormonları ve abiyotik stres faktörleri çerçevesinde ele almaktadır. Bokashi gibi organik kökenli gübrelerin azot kaynağı olarak kullanımı, tarla bitkileri üretiminde çevre dostu gübreleme stratejileri ve yemelik baklagillerde rhizobiyal aşılama uygulamaları, sürdürülebilir üretim hedeflerine katkı sağlayan önemli konular arasında yer almaktadır.

Kitapta ayrıca, brassinosteroid uygulamalarının abiyotik stres koşullarında bitki verimi üzerindeki etkileri, kuraklık stresinin buğdayda verim ve kaliteye yansımaları ile bu streslere karşı geliştirilen fizyolojik uyum mekanizmaları ayrıntılı biçimde incelenmektedir. Bunun yanında, iklim değişikliğinin fasulye yetiştiriciliği üzerindeki etkileri değerlendirilerek, gelecekte karşılaşılması muhtemel riskler ve bu risklere yönelik çözüm önerileri bilimsel veriler ışığında ele alınmaktadır.

Bu eser; tarla bitkileri, bitki besleme, toprak bilimi ve sürdürülebilir tarım alanlarında çalışan akademisyenler, araştırmacılar, lisansüstü öğrenciler ve uygulayıcılar için temel bir başvuru kaynağı olmayı amaçlamaktadır. Sunulan bilgilerin hem bilimsel çalışmalara hem de tarımsal üretimde sürdürülebilir uygulamaların yaygınlaştırılmasına katkı sağlaması

temennisiyle, bu kitabın hazırlanmasında emeği geçen tüm yazar ve araştırmacılara teşekkür ederiz.

Bilimsel bilgi birikiminin sürdürülebilir bir gelecek için rehber olması dileđiyle...

Prof. Dr. Fatih ÇİĞ
Dr. Öğr. Üyesi Sipan SOYSAL

BÖLÜM 1

YEMEKLİK BAKLAGİLLERDE BRASSİNOSTEROİD UYGULAMASININ ABİYOTİK STRES KOŞULLARINDA TANE VERİMİ ÜZERİNE ETKİSİ

Dr. Zeki ERDEN^{1*}

Dr. Çağdaş Can TOPRAK²

Prof. Dr. Fatih ÇİĞ³

DOI: <https://www.doi.org/10.5281/zenodo.18115176>

¹ Siirt Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Tarla Bitkileri Bölümü, Siirt, Türkiye.
zeki.erden@siirt.edu.tr Orcid No: 0000-0003-1613-7768

² Siirt Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Tarla Bitkileri Bölümü, Siirt, Türkiye.
cagdascan.toprak@siirt.edu.tr Orcid No: 0000-0002-0951-7458

³ Siirt Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Tarla Bitkileri Bölümü, Siirt, Türkiye.
fatih@siirt.edu.tr Orcid No: 0000-0002-4042-0566

GİRİŞ

Ülke ekonomisinde büyük katkılar sağlayan sektörlerden birisi de tarım sektörüdür (Ay, 2025). Ülkemizde tarım sektörünün en önemli paylarından birisi de Tahıllar ve Yemelik baklagiller gelmekte olup, insan beslenmesinde yüksek protein içerikleri ve dengeli amino asit profilleri ile temel bir gıda grubunu oluşturmakta ve simbiyotik azot fiksasyonu yetenekleri sayesinde sürdürülebilir tarım sistemlerine önemli katkılar sağlamaktadır. Mercimek (*Lens culinaris Medik.*), nohut (*Cicer arietinum L.*), fasulye (*Phaseolus vulgaris L.*), bezelye (*Pisum sativum L.*) ve bakla (*Vicia faba L.*) gibi türler özellikle yarı kurak ve kurak bölgelerde yaygın olarak yetiştirilmektedir. Bu yaygınlığın başlıca nedenleri arasında simbiyotik azot fiksasyonu, yüksek besin değeri, geniş ekolojik adaptasyon ve sürdürülebilir tarıma katkı olduğu bilinmektedir. Türkiye'nin, yemelik baklagillerin gen merkezlerinden biri olduğu ve bu bitkilerin hem tarımsal üretim hem de gıda güvenliği açısından stratejik öneme sahip olduğu kaydedilmiştir (Şehirli, 1988; TUİK, 2023).

Bununla birlikte, iklim değişikliği ile birlikte artan abiyotik stresler, yemelik baklagillerde verim istikrarını ciddi biçimde tehdit etmektedir (Doğan ve Doğan, 2020). Özellikle kuraklık ve tuzluluk, baklagillerde tane verimini belirleyen fizyolojik süreçleri doğrudan etkilemektedir. Bu stres koşullarında fotosentetik kapasite azalmakta ve kaynak-havuz ilişkileri bozulmaktadır. Buna bağlı olarak generatif organların sürekliliği sağlanamamakta, bakla ve tane sayısında önemli kayıplar ortaya çıkmaktadır. Birçok çalışmada, baklagillerde verim kaybının vegetatif büyümenin yetersizliğinden ziyade, çiçeklenme, bakla tutumu ve tane oluşumu gibi üreme (generatif) süreçlerde yaşanan aksamalardan kaynaklandığı vurgulanmıştır (Boyer & Westgate, 2004).

Kuraklık stresinin, bitkilerde stomatal kapanma ve fotosentetik karbon asimilasyonunun azalması yoluyla asimilat üretimini sınırlandırmakta; bu durum özellikle çiçeklenme ve bakla tutumu dönemlerinde tane verimini olumsuz etkilediği bildirilmiştir (Boyer & Westgate, 2004). Benzer şekilde tuzluluk stresi, bitkide tuz birikimine ve su dengesinin bozulmasına yol açarak fotosentezi ve besin maddelerinin taşınmasını azaltmakta; bunun sonucunda çiçek ve bakla gibi üreme organları erken dönemde dökülmektedir. Yemelik baklagillerde bu iki stres faktörünün ortak sonucu, tane sayısında azalma ve bin tane ağırlığında düşüş şeklinde ortaya çıkmaktadır (Munns & Tester, 2008).

Abiyotik stres koşullarında bitkilerin verim performansı, yalnızca su veya iyon dengesine bağlı olmayıp, aynı zamanda bitki büyüme düzenleyicilerinin yönettiği fizyolojik süreçlerle yakından ilişkilidir. Stres koşullarında absisik asit (ABA) düzeylerindeki artış, büyüme ve üreme gelişimini baskımlarken; sitokinin, oksin ve giberellin gibi büyümeyi teşvik eden hormonların düzeyleri genellikle azalmakta ve bu durum generatif organların devamlılığını sınırlamaktadır. Bu hormonal dengesizlik, baklagillerde abiyotik stres altında gözlenen düşük tane veriminin temel nedenleri arasında yer almaktadır (Peleg & Blumwald, 2011).

Son yıllarda yapılan araştırmalar, brassinosteroidlerin (BR'ler) bu olumsuz süreci hafifletebilecek önemli bitki büyüme düzenleyicileri olduğunu ortaya koymuştur. Brassinosteroidler; hücre bölünmesi, hücre uzaması, fotosentez ve vasküler gelişim gibi birçok temel fizyolojik süreci düzenleyen steroid yapılı fitohormonlardır. BR'lerin özellikle kuraklık ve tuzluluk gibi abiyotik stres koşullarında bitkinin strese karşı dayanıklılığını artırdığı, fotosentezin devam etmesini sağladığı ve stres nedeniyle ortaya çıkan erken yaşlanmayı geciktirdiği bildirilmektedir (Clouse & Sasse, 1998).

Yemelik baklagiller üzerinde yürütülen çalışmalarda, dışsal brassinosteroid uygulamalarının kuraklık ve tuzluluk stresi altında tane verimi ve verim bileşenleri üzerinde olumlu etkiler oluşturduğu rapor edilmiştir. BR uygulamalarının bakla sayısını artırdığı, çiçek ve bakla dökümünü azalttığı ve sonuçta tane sayısı ile bin tane ağırlığını iyileştirdiği farklı baklagil türlerinde gösterilmiştir. Bu olumlu etkilerin, brassinosteroidlerin fotosentez ve asimilat üretimini desteklemesi, kaynak-havuz dengesini koruması ve stres koşullarında generatif organların sürekliliğini sağlamasıyla ilişkili olduğu değerlendirilmiştir (Vardhini & Anjum, 2015).

Türkiye'de yürütülen farklı bitkilerde ve farklı stres tiplerinde sınırlı sayıdaki çalışmada da, brassinosteroid uygulamalarının abiyotik stres koşullarında bitkisel üretimi destekleyici etkiler gösterdiği bildirilmektedir. Özellikle düşük dozlarda uygulanan BR'lerin bitki gelişimini teşvik ettiği ve stres koşullarında fizyolojik performansı iyileştirdiği ortaya konmuştur (Çavuşoğlu & Kabar, 2007). Ancak bu çalışmaların büyük bir kısmı vegetatif büyümeye odaklanmış olup, tane verimi ve verim bileşenleri açısından değerlendirmeleri sınırlı kalmıştır. Brassinosteroidlerin abiyotik stres koşullarında bitki büyümesi ve stres toleransı üzerindeki etkileri yapılan birçok

çalışmada geniş ölçüde incelenmiş olsa da, yemeklik baklagillerde tane verimi odaklı derleme çalışmalarının yetersiz olduğu görülmektedir. Özellikle kuraklık ve tuzluluk stresi altında brassinosteroid uygulamalarının verim bileşenleri üzerindeki etkilerinin, fizyolojik ve agronomik bir çerçevede ele alınmasına ihtiyaç bulunmaktadır.

Bu derleme çalışmasında, yemeklik baklagillerde brassinosteroid uygulamalarının abiyotik stres koşullarında tane verimi üzerine etkileri yapılan birçok çalışma çerçevesinde değerlendirilmiştir. Brassinosteroidlerin bakla sayısı, tane sayısı ve tane ağırlığı gibi temel verim bileşenleri üzerindeki etkileri; fotosentez, asimilat tahsisi ve kaynak–havuz dengesi bağlamında ele alınarak, stres koşullarında verim kayıplarının azaltılmasına yönelik potansiyel katkıları ortaya konmuştur.

1. BRASSİNOSTEROİDLER VE ABİYOTİK STRES ALTINDA TANE VERİMİ: FİZYOLOJİK TEMELLER

Yemeklik baklagillerde tane verimi, fotosentetik kapasite, asimilat üretimi ve bu asimilatların generatif organlara etkin bir şekilde tahsis edilmesiyle yakından ilişkilidir. Kuraklık ve tuzluluk gibi abiyotik stresler, bu fizyolojik süreçleri eşzamanlı olarak sınırlandırarak verim bileşenlerinde önemli kayıplara yol açmaktadır. Son yıllarda yapılan çalışmalar, brassinosteroidlerin bu olumsuz etkileri hafifletebilen önemli bitki büyüme düzenleyicileri olduğunu ortaya koymuştur.

1.1. Brassinosteroidlerin fotosentez ve karbon asimilasyonu üzerine etkileri

Abiyotik stres koşullarında tane verimindeki azalmanın temel nedenlerinden biri, fotosentetik karbon asimilasyonunun sınırlandırılmasıdır. Abiyotik stresler, baklagillerde fotosentetik kapasiteyi ve karbon tahsisini sınırlandırarak bakla ve tane gelişimini olumsuz etkilemektedir (Furlan ve ark., 2021). Kuraklık stresi, yapraklardaki gözeneklerin (stomaların) kapanmasına neden olarak bitkinin karbondioksit alımını azaltır. Tuzluluk stresi ise yapraklardaki klorofil miktarını ve fotosentezin ışık reaksiyonlarında görev alan Fotosistem II'nin etkinliğini düşürür. Bu durum, baklagillerde toplam kuru madde üretimini ve generatif organlara taşınan asimilat miktarını

düşürmektedir (Munns & Tester, 2008). Brassinosteroid uygulamalarının, stres koşulları altında fotosentetik kapasitenin korunmasına katkı sağladığı birçok çalışmada rapor edilmiştir. BR'lerin klorofil içeriğini desteklediği, fotosentetik enzimlerin aktivitesini artırdığı ve stres kaynaklı yaprak yaşlanmasını geciktirdiği bildirilmektedir (Kagale ve ark., 2007). Bu fizyolojik etkiler sayesinde stres altında dahi karbon asimilasyonu belirli bir düzeyde sürdürülebilmekte ve bunun tane verimine olumlu yansıdığı ifade edilmektedir (Fariduddin ve ark., 2014). Baklagiller üzerinde yapılan deneysel çalışmalarda, yapraklardan uygulanan brassinosteroidlerin tuzluluk stresinin olumsuz etkilerini hafiflettiği ve fizyolojik performansı iyileştirdiği rapor edilmiştir (Kutay & Venkatesan, 2022).

Bazı baklagil bitkileri üzerinde yapılan çalışmalarda, brassinosteroid uygulamalarının kuraklık ve tuzluluk stresi altında net fotosentez hızını ve yaprak alanının korunmasını sağladığı; bunun da bakla ve tane gelişimi için gerekli karbon arzını desteklediği bildirilmektedir (Vardhini & Anjum, 2015). Bu durum, BR'lerin tane verimini doğrudan artırmaktan ziyade, verim oluşumunu destekleyen fizyolojik altyapıyı güçlendirdiğini göstermektedir.

1.2. Asimilat üretimi, taşınımı ve kaynak–havuz dengesi

Tane verimi, yalnızca üretilen asimilat miktarına değil, aynı zamanda bu asimilatların kaynak organlardan (yapraklar) havuz organlara (baklalar ve taneler) etkin bir şekilde taşınmasına bağlıdır. Abiyotik stres koşullarında, asimilat üretiminin azalmasına ek olarak floem taşıma kapasitesi de sınırlandırılmakta; bu durum generatif organların karbon yetersizliği yaşamasına neden olmaktadır (Borrás & Slafer, 2004). Brassinosteroidlerin, stres koşullarında kaynak–havuz dengesinin korunmasına katkı sağladığı bildirilmektedir. BR uygulamaları, yaprakların fotosentetik etkinliğini sürdürmesinin yanı sıra, generatif organların asimilat çekme gücünü de destekleyerek bakla ve tane gelişimini olumlu yönde etkilemektedir. Bu sayede stres koşullarında sıkça gözlenen çiçek ve bakla dökümünün azaltılabildiği ifade edilmektedir (Vardhini & Anjum, 2015).

Baklagiller ve bir kısım bitkiler üzerinde yapılan bazı çalışmalarda, brassinosteroid uygulamalarının bakla sayısını ve tane sayısını artırdığı; bu artışın özellikle stres koşullarında daha belirgin olduğu bildirilmektedir. Bu

durum, BR'lerin stres altında bozulan kaynak–havuz ilişkilerini kısmen dengeleyerek tane veriminin korunmasına katkı sağladığını göstermektedir.

1.3. Generatif organların korunması ve tane verimi

Abiyotik stres koşullarında tane verimindeki kayıpların en önemli nedenlerinden biri, generatif organların stres süresince devamlılığının sağlanamamasıdır. Kuraklık ve tuzluluk stresi, çiçeklenme döneminde çiçek dökümünü artırmakta; bakla tutumunu ve tane sayısını sınırlamaktadır. Bu durum, baklagillerde toplam verimin düşmesine yol açmaktadır (Boyer & Westgate, 2004). Brassinosteroid uygulamalarının, generatif organların stres koşullarında korunmasına katkı sağladığı bildirilmektedir. BR'lerin hücre bölünmesini ve hücre uzamasını teşvik ederek çiçek ve bakla gelişimini desteklediği; stres kaynaklı erken senesensi geciktirdiği ifade edilmektedir. Bu etkiler, özellikle bakla sayısı ve tane sayısının korunması açısından önem taşımaktadır (Clouse & Sasse, 1998).

Yemeklik baklagiller ve bazı bitkilerde yapılan deneysel çalışmalarda, dışsal BR uygulamalarının stres koşullarında bakla tutumunu artırdığı ve tane verimindeki kayıpları azalttığı rapor edilmiştir. Bu sonuçlar, brassinosteroidlerin doğrudan bir verim artırıcıdan ziyade, stres altında verim bileşenlerinin korunmasını sağlayan düzenleyici moleküller olarak değerlendirilmesi gerektiğini göstermektedir.

1.4. Hormonal denge ve verim oluşumu ile ilişkisi

Abiyotik stres koşullarında tane veriminin azalmasında hormonal dengenin bozulması önemli bir rol oynamaktadır. Stres altında absisik asit (ABA) düzeyleri artarken, büyümeyi teşvik eden hormonların etkisi zayıflamaktadır. Bu durum, generatif gelişimin baskılanmasına ve verim bileşenlerinde düşüşe yol açmaktadır (Peleg & Blumwald, 2011).

Brassinosteroidlerin, stres koşullarında hormonal dengeyi kısmen düzenleyerek verim oluşumuna dolaylı katkı sağladığı bildirilmektedir. BR uygulamalarının, ABA kaynaklı büyüme baskısını hafiflettiği ve generatif gelişimin sürdürülmesine olanak tanıdığı ifade edilmektedir. Bu etki, baklagillerde tane veriminin korunması açısından önemli bir fizyolojik mekanizma olarak değerlendirilmektedir. BR uygulamalarının stres koşullarında antioksidan savunma sistemini ve azot metabolizmasını

desteklediği baklagiller üzerinde yapılan çalışmalarda gösterilmiştir (Turan, 2021; Yusuf ve ark., 2014).

2. BRASSINOSTEROİD UYGULAMALARININ KURAKLIK VE TUZLULUK STRESİ ALTINDA TANE VERİM BİLEŞENLERİNE ETKİSİ

Yemeklik baklagillerde tane verimi, bitkide oluşan bakla sayısı, her bakladaki tane sayısı ve bin tane ağırlığı gibi temel verim unsurlarının birlikte etkisiyle belirlenmektedir. Kuraklık ve tuzluluk gibi abiyotik stres koşulları, bu bileşenlerin her birini farklı düzeylerde etkileyerek toplam tane veriminde önemli kayıplara yol açmaktadır. Son yıllarda yapılan çalışmalar, brassinosteroid uygulamalarının stres koşulları altında bu verim bileşenlerini koruyabildiğini ve bazı durumlarda iyileştirebildiğini göstermektedir.

2.1. Bakla sayısı ve çiçek–bakla dökümü üzerine etkiler

Bakla sayısı, yemeklik baklagillerde tane verimini belirleyen en kritik bileşenlerden biridir. Kuraklık ve tuzluluk stresi, özellikle çiçeklenme döneminde çiçek dökümünü artırarak bakla tutumunu sınırlandırmaktadır. Stres koşullarında bitkilerin fotosentetik kapasitesinin azalması ve hormonal dengenin bozulması, generatif organların devamlılığını olumsuz yönde etkilemektedir (Boyer & Westgate, 2004). Brassinosteroid uygulamalarının stres koşullarında çiçek ve bakla dökümünü azalttığı birçok çalışmada rapor edilmiştir. BR'lerin hücre bölünmesini ve hücre uzamasını teşvik etmesi, çiçek ve genç baklaların stres altında canlılığını korumasına katkı sağlamaktadır. Özellikle kuraklık ve diğer abiyotik stres koşullarında yapılan çalışmalarda, bitkiye dışarıdan uygulanan brassinosteroidlerin bakla sayısını artırdığı ve bu artışın tane verimine olumlu yansıdığı bildirilmektedir (Kagale ve ark., 2007; Fariduddin ve ark., 2014).

Yemeklik baklagillerin yanı sıra bazı model bitkilerde elde edilen bulgular, BR uygulamalarının bakla tutumu üzerindeki etkisinin stres koşullarında daha belirgin olduğunu göstermektedir. Bu durum, brassinosteroidlerin normal koşullarda sınırlı olan etkilerinin, stres altında generatif organların korunması yoluyla daha anlamlı hâle geldiğini ortaya koymaktadır.

2.2. Tane sayısı üzerine etkiler

Tane sayısı, bakla sayısına ek olarak bakla başına oluşan tane sayısı ile de ilişkilidir. Abiyotik stres koşulları, özellikle üreme döneminde polen canlılığını ve döllenme başarısını olumsuz etkileyerek tane sayısında azalmaya yol açabilmektedir. Çiçeklenme ve erken bakla gelişimi dönemlerinde karşılaşılan su ve tuzluluk stresi, tane bağlama oranını önemli ölçüde düşürmektedir (Farooq ve ark., 2019). Brassinosteroid uygulamalarının, stres koşullarında tane sayısını koruyucu etki gösterebildiği çeşitli çalışmalarda ifade edilmektedir. BR'lerin çiçeklenme sürecini desteklediği ve üreme organlarının fizyolojik bütünlüğünü korumaya katkı sağladığı, bu yolla stres koşullarında tane sayısındaki kayıpların sınırlandırılmasına yardımcı olabileceği bildirilmektedir (Vardhini & Anjum, 2015).

Baklagiller üzerinde yapılan deneysel çalışmalarda, BR uygulamalarının bakla başına tane sayısını artırdığı veya en azından stres koşullarında tane sayısındaki düşüşü azalttığı rapor edilmiştir. Bu durum, brassinosteroidlerin verim bileşenleri üzerindeki etkisinin yalnızca vegetatif büyümeyle sınırlı olmadığını, doğrudan üreme başarısını da desteklediğini göstermektedir.

2.3. Bin tane ağırlığı ve tane dolumu üzerine etkiler

Bin tane ağırlığı, tane veriminin önemli bir diğer bileşeni olup, tane dolumu sürecindeki asimilat arzı ile yakından ilişkilidir. Kuraklık ve tuzluluk stresi, fotosentez ve asimilat taşınımını sınırlandırarak tane dolumu süresini kısaltmakta ve bin tane ağırlığında düşüşe neden olmaktadır (Borrás & Slafer, 2004). Brassinosteroid uygulamalarının, stres koşullarında tane dolumu sürecini desteklediği bildirilmektedir. Brassinosteroidlerin fotosentezin devam etmesini ve bitkide besin üretimini koruması, tane dolumu için gerekli karbonun sağlanmasına yardımcı olmaktadır. Bu sayede bin tane ağırlığı korunmakta ya da sınırlı da olsa artış gösterebilmektedir (Kagale ve ark., 2007; Fariduddin ve ark., 2014; Farooq ve ark., 2019).

Yemeklik baklagillerde yapılan çalışmalarda, brassinosteroid uygulamalarının bin tane ağırlığı üzerindeki etkisinin bakla ve tane sayısına kıyasla daha sınırlı olduğu; ancak stres koşullarında meydana gelen düşüşleri azaltabildiği ifade edilmektedir. Bu bulgu, BR'lerin verim bileşenleri üzerindeki etkisinin daha çok üreme organlarının korunması ve tane sayısının sürdürülmesi üzerinden gerçekleştiğini düşündürmektedir.

2.4. Türler arası farklılıklar ve uygulama koşullarının önemi

Brassinosteroid uygulamalarının tane verimi üzerindeki etkileri, baklagil türüne, genotipe, uygulama dozu ve zamanına bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Mercimek ve nohut gibi türlerde yapılan çalışmalar, BR uygulamalarının kuraklık stresi altında verim bileşenleri üzerinde daha belirgin etkiler oluşturduğunu ortaya koyarken; bazı fasulye ve bezelye genotiplerinde bu etkilerin sınırlı olabildiği bildirilmektedir.

Ayrıca uygulama şekli (tohum ön uygulama veya yaprak uygulaması) ve doz, elde edilen sonuçlar üzerinde belirleyici olmaktadır. Düşük dozlarda uygulanan brassinosteroidlerin genellikle olumlu etkiler oluşturduğu; yüksek dozların ise beklenen faydayı sağlamadığı veya etkisiz kaldığı ifade edilmektedir. Bu durum, BR uygulamalarının agronomik açıdan dikkatle planlanması gerektiğini göstermektedir.

3. BRASSİNOSTEROİD UYGULAMALARININ ETKİ MEKANİZMASI: TANE VERİMİ BAĞLAMINDA BİR SENTEZ

Yemeklik baklagillerde abiyotik stres koşullarında tane verimindeki kayıplar, tek bir fizyolojik bozulmadan ziyade, birbiriyle ilişkili çok sayıda sürecin eşzamanlı olarak etkilenmesi sonucunda ortaya çıkmaktadır. Kuraklık ve tuzluluk stresi altında fotosentez kapasitesinin azalması, asimilat üretimi ve taşınımının sınırlandırılması, hormonal dengenin bozulması ve generatif organların sürekliliğinin korunamaması, verim bileşenlerini doğrudan etkilemektedir. Brassinosteroid uygulamalarının bu çok yönlü olumsuzlukları kısmen dengeleyebildiği, son yıllarda yapılan çalışmalarla ortaya konmuştur.

3.1. Fotosentezin korunması ve asimilat arzının sürdürülmesi

Abiyotik stres koşullarında tane veriminin azalmasında temel etkenlerden biri, fotosentetik karbon asimilasyonunun sınırlandırılmasıdır. Kuraklık stresi stomatal kapanmaya neden olurken, tuzluluk stresi klorofil içeriğini ve fotosistem etkinliğini azaltmaktadır. Bu durum, generatif organların gelişimi için gerekli karbon arzını sınırlamaktadır (Munns & Tester, 2008).

Brassinosteroidlerin stres koşulları altında fotosentetik etkinliğin korunmasına katkı sağladığı bildirilmektedir. BR uygulamalarının klorofil içeriğini desteklediği, fotosentetik enzimlerin aktivitesini artırdığı ve stres kaynaklı yaprak yaşlanmasını geciktirdiği çeşitli çalışmalarda ortaya konmuştur (Kagale ve ark., 2007). Bu fizyolojik etkiler sayesinde stres altında dahi asimilat üretimi belirli bir düzeyde sürdürülebilmekte ve tane dolumu için gerekli karbon kaynağı korunabilmektedir (Fariduddin ve ark., 2014; Farooq ve ark., 2019).

3.2. Brassinosteroidlerin kaynak–havuz dengesi üzerindeki rolü

Tane verimi, yalnızca üretilen asimilat miktarına değil, bu asimilatların generatif organlara etkin bir şekilde yönlendirilmesine de bağlıdır. Abiyotik stres koşullarında kaynak–havuz ilişkileri bozulmakta; generatif organlar yeterli asimilat alamadığı için çiçek ve bakla dökümü artmaktadır. Bu durum, baklagillerde verim kaybının en önemli nedenlerinden biri olarak kabul edilmektedir (Borrás & Slafer, 2004). Brassinosteroid uygulamalarının, stres koşullarında kaynak–havuz dengesini kısmen koruyabildiği bildirilmektedir. BR’lerin fotosentetik kapasiteyi desteklemesinin yanı sıra, generatif organların asimilat çekme gücünü artırdığı ve böylece bakla ve tane gelişimini desteklediği ifade edilmektedir. Bu etki, özellikle çiçeklenme ve erken bakla gelişimi dönemlerinde önem kazanmakta ve tane sayısının korunmasına katkı sağlamaktadır (Vardhini & Anjum, 2015).

3.3. Generatif organların sürekliliği ve stres toleransı

Kuraklık ve tuzluluk stresi, generatif organların gelişimini doğrudan baskılamakta; çiçeklenme süresini kısaltmakta ve bakla tutumunu azaltmaktadır. Bu stres koşullarında bitkiler, sınırlı kaynaklarını yaşamsal süreçlere yönlendirerek üreme gelişimini geri plana atabilmektedir. Sonuçta tane verimi önemli ölçüde düşmektedir (Boyer & Westgate, 2004). Brassinosteroidlerin, generatif organların stres koşullarında korunmasına katkı sağladığı birçok çalışmada vurgulanmıştır. Baklagil türlerinde BR uygulamalarına verilen yanıtın genotipe bağlı olarak değişebileceği, kuraklık altında fizyolojik ve moleküler düzeyde gösterilmiştir (Felagari ve ark., 2023).

BR uygulamalarının hücre bölünmesini ve hücre uzamasını teşvik ederek çiçek ve bakla gelişimini desteklediği; stres kaynaklı erken senesensi geciktirdiği ifade edilmektedir. Bu mekanizma, özellikle bakla sayısı ve tane sayısının korunması açısından kritik öneme sahiptir (Clouse & Sasse, 1998). Baklagiller üzerinde yapılan çalışmalarda, brassinosteroid uygulamalarının stres koşullarında tane verimini artırabildiği ve verim kayıplarını sınırladığı bildirilmektedir (Rady, 2011).

3.4. Hormonal denge üzerinden dolaylı etkiler

Abiyotik stres koşullarında bitkilerde hormonal denge önemli ölçüde değişmektedir. Stres altında absisik asit (ABA) düzeylerinin artması, büyüme ve üreme gelişimini baskılayan bir etki oluşturmaktadır. Bu durumun, generatif organların sürekliliğini olumsuz etkilemekte ve tane veriminde düşüşe yol açtığı kaydedilmiştir (Peleg & Blumwald, 2011). Brassinosteroidlerin, stres koşullarında hormonal dengeyi dolaylı mekanizmalar aracılığıyla düzenleyerek verim oluşumuna katkı sağladığı; bu kapsamda BR uygulamalarının absisik asit (ABA) kaynaklı büyüme baskısını hafiflettiği ve büyümeyi teşvik eden hormonların fizyolojik etkilerini desteklediği rapor edilmiştir (Krishna, 2003). Doğrudan hormon düzeylerine ilişkin ölçümler bulunmasa dahi, söz konusu hormonal etkileşimlerin büyüme ve verim parametrelerindeki iyileşmeler üzerinden fizyolojik olarak anlamlandırılabilirdiği düşünülmüştür.

3.5. Mekanizmaların bütüncül değerlendirilmesi

Yukarıda ele alınan mekanizmalar birlikte değerlendirildiğinde, brassinosteroidlerin tane verimi üzerindeki etkisinin tek bir süreçle sınırlı olmadığı görülmektedir. BR uygulamaları; fotosentezin korunması, asimilat arzının sürdürülmesi, kaynak–havuz dengesinin düzenlenmesi ve generatif organların stres koşullarında devamlılığının sağlanması yoluyla, abiyotik stres altında tane verimindeki kayıpları sınırlamaktadır. Bu çok yönlü etki, brassinosteroidlerin abiyotik stres altında tane veriminin korunmasına yönelik tamamlayıcı bir strateji olarak ele alınabileceğini ortaya koymaktadır.

4. BRASSINOSTEROİD UYGULAMALARI: TARIMSAL AÇIDAN DEĞERLENDİRME VE UYGULAMA STRATEJİLERİ

Brassinosteroidlerin yemeklik baklagillerde abiyotik stres koşullarında tane verimini destekleyici etkileri, son yıllarda artan sayıda çalışmayla ortaya konmuş olmakla birlikte, bu düzenleyicilerin tarımsal uygulamalara entegrasyonu dikkatli bir değerlendirme gerektirmektedir. Brassinosteroidler, doğrudan verimi artıran girdilerden ziyade, stres koşullarında verim bileşenlerinin korunmasına katkı sağlayan tamamlayıcı araçlar olarak ele alınmalıdır.

4.1. Uygulama zamanı ve fenolojik dönemlerin önemi

Brassinosteroid uygulamalarının etkinliği, büyük ölçüde uygulamanın yapıldığı fenolojik döneme bağlıdır. Yemeklik baklagillerde çiçeklenme öncesi ve erken çiçeklenme dönemleri, abiyotik streslere karşı en hassas evreler olarak kabul edilmektedir. Bu dönemlerde karşılaşılan kuraklık veya tuzluluk stresi, bakla tutumunu ve tane sayısını ciddi biçimde sınırlandırmaktadır.

Literatürde yer alan bulgular, brassinosteroid uygulamalarının özellikle çiçeklenme öncesi veya çiçeklenme başlangıcında yapıldığında daha belirgin olumlu etkiler oluşturduğunu göstermektedir. Bu dönemde yapılan uygulamalar, generatif organların stres koşullarında devamlılığını destekleyerek bakla ve tane kayıplarını azaltabilmektedir. Buna karşılık, geç dönemde yapılan uygulamaların verim üzerindeki etkisinin sınırlı kaldığı bildirilmektedir (Krishna, 2003).

4.2. Uygulama şekli ve dozun belirleyici rolü

Brassinosteroid uygulamaları, genellikle tohum ön uygulama (priming) veya yaprak uygulaması şeklinde gerçekleştirilmektedir. Tohum ön uygulamalarının, bitkinin erken gelişim dönemlerinde stres toleransını artırdığı; yaprak uygulamalarının ise özellikle generatif dönemlerde daha etkili olduğu rapor edilmiştir. Yemeklik baklagillerde yapılan çalışmalarda, yaprak uygulamalarının bakla sayısı ve tane sayısı üzerinde daha belirgin sonuçlar verdiği ifade edilmektedir. Brassinosteroid uygulamalarında uygulanan doz, kritik bir belirleyici faktördür. Düşük dozlarda uygulanan BR'lerin olumlu

etkiler oluşturduğu; buna karşılık yüksek dozların beklenen faydayı sağlamadığı veya etkisiz kaldığı birçok çalışmada belirtilmiştir. Bu durum, brassinosteroidlerin dar bir etkinlik aralığına sahip olduğunu ve uygulamaların dikkatle planlanması gerektiğini ortaya koymaktadır (Vardhini & Anjum, 2015).

4.3. Brassinosteroid uygulamalarının diğer tarımsal uygulamalarla ilişkisi

Brassinosteroidlerin tarımsal üretimdeki potansiyeli, tek başına bir uygulama olarak değil, diğer yönetim stratejileriyle birlikte değerlendirildiğinde daha anlamlı hâle gelmektedir. Sulama yönetimi, gübreleme ve uygun çeşit seçimi gibi temel agronomik uygulamalar, brassinosteroidlerin etkinliğini doğrudan etkilemektedir. Yetersiz beslenme veya aşırı stres koşullarında, BR uygulamalarının tek başına yeterli olmayabileceği dikkate alınmalıdır.

Özellikle su kısıtı altında yapılan üretimde, brassinosteroid uygulamalarının uygun sulama stratejileriyle birlikte değerlendirilmesi önerilmektedir. Bu yaklaşım, stresin tamamen ortadan kaldırılmasını değil, bitkinin stresle başa çıkma kapasitesinin desteklenmesini hedeflemektedir. Bu bağlamda BR'ler, stres koşullarında verim istikrarını artırmaya yönelik tamamlayıcı bir araç olarak değerlendirilebilir.

4.4. Türkiye koşulları açısından değerlendirme

Türkiye’de yemeklik baklagil üretimi, büyük ölçüde yarı kurak ekolojik koşullarda gerçekleştirilmektedir. Bu durum, özellikle kuraklık stresinin verim üzerindeki etkilerini daha belirgin hâle getirmektedir. Türkiye’de yürütülen sınırlı sayıda çalışmada, bitki büyüme düzenleyicilerinin stres koşullarında bitkisel üretimi destekleyici etkileri olduğu bildirilmiştir. Ancak brassinosteroid uygulamalarının doğrudan tane verimi üzerindeki etkilerini ortaya koyan kapsamlı tarla çalışmalarının yetersiz olduğu görülmektedir. Bu nedenle, brassinosteroidlerin Türkiye koşullarında tarımsal uygulamalara entegrasyonu için, farklı baklagil türleri ve genotipleri üzerinde çok yıllı ve çok lokasyonlu denemelere ihtiyaç bulunmaktadır. Bu tür çalışmalar, BR uygulamalarının ekonomik ve agronomik açıdan uygulanabilirliğinin daha sağlıklı değerlendirilmesine olanak sağlayacaktır.

4.5. Uygulamada karşılaşılan sınırlılıklar

Brassinosteroidlerin tarımda kullanımı bazı kısıtlamalar içermektedir. Bu maddelerin maliyetinin yüksek olması, uygulama zamanının doğru ayarlanmasının gerekmesi ve çevre koşullarına bağlı olarak etkilerinin değişebilmesi, yaygın kullanımını zorlaştırmaktadır. Ayrıca, baklagil türleri ve çeşitleri arasında verilen tepkilerin farklı olması, her koşul için tek ve standart bir uygulama önerisi geliştirilmesini güçleştirmektedir. Bu nedenlerle, brassinosteroidler abiyotik stres koşullarında tane verimini destekleyici bir yardımcı uygulama olarak değerlendirilmeli; ancak mevcut tarımsal uygulamaların yerine geçen temel bir çözüm olarak görülmemelidir.

5. SONUÇ

Abiyotik stres koşulları, yemelik baklagillerde tane verimini belirleyen fizyolojik ve agronomik süreçleri çok yönlü olarak etkilemektedir. Kuraklık ve tuzluluk stresi altında fotosentetik kapasitenin azalması, asimilat üretimi ve taşınımının sınırlandırılması, kaynak-havuz dengesinin bozulması ve generatif organların sürekliliğinin korunamaması, baklagillerde verim kayıplarının temel nedenleri arasında yer almaktadır. Bu derlemede ele alınan bulgular, brassinosteroid uygulamalarının söz konusu olumsuzlukları tamamen ortadan kaldırmasa da, stres koşullarında tane verimini oluşturan bileşenlerin korunmasına önemli katkılar sağlayabildiğini ortaya koymaktadır.

Literatürde yer alan çalışmalar, brassinosteroidlerin abiyotik stres koşullarında fotosentezin korunması, asimilat arzının sürdürülmesi ve generatif organların stres toleransının artırılması yoluyla bakla sayısı, tane sayısı ve bin tane ağırlığı gibi verim bileşenlerini olumlu yönde etkileyebildiğini göstermektedir. Bu etkilerin özellikle çiçeklenme ve erken bakla gelişimi gibi streslere hassas dönemlerde daha belirgin olduğu; uygun doz ve zamanda yapılan uygulamaların verim kayıplarını sınırlayabildiği anlaşılmaktadır. Bu bağlamda brassinosteroidler, doğrudan bir verim artırıcıdan ziyade, abiyotik stres koşullarında verim istikrarını destekleyen tamamlayıcı düzenleyiciler olarak değerlendirilmelidir.

Yemelik baklagillerde brassinosteroid uygulamalarının etkileri, tür, genotip, stresin şiddeti ve süresi ile uygulama stratejilerine bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Bu durum, tek tip uygulama önerilerinin geliştirilmesini zorlaştırmakta; buna karşılık tür ve çevre koşullarına özgü

stratejilerin önemini artırmaktadır. Özellikle kurak ve yarı kurak bölgelerde yürütülen üretim sistemlerinde, brassinosteroidlerin uygun sulama ve besleme yönetimiyle birlikte ele alınması, daha gerçekçi ve uygulanabilir bir yaklaşım sunmaktadır. BR uygulamalarının etkinliğinin genotip ve stres düzeyine bağlı olarak değişebileceğini ve uygulama stratejilerinin buna göre şekillendirilmesi gerektiğini göstermektedir (Felagari ve ark., 2023).

Türkiye koşulları dikkate alındığında, yemeklik baklagil üretiminin büyük ölçüde yağışa bağımlı ve stres riski yüksek ekolojik alanlarda gerçekleştirildiği görülmektedir. Buna rağmen, brassinosteroid uygulamalarının doğrudan tane verimi üzerindeki etkilerini ortaya koyan çok yıllık ve çok lokasyonlu tarla çalışmalarının sınırlı olduğu dikkat çekmektedir. Gelecekte yürütülecek araştırmalarda, farklı baklagil türleri ve yerel genotipler üzerinde, tarla koşullarında gerçekleştirilecek denemelerle brassinosteroid uygulamalarının verim ve ekonomik getiri açısından değerlendirilmesi gerekmektedir.

Ayrıca, brassinosteroidlerin stres koşullarında verim oluşumuna katkı sağlayan fizyolojik mekanizmalarının daha net ortaya konması, uygulamaların etkinliğini artıracaktır. Bu kapsamda fotosentez, asimilat tahsisi ve kaynak–havuz ilişkilerinin yanı sıra, hormonal dengeye ilişkin göstergelerin de birlikte ele alındığı bütüncül çalışmaların yürütülmesi önem taşımaktadır. Ancak bu tür çalışmaların, tarımsal uygulamalara doğrudan aktarılabilir sonuçlar üretmeye odaklanması gerektiğinin dikkate alınması gerekir.

Sonuç olarak, brassinosteroid uygulamaları, abiyotik stres koşullarında yemeklik baklagillerde tane verim kayıplarını azaltmaya yönelik umut vadeden bir yaklaşım sunmaktadır. Bununla birlikte, bu düzenleyicilerin tek başına bir çözüm olarak değil; uygun çeşit seçimi, sulama yönetimi ve diğer agronomik uygulamalarla birlikte değerlendirilmesi gerekmektedir. Bu derlemede sunulan değerlendirmelerin, gelecekte yapılacak araştırmalara ve sürdürülebilir baklagil üretim stratejilerinin geliştirilmesine katkı sağlaması beklenmektedir

KAYNAKLAR

- Ay, Ş. (2025). Türkiye’de Tarım Sektörünün Vergi Geçmişi. *MANAS Sosyal Araştırmalar Dergisi*, 14(2), 664-674.
- Borrás, L., & Slafer, G. A. (2004). Seed dry weight response to source–sink manipulations in crops. *Field Crops Research*, 86(2–3), 131–146.
- Boyer, J. S., & Westgate, M. E. (2004). Grain yields with limited water. *Journal of Experimental Botany*, 55(407), 2385–2394.
- Clouse, S. D., & Sasse, J. M. (1998). Brassinosteroids: Essential regulators of plant growth and development. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*, 49, 427–451.
- Cavusoglu, K., & Kabar, K. (2007). Comparative effects of some plant growth regulators on the germination of barley and radish seeds under high temperature stress. *EurAsian Journal of BioSciences*, 1(1), 1-10.
- Doğan, S., & Doğan, Y. (2020). Mardin Koşullarında Kırmızı Mercimek (*Lens culinaris* Medik.) Genotiplerinin Verim ve Verim Öğelerinin Belirlenmesi. *Euroasia Journal of Mathematics, Engineering, Natural & Medical Sciences*, 7(9), 23-30.
- Fariduddin, Q., Yusuf, M., Chalkoo, S., Hayat, S., & Ahmad, A. (2014). Brassinosteroids and their role in response of plants to abiotic stresses. *Biologia Plantarum*, 58(1), 9–17.
- Farooq, M., Hussain, M., Ul-Allah, S., & Siddique, K. H. M. (2019). Physiological and agronomic approaches for improving water-use efficiency in crop plants, *Agricultural Water Management*, Volume 219, 20 June 2019, Pages 95-108.
- Felagari, K., Bahramnejad, B., Siosemardeh, A., Mirzaei, K., Lei, X., & Zhang, J. (2023). A comparison of the physiological traits and gene expression of brassinosteroids signaling under drought conditions in two chickpea cultivars. *Agronomy*, 13(12), 2963.
- Furlan, A., Bianucci, E., Llanes, A., Peralta, J. M., & Castro, S. (2021). Abiotic stress tolerance including salt, drought and metal(loid)s in legumes. In E. Lichtfouse (Ed.), *Sustainable agriculture reviews* (Vol. 51, pp. 135–180). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-67600-8_5.

- Kagale, S., Divi, U. K., Krochko, J. E., Keller, W. A., & Krishna, P. (2007). Brassinosteroid confers tolerance in *Arabidopsis thaliana* and *Brassica napus* to a range of abiotic stresses. *Planta*, 225 (2), 353–364. <https://doi.org/10.1007/s00425-006-0361-6>.
- Krishna, P. (2003). Brassinosteroid-mediated stress responses. *Journal of Plant Growth Regulation*, 22(4), 289–297.
- Kutay, Z. A., & Venkatesan, A. (2022). Mitigation of salinity induced effects by foliar application of brassinosteroids in *Vigna radiata* L. Co (Gg) 7 variety. *Indian Journal of Natural Sciences*, 12(70), 37520–37527.
- Munns, R., & Tester, M. (2008). Mechanisms of salinity tolerance. *Annual Review of Plant Biology*, 59, 651–681.
- Peleg, Z., & Blumwald, E. (2011). Hormone balance and abiotic stress tolerance. *Current Opinion in Plant Biology*, 14(3), 290–295.
- Rady, M. M. (2011). Effect of 24-Epibrassinolide on Growth, Yield, Antioxidant System and Cadmium Content of Bean (*Phaseolus vulgaris* L.) Plants under Salinity and Cadmium Stress, *Scientia Horticulturae*, Vol. 129, No. 2, 2011, pp. 232–237. doi:10.1016/j.scienta.2011.03.035.
- Şehirali, S., (1988). *Yemeklik tane baklagiller*. Ankara Üniversitesi Ziraat Fakültesi Yayınları.
- TÜİK (Türkiye İstatistik Kurumu), (2023). *Bitkisel üretim istatistikleri*. <https://www.tuik.gov.tr>, erişim tarihi: 18/12/2025.
- Turan, N., (2021). Crop Saline Tolerance in Relation To Nitrate/Ammonium Ratio in Fertilizers. Gülcan DEMİROĞLU TOPCU & Seyithan SEYDOSOGU (Ed) Sustainable Forage Production and Ecological Safety (359-374 ss). Ankara; Turkey: IKSAD.
- Vardhini, B. V., & Anjum, N. A. (2015). Brassinosteroids make plant life easier under abiotic stresses mainly by modulating major components of antioxidant defense system. *Frontiers in Environmental Science*, 2, 67.
- Yusuf, M., Fariduddin, Q., Ahmad, I., & Ahmad, A. (2014). Brassinosteroid-mediated evaluation of antioxidant system and nitrogen metabolism in two contrasting cultivars of *Vigna radiata* under different levels of nickel. *Physiology and Molecular Biology of Plants*, 20(4), 449–460.

BÖLÜM 2

YEMEKLİK TANE BAKLAGİLLERDE SÜRDÜRÜLEBİLİR AZOT YÖNETİMİ: RHİZOBİYAL AŞILAMA VE TOPRAK AZOT DİNAMİKLERİ

Dr. Öğr. Üyesi Özge UÇAR*¹

Dr. Öğr. Üyesi Sipan SOYSAL²

DOI: <https://www.doi.org/10.5281/zenodo.18115197>

¹ Siirt Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Tarla Bitkileri Bölümü, Siirt, Türkiye.
ozgeonder@siirt.edu.tr Orcid No: 0000-0002-4650-4998

² Siirt Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Tarla Bitkileri Bölümü, Siirt, Türkiye.
sipansoyisal@siirt.edut.tr Orcid No: 0000-0002-0840-6609

1. BAKLAGİLLERDE AZOT FİKSASYONUNUN TEMEL MEKANİZMASI

Yemeklik tane baklagiller, atmosferik azotu biyolojik yollarla bitki tarafından kullanılabilir formlara dönüştürebilen en önemli tarla bitkileri grubunu oluşturmaktadır. Bu yetenek, kök nodüllerinde simbiyotik yaşayan “rhizobia” olarak adlandırılan bakterilerle (başlıca *Rhizobium*, *Bradyrhizobium*, *Mesorhizobium* ve *Sinorhizobium*) kurulan karşılıklı faydaya dayalı ilişki sayesinde ortaya çıkmaktadır (Lindström and Mousavi, 2025).

Azot, bitki büyümesi ve verim oluşumu için önemli bir besin maddesidir (Turan, 2021). Biyolojik azot fiksasyonu (BAF), atmosferik azotun (N_2) bitkinin doğrudan kullanabileceği reaktif azot formlarına çevrilmesi olup, simbiyotik sistemlerde bu dönüşüm esas olarak amonyak oluşumu üzerinden gerçekleşmektedir (Zahran, 1999; Milton et al., 2016). Bu reaksiyonun katalizi, yalnızca prokaryotlarda bulunan nitrogenase enzim kompleksi ile mümkündür (Harwood, 2020). Nitrogenase, yüksek enerji gerektiren bir enzimdir ve reaksiyon, ATP tüketimiyle elektron/proton aktarımına bağlı yürümektedir (Deveryshetty & Antony, 2021). Nitrogenase’in en kritik özelliği, oksijene aşırı duyarlı olmasıdır; bu nedenle simbiyotik sistemler, bir yandan bakteriyel solunumu sürdürecekt oksijeni sağlarken, diğer yandan nitrogenase enzimini oksidatif inaktivasyondan koruyacak “mikroaerobik” koşulları oluşturmak zorundadır. Bu temel biyokimyasal kısıt, nodül fizyolojisinin (özellikle oksijen düzenlemesinin) merkezinde yer almaktadır (Avenhaus et al., 2016).

1.1. Konak–bakteri sinyalleşmesi ve nodülasyonun başlatılması

Simbiyozun kurulması, kök bölgesinde (rizosfer) gerçekleşen kimyasal sinyalleşmeyle başlar (Jones et al., 2007). Baklagil kökleri tarafından salgılanan flavonoidler, rhizobial hücrelerde NodD gibi transkripsiyonel düzenleyicileri aktive ederek nod genlerinin ekspresyonunu uyarır. Sonuçta bakteri tarafından sentezlenen Nod faktörleri, bitki hücrelerindeki reseptör kinazlar üzerinden sinyal iletimini tetikler ve nodül organogenezinin erken basamaklarını başlatır (Liu & Murray, 2016). Bu çerçeve, hem “konak özgüllüğünü” hem de nodül oluşumunun zamanlamasını açıklayan temel modeldir.

Nod faktörlerine yanıt olarak kök tüylerinde kıvrılma (root hair curling), enfeksiyon odağı oluşumu ve enfeksiyon ipliği gelişir (Esseling et al., 2003). Enfeksiyon ipliği, bakterilerin epidermisten kortekse doğru ilerlediği tüpsü bir yapıdır (Gage, 2004). Eş zamanlı olarak korteks hücrelerinde hücre bölünmeleri tetiklenir ve nodül primordiyumu oluşur. Nodül gelişimi; bitki hormonları, sinyal iletim ağları ve bitki tarafından yürütülen “otokontrol” mekanizmalarıyla sıkı şekilde düzenlenir. Bu düzenleme, aşırı nodül oluşumunu önleyerek bitkinin karbon maliyetini kontrol altında tutar (Valendia et al., 2022).

1.2. Nodül içinde metabolik entegrasyon ve azotun bitkiye aktarımı

Nodül oluşuktan sonra bakteriler bitki hücreleri içinde “symbiosome” zar sistemiyle çevrili halde bulunur ve farklılaşarak bakteroid formuna geçer. Bu aşamada simbiyotik etkinlik, bitki ile bakteri metabolizmasının olağanüstü düzeyde entegrasyonunu gerektirir (Limpens et al., 2005). Bitki, bakteriye başlıca dikarboksilik asitler (örn. malat) üzerinden karbon/enerji sağlar; bakteri ise fiksasyonla ürettiği amonyağı bitki metabolizmasına aktarır. Bu alışveriş, çok sayıda taşıyıcı protein ve membran geçiş mekanizması üzerinden yönetilir. Nodülün verimliliği; karbon arzı, solunum kapasitesi ve azot asimilasyon hızının dengesiyle yakından ilişkilidir (Kudlicka and Brown. 1997; Sreenivasulu and Wobus, 2013).

Üretilen NH_3 , nodül hücrelerinde hızla protonlanarak NH_4^+ formuna geçer ve bitkide GS/GOGAT gibi asimilasyon yollarıyla amino asitlere bağlanır (Schwember et al., 2019). Böylece “serbest amonyak” birikiminin fitotoksik etkileri sınırlanırken, bitkinin büyümesi için gerekli organik azot bileşiklerinin sentezi desteklenir (Liu et al., 2018). Bu aşamada nodül içi azot metabolizması, bitki genotipine ve türüne göre farklılık gösterebilir; örneğin bazı baklagillerde ureid taşınımı baskınken bazılarında amid (glutamin/asparagin) taşınımı daha öne çıkar (Atkins et al., 2001).

1.3. Oksijen paradoksu ve leghemoglobinin merkezi rolü

Simbiyotik azot fiksasyonunun en iyi bilinen biyokimyasal ikilemi, “oksijen paradoksu”dur: Nitrogenase oksijene duyarlıyken, fiksasyon için gereken ATP’nin üretilmesi yüksek solunum gerektirir ve bu da oksijen tüketimini zorunlu kılar (Kuzma et al., 1993). Nodüller bu çelişkiyi, difüzyon

bariyerleri ve özellikle leghemoglobin (Lb) aracılığıyla çözer. Leghemoglobin, nodül dokusunda oksijeni bağlayan bir hemoproteindir; oksijenin serbest düzeyini düşük tutarken bakteriyel solunum için “kontrollü oksijen iletimi” sağlar (Downie, 2005). Leghemoglobinin azot fiksasyonu için kritik olduğu, genetik ve fizyolojik çalışmalarla güçlü biçimde gösterilmiştir. Ott ve ark. (2005), leghemoglobinlerin işlevinin bozularak nodüllerde azot fiksasyonunun ciddi biçimde azaldığını, buna karşın bitkinin genel büyümesinin aynı ölçüde etkilenmeyebildiğini ortaya koyarak Lb’nin özellikle simbiyotik fiksasyon bağlamındaki özgül rolünü vurgulamıştır. Ayrıca leghemoglobinlerin yalnızca O₂ taşınmasında değil, nodülde reaktif azot türlerinin dengelenmesinde de rol alabildiği; NO’nun nitrogenase aktivitesini baskılayabildiği ve nodül yaşlanmasını hızlandırabildiği bildirilmektedir (Van Heerden et al., 2008).

1.4. Sürecin düzenlenmesi: bitki azot durumu ve çevresel geri beslemeler

Baklagillerde nodül oluşumu ve nitrogenase aktivitesi, yalnızca bakteri kapasitesine değil, aynı zamanda bitkinin azot durumu ve karbon bütçesine bağlıdır (Lepetit and Brouquisse, 2023). Bitkide mineral azot (özellikle nitrat/amonyum) düzeylerinin artması, nodülasyonun ve fiksasyonun baskılanmasına yol açabilmektedir (Glyan’ko et al., 2009). Bu düzenleme, tarımsal azot yönetiminde başlangıç azotu uygulamalarının neden dikkatle ele alınması gerektiğini açıklayan temel fizyolojik arka plandır.

Öte yandan kuraklık, tuzluluk ve sıcaklık stresi gibi abiyotik faktörler, enfeksiyon süreçlerini, nodül gelişimini ve nodül içi solunumu etkileyerek fiksasyonu sınırlandırabilir (Yavaş ve Ünay, 2018). Yapılan çalışmalar, özellikle kurak/yarı kurak koşullarda rhizobium–baklagil simbiyozunun çevresel streslerle güçlü şekilde etkileştiğini ve bunun saha performansında belirleyici olduğunu kapsamlı biçimde ortaya koymuştur (Owaresat et al., 2023).

Baklagillerde biyolojik azot fiksasyonu; konak ile bakterinin sinyalleşmesiyle başlayan nodülasyon sürecinin, nodül içinde bakteroid farklılaşması ve metabolik entegrasyonla devam ettiği, leghemoglobin aracılığıyla oksijen paradoksunun çözüldüğü ve tüm bu aşamaların bitkinin azot durumu ile çevresel koşullar tarafından düzenlendiği, enerji açısından

yoğun fakat agroekolojik değer bakımından son derece önemli bir süreçtir (Schwember et al., 2019).

2. RHİZOBİUM TÜRLERİNİN BAKLAGİLLERDE NODÜLASYON VERİMLİLİĞİ

Baklagiller ile rhizobiyal bakteriler arasındaki simbiyotik ilişki, yüksek düzeyde konak özgüllüğü (host specificity) ve strain düzeyinde performans farklılığı gösteren karmaşık bir biyolojik etkileşimdir (Oldroyd & Murray, 2011). Bu özgüllük, baklagil türlerinin köklerinden salgıladıkları sinyal molekülleri ile rhizobiyal bakterilerin genetik yapısı arasındaki uyuma dayanmaktadır (Long, 2001). Yemelik tane baklagillerde etkili nodülasyon ve biyolojik azot fiksasyonu, yalnızca uygun bakteri türüyle değil, aynı zamanda yüksek etkinlikte strainlerin varlığıyla mümkündür (Yates et al., 2004)

Nohut (*Cicer arietinum* L.) çoğunlukla *Mesorhizobium ciceri* ve *Mesorhizobium mediterraneum* ile simbiyoz kurmaktadır. Bu türlerin isimleri eski literatürde *Rhizobium ciceri* ve *Rhizobium mediterraneum* olarak geçmektedir (Nour et al., 1995). Bu türler, özellikle Akdeniz ve yarı kurak bölgelerde nohut üretiminin temel simbiyotik ortakları olarak tanımlanmıştır (Qureshi et al., 2009). Mercimek (*Lens culinaris* Medik.) için en yaygın ve etkili simbiyotik bakteri *Rhizobium leguminosarum* bv. *viciae* olup, aynı biyovar bezelye ve bakla gibi diğer *Viciae* üyeleriyle de simbiyoz kurabilmektedir (Nour et al., 1995). Fasulye (*Phaseolus vulgaris* L.) ise geniş adaptasyon yeteneğiyle bilinen *Rhizobium tropici*, *R. etli* (syn. *R. phaseolii*), *R. leguminosarum* bv. *phaseoli*, *R. gallicum* bv. *Phaseoli*, *R. giardinii* bv. *phaseoli* biovar ve türleri ile etkili nodülasyon göstermektedir. Özellikle *Rhizobium tropici*, yüksek sıcaklık ve asidik toprak koşullarına toleransı nedeniyle tropik ve subtropik bölgelerde fasulye üretimi için kritik öneme sahiptir (Martinez-Romero, 2003).

Vigna unguiculata (L.) Walp. (börülce), geniş simbiyotik esnekliğe sahip bir baklagil türü olup, farklı rhizobiyal gruplarla nodülasyon kurabilmektedir. Bununla birlikte, tropik, subtropik ve yarı kurak ekolojilerde yürütülen çalışmalar, börülcenin başlıca simbiyotik ortaklarının *Bradyrhizobium* cinsine ait türler olduğunu ve özellikle *Bradyrhizobium yuanmingense*, *B. elkanii* ve *B. japonicum*'un baskın rol oynadığını ortaya koymuştur (Zhang et al., 2008). Bu türler, yavaş gelişen (slow-growing) rhizobia grubunda yer almakta olup, söz

konusu ekolojilerde etkili biyolojik azot fiksasyonu sağlamaktadır (Pararajasingham & Knievel, 1990). Ayrıca bazı çevresel koşullarda *Rhizobium tropici*'nin de b örölce ile simbiyotik ilişki kurabildiğı bildirilmektedir (Martinez-Romero, 2003).

Ancak tür düzeyindeki bu genel eşleşmeler, sahadaki nodülasyon başarısını tek başına açıklamak için yeterli değildir. Aynı *Rhizobium* türü içerisinde yer alan farklı strainler arasında; nodül sayısı, nodül ağırlığı, nitrogenase aktivitesi ve bitkiye sağlanan toplam azot miktarı bakımından önemli farklılıklar gözlenmektedir. Bu durum, strain seçiminin, baklagil üretiminde verim ve sürdürülebilirlik açısından belirleyici bir faktör olduğunu ortaya koymaktadır (Singleton & Tavares, 1986). Nitekim Hungria ve Vargas (2000) ile Graham ve Vance (2003), rhizobiyal strainlerin çevresel koşullara adaptasyon kapasitesinin ve rekabet gücünün, tarla performansını belirleyen temel unsurlar arasında yer aldığını vurgulamıştır.

2.1. Nodülasyon verimliliğinde genetik ve fizyolojik farklılıklar

Rhizobiyal strainler arasındaki performans farklılıklarının temelinde, bakterilerin sahip olduğu nod genleri, azot fiksasyon genleri ve stres toleransına ilişkin düzenleyici genler yer almaktadır (Pararajasingham & Knievel, 1990). Etkili strainler, konak bitki kökleriyle daha hızlı ve güçlü sinyal alışverişi kurarak enfeksiyon ipliğı oluşumunu kolaylaştırmakta ve nodül organogenezini daha erken başlatabilmektedir. Bu erken ve etkin nodülasyon, bitkinin azot ihtiyacının kritik erken gelişme dönemlerinde karşılanmasını sağlamaktadır (Sessitsch et al., 2002).

Ayrıca, nodül içinde bakteroid farklılaşmasının derecesi ve nitrogenase enziminin stabilitesi de strainler arasında değişebilmektedir (Oono et al., 2009). Bazı strainler yüksek nodül sayısı oluşturmaya rağmen düşük azot fiksasyon kapasitesi gösterebilirken, bazıları daha az nodül ile daha yüksek toplam azot fiksasyonu sağlayabilmektedir (Mergaert et al., 2006). Bu nedenle nodülasyon verimliliğı yalnızca nodül sayısına değil, nodül başına fiksasyon etkinliğine bağlı olarak değerlendirilmelidir.

2.2. Bitki gelişimini teşvik edici özellikler ve nodülasyon

Son yıllarda rhizobiyal bakterilerin yalnızca simbiyotik azot fiksasyonu yapan organizmalar olmadığı, aynı zamanda bitki gelişimini teşvik edici

rizobakteriler (PGPR) olarak da işlev gördüğü yaygın biçimde kabul edilmektedir. Bu bağlamda, rhizobiyal strainlerin sahip olduğu bazı metabolik özellikler, nodülasyon verimliliğini ve bitki adaptasyonunu dolaylı olarak önemli ölçüde artırabilmektedir (Bhattacharyya & Jha, 2012). Bu özelliklerden biri ACC deaminaz enzimi üretimidir. ACC deaminaz, bitkide stres koşullarında artan etilen sentezinin öncül maddesi olan 1-aminosiklopropan-1-karboksilik asidi (ACC) parçalayarak etilen düzeylerini düşürür (Glick, 2014). Etilen, özellikle kuraklık, tuzluluk ve mekanik stres koşullarında kök büyümesini ve nodül oluşumunu baskılayan bir bitki hormonudur. ACC deaminaz üreten rhizobiyal strainler, etilen baskısını azaltarak kök uzamasını, kök tüyü oluşumunu ve enfeksiyon ipliği gelişimini desteklemektedir. Bu durum, stres koşullarında nodülasyonun sürdürülmesi açısından büyük önem taşımaktadır (Guinel, 2015).

Bir diğer önemli PGPR özelliği indol-3-asetik asit (IAA) üretimidir. IAA, kök hücre bölünmesini ve kök dallanmasını teşvik ederek bitkinin toprak hacmini daha etkin kullanmasını sağlar (Spaepen et al., 2007). Rhizobiyal bakteriler tarafından sentezlenen IAA, kök sisteminin gelişimini artırarak hem bakteri-bitki temas yüzeyini genişletmekte hem de nodül oluşumu için daha fazla potansiyel enfeksiyon noktası oluşturmaktadır. Böylece, IAA üreten strainler nodülasyon verimliliğini dolaylı yoldan artırmaktadır (Spaepen & Vanderleyden, 2011).

Rhizobiyal bakterilerin biyolojik azot fiksasyonunun ötesinde, fosfat çözündürme, siderofor üretimi ve özellikle B grubu vitaminlerin sentezi gibi çeşitli PGPR özellikleri sergilemesi, bitkinin besin alımını ve kök-bakteri etkileşimini güçlendirerek simbiyotik ilişkinin etkinliğini artırmaktadır (Timofeeva et al., 2023).

2.3. Abiyotik stres koşullarında strain seçiminin önemi

Kuraklık ve tuzluluk gibi abiyotik stresler, baklagillerde nodül oluşumunu ve biyolojik azot fiksasyonunu en fazla sınırlayan çevresel faktörler arasında yer almaktadır. Bu stresler, hem bitki kök gelişimini hem de rhizobiyal yaşam ve enfeksiyon süreçlerini olumsuz yönde etkilemektedir. Ancak stres toleransına sahip rhizobiyal strainlerin kullanımı, bu olumsuz etkilerin önemli ölçüde azaltılabileceğini göstermektedir (Serraj, 2003). Özellikle ACC deaminaz ve IAA üretimi yüksek olan strainlerin, kurak ve tuzlu koşullarda

nodül sayısını ve nodül canlılığını koruyabildiği; buna paralel olarak bitki biyokütlesi ve azot içeriğinin arttığı çeşitli çalışmalarla ortaya konmuştur. Bu bulgular, rhizobiyal aşılama çalışmalarında yalnızca “etkili azot fiksasyonu” kriterinin değil, aynı zamanda stres toleransı ve PGPR özelliklerinin birlikte değerlendirilmesi gerektiğini göstermektedir (Ma et al., 2004).

2.4. Tarımsal uygulamalar açısından değerlendirme

Rhizobiyal tür ve strain seçimi, baklagil üretiminde sürdürülebilir azot yönetiminin temel bileşenlerinden biridir. Yerel toprak ve iklim koşullarına uyumlu, rekabet gücü yüksek ve PGPR özellikleri gelişmiş strainlerin kullanımı; hem nodülasyon verimliliğini artırmakta hem de kimyasal azot gübrelerine olan bağımlılığı azaltmaktadır. Bu durum, özellikle kurak ve yarı kurak bölgelerde çevresel ve ekonomik açıdan önemli avantajlar sunmaktadır (Andrews & Andrews 2017). Baklagillerde nodülasyon verimliliği; konak bitki türü, rhizobiyal tür ve strain özellikleri ile çevresel koşulların etkileşimi sonucunda belirlenmektedir. Modern baklagil tarımında başarı, yalnızca doğru bakteri türünün seçilmesiyle değil, yüksek performanslı ve stres toleranslı rhizobiyal strainlerin etkin şekilde kullanılmasıyla mümkün hale gelmektedir (Allito et al., 2015).

3. TOPRAK AZOT DİNAMİKLERİNİ ETKİLEYEN FİZİKSEL VE KİMYASAL FAKTÖRLER

Toprak özellikleri hem rhizobiyal populasyonların yaşamını hem de baklagillerde biyolojik azot fiksasyonunun etkinliğini doğrudan etkileyen temel çevresel faktörler arasında yer almaktadır. Toprağın fiziksel ve kimyasal yapısı, rhizobiyal bakterilerin hayatta kalma yeteneğini, kök bölgesinde rekabet gücünü ve bitkiyle kurduğu simbiyotik ilişkinin başarısını belirlemektedir (Mohammadi et al., 2012). Bu nedenle toprak azot dinamiklerinin anlaşılması, sürdürülebilir azot yönetimi stratejilerinin geliştirilmesi açısından kritik öneme sahiptir.

Toprak pH'sı, rhizobiyal hayatta kalma ve nodül oluşumu üzerinde belirleyici rol oynayan en önemli kimyasal faktörlerden biridir (Hungria & Vargas, 2000). Çoğu *Rhizobium*, *Mesorhizobium* ve *Bradyrhizobium* türü, nötr ile hafif alkali (pH 6.0–7.5) koşullarda optimum gelişim göstermektedir. Aşırı asidik topraklarda (pH<5.5), rhizobiyal populasyon yoğunluğu azalmakta,

enfeksiyon ipliği oluşumu ve nodül gelişimi baskılanmaktadır (Zahran, 1999). Bazı Rhizobium türlerinin pH 4.6'ya kadar aktivite gösterdiği bildirilmiştir (Shamseldin & Werner, 2005). Asidik koşullar ayrıca alüminyum ve mangan toksisitesini artırarak kök büyümesini sınırlandırmakta ve dolaylı olarak simbiyotik azot fiksasyonunu olumsuz etkilemektedir. Benzer şekilde aşırı alkali topraklarda da besin elementlerinin yararışlılığı azalmakta ve nodülasyon verimliliği düşmektedir (Jaiswal et al., 2018).

Toprak organik madde içeriği, azot döngüsünün merkezinde yer alan bir diğer önemli faktördür. Organik madde, mikroorganizmalar için karbon ve enerji kaynağı sağlayarak mikrobiyal aktiviteyi destekler. Organik maddece zengin topraklarda azot mineralizasyonu daha dengeli gerçekleşirken, düşük organik madde içerikli topraklarda immobilizasyon süreçleri baskın olabilmektedir (Paul, 2015). Mineralizasyon sürecinde organik azot bileşikleri amonyum ve nitrat gibi bitkiler tarafından kullanılabilir formlara dönüştürülürken, immobilizasyon sürecinde mikroorganizmalar mineral azotu biyokütlelerine bağlayarak bitkiler için geçici olarak kullanılamaz hale getirmektedir. Bu durum, özellikle erken gelişme dönemlerinde baklagillerin azot beslenmesini sınırlandırabilmektedir (Schimel & Bennett, 2004).

Toprak tekstürü ve fiziksel yapısı da azot dinamikleri üzerinde önemli etkilere sahiptir. İnce tekstürlü ve iyi yapılaşmış topraklar, su tutma kapasitesi ve mikrobiyal aktivite açısından avantaj sağlarken, aşırı sıkışmış veya drenajı yetersiz topraklar oksijen eksikliğine yol açarak rhizobiyal solunumu ve nitrogenase aktivitesini olumsuz yönde etkileyebilir (Li et al., 2025). Nodül içinde oksijen dengesinin hassas olduğu dikkate alındığında, toprak havalanmasının simbiyotik azot fiksasyonu için dolaylı fakat kritik bir faktör olduğu anlaşılmaktadır.

Toprak kireç içeriği ve buna bağlı olarak kalsiyum karbonat düzeyi, mikro elementlerin yararışlılığı üzerinde önemli etkilere sahiptir. Özellikle demir (Fe) ve molibden (Mo), nitrogenase enziminin yapısal ve fonksiyonel bileşenleri arasında yer almaktadır. Yüksek kireçli topraklarda Fe ve Mo'nun bitki ve mikroorganizmalar tarafından alımı sınırlandırılabilen, bu durum nitrogenase aktivitesinin azalmasına yol açabilmektedir. Molibden eksikliği, azot fiksasyonunun doğrudan sınırlayıcı faktörlerinden biri olarak kabul edilmektedir (Seefeldt et al., 2009).

Toprakta mevcut mineral azot düzeyi, biyolojik azot fiksasyonunun düzenlenmesinde önemli bir geri besleme mekanizması oluşturur. Yüksek nitrat veya amonyum konsantrasyonları, nodül oluşumunu ve nitrogenase aktivitesini baskılayarak bitkinin simbiyotik azot fiksasyonuna olan ihtiyacını azaltmaktadır (Ferguson & Mathesius, 2014). Bu nedenle toprak azot dinamikleri, rhizobiyal aşılama ve gübreleme stratejilerinin birlikte değerlendirilmesini zorunlu kılmaktadır.

Toprak pH'sı, organik madde içeriği, fiziksel yapı, kireç oranı ve mineral azot düzeyleri; hem rhizobiyal populasyonların performansını hem de baklagillerde biyolojik azot fiksasyonunun etkinliğini belirleyen temel faktörlerdir. Bu özelliklerin dengeli biçimde yönetilmesi, sürdürülebilir azot kullanımının sağlanması ve çevresel etkilerin azaltılması açısından temel bir anahtar unsur olarak değerlendirilmektedir.

4. AŞILAMA TEKNİKLERİ VE UYGULAMA ZAMANININ VERİME ETKİSİ

Rhizobiyal aşılama, baklagil üretiminde biyolojik azot fiksasyonunu artırmak ve kimyasal azot gübrelere olan bağımlılığı azaltmak amacıyla yaygın olarak kullanılan çevre dostu bir uygulamadır. Doğal toprak koşullarında etkili rhizobiyal populasyonların bulunmadığı veya rekabet gücünün düşük olduğu alanlarda, uygun inokulantların kullanımı nodülasyon verimliliğini ve bitki gelişimini önemli ölçüde artırabilmektedir. Ancak aşılama başarısı, yalnızca inokulantın varlığına değil; uygulama tekniği, zamanlama ve çevresel koşulların uygunluğuna bağlı olarak değişmektedir.

4.1. Tohum kaplama (seed inoculation) yöntemi

Tohum kaplama yöntemi, rhizobiyal aşılama uygulamaları arasında en yaygın ve ekonomik yöntem olarak öne çıkmaktadır. Bu yöntemde inokulant, tohum yüzeyine yapıştırıcı maddeler (şeker çözeltileri, gum arabic vb.) kullanılarak uygulanır ve ekimle birlikte bakterilerin doğrudan kök bölgesine ulaşması sağlanır. Tohum kaplamanın en önemli avantajları; düşük maliyet, uygulama kolaylığı ve inokulantın hedef bölgeye etkin taşınmasıdır (Deaker et al., 2004). Bununla birlikte, tohum kaplama yöntemi bazı sınırlamalara da sahiptir. Kaplanan tohumların ekim öncesinde uzun süre bekletilmesi, yüksek sıcaklık ve düşük nem koşulları, inokulant içerisindeki canlı bakteri sayısının

hızla azalmasına neden olabilmektedir. Ayrıca fungusit veya insektisit ile muamele edilmiş tohumlarda, bu kimyasallar rhizobiyal canlılığı olumsuz etkileyebilmektedir. Bu nedenle tohum kaplama uygulamalarının, ekimden hemen önce ve mümkünse koruyucu kimyasallarla uyumlu inokulantlar kullanılarak yapılması önerilmektedir (Herridge, 2008).

4.2. Toprak uygulaması ve sıvı inokulantlar

Toprak uygulaması, inokulantın doğrudan ekim sırasına veya ekim öncesinde toprağa uygulanması esasına dayanmaktadır. Bu yöntem, özellikle toprakta mevcut rhizobiyal popülasyonun çok düşük olduğu veya toprak koşullarının tohum yüzeyinde bakteri yaşamını sınırladığı durumlarda avantaj sağlayabilmektedir. Toprak uygulamasında bakteriler, daha geniş bir kök bölgesine yayılarak bitkiyle temas etme şansını artırmaktadır (Brockwell et al., 1995).

Sıvı inokulantlar ise son yıllarda giderek artan ilgi gören uygulama formları arasında yer almaktadır. Sıvı formülasyonlar, yüksek canlı bakteri yoğunluğu, daha homojen uygulama ve tohum yüzeyine daha iyi tutunma gibi avantajlar sunmaktadır. Özellikle kuraklık, tuzluluk ve yüksek sıcaklık gibi stres koşullarında, sıvı inokulantların tohum kaplama yöntemine kıyasla daha istikrarlı sonuçlar verdiği bildirilmiştir. Bunun temel nedeni, sıvı formülasyonların bakterileri çevresel streslere karşı kısmen koruyabilmesidir (Tittabutr et al., 2007).

4.3. Uygulama zamanı ve çevresel koşulların önemi

Aşılama zamanlaması, rhizobiyal aşılama başarısının belirlenmesinde kritik bir faktördür. Ekimle eş zamanlı veya ekimden hemen önce yapılan aşılama uygulamaları, bakterilerin kök gelişiminin erken dönemlerinde bitkiyle etkileşime girmesini sağlayarak nodülasyonun erken başlamasına olanak tanır (Salvagiotti et al., 2008). Erken nodülasyon, bitkinin azot ihtiyacının özellikle fide döneminde karşılanması açısından büyük önem taşımaktadır.

Toprak sıcaklığı ve nem durumu, aşılama başarısını doğrudan etkileyen çevresel faktörler arasında yer almaktadır. Rhizobiyal bakterilerin çoğu, 15–30 °C aralığındaki toprak sıcaklıklarında optimum gelişim göstermektedir. Düşük sıcaklıklarda bakteri metabolizması yavaşlamakta, yüksek sıcaklıklarda ise canlılık kaybı artmaktadır (Hungria & Vargas, 2000). Benzer şekilde, toprak neminin yetersiz olduğu koşullarda bakterilerin kök bölgesine ulaşması ve

enfeksiyon ipliği oluşturmaları zorlaşmaktadır (Serraj et al., 1999). Bu nedenle aşılama uygulamalarının, mümkün olduğunca uygun sıcaklık ve nem koşullarında yapılması önerilmektedir.

4.4. Aşılama × çevre etkileşimi ve verim bileşenleri

Aşılama uygulamalarının etkinliği, çevresel koşullarla olan etkileşimine bağlı olarak değişmektedir. Aşılama × çevre etkileşimi; nodül sayısı, nodül kuru ağırlığı, nodül başına azot fiksasyon kapasitesi ve sonuçta bitki verimi üzerinde belirleyici rol oynamaktadır. Uygun çevresel koşullarda yapılan aşılama, nodül sayısını ve toplam azot fiksasyonunu artırarak bitki biyokütlesi ve tane veriminde anlamlı artışlar sağlayabilmektedir (Uçar & Erman, 2020). Bununla birlikte, yüksek mineral azot düzeylerine sahip topraklarda veya aşırı stres koşullarında aşılama etkisi sınırlı kalabilmektedir. Bu durum, aşılama uygulamalarının toprak azot durumu ve çevresel faktörler dikkate alınarak planlanması gerektiğini ortaya koymaktadır. Özellikle yarı kurak bölgelerde, aşılama ile birlikte toprak nemini koruyucu uygulamaların entegre edilmesi, aşılama başarısını artırabilmektedir (Soysal & Erman, 2020).

4.5. Tarımsal uygulamalar açısından genel değerlendirme

Rhizobiyal aşılama teknikleri ve uygulama zamanı, baklagil üretiminde sürdürülebilir azot yönetiminin temel bileşenlerinden biridir. Uygun inokulant seçimi, doğru uygulama tekniği ve çevresel koşullara duyarlı zamanlama; nodülasyon verimliliğini ve biyolojik azot fiksasyonunu maksimize ederek kimyasal azot girdilerini azaltmaktadır. Bu durum hem ekonomik hem de çevresel açıdan önemli kazanımlar sağlamaktadır. Rhizobiyal aşılama uygulamalarında “tek tip” yaklaşımlar yerine, toprak ve iklim koşullarına uyarlanmış, uygulama zamanı ve tekniği optimize edilmiş stratejilerin benimsenmesi, baklagil üretiminde verim ve sürdürülebilirliğin artırılması açısından büyük önem taşımaktadır.

5. RHİZOBİYAL AŞILAMA İLE KİMYASAL AZOT GÜBRE KULLANIMININ ENTEGRASYONU

Baklagil üretiminde kimyasal azot gübreleri ile biyolojik azot fiksasyonu arasındaki ilişki, sürdürülebilir azot yönetiminin temel bileşenlerinden biridir. Yüksek dozlarda uygulanan mineral azot, nodül oluşumunu ve nitrogenase aktivitesini baskılayarak simbiyotik azot fiksasyonunu sınırlandırmakta; bu durum hem baklagillerin doğal azot kazanım potansiyelinin yeterince kullanılmasını engellemekte hem de çevresel azot kayıplarını artırmaktadır (Cig et al., 2022).

Mineral azotun nodülasyon üzerindeki baskılayıcı etkisi, bitkinin enerji ekonomisiyle yakından ilişkilidir. Biyolojik azot fiksasyonu yüksek karbon maliyetine sahip bir süreç olduğundan, toprakta yeterli mineral azot bulunduğunda bitki daha düşük enerji gerektiren doğrudan azot alımını tercih etmekte ve simbiyotik ilişkiyi sınırlandırmaktadır. Bu durum, nodül sayısında azalma ve nitrogenase aktivitesinde düşüş şeklinde ortaya çıkmaktadır (Carroll & Mathews, 2018). Buna karşın, düşük veya başlangıç azotu (starter N) uygulamalarının erken fide gelişim döneminde yararlı olabileceği bildirilmektedir. Düşük dozlu azot, kök ve sürgün gelişimini destekleyerek fotosentetik kapasiteyi artırmakta ve ilerleyen dönemlerde nodül oluşumu için gerekli karbon kaynaklarının sağlanmasına katkı sunmaktadır (Gai et al., 2017).

Rhizobiyal aşılama ile azaltılmış azot gübrelemesinin entegrasyonu, nodülasyon, biyolojik azot fiksasyonu ve verim açısından olumlu sonuçlar doğurabilmektedir. Bu yaklaşım, çevresel etkileri ve girdi maliyetlerini azaltarak baklagil tarımında ekonomik ve ekolojik açıdan dengeli bir azot yönetimi stratejisi sunmaktadır.

6. KURU VE SULU KOŞULLARDA AZOT FİKSASYONUNUN STRES ALTINDAKİ DAVRANIŞI

Baklagillerde biyolojik azot fiksasyonu, çevresel koşullara son derece duyarlı bir süreçtir ve özellikle kuraklık, tuzluluk ve yüksek sıcaklık gibi abiyotik stres faktörleri tarafından önemli ölçüde sınırlandırılmaktadır. Bu stresler, hem konak bitkinin fizyolojisini hem de rhizobiyal bakterilerin yaşam ve metabolik aktivitelerini etkileyerek nodül oluşumu ve nitrogenase aktivitesi üzerinde doğrudan ve dolaylı etkiler oluşturmaktadır. Kuru ve sululu koşullar

arasındaki farklılıklar, azot fiksasyonunun miktarı, süresi ve verimliliği açısından belirleyici olmaktadır.

6.1. Kuraklık stresinin nodülasyon ve azot fiksasyonu üzerindeki etkileri

Kuraklık stresi, baklagillerde biyolojik azot fiksasyonunu sınırlandıran en önemli çevresel faktörlerden biridir. Toprak su içeriğinin azalması, kök büyümesini ve kök tüyü gelişimini baskılayarak rhizobiyal enfeksiyon süreçlerini olumsuz yönde etkilemektedir. Bunun sonucunda enfeksiyon ipliği oluşumu gecikmekte veya tamamen engellenebilmektedir. Kurak koşullarda oluşan nodüller ise genellikle daha küçük, kısa ömürlü ve düşük fiksasyon kapasitesine sahiptir.

Kuraklığın azot fiksasyonu üzerindeki en kritik etkilerinden biri, karbon akışının azalmasıdır. Fotosentetik aktivitenin düşmesiyle birlikte nodüllere taşınan karbonhidrat miktarı azalmakta, bu durum nitrogenase enziminin gerektirdiği yüksek enerji ihtiyacının karşılanmasını zorlaştırmaktadır. Karbon sınırlaması, nodül solunumunu ve ATP üretimini kısıtlayarak nitrogenase aktivitesinde belirgin bir düşüşe yol açmaktadır. Ayrıca kuraklık, nodül dokularında oksijen difüzyonunu değiştirerek “oksijen paradoksunun” daha da belirginleşmesine neden olmaktadır.

Kurak stres altında nodül yaşlanmasının (senesens) hızlandığı ve leghemoglobin düzeylerinin azaldığı bildirilmiştir. Bu durum, nodül içi oksijen dengesinin bozulmasına ve nitrogenase enziminin inaktivasyonuna yol açmaktadır. Sonuç olarak, kuraklık koşullarında biyolojik azot fiksasyonu genellikle erken dönemde azalmakta ve bitkinin azot beslenmesi olumsuz etkilenmektedir.

6.2. Tuzluluk stresinin simbiyotik sistem üzerindeki etkileri

Tuzluluk stresi, özellikle yarı kurak ve sulama suyu kalitesi sınırlı bölgelerde baklagil üretimini kısıtlayan önemli bir faktördür. Yüksek tuz konsantrasyonları, rhizobiyal bakterilerin hayatta kalma ve çoğalma yeteneğini azaltmakta, kök yüzeyinde bakteri-bitki etkileşimini zayıflatmaktadır. Tuzluluk ayrıca kök hücre zarlarında iyon dengesini bozarak enfeksiyon ipliği gelişimini ve nodül organogenezini sınırlandırmaktadır (Wekesa et al., 2022).

Nodül içi düzeyde tuzluluk, ozmotik stres ve iyon toksisitesi yoluyla bakteroid metabolizmasını baskılamakta ve nitrogenase aktivitesini

düşürmektedir. Özellikle sodyum ve klor iyonlarının birikimi, nodül dokularında yapısal bozulmalara yol açabilmektedir. Tuzluluk stresi altında azot fiksasyonundaki düşüşün, bitkide su stresine benzer şekilde karbon tahsisindeki azalmayla da ilişkili olduğu bildirilmektedir (Sindhu et al., 2020).

6.3. Yüksek sıcaklık stresinin etkileri

Yüksek sıcaklık, hem bitki fizyolojisi hem de rhizobiyal metabolizma üzerinde olumsuz etkilere sahiptir. Rhizobiyal bakterilerin çoğu 25–30 °C aralığında optimum aktivite gösterirken, bu aralığın üzerindeki sıcaklıklar bakteri canlılığını ve enfeksiyon yeteneğini azaltabilmektedir. Yüksek sıcaklıklar ayrıca nitrogenase enziminin stabilitesini bozarak fiksasyon kapasitesini düşürmektedir (Aranjuelo et al., 2015).

Sıcaklık stresinin bir diğer etkisi, nodül içi oksijen düzenlemesinin bozulmasıdır. Artan solunum hızı ve değişen membran geçirgenliği, nodül dokularında oksijen dengesini olumsuz etkileyerek nitrogenase inaktivasyonuna neden olabilmektedir. Bu durum özellikle kuraklıkla birlikte görüldüğünde, azot fiksasyonu üzerindeki baskı daha da artmaktadır (Hungria & Franco, 1993)

6.4. Sulu koşullarda azot fiksasyonu ve stres karşılaştırması

Sulu koşullarda yetiştirilen baklagiller, genellikle daha stabil bir karbon akışı ve kök gelişimi sergilediklerinden, nodül oluşumu ve azot fiksasyonu açısından avantajlıdır. Yeterli toprak nemi, rhizobiyal enfeksiyon süreçlerini kolaylaştırmakta ve nodüllerin daha uzun süre aktif kalmasını sağlamaktadır. Ancak aşırı sulama veya drenaj yetersizliği durumunda ortaya çıkan oksijen eksikliği (hipoksi), nodül solunumunu ve nitrogenase aktivitesini olumsuz etkileyebilmektedir. Bu nedenle sulu koşulların avantajı, uygun su yönetimi ile birlikte değerlendirilmelidir (Pucciariello et al., 2019)

6.5. Strese toleranslı rhizobiyal strainler ve yönetim stratejileri

Kuraklık, tuzluluk ve sıcaklık streslerinin olumsuz etkilerini azaltmada strese toleranslı rhizobiyal strainlerin kullanımı önemli bir strateji olarak öne çıkmaktadır. ACC deaminaz ve osmoprotektan üretme kapasitesine sahip rhizobiyal strainlerin, stres koşullarında nodül sayısını ve nitrogenase aktivitesini daha iyi koruyabildiği bildirilmektedir. Bu strainler, bitkide stres etilenini baskılayarak kök ve nodül gelişimini desteklemektedir (Saikia et al.,

2018). Buna ek olarak, uygun tarımsal uygulamalar (erken ekim, toprak nemini koruyucu yöntemler, organik madde artırımı) ile birlikte yapılan aşılama uygulamaları, stres koşullarında azot fiksasyonunun korunmasına katkı sağlamaktadır. Bu entegre yaklaşım, özellikle kurak ve yarı kurak bölgelerde baklagil üretiminin sürdürülebilirliği açısından kritik öneme sahiptir (Sapre et al., 2019).

Kuru ve sulu koşullar arasındaki farklılıklar, baklagillerde biyolojik azot fiksasyonunun miktarını ve sürekliliğini belirleyen temel faktörlerdir. Abiyotik streslerin etkilerini azaltmaya yönelik biyolojik ve agronomik stratejilerin birlikte uygulanması, azot fiksasyonunun korunması ve verim sürdürülebilirliğinin sağlanması açısından vazgeçilmezdir.

7. TOPRAK MİKROBİYAL ÇEŞİTLİLİĞİ İLE AZOT FİKSASYONU ARASINDAKİ ETKİLEŞİM

Toprak mikrobiyomu; bakteri, arkea, mantar ve diğer mikroorganizmalardan oluşan karmaşık bir topluluk olup, bitki gelişimi ve besin döngülerinin düzenlenmesinde temel bir role sahiptir. Baklagillerde biyolojik azot fiksasyonunun başarısı yalnızca inokule edilen rhizobiyal bakterilerin etkinliğine değil, aynı zamanda rizosferde bulunan yerli mikrobiyal toplulukların yapısı ve dinamiklerine de bağlıdır. Bu nedenle toprak mikrobiyal çeşitliliği, rhizobiyal simbiyozun kurulması, sürdürülmesi ve verimliliği açısından kritik bir unsur olarak değerlendirilmektedir (Allito et al., 2015)

Rhizobiyal bakteriler, rizosferde diğer bakteri, mantar ve aktinomisetlerle besin maddeleri, kök salgıları ve yaşam alanı için yoğun bir rekabet içerisinde. Bu rekabet, özellikle inokule edilen strainlerin kök yüzeyine tutunmasını ve enfeksiyon süreçlerini sınırlayabilmektedir. Toprakta doğal olarak bulunan ancak azot fiksasyon kapasitesi düşük veya simbiyotik olmayan rhizobiyal populasyonlar, “rekabetçi ancak etkisiz” rhizobia olarak tanımlanmakta ve inokulantların nodül oluşturma başarısını azaltabilmektedir (Burghardt & Dicenzo, 2023).

Buna karşılık, mikrobiyal çeşitliliğin yüksek olduğu sistemlerde bitki-mikroorganizma etkileşimlerinin daha stabil ve çevresel dalgalanmalara karşı daha dirençli olduğu bilinmektedir. Yüksek çeşitlilik; patojen baskısının azalması, besin elementlerinin döngüsünün hızlanması ve bitkilerin stres koşullarına adaptasyonunun artması yoluyla rhizobiyal simbiyozu dolaylı

olarak desteklemektedir (Mendoza-Suárez et al., 2021). Fosfat çözücü bakteriler, bitki gelişimini teşvik edici rizobakteriler (PGPR) ve arbusküler mikorizal mantarlar gibi yararlı mikroorganizmalar, fosfor yararlanılabilirliğini artırarak nodül gelişimi ve azot fiksasyonunu destekleyebilmektedir (Rahman et al., 2023)

Ancak yoğun tarımsal girdiler, monokültür ve aşırı toprak işleme mikrobiyal çeşitliliği azaltarak simbiyotik ilişkileri zayıflatabilmektedir. Buna karşılık, organik maddece zengin, ürün rotasyonu uygulanan ve minimum toprak işleme yapılan sistemlerde mikrobiyal çeşitliliğin arttığı ve rhizobiyal simbiyozun daha istikrarlı hale geldiği bildirilmektedir. Bu bağlamda, sürdürülebilir baklagil tarımı için rhizobiyal aşılama stratejilerinin toprak mikrobiyomu perspektifiyle planlanması büyük önem taşımaktadır.

8. SÜRDÜRÜLEBİLİR AZOT YÖNETİMİ İÇİN TÜRKİYE İÇİN BÖLGESEL BİR MODEL ÖNERİSİ

Türkiye, farklı iklim tipleri, toprak özellikleri ve üretim desenleriyle yüksek düzeyde agro-ekolojik çeşitlilik gösteren bir ülkedir. Bu çeşitlilik, baklagil tarımı ve buna bağlı azot yönetimi stratejilerinin bölgesel düzeyde farklılaştırılmasını zorunlu kılmaktadır. Sürdürülebilir azot yönetimi; biyolojik azot fiksasyonunun etkin kullanımı, kimyasal azot girdilerinin optimize edilmesi ve çevresel etkilerin azaltılmasını hedefleyen bütüncül bir yaklaşımı gerektirmektedir. Bu bağlamda, Türkiye için geliştirilecek bölgesel modellerin, yerel iklim ve toprak koşullarını dikkate alması büyük önem taşımaktadır.

8.1. Güneydoğu Anadolu Bölgesi: Kuraklık odaklı azot yönetimi

Güneydoğu Anadolu Bölgesi, yarı kurak ve kurak iklim koşulları, yüksek sıcaklıklar ve düzensiz yağış rejimi ile karakterizedir. Bu bölgede baklagil üretiminde karşılaşılan temel sınırlayıcı faktörler; su stresi, düşük organik madde içeriği ve yüksek kireçli topraklardır. Kuraklık stresi, hem bitki gelişimini hem de biyolojik azot fiksasyonunu önemli ölçüde sınırlandırmaktadır (Uçar & Erman, 2020). Bu nedenle Güneydoğu Anadolu için önerilen sürdürülebilir azot yönetimi modeli, kuraklık stresine dayanıklı rhizobiyal strainlerin kullanımı üzerine kurulmalıdır. ACC deaminaz ve osmoprotektan üretme kapasitesine sahip rhizobiyal strainler, kurak koşullarda

nodül oluşumunu ve nitrogenase aktivitesini daha iyi koruyabilmektedir (Çakmakçı & Karagöz, 2020). Ayrıca aşılama uygulamalarının, erken ekim ve toprak nemini koruyucu tarımsal uygulamalar (azaltılmış toprak işleme, anız örtüsü) ile entegre edilmesi önerilmektedir. Kimyasal azot gübrelemesi açısından ise düşük dozlu başlangıç azotu uygulamaları, yalnızca erken fide gelişimini destekleyecek düzeyde sınırlandırılmalıdır (Soysal & Erman, 2020). Böylece biyolojik azot fiksasyonunun baskılanması önlenirken, verim sürdürülebilirliği sağlanabilir. Bu yaklaşım, aynı zamanda nitrat yıkanması ve sera gazı emisyonlarının azaltılmasına katkı sunmaktadır.

8.2. İç Anadolu Bölgesi: Toprak organik maddesi ve dengeleyici azot stratejileri

İç Anadolu Bölgesi, geniş tarım alanları, düşük yağış miktarı ve organik maddece fakir toprakları ile Türkiye baklagil üretiminde stratejik bir konuma sahiptir. Bölgedeki temel sorunlardan biri, uzun yıllar süren yoğun toprak işleme ve monokültür uygulamalarının toprak organik maddesini ciddi biçimde azaltmış olmasıdır (Dedeoğlu ve ark., 2020). Düşük organik madde, mikrobiyal aktiviteyi ve dolayısıyla rhizobiyal simbiyozun etkinliğini sınırlamaktadır. Bu bölge için önerilen azot yönetimi modeli, öncelikle toprak organik maddesinin artırılmasını hedeflemelidir.

Yeşil gübreleme, baklagil–tahıl rotasyonları ve organik atıkların (ahır gübresi, kompost) dengeli kullanımı, mikrobiyal çeşitliliği artırarak biyolojik azot fiksasyonunu desteklemektedir. Organik madde artışı, aynı zamanda toprak su tutma kapasitesini iyileştirerek kuraklık stresinin etkilerini hafifletmektedir (Çalışkan ve ark., 2013). İç Anadolu’da rhizobiyal aşılama uygulamaları, genellikle yüksek potansiyel taşımaktadır; çünkü birçok alanda doğal rhizobiyal populasyonlar yetersiz veya etkisizdir. Aşılama ile birlikte düşük–orta düzeyde azot gübrelemesi, özellikle başlangıç döneminde bitki gelişimini destekleyerek verim kayıplarını önleyebilir. Bu entegre yaklaşım hem üretici gelirlerini artırmakta hem de çevresel riskleri azaltmaktadır.

8.3. Doğu Anadolu Bölgesi: Düşük sıcaklığa adaptasyon ve simbiyotik verimlilik

Doğu Anadolu Bölgesi, yüksek rakım, kısa ve serin vejetasyon süresi ve düşük toprak sıcaklıkları ile karakterizedir (Çelik et al., 2018). Bu koşullar,

rhizobiyal enfeksiyon süreçlerini ve nodül gelişimini geciktirebilmekte; dolayısıyla biyolojik azot fiksasyonunun etkinliğini sınırlandırabilmektedir (Dart & Day, 1971). Bölgedeki temel sınırlayıcı faktör, düşük sıcaklığa bağlı simbiyotik gecikme olarak öne çıkmaktadır. Bu nedenle Doğu Anadolu için sürdürülebilir azot yönetimi modeli, düşük sıcaklıklara adapte olmuş rhizobiyal strainlerin seçilmesine odaklanmalıdır. Soğuk toleranslı strainler, erken dönemde kök enfeksiyonunu ve nodül oluşumunu teşvik ederek kısa vejetasyon süresinden daha etkin yararlanılmasını sağlamaktadır. Ayrıca ekim zamanının dikkatle planlanması ve toprak sıcaklığını artırıcı uygulamaların kullanılması, simbiyotik etkinliği artırabilmektedir. Kimyasal azot gübrelemesi, bu bölgede de sınırlı ve dikkatli biçimde uygulanmalıdır. Düşük dozlu başlangıç azotu, erken gelişim döneminde avantaj sağlayabilir; ancak yüksek dozlar nodülasyonun gecikmesine ve biyolojik azot fiksasyonunun baskılanmasına yol açabilir.

8.4. Karadeniz Bölgesi: Yüksek yağış ve asidik toprak koşullarında azot yönetimi

Karadeniz Bölgesi, yıl boyunca yüksek ve düzenli yağış rejimi, nispeten düşük buharlaşma ve çoğunlukla asidik karakterli toprakları ile Türkiye'nin diğer tarım bölgelerinden belirgin biçimde ayrılmaktadır. Bu koşullar, baklagillerde rhizobiyal enfeksiyon süreçleri açısından genel olarak elverişli olmakla birlikte, düşük pH'ya bağlı olarak rhizobiyal canlılık ve nodül fonksiyonlarının sınırlandırılabilirdiği durumlar da ortaya çıkabilmektedir. Asidik topraklarda özellikle alüminyum toksisitesi ve fosfor bağlanması, kök gelişimini ve nodül etkinliğini olumsuz etkileyerek biyolojik azot fiksasyonunun potansiyelini düşürebilmektedir (Zhao & Shen, 2018). Bu nedenle Karadeniz Bölgesi için sürdürülebilir azot yönetimi; asidik koşullara toleranslı rhizobiyal strainlerin seçimi, toprak pH'sını dengelemeye yönelik kireçleme uygulamaları ve fosfor yarıyışlılığını artırıcı stratejilerle birlikte ele alınmalıdır. Aksi takdirde, yüksek yağış koşullarının sağladığı avantajlara rağmen, biyolojik azot fiksasyonu istenen düzeylere ulaşamayabilmektedir.

8.5. Ege Bölgesi: Ilıman iklimde dengeleyici ve entegre azot stratejileri

Ege Bölgesi, ılıman iklim koşulları, nispeten dengeli yağış dağılımı ve tarımsal üretimdeki çeşitliliği ile baklagillerde biyolojik azot fiksasyonu açısından yüksek potansiyel taşıyan bölgelerden biridir. Bölge topraklarının önemli bir kısmında pH'nın nötr–hafif alkali aralıkta seyretmesi, rhizobiyal enfeksiyon ve nodül gelişimi için uygun bir zemin oluşturmaktadır. Bununla birlikte, yoğun tarımsal faaliyetler ve uzun yıllara dayanan kimyasal gübre kullanımı, bazı alanlarda toprak organik maddesinin azalmasına ve mikrobiyal dengenin bozulmasına yol açmaktadır (Merken & Önder, 2014). Ege Bölgesi için sürdürülebilir azot yönetimi yaklaşımı; rhizobiyal aşılama uygulamalarının, dengeli mineral azot kullanımı ve organik maddeyi artırıcı tarımsal uygulamalarla entegre edilmesini gerektirmektedir. Bu bütüncül yaklaşım, bölgenin yüksek verim potansiyelini korurken çevresel azot kayıplarının sınırlandırılmasına katkı sağlayacaktır.

8.6. Akdeniz Bölgesi: Yüksek sıcaklık ve mevsimsel su stresi altında azot fiksasyonu

Akdeniz Bölgesi, uzun ve sıcak vejetasyon dönemi, yaz aylarında belirginleşen mevsimsel kuraklık ve yüksek sıcaklıklar ile karakterizedir. Bu çevresel koşullar, baklagillerde nodül oluşumu ve biyolojik azot fiksasyonu üzerinde sınırlayıcı etkilere yol açabilmektedir. Özellikle yüksek sıcaklık ve su stresi, rhizobiyal enfeksiyon süreçlerini baskılamakta, nodül ömrünü kısaltmakta ve nitrogenase aktivitesinin erken dönemde düşmesine neden olabilmektedir (Jumrani et al., 2024). Akdeniz Bölgesi için önerilen sürdürülebilir azot yönetimi modeli; yüksek sıcaklık ve kuraklık stresine toleranslı rhizobiyal strainlerin kullanımı, ekim zamanının dikkatle planlanması ve toprak nemini koruyucu tarımsal uygulamaların yaygınlaştırılması üzerine kurulmalıdır. Bu stratejiler, biyolojik azot fiksasyonunun sürekliliğini destekleyerek bölge koşullarında baklagil üretiminin verim ve stabilitesini artırma potansiyeli taşımaktadır.

8.7. Marmara Bölgesi: Yoğun tarımsal baskı altında entegre ve kontrollü azot yönetimi

Marmara Bölgesi, ılıman geçiş iklimi, nispeten düzenli yağış rejimi ve Türkiye'nin en yoğun tarımsal faaliyetlerinin yürütüldüğü bölgelerinden biri olması nedeniyle, baklagillerde azot yönetimi açısından kendine özgü fırsatlar ve riskler barındırmaktadır. Bölge toprakları genel olarak nötr-hafif alkali pH aralığında yer almakta ve bu durum rhizobiyal enfeksiyon ile nodül gelişimi için uygun bir zemin oluşturmaktadır (Taşova & Akın, 2013). Ancak yüksek üretim baskısı, yoğun kimyasal gübre kullanımı ve kısa münavebe sistemleri, birçok alanda toprak azot dengesinin bozulmasına ve biyolojik azot fiksasyonunun baskılanmasına yol açabilmektedir. Özellikle yüksek başlangıç azotu uygulamaları, nodül oluşumunu sınırlayarak baklagillerin simbiyotik azot kazanım potansiyelini düşürmektedir. Bu nedenle Marmara Bölgesi için sürdürülebilir azot yönetimi yaklaşımı; rhizobiyal aşılama uygulamalarının, azaltılmış ve kontrollü azot gübrelemesi ile birlikte planlanmasını gerektirmektedir. Ayrıca ürün rotasyonlarının baklagil ağırlıklı şekilde düzenlenmesi ve organik maddeyi artırıcı uygulamaların yaygınlaştırılması, bölge koşullarında hem verim istikrarının sağlanması hem de çevresel azot kayıplarının sınırlandırılması açısından kritik öneme sahiptir.

8.8. Bölgesel modelin bütüncül değerlendirmesi

Türkiye için önerilen bölgesel sürdürülebilir azot yönetimi modeli, tek tip uygulamalar yerine bölgeye özgü, esnek ve entegre stratejilerin benimsenmesini öngörmektedir. Rhizobiyal aşılama, azaltılmış azot gübrelemesi ve toprak yönetimi uygulamalarının birlikte ele alınması; hem verim artışı hem de çevresel etkilerin azaltılması açısından büyük önem taşımaktadır. Türkiye'nin agro-ekolojik çeşitliliği dikkate alınarak geliştirilecek bölgesel azot yönetimi modelleri; baklagil üretiminde sürdürülebilirliğin sağlanması, girdi maliyetlerinin düşürülmesi ve çevresel risklerin azaltılması için güçlü bir bilimsel ve pratik çerçeve sunmaktadır.

SONUÇ

Yemeklik tane baklagillerde azot yönetimi, yalnızca bir besleme stratejisi değil; bitki, mikroorganizma ve toprak arasındaki karmaşık etkileşimlerin birlikte ele alınmasını gerektiren çok boyutlu bir üretim

bileşenidir. Biyolojik azot fiksasyonu, tek başına bir fizyolojik süreç olarak değil, çevresel koşullar ve tarımsal uygulamalar tarafından şekillenen dinamik bir sistem olarak değerlendirilmelidir. Bu zamana kadar yapılan çalışmalar sonucunda elde edilen bulgular, baklagillerde sürdürülebilir azot yönetiminin tek bir uygulamaya indirgenemeyeceğini; aksine biyolojik, kimyasal ve ekolojik bileşenlerin eşgüdümlü biçimde yönetilmesini zorunlu kıldığını açık biçimde ortaya koymaktadır.

Rhizobiyal simbiyozun etkinliği; konak bitkinin gelişimsel durumu, rhizobiyal strainlerin fonksiyonel özellikleri ve toprak ortamının fiziksel–kimyasal yapısıyla doğrudan ilişkilidir. Özellikle abiyotik stres koşullarında biyolojik azot fiksasyonunun kırılğan bir yapıya sahip olduğu; ancak uygun simbiyotik ortakların seçimi ve doğru azot yönetimi stratejilerinin uygulanmasıyla bu kırılğanlığın önemli ölçüde azaltılabildiği görülmektedir. Bu bağlamda, rhizobiyal aşılama ile kimyasal azot girdilerinin dengeli ve bilinçli biçimde birlikte kullanılması, verim kaybı oluşturmaksızın azot kullanım etkinliğini artıran rasyonel ve uygulanabilir bir yaklaşım olarak öne çıkmaktadır.

Türkiye’nin agro-ekolojik çeşitliliği dikkate alındığında, sürdürülebilir azot yönetiminin tek tip bir model üzerinden ele alınması mümkün değildir. Kuraklık, düşük organik madde içeriği veya düşük sıcaklık gibi sınırlayıcı faktörler, bölgeden bölgeye değişen öncelikler doğurmakta; bu durum yerel koşullara uyarlanmış stratejilerin gerekliliğini ortaya koymaktadır. Bu nedenle, biyolojik azot fiksasyonunu merkezine alan ancak bölgesel iklim ve toprak özelliklerine duyarlı, esnek ve uyarlanabilir azot yönetim modellerinin geliştirilmesi kritik önem taşımaktadır.

Sonuç olarak, baklagil tarımında sürdürülebilirlik; biyolojik azot fiksasyonunun potansiyelini etkin biçimde kullanan, kimyasal azot girdilerine olan bağımlılığı azaltan ve çevresel yükü en aza indirirken üretici açısından uygulanabilirliği yüksek entegre azot yönetimi yaklaşımlarının benimsenmesiyle mümkün olacaktır. Bu yaklaşım, yalnızca verim ve kalite artışı değil, aynı zamanda uzun vadede toprak sağlığının korunması ve tarımsal üretimin çevresel sürdürülebilirliği açısından da stratejik bir gereklilik olarak değerlendirilmelidir.

KAYNAKLAR

- Allito, B. B., Nana, E. M., & Alemneh, A. A. (2015). Rhizobia strain and legume genome interaction effects on nitrogen fixation and yield of grain legume: A review. *Molecular Soil Biology*, 6.
- Andrews, M., & Andrews, M. E. (2017). Specificity in legume–rhizobia symbioses. *International Journal of Molecular Sciences*, 18(4), 705.
- Aranjuelo, I., Aldasoro, J., Arrese-Igor, C., Erice, G., & Sanz-Sáez, Á. (2015). How does high temperature affect legume nodule symbiotic activity? In *Legume nitrogen fixation in a changing environment: Achievements and challenges* (pp. 67–87). Springer.
- Atkins, C. A., Shelp, B. J., Storer, P. J., & Pate, J. S. (1984). Nitrogen nutrition and the development of biochemical functions associated with nitrogen fixation and ammonia assimilation of nodules on cowpea seedlings. *Planta*, 162(4), 327–333.
- Avenhaus, U., Cabeza, R. A., Liese, R., Lingner, A., Dittert, K., Salinas-Riester, G., & Schulze, J. (2016). Short-term molecular acclimation processes of legume nodules to increased external oxygen concentration. *Frontiers in Plant Science*, 6, 1133.
- Bhattacharyya, P. N., & Jha, D. K. (2012). Plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR): Emergence in agriculture. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 28(4), 1327–1350.
- Brockwell, J., Bottomley, P. J., & Thies, J. E. (1995). Manipulation of rhizobia microflora for improving legume productivity and soil fertility: A critical assessment. *Plant and Soil*, 174(1), 143–180.
- Burghardt, L. T., & DiCenzo, G. C. (2023). The evolutionary ecology of rhizobia: Multiple facets of competition before, during, and after symbiosis with legumes. *Current Opinion in Microbiology*, 72, 102281.
- Carroll, B. J., & Mathews, A. (2018). Nitrate inhibition of nodulation in legumes. In *Molecular biology of symbiotic nitrogen fixation* (pp. 159–180). CRC Press.
- Çakmakçı, R., & Karagöz, H. (2020). Effect of plant growth promoting rhizobacteria on growth, nutrient uptake and physiological parameters in sugar beet under different watering regimes. *ÇOMÜ Ziraat Fakültesi Dergisi*, 8(2), 301–317.

- Çalışkan, S., Erdogan, C., Arslan, M., & Çalışkan, M. E. (2013). Comparison of organic and traditional production systems in chickpea (*Cicer arietinum* L.). *Turkish Journal of Field Crops*, 18(1), 34–39.
- Cig, F., Ceritoğlu, M., Açıkbaş, S., Uçar, Ö., Özçınar, A. B., Kılıç, R., & Sabagh, A. E. (2022). Biological nitrogen fixation: An analysis of intoxicating tribulations from pesticides. In *Managing plant production under changing environment* (pp. 351–370).
- Dart, P. J., & Day, J. M. (1971). Effects of incubation temperature and oxygen tension on nitrogenase activity of legume root nodules. *Plant and Soil*, 35(1), 167–184.
- Deaker, R., Roughley, R. J., & Kennedy, I. R. (2004). Legume seed inoculation technology—A review. *Soil Biology and Biochemistry*, 36(8), 1275–1288.
- Deveryshetty, J., & Antony, E. (2021). Electrons and protons: Nitrogenase. In J. Jez (Ed.), *Encyclopedia of Biological Chemistry* (3rd ed., Vol. 2, pp. 586–595). Elsevier.
- Downie, J. A. (2005). Legume haemoglobins: Symbiotic nitrogen fixation needs bloody nodules. *Current Biology*, 15(6), R196–R198.
- Esseling, J. J., Lhuissier, F. G., & Emons, A. M. C. (2003). Nod factor-induced root hair curling: Continuous polar growth towards the point of nod factor application. *Plant Physiology*, 132(4), 1982–1988.
- Ferguson, B. J., & Mathesius, U. (2014). Phytohormone regulation of legume–rhizobia interactions. *Journal of Chemical Ecology*, 40(7), 770–790.
- Gage, D. J. (2004). Infection and invasion of roots by symbiotic, nitrogen-fixing rhizobia during nodulation of temperate legumes. *Microbiology and Molecular Biology Reviews*, 68(2), 280–300.
- Glick, B. R. (2014). Bacteria with ACC deaminase can promote plant growth and help to feed the world. *Microbiological Research*, 169(1), 30–39.
- Glyan’ko, A. K., Vasil’eva, G. G., Mitanova, N. B., & Ishchenko, A. A. (2009). The influence of mineral nitrogen on legume–rhizobium symbiosis. *Biology Bulletin*, 36(3), 250–258.
- Graham, P. H., & Vance, C. P. (2003). Legumes: Importance and constraints to greater use. *Plant Physiology*, 131(3), 872–877.
- Guinel, F. C. (2015). Ethylene, a hormone at the center-stage of nodulation. *Frontiers in Plant Science*, 6, 1121.

- Harwood, C. S. (2020). Iron-only and vanadium nitrogenases: Fail-safe enzymes or something more? *Annual Review of Microbiology*, 74, 247–266.
- Herridge, D. F. (2008). Inoculation technology for legumes. In *Nitrogen-fixing leguminous symbioses* (pp. 77–115). Springer.
- Hungria, M., & Franco, A. A. (1993). Effects of high temperature on nodulation and nitrogen fixation by *Phaseolus vulgaris* L. *Plant and Soil*, 149(1), 95–102.
- Hungria, M., & Vargas, M. A. (2000). Environmental factors affecting N₂ fixation in grain legumes in the tropics, with an emphasis on Brazil. *Field Crops Research*, 65(2–3), 151–164.
- Jones, K. M., Kobayashi, H., Davies, B. W., Taga, M. E., & Walker, G. C. (2007). How rhizobial symbionts invade plants: The *Sinorhizobium–Medicago* model. *Nature Reviews Microbiology*, 5(8), 619–633.
- Lepetit, M., & Brouquisse, R. (2023). Control of the rhizobium–legume symbiosis by the plant nitrogen demand. *Frontiers in Plant Science*, 14, 1114840.
- Lindström, K., & Mousavi, S. A. (2020). Effectiveness of nitrogen fixation in rhizobia. *Microbial Biotechnology*, 13(5), 1314–1335.
- Liu, C. W., & Murray, J. D. (2016). The role of flavonoids in nodulation host-range specificity. *Plants*, 5(3), 33.
- Long, S. R. (2001). Genes and signals in the *Rhizobium–legume* symbiosis. *Plant Physiology*, 125(1), 69–72.
- Mergaert, P., et al. (2006). Eukaryotic control on bacterial cell cycle and differentiation in the *Rhizobium–legume* symbiosis. *PNAS*, 103(13), 5230–5235.
- Oldroyd, G. E., Murray, J. D., Poole, P. S., & Downie, J. A. (2011). The rules of engagement in the legume–rhizobial symbiosis. *Annual Review of Genetics*, 45, 119–144.
- Ott, T., et al. (2005). Symbiotic leghemoglobins are crucial for nitrogen fixation in legume root nodules. *Current Biology*, 15(6), 531–535.
- Pararajasingham, S., & Knievel, D. P. (1990). Nitrogenase activity of cowpea during and after drought stress. *Canadian Journal of Plant Science*, 70(1), 163–171.

- Salvagiotti, F., et al. (2008). Nitrogen uptake, fixation and response to fertilizer N in soybeans. *Field Crops Research*, 108(1), 1–13.
- Sessitsch, A., et al. (2002). Advances in Rhizobium research. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 21(4), 323–378.
- Turan, N., (2021). Crop Saline Tolerance in Relation To Nitrate/Ammonium Ratio in Fertilizers. Gülcan DEMİROĞLU TOPCU & Seyithan SEYDOSOGU (Ed) *Sustainable Forage Production and Ecological Safety* (359-374 ss). Ankara; Turkey: IKSAD.
- Zahran, H. H. (1999). Rhizobium–legume symbiosis and nitrogen fixation under severe conditions. *Microbiology and Molecular Biology Reviews*, 63(4), 968–989.

BÖLÜM 3

KURAKLIK STRESİNİN BUĞDAYDA VERİM VE KALİTE ÜZERİNE ETKİLERİ: FİZYOLOJİK MEKANİZMALAR VE UYUM STRATEJİLERİ

Prof. Dr. Fatih ÇİĞ¹
Dr. Çağdaş Can TOPRAK²
Dr. Zeki ERDEN^{3*}

DOI: <https://www.doi.org/10.5281/zenodo.18116198>

¹ Siirt Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Tarla Bitkileri Bölümü, Siirt, Türkiye.
fatih@siirt.edu.tr Orcid No: 0000-0002-4042-0566

² Siirt Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Tarla Bitkileri Bölümü, Siirt, Türkiye.
cagdascan.toprak@siirt.edu.tr Orcid No: 0000-0002-0951-7458

³ Siirt Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Tarla Bitkileri Bölümü, Siirt, Türkiye.
zeki.erden@siirt.edut.tr Orcid No: 0000-0003-1613-7768

GİRİŞ

Buğday, Dünya'nın pek çok ülkesinde temel besin maddesi olarak yetiştirilip kullanılmaktadır. Buğdayın içerdiği mineraller, B vitamini ve mikro besin maddelerince zengin bir bitki olduğu bilinmektedir. Ayrıca buğdayın Dünya nüfusunun besin ve enerji ihtiyacının büyük bir çoğunluğunu karşıladığı belirtilmiştir (Cummins ve Roberts- Thomson, 2009).

Modern tarım, hızla artan dünya nüfusunun tetiklediği çevresel baskılar nedeniyle giderek daha karmaşık sorunlarla yüzleşmekte; bu koşullar, üretim sistemlerinde kapsamlı dönüşümleri zorunlu kılmaktadır (Yılmaz ve Çiftçi, 2024). Bu çevresel baskıların başında kuraklık gelmekte ve kuraklık, dünya genelinde tarımsal üretimi en fazla etkileyen çevresel faktörlerden biri olmuştur. Kuraklığın özellikle su kaynaklarına dayalı tarımsal üretim yapılan bölgelerde büyük ekonomik ve agronomik sorunlara yol açtığı çok sayıda araştırmacı tarafından belirlenmiştir (Ay, 2024). Tarımsal üretimin, su ve iklim koşullarından büyük ölçüde etkilendiği bilinmektedir. Bu doğrultuda stratejik tarım ürünleri arasında dünya çapında en yaygın olarak ekilen, gıda güvenliği açısından kritik bir öneme sahip olan ve dünya nüfusunun büyük bir kısmının temel gıda kaynağını oluşturan buğdayın, kurak koşullarda yetiştiricilik için gerekli olan suyun azaldığı durumlarda verimliliğinin ciddi şekilde düştüğü belirlenmiştir (Faisal ve ark., 2024; Doğan ve ark., 2025; Lobell ve ark., 2011).

Kuraklık stresinin, buğdayın gelişim sürecinin tüm evrelerinde olumsuz etkiler oluşturduğu çeşitli çalışmalarla ortaya konmuştur. Buğday bitkisi, vejetatif büyümeden generatif döneme kadar olan süreçte yeterli su teminine yüksek düzeyde gereksinim duymakta olup, su kısıtlılığı fotosentez, stomatal iletkenlik ve karbon asimilasyonu gibi temel fizyolojik süreçleri sınırlandırmaktadır (Özyazıcı ve Turan, 2021). Bu fizyolojik kısıtlamalar, bitki gelişiminin yavaşlamasına ve sonuçta tane veriminde belirgin kayıpların ortaya çıkmasına neden olmaktadır (Farooq ve ark., 2014; Flexas ve ark., 2004; Asseng ve ark., 2015). Ayrıca, kuraklık, sıcaklık artışı ile birleşerek, bitkinin su kaybını hızlandırdığı ve toprak neminin azalmasına yol açarak buğday üretiminde daha belirgin

kayıplara neden olduğu rapor edilmiştir (Doğan ve Doğan, 2023; Lobell ve ark., 2011).

Söz konusu etkiler doğrultusunda araştırmamızda; kuraklığın buğday üretimi üzerindeki etkileri ile ekonomik etkiler ele alınmış ve bu etkilerin buğday tarımında, kuraklıkla mücadele için önerilen stratejiler, buğday üretiminde yaşanacak olası kayıpları azaltmaya yönelik çözüm önerileri sunulmuştur.

1. KURAKLIK VE BUĞDAY ÜRETİMİNİN ETKİLEŞİMİ

Kuraklık, su kaynaklarının yetersizliği ve toprağın kuruması nedeniyle bitkilerin su ihtiyaçlarını karşılamakta zorluk yaşadığı bir çevresel stres faktörüdür. Bu faktörün, özellikle suya duyarlı olan buğday gibi tarım ürünlerini önemli derecede etkilediği bilinmektedir. Buğdayın, suya yüksek oranda bağımlı bir bitki olduğu, su stresinin etkisi altında verim kayıpları, gelişim bozuklukları ve kalite düşüşleri yaşadığı kaydedilmiştir (Farooq ve ark., 2012). Kuraklığın buğday bitkisi üzerindeki etkileri, vejetasyon süresi boyunca farklı şekillerde kendini göstermekte ve her aşamada belirgin olumsuz etkiler oluşturduğu rapor edilmiştir. Konunun daha iyi anlaşılması bakımından verim kaybı, buğdayda su stresi ve kök gelişimi, sıcaklık etkisi ve erken olgunlaşma dönemlerine göre kuraklığın etkilerini sınıflandırmanın yararlı olacağı düşünülmüştür.

1.1. Verim Kaybı

Kuraklığın, buğday bitkisinin temel enerji üretme süreci olan fotosentezi yavaşlatarak bitkinin su ihtiyacını karşılamakta zorlanmasına neden olduğu araştırmacılar tarafından rapor edilmiştir. Ayrıca kuraklığın, bitkide hücre bölünmesine ve büyümesini baskılayarak bitki kuru ağırlığının azalmasına neden olabilmektedir (Delfine ve ark., 2002; Hammad ve Ali, 2014; Muhtaba ve ark., 2007). Su stresi koşullarında buğday bitkisinde hücrel metabolik faaliyetlerin zayıfladığı, bunun sonucunda bitkinin büyüme ve gelişme kapasitesinin önemli ölçüde sınırlandığı bildirilmektedir. Kurak koşullar, özellikle başaklanma ve tane dolum dönemlerinde bitkinin fotosentetik ürünleri yeterli düzeyde

başaklara aktaramamasına neden olmakta; bu durum başak gelişiminin yetersiz kalması ve tanelerin tam olarak olgunlaşamamasıyla sonuçlanmaktadır. Söz konusu fizyolojik ve gelişimsel kısıtlamaların, buğdayda verimde ciddi düşüşlere yol açtığı çeşitli çalışmalarla ortaya konmuştur (Farooq ve ark., 2014; Stone & Nicolas, 1995; Asseng ve ark., 2015). Kuraklık nedeniyle fotosentezdeki yavaşlama, buğdayın karbonhidrat üretiminde de azalmaya yol açmaktadır. Bu durum başaklanma evresine ulaşan buğdayın daha düşük verimle sonuçlanmasına neden olmaktadır. Söz konusu verim kayıplarının, dünya çapında tarımda gıda güvenliği sorunlarını artırdığı ve üretim kapasitesinin daralmasına neden olduğu belirtilmiştir (Lobell ve ark., 2011).

Kuraklık stresi, bitkinin büyüme evresinde, kuraklığın süresine ve yoğunluk artışına bağlı olarak, buğdayda %92 oranında verim kayıplarına neden olmaktadır (Farooq ve ark., 2014). Bitkiler kuraklık stresi altında kendini korumak için farklı metabolik ve fizyolojik tepkiler verir (Bray, 1997). Verim kaybının yanı sıra bitkide fizyolojik ve biyokimyasal süreçlerinde etkilendiği bilimsel çalışmalar ile ortaya konulmuştur.

1.2. Su Stresi ve Kök Gelişimi

Buğday bitkisi, büyüme aşamalarında suyu topraktan alarak besin maddelerine ulaşır. Ancak, su temininin yetersizliği, buğdayın kök gelişimini engelleyerek köklerin toprak derinliklerine inmesini zorlaştırdığı belirlenmiştir. Yetersiz kök gelişimi, bitkinin besin maddeleri ve suyu emme kapasitesini düşürür. Bu durum bitkinin genel sağlığını bozar ve verim kaybına yol açar. Kök sisteminin zayıflaması, bitkinin toprakta daha fazla su aramasına neden olur, suyun her yönüyle yetersiz olmasına sebep olan kuraklık, bu süreci daha da zorlaştırır (Farooq ve ark., 2012). Bu doğrultuda, kök gelişiminin kısıtlanması, buğdayın büyüme hızını yavaşlatarak özellikle ilerleyen dönemlerde su temininin de azalmasına yol açtığı ve bu durumun da verimi önemli ölçüde olumsuz etkilediği kaydedilmiştir.

1.3. Sıcaklık Etkisi

Kuraklığın, sıcaklıkla birleşerek buğday yetiştiriciliği üzerinde olumsuz etkilere neden olduğu bilinmektedir. Yüksek sıcaklıklar, bitkinin su kaybını hızlandırırken, su stresinin etkisi de artmaktadır. Kuraklık ve sıcaklık artışının, buğdayın gelişimini engelleyerek fotosentez gibi biyolojik süreçleri olumsuz yönde etkilediği kaydedilmiştir. Yüksek sıcaklıkların, buğday bitkisinin su ihtiyacını daha da artırırken, su temini konusunda daha fazla baskıya yol açtığı bildirilmiştir (Lobell ve ark., 2011).

Sıcaklıkların 30 °C'nin üzerine çıktığı dönemlerde buğday bitkileri, artan evapotranspirasyon (ET) ve sınırlı su alımı nedeniyle belirgin bir su stresine maruz kalmaktadır. Yüksek sıcaklık ve kuraklık koşullarının birlikte etkisi, bitki gelişimini sınırlandırarak fotosentetik aktivitenin azalmasına ve buna bağlı olarak verim kayıplarına yol açabilmektedir. Özellikle başaklanma ve tane dolum dönemlerinde ortaya çıkan sıcaklık ve su stresi, başak oluşumunu ve tane gelişimini olumsuz yönde etkilemekte, bu durum hem tane sayısında hem de tane ağırlığında düşüslere neden olmaktadır. Ayrıca kuraklık stresi, buğday tanesinin kimyasal bileşimini değiştirerek protein içeriği, nişasta yapısı ve işleme kalitesi üzerinde belirleyici etkilere sahip olabilmektedir. Tanedeki bu değişimler, un ve mamul ürünlerin teknolojik özellikleri ile besin değerini doğrudan etkilediği belirtilmiştir (Stone ve Nicolas, 1995; Farooq ve ark., 2014; Asseng ve ark., 2015; Shewry, 2009).

1.4. Erken Olgunlaşma

Kuraklık stresi, buğdayda fenolojik gelişim süresinin kışalmasına neden olarak erken olgunlaşmayı tetikleyebilmektedir. Özellikle su kısıtlılığı koşullarında bitki, yaşam döngüsünü tamamlamaya yönelik bir adaptasyon stratejisi geliştirerek normal gelişim sürecine kıyasla daha hızlı olgunlaşmaktadır. Bu durum, başaklanma ve tane dolum dönemlerinin kışalmasına yol açmakta; başakların yeterli düzeyde gelişmemesi ve tanelerin tam olgunluğa ulaşamaması sonucunda verim ve kalite kayıpları ortaya çıkmaktadır. Başaklanma dönemi, buğdayda verimin belirlenmesinde kritik gelişim evrelerinden biri olup, bu dönemde

meydana gelen su stresi başak kurumasına ve tane oluşumunun sınırlanmasına neden olabilmektedir. Söz konusu süreçlerin, buğdayda hem tane verimini hem de ürün kalitesini olumsuz yönde etkilediği çeşitli çalışmalarla ortaya konmuştur (Farooq ve ark., 2014; Stone & Nicolas, 1995; Asseng ve ark., 2015). Erken olgunlaşmanın, buğdayın kısa sürede olgunlaşmasını sağlasa da, kalite açısından büyük kayıplara yol açtığı düşünülmüştür. Bu durum, sadece verimi değil, aynı zamanda buğdayın ticari değerini de olumsuz etkilemektedir.

2. KURAKLIK VE EKONOMİK ETKİLER

Kuraklık, buğday tarımının yanında buğday orijinli gıdaların kalitesi ve güvenilir gıdaya erişim noktasında çeşitli ekonomik zorlukları beraberinde getirmiştir. Buğday tarımında meydana gelen kayıplar, gıda fiyatlarının yükselmesine, dolayısıyla gıda güvenliği sorunlarının artmasına yol açmıştır. Bu durumun, özellikle gelişmekte olan ve tarıma dayalı ekonomilere sahip ülkelerde hem üreticilerin hem de tüketicilerin yaşam standartlarını ciddi şekilde olumsuz etkileyebileceği düşünülmüştür. Bu doğrultuda stratejik öneme sahip olan buğday bitkisinin, birçok ülke için temel gıda maddesi olduğu göz önüne alındığında, buğday üretimindeki azalma, yalnızca fiyatları artırmakla kalmaz, aynı zamanda ekonomik istikrarı da tehdit ettiği düşünülmüştür.

Kuraklık, buğday üretiminde azalmaya yol açtığında, buğdayın arzı sınırlanır. Arzın daralması, buğdayın ve buğdayla üretilen gıda ürünlerinin fiyatlarının artmasına neden olur. Bu durum, özellikle düşük gelirli haneler için gıda alım gücünü zorlaştırır. Gıda fiyatlarındaki artış, gıda güvenliğini tehdit eder, çünkü bu fiyat artışları, gıda temini konusunda sıkıntılar yaşanmasına yol açar ve yoksul bölgelerde gıda yetersizliği ve açlık gibi sosyal sorunları artırabileceği belirtilmiştir (Lobell ve ark., 2011). Ayrıca, söz konusu fiyat artışları, dünya genelindeki gıda ticaretinin istikrarını da bozarak gıda ithalatı yapan ülkeler için maliyetlerin artmasına neden olmaktadır.

Kuraklık, tarım sektöründeki doğrudan verim kayıplarına neden olmanın ötesinde, tarıma dayalı ekonomilerde gelir kaybı ve tarım sektöründe çalışan işgücüne de zarar vermektedir. Tarıma dayalı

ekonomilere sahip ülkelerde, özellikle küçük çiftçiler ve tarım işçileri, gelir kayıpları ile karşı karşıya kalmaktadır. Bu durum, daha büyük işsizlik oranlarına ve tarımsal istihdamda azalmaya yol açabilir. Buğday üretimindeki kayıplar, kırsal alanlardaki gelir seviyelerini düşürür ve buna bağlı olarak yerel ekonomilerde büyük daralmalar görülebilir. Ayrıca, tarımda istihdam kaybı, bu sektöre bağımlı olan yan sanayileri de etkileyebileceği belirtilmiştir (Farooq ve ark., 2012). Tarımsal üretimdeki azalma, ülkelerin ekonomik büyüme oranlarını da olumsuz etkileyebileceği düşünülmüştür. Çünkü tarım sektörü, birçok gelişmekte olan ülkenin gayri safi yurtiçi hasılasının önemli bir kısmını oluşturmaktadır.

Kuraklık, sadece tarımsal üretim üzerinde değil, aynı zamanda küresel ekonomi üzerinde geniş çaplı etkilere neden olmaktadır. Buğday üretimindeki kayıplar, gıda fiyatlarının artmasına, gıda güvensizliğine, yerel ekonomilerde daralmaya ve işsizlik oranlarının artmasına neden olur. Ayrıca, gıda ithalatının artışı, ticaret dengesizliklerine yol açarak ulusal ekonomileri zorlayabilir. Tarıma dayalı ekonomilere sahip ülkeler için kuraklık, yalnızca tarımsal üretimi değil, tüm ekonomik yapıyı tehdit eden bir kriz kaynağıdır.

3. KURAKLIKLARLA MÜCADELE YÖNTEMLERİ VE ADAPTASYON STRATEJİLERİ

Kuraklık, buğday üretimini tehdit eden önemli bir çevresel faktördür ve bu sorunla başa çıkabilmek için geçmişten günümüze çeşitli stratejiler geliştirilmiştir. Kuraklıkla mücadele etmek ve buğday üretiminin sürdürülebilirliği sağlamak için, verimli su kullanımı, kuraklık toleranslı çeşitlerin geliştirilmesi ve modern tarım teknolojilerinin kullanılması gibi farklı yöntemler uygulanmaktadır. Bu stratejiler, sadece verim kayıplarını azaltmaya yardımcı olmakla kalmaz, aynı zamanda tarımsal üretimin sürdürülebilirliğini sağlamak için önemli bir rol oynar. Bu doğrultuda verimli sulama sistemleri, kuraklığa toleranslı buğday çeşitlerinin ıslahı, tarım teknolojileri, toprak yönetimi ve biyoçeşitlilik bakımından buğday tarımında farklı yöntemleri ayrı başlıklar halinde ele almanın yararlı olacağı düşünülmüştür.

3.1. Verimli Sulama Yöntemleri

Kuraklıkla mücadelede suyun etkin kullanımı kritik öneme sahiptir. Geleneksel sulama yöntemleri, suyun verimli kullanılmamasına neden olabilir ve su kayıplarına yol açar. Bunun yerine, su tasarrufu sağlayan modern sulama yöntemleri, buğday üretiminin sürdürülebilirliğini artıracak şekilde düşünülmüştür. Damla sulama ve yağmurlama sulama gibi modern sulama yöntemleri, suyun kontrollü ve doğrudan bitki kök bölgesine uygulanmasına olanak tanıyarak buğdayın su ihtiyacının daha etkin biçimde karşılanmasını sağlamaktadır. Bu yöntemler, sulama suyunun homojen dağılımını destekleyerek toprakta suyun bitki tarafından daha verimli kullanılmasına katkıda bulunmakta ve yüzeyden gerçekleşen buharlaşma kayıplarını azaltmaktadır. Özellikle su kaynaklarının sınırlı olduğu koşullarda, basınçlı sulama sistemlerinin su kullanım etkinliğini artırarak verim kayıplarını sınırlandırdığı ve toplam su tüketimini önemli ölçüde düşürdüğü bildirilmektedir (Howell, 2001; Fereres & Soriano, 2007; Pereira ve ark., 2012).

Uygun sulama tekniklerinin, toprak profilinde nemin daha dengeli dağılımını sağlayarak bitki kök bölgesinde istikrarlı bir su ortamı oluşturduğu ve bu durumun bitki gelişimi ile verim üzerinde olumlu etkiler yarattığı bildirilmektedir. Özellikle damla ve yağmurlama gibi basınçlı sulama yöntemleri, suyun doğrudan kök bölgesine kontrollü biçimde iletilmesine olanak tanıyarak su kullanım etkinliğini artırmakta ve su kaynaklarının sınırlı olduğu bölgelerde kuraklık kaynaklı verim kayıplarını azaltmaktadır. Bu yöntemlerin, toprak yüzeyinden gerçekleşen buharlaşma kayıplarını sınırlandırarak sulama suyunun daha etkin kullanılmasını sağladığı farklı çalışmalarla ortaya konmuştur (Fereres & Soriano, 2007; Howell, 2001; Pereira ve ark., 2012).

3.2. Kuraklık Toleranslı Buğday Çeşitleri

Kuraklık stresinin, buğdaydaki tane sayısını en çok generatif gelişme döneminde etkilediği yapılan çalışmalarla gösterilmiştir (Dolferus ve ark., 2011; Ma ve ark., 2017). Bu nedenle, kuraklık stresine dayanıklı buğday çeşitleri geliştirmek öncelikli çalışmalar arasında yer almaktadır (Cattivelli ve ark., 2008; Mwadzingeni ve ark., 2016).

Kuraklıkla mücadelede önemli bir diğer strateji ise, kuraklık stresine dayanıklı buğday çeşitlerinin geliştirilmesidir. Bilimsel araştırmalar, kuraklık koşullarında verim istikrarını koruyabilen buğday genotiplerinin geliştirilmesi ve yaygınlaştırılmasına odaklanmıştır. Yürütülen çalışmalarda, kuraklığa toleranslı çeşitlerin sınırlı su koşullarında fizyolojik işlevlerini daha etkin biçimde sürdürebildiği, su kullanım etkinliğinin arttığı ve buna bağlı olarak verim kayıplarının önemli ölçüde azaltılabildiği ortaya konmuştur. Bu çeşitlerin, özellikle yağışın düzensiz ve su kaynaklarının kısıtlı olduğu bölgelerde, tarımsal üretimin sürekliliğini ve sürdürülebilirliğini destekleyen temel unsurlar arasında yer aldığı bildirilmektedir (Blum, 2010; Passioura, 2007). Bu çeşitlerin geliştirilmesinde genetik mühendislik ve klasik ıslah yöntemlerinin yanı sıra, moleküler biyoloji ve biyoteknoloji kullanılarak daha dayanıklı buğday türleri elde edilmektedir. Bu türlerin yaygınlaştırılmasının, özellikle su kıtlığı çeken bölgelerde buğday üretiminin sürdürülebilirliğinin sağlanmasına olanak tanıyacağı beklenmektedir.

3.3. Tarım Teknolojileri ve İleri Düzey İzleme

Günümüzde modern tarım teknolojileri, kuraklıkla mücadelede önemli yöntemlerden biri olmuştur. Bu teknolojiler, sulama sistemlerinin optimize edilmesinden, toprağın nem seviyelerinin izlenmesine kadar geniş bir yelpazeye yayılır. Uzaktan algılama ve sensör teknolojileri kullanımıyla, toprak nemini, hava koşullarını ve bitkilerin su ihtiyacını anlık olarak izlenebilmektedir. Bu doğrultuda, sulama gereksinimleri daha doğru bir şekilde belirlenerek sulama sistemlerinin daha etkin ve verimli hale getirilebileceği düşünülmüştür. Uzaktan algılama temelli sistemler, bitki örtüsü ve toprak yüzeyine ilişkin spektral veriler aracılığıyla tarla ölçeğinde nem durumu ve bitki su tüketimini izlemeye olanak tanımakta; bu bilgiler doğrultusunda sulama zamanlaması ve uygulanacak su miktarı daha hassas biçimde belirlenebilmektedir. Bitkinin gerçek su ihtiyacına dayalı olarak gerçekleştirilen bu yaklaşım, gereksiz sulamayı önleyerek su kullanım etkinliğini artırmakta ve su israfını önemli ölçüde azaltmaktadır. Bu nedenle uzaktan algılama uygulamaları, özellikle su kaynaklarının sınırlı olduğu tarım alanlarında modern sulama yönetiminin temel araçları

arasında değerlendirilmektedir (Anderson ve ark., 2012; Zhang ve ark., 2016). Ayrıca, bu teknolojiler, kuraklık riski altında olan bölgelerin erken tespiti ve gerekli önlemlerin alınması için de kullanılarak olası üretim kayıplarının önlenmesinde önemli bir seçenek olarak buğday tarımında kullanılmaktadır.

3.4. Toprak Yönetimi ve Malçlama Teknikleri

Toprak yönetimi uygulamaları, suyun toprak profilinde tutulmasını artırmak ve su kayıplarını sınırlandırmak açısından önemli bir strateji olarak değerlendirilmektedir. Bu kapsamda malçlama (toprak örtüsü) uygulamaları, toprak yüzeyini kaplayarak buharlaşma kaynaklı su kayıplarını azaltmakta, toprak sıcaklığındaki ani dalgalanmaları sınırlandırmakta ve erozyonu önleyerek toprak yapısının korunmasına katkı sağlamaktadır. Ayrıca malç materyali, toprakta organik madde birikimini destekleyerek su tutma kapasitesini artırmakta ve bitkilerin su stresine karşı daha dayanıklı bir gelişim göstermesine olanak tanımaktadır. Söz konusu etkiler sayesinde malçlama uygulamalarının, özellikle kurak ve yarı kurak koşullarda buğdayda su kullanım etkinliğini artırarak verimliliği desteklediği bildirilmektedir (Kader ve ark., 2017).

3.5. Biyoçeşitliliği Artırıcı Tarım Uygulamaları

Biyoçeşitliliği artırmaya yönelik tarımsal uygulamalar, ekosistem işlevlerini güçlendirerek toprak verimliliğinin iyileşmesine katkı sağlamak ve bitkilerin kuraklık gibi çevresel stres etmenlerine karşı dayanıklılığını artırmaktadır. Farklı bitki türlerinin birlikte veya dönüşümlü olarak yetiştirilmesi, toprak mikrobiyal çeşitliliğini zenginleştirerek besin döngülerinin daha etkin işlemlerini sağlamak ve toprak yapısının korunmasına yardımcı olmaktadır. Artan biyoçeşitlilik, aynı zamanda zararlı ve hastalık baskısının doğal mekanizmalar yoluyla dengelenmesine katkı sunmaktadır. Bu yönleriyle biyoçeşitlilik temelli tarım uygulamaları, sürdürülebilir tarım sistemlerinin temel bileşenleri arasında değerlendirilmektedir (Tilman ve ark., 2002; Altieri, 1999; Bender ve ark., 2016).

SONUÇ

Dünya genelinde kuraklığın buğday üretimini olumsuz etkileyen önemli bir çevresel faktör olduğu ve tarımsal üretimin sürdürülebilirliğini tehdit ettiği bilinmektedir. Buğday, suya bağımlı bir ürün olduğu için, kuraklık koşullarında verim kayıpları kaçınılmaz hale gelmiştir. Su temininin yetersizliği, bitkinin tüm büyüme aşamalarını olumsuz etkiler ve fotosentez, kök gelişimi, başaklanma ve olgunlaşma gibi kritik süreçlerde aksamalara neden olmuştur. Bu durum, verim kayıplarının artmasına ve buğdayın hem kalitesinin hem de üretim miktarının düşmesine yol açmıştır.

Kuraklıkla mücadele, buğday üretiminin sürdürülebilirliğinin sağlanabilmesi açısından bütüncül yaklaşımları gerekli kılmaktadır. Bu kapsamda suyun etkin kullanımı, kuraklığa toleranslı buğday çeşitlerinin geliştirilmesi ve modern tarım teknolojilerinin yaygınlaştırılması öncelikli stratejiler arasında yer almaktadır. Özellikle verimli sulama yöntemleri, sınırlı su kaynaklarının daha rasyonel kullanılmasına olanak tanıyarak bitkinin su ihtiyacının kritik gelişim dönemlerinde karşılanmasını sağlamaktadır. Damla sulama ve yağmurlama sulama gibi basınçlı sulama sistemleri, sulama suyunun kontrollü biçimde uygulanmasını mümkün kılmakta, buharlaşma ve yüzey akışı kaynaklı kayıpları azaltarak su kullanım etkinliğini artırmaktadır. Bu yöntemlerin, kurak koşullarda buğdayda verim kayıplarını sınırlandırarak üretim istikrarına katkı sağladığı çeşitli çalışmalarla ortaya konmuştur (Howell, 2001; Fereres & Soriano, 2007; Pereira ve ark., 2012). Kuraklık toleranslı buğday çeşitlerinin geliştirilmesi, su kısıtlı koşullarda verim istikrarının korunmasına ve kuraklık dönemlerinde dahi kabul edilebilir düzeyde ürün elde edilmesine olanak sağlamaktadır. Bu amaçla yürütülen klasik ıslah çalışmaları ile moleküler ıslah ve biyoteknolojik yaklaşımlar, su stresine karşı fizyolojik ve genetik adaptasyon kapasitesi yüksek genotiplerin geliştirilmesine katkı sunmaktadır. Söz konusu çeşitlerin, sınırlı su koşullarında daha etkin su kullanımı sağladığı ve kuraklık stresine daha iyi uyum gösterdiği çeşitli çalışmalarla ortaya konmuştur (Blum, 2010; Passioura, 2007; Cattivelli ve ark., 2008).

Modern tarım teknolojilerinin kullanımı, kuraklık koşullarında su kaynaklarının etkin yönetilmesine önemli katkılar sağlamaktadır. Uzaktan algılama ve sensör tabanlı izleme sistemleri, toprak nemi, bitki su durumu ve meteorolojik değişkenleri gerçek zamanlı olarak takip etmeye olanak tanıyarak sulama uygulamalarının daha hassas biçimde planlanmasını mümkün kılmaktadır. Bu yaklaşımlar, bitkinin gerçek su ihtiyacına dayalı sulama yapılmasını sağlayarak gereksiz su kullanımını sınırlandırmakta ve su kullanım etkinliğini artırmaktadır. Dolayısıyla söz konusu teknolojiler, kuraklık koşullarında tarımsal üretimin sürdürülebilirliğini destekleyen temel araçlar arasında yer almaktadır (Jones, 2004; Anderson ve ark., 2012; Vellidis ve ark., 2016). Ayrıca toprak yönetimi uygulamalarından biri olan malçlama, toprak yüzeyinden gerçekleşen buharlaşmayı azaltarak nem kaybını sınırlandırmakta; özellikle kurak ve yarı kurak ekolojik koşullarda toprağın suyu daha uzun süre muhafaza etmesine olanak sağlamaktadır. Malç materyalinin toprak sıcaklığını dengeleyici etkisi, evapotranspirasyonun azalmasına katkıda bulunarak bitkiler açısından daha dengeli bir toprak nemi ortamı oluşturmaktadır (Kader ve ark., 2017).

Bununla birlikte, kuraklıkla mücadelede en önemli unsurlardan biri, ekonomik olarak tarıma dayalı sistemlerin dayanıklılığının artırılmasıdır. Tarıma dayalı ekonomilere sahip ülkeler için, kuraklık sadece tarımsal üretimi değil, aynı zamanda tüm ekonomik yapıyı tehdit eden bir kriz kaynağıdır. Bu bağlamda, ülkelerin, kuraklıkla mücadeleye yönelik ulusal politikalar geliştirmeleri, tarımsal üretim sistemlerini daha dayanıklı hale getirmeleri ve kuraklıkla başa çıkabilecek verimli tarım sistemleri oluşturmaları gerekmektedir.

Kuraklık, buğday üretiminde her aşamada önemli olumsuz etkiler yaratır. Bitkinin verimi, su temininin yetersizliği nedeniyle ciddi şekilde düşer. Buğday, suya duyarlı bir bitki olduğu için, kuraklık koşullarında fotosentez gibi temel biyolojik süreçlerin yavaşlaması, kök gelişiminin kısıtlanması ve başaklanma ile olgunlaşma aşamalarındaki bozulmalar verim kayıplarını arttırır. Bu süreçler, buğdayın hem kalitesini hem de üretim miktarını olumsuz yönde etkiler.

Söz konusu sonuçlar doğrultusunda;

- 1- Buğday üretimi ve tüketimi arasındaki büyük farkı kapatabilmek için suyun az ve verimli kullanılması önem teşkil etmektedir (Gallardo ve ark., 2004; Hammad ve Ali, 2014). Su kaynaklarını daha verimli kullanmak için sulama teknikleri geliştirilmelidir. Damla sulama ve yağmurlama sulama gibi suyu verimli kullanan sulama yöntemleri, buğday üretiminde su israfını önleyeceği düşünülmüştür.
- 2- Kuraklık stresine dayanıklı buğday çeşitlerinin yaygınlaştırılması, kuraklık koşullarında üretimin sürdürülebilirliğini sağlayacaktır. Genetik mühendislik ve ıslah yöntemleriyle bu türlerin sayısının artırılması önemli olduğu düşünülmüştür.
- 3- Modern tarım teknolojileri vasıtasıyla, suyun etkin kullanımını artırabilir. Uzaktan algılama sistemleri ve sensör teknolojileri ile tarımsal üretim süreçleri optimize edilmelidir.
- 4- Malçlama gibi toprak yönetimi tekniklerinin yaygınlaştırılmasının, su kaybını engellediği ve toprak verimliliğini artırdığı belirtilmiştir (Kader ve ark., 2017). Bu doğrultuda malçlama sisteminin yaygınlaştırılması sağlanmalıdır.
- 5- Tarıma dayalı ekonomilere sahip ülkeler, kuraklıkla mücadeleye yönelik ulusal düzeyde stratejiler geliştirmeli ve bu stratejilerin tarım sektöründeki tüm paydaşlarla uyumlu hale getirilmesi sağlanmalıdır.

Günümüzde küresel ölçekte yürütülen kuraklıkla mücadele çalışmalarının, sadece buğday üretiminin sürdürülebilirliğini sağlamakla kalmaz, aynı zamanda gıda güvenliğini ve küresel ekonomik istikrarı güçlendirdiği beklenmektedir. Bu süreçte, verimli sulama, kuraklık toleranslı çeşitlerin geliştirilmesi, modern teknolojilerin kullanımı ve toprak yönetimi gibi stratejilerin bir arada uygulanması, kuraklıkla başa çıkabilmek için etkili çözümler sunmaktadır.

KAYNAKLAR

- Altieri, M. A. (1999). The ecological role of biodiversity in agroecosystems. In *Invertebrate biodiversity as bioindicators of sustainable landscapes* (pp. 19-31). Elsevier.
- Anderson, M. C., Allen, R. G., Morse, A., & Kustas, W. P. (2012). Use of Landsat thermal imagery in monitoring evapotranspiration and managing water resources. *Remote sensing of environment*, 122, 50-65.
- Asseng, S., Ewert, F., Martre, P., Rötter, R. P., Lobell, D. B., Cammarano, D., ... & Zhu, Y. (2015). Rising temperatures reduce global wheat production. *Nature climate change*, 5(2), 143-147.
- Ay, Ş., (2024). An empirical analysis of the relationship between agricultural revenue and tax burden. *ISPEC Journal of Agricultural Sciences*, 8(4), 1127-1133.
- Bender, S. F., Wagg, C., & van der Heijden, M. G. (2016). An underground revolution: biodiversity and soil ecological engineering for agricultural sustainability. *Trends in ecology & evolution*, 31(6), 440-452.
- Blum, A. (2010). *Plant breeding for water-limited environments*. Springer Science & Business Media.
- Bray, E. (1997). Plant responses to water deficit. *Trends in Plant Science*, 2(2), 48-54. [https://doi.org/10.1016/S1360-1385\(97\)82562-9](https://doi.org/10.1016/S1360-1385(97)82562-9)
- Cattivelli, L., Rizza, F., Badeck, F. W., Mazzucotelli, E., Mastrangelo, A. M., Francia, E., ... & Stanca, A. M. (2008). Drought tolerance improvement in crop plants: an integrated view from breeding to genomics. *Field crops research*, 105(1-2), 1-14.
- Cummins, A. G., & Roberts-Thomson, I. C. (2009). Prevalence of celiac disease in the Asia-Pacific region. *Journal of gastroenterology and hepatology*, 24(8), 1347-1351.
- Delfine, S., Tognettir, R., Loreto, F., & Alvino, A. (2002). Physiological and growth responses to water stress in field grown bell pepper (*Capsicum annuum*, L.). *The Journal of Horticultural Science and*

- Biotechnology, 77 (6), 697-704.
<https://doi.org/10.1080/14620316.2002.11511559>
- Dolferus, R., Ji, X., and Richards R. A. (2011). Abiotic stress and control of grain number in cereals. *Plant Science*, 181, 331-341.
<https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2011.05.015>
- Doğan, S., & Doğan, Y. (2023). Yarı kurak iklim koşullarında bazı nohut (*Cicer arietinum* L.) hat ve çeşitlerinin verim ve verim unsurlarının belirlenmesi. *Harran Tarım ve Gıda Bilimleri Dergisi*, 27(1), 73-82.
- Dogan, Y., Alam, P., Sultan, H., Sharma, R., Soysal, S., Baran, M. F., & Faizan, M. (2025). Zinc oxide nanoparticles for sustainable agriculture: A tool to combat salinity stress in rice (*Oryza sativa*) by modulating the nutritional profile and redox homeostasis mechanisms. *Journal of Agriculture and Food Research*, 19, 101598.
- Faisal, M., Faizan, M., Soysal, S., & Alatar, A. A. (2024). Synergistic application of melatonin and silicon oxide nanoparticles modulates reactive oxygen species generation and the antioxidant defense system: a strategy for cadmium tolerance in rice. *Frontiers in Plant Science*, 15, 1484600.
- Farooq, M., Wahid, A., Kobayashi, N. S. M. A., Fujita, D. B. S. M. A., & Basra, S. M. (2009). Plant drought stress: effects, mechanisms and management. In *Sustainable agriculture* (pp. 153-188). Dordrecht: Springer Netherlands.
- Farooq, M., Hussain, M., Wahid, A., & Siddique, K. H. M. (2012). Drought stress in plants: an overview. *Plant responses to drought stress: From morphological to molecular features*, 1-33.
- Farooq, M., Hussain, M., and Siddique K. H. M. (2014). Drought stress in wheat during flowering and grainfilling periods. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 33(4), 331-349.
<https://doi.org/10.1080/07352689.2014.875291>
- Fereres, E., & Soriano, M. A. (2007). Deficit irrigation for reducing agricultural water use. *Journal of experimental botany*, 58(2), 147-159.

- Flexas, J., Bota, J., Loreto, F., Cornic, G., & Sharkey, T. D. (2004). Diffusive and metabolic limitations to photosynthesis under drought and salinity in C3 plants. *Plant biology*, 6(03), 269-279.
- Howell, T. A. (2001). Enhancing water use efficiency in irrigated agriculture. *Agronomy journal*, 93(2), 281-289.
- Gallardo, M., Thompson, R. B., Valdez, L. C., and Pêrez, C. (2004). Response of stem diameter to water stress in greenhouse-grown vegetable crops. *Acta Horticulturae* , 664, 253-260. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2004.664.30>
- Hammad, S. A., & Ali, O. A. (2014). Physiological and biochemical studies on drought tolerance of wheat plants by application of amino acids and yeast extract. *Annals of Agricultural Sciences*, 59(1), 133-145.
- Jones, H. G. (2004). Irrigation scheduling: advantages and pitfalls of plant-based methods. *Journal of experimental botany*, 55(407), 2427-2436.
- Kader, M. A., Senge, M., Mojid, M. A., & Ito, K. (2017). Recent advances in mulching materials and methods for modifying soil environment. *Soil and Tillage Research*, 168, 155-166.
- Lobell, D. B., Schlenker, W., and Costa-Roberts, J. (2011). Climate change and impacts of global crop production. *Science*, 333(6042), 1081-1084. <https://doi.org/10.1126/science.1204531>
- Ma, J., Li, R., Wang, H., Li, D., Wang, X., Zhang, Y., Zhen, W., Duan, H., Yan, G., and Li, Y. (2017). Transcriptomics analyses reveal wheat responses to drought stress during reproductive stages under field conditions. *Frontiers in Plant Science*, 8, 592. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.00592>
- Mujtaba, S. M., Ali, M., Ashraf, M. Y., Khanzada, B., Farhan, S. M., Shirazi, M. U., ... & Mumtaz, S. (2007). Physiological responses of wheat (*Triticum aestivum* L.) genotypes under water stress conditions at seedling stage. *Pak. J. Bot*, 39(7), 2575-2579.
- Mwadingeni, L., Shimelis, H., Dube, E., Laing, M. D., and Tsilo T. J. (2016). Breeding wheat for drought tolerance: progress and

- technologies. *Journal of Integrative Agriculture* 15, 935-943.
[https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(15\)61102-9](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(15)61102-9)
- Özyazıcı, G., & Turan, N. (2021). Effect of vermicompost application on mineral nutrient composition of grains of buckwheat (*Fagopyrum esculentum* M.). *Sustainability*, 13(11), 6004.
- Passioura, J. (2007). The drought environment: physical, biological and agricultural perspectives. *Journal of experimental botany*, 58(2), 113-117.
- Pereira, L. S., Cordery, I., & Iacovides, I. (2012). Improved indicators of water use performance and productivity for sustainable water conservation and saving. *Agricultural water management*, 108, 39-51.
- Stone, P. J., & Nicolas, M. E. (1995). Effect of timing of heat stress during grain filling on two wheat varieties differing in heat tolerance. I. Grain growth. *Australian journal of plant physiology*, 22(6), 927-934.
- Shewry, P. R. (2009). Wheat. *Journal of experimental botany*, 60(6), 1537-1553.
- Tilman, D., Cassman, K. G., Matson, P. A., Naylor, R., & Polasky, S. (2002). Agricultural sustainability and intensive production practices. *Nature*, 418(6898), 671-677.
- Vellidis, G., Liakos, V., Andreis, J. H., Perry, C. D., Porter, W. M., Barnes, E. M., ... & Migliaccio, K. W. (2016). Development and assessment of a smartphone application for irrigation scheduling in cotton. *Computers and Electronics in Agriculture*, 127, 249-259.
- Yılmaz, A., & Çiftçi V. (2024). Tıbbi ve aromatik bitkilerde sürdürülebilir üretim için AMF ve PGPR uygulamaları. İçinde A. Yılmaz & H. Yılmaz (Ed.), Tarımsal verimliliği kısıtlayan sorunlarla mücadele yöntemleri 1 (s. 167-187). Adıyaman: İKSAD Publishing House.
- Zhang, Y., Peña-Arancibia, J. L., McVicar, T. R., Chiew, F. H., Vaze, J., Liu, C., ... & Pan, M. (2016). Multi-decadal trends in global terrestrial evapotranspiration and its components. *Scientific reports*, 6(1), 19124.

BÖLÜM 4

FASULYE YETİŞTİRİCİLİĞİNE İKLİM DEĞİŞİKLİĞİNİN ETKİLERİ

Öğr. Gör. Fatih ERDİN¹

DOI: <https://www.doi.org/10.5281/zenodo.18116230>

¹Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Özalp Meslek Yüksek Okulu, Bitkisel ve Hayvansal Üretim Bölümü Van, Türkiye. fatiherdin@yyu.edu.tr, Orcid ID: 0000-0002-1338-5582

GİRİŞ

İnsanoğlu var olan doğal dengenin bozulmasında baş rol oynarken bu dengenin bozulmaması için gerekli tedbirleri almazsa ve hatta aynı şekilde ve şiddette sürdürdüğü taktirde, ileriki yıllarda iklim değişimlerin ve yaşamsal etkilerin küresel ısınma etkisiyle artacağı kaçınılmaz bir sonuç olarak öngörülmektedir (Sırdaş, 2002; Öztürk, 2012). İklim değişikliği, yetiştirme koşullarını dönüştürmesi ve olağandışı hava koşullarının sıklığını artırması nedeniyle tarımsal üretkenlik üzerinde ciddi baskılar oluşturmaktadır (Soysal vd., 2024). Dünya üzerindeki kuraklığın artması, artan aşırı sıcaklığa karşı yağışların azalması ile küresel iklimde olan değişimlerin bir sonucudur (Akbaş, 2014). Bitkilerin gelişim hızını etkileyen birincil faktör sıcaklık olduğundan, iklim değişikliği nedeniyle oluşacak aşırı yüksek sıcaklıklar bitkinin verim potansiyelini etkileyecektir. Bitkilerin gelişim aşamalarından en hassas dönemlerden biri olan tozlaşma döneminde oluşacak aşırı sıcaklıklar elde edilecek üretimi önemli derecede olumsuz olarak etkileyecektir (Hatfield ve Prueger, 2015). Akdeniz havzası içinde bulunan Türkiye, topoğrafik yapısından ve üç tarafının denizlerle çevrili olmasından iklim değişikliğinden önemli derecede etkilenmesi beklenmektedir. 21. yüzyılda sıcaklık ve kuraklık eğilimlerinin artacağı ve tarla bitkilerinde önemli streslere neden olacağı ayrıca bitkisel üretimde hem bölge hem de tür olarak önemli farklılıklara neden olacağı Hükümetler arası İklim Değişikliği Paneli Altıncı Değerlendirme Raporu (IPCC) ile belirtilmiştir (IPCC, 2021).

Çeşitli vitamin, mineral madde ve zengin protein içeriğine sahip olan fasulye, ete göre daha az maliyetle elde edilebildiğinden az gelişmiş ve gelişmekte olan ülkelerde et yerine kullanımının artmasına neden olmuştur (Broughton vd., 2003). Fasulye yetiştiriciliğinde en önemli koşullardan biri bitkilerin gerekli su ihtiyacının karşılanmasıdır. Gerekli suyun olmadığı şartlarda bitkiler yaşamlarını devam ettiremez. Suyun olmaması toprak verimsizliğine neden olacağından tarımsal faaliyetlerin yapılması zorlaşacak dolayısıyla bu alanların tarım dışı kullanımı söz konusu olabilecektir (Başoğlu ve Telatar, 2013; Akbaş, 2014). Tarımsal alanların azalması ile üretimin azalması kaçınılmaz bir sonuç olarak karşımıza çıkarken tüm bunlar insanların besin ihtiyaçlarının karşılanmasını çok daha zorlaştıracığından ciddi sağlık problemlerinin olabileceği görülebilmektedir. Fasulye bitkisi diğer baklagil bitkilerinde olduğu gibi rhizobium bakterileri ile simbiyotik ortam yaşam

sayesinde toprağı azot yönünden zenginleştirirler. Fakat bu biyolojik süreç susuzluğa karşı hassas olduğundan yaşanacak kuraklık şartlarında nodül oluşumu dolayısıyla azot bağlama miktarı önemli seviyede azalacaktır (Beebe vd., 2013). Bakteriyel yanıklık, kök çürüklüğü, antraknoz gibi hastalıkların artışı bilhassa iklim değişikliği ile oluşan sıcaklık ve nem farklılıkları artırabilmektedir (Graham ve Vance, 2003). Birleşmiş Milletler Gıda ve Tarım Örgütü (FAO) 2023 yılı verilerine göre dünyada yemeklik tane baklagiller içerisinde fasulye 37.750.753 ha'lık ekim alanından 28.505 bin ton ürün elde edilerek ilk sırada yer almaktadır. Ülkemizde ise nohut ve mercimekten sonra 88.457 ha alandan 240 bin ton (2023) üretim ile üçüncü sırada bulunmaktadır (FAO, 2023).

Küresel bir olay olan iklim değişikliği dünyada bulunan bütün ülkeler ile her sektörü etkileyeceği ancak bu sektörler içerisinde en fazla tarım sektörünü etkileyecektir. Çünkü ekosistem ve su kaynaklarına iklim değişikliğinden oluşacak baskı çok daha fazla olacaktır.

1. FASULYE BİTKİSİNİN EKOLOJİK İSTEKLERİ

Yemeklik tane baklagil bitkilerinden olan fasulye, dünyada en fazla yetiştirilen ılıman iklim bitkisidir. Donlara karşı hassas olan fasulye, 0 °C ve altında olan sıcaklık değerlerine kısa süre maruz kalsa da zarar görecektir. Düşük sıcaklıkta olduğu gibi fasulye yüksek sıcaklıkta bilhassa çiçeklenme döneminde 32 °C ve daha yüksek sıcaklıklara karşı hassas olan bir bitkidir. Nispi nemin düşmesi ve sıcaklıkların artması bitkideki tohum ve meyve veriminin azalmasına neden olmaktadır. Bu durumun oluşmasındaki nedenlere bakıldığında bu koşullarda canlı polen oranının düşmesi, döllemenin olumsuz olarak etkilenmesi ve generatif organların dökülmesi söylenebilir. Fasulye çimlenme optimum sıcaklık değerleri 15-20 °C iken, büyüme ve çiçeklenme için optimum 20-25 °C aralığındadır (Özdemir, 2006).

Fasulye bitkisinin besin maddesi ve su ihtiyacı fazla olduğundan, bunları rahat bir şekilde alabileceği hem çok hafif hem de çok ağır olmayan topraklar en ideal topraklardır. Çok hafif topraklar suyu tutamazken susuzluğa, ağır topraklar ise suyu fazla tutacağından göllenmelere neden olacağından her iki koşulda da fasulye bitkileri olumsuz etkilenecektir. Dolayısıyla fasulye bitkilerinin iyi bir şekilde gelişme gösterebilmeleri için organik madde

bakımından zengin, hafif asitli, derin ve tınlı topraklar uygun olacaktır (Özdemir, 2006).

Fasulye yetiştiriciliğini etkileyen en önemli faktörlerden biri su yetersizliğidir. Bilhassa su eksikliğine en hassas olduğu dönemler çiçeklenme, baklaların oluştuğu ve tane dolumunun olduğu dönemlerdir. Fasulye ilk dönemlerde tavlı topraklara ekim yapıldıktan sonra kök ve gövde çürüklerine neden olmaması için suya gerek olmadığı gibi tane dolumundan sonra tohum ve baklaların kurumması için suya gereksinim olmadığı kuru bir döneme ihtiyacı olacaktır. Fasulye yetiştiriciliğinde oluşacak su yetersizliği çiçeklenme döneminde olduğunda; çiçek dökülmelerinin artmasına, bakla ve baklada oluşacak tane sayısının azalmasına, tane doldurma döneminde olduğunda ise; tanelerin buruşuk, küçük ve zayıf olmasına neden olacaktır. Fasulye yetiştiriciliği süresince 300-400 mm toplam yağış iyi bir verim elde edebilmek için yeterlidir (Özdemir, 2006).

2. FASULYEDE İKLİM DEĞİŞİKLİĞİNİN DOĞRUDAN ETKİLERİ

2.1. Sıcaklık Artışı

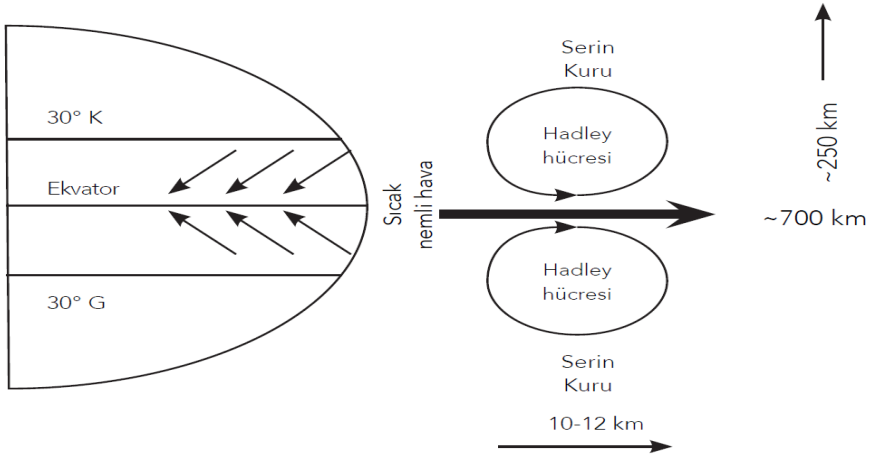
Küresel ortalama yüzey sıcaklığı dünya genelinde tespit edilen kayıtlar incelendiğinde, 1901 tarihi başlangıç olarak alındığında 0.89°C artışın olduğu, bu sıcaklığın 0.6°C olan değerlerinin 1950 sonrası gerçekleştiği ve küresel yüzey sıcaklığının halen artma eğiliminde olduğu görülebilmektedir. Dünya ortalama sıcaklık değerlerinin artması neticesinde ekvator da bulunan sıcak bölge ülkelerinin üzerinde olan hava sirkülasyonu (Şekil 1) daha sıcak hava akımlarını kuzeye kaydırmaktadır. Güneyden gelen sıcak hava hareketleri ile Türkiye’de iklim daha kötü olabileceği düşünülmektedir. İklimde olabilecek farklılığın en görülebilecek etkisi sıcaklık ve yağışlarda olacağıdır. Bu durumda yeraltı suyu, ekonomi ve tarım gibi birçok alanı etkileyeceği kaçınılmaz bir sonuç olarak düşünülmektedir (Dabanlı, 2017).

Fasulye bitkisi bilhassa çiçeklenme döneminde oluşacak 32 °C ve daha yüksek sıcaklıklardan olumsuz etkilenecektir (Özdemir, 2006). Yüksek sıcaklıklara maruz kalan fasulye bitkilerinde polen oluşumunda kayıplar, polen tanelerinin sayısında ve boyutunda azalmalar, çiçeklerde daha fazla dökülmeler, daha az sayıda bakla oluşumu ve tüm bunların neticesinde fasulye veriminde önemli düşüşler olacaktır (Silva vd., 2020).

2.2. Kuraklık Stresi

Küresel ısınma ile 1 °C derecelik meteorolojik artış yapılan hesaplama göre günümüz koşullarında güneydeki kurak kuşakların kuzeye doğru 250 km kadar kaymasıdır (Şen, 2022) (Şekil 1). Bu durumda ülkemizin güney bölgelerinin daha kurak hale gelebileceği sonucuna ulaşılmaktadır.

Toprak parçacıkları arasındaki gözeneklere sızan su, değişen derecelerde tutunur. Toprakta bitkiler tarafından kullanımını ve topraktaki suyun hareketini kontrol eden negatif basınç ile oluşan su gerilimi, MPa birimiyle ifade edilir. Bu gerilim -1,5 MPa veya daha az olduğunda, yapışma kuvveti fazla olan suyu topraktan bitki kökleri çekemez, diğer taraftan bu gerilim -0,01 ile -0,03 MPa arasında olduğunda yerçekiminin etkisiyle su alttaki toprak katmanlarına doğru süzülür. Toprak suyunu yaklaşık olarak -0,01 ile -1,5 MPa arasında gerilime sahip olduğunda bitkiler kullanabilir. Bitki kökleri suyu topraktan çekemedikleri zaman, genelde daimi solan bitkilerin büyümesi duracaktır. Türe özgü olan daimi solma noktası fasulye bitkisinde, -0,8 MPa'nın altında veya üzerinde olacak toprak su gerilimi değerlerinin ciddi kuraklık stresine yol açabileceği ve elde edilecek tane verimini de böylece sınırlayabilecektir (Beebe vd., 2013).

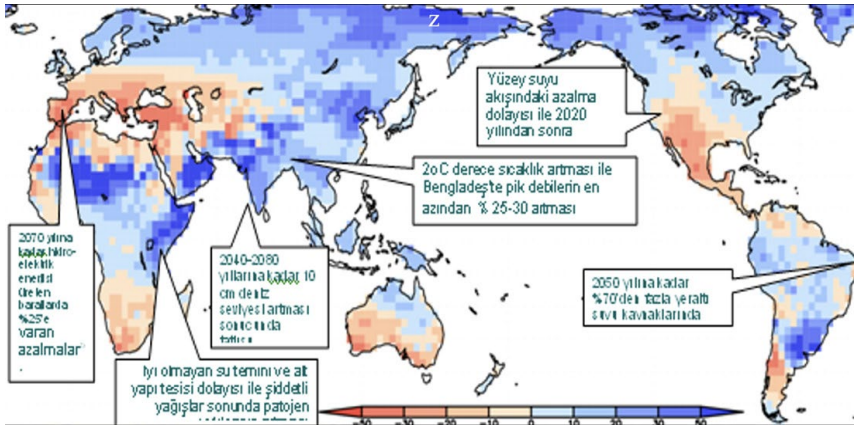


Şekil 1. Kurak kuşakların kuzeye kayması (Şen, 2022)

Şekil 2.'deki haritaya bakıldığında yüzeysel su akışının bazı akarsu havzalarında olumlu etki olurken, bazılarında ise olumsuz bir etkilenme olduğu

görülebilmektedir. Bazı bölgelerde iklim değişikliğinin faydası olabilirken bazı bölgelerde de zararları olabilmektedir. Yıllık ortalama nehir akışı ve su varlığı bu yüzyılın yarısına doğru, Türkiye'nin de bulunduğu alt tropik ve tropik bazı kurak bölgelerde azalma (%10-%30) beklenirken, sulak olan kutup bölgelerine doğru artış (%10-%40) olabileceği düşünülmektedir (Milly vd., 2008). Şekil 1'deki iklim kuşak kaymaları da dikkate alındığında Türkiye'de kuzey bölgelerde taşkın artışlarının, güney bölgelerde ise kuraklığın etkisinde artış beklenmektedir. Küresel ısınma neticesinde yüzey akış, buzulların geri çekilmesi ile kısa sürede artacak, fakat buzullar yok olacağı için de azalacaktır. Çok sayıda dağlık ve kara bölgelerinde yüzey akış debilerindeki tepe noktaları zaman içerisinde erken ortaya çıkacaktır. Bu durumun nedeni kışın yağışların yağmurdan kara kayması, sıcaklıkların da artmasıdır (Şen, 2022)

Fasulye yetiştiriciliğinde en önemli konulardan biri su yetersizliğidir. Dünya genelinde bir sorun olan kuraklık, mahsul üretimini ve kalitesini önemli seviyede etkilerken küresel iklim değişikliği ile çok önemli konu durumuna gelmiştir. Kuraklık stresi altındaki bitkilerde büyüme, kuru madde ve verim miktarı etkilenir. Stomalar kuraklık sonrası kapanarak fotosentez ve su kullanım verimliliği azalır (Anjum vd., 2011). Fasulye yetiştiriciliğinde özellikle çiçeklenme döneminde yaşanacak su yetersizliği; çiçek dökülmelerinin artırırken, bakla ve bakladaki tane sayısında azalmalara, tane doldurma döneminde ise; tanelerde buruşma, küçük ve zayıf oluşmalara sebep olabilmektedir (Özdemir, 2006).



Şekil 2. İklim değişikliğinin tatlı su kaynaklarına etkisini gösteren harita (Kundzewicz vd., 2007)

2.3. CO₂ Artışı

Atmosferi oluşturan gazlardan azot ve oksijenden sonra %0,93 oranı ile bulunan üçüncü önemli gaz karbondioksittir. Karbondioksit (CO₂), su buharı (H₂O), metan (CH₄), diazotmonoksit (N₂O) ve ozon (O₃) doğal sera gazlarının en önemlileridir. Atmosferde sera gazlarının birikiminin artışı iklim sisteminin değişimine sebep olan faktörlerin başında gelmektedir. Sanayi devrimi ile başlayan insan kaynaklı atmosferdeki sera gazı birikimlerinde gözlenen artış sürerken, günümüzdeki artış hızının devam etmesi durumunda CO₂ birikim seviyesinin 500 ppmv olarak 21. yüzyılın sonunda görülebileceği düşünülmektedir. CO₂ oranı sanayi öncesi olan 1950'li yıllara kadar hiç 300 ppm olmazken 2021 yılında 415 olduğu tespit edilmiştir. İklim değişikliğine bağlı buzul erimeleriyle deniz seviyesinde yaşanacak yükselmeler ile bazı tarım alanlarının su altında kalabilir ve yer altı sularının tuz oranında değişiklikler olabilir. Denizlerde CO₂ artışı nedeni ile asitliğin artması tehlikelerinin de söz konusu olduğu bu durumda bazı su ürünleri ile deniz canlılarının varlığı okyanus asidifikasyonu sebebi ile tehlikeye girebilir (Görmüş, 2021).

Bitkileri ve ekosistemleri artan CO₂ stoma iletkenliğinin azalması ve fotosentezin artmasıyla etkileyecektir. Artış ile fasulyenin de dahil olduğu hem C₃ hem de C₄ türlerinde sürekli olarak stoma iletkenliğinin azaldığını, fakat stoma yoğunluğunun önemli derecede değişmediğini ve yüksek CO₂'ye stoma iletkenliğinin fotosentezden bağımsız olarak uyum sağlamadığını göstermektedir (Ainsworth ve Rogers, 2007). CO₂ artışının, N konsantrasyonlarından daha düşük olan Mg, Ca, K ve P gibi diğer besin maddelerinin seviyelerini bitkilerin yenilebilir kısımlarında azalttığı, ayrıca yüksek CO₂ seviyelerinin bitkilerde Co, Fe, Mg, Mn, Ni, S ve Zn konsantrasyonlarını da azalttığı görülmüştür (Taub ve Wang, 2008; Mcgrath ve Lobell, 2013; Pilbeam, 2015). Fasulye yetiştiriciliğinde yüksek CO₂'ye maruz kalan bitkilerden elde edilecek ürünlerde, Fe ve Zn gibi önemli besin maddeleri seviyelerinde azalma olurken verim miktarında artışların olduğu görülebilmektedir (Duarte vd., 2025).

2.4. Aşırı Hava Olayları

İklim değişikliği ile oluşabilecek aşırı hava olayları neticesinde; sel, hortum, dolu, ani don, fırtına ve sıcak hava olayları gibi oluşacak kötü hava şartlarının yapılacak hem bitkisel üretime hem de hayvancılığa önemli zararları

olabilecektir. Su baskını ile yaşanan streste fasulye bitkilerinde, yaprak alanı, taze ve kuru ağırlık üzerinde güçlü bir azaltıcı etkiye sahiptir (Geleta vd., 2024). Su baskınlarının süresi uzadıkça, 1 saatten 24 saate çıktıkça hem hipokotil hem de kök hastalığının şiddetinin arttığı görülmüştür (Li vd., 2015). Simüle edilmiş dolu hasarı fasulye bitkilerinde boy, biyokütle, tane verimi ve tane ağırlığında azalmalara yol açtığını, ortalama verimin hafif dolu şiddetinde %17 ve ağır dolu şiddetinde ise %35 oranında bir düşüş olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca dolu zamanlamasının da bitki hasarının boyutunu etkileyen önemli bir faktör olduğu, şayet dolu hasarı zamanı erken büyüme döneminde olursa, orta ve geç büyüme dönemlerine kıyasla daha az verim kaybına yol açtığı görülmüştür (Dhillon vd., 2021).

3. FASULYEDE İKLİM DEĞİŞİKLİĞİNİN DOLAYLI ETKİLERİ

3.1. Toprak Verimliliği ve Besin Elementleri

Toprak ısınmasının toprakta organik karbon kayıplarına yol açabileceğini ve bu kayıpların alt toprağa kıyasla üst toprakta en yüksek olabileceğidir (Pallandt vd., 2025). Yüksek yağışın mikrobiyal ve bitki besin alımını artırırken azalan yağışın toprakta besin maddelerinin birikmesine yol açacağından, sızıntı veya erozyon yoluyla besin kaybı riskini artırır. Bu sonuçlara göre olabilecek iklim değişikliğinin besin döngüleri üzerinde ciddi etkileri olacağından dolayı ekosistem üzerinde önemli sonuçların doğmasına neden olabilir (Matias vd., 2011). Sıcaklık solunum ve fotosentez gibi fizyolojik süreçleri etkilediğinden belirli koşullara bağlı iklim değişikliğinin etkisi değişecektir. Büyüme mevsimi kısa, soğuk ilkbahar ve yaz periyotlarına sahip alanlarda, daha yüksek sıcaklıklar ürün verimini artırabilirken, daha sıcak bir iklime sahip alanlarda sıcaklık arttığında verimi azaltacaktır (Adavi vd., 2018).

Atmosferde artan CO₂, sıcaklık ve yağışta dalgalanmalara neden olabilirken bu durum neticesinde toprakların bozulmasına neden olabilecek hayati değişikliklere yol açılabilir. Bunlar; erozyon, tuzlanma, fiziksel ve kimyasal bozulma, kullanılabilir suyun azalması, toprak biyoçeşitliliğinin tükenmesi ve toprakta depolanan besin maddelerinde azalmadır. Bu tür istenmeyen değişiklikler, toprak ve su kalitesi, toprak verimliliği ve üretim sürdürülebilirliği açısından ciddi bir tehdit oluşturmaktadır (Sarraz vd., 2019).

3.2. Hastalık ve Zararlılar

Yağış, sıcaklık, ışık, nem ve rüzgar gibi iklim faktörleri, bitki hastalıklarının oluşmasında ve artmasında çok önemli faktörler olarak karşımıza çıkmaktadır (Choudhary vd., 2024; Delgado-Baquerizo vd., 2020; Pandey ve Senthil-Kumar, 2024). Bitkilerde oluşan hastalık salgınları, küresel düzeyde öncelikle üretkenliğe ve biyoçeşitliliğe zarar vermektedir. İklim değişikliği bu risklerin daha da artmasını, patojen evrimini yönlendirerek patojen ile konak ilişkilerini farklılaştırıp, yeni patojenik suşların oluşmasını sağlayarak katkıda bulunacaktır (Singh et al., 2023). İklimde beklenen değişimler, patojen gelişimi ve hayatta kalma oranları gibi durumları etkilerken konakçı hassasiyetini değiştirecektir. Bu durumda ürünlerdeki hastalıkların etkisinde değişikliklere neden olacaktır. Abiyotik koşullarda oluşacak değişimler bitkilerin bulunduğu çevredeki mikro iklimin yeniden oluşmasını ve var olan toprak mikrobiyal toplulukları ile bitki örtüsü bitki patojen etkileşim sisteminin faydalı etkilerine zarar verecektir (Elad ve Pertot, 2014). Bitki patojenlerinin dağılımında, iklim değişikliği hastalıkların yeni alanlara kaymasına neden olup yerli bitki toplulukları ve tarımsal faaliyetler için ciddi zorluklar meydana getirmektedir. Bu çeşit problemleri ortadan kaldırmak için, değişen iklim senaryolarına göre hastalık taşıyıcı ile patojenlerin ilişkilerinin çok iyi anlaşılması gereklidir (Hossain vd., 2024).

Dünyada ve ülkemizde görülen antraknoz, en önemli fasulye mantarı hastalıklarından biri olup halk arasında fide yanığı veya yanık leke gibi isimlerle bilinmektedir (Madakbaş ve Ellialtıoğlu, 2005). İklim koşullarının hastalık salgınları için çoğunlukla optimum koşullar oluşturduğunda patojenlerin üremesi, büyümesi ve sonrasında yayılması gerçekleşir (Burdon ve Zhan, 2020). Bağlı nemin %75'ten fazla, sıcaklıkların ortalama 16-24°C arasında değiştiği ve yağışların sık olduğu hava koşullarında, antraknoz hastalığı fasulyede hızlı gelişmektedir (Javaid vd., 2022). Antraknoz hastalığının şiddetli görüldüğü alanlarda ürün kaybı %90'a kadar çıkabilmektedir. Bu hastalık genç fidelerde oluştuğunda fidelerin gelişmesini yavaşlatabildiği gibi bu fidelerin ölümüne de neden olabilirken, yaşlı bitkilerde görüldüğünde bitkinin yeşil kısımlarında kuruma ayrıca meyvelerde oluşturduğu lekeler neticesinde üründe kalite ve kantite açısından ciddi zararlar oluşturabilmektedir. (Madakbaş ve Ellialtıoğlu, 2005). Süregelen iklim değişikliği, tarımsal alanda olan etkilerinden kaynaklı sonuçlara bakıldığında,

tarımsal faaliyetler ile geçimini sağlayan insanlar gibi her geçen gün artan nüfusun gıda güvenliği de çok ciddi bir risk altında olduğu düşünülebilir (Doğan ve ark., 2018; Mirzabaev vd., 2023; Roy vd., 2023).

4. İKLİM DEĞİŞİKLİKLERİNİN TARIMSAL ÜRETİME ETKİLERİ

IPCC dünya genelinde, yaklaşık olarak 2050 yılında 3 derecelik sıcaklık artışında %25-50 civarında oluşacak verim kayıplarının olabileceği öngörüsünde bulunmuştur (Görmüş, 2021).

Küresel iklim değişikliğinin tarımsal üretime etkilerini maddeler halinde belirtmek gerekirse:

- İklimde dayalı yapılan tarımsal faaliyetler iklimin değişkenlik göstermesi ile bu faaliyetleri kısıtlayabilir hatta tamamen engelleyebilir. İklim koşullarında sıcaklık ve su önemli faktörler olup bunlardan suyun azlığında veya yokluğunda aynı şekilde sıcaklığın çok düşük veya aşırı yüksek oluşunda üretimi engelleyici faktörler olarak görülebilir.
- Tarımsal faaliyette verime etki eden güneşlenme süresi de iklim değişikliğine bağlı olarak değişebilecektir.
- Tarımsal faaliyet yapılan yıl için sadece toplam yağış miktarı değil aynı zamanda yıl içerisindeki dağılımı bilhassa bitkilerin gelişme dönemlerinde olması önem kazanmaktadır.
- İklim değişikliği neticesinde buzulların erimesi ile deniz seviyesindeki yükselmeler ile bazı tarım alanları su altında kalırken yer altı sularının tuz oranında da değişiklikler görülebilir. Denizlerde oluşacak CO₂ artışı, asitliğin artması tehlikesini doğuracağı, bu durumda bazı su ürünleri ile deniz canlılarının varlığı okyanus asidifikasyonu nedeni ile tehlikeye girebilir.
- İklim değişikliği ile oluşabilecek aşırı hava olayları neticesinde; sel, hortum, fırtına ve sıcak hava olayları gibi oluşacak kötü hava şartlarının yapılacak hem bitkisel üretime hem de hayvancılığa önemli zararları olabilir (Görmüş, 2021).

SONUÇ

Yapılan çeşitli araştırmalar, küresel ısınmaya bağlı iklim değişikliğinin; sıcaklık artışı, kuraklık, doğal afetler, yağış miktarı ve yağışın dağılımında değişiklik gibi uygun olmayan koşullara neden olduğunu ve sonrasında da olacağını göstermektedir. Bu olumsuz koşullar yapılacak tarımsal üretime ve elde edilecek verim miktarı açısından ciddi sorunlar oluşturabilecektir. Dünyada iklim değişikliği ile oluşacak olumsuz etkilerden en fazla etkilenecek bölgelerden biri olan, ülkemizin de içinde olduğu Akdeniz Havzası'dır. Ülkemizde tüm tarımsal faaliyetlerde olduğu gibi bitkisel üretimde de iklim değişikliği ve küresel ısınma ile yaşanabilecek tarımsal açıdan ideal olmayan iklim koşulları dikkate alınarak yapılacak planlamalar, yaşanabilecek kötü iklim şartlarına hazırlıklı olunması bakımından çok önem kazanmaktadır. İklim değişikliği neticesinde oluşabilecek kuraklık, sıcaklık artışı, CO₂ artışı ve ekstrem hava olayları gibi durumlar fasulye bitkisinin büyüme ve gelişimini ciddi seviyelerde etkilerken, elde edilecek verim ve ürünlerin kalitesi açısından da olumsuzluklarla karşılaşılması kaçınılmaz bir sonuç olarak görülebilmektedir. İklim değişimi ile oluşabilecek kötü senaryoları dikkate alarak yapılacak iklim değişim stratejilerini, tarımsal uygulanabilirlik konularını da dikkate alarak uygun stratejilerin hazırlanması aynı zamanda bu tarımsal faaliyetleri yürütecek çiftçilerin de eğitimleri sağlanarak tüm hazırlıkların ivedi bir şekilde yapılması önem arz etmektedir. Aksi taktirde tarımsal açıdan karşılaşılabilecek ciddi sorunlar, insanların yaşamlarını sürdürebilmeleri için gerekli temel besin ihtiyaçlarının karşılanması konularında önemli problemlerle karşı karşıya kalınması kaçınılmaz bir sonuç olarak görülebilmektedir.

KAYNAKÇA

- Adavi, Z., Moradi, R., Saeidnejad, A. H., Tadayon, M. R., & Mansouri, H. (2018). Assessment of potato response to climate change and adaptation strategies. *Scientia Horticulturae*, 228, 91-102.
- Ainsworth, E. A., & Rogers, A. (2007). The response of photosynthesis and stomatal conductance to rising [CO₂]: mechanisms and environmental interactions. *Plant, cell & environment*, 30(3), 258-270.
- Akbaş, A. (2014). Türkiye Üzerindeki Önemli Kurak Yıllar. *Coğrafi Bilimler Dergisi*, 12 (2), 101- 118.
- Anjum, S. A., Xie, X., Wang, L. C., Saleem, M. F., Man, C., & Lei, W. (2011). Morphological, physiological and biochemical responses of plants to drought stress. *African journal of agricultural research*, 6(9), 2026-2032.
- Başoğlu, A. & Telatar, O.M. (2013). İklim Değişikliğinin Etkileri: Tarım Sektörü Üzerine Ekonometrik Bir Uygulama. *Karadeniz Teknik Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, 6.
- Beebe, S. E., Rao, I. M., Blair, M. W., & Acosta-Gallegos, J. A. (2013). Phenotyping common beans for adaptation to drought. *Frontiers in physiology*, 4, 35.
- Broughton, W. J., Hernández, G., Blair, M., Beebe, S., Gepts, P. & Vanderleyden, J. (2003). Beans (*Phaseolus* spp.) model food legumes. *Plant Soil* 252:55-128.
- Burdon, J. J., & Zhan, J. (2020). Climate change and disease in plant communities. *PLoS biology*, 18(11), e3000949. Doi.org/10.1371/journal.pbio.3000949.
- Choudhary, A., & Senthil-Kumar, M. (2024). Drought: a context-dependent damper and aggravator of plant diseases. *Plant, Cell & Environment*, 47(6), 2109-2126. Doi.org/10.1111/pce.14863.
- Dabanlı, İ. (2017). *Türkiye'de iklim değişikliğinin yağış-sıcaklığa etkisi ve kuraklık analizi: Akarçay örneği*, Doktora Tezi. İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye.
- Delgado-Baquerizo, M., Guerra, C. A., Cano-Díaz, C., Egidi, E., Wang, J. T., Eisenhauer, N., ... & Maestre, F. T. (2020). The proportion of soil-borne

- pathogens increases with warming at the global scale. *Nature Climate Change*, 10(6), 550-554. Doi.org/10.1038/s41558-020-0759-3.
- Dhillon, G. S., Gretzinger, M., Baarda, L., Lange, R., Singh Gill, K., Yaremko, V., ... & Coles, K. (2021). Effects of simulated hail damage and foliar-applied recovery treatments on growth and grain yield of wheat, field pea, and dry bean crops. *Canadian Journal of Plant Science*, 101(5), 758-769.
- Duarte, R. D., Nunes da Silva, M., Fortunato, G., Quirós-Vargas, J., Muller, O., Manaia, C. M., & Vasconcelos, M. W. (2025). Effects of short-term exposure to elevated atmospheric CO₂ on yield, nutritional profile, genetic regulatory pathways, and rhizosphere microbial community of common bean (*Phaseolus vulgaris*). *Plant and Soil*, 512(1), 297-311.
- Doğan, S., Doğan, Y., & Kendal, Y. (2018). Bazı nohut (*Cicer arietinum* L.) genotiplerin Mardin koşullarındaki verim ve adaptasyon yeteneklerinin belirlenmesi. Anadolu Multidisipliner Çalışmalar Kongresi, 918, 922.
- Elad, Y., & Pertot, I. (2014). Climate change impacts on plant pathogens and plant diseases. *Journal of Crop Improvement*, 28(1), 99-139. Doi.org/10.1080/15427528.2014.865412.
- FAO. (2023). Food and agriculture organization of the united nations. Erişim tarihi: 10 Aralık 2025. Erişim adresi: <https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL>.
- Geleta, R. J., Roro, A. G., & Terfa, M. T. (2024). Phenotypic and yield responses of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) varieties to different soil moisture levels. *BMC Plant Biology*, 24(1), 242.
- Graham, P. H., & Vance, C. P. (2003). Legumes: importance and constraints to greater use. *Plant physiology*, 131(3), 872-877.
- Görmüş, D. (2021). Küresel iklim değişikliğinin ülkemize etkileri. *Türk Tarım ve Orman Dergisi*. Eylül-Ekim.2021. 267, 46-50. ISSN: 2651 303X <https://www.turktarim.gov.tr/EDergi/267/mobile/html5forpc.html>
- Hatfield, J. L., & Prueger, J. H. (2015). Temperature extremes: Effect on plant growth and development. *Weather and climate extremes*, 10(Part A), 4-10.
- Hossain, M. M., Sultana, F., Mostafa, M., Ferdus, H., Rahman, M., Rana, J. A., ... & Al Sabbir, M. A. (2024). Plant disease dynamics in a changing

- climate: impacts, molecular mechanisms, and climate-informed strategies for sustainable management. *Discover Agriculture*, 2(1), 132.
- IPCC, 2021: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2391 pp. doi:10.1017/9781009157896.
- Javaid, I., Bhat, F. A., Mughal, M. N., Sheikh, T. A., Manzoor, S., & Wani, A. A. (2022). Bean anthracnose (*Colletotrichum lindemuthianum*) in Kashmir: Epidemiology and yield loss assessment. *Indian Journal of Agricultural Research*, 56(2), 225-229. Doi: 10.18805/IJARE.A-5643.
- Kundzewicz ZW, Mata LJ, Arnell NW, Doll, P., Kabat, P., Jimenez, B., Miller, K., Oki, T., Zekai, S. & Shiklomanov, I. (2007). *Freshwater resources and their management*. In: Parry, M. L., Canziani, O. F., Palutikof, J. P., Van Der Linden, P. J. and Hanson, C. E. (eds.) *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, pp. 173-210. ISBN 9780521880091
- Li, Y. P., You, M. P., Colmer, T. D., & Barbetti, M. J. (2015). Effect of timing and duration of soil saturation on soilborne Pythium diseases of common bean (*Phaseolus vulgaris*). *Plant Disease*, 99(1), 112-118.
- Madakbaşı, S. Y., & Ellialtıoğlu, Ş. (2005). Fasulye antraknozu (*Colletotrichum lindemuthianum*) hastalığına dayanıklılığın kalıtımı. *alatarım*, 4(2), 1-12.
- Matias, L., Castro, J., & Zamora, R. (2011). Soil-nutrient availability under a global-change scenario in a Mediterranean mountain ecosystem. *Global Change Biology*, 17(4), 1646-1657.
- Mcgrath, J. M., & Lobell, D. B. (2013). Reduction of transpiration and altered nutrient allocation contribute to nutrient decline of crops grown in elevated CO₂ concentrations. *Plant, Cell & Environment*, 36(3), 697-705.

- Milly, P.C.D., Betancourt, J., Falkenmark, M., Hirsch, R.M., Kundzewicz, Z.W., Lettenmaier, D.P., and Stouffer, R.J., (2008). Stationarity Is Dead: Whither Water Management? *Science*, Vol. 319: 573-574.
- Mirzabaev, A., Kerr, R. B., Hasegawa, T., Pradhan, P., Wreford, A., von der Pahlen, M. C. T., & Gurney-Smith, H. (2023). Severe climate change risks to food security and nutrition. *Climate Risk Management*, 39, 100473. Doi.org/10.1016/j.crm.2022.100473.
- Özdemir, S. (2006). *Yemeklik tane baklagiller*. Hasad yayıncılık: Türkiye.
- Öztürk, K. (2012). Küresel İklim Değişikliği ve Türkiye'ye Olası Etkileri. *Gazi Eğitim Fakültesi Dergisi*, 22,1.
- Pallandt, M., Schrumpf, M., Lange, H., Reichstein, M., Yu, L., & Ahrens, B. (2025). Modelling the effect of climate–substrate interactions on soil organic matter decomposition with the Jena Soil Model. *Biogeosciences*, 22(7), 1907-1928.
- Pandey, P., & Senthil-Kumar, M. (2024). Unmasking complexities of combined stresses for creating climate-smart crops. *Trends in Plant Science*. Doi.org/10.1016/j.tplants.2024.07.005.
- Pilbeam, D. J. (2015). Breeding crops for improved mineral nutrition under climate change conditions. *Journal of Experimental Botany*, 66(12), 3511-3521.
- Roy, A., Kumar, S., & Rahaman, M. (2024). Exploring climate change impacts on rural livelihoods and adaptation strategies: Reflections from marginalized communities in India. *Environmental Development*, 49, 100937. Doi.org/10.1016/j.envdev.2023.100937.
- Sarfraz, R., Hussain, A., Sabir, A., Ben Fekih, I., Ditta, A., & Xing, S. (2019). Role of biochar and plant growth promoting rhizobacteria to enhance soil carbon sequestration-A review. *Environmental monitoring and assessment*, 191(4), 251.
- Savary, S., Willocquet, L., Pethybridge, S. J., Esker, P., McRoberts, N., & Nelson, A. (2019). The global burden of pathogens and pests on major food crops. *Nature ecology & evolution*, 3(3), 430-439. Doi.org/10.1038/s41559-018-0793-y.
- Sırdaş, S. (2002). Meteorolojik Kuraklık ve Türkiye Modellemesi. *İstanbul Teknik Üniversitesi Dergisi*, 2 (2) ,95-103.

- Silva, D. A. D., Pinto-Maglio, C. A. F., Oliveira, É. C. D., Reis, R. L. D. M. D., Carbonell, S. A. M., & Chiorato, A. F. (2020). Influence of high temperature on the reproductive biology of dry edible bean (*Phaseolus vulgaris* L.). *Scientia Agricola*, 77(3), e20180233.
- Singh, B. K., Delgado-Baquerizo, M., Egidi, E., Guirado, E., Leach, J. E., Liu, H., & Trivedi, P. (2023). Climate change impacts on plant pathogens, food security and paths forward. *Nature Reviews Microbiology*, 21(10), 640-656. Doi.org/10.1038/s41579-023-00900-7.
- Soysal, S., Yılmaz, A., & Çiftçi V. (2024). Türkiye’de temel tahıl ürünlerinde verimliliği kısıtlayan sorunlar ve sürdürülebilirlik stratejileri. İçinde A. Yılmaz & H. Yılmaz (Ed.), Tarımsal verimliliği kısıtlayan sorunlarla mücadele yöntemleri 2 (s. 35-53). Adıyaman: İKSAD Publishing House.
- Şen, Z. (2022). İklim değişikliği ve Türkiye. *Çevre Şehir ve İklim Dergisi*, 1(1), 1-19.
- Taub, D. R., & Wang, X. (2008). Why are nitrogen concentrations in plant tissues lower under elevated CO₂? A critical examination of the hypotheses. *Journal of Integrative Plant Biology*, 50(11), 1365-1374.

BÖLÜM 5

SÜRDÜRÜLEBİLİR TARIMDA AZOT KAYNAĞI OLARAK KULLANILAN BOKASHİ UYGULAMALARI

Dr. Öğr. Üyesi Sipan SOYSAL¹

Dr. Öğr. Üyesi Özge UÇAR²

DOI: <https://www.doi.org/10.5281/zenodo.18116342>

¹ Siirt Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Tarla Bitkileri Bölümü, Siirt, Türkiye.
sipansoyosal@siirt.edu.tr Orcid No: 0000-0002-0840-6609

² Siirt Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Tarla Bitkileri Bölümü, Siirt, Türkiye.
ozgeonder@siirt.edu.tr Orcid No: 0000-0002-4650-4998

GİRİŞ

Tarımsal ekolojik ilkelerin çiftçilik sistemlerine entegrasyonu, ekolojik etkileşimler ve doğal kaynak kullanımını merkeze alan agroekolojik uygulamalar aracılığıyla sürdürülebilirliği güçlendirmekte; iklim değişikliğine karşı dayanıklılığı artırmakta ve kimyasal girdilere bağımlılığı azaltmaktadır (Soysal ve ark., 2024). Bununla birlikte modern tarım, artan çevresel baskılar nedeniyle sürdürülebilirliği koruyacak yeni stratejilere yönelmekte; kimyasal gübrelerin uzun vadeli toprak sağlığı ve çevre üzerindeki olumsuz etkileri alternatif gübreleme yaklaşımlarına olan gereksinimi artırmaktadır (Yılmaz & Çiftçi, 2024; Özyazıcı ve Turan, 2021). Özellikle yararlı mikroorganizmaların kullanıldığı fermantasyon temelli uygulamalar, organik materyalin hızlı şekilde stabilize edilmesini ve tarımsal üretimde kullanılabilir bir girdiye dönüştürülmesini mümkün kılmaktadır (Doğan ve ark., 2025; Shin ve ark., 2017; Lew ve ark., 2021). Bokashi, kökeni Japonya'ya dayanan ve etkili mikroorganizmalar (Effective Microorganisms, EM) kullanılarak organik atıkların fermantasyon yoluyla dönüştürülmesini esas alan bir kompostlama yöntemidir. Özellikle gıda atıkları gibi organik materyallerin kısa sürede besin elementi bakımından zengin bir ürüne dönüştürülmesine olanak tanıyan bu yöntem hem atık yönetimi hem de sürdürülebilir tarım uygulamaları açısından önemli avantajlar sunmaktadır (Guo, 2025; Bustamante ve ark., 2025).

Bokashi kompostunun kullanımı, tarımsal atıkların sürdürülebilir şekilde değerlendirilmesine katkı sağlamakta ve konvansiyonel tarım uygulamalarına bağlı çevresel etkilerin azaltılmasına yardımcı olmaktadır. Kimyasal gübrelere olan bağımlılığı azaltarak toprak ve su kirliliği riskini düşürmektedir (Budihardjo ve ark., 2023; Prisa & Jamal, 2025). Bu yönüyle Bokashi kompostunun baklagil tarımında kullanımı, uzun vadeli tarımsal sürdürülebilirlik hedefleriyle yüksek düzeyde uyum göstermektedir.

Bokashi fermantasyonu sonucunda elde edilen ürün, toprak kalitesini iyileştirme, mikrobiyal aktiviteyi artırma ve başta azot (N) olmak üzere temel bitki besin elementlerini sağlama potansiyeline sahip bir organik toprak düzenleyicisi olarak tanımlanmaktadır. Bu özellikleri sayesinde bokashi, kimyasal gübre kullanımını azaltmaya yönelik çevre dostu yaklaşımlar arasında giderek daha fazla ilgi görmektedir. Özellikle azot döngüsüne olan katkısı, bokashinin bitkisel üretimde alternatif bir besin kaynağı olarak değerlendirilmesini mümkün kılmaktadır.

Sürdürülebilir tarım sistemlerinde baklagiller, biyolojik azot fiksasyonu yoluyla toprak verimliliğini artırmaları nedeniyle kritik bir role sahiptir. Bokashi uygulamalarının baklagil yetiştiriciliği ile birlikte kullanılması, toprak organik maddesinin zenginleşmesi, besin elementi kullanılabilirliğinin artması ve bitki gelişiminin desteklenmesi açısından önemli sinerjik etkiler yaratabilmektedir. Bu bağlamda, bokashinin azot kaynağı olarak işlevi ve toprak sağlığı üzerindeki etkilerinin anlaşılması hem ürün veriminin artırılması hem de uzun vadeli toprak sürdürülebilirliğinin sağlanması açısından büyük önem taşımaktadır.

1. AZOT İÇERİĞİ VE TOPRAK VERİMLİLİĞİ

Bokashi; azot, fosfor, potasyum, kalsiyum ve magnezyum gibi çeşitli temel besin elementlerini içermekte olup, toprak verimliliğinin artırılmasında önemli bir potansiyele sahiptir (Quiroz & Céspedes, 2019). Bokashinin azot içeriği, üretiminde kullanılan organik materyallere bağlı olarak değişkenlik göstermekle birlikte, genellikle bitki gelişiminin sürdürülebilmesi ve toprak mikrobiyal aktivitesinin artırılması açısından uygun kabul edilen 10–20 arasında bir karbon/azot (C:N) oranına sahiptir (Fauzan ve ark., 2022). EM Bokashi gübrelerinin besin elementi salınımını artırarak toprak sürdürülebilirliğini desteklediği ve verim üzerinde olumlu etkiler oluşturmaktadır (Al-Assfar & Al-Juthery, 2025).

Bokashi uygulaması yalnızca azot temin etmekle kalmamakta, aynı zamanda toprak pH'sı ve genel besin elementi yarayışlılığı gibi toprak özelliklerini de iyileştirerek bütüncül bir toprak verimliliği yaklaşımı sunmaktadır. Yapılan araştırmalar, bokashinin besin elementi bakımından yetersiz topraklarda azotun yarayışlılığını önemli düzeyde artırarak bitki gelişimi ve verimi teşvik ettiğini ortaya koymaktadır (Masulili ve ark., 2023).

Bokashi kompostu, toprak özelliklerini ve verimliliğini iyileştirme kapasitesiyle tanınmaktadır. Toprağa organik madde kazandırarak yararlı mikroorganizmalar için elverişli bir ortam oluşturmaktadır. Yapılan araştırmalar, Bokashi'nin uygun tarımsal yönetim uygulamalarıyla birlikte kullanımının toprak sıcaklığını ve buharlaşmayı azalttığını, böylece bitkilerde su stresi kaynaklı olumsuz etkileri sınırladığını ortaya koymaktadır (Wenneck ve ark., 2023). Bunun yanı sıra Bokashi kompostu, baklagil gelişimi için hayati öneme sahip olan azotun önemli bir kaynağı olup, bitki sağlığını destekleyen

diğer toprak özelliklerini de iyileştirmektedir (Quiroz & Céspedes, 2019). Bokashi uygulamasıyla teşvik edilen mikrobiyal aktivite, temel besin elementlerinin yayırlılığını artırarak baklagiller ve diğer kültür bitkilerinde daha sağlıklı bir gelişimi desteklemektedir (Amer ve ark., 2023).

2. ETKİ MEKANİZMASI

Bokashinin azot kaynağı olarak etkinliği, içerdiği zengin mikrobiyal popülasyon ve fermentasyon süreciyle ilişkilidir. Bu süreçte ortaya çıkan faydalı mikroorganizmalar, organik azotun bitkiler tarafından alınabilir mineral formlara dönüştürülmesini sağlayan azot mineralizasyonunda kritik bir rol oynamaktadır (Lew ve ark., 2021). Nitekim, bokashinin toprağa uygulanmasının mikrobiyal biyokütle karbonu (C) ve azotu (N) artırarak karbon asimilasyonunu ve besin elementi döngüsünü iyileştirmektedir (Lew ve ark., 2021). Ayrıca, etkili mikroorganizmalar (EM) kullanılarak hazırlanan bokashi formülasyonlarının, yararlı mikrobiyal aktiviteyi destekleyerek toprakta azotun stabilizasyonunu ve besin elementi yayırlılığını optimize ettiği belirtilmektedir (Sales ve ark., 2020).

Bokashi kompostunun topraklara uygulanması, toprak kalitesinde belirgin iyileşmelerle ilişkilendirilmektedir. Araştırmalar, bokashinin toprakların kimyasal ve biyolojik özelliklerini geliştirdiğini; azot (N), fosfor (P) ve potasyum (K) gibi temel besin elementlerinin düzeylerini artırırken toprak pH'sını optimize ettiğini göstermektedir (Pereira ve ark., 2022; Fahrul ve ark., 2019). Özellikle bokashinin agregat yapısını iyileştirdiği ve bunun su tutma kapasitesi ile kök gelişimi açısından kritik öneme sahip olduğu bildirilmektedir (Rohmah & Suntari, 2019; Phooi ve ark., 2022). Bununla birlikte, bokashi ile biyokömürün birlikte kullanımı, kompost olgunlaşma sürecinde pH'nın yükselmesine ve CO₂ emisyonlarının azalmasına katkı sağlayarak toprak sağlığını daha da desteklemektedir (Muñoz ve ark., 2023).

3. TARIMDA KULLANIM ALANLARI

Bokashi, farklı tarımsal üretim sistemlerinde yaygın olarak incelenmiş ve bitki gelişimini teşvik ederek verimi artırdığı ortaya konmuştur. Örneğin, ananas kabuğundan elde edilen bokashinin, toprak özelliklerini ve temel makro besin elementlerinin yayırlılığını iyileştirerek arpacık soğanının gelişimini olumlu yönde etkilediği belirlenmiştir (Masulili ve ark., 2023). Ayrıca, farklı

bokashi formülasyonlarının azot içeriklerinin incelendiği çalışmalar, bokashinin sentetik gübrelere çevre dostu bir alternatif olabileceğini; toprak kalitesindeki bozulmaya yönelik kaygıları azaltarak çevresel etkileri sınırlandırabileceğini göstermektedir (Sihotang & Hanik, 2025).

Bununla birlikte, farklı kültür bitkilerinde yapılan araştırmalar sonucunda, bokashi uygulamasının toprak pH'sının dengelenmesine katkı sağladığını ve temel toprak verimlilik parametrelerini iyileştirdiği sonucuna varılmıştır (Coulibaly ve ark., 2021). Bu bulgular, bokashinin besin elementi yönetimini geliştirme ve ekolojik dengeyi destekleme yoluyla sürdürülebilir tarımsal uygulamalara önemli katkılar sağlayabileceğini göstermektedir.

Baklagiller, azot bağlayan bakteriler (*Rhizobium* spp.) ile simbiyotik ilişkiler kurmakta olup, mikrobiyal açıdan zengin Bokashi uygulamaları bu simbiyozu güçlendirebilmektedir. Araştırmalar, etkili *Rhizobium* suşlarının Bokashi gibi organik toprak düzenleyicilerle birlikte aşılanması, artan azot fiksasyonu ve besin elementi alımı sayesinde bitki performansını önemli ölçüde artırdığını göstermektedir (Amine-Khodja ve ark., 2022). Bununla birlikte, yüksek verimli bakla çeşitlerinde Bokashi uygulamalarının biyotik streslere karşı dayanıklılığı artırdığı ve toprak biyotasına olumlu katkılar sağladığı belirlenmiştir (Karkanis ve ark., 2018). Baklagiller ile Bokashi uygulamaları arasındaki bu sinerjik etkileşim, sürdürülebilir tarım uygulamaları açısından önemli bir avantaj oluşturmaktadır.

Baklagil bitkileri; bakla, nohut ve bezelye gibi türler başta olmak üzere, azot bağlama yetenekleri sayesinde toprak verimliliğini artırmaları ve kimyasal gübre kullanımını azaltmaları nedeniyle ekim nöbeti sistemlerinde önemli bir yere sahiptir (Makhlouf ve ark., 2024). Bokashi kompostunun baklagil yetiştiriciliğine entegre edilmesi, verim ve kalite açısından önemli iyileşmelere yol açabilmektedir. Her ne kadar mevcut araştırmalar ağırlıklı olarak diğer bitki türlerine odaklanmış olsa da, mikrobiyal aktivite bakımından zenginleştirilmiş topraklarda baklagillerin daha iyi gelişim gösterdiği ve Bokashi uygulamalarının büyüme parametrelerini olumlu yönde etkileyebileceği bildirilmektedir (Hata ve ark., 2020). Ayrıca, biyogübreler ve geleneksel kompostlama yöntemleriyle birlikte baklagillerde artan verimliliğin rapor edilmesi, Bokashi kullanımının da benzer veya tamamlayıcı faydalar sağlayabileceğine işaret etmektedir (Budihardjo ve ark., 2023; Prisa & Jamal, 2025).

SONUÇ

Bu çalışmadan elde edilen bulgular, bokashinin tarımsal üretimde çok yönlü bir toprak düzenleyici ve etkili bir azot kaynağı olarak önemli bir potansiyele sahip olduğunu ortaya koymaktadır. Özellikle baklagil tarımında bokashi uygulamalarının, toprak sağlığını iyileştirerek besin elementi yarayışlılığını ve mikrobiyal aktiviteyi artırdığı belirlenmiştir. Bokashinin, baklagiller ile *Rhizobium* bakterileri arasındaki simbiyotik ilişkiyi desteklemesi, biyolojik azot fiksasyonunun etkinliğini artırarak ürün verimine olumlu katkı sağlamaktadır.

Bununla birlikte, bokashi uygulamalarının toprak verimliliğini artırması ve çevresel sürdürülebilirliği desteklemesi, bu materyalin sürdürülebilir tarım sistemleri açısından stratejik bir girdi olduğunu göstermektedir. Bu doğrultuda, bokashinin farklı toprak koşulları ve bitki türleri üzerindeki etkilerinin daha ayrıntılı biçimde ortaya konulmasına yönelik ileri araştırmalar, söz konusu uygulamanın tarımsal üretimde daha yaygın ve etkin kullanımına bilimsel bir zemin oluşturacaktır.

KAYNAKÇA

- Al-Assfar, H. S., & Al-Juthery, H. W. A. (2025, April). Effect of Nano-Silicon, EM. Bokashi Fertilizers and Spraying of Some Biostimulants on Soil Sustainability, Some Growth and Yield Parameters of Cauliflower. *In IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 1487, No. 1, p. 012178). IOP Publishing.
- Amine-Khodja, I. R., Boscari, A., Riah, N., Kechid, M., Maougal, R. T., Belbekri, N., & Djekoun, A. (2022). Impact of two strains of *Rhizobium leguminosarum* on the adaptation to terminal water deficit of two cultivars *Vicia faba*. *Plants*, 11(4), 515.
- Amer, M. M., Elbagory, M., Aiad, M., & Omara, A. E. D. (2023). The influence of short-term tillage, compost, and beneficial microbes on soil properties and the productivity of wheat and cowpea crops. *Agriculture*, 13, 1857.
- Budiardjo, M. A., Huboyo, H. S., Puspita, A. S., & Hutagaol, J. D. C. (2023). Utilization of bokashi composting and animal feed silage for sustainable agricultural waste management and environmental impact analysis. *Global Nest Journal*, 25(9), 1–10.
- Coulibaly, P., Sawadogo, J., Bambara, Y., Legma, J., & Compaore, E. (2020). Effect of bio-fertilizers on tomato (*Solanum lycopersicum*) production and on soil physico-chemical properties in Sudan area of Burkina Faso.
- Doğan, S., Doğan, Y., & Çiğ, F. (2025). Effect of chemical and organic fertilizers on the yield and quality attributes and nutrient composition in lentil. *Chilean Journal of Agricultural Research*, 85(4), 539-548.
- Fahrul, M., Jannah, R., & Patmawati, P. (2019). Perbaikan beberapa sifat kimia pada tanah pasca tambang batubara dengan pemberian dosis bokashi kiapu (*Pristia stationes* L.) dan krinyu (*Choromolaena odorata* L.). *Jurnal Agroekoteknologi Tropika Lembab*, 2(1), 29–37.
- Fauzan, F., Fadhil, M., Irfan, I., Yunita, D., Erika, C., & Lahmer, R. A. (2022). Study of C/N ratio of organic materials and its application in the production of natural fertilizer (bokashi). *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 951(1), 012105.
- Hata, F. T., Spagnuolo, F. A., de Paula, M. T., Moreira, A. A., Ventura, M. U., de Freitas Fregonezi, G. A., & de Oliveira, A. L. M. (2020). Bokashi compost and biofertilizer increase lettuce agronomic variables in

- protected cultivation and indicates substrate microbiological changes. *Emirates Journal of Food and Agriculture*, 32(9), 640–646.
- Karkanis, A., Ntatsi, G., Lepse, L., Fernández, J. A., Vågen, I. M., Rewald, B., ... Savvas, D. (2018). Faba bean cultivation – revealing novel managing practices for more sustainable and competitive European cropping systems. *Frontiers in Plant Science*, 9, 375969.
- Lew, P. S., Nik Ibrahim, N. N. L., Kamarudin, S., Thamrin, N. M., & Misnan, M. F. (2021). Optimization of bokashi-composting process using effective microorganisms-1 in smart composting bin. *Sensors*, 21(8), 2847.
- Makhlouf, L., El Fakhouri, K., Kemal, S. A., Maafa, I., Meftah Kadmiri, I., & El Bouhssini, M. (2024). Potential of volatile organic compounds in the management of insect pests and diseases of food legumes: A comprehensive review. *Frontiers in Plant Science*, 15, 1430863.
- Masulili, A., & Suyanto, A. (2023). Effect of pineapple skin bokashi on improvement of soil properties and growth of shallot (*Allium ascalonicum* L.). *Research on Crops*, 24(2), 319–325.
- Muñoz, C., Loncomilla, A., & Basy-Galup, N. (2023). Effect of biochar on the agronomic and environmental properties of bokashi and compost. *Journal of Agricultural Sciences Research*, 3(19), 2–12.
- Özyazici, G., & Turan, N. (2021). Effect of vermicompost application on mineral nutrient composition of grains of buckwheat (*Fagopyrum esculentum* M.). *Sustainability*, 13(11), 6004.
- Pereira, G. L., de Araújo, L. L., Wenneck, G. S., Saath, R., Ghuidotti, G. C., & Bertolo, R. P. (2022). Physicochemical characterization of fermented bokashi compost produced on farm in Southern Brazil. *Revista de Agricultura Neotropical*, 9(2), e6926.
- Phooi, C. L., Azman, E. A., & Ismail, R. (2022). Do it yourself: Humic acid. *Pertanika Journal of Tropical Agricultural Science*, 45(3).
- Prisa, D., & Jamal, A. (2025). Comprehensive analysis of effective microorganisms: Impacts on soil, plants, and the environment. *Multidisciplinary Reviews*, 8(12), 2025318.
- Quiroz, M., & Céspedes, C. (2019). Bokashi as an amendment and source of nitrogen in sustainable agricultural systems: A review. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 19(1), 237–248.

- Rohmah, A., & Suntari, R. (2019). Efek pupuk bokashi terhadap ketersediaan unsur basa (K, Na, Ca, dan Mg) pada Inceptisol Karangploso Malang. *Jurnal Tanah dan Sumberdaya Lahan*, 6(2), 1273–1279.
- Sales, B. K., Bryla, D. R., Trippe, K. M., Weiland, J. E., Scagel, C. F., Strik, B. C., & Sullivan, D. M. (2020). Amending sandy soil with biochar promotes plant growth and root colonization by mycorrhizal fungi in highbush blueberry. *HortScience*, 55(3), 353–361.
- Shin, K., van Diepen, G., Blok, W., & van Bruggen, A. H. (2017). Variability of Effective Micro-organisms (EM) in bokashi and soil and effects on soil-borne plant pathogens. *Crop Protection*, 99, 168-176.
- Sihotang, D. R., & Hanik, N. R. (2025). Analysis of NPK content in several solid bokashi fertilizers. *Jurnal Biologi Tropis*, 25(1), 334–340.
- Soysal, S., Yılmaz, A., & Çiftçi V. (2024). Türkiye’de temel tahıl ürünlerinde verimliliği kısıtlayan sorunlar ve sürdürülebilirlik stratejileri. İçinde A. Yılmaz & H. Yılmaz (Ed.), Tarımsal verimliliği kısıtlayan sorunlarla mücadele yöntemleri 2 (s. 35-53). Adıyaman: İKSAD Publishing House.
- Yılmaz, A., & Çiftçi V. (2024). Tıbbi ve aromatik bitkilerde sürdürülebilir üretim için AMF ve PGPR uygulamaları. İçinde A. Yılmaz & H. Yılmaz (Ed.), Tarımsal verimliliği kısıtlayan sorunlarla mücadele yöntemleri 1 (s. 167-187). Adıyaman: İKSAD Publishing House.
- Wenneck, G. S., Saath, R., Moro, A. L., Carvalho, G. P. D. S., Santi, D. C., & Rezende, R. (2023). Physiological responses of oregano under different water management and application of fermented bokashi compost. *Acta Scientiarum. Agronomy*, 45, e60807.

BÖLÜM 6

TARLA BİTKİLERİ ÜRETİMİNDE SÜRDÜRÜLEBİLİR GÜBRELEME YAKLAŞIMLARI

Dr. Öğr. Üyesi Sipan SOYSAL¹

Prof. Dr. Murat ERMAN²

Prof. Dr. Fatih ÇİĞ³

DOI: <https://www.doi.org/10.5281/zenodo.18116361>

¹ Siirt Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Tarla Bitkileri Bölümü, Siirt, Türkiye.
sipansoyosal@siirt.edu.tr Orcid No: 0000-0002-0840-6609

² Bursa Uludağ Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Tarla Bitkileri Bölümü, Bursa, Türkiye.
muraterman@uludag.edu.tr Orcid No: 0000-0002-1435-1982

³ Siirt Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Tarla Bitkileri Bölümü, Siirt, Türkiye.
fatih@siirt.edu.tr Orcid No: 0000-0002-4042-0566

GİRİŞ

Tarla bitkileri üretiminde gübreleme, artan dünya nüfusunun gıda gereksinimlerinin karşılanmasında kritik bir rol oynamaktadır. Ancak uzun yıllar boyunca ağırlıklı olarak verim artışına odaklanan ve sentetik girdilere yoğun biçimde dayanan gübreleme uygulamaları; çevresel kirlilik, toprak yapısının bozulması, besin maddelerinin su ortamlarına taşınması ve sera gazı emisyonlarının artışı gibi önemli sorunları da beraberinde getirmiştir (Doğan ve Çığ, 2023; Vitousek et al., 1997; Burney et al., 2010). Küresel gıda talebindeki hızlı artış karşısında tarımsal üretkenliğin artırılması zorunlu olmakla birlikte, bu artışın çevresel sürdürülebilirliği göz ardı eden yaklaşımlarla sağlanması uzun vadede üretim sistemlerinin dayanıklılığını tehdit etmektedir (Tilman et al., 2011). Bu nedenle sürdürülebilir gübreleme kavramı, yalnızca uygulanan gübre miktarının azaltılmasını değil; verimliliğin korunmasını, besin elementi kullanım etkinliğinin artırılmasını ve çevresel etkilerin en aza indirilmesini birlikte hedefleyen bütüncül bir yönetim yaklaşımını ifade etmektedir. Tarla bitkileri üretiminde giderek daha fazla önem kazanan bu yaklaşımlar, bitkisel üretimin sürekliliğini sağlarken çevresel olumsuzlukları sınırlamayı amaçlayan stratejik bir çerçeve sunmaktadır (Bindraban et al., 2015; Hou et al., 2024).

Organik ve inorganik gübre kaynaklarının dengeli ve tamamlayıcı biçimde kullanımını esas alan Entegre Besin Yönetimi (Integrated Nutrient Management, INM) uygulamalarının benimsenmesi, toprak verimliliğinin korunması ve uzun vadeli tarımsal sürdürülebilirliğin sağlanması açısından temel bir araç olarak değerlendirilmektedir (Ozyazıcı ve Turan, 2021; Yu et al., 2019; Miao et al., 2010). Buna ek olarak, hassas tarım teknolojileri ve nanogübre uygulamaları gibi yenilikçi yaklaşımlar, besin elementlerinin bitki tarafından alım etkinliğini artırarak hem ürün verimini yükseltme hem de çevresel baskıları azaltma potansiyeli sunmaktadır (Kumar, 2021; Kumar et al., 2023). Bu sürdürülebilir uygulamalara yönelim, yalnızca gıda güvenliğinin desteklenmesine katkı sağlamakla kalmamakta; aynı zamanda su kalitesinin korunması, toprak sağlığının iyileştirilmesi ve tarımsal ekosistemlerin çevresel dayanıklılığının artırılması gibi daha geniş ekolojik hedeflerle de uyum göstermektedir (Aktaş ve Ark., 2025; Vitousek et al., 1997; Yu et al., 2019).

Güncel literatür, gübrelemenin yalnızca kimyasal besin arzı olarak değerlendirilmesinin yetersiz olduğunu; toprak biyolojik süreçleri, mikrobiyal

çeşitlilik ve agroekosistem işleyişi ile birlikte ele alınması gerektiğini ortaya koymaktadır (Meena et al., 2020). Bu nedenle sürdürülebilir gübreleme, tarla bitkileri üretiminde sistem temelli ve çok boyutlu bir yönetim anlayışı gerektirmektedir.

1. ENTEGRE BESİN ELEMENTİ YÖNETİMİ (INM) YAKLAŞIMI

Sürdürülebilir gübrelemenin temel yapı taşlarından biri olan Entegre Besin Elementi Yönetimi (Integrated Nutrient Management, INM), mineral gübrelerin organik materyaller ve biyolojik girdilerle dengeli ve tamamlayıcı biçimde birlikte kullanılmasına dayanan bütüncül bir yaklaşımdır. INM, kimyasal gübrelere aşırı bağımlılığı azaltmayı, toprak verimliliğini ve işlevselliğini korumayı ve böylece uzun vadede tarımsal üretkenliğin sürdürülebilirliğini sağlamayı hedeflemektedir (Gupta & Bordoloi, 2024; Saini et al., 2025). Bu yaklaşım, organik gübreler, bitki artıkları, biyogübreler ve mineral gübrelerin birlikte yönetilmesi yoluyla bitki besin maddelerinin etkin kullanımını artırırken, çevresel olumsuzlukları da sınırlandıran çevre dostu bir strateji olarak değerlendirilmektedir (Doğan ve ark., 2021). Meta-analitik ve kantitatif sentez çalışmaları, INM uygulamalarının yalnızca ürün verimini artırmakla kalmadığını; aynı zamanda toprak organik karbon stokları ve mikrobiyal aktivite gibi toprak kalite ve sürdürülebilirlik göstergeleri üzerinde de anlamlı ve olumlu etkiler oluşturduğunu ortaya koymaktadır (Padbhushan et al., 2021). Buna karşılık, yalnızca mineral gübre kullanımına dayalı sistemlerin uzun vadede toprak kalitesini olumsuz etkileyebildiği; organik ve biyolojik girdilerin mineral gübrelerle birlikte uygulanmasının ise hem toprak sağlığını hem de bitkisel üretimi desteklediği bildirilmektedir (Gupta & Bordoloi, 2024). Ekim sistemlerinde yürütülen ampirik çalışmalar, organik ve inorganik kaynakların dengeli kullanımının bitkiler için yeterli besin maddesi yarayışlılığı sağlayarak verim oluşumunu desteklediğini, ancak çevresel koşullar ve besin maddelerinin tam yarayışlılığına bağlı olarak hedeflenen verim düzeylerinin her zaman tamamen elde edilemeyebileceğini de vurgulamaktadır (Singh et al., 2015).

2. AZOT KULLANIM ETKİNLİĞİNİ ARTIRMAYA YÖNELİK TANIYA DAYALI VE HASSAS GÜBRELEME

Azot, tarla bitkileri üretiminde en fazla kullanılan ve çevresel etkileri en belirgin olan besin elementidir (Turan, 2021). Geleneksel gübreleme uygulamalarında yaygın olarak kullanılan sabit dozlu ve takvime dayalı azot uygulamaları, çoğu durumda bitki gereksinimleriyle örtüşmemekte ve aşırı uygulamalara yol açmaktadır. Bu durum hem azot kullanım etkinliğini (NUE) düşürmekte hem de nitrat yıkanması ve N₂O emisyonları gibi çevresel riskleri artırmaktadır (Hou et al., 2024).

Taniya dayalı gübreleme yaklaşımları, azot uygulamalarının toprak mineral azot durumu ve bitki ihtiyacına göre düzenlenmesini esas almaktadır. Kuzey Çin Ovası'nda yürütülen çalışmalar, toprak (N_{min}) esaslı azot yönetiminin, geleneksel uygulamalara kıyasla verim kaybı olmaksızın önemli ölçüde azot tasarrufu sağladığını ortaya koymuştur (Cui et al., 2008). Ayrıca, hassas tarım uygulamaları kapsamında geliştirilen yetiştirme dönemine duyarlı azot uygulamaları, heterojen tarım alanlarında azot kullanım etkinliğinin artırılmasında etkili araçlar olarak değerlendirilmektedir (Shanahan et al., 2008).

3. BİYOGÜBRELER VE MİKROBİYAL İNOKULANTLARIN ROLÜ

Biyogübreler, sürdürülebilir gübreleme sistemlerinde mineral ve organik girdileri tamamlayıcı unsurlar olarak öne çıkmaktadır. Rhizobium, fosfat çözücü bakteriler ve siyanobakteriler gibi mikrobiyal inokulantlar; azot fiksasyonu, fosforun yararlılığının artırılması ve kök gelişiminin desteklenmesi yoluyla besin elementi alımını iyileştirmektedir (Thakur et al., 2023).

Çeltik-buğday ve çeltik-nohut sistemlerinde yapılan çalışmalar, biyogübrelerin INM paketlerine dâhil edilmesinin verim ve besin elementi kullanım etkinliğini artırdığını göstermektedir (Shrivastava et al., 2023). Ayrıca biyogübrelerin modern tarım uygulamalarıyla, özellikle yabancı ot kontrol programlarıyla uyumlu şekilde kullanılabileceği bildirilmektedir (Dabyani & Al-Ziady, 2025).

Biyogübreler ve mikrobiyal aşılama uygulamaları, besin elementlerinin toprak-bitki sisteminde yararlılığını artıran biyolojik süreçleri (örneğin

biyolojik azot fiksasyonu ve fosfor çözündürme) aktive ederek gübre kullanım verimliliğini ve bitki üretkenliğini yükseltmeleri nedeniyle sürdürülebilir tarım sistemlerinin temel bileşenleri arasında değerlendirilmektedir. Bu girdiler, özellikle entegre besin yönetimi (Integrated Nutrient Management, INM) çerçevesinde, mineral ve organik gübrelerin etkinliğini tamamlayıcı ve optimize edici bir rol üstlenmektedir (Khan et al., 2007; Bhardwaj et al., 2014; Wahid et al., 2022). Biyogübreleme uygulamalarına ilişkin küresel ölçekte yürütülen meta-analitik değerlendirmeler, tekil saha denemelerinin ötesinde, ürün verimi ve besin kullanım verimliliğinde istatistiksel olarak anlamlı artışlar sağlandığını ortaya koyarak bu yaklaşımların genellenebilir performans potansiyeline işaret etmektedir (Schütz et al., 2018).

Biyokimyasal ve mikrobiyal süreçler çerçevesinde değerlendirildiğinde, fosfat çözüdüren mikroorganizmalar (phosphate-solubilizing microorganisms/bacteria; PSM/PSB), çözünmeyen fosfor fraksiyonlarını bitkiler için erişilebilir formlara dönüştürerek fosfor beslenmesini iyileştirmekte; aynı zamanda rizosferde mikrobiyal aktiviteyi ve toprak biyolojik işlevselliğini desteklemektedir. Performansın agro-ekolojik koşullara bağlı olarak değişkenlik gösterebilmesine karşın, PSM/PSB uygulamalarının farklı üretim sistemlerinde sürdürülebilirlik odaklı bir besin yönetimi aracı olarak güçlü bir biyolojik gerekçeye sahip olduğu bildirilmektedir (Khan et al., 2007). PSB'nin fosfor çözüdürmeye bağlı olarak bitki büyümesini teşvik ettiği, besin alımını ve biyokütle birikimini artırdığı; bu süreçlerin mikrobiyal aşılamanın mineral gübre girdilerini tamamlayıcı nitelikte işlev görebileceğini desteklediği vurgulanmaktadır (Chen et al., 2021).

Tarla denemelerine dayalı kanıtlar, bu süreç temelli değerlendirmelerle uyumlu sonuçlar ortaya koymaktadır. Pirinç-buğday üretim sistemlerinde yürütülen çalışmalar, azaltılmış mineral gübre dozlarının vermikompost ve biyogübrelerle (PSB ve siyanobakteriler dâhil) birlikte uygulanmasının, geleneksel çiftçi uygulamalarına kıyasla tane verimini ve besin alımını artırdığını göstermekte; böylece biyogübrelerin mineral gübre girdilerini azaltırken üretkenliği sürdürebileceğine işaret etmektedir (Shrivastava et al., 2023). Benzer şekilde, pirinç-nohut rotasyonlarında inorganik gübrelerin organik materyaller ve biyogübrelerle (azot fiksasyonu için *Rhizobium*, fosfor çözündürme için PSB) entegre edilmesi, bitkisel üretimin devamlılığını sağlarken toprak sağlığı ve besin kullanım verimliliğini iyileştiren etkili bir

yönetim stratejisi olarak tanımlanmaktadır (Thakur et al., 2023). Buğday üzerinde elde edilen bulgular ise, biyogübre uygulamalarının uygun besleme ve yönetim programlarıyla eşleştirildiğinde verim bileşenlerini olumlu yönde etkileyebildiğini; dolayısıyla biyogübrelemenin mevcut üretim pratikleriyle uyumlu biçimde verim oluşum süreçlerini destekleyebileceğini ortaya koymaktadır (Dabyani & Al-Ziady, 2025).

4. BİYOLOJİK AZOT FİKSASYONU (BNF) VE BAKLAGİL BİTKİLERİNİN STRATEJİLERİ

Biyolojik azot fiksasyonu (BNF) ve baklagil/örtü bitkisi temelli stratejiler, tarımsal üretim sistemlerinde dışsal azot (N) girdilerine olan bağımlılığın azaltılmasında temel bir sürdürülebilir gübreleme yaklaşımı olarak öne çıkmaktadır. Bu kapsamda, sentetik azotlu gübrelerin belirli bir bölümünün baklagiller ile *Rhizobium* türleri arasındaki simbiyotik etkileşimler yoluyla biyolojik olarak fikse edilen N ile ikame edilmesi; gübre-azot kullanım verimliliğinin artırılması ve reaktif azot kayıplarının sınırlandırılması açısından stratejik bir çözüm sunmaktadır (Herridge et al., 2008; Mendoza-Suárez et al., 2021). Mevcut sentez çalışmaları, BNF'nin tarımsal sistemler için önemli bir azot kaynağı olduğunu ve baklagil-*Rhizobium* simbiyozlarının uygun koşullar altında hektar başına yıllık yüksek miktarlarda N fikse edebildiğini ortaya koyarak, BNF'yi sürdürülebilir besin temininin temel bileşenlerinden biri olarak konumlandırmaktadır (Mendoza-Suárez et al., 2021). Baklagil ağırlıklı ekim sistemlerinin, baklagil içermeyen rotasyonlara kıyasla karbon ve azot kayıplarını azalttığı; böylece baklagil kaynaklı N girdilerinin, daha düşük çevresel besin sızıntısı ile ilişkilendirildiği bildirilmektedir (Drinkwater et al., 1998). Örtü bitkisi karışımlarına ilişkin çalışmalar, baklagillerin sisteme dâhil edilmesinin yalnızca N teminini artırmakla kalmadığını, aynı zamanda toprak örtüsü, biyolojik çeşitlilik ve besin döngüsü gibi diğer ekosistem işlevlerini de desteklediğini; baklagil kaynaklı N'nin yer aldığı rotasyonlarda azot kullanım verimliliğinin belirgin biçimde iyileştiğini göstermektedir (Blesh, 2017). Bununla birlikte, BNF etkinliğinin fosfor (P) yararlanılabilirliği ile yakından ilişkili olduğu; meta-analitik değerlendirmelerin P'yi simbiyotik azot fiksasyonunu sınırlayan temel faktörlerden biri olarak tanımladığı dikkate alındığında, sürdürülebilir gübreleme yaklaşımlarının BNF potansiyelini tam olarak ortaya

çıkarabilmesi için fosfor yönetimini baklagil temelli azot stratejileriyle bütünleştirmesi gerekmektedir (Augusto et al., 2013; Schütz et al., 2018).

5. GÜBRELEME STRATEJİLERİ VE SERA GAZI EMİSYONLARI

Tarla bitkileri üretiminde gübreleme stratejileri, özellikle N_2O emisyonları açısından önemli bir belirleyicidir. Aşırı ve dengesiz azot kullanımı, tarımsal sera gazı emisyonlarının başlıca kaynaklarından biri olarak tanımlanmaktadır (Hou et al., 2024). Bununla birlikte, gübre kullanımının tamamen kısıtlanması yerine; tanıya dayalı, dengeli ve entegre gübreleme stratejilerinin benimsenmesi hem verimin korunmasını hem de çevresel etkilerin azaltılmasını mümkün kılmaktadır.

Organik ve inorganik girdilerin uyumlu şekilde kullanılması, ürün gereksinimlerine göre optimize edilmiş azot uygulamaları ile birlikte değerlendirildiğinde, N_2O emisyonlarının azaltılmasının agronomik hedeflerle çelişmediği açıkça görülmektedir (Hou et al., 2024).

6. ORGANİK MATERYALLERİN MİNERAL GÜBRELERLE BİRLİKTE KULLANIMI

Çiftlik gübresi (FYM), vermikompost ve bitki artıkları gibi organik materyallerin mineral gübrelerle birlikte kullanımı, sürdürülebilir gübreleme stratejilerinin önemli bir bileşenidir. Uzun süreli tarla denemeleri, bu tür entegre uygulamaların yalnızca mineral gübre kullanımına kıyasla daha yüksek verim ve besin elementi alımı sağladığını ortaya koymaktadır (Lazcano et al., 2011; Puniya et al., 2019).

Özellikle çeltik-buğday sistemlerinde yürütülen uzun dönemli çalışmalarda, FYM + NPK uygulamalarının hem makro hem de mikro besin elementlerinin bitki tarafından alımını artırdığı ve toprak biyolojik aktivitesini desteklediği bildirilmiştir (Puniya et al., 2019). Vermikompostun mineral gübrelerle birlikte kullanımı ise verim artışının yanı sıra sentetik gübre kullanımının kısmen azaltılmasına olanak tanımaktadır (Thakur et al., 2021; Shrivastava et al., 2023).

7. YENİ TEKNOLOJİLER: NANO GÜBRELER VE SENSÖR TABANLI YAKLAŞIMLAR

Son yıllarda nano gübreler ve sensör temelli besin yönetim sistemleri, sürdürülebilir gübreleme kapsamında dikkat çeken yenilikçi yaklaşımlar arasında yer almaktadır. Nano gübrelerin yüksek yüzey alanları sayesinde besin elementi kullanım etkinliğini artırma potansiyeline sahip olduğu bildirilmektedir (Joseph et al., 2024). Buna ek olarak, toprak ve bitki sensörlerine dayalı karar destek sistemleri, gübre uygulamalarının daha hassas ve çevre dostu şekilde planlanmasına olanak tanımaktadır (Gottemukala et al., 2023).

8. TOPRAK ANALİZİNE DAYALI VE SİSTEM ODAKLI BESİN YÖNETİMİ

Sürdürülebilir gübrelemede “doğru kaynak, doğru doz, doğru zaman ve doğru yer” ilkesi büyük önem taşımaktadır. Toprak analizine dayalı besin yönetimi uygulamaları, geleneksel çiftçi uygulamalarına kıyasla daha yüksek verim ve besin elementi kullanım etkinliği sağlamaktadır (Sahu et al., 2023).

Tahıl rotasyon sistemlerinde yürütülen uzun süreli çalışmalar, dengeli NPK gübrelemenin ve organik girdilerle desteklenen uygulamaların hem verim sürekliliğini hem de mikro besin elementi alımını artırdığını ortaya koymuştur (Puniya et al., 2019; Sharma & Sharma, 2006).

SONUÇ

Tarla bitkileri üretiminde sürdürülebilir gübreleme; tanıya dayalı karar alma, entegre besin yönetimi, çevresel etkilerin izlenmesi ve yeni teknolojilerin kullanımı ile bütüncül bir yaklaşım gerektirmektedir. Mevcut bilimsel kanıtlar, uygun şekilde planlanan gübreleme stratejilerinin verimden ödün vermeksizin besin elementi kullanım etkinliğini artırabileceğini ve çevresel etkileri azaltabileceğini göstermektedir. Bu çerçevede sürdürülebilir gübreleme, modern tarla tarımının vazgeçilmez bir bileşeni olarak değerlendirilmelidir.

Tarla bitkilerinde sürdürülebilir gübrelemeler; verimi korurken besin maddesi kullanım etkinliğini artırmayı ve çevresel etkileri azaltmayı amaçlayan bütüncül bir yaklaşımdır. Bu çerçevede, azot başta olmak üzere besin maddelerinin toprak analizlerine dayalı olarak zamansal ve mekânsal biçimde ayarlanması gereksiz girdi kullanımını azaltmaktadır. Mineral gübrelerin

organik gübreler ve biyogübreler ile birlikte kullanıldığı Entegre Besin Maddesi Yönetimi, toprak organik maddesini ve mikrobiyal aktiviteyi destekleyerek uzun vadeli verimliliği güçlendirmektedir. Makro ve mikro besin elementlerini kapsayan dengeli gübreleme, dengesiz uygulamalara kıyasla daha yüksek ve sürdürülebilir verim sağlamaktadır. Ayrıca, gübreleme stratejilerinin sera gazı emisyonlarını azaltacak şekilde optimize edilmesi ve toprak biyolojik göstergelerinin izlenmesi, çevresel sürdürülebilirliği güçlendirmektedir. Nano-gübreler ve sensör tabanlı teknolojiler ise bu süreci destekleyen yenilikçi araçlar olarak öne çıkmaktadır.

KAYNAKÇA

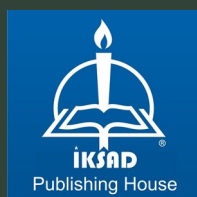
- Al Dabyani, S. M., & Al-ziady, S. H. A. (2025, February). The cooperation between biofertilizers and herbicides in controlling weeds in wheat (*Triticum aestivum* L.) fields. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1449(1), 012068.
- Augusto, L., Delerue, F., Gallet-Budynnek, A., & Achat, D. L. (2013). Global assessment of limitation to symbiotic nitrogen fixation by phosphorus availability in terrestrial ecosystems using a meta-analysis approach. *Global Biogeochemical Cycles*, 27(3), 804–815.
- Aktaş, H., Nadeem, M. A., Tutuş, Y., Doğan, S., Karaman, M., Erdemci, İ., ... & Baloch, F. S. (2025). Mineral profiling of Turkish wheat genetic resources unveiled their conserved potential for biofortification in combating hidden hunger. *Genetic Resources and Crop Evolution*, 72(4), 4915-4929.
- Bhardwaj, D., Ansari, M. W., Sahoo, R. K., & Tuteja, N. (2014). Biofertilizers function as key player in sustainable agriculture by improving soil fertility, plant tolerance and crop productivity. *Microbial Cell Factories*, 13(1), 66.
- Bindraban, P. S., Dimkpa, C., Nagarajan, L., Roy, A., & Rabbinge, R. (2015). Revisiting fertilisers and fertilisation strategies for improved nutrient uptake by plants. *Biology and Fertility of Soils*, 51(8), 897–911.
- Blesh, J. (2018). Functional traits in cover crop mixtures: Biological nitrogen fixation and multifunctionality. *Journal of Applied Ecology*, 55(1), 38–48.
- Burney, J. A., Davis, S. J., & Lobell, D. B. (2010). Greenhouse gas mitigation by agricultural intensification. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 107(26), 12052–12057.
- Chen, J., Zhao, G., Wei, Y., Dong, Y., Hou, L., & Jiao, R. (2021). Isolation and screening of multifunctional phosphate solubilizing bacteria and its growth-promoting effect on Chinese fir seedlings. *Scientific Reports*, 11(1), 9081.
- Cui, Z., Zhang, F., Chen, X., Miao, Y., Li, J., Shi, L., ... Bao, D. (2008). On-farm estimation of indigenous nitrogen supply for site-specific nitrogen

- management in the North China Plain. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 81(1), 37–47.
- Drinkwater, L. E., Wagoner, P., & Sarrantonio, M. (1998). Legume-based cropping systems have reduced carbon and nitrogen losses. *Nature*, 396(6708), 262–265.
- Doğan, S., & Çığ, F. (2023). Effects of chemical, organic and microbial fertilization on agronomical growth parameters, seed yield and chemical composition of chickpea. *Journal of Elementology*, 28(4), 949-970.
- Dogan, S., Eren, A., & Dogan, Y. (2021). The effect of different fertilizer sources on yield and nutrient content in corn cultivation as the second crop.
- Gottemukkala, L., Jajala, S. T. R., Thalari, A., Vootkuri, S. R., Kumar, V., & Naidu, G. M. (2023). Sustainable crop recommendation system using soil NPK sensor. *E3S Web of Conferences*, 430, 01100.
- Gupta, K., & Bordoloi, N. (2024). Integrated nutrient management: Effect on soil properties and crop yields on sandy clay loam soil under maize–wheat cropping system. *Agricultural Science Digest*, 1–8.
- Herridge, D. F., Peoples, M. B., & Boddey, R. M. (2008). Global inputs of biological nitrogen fixation in agricultural systems. *Plant and Soil*, 311(1), 1–18.
- Hou, D., Meng, X., Qin, M., Zheng, E., Chen, P., Meng, F., & Zhang, C. (2024). Nitrous oxide (N₂O) emission characteristics of farmland (rice, wheat, and maize) based on different fertilization strategies. *PLoS One*, 19(7), e0305385.
- Joseph, M., Hemalatha, M., Bhuvaneswari, J., Srinivasan, S., & Leninraja, D. (2024). Nano-fertilizers: The future of nutrient approaches for cereals. *The Indian Journal of Agricultural Sciences*, 94(11), 1155–1164.
- Khan, M. S., Zaidi, A., & Wani, P. A. (2009). Role of phosphate solubilizing microorganisms in sustainable agriculture: A review. *Sustainable Agriculture*, 551–570.
- Kumar, M., Singh, Y. K., Maurya, S. K., Maurya, D. K., Sachan, R., ... Tiwari, A. (2023). Efficient use of nano-fertilizer for increasing productivity and profitability along with maintain sustainability in rice crop: A review. *International Journal of Environment and Climate Change*, 13, 1358–1368.

- Kumar, Y., Tiwari, K. N., Singh, T., & Raliya, R. (2021). Nanofertilizers and their role in sustainable agriculture. *Annals of Plant and Soil Research*, 23(3), 238–255.
- Lazcano, C., Revilla, P., Malvar, R. A., & Domínguez, J. (2011). Yield and fruit quality of four sweet corn hybrids (*Zea mays*) under conventional and integrated fertilization with vermicompost. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 91(7), 1244–1253.
- Meena, R. S., Kumar, S., Datta, R., Lal, R., Vijayakumar, V., Brtnicky, M., ... Marfo, T. D. (2020). Impact of agrochemicals on soil microbiota and management: A review. *Land*, 9(2), 34.
- Mendoza-Suárez, M., Andersen, S. U., Poole, P. S., & Sánchez-Cañizares, C. (2021). Competition, nodule occupancy, and persistence of inoculant strains: Key factors in the rhizobium–legume symbioses. *Frontiers in Plant Science*, 12, 690567.
- Miao, Y., Stewart, B. A., & Zhang, F. (2011). Long-term experiments for sustainable nutrient management in China: A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 31(2), 397–414.
- Ozyazici, G., & Turan, N. (2021). Effect of vermicompost application on mineral nutrient composition of grains of buckwheat (*Fagopyrum esculentum* M.). *Sustainability*, 13(11), 6004.
- Padbhushan, R., Sharma, S., Kumar, U., Rana, D. S., Kohli, A., Kaviraj, M., ... Gupta, V. V. (2021). Meta-analysis approach to measure the effect of integrated nutrient management on crop performance, microbial activity, and carbon stocks in Indian soils. *Frontiers in Environmental Science*, 9, 724702.
- Puniya, R., Pandey, P. C., Bisht, P. S., Singh, D. K., & Singh, A. P. (2019). Effect of long-term nutrient management practices on soil micronutrient concentrations and uptake under a rice–wheat cropping system. *The Journal of Agricultural Science*, 157(3), 226–234.
- Sahu, R., Kumar, D., Sohane, R., Kumar, R., Kumar, A., Mandal, S. K., ... Sahu, J. (2023). Crop establishment and nutrient management for production sustainability in rice–wheat system in eastern India. *The Indian Journal of Agricultural Sciences*, 93(10), 1114–1119.
- Saini, N., Yadav, H. S., Saini, S., Sharma, A., & Saini, N. (2025). Advances in integrated nutrient management practices for cereal crops: A

- comprehensive review. *International Journal of Plant & Soil Science*, 37(1), 375–383.
- Schütz, L., Gattinger, A., Meier, M., Müller, A., Boller, T., Mäder, P., & Mathimaran, N. (2018). Improving crop yield and nutrient use efficiency via biofertilization: A global meta-analysis. *Frontiers in Plant Science*, 8, 2204.
- Shanahan, J. F., Kitchen, N. R., Raun, W. R., & Schepers, J. S. (2008). Responsive in-season nitrogen management for cereals. *Computers and Electronics in Agriculture*, 61(1), 51–62.
- Sharma, S. K., & Sharma, S. N. (2006). Effect of different combinations of inorganic nutrients and farmyard manure on the sustainability of a rice–wheat–mungbean cropping system. *Acta Agronomica Hungarica*, 54(1), 93–99.
- Shrivastava, A. K., Thakur, R. K., Bisen, N. K., Rai, S. K., & Sarvade, S. (2023). Response of integrated nutrient management on crop productivity and soil fertility under rice–wheat cropping system in Chhattisgarh Plain agro-climatic zone. *Journal of Experimental Agriculture International*, 45(12), 201–208.
- Singh, M. V., Kumar, M., Mitra, S., & Naik, M. R. (2015). Nutrient management for jute–rice cropping system using soil test target yield equation. *Journal of Applied and Natural Science*, 7(1), 211–214.
- Thakur, R., Bisen, N. K., Shrivastava, A. K., Rai, S. K., & Sarvade, S. (2023). Effect of integrated nutrient management on chickpea productivity and soil fertility status under rice–chickpea cropping system. *Journal of Experimental Agriculture International*, 45(12), 250–256.
- Thakur, R., Shrivastava, A. K., Sarvade, S., Rai, S. K., Koutu, G. K., Bisen, N. K., & Khan, M. I. (2021). Response of integrated application of inorganic fertilizers and vermicompost on rice productivity at farmer field. *International Journal of Plant and Soil Science*, 33(4), 25–31.
- Tilman, D., Balzer, C., Hill, J., & Befort, B. L. (2011). Global food demand and the sustainable intensification of agriculture. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 108(50), 20260–20264.
- Turan, N., (2021). Crop Saline Tolerance in Relation To Nitrate/Ammonium Ratio in Fertilizers. Gülcan DEMİROĞLU TOPCU & Seyithan

- SEYDOSOGLU (Ed) Sustainable Forage Production and Ecological Safety (359-374 ss). Ankara; Turkey: IKSAD.
- Vitousek, P. M., Aber, J. D., Howarth, R. W., Likens, G. E., Matson, P. A., Schindler, D. W., ... Tilman, D. G. (1997). Human alteration of the global nitrogen cycle: Sources and consequences. *Ecological Applications*, 7(3), 737–750.
- Wahid, F., Sharif, M., Shah, F., Ali, A., Adnan, M., Shah, S., ... Datta, R. (2022). Mycorrhiza and phosphate solubilizing bacteria: Potential bioagents for sustainable phosphorus management in agriculture. *Phyton*, 91(2), 257–270.
- Yu, C., Huang, X., Chen, H., Godfray, H. C. J., Wright, J. S., Hall, J. W., ... Taylor, J. (2019). Managing nitrogen to restore water quality in China. *Nature*, 567(7749), 516–520.



ISBN: 978-625-378-565-9