

TARLA BİTKİLERİNDE

ve DİĞER TARIMSAL KONULARDA

SÜRDÜRÜLEBİLİR UYGULAMALAR: II

Editör
HAZIM SERKAN TENİKECİER



BİDGE Yayınları

**Tarla Bitkilerinde ve Diğer Tarımsal Konularda Sürdürülebilir
Uygulamalar: 1**

Editör: HAZIM SERKAN TENİKECİER

ISBN: -

1. Baskı

Sayfa Düzeni: Gözde YÜCEL

Yayınlama Tarihi: 2025-12-25

BİDGE Yayınları

Bu eserin bütün hakları saklıdır. Kaynak gösterilerek tanıtım için yapılacak kısa alıntılar dışında yayıncının ve editörün yazılı izni olmaksızın hiçbir yolla çoğaltılamaz.

Sertifika No: 71374

Yayın hakları © BİDGE Yayınları

www.bidgeyayinlari.com.tr - bidgeyayinlari@gmail.com

Krc Bilişim Ticaret ve Organizasyon Ltd. Şti.

Güzeltepe Mahallesi Abidin Daver Sokak Sefer Apartmanı No: 7/9 Çankaya /
Ankara



ÖNSÖZ

Tarım, insanlığın varoluşundan bu yana temel bir yaşam kaynağı olmuş; günümüzde ise artan dünya nüfusunun beslenmesi ile doğal kaynakların korunması sorumluluğunu aynı anda taşıyan stratejik bir sektör hâline gelmiştir. Bu hassas denge içerisinde, tarımın temel yapı taşlarından biri olan tarla bitkileri üretimi; gıda güvenliğinin sağlanması, ekonomik sürdürülebilirliğin desteklenmesi ve ekolojik dengenin korunması açısından kritik bir öneme sahiptir.

İklim değişikliği, toprak bozunumu, su kaynaklarının azalması ve biyolojik çeşitlilik kaybı gibi küresel sorunlar, geleneksel tarımsal uygulamaların yeniden değerlendirilmesini ve daha sürdürülebilir üretim sistemlerine geçişi zorunlu kılmaktadır. Tarla bitkileri üretimi; toprak, bitki, hayvan, makine, kimyasal girdiler, ekonomi ve yönetim gibi tarımın tüm bileşenlerini bütüncül bir sistem içerisinde ele alarak, ekolojiyle uyumlu ve toplum yararına çözümler sunmaktadır.

Bu alanda çalışan uzmanlar ve üreticilerin; bitki koruma, su yönetimi, ekoloji, tohum üretimi, genetik kaynaklar, bitki ıslahı, alternatif kullanım alanları, depolama ve muhafaza, pazarlama, bilgi yayımı ve ürün kullanımı gibi birçok konuda disiplinler arası bir bakış açısına ve güçlü bir eğitim altyapısına sahip olmaları büyük önem taşımaktadır.

Sürdürülebilirliğin sabit bir hedef değil, sürekli gelişim ve öğrenme gerektiren dinamik bir süreç olduğu gerçeğinden hareketle hazırlanan bu eser; okuyucularını mevcut uygulamaları sorgulamaya, bilimsel bilgiyi doğa ve insan odaklı yaklaşımlarla birleştirmeye teşvik etmektedir. Bu sayfalarda yer alan bilgilerin, sürdürülebilir tarımsal uygulamaların geliştirilmesine katkı sunmasını ve tarla bitkileri alanında çalışan tüm paydaşlara yol gösterici olmasını temenni ederiz.

Doç. Dr. HAZIM SERKAN TENİKECİER
TEKİRDAĞ NAMIK KEMAL ÜNİVERSİTESİ

İÇİNDEKİLER

ÇİM BİTKİLERİNİN EKOSİSTEM HİZMETLERİ VE SINIRLILIKLARI	1
<i>ŞÜKRÜ SEZGİ ÖZKAN, ESRA ÇETİNKAYA ÖZKAN</i>	
BIOFERTİLİZER AND NANOTECHNOLOGICAL FORMULATIONS WITH SPERMIDINE	31
<i>AYŞE ÖZGE ŞİMŞEK SOYSAL, MUHAMMED AÇIKGÖZ</i>	
ŞANLIURFA EKOLOJİK KOŞULLARINDA KIRMIZI MERCİMEK (LENS CULINARIS MEDIC) YETİŞTİRİCİLİĞİ	51
<i>AYŞE GÜLGÜN ÖKTEM</i>	
MISIRDA (ZEA MAYS L.) GÜBRELEME	67
<i>AYŞE GÜLGÜN ÖKTEM</i>	
ARPA ISLAHINDA VERİM İSTİKRARI, STRES TOLERANSI VE HASTALIK DİRENCİNE ENTEGRE YAKLAŞIMLAR	80
<i>İLKER YÜCE</i>	
İKLİM DEĞİŞİKLİĞİNİN TÜRKİYE’DE BAKLAGİL YEM BİTKİLERİ YETİŞTİRİCİLİĞİNE ETKİLERİ	102
<i>HASAN KALE, UĞUR BAŞARAN</i>	
SON ZAMANLARDA GENOTİPLERİN DEĞERLENDİRİLMESİNDE ÇOK SIK KULLANILAN GGE BİPLOT ANALİZ TEKNİĞİNİN UYGULAMALARI VE YORUMLANMASI	120
<i>ENVER KENDAL, MEHMET SALİH SAYAR</i>	
BRASSİCACEAE FAMILİYASI TOHUM KABUĞU MÜSİLAJI	142
<i>YUSUF ARSLAN, İLHAN SUBAŞI</i>	
ROLES OF ENDOGENOUS PHYTOHORMONES IN ABIOTIC STRESS TOLERANCE OF MAJOR FIELD CROPS: A REVIEW	163
<i>TİMUÇİN TAŞ</i>	

MİKROBİYAL GÜBRE UYGULAMALARINDA SORUNLAR, SINIRLAMALAR VE GELECEK PERSPEKTİFLERİ	193
---	-----

İLHAN SUBAŞI, YUSUF ARSLAN

BÖLÜM 1

ÇİM BİTKİLERİNİN EKOSİSTEM HİZMETLERİ VE SINIRLILIKLARI

ŞÜKRÜ SEZGİ ÖZKAN¹
ESRA ÇETİNKAYA ÖZKAN²

Giriş

Çim bitkileri, günümüzde konut alanları, parklar, spor sahaları, rekreasyon alanları, yol kenarları ve çeşitli kamusal açık alanlarda yaygın olarak kullanılan bitkisel örtü unsurlarıdır (Beard, 1973). Bu bitkilerin oluşturduğu çim alanlar; toprağın yüzeyini hızlı bir şekilde örten, homojen bir görünüme sahip, düzenli biçimle kısa tutulan ve Gramineae (Poaceae) familyasına ait bitki topluluklarından meydana gelen, yapay olarak tesis edilmiş yeşil yüzeyler olarak tanımlanmaktadır (Pessarakli, 2007; Demiroğlu Topçu ve Özkan, 2016). Bu özellikleri nedeniyle çim alanlar, özellikle yoğun kullanımın söz konusu olduğu kentsel ve sportif alanlarda tercih edilen başlıca bitkisel yüzey tipleri arasında yer almaktadır (Şekil 1). Kent peyzajı bağlamında çim alanlar, yalnızca mekânsal süreklilik sağlayan yüzeyler değil, çeşitli işlevleriyle

¹ Doç. Dr., Ege Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Tarla Bitkileri Bölümü, İzmir, Orcid: 0000-0001-5989-0384

² Dr., Fırat Üniversitesi, Mimarlık Fakültesi, Peyzaj Mimarlığı Bölümü, Elazığ, Orcid: 0000-0001-8797-194X

kentsel sistemler içerisinde önemli roller üstlenmektedir. Bu alanlar çoğu zaman estetik, rekreasyonel ya da işlevsel yüzeyler olarak algılansa da çim bitkileri yalnızca görsel değer sunan pasif unsurlar değildir. Aksine, toprak–bitki–atmosfer etkileşimleri içerisinde aktif rol oynayan, çevresel ve toplumsal sistemlerle sürekli etkileşim hâlinde bulunan canlı ekosistem bileşenleridir (Beard & Green, 1994; Casler, 2006; Stier & ark., 2013).

Şekil 1. Çim alanlar



Kaynak: Yazar arşivi (Orijinal)

1. im Bitkileri ve Ekosistem Perspektifi

Bitkisel sistemlerin insanlığa sağladığı yararlar günümüzde “ekosistem hizmetleri” kavramı altında ele alınmaktadır. Bu kavram, temiz hava ve suyun sağlanması, toprak verimliliğinin korunması, su döngüsünün düzenlenmesi, iklimin dengelenmesi ve insan refahının desteklenmesi gibi çok sayıda işlevi kapsamaktadır (Millennium Ecosystem Assessment, 2005; Thompson & Kao-Kniffin, 2017). im bitkileri, doğrudan gıda üretimi sağlamamaları dışında, birçok doğal ve yarı-doğal bitki örtüsüyle benzer ekosistem hizmetleri sunabilmektedir. Bununla birlikte, tüm bitkisel sistemlerde olduğu gibi, çim bitkileri de yanlış planlama veya yönetim uygulamaları sonucunda çevresel, ekonomik ya da toplumsal bazı olumsuzluklara yol açabilmektedir. Bu tür olumsuz etkiler literatürde “ekosistem zararları” olarak tanımlanmaktadır (Shackleton & ark., 2016).

im bitkilerine yönelik ekosistem temelli değerlendirmelerin temelleri, bu alanın erken dönem çalışmalarında atılmıştır. im sistemlerinin çevresel, rekreasyonel ve estetik işlevleri ilk kez bütüncül biçimde ele alınmış; bu bitkilerin yalnızca görsel unsurlar değil, aynı zamanda çevresel süreçlere katkı sağlayan sistemler olduğu vurgulanmıştır (Beard & Green, 1994). Daha sonraki çalışmalar, bu yaklaşımı geliştirerek çim bitkilerinin tarihsel kullanımını, ıslah çalışmalarını ve farklı kullanım amaçlarına yönelik evrimini ayrıntılı biçimde ele almıştır (Casler, 2006). İzleyen yıllarda farklı coğrafyalarda yürütölen araştırmalar, çim bitkilerinin sağladığı faydaları çevresel, toplumsal ve ekonomik boyutlarıyla yeniden değerlendirmiş; su kullanımı, bakım girdileri ve arazi kullanımı gibi konulara yönelik eleştirileri de gündeme taşımıştır (Higginson & McMaugh, 2010; Stier & ark., 2013; Monteiro, 2017).

Son otuz yıl içerisinde yapılan çalışmalar, çim bitkilerinin ekosistem hizmetlerinin yalnızca estetik ve rekreasyonla sınırlı olmadığını açıkça ortaya koymuştur (Braun & ark., 2024). Karbon tutulumu, toprak sağlığının korunması, yüzey akışının azaltılması,

mikroklimanın düzenlenmesi ve biyolojik yaşam için habitat oluşturulması gibi işlevler, çim sistemlerinin çevresel önemini güçlendirmiştir (Monteiro, 2017; Thompson & Kao-Kniffin, 2017). Bununla birlikte, bu sistemlerin sağladığı faydalar ile potansiyel zararlar arasındaki denge, büyük ölçüde uygulanan yönetim stratejilerine bağlıdır. Yoğun girdili, sürdürülebilirlik ilkeleriyle uyumsuz uygulamalar; sera gazı salımları, aşırı su tüketimi ve kimyasal kullanımına bağlı riskleri artırabilmektedir (Stier & ark., 2013; Monteiro, 2017).

Çim bitkilerinin ekosistem zararları, bitkinin biyolojik özelliklerinden ziyade çoğunlukla insan kaynaklı uygulamalarla ilişkilidir. Nitekim tüm bitkisel sistemlerde olduğu gibi, çim bitkileri de uygun tür seçimi, doğru bakım yoğunluğu ve çevresel koşullara uyumlu yönetim yaklaşımlarıyla ele alındığında, sağladıkları ekosistem hizmetleri potansiyel zararların önüne geçebilmektedir (Shackleton & ark., 2016). Bu bağlamda, çim alanların değerlendirilmesi “var ya da yok” ikilemi yerine, hangi koşullarda ve nasıl yönetildikleri sorusu üzerinden yapılmalıdır.

Hızla artan kentleşme, geçirimsiz yüzeylerin yaygınlaşması ve doğal alanların daralması, çim bitkilerinin kentsel ve yarı-kentsel alanlardaki rolünü daha da önemli hâle getirmektedir. Çim alanlar, bu tür ortamlarda toprak yüzeyini kaplayarak erozyonu sınırlandırmakta, yüzey akışını yavaşlatmakta ve insan-doğa etkileşimini destekleyen açık alanlar sunmaktadır. Bu özellikleriyle çim bitkileri, sürdürülebilir peyzaj yaklaşımlarının potansiyel bileşenleri arasında yer almaktadır (Hostetler, 2021).

Çim bitkilerinin çevresel, toplumsal ve ekonomik faydaları ile olası zararları bütüncül bir çerçevede ele alınmalıdır. Farklı kullanım alanları ve yönetim senaryoları dikkate alınarak bilimsel ve eleştirel bir yaklaşım benimsenmelidir. Çim bitkileri, doğru yönetim altında sağlayabilecekleri katkılar ve sınırlılıkları birlikte değerlendirilmelidir.

2. Çim Bitkilerinin Çevresel (Ekolojik) Faydaları

Çim bitkileri, geniş bir kullanım alanına sahip olmaları nedeniyle, doğal ve yarı-doğal ekosistemlerle insan tarafından şekillendirilmiş peyzajlar arasında işlevsel bir ara yüz oluşturmaktadır. Bu bitkiler, sürekli yeşil örtü oluşturmaları, yoğun kök sistemleri ve çok yıllık büyüme karakterleri sayesinde, çevresel süreçlere aktif olarak katılmakta ve çeşitli ekosistem hizmetleri sunmaktadır. Son otuz yıl içerisinde yapılan araştırmalar, çim bitkilerinin yalnızca yüzey kaplayıcı bitkiler olmadığını; karbon, su, toprak ve enerji döngüleriyle doğrudan ilişkili canlı sistemler olduğunu açık biçimde ortaya koymuştur (Beard & Green, 1994; Stier & ark., 2013; Monteiro, 2017).

Karbon Döngüsü, Toprak Organik Maddesi ve Atmosferle Etkileşim

Çim bitkilerinin çevresel faydaları arasında en çok tartışılan konulardan biri, karbon döngüsüne katkılarıdır. Fotosentez yoluyla atmosferdeki karbondioksiti bünyelerine alan çim bitkileri, bu karbonu hem toprak üstü biyokütlede hem de kök sistemi aracılığıyla toprakta depolamaktadır. Çok yıllık büyüme özellikleri nedeniyle çim bitkilerinde kök ve yaprak dokularının düzenli olarak yenilenmesi, toprak organik maddesinin zaman içerisinde artmasına katkı sağlamaktadır (Bigelow & ark., 2002; Qian & Follett, 2002; Shi & ark., 2006).

Toprakta biriken organik karbon, yalnızca karbon depolanması açısından değil, aynı zamanda toprak biyolojik aktivitesinin sürdürülmesi bakımından da önemlidir. Artan organik madde, mikrobiyal biyokütleyi desteklemekte; bakteriler, mantarlar ve diğer toprak organizmaları için uygun bir yaşam ortamı oluşturmaktadır (Elliott & Des Jardin, 1999; Elliott & ark., 2003; Kaye & ark., 2005). Bu süreç, toprak yapısının iyileşmesine, agregat

stabilitesinin artmasına ve uzun vadede toprak sağlığının korunmasına katkı sağlamaktadır (Kibblewhite & ark., 2008).

Ancak karbon tutulumu potansiyelinin, çim alanların yaşı, tür kompozisyonu, iklim koşulları ve yönetim uygulamalarıyla yakından ilişkili olduğu bilinmektedir. Uzun süreli çalışmalarda, çim sistemlerinde karbon birikiminin zamanla yavaşladığı ve belirli bir denge noktasına ulaştığı bildirilmiştir (Bandaranayake & ark., 2003; Selhorst & Lal, 2011). Ayrıca yoğun bakım uygulamalarıyla ilişkili enerji tüketimi ve sera gazı salımları, net karbon kazanımını sınırlayabilmektedir. Bu durum, çim bitkilerinin karbon döngüsüne katkısının ancak sürdürülebilir yönetim koşulları altında anlamlı hâle geldiğini göstermektedir (Law & Patton, 2017; Braun & Bremer, 2019).

Toprak Stabilizasyonu, Erozyonun Önlenmesi ve Su Dinamikleri

im bitkilerinin çevresel açıdan en belirgin faydalarından biri, toprak yüzeyini sürekli olarak kaplayarak erozyonu azaltmalarıdır. Yoğun ve lifli kök sistemleri, toprağın üst katmanlarında fiziksel bir ağ oluşturarak toprak parçacıklarının taşınmasını sınırlandırmakta; aynı zamanda toprak üstü biyokütle, yağışın kinetik enerjisini azaltarak yüzey akışını yavaşlatmaktadır (Gross & ark., 1990; Linde & ark., 1995; Krenitsky & ark., 1998).

Bu özellik, özellikle eğimli alanlar, yol kenarları ve kentsel yüzeyler açısından büyük önem taşımaktadır. Araştırmalar, yoğun bitki örtüsüne sahip çim alanlardan kaynaklanan sediment kayıplarının, çıplak toprak yüzeylere kıyasla son derece düşük olduğunu göstermektedir (Stier & ark., 2013). Bu durum, çim bitkilerini toprak koruma ve arazi stabilizasyonu açısından etkili bir bitkisel örtü hâline getirmektedir.

Toprak stabilizasyonu ile yakından ilişkili bir diğer süreç ise suyun toprak profiline infiltrasyonudur. im bitkilerinin kök sistemi

ve yüzeyde oluşan organik tabaka, yüzey akışını yavaşlatarak suyun toprak içine sızmasını kolaylaştırmaktadır. Bu süreç, yeraltı suyu beslenmesine katkı sağlarken aynı zamanda yüzey sularına taşınabilecek sediment ve çözünmüş maddelerin miktarını da azaltmaktadır (Petrovic & Easton, 2005; Steinke & ark., 2009). Bu yönüyle çim alanlar, doğal filtrasyon sistemleri gibi işlev görebilmektedir.

Besin Maddesi Tutulumu ve Su Kalitesinin Korunması

Toprak stabilizasyonu ile birlikte değerlendirildiğinde, çim bitkilerinin besin maddesi kayıplarını sınırlandırma potansiyeli önemli bir çevresel fayda olarak öne çıkmaktadır. Azot ve fosfor gibi bitki besin maddeleri, yanlış yönetim koşullarında yüzey ve yeraltı sularında kirliliğe yol açabilmektedir. Ancak sağlıklı ve yoğun çim örtüsü, bu besin maddelerinin büyük bir kısmını kök bölgesinde tutarak su kaynaklarına taşınmasını sınırlandırmaktadır (Gross & ark., 1991; Miltner & ark., 1996).

Araştırmalar, uygun dozlarda ve zamanlamayla yapılan gübreleme uygulamalarının, çim alanlarda besin maddesi kayıplarını sınırladığını ve bu kayıpların birçok doğal çayır sistemiyle benzer düzeylerde olduğunu göstermektedir (Guillard & Kopp, 2004; Steinke & ark., 2009). Bununla birlikte, toprak dokusu ve drenaj özellikleri bu süreçte belirleyici olmaktadır. Özellikle kumlu topraklarda besin maddesi taşınımı riski daha yüksek olsa da çim bitkilerinin yoğun kök sistemi bu riskin önemli ölçüde azaltılmasına katkı sağlamaktadır (Petrovic, 2004; Côté & Grégoire, 2021).

Bu bağlamda, çim alanların su kalitesi üzerindeki etkileri, bitkinin varlığından ziyade uygulanan yönetim stratejileriyle doğrudan ilişkilidir. Toprak analizi temelli gübreleme, yavaş salımlı gübrelerin kullanımı ve uygun sulama uygulamaları, bu sistemlerin çevresel faydalarını güçlendiren temel unsurlar arasında yer almaktadır (Frank & ark., 2016; Braun & ark., 2023).

Mikroklima Düzenleme, Evaporatif Soğutma ve Fiziksel  evre

 im bitkilerinin çevresel faydaları yalnızca toprak ve su süreçleriyle sınırlı değildir; aynı zamanda mikroklimatik koşullar üzerinde de belirgin etkiler göstermektedir. Bitkisel yüzeyler, evapotranspirasyon yoluyla  evre sıcaklığını düşürmekte ve bu sayede özellikle kentsel alanlarda hissedilen ısı yükünü azaltmaktadır (Beard & Johns, 1985; Gill & ark., 2007).

 im alanların yüzey sıcaklıklarının, beton, asfalt veya sentetik yüzeylere kıyasla belirgin biçimde daha düşük olduğu farklı çalışmalarla ortaya konmuştur. Bu durum hem insan konforunu artırmakta hem de çevredeki yapıların soğutma ihtiya ını dolaylı olarak azaltmaktadır (Beard & Green, 1994; Takebayashi & Moriyama, 2009; Carvalho & ark., 2021). Ayrıca  im bitkilerinin yüzey özellikleri, güneş ışınının yansımısını ve parlama etkisini azaltarak görsel konforu da iyileştirmektedir.

Bunun yanında, bitkisel yüzeylerin ses dalgalarını absorbe etme kapasitesi, çim alanların gürültü kirliliğini azaltma potansiyeline işaret etmektedir. Her ne kadar bu konuda çim bitkilerine özgü çalışmalar sınırlı olsa da bitkisel örtülerin sert yüzeylere kıyasla daha düşük yansımaya ve daha yüksek ses emilimi sağladığı bilinmektedir (Cook & Haverbeke, 1971; Forss n & ark., 2014). Bu  zellik, özellikle yol kenarları ve yoğun insan faaliyetinin olduğu alanlarda çevresel konforu artıran bir unsur olarak değerlendirilmektedir.

Bozulmuş Alanların Islahı ve Atıkların Değerlendirilmesi

 im bitkileri, çevresel faydaları kapsamında bozulmuş veya kirlenmiş alanların rehabilitasyonunda da önemli roller üstlenmektedir. Fitoremediasyon uygulamalarında, yoğun kök sistemine sahip çim türlerinin ağır metaller ve diğer kirleticilerin tutulmasında etkili olabildiği gösterilmiştir (Shahandeh & Hossner, 2000; Tordoff & ark., 2000). Bu  zellik, çim bitkilerini sanayi

alanları, maden sahaları ve atık depolama alanlarının ıslahında işlevsel bir araç hâline getirmektedir.

Ayrıca çim alanlar, arıtılmış atık suların ve biyokatıların değerlendirilmesi için de uygun bitkisel sistemler sunmaktadır. Gıda üretimine yönelik olmayan bu alanlar, organik atıkların geri kazanımına ve döngüsel kaynak kullanımına katkı sağlamaktadır (Harivandi, 2008; Guertal & Green, 2012; Kranz & ark., 2020). Bu yönüyle çim bitkileri, sürdürülebilir arazi yönetimi ve çevresel yüklerin azaltılması açısından potansiyel çözümler sunmaktadır (Hostetler, 2021).

3. Çim Bitkilerinin Toplumsal ve Kültürel Faydaları

Çim bitkilerinin sağladığı faydalar yalnızca çevresel süreçlerle sınırlı değildir; aynı zamanda insan sağlığı, toplumsal etkileşim ve yaşam kalitesi üzerinde de önemli etkiler göstermektedir. Özellikle kentleşmenin hızla arttığı günümüzde, insanların doğayla kurduğu doğrudan temas giderek azalmakta, bu durum fiziksel ve ruhsal sağlık üzerinde çeşitli olumsuz sonuçlar doğurmaktadır. Çim alanlar, kentsel ve yarı-kentsel peyzajlarda doğayla temasın sürdürülebildiği sınırlı açık alanlardan biri olarak, toplumsal ve kültürel açıdan önemli ekosistem hizmetleri sunmaktadır (Beard & Green, 1994; Stier & ark., 2013).

İnsan Ruh Sağlığı ve Psikolojik İyilik Hali

Yeşil alanların insan ruh sağlığı üzerindeki olumlu etkileri, disiplinler arası çalışmalarla güçlü biçimde ortaya konmuştur. Çim bitkileriyle kaplı açık alanlar, stres düzeylerinin azalması, zihinsel yorgunluğun hafiflemesi ve genel psikolojik iyilik hâlinin artmasıyla ilişkilendirilmektedir (Ulrich, 1984; Kaplan, 1993; Bratman & ark., 2012). Doğal veya yarı-doğal bitkisel örtüye sahip alanlara erişim, bireylerin dikkat yenilenmesi, duygusal denge ve zihinsel toparlanma süreçlerini desteklemektedir.

Çim alanların bu etkisi, yalnızca aktif kullanım durumlarıyla sınırlı değildir. Yeşil alanlara görsel erişim dahi, bireylerin ruhsal durumları üzerinde olumlu sonuçlar doğurabilmektedir. Bitkisel peyzajlara bakan pencerelere sahip çalışma veya yaşam alanlarında, daha yüksek memnuniyet düzeyleri ve daha düşük stres belirtileri rapor edilmiştir (Kaplan, 1993; Lohr & ark., 1996). Bu bağlamda çim bitkileri, kentlerde insan-doğa etkileşiminin sürdürülebilmesi açısından önemli bir aracı rol üstlenmektedir.

Fiziksel Aktivite, Rekreasyon ve Sağlık

Çim alanların toplumsal faydaları arasında öne çıkan bir diğer unsur, fiziksel aktivite ve rekreasyon olanakları sunmalarıdır. Parklar, spor sahaları, okul bahçeleri ve benzeri çim alanlar; yürüyüş, oyun, spor ve egzersiz gibi çok sayıda fiziksel aktiviteye uygun yüzeyler sağlamaktadır. Bu alanların varlığı, özellikle kentsel ortamlarda hareketsiz yaşam biçiminin olumsuz etkilerinin azaltılmasına katkı sunmaktadır (Godbey & ark., 1992; Cohen & ark., 2007).

Araştırmalar, yeşil alanlara erişimin artmasının fiziksel aktivite düzeylerini yükselttiğini ve obezite riskini azalttığını göstermektedir (Takano & ark., 2002; Dear & ark., 2010). Çim bitkileriyle kaplı açık alanlar, farklı yaş gruplarına hitap eden güvenli ve erişilebilir alanlar sunarak, toplum genelinde fiziksel hareketliliği teşvik etmektedir. Ayrıca çim alanların sunduğu esnek kullanım olanakları, bu alanları hem bireysel hem de toplu aktiviteler için uygun kılmaktadır.

Toplumsal Etkileşim, Sosyal Uyum ve Yaşam Kalitesi

Çim alanlar, yalnızca bireysel sağlık açısından değil, toplumsal etkileşim ve sosyal uyum bakımından da önemli işlevler üstlenmektedir. Ortak kullanılan yeşil alanlar, bireylerin bir araya gelmesini, yüz yüze etkileşim kurmasını ve sosyal bağların güçlenmesini teşvik etmektedir (Coley & ark., 1997; Chiesura,

2004). Bu tür alanlar, komşuluk ilişkilerinin gelişmesine ve topluluk bilincinin güçlenmesine katkı sağlamaktadır.

Yeşil alanlarla çevrili yerleşim alanlarında yaşayan bireylerin, daha güçlü sosyal bağlar kurduğu ve yaşadıkları çevreye daha yüksek aidiyet hissettiği bildirilmektedir (Kuo & ark., 1998; Kuo & Sullivan, 2001a). Çim bitkileriyle kaplı parklar ve açık alanlar, bu sosyal etkileşimlerin gerçekleştiği temel mekânlar arasında yer almaktadır. Bu durum, çim alanların toplumsal refahın desteklenmesinde dolaylı ancak önemli bir rol oynadığını göstermektedir.

Güvenlik Algısı ve Suçun Azaltılması

Toplumsal faydalar bağlamında dikkat çeken bir diğer konu, yeşil alanların güvenlik algısı ve suç oranları üzerindeki etkileridir. Düzenli olarak bakımı yapılan, çim bitkileriyle kaplı açık alanların bulunduğu yerleşimlerde, bireylerin kendilerini daha güvende hissettikleri ve suç oranlarının daha düşük olduğu bildirilmiştir (Kuo & Sullivan, 2001b; Wolfe & Mennis, 2012). Bu durum, yeşil alanların sosyal kontrol mekanizmalarını güçlendirdiğine işaret etmektedir.

Çim alanlar, kamusal mekânların daha fazla ve düzenli kullanılmasını teşvik ederek, terk edilmiş veya bakımsız alanlara kıyasla olumsuz davranışların ortaya çıkma olasılığını azaltmaktadır. Ayrıca bu alanlar, çocuklar ve yaşlılar gibi hassas gruplar için daha güvenli dış mekân kullanım olanakları sunmaktadır (Branas & ark., 2011; Troy & ark., 2016).

Polen, Alerjenler ve İnsan Sağlığı Açısından Göreli Durum

Bitkisel peyzajların insan sağlığı üzerindeki etkileri değerlendirilirken, alerjen polen üretimi de dikkate alınması gereken bir konudur. Çim bitkileri, botanik olarak Poaceae familyasına ait olmaları nedeniyle potansiyel polen kaynağı olarak

değerlendirilmektedir. Ancak düzenli biçme uygulamaları, çim bitkilerinin generatif gelişimini baskılamakta ve çiçeklenmeyi önemli ölçüde sınırlamaktadır (Beard & Green, 1994; Braun & Patton, 2022).

Bu durum, çim alanların polen kaynaklı alerjiler açısından birçok alternatif bitki örtüsüne kıyasla daha düşük risk oluşturabileceğini göstermektedir. Ayrıca biçme uygulamaları, yabancı otların ve diğer çiçekli bitkilerin baskılanmasına da katkı sağlayarak alerjen yükünü azaltmaktadır (Van Ree & ark., 1998; Basky & ark., 2017). Bu nedenle çim bitkilerinin alerjik etkileri, yönetim uygulamalarıyla doğrudan ilişkilidir.

Zararlı Organizmalar, Hastalık Vektörleri ve Sağlık Riski

Çim alanların düzenli olarak bakımı, zararlı organizmalar ve hastalık taşıyıcı vektörlerin kontrolü açısından da toplumsal faydalar sunmaktadır. Uzun boylu, bakımsız bitki örtüsüne sahip alanlar; kene, sivrisinek ve diğer zararlı organizmalar için daha uygun yaşam koşulları oluşturabilmektedir. Buna karşılık, düzenli biçilen ve yönetilen çim alanlar, bu organizmalar için daha elverişsiz habitatlar sunmaktadır (Carroll & ark., 1992; Potter & Waldvogel, 2012).

Ayrıca çim bitkileri, zehirli veya istilacı yabancı ot türlerinin baskılanmasına katkı sağlayarak insan sağlığı açısından risk oluşturabilecek bitkisel unsurların yayılmasını sınırlandırmaktadır (Czarnota, 2015; Entsminger & ark., 2019). Bu yönüyle çim alanlar, dolaylı bir halk sağlığı hizmeti de sunmaktadır.

Yangın Güvenliği ve Ulaşım Alanlarında Toplumsal İşlevler

Çim bitkilerinin toplumsal faydaları arasında, yangın güvenliği ve ulaşım alanlarındaki işlevleri de yer almaktadır. Aktif olarak büyüyen ve sulanan çim alanlar, düşük yanıcı madde içeriği nedeniyle yangın yayılımını sınırlandırabilen bitkisel örtüler olarak değerlendirilmektedir (Youngner, 1970; Natural Resources

Conservation Service, 2011). Bu özellik, özellikle yangın riski bulunan bölgelerde çim alanların koruyucu bir tampon işlevi görmesini sağlamaktadır.

Bunun yanında, yol kenarlarında yer alan çim bitkileri, sürücüler için görüş alanını iyileştirmekte ve araçların acil durumlarda kontrolünü destekleyen stabil yüzeyler sunmaktadır (Beard, 1973; Forman & McDonald, 2007). Bu işlevler, çim bitkilerinin yalnızca estetik değil, aynı zamanda güvenlik odaklı toplumsal katkılar sunduğunu göstermektedir.

4. Çim Bitkilerinin Ekonomik Katkıları

Çim bitkilerinin sağladığı faydalar yalnızca çevresel ve toplumsal boyutlarla sınırlı olmayıp, aynı zamanda doğrudan ve dolaylı ekonomik katkılar da içermektedir. Peyzaj düzenlemeleri, spor alanları, rekreasyon alanları ve kamusal açık alanlar kapsamında değerlendirilen çim sistemleri, geniş bir hizmet ve üretim zincirinin parçası olarak önemli bir ekonomik faaliyet alanı oluşturmaktadır. Bu ekonomik katkılar hem istihdam yaratılması hem de yaşam alanlarının değerinin artırılması yoluyla ortaya çıkmaktadır (Beard & Green, 1994; Hall & ark., 2006; Stier & ark., 2013).

Çim bitkilerinin ekonomik etkilerinden biri, peyzaj ve yeşil alan yönetimiyle ilişkili sektörlerin büyüklüğüdür. Çim üretimi, tesis edilmesi ve bakımı; farklı uzmanlık alanlarını içeren geniş bir meslek grubunu kapsamaktadır. Bu kapsamda, çim alanların kurulumu ve sürdürülebilir yönetimi; tarımsal üretim, teknik hizmetler, bakım uygulamaları ve danışmanlık faaliyetleri gibi çok sayıda ekonomik faaliyeti desteklemektedir. Bu sektörler, farklı coğrafyalarda iklimsel ve kültürel koşullara uyarlanarak benzer ekonomik işlevler üstlenmektedir (Hall & ark., 2006; Haydu & ark., 2006).

Ekonomik katkıların bir diğerk önemli boyutu, çim bitkilerinin yer aldığı alanların mülk değerkleri üzerindeki etkisidir. Araştırmalar, iyi tasarlanmış ve bakımı yapılmış yeşil alanlara sahip konut ve ticari alanların, algılanan ve gerçekleşen piyasa değerklerinin daha yüksek olduğunu göstermektedir. Çim bitkileriyle desteklenen peyzaj düzenlemeleri, estetik çekiciliğı artırarak mülklerin tercih edilebilirliğini yükseltmekte ve bu durum ekonomik bir avantaj olarak yansımaktadır (Hardy & ark., 2000; Laverne & Winson-Geideman, 2003; Behe & ark., 2005). Bu artış, farklı iklim ve coğrafyalarda benzer eğilimler göstermekte olup, çim alanların ekonomik değerk yaratma potansiyelinin evrensel olduğunu ortaya koymaktadır.

Çim bitkilerinin ekonomik katkıları yalnızca doğrudan gelir artışıyla sınırlı değildir. Çevresel faydalarla ilişkili dolaylı ekonomik kazanımlar da bu kapsamda değerklendirilmelidir. Örneğın, çim alanların mikroklimayı düzenleyici etkisi, yapıların soğutma ihtiyacını azaltarak enerji tüketiminde tasarruf sağlayabilmektedir. Benzer şekilde, gürültü azaltma, yüzey stabilizasyonu ve su yönetimine katkılar, uzun vadede altyapı ve bakım maliyetlerinin düşürölmesine yardımcı olabilmektedir (Beard & Green, 1994; Monteiro, 2017).

Toplumsal faydalarla ilişkili ekonomik etkiler de göz ardı edilmemelidir. Çim bitkileriyle kaplı parklar ve rekreasyon alanları, toplum sağlığını destekleyerek sağlık harcamalarının azaltılmasına dolaylı katkılar sunabilmektedir. Ayrıca sosyal etkileşimi artıran ve güvenlik algısını güçlendiren yeşil alanlar, yaşanabilirlik düzeyini yükselterek yerleşim alanlarının ekonomik cazibesini artırmaktadır (Kuo & Sullivan, 2001a; Branas & ark., 2011). Bu tür etkiler, doğrudan ölçölmesi zor olsa da uzun vadede ekonomik refah üzerinde belirleyici rol oynamaktadır.

Bununla birlikte, çim bitkilerinin ekonomik katkıları değerklendirilirken bakım maliyetleri ve girdiler de dikkate

alınmalıdır. Yoğun bakım gerektiren çim sistemlerinde, su, enerji ve iş gücü maliyetleri artabilmektedir. Bu nedenle ekonomik sürdürülebilirlik, çim bitkilerinin sağladığı faydalar ile bakım ve yönetim maliyetleri arasındaki dengenin kurulmasına bağlıdır. Düşük girdili türlerin tercih edilmesi, iklim koşullarına uygun yönetim stratejilerinin uygulanması ve kaynak kullanımının optimize edilmesi, ekonomik faydaların maksimize edilmesinde kritik rol oynamaktadır (Stier & ark., 2013; Monteiro, 2017).

Sonuç olarak, çim bitkileri; doğrudan istihdam, mülk değeri artışı ve sektör büyüklüğü gibi somut ekonomik katkıların yanı sıra, çevresel ve toplumsal faydalarla ilişkili dolaylı ekonomik kazanımlar da sunmaktadır. Bu katkıların sürdürülebilir biçimde devam edebilmesi, çim sistemlerinin çevresel koşullara duyarlı ve dengeli bir yönetim anlayışıyla ele alınmasını gerektirmektedir.

5. Çim Bitkilerinin Olası Zararları ve Sınırlılıkları

Çim bitkileri, çok sayıda çevresel, toplumsal ve ekonomik fayda sunmakla birlikte, diğer tüm bitkisel sistemlerde olduğu gibi belirli koşullar altında bazı olumsuz etkilere de yol açabilmektedir. Bu olumsuzluklar literatürde “ekosistem zararları” olarak tanımlanmakta ve genellikle bitkinin biyolojik özelliklerinden ziyade, uygulanan yönetim stratejileriyle ilişkilendirilmektedir (Beard & Green, 1994; Shackleton & ark., 2016; Stier & ark., 2013). Dolayısıyla çim bitkilerinin potansiyel zararlarının değerlendirilmesi, bu sistemlerin tümüyle reddedilmesi değil; risklerin doğru tanımlanarak yönetilmesi amacıyla ele alınmalıdır.

Sera Gazı Salımları ve Bakım Kaynaklı Emisyonlar

Çim alanlar, toprakta gerçekleşen doğal biyokimyasal süreçler ve bakım uygulamaları nedeniyle sera gazı salımlarına katkı sağlayabilmektedir. Özellikle azotlu gübre uygulamalarına bağlı olarak nitrifikasyon ve denitrifikasyon süreçleri sonucunda ortaya çıkan diazot monoksit (N_2O), bu bağlamda öne çıkan bir gazdır

(Braun & Bremer, 2018a; Braun & Bremer, 2018b; Law & ark., 2021). Ayrıca bakım faaliyetlerinde kullanılan ekipmanlar, sulama sistemleri ve girdi üretimi de dolaylı karbon salımlarına neden olabilmektedir (Gillette & ark., 2016; Bekken & Soldat, 2022).

Bununla birlikte, bu emisyonların büyüklüğü çim alanın yönetim yoğunluğuna göre büyük ölçüde değişmektedir. Düşük girdili, minimum gübreleme ve sulama gerektiren çim sistemlerinde sera gazı salımları oldukça sınırlı kalabilmektedir. Buna karşılık yoğun bakım gerektiren sistemlerde, özellikle enerji ve azot girdilerinin artmasıyla emisyonlar da yükselmektedir (Braun & Bremer, 2019; Braun & ark., 2023). Bu durum, sera gazı salımlarının çim bitkisinin varlığından çok, yönetim tercihleriyle ilişkili olduğunu göstermektedir.

Metan (CH_4) açısından değerlendirildiğinde ise çim alanların hem kaynak hem de yutak (sink) olabildiği bildirilmiştir. Toprak nemi, sıcaklık, mikrobiyal topluluklar ve yönetim uygulamaları bu dengeyi belirleyen temel faktörlerdir. Bazı çalışmalarda çim alanların metan açısından net yutak işlevi görebildiği rapor edilmiştir (Groffman & Pouyat, 2009; Livesley & ark., 2010; Riches & ark., 2020). Bu bulgular, çim bitkilerinin sera gazı dengesi üzerindeki etkilerinin tek yönlü olmadığını ortaya koymaktadır.

Su Kullanımı ve Bölgesel Sınırlılıklar

Çim bitkilerine yönelik en yaygın eleştirilerden biri, sulama gereksinimleri ve buna bağlı su tüketimidir. Özellikle kurak ve yarı kurak bölgelerde, çim alanların sulanması su kaynakları üzerinde baskı oluşturabilmektedir (Beard & Green, 1994; Stier & ark., 2013). Bu durum, çim bitkilerinin sürdürülebilirliği tartışmalarında önemli bir yer tutmaktadır.

Ancak literatür, çim alanların tamamının yoğun sulama gerektirdiği yönündeki genellemenin bilimsel açıdan doğru olmadığını göstermektedir. Birçok çim alan, özellikle parklar, yol

kenarları ve düşük bakım gerektiren alanlar ya hiç sulanmamakta ya da yalnızca sınırlı dönemlerde destek sulaması almaktadır (Stier & ark., 2013; Monteiro, 2017). Ayrıca farklı türlerin ve çeşitlerin su kullanım etkinliği büyük farklılıklar göstermekte; kuraklığa dayanıklı türlerin tercih edilmesiyle su tüketimi önemli ölçüde azaltılabilmektedir (Colmer & Barton, 2017; Braun & Patton, 2022).

Aşırı sulamanın ekosistem hizmetlerini de olumsuz etkileyebileceği unutulmamalıdır. Yetersiz veya aşırı sulama, kök gelişimini sınırlayarak karbon tutulumu, evaporatif soğutma ve toprak stabilizasyonu gibi faydaların azalmasına neden olabilmektedir (Monteiro, 2017). Bu nedenle su yönetimi, çim alanların hem fayda hem de zarar potansiyelini belirleyen temel unsurlardan biri olarak değerlendirilmektedir.

Gübre ve Pestisit Kullanımına Bağlı Riskler

Çim alanların yönetiminde kullanılan gübreler ve pestisitler, uygun olmayan uygulamalar sonucunda çevresel riskler oluşturabilmektedir. Azot ve fosfor içeren gübrelerin aşırı veya yanlış zamanda uygulanması, yüzey ve yeraltı sularında besin maddesi kirliliğine yol açabilmektedir (Carpenter & ark., 1998; Soldat & Petrovic, 2008). Benzer şekilde pestisitlerin uygunsuz kullanımı, hedef dışı organizmalar üzerinde olumsuz etkilere neden olabilmektedir (Stier & ark., 2013).

Bununla birlikte, araştırmalar uygun yönetim uygulamalarının bu riskleri büyük ölçüde azaltabildiğini göstermektedir. Toprak analizine dayalı gübreleme, kontrollü salınımlı gübrelerin kullanımı, bölünmüş uygulamalar ve uygun zamanlama gibi yaklaşımlar, besin maddesi kayıplarını sınırlandırmaktadır (Guillard & Kopp, 2004; Frank & ark., 2016; Braun & ark., 2023). Benzer şekilde entegre zararlı yönetimi yaklaşımları, kimyasal kullanımını minimize ederek çevresel riskleri düşürmektedir.

Arazi Kullanımı, Biyolojik Çeşitlilik ve İstilacılık Tartışmaları

Çim bitkilerine yönelik bir diğer eleştiri, bu alanların gıda üretimine ayrılabilen araziler üzerinde yer alması ve bazı türlerin doğal alanlara yayılma potansiyelidir. Ancak bu eleştiriler, çoğu zaman çim alanların bulunduğu arazi türlerini dikkate almamaktadır. Çim bitkileri genellikle konut, rekreasyon ve altyapı alanlarında yer almakta; bu alanlar zaten gıda üretimi için uygun olmayan veya kullanılmayan alanlardır (Beard & Green, 1994; Stier & ark., 2013).

Biyolojik çeşitlilik açısından değerlendirildiğinde ise çim alanların sunduğu habitatların sınırlı olduğu kabul edilmekle birlikte, özellikle düşük bakım yoğunluğuna sahip ve heterojen peyzaj unsurlarıyla desteklenen çim alanların belirli türler için yaşam alanı sunduğu bildirilmektedir (Gallo & ark., 2017; Thompson & Kao-Kniffin, 2017). Dolayısıyla biyolojik çeşitlilik üzerindeki etkiler, çim bitkisinin varlığından çok, peyzajın genel tasarımı ve yönetim biçimiyle ilişkilidir.

Zarar–Fayda Dengesi ve Yönetim Odaklı Yaklaşım

Genel olarak değerlendirildiğinde, çim bitkilerinin potansiyel zararları büyük ölçüde insan müdahalesine ve yönetim tercihlerine bağlıdır. Aşırı girdili, çevresel koşullarla uyumsuz uygulamalar; sera gazı salımları, su tüketimi ve kimyasal riskleri artırabilmektedir. Buna karşılık, uygun tür seçimi, iklime duyarlı yönetim ve sürdürülebilir bakım uygulamaları altında çim alanlar, sağladıkları ekosistem hizmetleriyle bu zararların büyük kısmını dengeleyebilmektedir (Shackleton & ark., 2016; Braun & ark., 2023).

Bu nedenle çim bitkileri, mutlak biçimde yararlı ya da zararlı sistemler olarak değil; nasıl, nerede ve hangi yoğunlukta yönetildiklerine bağlı olarak değişen ekosistem bileşenleri olarak değerlendirilmelidir.

6. Genel Değerlendirme ve Sürdürülebilir Yaklaşım

Çim bitkilerinin çevresel, toplumsal ve ekonomik sistemlerle çok yönlü ilişkiler içerisinde yer aldığı görülmektedir. Uygun koşullar altında ele alındığında çim bitkileri; toprak ve su süreçlerinin düzenlenmesine katkı sağlayan, mikroklimayı iyileştiren, insan sağlığı ve toplumsal refah üzerinde olumlu etkiler oluşturan bitkisel örtüler olarak önemli işlevler üstlenebilmektedir.

Bununla birlikte, çim bitkilerine yönelik tartışmaların önemli bir bölümü potansiyel çevresel yükleri üzerine yoğunlaşmaktadır. Bu durum, çim bitkilerinin kendisinden ziyade uygulanan yönetim yaklaşımlarının belirleyici olduğunu göstermektedir. Aşırı girdili, çevresel koşullarla uyumsuz ve tek tip uygulamalar, çim alanların sunduğu ekosistem hizmetlerini sınırlandırabilmekte ve bazı durumlarda olumsuz sonuçlara yol açabilmektedir. Buna karşılık, iklim koşullarına uygun tür seçimi, dengeli bakım yoğunluğu ve kaynak kullanımını gözeten yaklaşımlar altında, sağladıkları faydalarla potansiyel zararları büyük ölçüde dengeleyebilmektedir.

Sürdürülebilir bir çim yönetimi anlayışı, çim bitkilerini tek başına ele alınan peyzaj unsurları olarak değil, daha geniş ekosistemlerin bir parçası olarak değerlendirmeyi gerektirmektedir. Çim alanların ağaçlar, çalılar ve diğer bitkisel bileşenlerle birlikte tasarlandığı bütüncül peyzaj yaklaşımları, ekosistem hizmetlerinin çeşitliliğini ve etkinliğini artırmakta; hem çevresel dayanıklılığı hem de toplumsal kabulü güçlendirmektedir.

Sonuç olarak, çim bitkileri ne koşulsuz biçimde yüceltilmesi gereken ne de tümüyle dışlanması gereken sistemlerdir. Bilimsel veriler ışığında, bu bitkilerin doğru koşullar altında ve uygun yönetim stratejileriyle ele alındığında önemli katkılar sağlayabildiği anlaşılmaktadır. Bu nedenle çim bitkilerine ilişkin kararların, ideolojik yaklaşımlar yerine ekosistem temelli, dengeli ve bilimsel değerlendirmelere dayandırılması gerekmektedir.

Kaynakça

Bandaranayake, W., Qian, Y. L., Parton, W. J., Ojima, D. S., & Follett, R. F. (2003). Estimation of soil organic carbon changes in turfgrass systems using the CENTURY model. *Agronomy Journal*, 95, 558–563.

Basky, Z., Ladányi, M., & Simončič, A. (2017). Efficient reduction of biomass, seed and season long pollen production of common ragweed (*Ambrosia artemisiifolia* L.). *Urban Forestry & Urban Greening*, 24, 134–140.

Beard, J. B. (1973). *Turfgrass: Science and culture*. Prentice Hall.

Beard, J. B., & Green, R. L. (1994). The role of turfgrasses in environmental protection and their benefits to humans. *Journal of Environmental Quality*, 23, 452–460.

Beard, J. B., & Johns, D. (1985). The comparative heat dissipation from three typical urban surfaces: Asphalt, concrete, and bermudagrass turf. In *Texas turfgrass research* (PR-4329, pp. 125–133). Texas Agricultural Experiment Station.

Behe, B., Hardy, J., Barton, S., Brooker, J., Fernandez, T., Hall, C., Hicks, J., Hinson, R., Knight, P., McNeil, R., Page, T., Rowe, B., Safley, C., & Schutzki, R. (2005). Landscape plant material, size, and design sophistication increase perceived home value. *Journal of Environmental Horticulture*, 23, 127–133.

Bekken, M. A. H., & Soldat, D. J. (2022). Estimated energy use and greenhouse emissions associated with golf course turfgrass maintenance in the Northern USA. *International Turfgrass Society Research Journal*, 14, 58–75.

Bigelow, C. A., Bowman, D. C., & Wollum, A. G., (2002). Characterization of soil microbial population dynamics in newly constructed sand-based rootzones. *Crop Science*, 42, 1393–1761.

Branas, C. C., Cheney, R. A., MacDonald, J. M., Tam, V. W., Jackson, T. D., & Ten Have, T. R. (2011). A difference-in-differences analysis of health, safety, and greening vacant urban space. *Journal of Epidemiology*, 174, 1296–1306.

Bratman, G. N., Hamilton, J. P., & Daily, G. C. (2012). The impacts of nature experience on human cognitive function and mental health. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1249, 118–136.

Braun, R. C., & Bremer, D. J. (2018a). Nitrous oxide emissions in turfgrass receiving different irrigation amounts and nitrogen fertilizer forms. *Crop Science*, 58, 1762–1775.

Braun, R. C., & Bremer, D. J. (2018b). Nitrous oxide emissions in turfgrass systems: A review. *Agronomy Journal*, 110, 1–11.

Braun, R. C., & Bremer, D. J. (2019). Carbon sequestration in zoysiagrass turf under different irrigation and fertilization management regimes. *Agrosystems, Geosciences & Environment*, 2, 180060.

Braun, R. C., & Patton, A. J. (2022). Perennial ryegrass (*Lolium perenne*) culm and inflorescence density in lawns: Effects of nitrogen fertilization and scalping timing and height. *Crop Science*, 62, 489–502.

Braun, R. C., Mandal, P., Nwachukwu, E., & Stanton, A. (2024). The role of turfgrasses in environmental protection and their benefits to humans: Thirty years later. *Crop Science*, 64, 2909–2944.

Braun, R. C., Straw, C. M., Soldat, D. J., Bekken, M. A. H., Patton, A. J., Lonsdorf, E. V., & Horgan, B. P. (2023). Strategies for reducing inputs and emissions in turfgrass systems. *Crop, Forage & Turfgrass Management*, 9, e20218.

Carpenter, S. R., Caraco, N. F., Correll, D. L., Howarth, R. W., Sharpley, A. N., & Smith, V. H. (1998). Nonpoint pollution of surface waters with phosphorus and nitrogen. *Ecological Applications*, 8, 559–568.

Carroll, M. C., Ginsberg, H. S., Hyland, K. E., & Hu, R. (1992). Distribution of *Ixodes dammini* (Acari: Ixodidae) in residential lawns on Prudence Island, Rhode Island. *Journal of Medical Entomology*, 29, 1052–1055.

Carvalho, H. D., Chang, B., McInnes, K. J., Heilman, J. L., Wherley, B., & Aitkenhead-Peterson, J. A. (2021). Energy balance and temperature regime of different materials used in urban landscaping. *Urban Climate*, 37, 100854.

Casler, M. D. (2006). Perennial grasses for turf, sport and amenity uses: Evolution of form, function and fitness for human benefit. *The Journal of Agricultural Science*, 144, 189–203.

Chiesura, A. (2004). The role of urban parks for the sustainable city. *Landscape and Urban Planning*, 68, 129–138.

Cohen, D. A., McKenzie, T. L., Sehgal, A., Williamson, S., Golinelli, D., & Lurie, N. (2007). Contribution of public parks to physical activity. *American Journal of Public Health*, 97, 509–514.

Coley, R. L., Sullivan, W. C., & Kuo, F. E. (1997). Where does community grow? The social context created by nature in urban public housing. *Environment and Behavior*, 29, 468–494.

Colmer, T. D., & Barton, L. (2017). A review of warm-season turfgrass evapotranspiration, responses to deficit irrigation, and drought resistance. *Crop Science*, 57(S1), S98–S110.

Cook, D. I., & Van Haverbeke, D. F. (1971). *Trees and shrubs for noise abatement* (Research Bulletin No. 246). Nebraska Agricultural Experiment Station Research Bulletin.

Côté, L., & Grégoire, G. (2021). Reducing nitrate leaching losses from turfgrass fertilization of residential lawns. *Journal of Environmental Quality*, 50, 1145–1155.

Czarnota, M. (2015). *Controlling poison ivy in the landscape* (UGA Extension Circular, 867-10). UGA Cooperative Extension.

Dear, J. B., Porter, M. M., & Ready, A. E. (2010). Energy expenditure during golfing and lawn mowing in older adult men. *Journal of Aging and Physical Activity*, 18, 185–200.

Demiroglu Topcu, G., & Ozkan, S. S. (2016). Turf ecology. In *International Ecology 2016 Adnan Aldemir Symposium* (Abstract Book, p. 63). Kars, Türkiye.

Elliott, M. L., & Des Jardin, E. A. (1999). Effect of organic nitrogen fertilizers on microbial populations associated with bermudagrass putting greens. *Biology and Fertility of Soils*, 28, 431–435.

Elliott, M. L., Guertal, E. A., Jardin, E. A., & Skipper, H. D. (2003). Effect of nitrogen rate and root-zone mix on rhizosphere bacterial populations and root mass in creeping bentgrass putting greens. *Biology and Fertility of Soils*, 37(6), 348–354.

Entsminger, E. D., Jones, J. C., Guyton, J. W., Leopold, B. D., & Strickland, B. K. (2019). Mowing effects on woody stem density and woody and herbaceous vegetation heights along Mississippi highway right-of-ways. *Journal of Fish and Wildlife Management*, 10, 19–37.

Forman, R. T. T., & McDonald, R. I. (2007). A massive increase in roadside woody vegetation: Goals, pros, and cons. In C. L. Irwin, D. Nelson, & K. P. McDermott (Eds.), *Proceedings of the 2007 international conference on ecology and transportation* (pp.

229–238). Center for Transportation and the Environment, North Carolina State University.

Forssén, J., Hornikx, M., Van Der Aa, B., Nilsson, M., Rødsten-Ekmanc, M., Defrance, J., Jean, P., Koussa, F., Maillard, J., VanMaercke, D., Attenborough, K., Bashir, I., Taherzadeh, S., Benkreira, H., Horoshenkov, K. V., Khan, A., Kang, J., De Coensel, B., Van Renterghem, T., Klæboe, R., Mosslemi, M., Veisten, K., Männel, M., Vincent, B., Jeon, J.Y., Jang, H.S., Hong, J. Y. (2014). Toolbox from the EC FP7 HOSANNA project for the reduction of road and rail traffic noise in the outdoor environment. *Transport Research Arena 2014 (TRA 2014)*.

Frank, K. W., Crum, J. R., Bryan, J. M., & Hathaway, A. D. (2016). Fifteen years of nitrogen leaching from a Kentucky bluegrass turf. *Crop Science*, 56, 3338–3344.

Gallo, T., Fidino, M., Lehrer, E. W., & Magle, S. B. (2017). Mammal diversity and metacommunity dynamics in urban green spaces: Implications for urban wildlife conservation. *Ecological Applications*, 27, 2330–2341.

Gill, S. E., Handley, J. F., Ennos, A. R., & Pauleit, S. (2007). Adapting cities for climate change: The role of the green infrastructure. *Built Environment*, 33, 115–133.

Gillette, K. L., Qian, Y., Follett, R. F., & Del Grosso, S. (2016). Nitrous oxide emissions from a golf course fairway and rough after application of different nitrogen fertilizers. *Journal of Environmental Quality*, 45, 1788–1795.

Godbey, G., Grafe, A., & James, W. (1992). *The benefits of local recreation and park services: A nationwide study of the perceptions of the American public*. National Recreation and Park Association.

Groffman, P. M., & Pouyat, R. B. (2009). Methane uptake in urban forests and lawns. *Environmental Science & Technology*, 43, 5229–5235.

Gross, C. M., Angle, J. S., & Welterlen, M. S. (1990). Nutrient and sediment losses from turfgrass. *Journal of Environmental Quality*, 19, 663–668.

Gross, C. M., Angle, J. S., & Welterlen, M. S. (1991). Runoff and sediment losses from tall fescue under simulated rainfall. *Journal of Environmental Quality*, 20, 604–607.

Guertal, E. A., & Green, B. D. (2012). Evaluation of organic fertilizer sources for south-eastern (USA) turfgrass maintenance. *Acta Agriculturae Scandinavica Section B—Soil and Plant Science*, 62, 130–138.

Guillard, K., & Kopp, K. L. (2004). Nitrogen fertilizer form and associated nitrate leaching from cool-season lawn turf. *Journal of Environmental Quality*, 33, 1822–1827.

Hall, C. R., Hodges, A. W., & Haydu, J. J. (2006). The economic impact of the green industry in the United States. *HortTechnology*, 16, 345–353.

Hardy, J., Behe, B. K., Barton, S. S., Page, T. J., Schutzki, R. E., Muzii, K., Fernandez, R. T., Haque, M. T., Brooker, J., Hall, C. R., Hinson, R., Knight, P., McNiel, R., Rowe, D. B., & Safley, C. (2000). Consumers preferences for plant size, type of plant material and design sophistication in residential landscaping. *Journal of Environmental Horticulture*, 18, 224–230.

Harivandi, M. A. (2008). Irrigating sports turf with municipal recycled water. *ISHS Acta Horticulturae 783: II International Conference on Turfgrass Science and Management for Sports Fields*, 783, 215–220.

Haydu, J. J., Hodges, A. W., & Hall, C. R. (2006). *Economic impacts of the turfgrass and lawncare industry in the United States* (FE632). University of Florida, Extension IFAS.

Higginson, F. R., & McMaugh, P. E. (2010). *Literature review and environmental, social, economic and health benefits of the Australian turf and golf industries* (TU07034). Horticulture Australia Ltd., Sydney, 94p.

Hostetler, M. (2021). Cues to care: Future directions for ecological landscapes. *Urban Ecosystems*, 24, 11–19.

Kaplan, R. (1993). The role of nature in the context of the workplace. *Landscape and Urban Planning*, 26, 193–201.

Kaye, J. P., McCulley, R. L., & Burke, I. C. (2005). Carbon fluxes, nitrogen cycling, and soil microbial communities in adjacent urban, native and agricultural ecosystems. *Global Change Biology*, 11, 525–698.

Kibblewhite, M. G., Ritz, K., & Swift, M. J. (2008). Soil health in agriculture systems. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 363, 685–701.

Kranz, C. N., McLaughlin, R. A., Johnson, A., Miller, G., & Heitman, J. L. (2020). The effects of compost incorporation on soil physical properties in urban soils-A concise review. *Journal of Environmental Management*, 261, 110209.

Krenitsky, E. C., Carroll, M. J., Hill, R. L., & Krouse, J. M. (1998). Runoff and sediment losses from natural and man-made erosion control materials. *Crop Science*, 38, 1042–1046.

Kuo, F. E., & Sullivan, W. C. (2001a). Aggression and violence in the inner city: Effects of environment via mental fatigue. *Environment and Behavior*, 33, 543–571.

Kuo, F. E., & Sullivan, W. C. (2001b). Environment and crime in the inner-city: Does vegetation reduce crime? *Environment and Behavior*, 33, 343–367.

Kuo, F. E., Sullivan, W. C., Coley, R. L., & Brunson, L. (1998). Fertile ground for community: Inner-city neighborhood common spaces. *American Journal of Community Psychology*, 26, 823–851.

Laverne, R. J., & Winson-Geideman, K. (2003). The influence of trees and landscaping on rental rates at office buildings. *Arboriculture & Urban Forestry*, 29, 281–290.

Law, Q. D., & Patton, A. J. (2017). Biogeochemical cycling of carbon and nitrogen in cool-season turfgrass systems. *Urban Forestry and Urban Greening*, 26, 158–162.

Law, Q. D., Trappe, J. M., Braun, R. C., & Patton, A. J. (2021). Greenhouse gas fluxes from turfgrass systems: Species, growth rate, clipping management, and environmental effects. *Journal of Environmental Quality*, 50, 547–557.

Linde, D. T., Watschke, T. L., Jarrett, A. R., & Borger, J. A. (1995). Surface runoff assessment from creeping bentgrass and perennial ryegrass turf. *Agronomy Journal*, 87, 176–182.

Livesley, S. J., Dougherty, B. J., Smith, A. J., Navaud, D., Wylie, L. J., & Arndt, S. K. (2010). Soil-atmosphere exchange of carbon dioxide, methane, and nitrous oxide in urban garden systems: Impact of irrigation, fertilizer, and mulch. *Urban Ecosystem*, 13, 273–293.

Lohr, V. I., Pearson-Mims, C. H., & Goodwin, G. K. (1996). Interior plants may improve worker productivity and reduce stress in a windowless environment. *Journal of Environmental Horticulture*, 14, 97–100.

Millennium Ecosystem Assessment, (2005). *Ecosystems and human well-being*. Island Press.

Miltner, E. D., Branham, B. E., Paul, E. A., & Rieke, P. E. (1996). Leaching and mass balance of ¹⁵N-labeled urea applied to a Kentucky bluegrass turf. *Crop Science*, 36, 1427–1433.

Monteiro, J. A. (2017). Ecosystem services from turfgrass landscapes. *Urban Forestry & Urban Greening*, 26, 151–157.

Natural Resources Conservation Service. (2011). *Fuel and fire break: Small scale solutions for your farm*. USDA Natural Resources Conservation Service.

Pessarakli, M. (2007). Handbook of turfgrass management and physiology. CRC Press.

Petrovic, A. M. (2004). Impact of soil texture on nutrient fate. *Acta Horticulturae*, 661, 93–98.

Petrovic, A. M., & Easton, Z. M. (2005). The role of turfgrass management in the water quality of urban environments. *International Turfgrass Society Research Journal*, 10, 55–69.

Potter, M. F., & Waldvogel, M. G. (2012). Stinging and biting pests. In R. L. Brandenburg & C. P. Freeman (Eds.), *Handbook of turfgrass insects* (2nd ed., pp. 71–95). Entomological Society of America and The American Phytopathological Society.

Qian, Y., & Follett, R. F. (2002). Assessing soil carbon sequestration in turfgrass systems using long-term soil testing data. *Agronomy Journal*, 94, 930–935.

Riches, D., Porter, I., Dingle, G., Gendall, A., & Grover, S. (2020). Soil greenhouse gas emissions from Australian sports fields. *Science of the Total Environment*, 707, 134420.

Selhorst, A. L., & Lal, R. (2011). Carbon budgeting in golf course soil of Central Ohio. *Urban Ecosystems*, 14, 771–781.

Shackleton, C. M., Ruwanza, S., Sinasson Sanni, G. K., Bennett, S., De Lacy, P., Modipa, R., Mtatai, N., Scamahonye, M., & Thondhlana, G. (2016). Unpacking Pandora's box: Understanding and categorising ecosystem disservices for environmental management and human wellbeing. *Ecosystems*, 19, 587–600.

Shahandeh, H., & Hossner, L. R. (2000). Plant screening for chromium phytoremediation. *International Journal of Phytoremediation*, 2, 31–51.

Shi, W., Yao, H., & Bowman, D. (2006). Soil microbial biomass, activity and nitrogen transformations in a turfgrass chronosequence. *Soil Biology and Biochemistry*, 38, 311–319.

Soldat, D. J., & Petrovic, A. M. (2008). The fate and transport of phosphorus in turfgrass ecosystems. *Crop Science*, 48, 2051–2491.

Steinke, K., Stier, J. C., & Kussow, W. R. (2009). Prairie and turfgrass buffer strips modify water infiltration and leachate resulting from impervious surface runoff. *Crop Science*, 49, 658–670.

Stier, J. C., Steinke, K., Ervin, E. H., Higginson, F. R., & McMaugh, P. E. (2013). Turfgrass benefits and issues. In J. C. Stier, B. P. Horgan, & S. A. Bonos (Eds.), *Turfgrass: Biology, use, and management* (Vol. 56, pp. 105–145). Agronomy monograph. ASA, CSSA, SSSA.

Takano, T., Nakamura, K., & Watanabe, M. (2002). Urban residential environments and senior citizens' longevity in megacity areas: The importance of walkable green spaces. *Journal of Epidemiology & Community Health*, 56, 913–918.

Takebayashi, H., & Moriyama, M. (2009). Study on the urban heat island mitigation effect achieved by converting to grass-covered parking. *Solar Energy*, 83, 1211–1223.

Thompson, G. L., & Kao-Kniffin, J. (2017). Applying biodiversity and ecosystem function theory to turfgrass management. *Crop Science*, 57(S1), S-238–S-248.

Tordoff, G. M., Baker, A. J. M., & Willis, A. J. (2000). Current approaches to the revegetation and reclamation of metalliferous mine wastes. *Chemosphere*, 41, 219–228.

Troy, A., Nunery, A., & Grove, J. M. (2016). The relationship between residential yard management and neighborhood crime: An analysis from Baltimore City and County. *Landscape and Urban Planning*, 147, 78–87.

Ulrich, R. S. (1984). View through a window may influence recovery from surgery. *Science*, 224, 420–421.

Van Ree, R., van Leeuwen, W. A., & Aalberse, R. C. (1998). How far can we simplify in vitro diagnostics for grass pollen allergy? A study with 17 whole pollen extracts and purified natural and recombinant major allergens. *Journal of Allergy and Clinical Immunology*, 102, 184–190.

Wolfe, M. K., & Mennis, J. (2012). Does vegetation encourage or suppress urban crime? Evidence from Philadelphia, PA. *Landscape & Urban Planning*, 108, 112–122.

Youngner, V. B. (1970). Landscaping to protect homes from wildfires. *California Turfgrass Culture*, 20, 28–32.

BÖLÜM 2

BIOFERTILIZER AND NANOTECHNOLOGICAL FORMULATIONS WITH SPERMIDINE

1. Ayşe Özge ŞİMŞEK SOYSAL ¹
2. Muhammed Akif AÇIKGÖZ²

Introduction

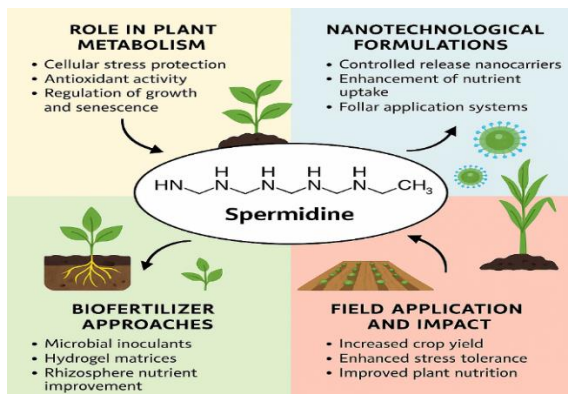
Spermidine (C₇H₁₉N₃N₃) is a polyamine compound and an aliphatic amine chain synthesized from putrescine, widely found in biological systems. It has three amide groups that are protonatable in the cellular structure, allowing it to form electrostatic bonds with DNA, RNA, phospholipids and proteins (Augustyniak et al., 2025; Mao et al., 2025). This makes it not only a structural molecule but also a cellular regulator. Spermidine is particularly involved in fundamental biological processes such as cell growth, differentiation and programmed cell death (apoptosis) (Hasan et al., 2021). Although chemical fertilizers used in conventional agriculture provide short-term productivity, in the long term they degrade soil structure, pollute water resources and have negative effects on plant-soil microbiota. The search for sustainable, environmentally friendly

¹ Assistant Professor, Ordu University, Agriculture Faculty, Field Crops Department, 0000-0002-2494-0844;

² Associate Professor, Ordu University, Agriculture Faculty, Field Crops Department, 0000-0003-2436-5605

solutions to these problems has increased interest in natural biomolecules such as spermidine. Spermidine stands out as a biofertilizer candidate due to its low toxicity, environmentally compatible biodegradation and broad spectrum of effects (Añibarro-Ortega et al., 2025). Biofertilizers are ecosystem-friendly agricultural products with low chemical content that promote plant growth through microorganisms or biomolecules. In this context, spermidine is a compound that can be directly or indirectly integrated into microbial fertilizer formulations. Indeed, some fruit species have both agricultural and anti-microbial functions thanks to their high spermidine content. In the analysis of *Solanum quitoense* species, it was found that the peel and seeds were rich in spermidine, which contributed to anti-microbial effects (Añibarro-Ortega et al., 2025). In recent years, with the integration of nanotechnology into the agricultural sector, the delivery of active ingredients such as spermidine through micro- and nano-carrier systems has come to the fore. Such systems make it possible to direct the molecule to the target tissue, protect it from environmental factors and control its release. Spermidine-containing nano formulations have shown particularly strong effects against water and heat stress (Li et al., 2022).

Figure 1. Integration of Spermidine in Smart Agriculture Through Nanoformulations



To summarize, the spermidine molecule is poised to be one of the key molecules in the transformation of modern agriculture in terms of its chemical structure, biological function and environmental interactions. It is gaining value not only as a growth regulator, but also as a component that can be integrated into nanotechnological systems to develop resistance under stress conditions, promote microbial interactions, and promote microbial growth. Although spermidine shares similar biochemical pathways with other polyamines such as putrescine and spermine, it has some advantages and some limitations in agricultural applications. Although these molecules often work together, their physiological effects may differ according to their molecular structure and intracellular distribution (Table 1).

Table 1. Polyamines and Their Agricultural Stress Responses

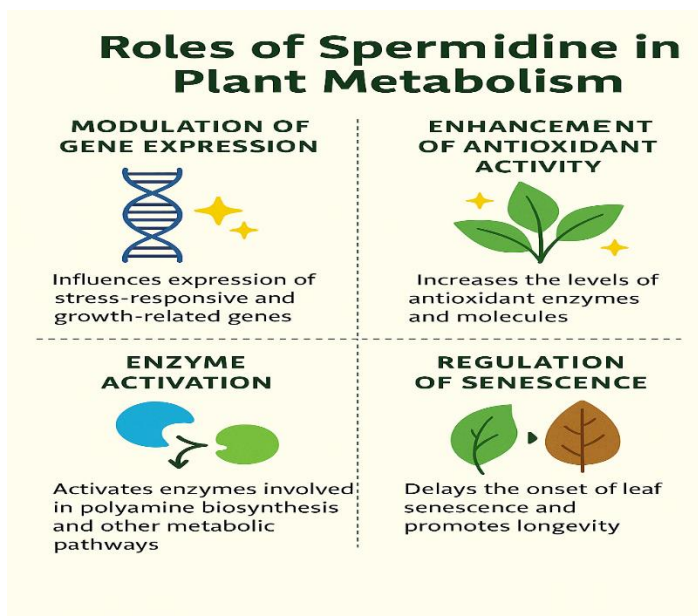
Polyamine	Antioxidant Power	Carrier Compatibility	Phytotoxicity Risk	Biosynthesis Complexity	Scope of Effect
Spermidine	High	High	Moderate	High	Drought, Heat, Salinity
Spermine	Very High	Low	High	Very High	Drought, UV, Metals
Putrescine	Moderate	High	Low	Low	Seed germination, Salt stress
Cadaverine	Moderate	Moderate	Moderate	Moderate	Salinity, Excess Boron
Thermospermine	High	Low	Low	High	Development, Cold stress

Role of Spermidine in Plant Metabolism

Spermidine is a strategic molecule involved in numerous critical pathways and functions of plant physiology. Its involvement in antioxidant defense, ion balance, photosynthetic capacity, metabolic plasticity and even genetic regulation has made it a high potential bioactive agent in agricultural technologies. Yadav et al. (2025) emphasized that polyamines play central roles in plant tolerance and adaptation to changing environmental conditions and

that these compounds support plant adaptation through mechanisms such as stress signaling, antioxidant defense and metabolic regulation. This broad impact on plant metabolism explains why it is preferred in biofertilizer and nano formulation systems that will be discussed in the following sections.

Figure 2. *Spermidine-Mediated Pathways Enhancing Plant Development and Stress Response*



Basic Functions at the Cellular Level

Spermidine directly affects vital events such as DNA stabilization, protein synthesis and membrane integrity by being distributed in different subcellular regions such as nucleus, cytoplasm and mitochondria in plant cells. Thanks to its polycationic structure, it stabilizes transcription and translation processes by forming electrostatic bonds with DNA and RNA. It also inhibits lipid peroxidation by limiting free radical accumulation and prevents cell membrane degradation (Hasan et al., 2021). It also has important

effects on the photosynthetic system. Spermidine application increases light absorption, especially by promoting chlorophyll biosynthesis. However, it also promotes the activity of key enzymes in the Calvin cycle, increasing carbon fixation efficiency (Sun et al., 2022).

Regulatory Role in Stress Responses

When plants are exposed to environmental stress conditions, sudden increases in endogenous spermidine levels are observed. This suggests that spermidine also functions as a signaling molecule in stress responses. Especially in conditions that disrupt water balance such as drought and salinity, spermidine prevents intracellular water loss by regulating osmotic pressure (Gholizadeh et al., 2022). In a study on *Achillea millefolium*, exogenously applied spermidine increased the synthesis of osmotic stabilizers such as proline and ascorbic acid and optimized stomatal closure in plants under drought stress (Alijani et al., 2025). Likewise, in halophyte plants subjected to salt stress, spermidine maintains ion homeostasis by reducing ion transport and ion toxicity (Bueno & Cordovilla, 2021).

Polyamine Metabolism and Genetic Regulation

Spermidine, together with putrescine and spermine, forms a link in the polyamine metabolic chain. This chain starts with arginine and continues with the synthesis of spermidine using decarboxylated S-adenosylmethionine (dcSAM). This pathway is encoded in the plant genome by specific genes such as SPDS (spermidine synthase) and SAMDC (S-adenosylmethionine decarboxylase). Regulation of these enzymes during stress dynamically changes the level of spermidine in the plant, enabling stress adaptation. Studies, especially in wheat plants, have found that different genotypes show variation in spermidine uptake and metabolism, which is a determining factor in tolerance capacity (Pál et al., 2025).

Effects on Apoptosis and Autophagy

Recent studies have shown that spermidine is not only a growth-promoting molecule but also plays an active role in programmed processes such as aging, cell death and autophagy. Autophagy is a protective process involved in the elimination of cellular damage and spermidine stimulates this mechanism at the epigenetic level by reducing histone acetylation (Li et al., 2022). In this respect, spermidine not only provides extrinsic protection under stress conditions, but also promotes internal reorganization processes. This feature makes it different from other polyamines.

Examples of Plant-Based Applications

The results obtained with spermidine application in various plant species concretize the multifaceted effects of this compound: Lettuce (*Lactuca sativa*): Enhanced resistance to heat stress by increasing flavone production (Sun et al., 2022). Wheat (*Triticum aestivum*): Improved resistance to drought stress by regulating polyamine metabolism (Gholizadeh et al., 2022). Yarrow (*Achillea millefolium*): Promoted growth under water stress by activating antioxidant systems (Alijani et al., 2025). *Plantago coronopus* (halophyte): Promoted photosynthesis and growth against salinity stress (Bueno & Cordovilla, 2021).

Spermidine-based Biofertilizer Approaches

Spermidine-based biofertilizer approaches simultaneously target productivity and environmentally friendly production, which is one of the most fundamental needs of modern agriculture. Its potential in various areas such as microencapsulation, slow release, microbial support and stress management has made spermidine a strategic agricultural tool beyond traditional fertilizer ingredients.

Table 2. Spermidine-Based Biofertilizer Approaches

Biofertilizer Type	Carrier System	Mode of Action	Application Example
Microbial Biofertilizer	Rhizobacteria enriched with spermidine	Improves root nodulation and nutrient solubilization	Maize yield under drought stress conditions (Dong et al., 2022)
Silica-Based Composite	Mesoporous silica with spermidine	Enhances phosphate uptake and root elongation	Nano-silicon studies (Sarkar et al., 2022)
Organic	Biochar combined with spermidine	Improves photosynthesis and yield	Maize under semi-arid conditions (Huang et al., 2024)
Seed Coating	Spermidine formulation	Improves germination and drought resistance	Wheat seed treatments (Gholizadeh et al., 2022)

Biofertilizer Concept and Polyamine-Based Approaches

Biofertilizers are emerging as an alternative to traditional agricultural inputs due to their environmental friendliness and sustainability. Although these formulations are usually microbial based, recently biofertilizer strategies enriched with biologically active molecules, especially polyamines, have been developed. Spermidine is notable for its capacity to interact with both microbial and plant systems (Roy et al., 2024).

Microencapsulation and Carrier Systems

The efficacy of biofertilizer formulations containing spermidine can be enhanced through appropriate carrier systems. Similarly, polyamine carriers formed with nanogel systems provide both nutrient release control and stability against environmental conditions (Ochoa et al., 2025).

Microbial Partnership and Rhizosphere Interaction

Spermidine can increase microbial density in the root zone by symbiotic interaction with soil microorganisms. Zhou et al. (2016) reported that *Bacillus megaterium* BOFC15 increased growth and improved root development and promoted photosynthesis in *Arabidopsis*. These effects were associated with changes in the levels of polyamines such as spermidine and spermine in the plant. Likewise, Zhang (2021) revealed that spermidine-loaded hydrogels positively affected microbial diversity in the rhizosphere.

Effects on Abiotic Stress Resistance

Drought, salinity and heavy metal stress are major factors limiting plant growth. Spermidine-based biofertilizers have proven to be an effective defense against these stressors. Spermidine formulated with zinc oxide nanoparticles increased photosynthetic capacity and increased biomass in maize (Ahmadi-Nouraldinvand et al., 2023). Gholizadeh et al. (2022) reported that spermidine-based seed coatings provided significant resistance to drought stress in wheat.

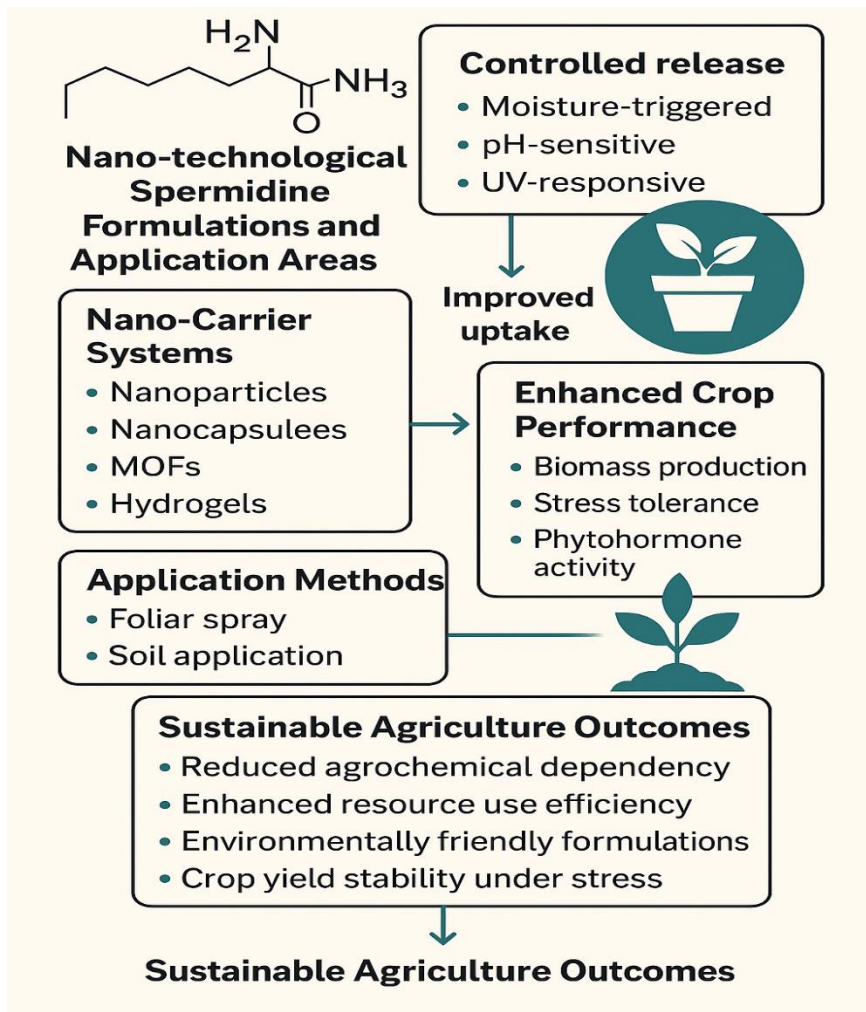
Slow-Release Technologies

Conventional fertilization systems can cause nutrient losses and environmental pollution. Therefore, it is very important to integrate spermidine-based fertilizers with controlled release mechanisms. Li et al. (2023) showed that spermidine-loaded polymeric carriers optimize plant nutrition by providing directed release in alkaline soils. This strategy provides both yield enhancement and supports environmental sustainability.

Nanotechnological Spermidine Formulations and Application Areas

Nanotechnology in agriculture has the potential to improve the efficiency of fertilization systems by offering advantages such as controlled release, targeted transport and environmental stability. The integration of biologically active compounds such as spermidine into these systems has led to breakthrough advances in both stress tolerance and efficiency (Worrall et al., 2018; Ahmed et al., 2021). Spermidine carrier systems are often designed with biodegradable polymers, metal-organic frameworks (MOFs) or nanogel structures. Moreover, thanks to pH-sensitive carrier systems, spermidine release can be automatically adjusted according to acidic-alkalic changes in the soil (Picos-Corrales et al., 2023). One of the most notable aspects of spermidine formulations is targeted in-foliar applications.

Figure 4. *Nanoformulations of Spermidine in Sustainable Crop Management*



In nano formulation systems, it is common to use not only spermidine but also in combination with additional bio stimulants such as zinc and salicylic acid. Such multifunctional structures play both protective and growth-promoting roles by creating a synergistic effect in plant metabolism. Spermidine nano formulations have a wide range of uses not only as fertilizers but also as plant protection,

seed coating and foliar sprays. Sarkar et al. (2022) showed that spermidine complexes containing mesoporous silica enhanced maize root growth, while Yang et al. (2022) highlighted the positive effects of these systems on oxidative stress reduction (Raziq et al., 2022; Basit et al., 2025). In the future, it is possible to integrate these systems with sensors for real-time applications according to plant needs.

Spermidine-Based Applications

Despite the positive results obtained in the laboratory setting, testing bio stimulants under real field conditions is critical to validate their effects. Spermidine has been applied through soil, foliar and seed coatings in an increasing number of field studies and evaluated for yield improvement and stress tolerance (Kebert et al., 2023). The effect of spermidine applications may vary depending on the plant species. For example, Dong et al. (2022) reported significant increases in biomass and grain yield in paddy under nitrogen deficiency, while Wang et al. (2022) reported that foliar application to enhance plant tolerance to abiotic stresses in maize. Similarly, Dong et al. (2022) showed improved spermidine significantly promoted the root growth of maize under drought stress, to improve the absorption and utilization of water and nutrients. There are generally three main routes of the application of spermidine in field trials: soil mixture, foliar spraying and seed pre-treatment (priming). Huang et al. (2024) found that spermidine applied in combination with biochar increased photosynthetic capacity and increased yield. Su et al. (2014) observed a significant increase in chlorophyll content in seed pretreatment of cucumber plants. Under stress conditions such as drought and salinity, spermidine applications provide significant advantages. Saberi Riseh et al. (2021) reported that spermidine-enriched soil application improved drought resistance in plant systems (Sun et al., 2025). In addition, Shokri et al. (2024) reported that the application of nano formulations

containing spermidine in grapevines improved grape yield and fruit quality. Mao et al. (2025), exogenously applied silicon and spermidine attenuated cadmium toxicity in *Salix matsudana* Koidz. seedlings, which were shown to occur by regulating endogenous polyamine levels and glutathione metabolism. In another study, Wang et al. (2025) reported that exogenous spermidine application promoted the formation of the closure layer in potato tuber wounds by inducing polyamine synthesis and phenylpropanoid metabolism. Augustyniak et al. (2025) reported that spermidine treatment limited fungal growth in flax shoots by suppressing polyamine metabolism and promoting balanced defense responses, thereby increasing flax resistance. Xing et al. (2025) reported that spermidine treatment stimulated germination of senescent sorghum seeds by enhancing antioxidant defense mechanisms. Badawy et al. (2025) reported that arginine and spermine treatment alleviated water scarcity stress in *Trigonella foenum-graecum* L. (fenugreek) by improving growth and physiobiochemical traits. Mostafaie et al. (2025) reported that exogenous spermine application promoted the grain filling process in spring wheat by increasing the accumulation and remobilization of stem reserves under drought stress.

These treatments resulted in improvements not only in quantity but also in biochemical quality parameters. This emphasizes the importance of spermidine-based bio stimulants in terms of marketable product quality.

Table 3. Field Trials and Effects of Spermidine Applications

Crop	Application Method	Observed Effects	Environmental Conditions	Reference
Wheat	Foliar Spray	Enhanced drought tolerance and microbial stability	Semi-arid, field	Kebert et al., 2023
Maize	Foliar Spray	The exogenous application enhances plant tolerance to abiotic stresses	Pots	Wang et al., 2022
Soybean	Biochar + Spermidine	Improved photosynthesis and yield	Semi-arid region	Huang et al., 2024
Maize	Exogenous Applications	Better chlorophyll content and photosynthetic rate	Field	Dong et al., 2022
Tomato	Exogenous Spermidine	Exogenous spermidine applied to tomato plants reduces stress-induced increases in free amino acids	Greenhouse	Zhang et al., 2013
Cucumber	Seed Priming	Higher chlorophyll and early vigor	Field	Su et al., 2014
Grapevine	Foliar Spray	Improved fruit yield and quality	Greenhouse	Shokri et al., 2024

General Evaluation and Future Perspectives Sustainable Agriculture and Spermidine Applications

Spermidine-containing bioformulations are among the most innovative approaches developed to contribute to sustainable agriculture. Combined with nanoencapsulation and controlled release technologies, these compounds maximize plant growth while reducing environmental toxicity (Garg et al., 2023; Zafar et al., 2024).

Environmental Impacts and Ecological Adaptation

The environmental damage of conventional fertilizers has increased interest in alternative biological solutions. Spermidine stands out as a compound compatible with both microbial and vegetative ecosystems and shows high potency in nanoforms without threatening soil biota (Younas et al., 2020; Oyedoh et al., 2023).

Future Technologies and Sensor-Based Systems

In the next generation agriculture, substances such as spermidine are expected to be integrated with sensor-assisted systems through nano formulations. Biosensor carrier systems that can make targeted releases when the plant needs them could revolutionize agriculture in the future (SeyedHajizadeh et al., 2024).

Policy, Regulation and Dissemination

The commercialization of biofertilizers is directly related to the development of regulations. Spermidine-based applications have accelerated approval processes in European and Asian markets, and widespread use of these products is expected in the next decade (Choudhary et al., 2021; Rathod et al., 2024).

Conclusion and Recommendations

Spermidine-based nano-biofertilizers have great potential for sustainability, potency and environmental safety in modern agriculture. It is recommended that future research should focus on integrating these systems with precision agriculture technologies, reducing production costs and testing them on a wider range of crops.

References

Ahmadi-Nouraldinvand, F., Afrouz, M., Tseng, T. M. P., Poshtdar, A., & Coudret, C. (2023). Green synthesis of hyperbranched spermine-coated Fe₃O₄ nanoparticles and their effect on corn seedlings under copper oxide stress. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 11(35), 12888-12907.

Alijani, S., Raji, M. R., Bistgani, Z. E., Nia, A. E., & Farajpour, M. (2025). Spermidine-induced improvements in water relations and antioxidant defense enhance drought tolerance in yarrow (*Achillea millefolium* L.). *Heliyon*, 11(1).

Añibarro-Ortega, M., Dias, M. I., Petrović, J., Pereira, A., Soković, M., Barros, L., & Pinela, J. (2025). Nutrients, Phytochemicals, and In Vitro Antioxidant and Antimicrobial Activities of Lulo (*Solanum quitoense* Lam.) Fruit Pulp, Peel, and Seeds. *Foods*, 14(12), 2083.

Augustyniak, B., Wojtasik, W., Sawuła, A., Burgberger, M., & Kulma, A. (2025). Spermidine treatment limits the development of the fungus in flax shoots by suppressing polyamine metabolism and balanced defence reactions, thus increasing flax resistance to fusariosis. *Frontiers in Plant Science*, 16, 1561203.

Badawy, A. A., Alshammari, W. K., Salem, N. F., Alshammari, W. S., & Hussein, H. A. A. (2025). Arginine and spermine ameliorate water deficit stress in Fenugreek (*Trigonella foenum-graecum* L.) by Enhancing Growth and Physio-Biochemical Processes. *Antioxidants*, 14(3), 329.

Basit, F., Khalid, M., Bahadur, A., Bhat, J. A., Ahmad, A., & Ahmad, P. (2025). Alleviation of vanadium toxicity through individual and combined supplementation of spermine and spermidine in soybean: Insights into oxidative stress management, detoxification mechanisms, and root exudates. *South African Journal of Botany*, 184, 468-479.

Bueno, M., & Cordovilla, M. D. P. (2021). Spermidine pretreatments mitigate the effects of saline stress by improving growth and saline excretion in *Frankenia pulverulenta*. *Agronomy*, 11(8), 1515.

Choudhary, R. S., & Yadav, N. K. (2021). Biofertilizers (microbial inoculants). *Just Agriculture*, 1, 1-10.

Dong, Z., Li, H., Xiao, J., Sun, J., Liu, R., & Zhang, A. (2022). Soil multifunctionality of paddy field is explained by soil pH rather than microbial diversity after 8-years of repeated applications of biochar and nitrogen fertilizer. *Science of the Total Environment*, 853, 158620.

Garg, T., Masud, S., Suresh, T., & Chakraborty, T. (2023). Handling bias in toxic speech detection: A survey. *ACM Computing Surveys*, 55(13s), 1-32.

Gholizadeh, F., Janda, T., Gondor, O. K., Pál, M., Szalai, G., Sadeghi, A., & Turkoglu, A. (2022). Improvement of drought tolerance by exogenous spermidine in germinating wheat (*Triticum aestivum* L.) plants is accompanied with changes in metabolite composition. *International Journal of Molecular Sciences*, 23(16), 9047.

Hasan, M. M., Skalicky, M., Jahan, M. S., Hossain, M. N., Anwar, Z., Nie, Z. F., ... & Fang, X. W. (2021). Spermine: its emerging role in regulating drought stress responses in plants. *Cells*, 10(2), 261.

Huang, S., Huang, P., Masood, S., Iqbal, M. M., Naz, T., Danish, S., ... & Salmen, S. H. (2024). Enhancing maize growth through the synergistic impact of potassium enrich biochar and spermidine. *BMC Plant Biology*, 24(1), 36.

Kebert, M., Kostić, S., Stojnić, S., Čapelja, E., Markić, A. G., Zorić, M., ... & Flors, V. (2023). A fine-tuning of the plant hormones, polyamines and osmolytes by ectomycorrhizal fungi enhances

drought tolerance in pedunculate oak. *International journal of molecular sciences*, 24(8), 7510.

Li, X., Zhou, X., Liu, X., Li, X., Jiang, X., Shi, B., & Wang, S. (2022). Spermidine protects against acute kidney injury by modulating macrophage NLRP3 inflammasome activation and mitochondrial respiration in an eIF5A hypusination-related pathway. *Molecular Medicine*, 28(1), 103.

Mao, W., Guo, L., Sun, T., Song, X., Gao, S., Li, X., ... & Ruan, Y. (2025). Exogenous Application of Silicon and Spermidine Alleviate Cadmium Toxicity by Modulating Endogenous Polyamines Level and Glutathione Metabolism in *Salix matsudana* Koidz. Seedlings. *Journal of Plant Growth Regulation*, 44(5), 2583-2599.

Mostafaie, P., Afjeh, S. S., Ahmadi, A., & Oveisi, M. (2025). Exogenous spermine promotes grain filling in spring wheat by enhancing the accumulation and remobilization of stem reserves under drought stress conditions. *Journal of Plant Growth Regulation*, 44(5), 2164-2183.

Ochoa, L., Shrivastava, M., Srivastava, S., Cota-Ruiz, K., Zhao, L., White, J. C., ... & Gardea-Torresdey, J. L. (2025). Nanomaterials for managing abiotic and biotic stress in the soil–plant system for sustainable agriculture. *Environmental Science: Nano*.

Oyedoh, O. P., Yang, W., Dhanasekaran, D., Santoyo, G., Glick, B. R., & Babalola, O. O. (2023). Sustainable agriculture: rare-actinomycetes to the rescue. *Agronomy*, 13(3), 666.

Pál, M., Rahman, A., Hamow, K. Á., Nagy, K., Janda, T., Dernovics, M., & Szalai, G. (2025). Genotype-specific and light dependence of polyamine uptake and metabolism in wheat plants. *Plant Physiology and Biochemistry*, 222, 109659.

Picos-Corrales, L. A., Morales-Burgos, A. M., Ruelas-Leyva, J. P., Crini, G., García-Armenta, E., Jimenez-Lam, S. A., ... & Inzunza-Camacho, L. N. (2023). Chitosan as an outstanding polysaccharide improving health-commodities of humans and environmental protection. *Polymers*, 15(3), 526.

Rathod, S. A., Rabari, D. S., & Kansara, S. S. (2024). Plant Growth Promoting Rhizobacteria: Mechanisms and their Role in Sustainable Agriculture.

Raziq, A., Din, A. M. U., Anwar, S., Wang, Y., Jahan, M. S., He, M., ... & Guo, S. (2022). Exogenous spermidine modulates polyamine metabolism and improves stress responsive mechanisms to protect tomato seedlings against salt stress. *Plant Physiology and Biochemistry*, 187, 1-10.

Roy, T., Pal, N., & Das, N. (2024). Regulation of the polyamine pool in plants: Metabolic implications and stress mitigation, with emphasis on microbial influence. *Physiological and Molecular Plant Pathology*, 132, 102317.

Saberi Riseh, R., Ebrahimi-Zarandi, M., Tamanadar, E., Moradi Pour, M., & Thakur, V. K. (2021). Salinity stress: toward sustainable plant strategies and using plant growth-promoting rhizobacteria encapsulation for reducing it. *Sustainability*, 13(22), 12758.

Sarkar, D., Vijayan, R., Gourinath, S., & Sau, A. K. (2022). A unique aromatic cluster near the active site of H. pylori CPA is essential for catalytic function. *Biophysical journal*, 121(2), 248-262.

Seyed Hajizadeh, H., Bayrami Aghdam, S., Fakhrghazi, H., Karakus, S., & Kaya, O. (2024). Physico-chemical responses of *Alstroemeria* spp. cv. Rebecca to the presence of salicylic acid and sucrose in vase solution during postharvest life. *BMC Plant Biology*, 24(1), 121.

Shokri, S., Soltani, M., Mazaheri, Y., Rezagholizade-shirvan, A., Mohammadi, M., Shariatifar, N., & Zeinali, T. (2024). New and Advanced Methods in Detection of Fruit Juice Adulteration: Focusing on Nano-Biosensor. *Journal of Spectroscopy*, 2024(1), 4691816.

Su, N., Wu, Q., Shen, Z., Xia, K., & Cui, J. (2014). Effects of light quality on the chloroplastic ultrastructure and photosynthetic characteristics of cucumber seedlings. *Plant Growth Regulation*, 73(3), 227-235.

Sun, C., Yu, Q., Zhao, Z., & Zhang, Y. (2022). Extracellular electron uptake for CO₂ fixation by *Rhodopseudomonas palustris* during electro-cultivation in darkness. *Science of The Total Environment*, 849, 157864.

Xing, Y., Zhang, H., Liu, C., Liu, C., & Zhou, Y. (2025). Spermidine Revives Aged Sorghum Seed Germination by Boosting Antioxidant Defense. *Antioxidants*, 14(3), 349.

Wang, L., Ning, C., Pan, T., & Cai, K. (2022). Role of silica nanoparticles in abiotic and biotic stress tolerance in plants: a review. *International Journal of Molecular Sciences*, 23(4), 1947.

Wang, X., Ling, W., Zhu, Y., Ji, C., An, X., Qi, Y., ... & Kang, B. (2025). Spermidine alleviates copper-induced oxidative stress, inflammation and cuproptosis in the liver. *The FASEB Journal*, 39(6), e70453.

Worrall, E. A., Hamid, A., Mody, K. T., Mitter, N., & Pappu, H. R. (2018). Nanotechnology for plant disease management. *Agronomy*, 8(12), 285.

Yadav, M., Sharma, A., Barot, M., Saini, M., Rajendran, A., & Modi, A. (2025). Understanding the roles of polyamines for plants tolerance and acclimatization under changing environmental

situations. In *Roles of Osmolytes in Changing Environment* (pp. 147-163). Academic Press.

Yang, X., Han, Y., Hao, J., Qin, X., Liu, C., & Fan, S. (2022). Exogenous spermidine enhances the photosynthesis and ultrastructure of lettuce seedlings under high-temperature stress. *Scientia Horticulturae*, 291, 110570.

Younas, A., Yousaf, Z., Rashid, M., Riaz, N., Fiaz, S., Aftab, A., & Haung, S. (2020). Nanotechnology and plant disease diagnosis and management. In *Nanoagronomy* (pp. 101-123). Cham: Springer International Publishing.

Zafar, S., Arshad, M. F., Khan, H., Menahil, R., Iqbal, L., Prabhavathi, S. J., ... & Shaheen, T. (2024). Nanoformulations of plant essential oils for managing mycotoxins producing fungi: An overview. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 60, 103314.

Zhang, Y., Wang, Y., Wen, W., Shi, Z., Gu, Q., Ahammed, G. J., ... & Guo, S. (2021). Hydrogen peroxide mediates spermidine-induced autophagy to alleviate salt stress in cucumber. *Autophagy*, 17(10), 2876-2890.

Zhou, C., Ma, Z., Zhu, L., Xiao, X., Xie, Y., Zhu, J., & Wang, J. (2016). Rhizobacterial strain *Bacillus megaterium* BOFC15 induces cellular polyamine changes that improve plant growth and drought resistance. *International Journal of Molecular Sciences*, 17(6), 976.

BÖLÜM 3

ŞANLIURFA EKOLOJİK KOŞULLARINDA KIRMIZI MERCİMEK (*Lens culinaris* Medic) YETİŞTİRİCİLİĞİ

1. AYŞE GÜLGÜN ÖKTEM*(¹)

Giriş

Yemeklik tane baklagiller içerisinde yer alan kırmızı mercimek gerek tarımsal üretimde, gerekse insan beslenmesinde önemli bir yere sahiptir. Ülkemizde, 2 423 848 da alanda ekimi yapılmakta, 405 000 ton üretim sağlanmakta ve 167 kg da⁻¹ verim elde edilmektedir. Kırmızı mercimek ülkemizde en çok Güneydoğu Anadolu Bölgesi'nde yetiştirilmekte olup, 2 348 072 da alanda ekilmekte, 391 455 ton üretim sağlanmakta ve 167 kg da⁻¹ ortalama verim alınmaktadır. Şanlıurfa'nın da temel tarım ürünlerinden birisi olan kırmızı mercimeğin ekim alanı, 1 187 891 da olup, 177 099 ton

¹ Doç. Dr., Harran Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Tarla Bitkileri Bölümü, Şanlıurfa, Türkiye. Orcid: 0000-0002-7669-5801

Üretim sağlanmakta ve ortalama 149 kg da⁻¹ verim elde edilmektedir (TUİK, 2024).

Mercimeğin gen kaynağı olarak Akdeniz Havzasının doğusundan, Afganistan'ın yüksek kesimleri, Himalaya ve Hindikuş Dağlarına kadar olan alan belirtilmektedir (Vavilov, 1951; Eser, 1970:2, Kaya, 2010:6). Fakat, Afganistan – Hindistan – Türkistan arasındaki bölge birçok endemik ve yabani mercimek açısından önemli gen kaynağıdır (Cubero, 1984:196). Günümüzde kültüre alınan mercimeğin (*Lens culinaris* Medik) gen merkezi ise Filistin, Suriye ve Türkiye'nin içinde bulunduğu alan olarak bilinmektedir. (Cubero, 1984:197). Bu durum bölgenin mercimek için önemli bir gen merkezi olduğunu da göstermektedir.

Resim 1. Şanlıurfa'nın önemli tarım ürünlerinden birisi kırmızı mercimektir.



Mercimek içerdiği yüksek protein nedeniyle (%15.9-31.4) diyetlerde veya gıdaya erişimin kısıtlı olduğu yerlerde oldukça tercih edilen bir üründür. Çünkü karbonhidrat (43.0-74.9), vitamin (A,B,C ve D) folik asit, demir, çinko, kalsiyum, fosfor ve amino asitler

içeren zengin bir birleşime sahiptir (Şehirali,1988:407). Gıdanın yanı sıra, hasat sonrası kalan artıkları zengin bir hayvan yemi olarak değerlendirilmektedir. Mercimek bitkileri yeşil gübre olarak da kullanılabilir. Köklerindeki *Rhizobium leguminosarum* bakterileri havanın serbest azotunu bağlayabilme yeteneğine sahiptir. Bu sayede toprağın organik maddece zenginleşmesine katkıda bulunmaktadır.

ADAPTASYONU

İklim ve Toprak İstekleri

Bölgede mercimek yetiştiriciliği genellikle kuru tarım alanlarında yapılmaktadır. Mercimek, sıcak ılıman ve subtropik bölgelerde yetiştirilmekte olup tropik bölgelerin yüksek veya serin bölgelerinde de tarımı yapılabilir. Optimum sıcaklık isteği 20°C ile 35 °C arasındadır (Adak, 2021:133). Kanada, Amerika gibi ülkelerde yazlık ekimler yapılmaktadır. Mercimek uzun gün bitkisi olup, vejetasyon süresi 6-7 aydır, 4-6 °C'de 1 ay kadar vernalizasyon süresine ihtiyaç duymaktadır. Ancak, Şanlıurfa koşullarında yaz sıcakları erken ve aniden gerçekleştiğinden dolayı mercimek kışlık olarak yetiştirilmektedir. Şanlıurfa'da ve Güneydoğu Anadolu Bölgesi'nde tarımı genellikle yağışa dayalı olarak yapılmaktaysa da, son yıllarda sulanan alanlarda da üretilmeye başlamıştır.

Mercimek genellikle kurağa dayanıklı bir bitki olmakla birlikte özellikle ilk çıkış, bakla doldurma, çiçeklenme dönemlerinde suya ihtiyaç duymaktadır. Son zamanlarda bölgede yaşanan kuraklığın veya düzensiz yağışların etkisiyle mercimek verimlerinde düşüş gözlenmiş, üreticiler alternatif ürünlere yönelmek durumunda kalmıştır.

Toprak isteği bakımından seçici olmayan bir bitkidir. Yüksek verim için havalanması iyi, kumlu-tınlı, kireçli topraklar önerilmektedir, pH değeri 5.0-6.5 olan topraklarda rahatlıkla tarımı yapılabilir. Hafif bünyeli topraklar yetiştiricilik için tercih

edilse de, ağır bünyeli topraklarda da yetişebilmektedir. Ancak, bu durumda verimde düşmeler söz konusu olabilmektedir. 3000 metre rakıma kadar yetiştirilebilse de, yükseklik arttıkça verim kaybı yaşanmaktadır (Özdemir, 2002:79).

Kültürü

Toprak Hazırlığı

Bölgede toprak hazırlığında iki farklı yöntem kullanılmaktadır. Birinci yöntemde tahıl hasadından sonra toprak 15-20 cm derinlikte sürülerek anız bozma işlemi yapılır, sonbaharın ilk yağmurlarına kadar beklenir. Yabancı otların çıkışı sağlandıktan sonra kültivatör ve tapan çekilerek tarla ekime hazır hale getirilir. İkinci yöntemde ise, tarla tahıl hasadından sonra sonbahar aylarına kadar bekletilir. Daha sonra pulluk, kültivatör veya goble disk ile işlenir ve arkasından tapan çekilerek ekime hazır hale getirilir. Mercimek yetiştiriciliğinde düzenli ve üniform bitki çıkışının sağlamanın ilk koşulu iyi bir toprak hazırlığından geçmektedir.

Tohumluk Seçimi ve Ekim

Tohumluk seçimi kaliteli ve yüksek verimin güvencesidir. Bu amaçla bölgede kırmızı mercimek ile yürütülen çeşitli çalışmalar bulunmaktadır. Öktem (2016:27), Şanlıurfa koşullarında yürütülen bir çalışmada en yüksek tane veriminin Şakar çeşidinden (186.16 kg da⁻¹), en düşük ise Yerli Kırmızı çeşidinden (72.82 kg da⁻¹) olduğunu, ancak Tigris, Altıntoprak ve Evirgen çeşitlerinin de yüksek verim potansiyeline sahip olduklarını belirtmiştir. Koç ve Akdeniz (2019:15), Şanlıurfa-Ceylanpınar ekolojisindeki araştırmalarında İpek kırmızı mercimek çeşidinin tane veriminin yüksek olmasının yanı sıra, bitki boyu, ilk bakla yüksekliği ve bitkide bakla sayısı bakımından Seyran, Tigris Evirgen ve Fırat-87 çeşitlerinden daha yüksek değerlere sahip olduğunu açıklamışlardır. Doğan ve Doğan (2020:23), Mardin bölgesinde çeşitli hat ve çeşitlerle yürüttükleri çalışmalarında en yüksek verimin Fırat-87 çeşidinden ve ICARDA

kökenli iki hattan aldıklarını bildirmişlerdir. Şanlıurfa gibi yarı kurak iklim koşulları için, kurağa ve yatmaya dayanıklı, yüksek verimli, erkenci, makinalı hasada uygun, mercimek çeşitlerinin ıslah edilmesi de ayrıca önem taşımaktadır (Öktem, 2021: 267).

Ekim için seçilecek tohumlukların temiz, 1000 tane ağırlığının yüksek, safiyetinin en az % 97-98 olması, yabancı otlardan arındırılmış, yüksek verimli olması istenir. Yapılan çalışmalar dikkate alınarak ve yeni ıslah edilen çeşitler de göz önünde bulundurularak, Şanlıurfa koşullarında Evirgen, Tigris, Mert, Atacan, Çağıl, Altıntoprak, Seyran-96, Şakar çeşitleri önerilmektedir. Ekimde tohumluk miktarı, tohum iriliğine bağlı olarak 9-12 kg da⁻¹ arasında değişmektedir. Mibzerle ekimde sıra arası 15-20 cm, ekim derinliği 4-5 cm olacak şekilde düzenlenmelidir.

Gübreleme

Dekardan 200 kg tane ürünü alındığında topraktan 10 kg N, 2.8 kg P₂O₅ ve 7.8 kg K₂O kaldırılmaktadır (Azad & Gill, 1989:28). Yapılan çalışmalarda topraktaki besin maddelerinin durumuna, ekolojik şartlara ve yetiştirilen çeşide göre değişmekle birlikte mercimeğin fosfor ihtiyacının dekara 2-6 kg arasında değiştiğini ortaya koymuştur (Sekhon et al, 1986:11, Singh & Saxena, 1986:27, Khare et al, 1988:12, Dhingra & ark. 1988:141, Azad & Gill, 1989:28, Murshidul Hoque & Fazlul Haq, 1994:29). Bölgede 3 kg da N ile 6 kg da⁻¹ P₂O₅ yeterli olmaktadır. Gübrenin ekimle birlikte tek dozda verilmesi gerekmektedir.

Mercimekte mikro element uygulamaları da verim ve kaliteye önemli etkide bulunmaktadır. Öktem (2019:360), Şanlıurfa koşullarında topraktan 0, 5, 10, 15, 20 ve 25 kg Zn ha⁻¹ dozlarındaki çinkoyu topraktan uygulamış, tane veriminde ve kalite özelliklerinde artış olduğunu en ekonomik çinko dozunun 15 kg ha⁻¹ olduğunu açıklamıştır (Tablo 1).

Öktem (2022), bor elementini mercimek bitkisine farklı yöntemlerle uygulamış en yüksek tane veriminin toprak + yaprak uygulamasından ($198.57 \text{ kg ha}^{-1}$) elde edildiğini, yaprak ve topraktan uygulamaların da, kontrolden daha yüksek verim verdiğini bildirmiştir (Grafik 1). Öktem (2020:4169), borun kırmızı mercimekte verim ve verim unsurlarına etkisini incelediği diğer bir araştırmada 0, 0.75, 1.5, 2.25, 3, 3.75 kg B ha^{-1} dozlarında bor topraktan uygulama yapmış, ekonomik bor dozunun 1.7 kg B ha^{-1} olduğunu açıklamıştır (Resim 2).

Tablo 1 Değişik çinko miktarlarının protein oranı (%) ve tane verimi (kg ha^{-1}) değerleri

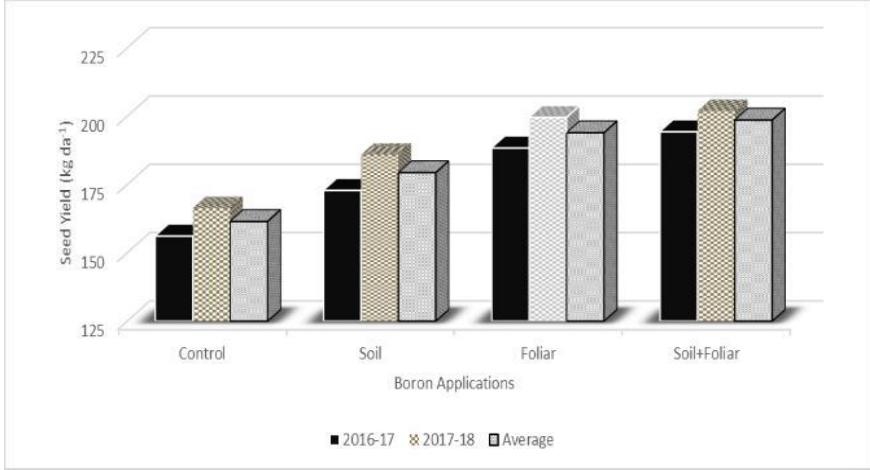
Çinko Miktarları (kg ha^{-1})	Protein İçeriği (%)		Tane Verimi (kg ha^{-1})	
	2013-14**	2014-15**	2013-14**	2014-15*
0 (Kontrol)	22.82 e†	22.71 e	899 e	1093 d
5	23.71 d	24.09 d	942 de	1153 d
10	24.61 c	24.94 d	1133 c	1273 c
15	25.75 b	26.53 c	1398 a	1485 a
20	26.04 b	28.71 b	1268 b	1463 ab
25	26.66 a	29.76 a	1049 cd	1370 bc
LSD	0.399	0.857	127.3	112.7

Kaynak: Öktem (2019: 363).

Farklı organik materyallerin de kırmızı mercimekte verim ve kaliteyi olumlu etkilediğine dair çeşitli çalışmalar bulunmaktadır. Siirt koşullarında yürütülmüş bir çalışmada 5 ekim zamanı (15 Ekim, 1 Kasım, 15 Kasım, 1 Aralık, 15 Aralık) ve 5 vermikompost dozunun (Kontrol, 250, 500, 750 ve 1000 kg da^{-1}) kırmızı mercimekte verim ve verim unsurlarına etkilerini incelendiği bir çalışmada, en yüksek tane veriminin (252.6 kg da^{-1}) 4. Ekim zamanında uygulanan 250 kg da^{-1} vermikompost dozundan elde edildiği bildirilmiştir. Ayrıca 750

kg da⁻¹'dan daha yüksek miktarda uygulanan vermikompostun, bazı bitkisel özellikler ile verim unsurlarına olumsuz etkilerinin olduğu belirtilmiştir. (Ceritoğlu, 2019: 11).

Grafik 1 Bor uygulamalarının mercimeğe etkisi



Kaynak: Öktem, 2022: 115.

Humik asitin kırmızı mercimeğe etkisinin incelendiği bir çalışmada, Öktem ve ark. (2017: 119), mercimek bitkisine topraktan 2 L da⁻¹, 4 L da⁻¹, 6 L da⁻¹ ve 8 L da⁻¹ hümik asit uygulamışlardır. 8 L da⁻¹ uygulamasının, tane verimi, bitki boyu, ilk bakla yüksekliği, bin tane ağırlığı, hasat indeksi ve bakla sayısı değerlerinin kontrole göre daha yüksek değerler verdiğini belirtmişlerdir.

Küçük ve Arslan (2024:61), toprağa farklı dozlarda uygulanan yarasa gübresinin mercimeğin bitki boyu, yeşil aksam ve kök kuru ağırlığı, kök uzunluğu değerlerine ve klorofil içeriğine pozitif etkisinin olduğunu açıklamışlardır.

Genellikle bölgede bakteri aşılması yapılmamaktadır. Ancak *Rhizobium leguminosarum* bakterilerinin mercimekte aktif olduğu, nodül oluşumunda etkili olduğu bilinmektedir.

Resim 2. Farklı mikro element uygulamaları yapılmış çiftçi tarlasından görünüm



Sulama

Bölgede mercimek genellikle kuru tarım alanlarında yetiştirildiğinden sulama yapılmamaktadır. Yağışların yoğun olduğu dönemde bitki boyu uzamakta ve bitkilerde yatma görülmektedir. Bu durum özellikle hasatta tane dökme nedeniyle ürün kayıplarına neden olmaktadır. Ayrıca yatan bitkilerde çürüme, kızışma meydana gelebilmektedir.

Yağışın yetersiz olduğu dönemlerde özellikle bakla dolum dönemindeki az veya yetersiz yağışlar tanelerin cılız ve küçük olmasına neden olmakta, bu durumda verim de düşmektedir. Sulama imkânının bulunduğu yerlerde bitkinin ihtiyacına göre verilecek 1 veya 2 su ile verim kayıpları önlenilebilecektir.

Yabancı Otlar

Mercimek yetiştiriciliğinde yüksek verim alınmasını engelleyen en önemli unsur yabancı otlardır. Bunun için mercimek

ekiminin ilk yağmurlardan sonra bırakılması, yabancı otlar çimlenip tarla bir daha işlendikten sonra ekim yapılması yabancı ot kontrolünde etkili bir yöntem olarak uygulanmaktadır.

Mercimek bitkisinin ilk gelişme döneminde yabancı otlar ışık, su besin maddesi gibi faktörler nedeniyle rekabete girmekte, verimde kayıplara neden olmaktadır. Mercimek ilk gelişim döneminde oldukça yavaş gelişmekte, boylanması kısa olmaktadır. Bu nedenle bitki, yabancı otlarla rekabet edememekte, yabancı otlar mercimeği baskılamaktadır.

Bölgede en sık görülen yabancı otlar, köygöçüren (*Cirsium arvense*), pıtrak (*Xanthium macrocarpus*), yabani hardal (*Sinapis arvensis*), tarla sarmaşığı (*Convolvulus arvensis*), yabani yulaf (*Avena fatua*), ayrık (*Agropyron repens*), canavar otu (*Orobanche minör*), dil kanatan, tilkikuyruğu (*Alopecurus myosuroides*), vb olarak sıralanabilmektedir. Yabancı otlarla mücadelede temiz tohum kullanmak, mekanik veya kimyasal mücadele etkili olmaktadır (Tablo 2).

Tablo 2. Şanlıurfa koşullarında en sık rastlanan yabancı ot ve zararlılara ait etkin madde ve kullanım dozları

Yabancı Ot/Zararlı	Aktif Madde Madde	Doz
Ayrık (<i>Elymus repens</i>)	50 g l ⁻¹ Quizalofob-p-ethyl	100 ml da ⁻¹
Tilkikuyruğu (<i>Alopecurus myosuroides</i>)	50 g l ⁻¹ Quizalofob-p-ethyl	75 ml da ⁻¹
Kısır Yabani Yulaf (<i>Avena sterilis</i> = <i>Avena ludoviciana</i>)	50 g L ⁻¹ Quizalofob-p-ethyl	75 ml da ⁻¹
Apion	25 g l ⁻¹ Deltamethrin	50 ml da ⁻¹
Mercimek Tohum Böceği (<i>Bruchus lentils</i>)	100 g l ⁻¹ Cypermethrin	100 ml da ⁻¹
Mercimek Hortumlu Böceği (<i>Sitona sp.</i>)	25 g l ⁻¹ Deltamethrin	50 ml da ⁻¹

Kaynak: Bitki Koruma Ürünleri Veri Tabanı (2025).

Başlıca Zararlılar

Şanlıurfa koşullarında kırmızı mercimek alanlarında görülebilecek başlıca zararlılar; tohum böceği (*Bruchus ervi* Fröhl.), mercimek hortumlu böceği (*Sitona crinitus* Hrbst.), apion (*Apion arrogans* Wenck), mercimek kök koşnili (*Porphyrophora polonica* L), kök afidi: *Smynthuodes betae* Westwood (Homoptera: Aphididae), yaprak bitleri (*Aphis craccivora* Koch, *Acyrtosiphon pisum* Harris (Homoptera: Aphididae), pis kokulu yeşilböcek (*Nezara viridula* L.), thripsler, dut kımılı (*Dolycoris baccarum* L.) vb olarak sıralanabilmektedir. Kırmızı mercimekte etkili olan bazı zararlılara karşı aktif madde içeriği ve uygulama miktarları Tablo 2’de verilmektedir.

Hasat

Şanlıurfa ekolojisinde mercimeğin zamanında hasat edilmesi önemlidir. Hasat işlemi mercimek yetiştiriciliğinin en zorlayıcı işlemidir. Çünkü baklaların yeterli olgunluğa gelmiş olması ve çatlama olmadan hasat edilmesi gerekmektedir. Ancak, mercimek bitkisinin baklaları aynı anda hasat olgunluğuna gelmemektedir. Yağışın yetersiz olduğu dönemlerde bitki boyu kısa kalmakta ve ilk baklalar yüzeye yakın oluşmaktadır. Yağışın fazla olduğu dönemlerde ise, bitki fazla boylanabilmekte ve yatmalar olabilmektedir.

Hasat bölgede genellikle çeşide ve iklim koşullarına bağlı olarak Mayıs ayında başlamakta, Haziran ayının ilk günlerine kadar sürebilmektedir.

Bitkiler hava sıcaklığının aniden artışı ile çok kısa sürede hasat olgunluğuna ulaşabilmektedir. Genellikle bitkilerin sarı-yeşil renk aldığı, tanelerin sertleştiği dönemde ve sabah saatlerinde hasadın yapılması önerilmektedir. Hasatta orak, biçme makinaları kullanılmakta veya küçük alanlarda elle yapılmaktadır (Resim 3 ve 4). Hasat edilen bitkiler tarlada 7- 10 gün süreyle yığınlar halinde

bekletilerek kurutulmakta, ardından patoza verilerek tanelenmektedir.

Resim 3. Şanlıurfa'da hasattan bir görünüm



Arazinin tesviyeli ve makinalı hasada uygun olduğu yerlerde biçerdöverle hasat da yapılmaktadır. Biçerdöverle hasatta ise ilk bakla yüksekliği değeri makinalı hasada uygunluk bakımından önem taşımaktadır. Makineli hasada uygunluk bakımından, ilk bakla yüksekliği değerinin en az 12 cm olması gerektiğini açıklanmıştır (Aydoğan, Karagül & Bozdemir, 2002:2). Ancak, ilk bakla yüksekliği ekolojik koşulların yanında, çeşitlerin genetik yapısına da bağlı bir özelliktir. Makinalı hasat yapılacaksa kullanılacak çeşidin ilk bakla yüksekliğinin bilinmesi önemlidir. Öktem (2021: 270), Şanlıurfa koşullarında 2016-17 ve 2017-18 yıllarında yürüttüğü çalışmada, 10 kırmızı mercimek hattı ve 2 standart çeşidi (Çağıl ve Çiftçi) materyal olarak kullanmış, iki yılın ortalama sonuçlarına göre

en yüksek ilk bakla yüksekliği değerini ifti (24.28 cm) eşidinden elde etmiştir.

Resim 4. Biilerek hasat edilen bitkiler tarlada kurumaya bırakılmaktadır.



Hasat sonucu elde edilen ürünler selektrden geçirilerek, içindeki taş, toprak, yabancı ot tohumları gibi yabancı maddeler temizlenmeli, depo rutubetsiz ve mutlaka ilaçlanmış olmalıdır (Resim 5).

Depolamada özellikle tohum böcekleri sorun teşkil etmektedir. Tohum böcekleri hem tohumluk olarak ayrılan taneye zarar vermekte, hem de üretimde kalitenin düşmesine neden olmaktadır.

Resim 5. Kırmızı mercimeğin harmanlanmış görünümü



Kaynakça/References

Adak, M.S. (2021). Yemeklik Baklagiller, Ankara Üniversitesi Ziraat Fakültesi Basımevi.

Aydoğan A., Karagül V. & Bozdemir Ç. (2002) Orta Anadolu Bölgesi kışlık mercimek (*Lens culinaris* Medik.) ıslah çalışmaları. *Tarla Bitkileri Merkez Araştırma Enstitüsü Dergisi*, 11(1):2.

Azad, A.S. & Gill, A.S. (1989). Effect of the application of phosphorus fertilizier on grain yield of lentil. *Lens Newsletter*, 16, (1) 28-29.

Bitki Koruma Ürünleri (2025). Bitki Koruma Ürünleri Veri Tabanı. <https://bku.tarimorman.gov.tr/> (Erişim Tarihi: 10.12.2025).

Ceritoğlu, M. (2019). Farklı ekim zamanlarında uygulanan vermikompostun mercimek (*Lens culinaris* Medik.)'te verim ve verim öğeleri üzerine etkisi. Siirt Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi.

Cubero, J.I. (1984). Taxonomy, distribution and evolution of the lentil and its wild relatives, genetic resources and their exploitation chickpeas, faba beans and lentils, (Ed. John R. Witcombe, William Erskine), s. 187 – 203, Martinus Nijhoff/Dr. W. Junk Publishers.

Dhingra, K.K., Sekhon, H.S., Sandhu, P.S. & Bhandari, S.C. (1988). Phosphorus-Rhizobium interaction studies on biological nitrogen fixation and yield of lentil. *J.Agric.Sci. Camb.* 110, 141-144.

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.

Eser, D. (1970). Türkiye’de yetiştirilen mercimek çeşitlerinin önemli morfolojik karakterleri üzerinde araştırmalar. Basım Yeri: Ankara, Ankara Üniversitesi Ziraat Fakültesi Yayınları: 383.

Kaya, F. (2010). Ülkemizde yetiştirilen bazı mercimek çeşitlerinin bileşenlerinin belirlenmesi. *Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Basılmamış Yüksek Lisans Tezi, s. 50, Adana.

Khare, J P., Tomar, G.S., Tiwari, U.K. & Sharma, H.L. (1988). Response of lentil to nitrogen and phosphorus levels under rainfed conditions in central india. *Lens Newsletter*, 15(2), 1.

Koç, A. & Akdeniz, H. (2019). bazı kırmızı mercimek (*Lens culinaris* Medik.) genotiplerinin, Beyazkule-Ceylanpınar sulu koşullarında verim ve teknolojik özelliklerinin belirlenmesi. *Erciyes Tarım ve Hayvan Bilimleri Dergisi*, 2(2), 15-20.

Küçük, Ç. & Arslan, A. (2024). Toprakta uygulanan yaras gübresinin mercimek gelişimi ile rizosfer toprağının bazı biyolojik özelliklerine etkisi. *Sinop Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 9(1), 61-71.

Murshidul Hoque, M. & Fazlul Haq, M. (1994). Rhizobial inoculation and fertilization of lentil in bangladesh. *Lens Newsletter*, 21(2), 29-30.

Öktem, A. G. (2016). Şanlıurfa koşullarında yetiştirilen bazı kırmızı mercimek (*Lens Culinaris* Medik.) genotiplerinin verim ve verim öğelerinin belirlenmesi. *Nevşehir Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 5(1), 27-34.

Öktem, A. G., Nacar, A. S. & Öktem, A. (2017). Sıvı olarak toprağa uygulanan hümitik asit miktarlarının kırmızı mercimek bitkisinde (*Lens culinaris* Medic.) verim ve bazı verim unsurlarına etkisi. *Tarla Bitkileri Merkez Araştırma Enstitüsü Dergisi*, 26, 119-124.

Öktem, A. G. (2019). Effects of different zinc levels on grain yield and some phenological characteristics of red lentil (*Lens culinaris* Medic.) under arid conditions. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, 43(3), 360-367.

Öktem, A.G. (2020). Boron Applications to red lentil (*Lens culinaris* Medic) under arid conditions. *Fresenius Environmental Bulletin*. 29(6), 4169-4174. ISSN 1018-4169.

Öktem, A. G. (2021). Yarı kurak iklim koşulları için ıslah amaçlı yetiştirilen bazı kırmızı mercimek hat ve çeşitlerinin verim ve verim unsurlarının belirlenmesi. *Adnan Menderes Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, 18(2), 267-274.

Öktem, A. G. (2022). Effects of different boron applications on seed yield and some agronomical characteristics of red lentil. *Turkish Journal of Field Crops*, 27(1), 112-118.

Özdemir, S. (2002). Yemeklik tane baklagiller. Basım Yeri: İstanbul, Hasad Yayıncılık.

Sekhon, H.S., Dhingra, K.K., Sandhu, P.S. & Bhandari, S.C. (1986). Effects of time of sowing, phosphorus and herbisids on the response to rhizobium inoculation. *Lens Newsletter*, 13(1), 11-14.

Singh, N.P. & Saxena, M.C. (1986). Response of lentil to phosphorus and zinc application. *Lens Newsletter*, 13(2), 27-28.

Şehirli, S. (1988). Yemeklik Dane Baklagiller, Basım Yeri: Ankara. A.Ü. Ziraat Fakültesi Yayınları, 1089, Ders Kitabı 314.

Tüik (2024). Türkiye İstatistik Kurumu <https://www.tuik.gov.tr/> (Erişim Tarihi:16.12.2025)

Vavilov, N. I. (1951). The Origin, variation, immunity and breeding of cultivated plants. *Chronica Botanica*, No. 1/6, pp. 364, New York.

BÖLÜM 4

MISIR BİTKİSİNDE (*Zea mays* L.) GÜBRELEME

AYŞE GÜLGÜN ÖKTEM¹

Giriş

Yeryüzünde tahıllar içerisinde buğday ve çeltikten sonra üretim alanı yönünden en çok yetiştirilen tahıl, mısır bitkisidir. Yaygın bir üretime sahip olan yapılan mısır bitkisinin kullanım alanları da çok geniştir. Mısır ülkemizde 7 894 438 da alanda yetiştirilmekte olup, 7 893 787 da alanda hasadı gerçekleştirilmekte, yaklaşık 1026 kg da⁻¹ verim elde edilmekte 8 100 000 ton üretim yapılmaktadır. Şanlıurfa'da ise, 1 059 514 da alanda ekimi yapılmakta, ortalama 848 kg da⁻¹ verim elde edilmekte ve 898 766 ton üretim sağlanmaktadır (TUİK, 2024).

C4 bitkisi olan mısır, birim alandan fazla miktarda kuru madde üreten bir bitkidir. Mısır bitkisi, büyümesi ve gelişmesi için azot (N), fosfor (P), potasyum (K) gibi makro besin elementlerinin yanı sıra mikro elementlere de ihtiyaç duyar. Ahır gübresi,

¹ Doç. Dr. Harran Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Tarla Bitkileri Bölümü
Orcid: 0000-0002-7669-5801

vermikompost, humik asit gibi organik materyaller de verime olumlu etkilerde bulunmaktadır. Bu nedenle gübre uygulamalarının doğru, dengeli ve yeterli şekilde yapılması gerekmektedir. Özellikle ekim nöbetinin uygulandığı sistemlerde, mısırı takip eden bitkide verim kaybı yaşanmaması için ihtiyacı olan besin maddelerinin toprağa verilmesi gerekmektedir. Mısırın ilk gelişme dönemlerinde yetersiz gübre uygulandığında veya bitki gübreyi bünyesine alamadığında gübre alım ve kullanım etkinliğinin düştüğü açıklanmıştır (Öktem, Öktem & Emeklier, 2010:832).

Resim 1. Yüksek ve kaliteli verim için uygun gübreleme programı oluşturulmalıdır.



Doğru ve etkili bir gübrelemede toprak ve yaprak analizleri önem taşımaktadır. Ayrıca gübrelerin bitkilerin ihtiyaç duyduğu zamanda, uygun yöntemle ve yeterli miktarda verilmesi gerekmektedir (Resim 1). Üretim artık tek başına yeterli bir kavram değildir. Üretimin sürdürülebilir, kaliteli ve çevreyi koruyucu olması oldukça önemlidir.

Mısır Güneydoğu Anadolu Bölgesi için de önemli bir potansiyel oluşturmaktadır. Mısır bitkisinden kaliteli ve yüksek verim almanın önemli koşullarından birisi de bitkinin gübreleme

programının oluşturulmasıdır. Bu bölümde şanlıurfa ve benzer ekolojilerde mısıрын verim ve kalitesine etki eden gübreleme çalışmalarının bazıları da ele alınacaktır.

Gübreleme Çalışmaları

Mısışda protein oranı ve tane verimini etkileyen en önemli girdilerden birisinin azotlu gübreler olduğu bildirilmiştir (El-Hosary & ark., 2019:2475). Azotun (N), mısış bitkisinin protoplazma, proteinler, nükleik asitler, klorofil içeriği vejetatif ve generatif gelişim aşamalarında çok önemli olduğu birçok araştırmacı tarafından bildirilmiştir (Ahmad & ark., 2018:1, Zeleke, Alemayehu & Yihenew, 2018:1). Mısış bitkisinin ilk gelişme döneminde itibaren ürün miktarını en çok etkileyen besin elementi azottur. Azot yetersizliğinde ciddi miktarlarda ürün kaybı meydana gelir. Bunun yanı sıra zayıf büyüme, boğum aralarında kısıalma ve sapta incelme gözlenirken, yaşlı yaprakların üst kısmında renk açılması ve orta damarda uçtan itibaren sararma görülebilir. Ülkemiz topraklarının genel olarak azot bakımından fakir olduğundan kaliteli ve yüksek verim için bitkinin ihtiyaç duyduğu azot gübreleme ile karşılanmaktadır (Anonim, 2025).

Güneydoğu Anadolu Bölgesi topraklarının %78inin fosfor içeriğinin düşük olduğu, yağış ve nemin az olması, toprakların kireç içeriğinin de yüksek olması, organik madde miktarının da düşük olması gibi faktörler nedeniyle bölgede fosforlu gübreleme yapılması gerektiği açıklanmıştır (Aydeniz ve Brohi, 1991:880). Azot ve fosfor kullanım etkinliği kullanılan çeşide göre değişmektedir. Bu nedenle, azot ve fosforu en iyi değerlendiren genotiplerin belirlenmesi gerek ekonomi, gerekse verim ve çevre için olumlu sonuçlar sağlayacaktır.

Yüksek verim için, mısışa saf olarak 8-10 kg da⁻¹ fosfor (Öktem & Ülger, 1998:71) ve potasyum ile 25-30 kg da⁻¹ azot uygulanması gerektiği (Öktem, 2008:50) bildirilmiştir. Fosfor ve potasyumun tamamının ekimle birlikte, azotun ise yarısının ekimle, diğer yarısının ise bitkiler 30-40 cm boyunda iken verilmesi önerilmektedir. Üst gübre uygulaması yapıldıktan sonra çapa veya lister çekilerek, ardından sulama yapılmalıdır.

Şanlıurfa Harran Ovası koşullarında yapılan bir çalışmada, tatlı mısır bitkisinde farklı azot dozlarının ve sıra üzeri ekim mesafelerinin verim ve verim özellikleri üzerine etkileri incelenmiştir. Azot dozları; kontrol, 6, 12, 18, 24 ve 30 kg da⁻¹ olarak düzenlenmiştir. Bitki boyu, koçan boyu, koçanda tane sayısı, suda çözünür kuru madde, bitkide yaprak sayısı, koçanda tane sayısı, 1000 tane ağırlığı, tane verimi, taneleme randımanı değerlerinin azot dozlarından olumlu etkilendiği bildirilmiştir. Khan F1 mısır çeşidi için en uygun azot dozunun 18 kg da⁻¹ N ve 20 cm sıra üzeri mesafeden elde edildiği açıklanmıştır (Boztepe, 2022:5).

Azot, bitkiye fertigasyon yöntemi ile de verilebilmektedir. Saraçoğlu ve Öktem (2021:5017), Şanlıurfa 2018 ve 2019 yıllarında ikinci ürün koşullarında fertigasyon yöntemi ile farklı düzeylerde uygulanan azotun mısır bitkisinin verim ve kalitesine etkilerini incelemişlerdir. Çalışmalarında farklı azot dozlarının (0, 4, 8, 12, 16, 20, 24, 28, 32 ve 36 kg N da⁻¹) etkileri araştırılmıştır. Araştırmacılar, tane verimi için en uygun azot dozunun N₇ (28 kg da⁻¹) olduğunu bildirmişlerdir. En yüksek tane verimini N₇ (28 kg da⁻¹) azot konusundan (1594 kg da⁻¹), en düşük tane verimini ise N₀ (kg da⁻¹) kontrol konusundan (434 kg da⁻¹) elde ettiklerini açıklamışlardır. Ayrıca N24 ile N28 uygulamaları arasında istatistiki farklılık bulunmadığını belirtmişlerdir.

Son zamanlarda Şanlıurfa ve benzer ekolojilerde tavsiye edilmekte olan yavaş salınlı gübrelerin kullanımı da gündeme gelmektedir Yoğun ve yanlış gübre kullanımı sonucunda toprağın ve çevrenin kirliliği söz konusu olabilmektedir. Yavaş salınlı gübreler özellikle kuraklığın söz konusu olduğu dönemlerde ve bölgelerde üreticinin yağış endişesini ortadan kaldırabilmektedir. Bölgede yavaş salınlı azotlu gübrelerin mısırdaki kullanımı ile ilgili yapılmış çalışmalar mevcuttur.

Cengizer ve Öktem (2023:438), Şanlıurfa ikinci ürün koşullarında DKC 6092 atdışi mısır çeşidi ile yaptıkları çalışmada 15 kg da⁻¹, 20 kg da⁻¹, 25 kg da⁻¹ ve 30 kg da⁻¹ olacak şekilde dört farklı yavaş salınlı azot dozunu farklı gelişme dönemlerinde denemişlerdir. Bitki sap kalınlığı, koçan çapı, koçanda tane sayısı, koçanda tane ağırlığı, koçan uzunluğu, hektolitre ağırlığı ve tane

verimi değerlerini istatiksels olarak önemli bulmuşlardır. Tane veriminde en yüksek değeri, yarısı ekim ve yarısı st olarak toplamda 25 kg N da⁻¹ uygulamasından (1270.66 kg da⁻¹) elde ettiklerini açıklamışlardır.

şanlıurfa veya benzer ekolojilerde yüksek sıcaklık bitkinin büyüme, gelişme ve besin maddeleri alımında etkili olmakta ve özellikle azotun etkin kullanımı önem taşıtmaktadır. Çünkü azot sıcak iklimlerde farklı şekillerde topraktan kayıplara uğramaktadır. Yavaş salınımlı azotlu gübrenin kullanımıyla bitki ve koçan özelliklerinde uygulanan azot miktarına bağlı olarak pozitif etkiler gözlemlendiği bildirilmiştir (ktem, Ağaçkesen & ktem, 2025 a:537).

Tablo 1 Yavaş Salınımlı Azotlu Gübrenin Cin Mısırdaki Tane Verimi ve Patlama Hacmine Etkisi

Uyg. (kg ha ⁻¹)	Tane Verimi (kg ha ⁻¹)			Patlama Hacmi (cm ³ g ⁻¹)		
	2022	2023	Ort.	2022	2023	Ort.
Kontrol	2369.9 f	2634.9 g	2502.4 G	19.83 f	21.00 e	20.41 F
40	2554.0 f	3600.8 f	3077.4 F	22.17 e	21.73 de	21.95 E
80	3818.2 e	4600.8 e	4209.5 E	24.27 d	23.87 cd	20.07 D
120	4488.1 d	5958.7 d	5223.4 D	25.43 c	24.27 bc	24.85 CD
160	7091.3 c	7069.1 c	7080.2 C	26.47 b	25.20 bc	25.83 BC
200	8288.1 ab	7834.8 b	8061.4 B	26.67 b	26.33 ab	26.50 B
240	8760.3 a	8542.9 a	8651.6 A	28.83 a	28.43 a	28.63 A
280	8027.8 b	8205.6 ab	8116.7 B	26.20 bc	21.80 de	24.00 D
320	7973.8 b	7804.8 b	7889.3 B	20.37 f	19.73 e	20.05 F
LSD	588.3	544.7	385.2	0.85	2.26	1.16

Kaynak: Öktem, Ağaçkesen & ktem (2025)

Öktem, Ağaçkesen & ktem (2025 b:1), şanlıurfa ikinci ürün koşullarında yavaş salınımlı azotlu gübrenin cin mısırdaki verim ve bazı verim unsurlarına etkisini amacıyla bir çalışma yrtmışlardır. Araştırmada R-997 cin mısırdaki ile NBPT inhibitörlü yavaş salınımlı üre gübresini materyal olarak kullanmışlardır. Azotlu gübre dozları 0 kg da⁻¹ N (azotlu gübre verilmemiş), 4 kg da⁻¹ yavaş

salınlımlı azotlu gübre (YSA), 8 kg da⁻¹ YSA, 12 kg da⁻¹ YSA, 16 kg da⁻¹ YSA, 20 kg da⁻¹ YSA, 24 kg da⁻¹ YSA, 28 kg da⁻¹ YSA, 32 kg da⁻¹ YSA olarak belirlemişlerdir. Varyans analiz sonuçlarına göre tane veriminin, patlama hacminin, protein içeriğinin, bin tane ağırlığının, koçan uzunluğu ve koçan çapının istatistiki olarak önemli olduğunu, 240 kg ha⁻¹ dozdan en yüksek verim alındığını belirtmişlerdir (Tablo 1).

Toprağın organik madde içeriğini arttırmak, çevreyi ve toprağı korumak için çeşitli organik gübreler de kullanılmaktadır. Kullanılan bu organik materyaller bitkisel özellikleri, tane verimini ve kaliteyi etkilemekte, çeşide, iklim ve toprak koşullarına göre önerilerde bulunabilmektedir (Resim 2). Bu amaçla bölgede yapılan çeşitli araştırmalardan, farklı sonuçlar elde edilmiştir.

Cihangir ve Öktem (2015:69), çalışmalarında 16 farklı besin kaynağının (sığır gübresi, sığır gübresi + humik asit, tavuk gübresi, tavuk gübresi + humik asit, at gübresi, at gübresi + humik asit, koyun gübresi, koyun gübresi + humik asit, torf, torf + humik asit, kompost, kompost + humik asit, solucan gübresi, deniz yosunu gübresi + sığır gübresi, güvercin gübresi, geleneksel) ikinci ürün olarak yetiştirilen tatlı mısırın taze koçan verimine olan etkisini araştırmışlardır. En yüksek taze koçan verimini sırasıyla; deniz yosunu + sığır gübresi (1346.02 kg da⁻¹) ve güvercin gübresi (1267.55 kg da⁻¹), torf (1266.15 kg da⁻¹) uygulamalarından elde etmişlerdir. Dekardan en fazla net kar sağlayan uygulama 2010 yılında at gübresi (2270.26 TL da⁻¹), 2011 yılında ise sığır gübresi + humik asit (5364.84 TL da⁻¹) uygulamalarından elde edildiği, organik ürün fiyatının yüksek olması nedeniyle organik materyallerin geleneksel üretimden daha kârlı bulunduğu açıklanmıştır.

Öktem ve Öktem (2020:35), Şanlıurfa ekolojik koşullarında patlak mısıra farklı miktarlarda ahır gübresini kontrol, 1 ton da⁻¹, 2 ton da⁻¹, 3 ton da⁻¹, 4 ton da⁻¹, 5 ton da⁻¹ ve 6 ton da⁻¹ olarak ekim öncesi toprağı karıştırarak uygulamışlardır. Araştırma sonucunda, bitki boyu, sap kalınlığı, patlama hacmi ve protein oranının ahır gübresi uygulamalarından pozitif etkilendiğini ve en uygun ahır gübresi dozunun 4 ton da⁻¹ olduğunu açıklamışlardır.

Resim 2. Organik materyallerin kullanımı mısırdaki verim ve kaliteyi artırmaktadır.



Tavuk gübresinin verim ve kaliteyi artırdığı, içeriğinde bulunan potasyumun %75, azotun %65 ve fosforun %50'lik kısmından bitki ilk yılda yararlanabilmektedir (Aydeniz ve Brohi, 1991:880). Ekinci ve Öktem (2024:1), Atıdışı mısırdaki azot dozu ve tavuk gübresi uygulamalarının koçan ve taneye etkilerini belirlemek amacıyla Şanlıurfa'da 2. ürün koşullarında yürüttükleri çalışmada, tavuk gübresi TG0: 0(tavuk gübresi verilmemiş), TG1: 100 kg da⁻¹, TG2: 150 kg da⁻¹, TG3: 200 kg da⁻¹, TG4: 250 kg da⁻¹ olarak belirlemişlerdir. Azot gübresi (N) dozlarını ise N1:10 kg da⁻¹, N2: 20 kg da⁻¹ ve N3:30 kg da⁻¹ azot olacak şekilde düzenlemişlerdir. Araştırmada, protein oranı, tanede yağ oranı, bin tane ağırlığı, hektolitreye ağırlığı, koçanda tane ağırlığı, koçanda tane sayısı, koçan çapı ve koçan uzunluğu değerlerini incelemişlerdir. Sonuç olarak, mısır bitkisine farklı oranlarda uygulanan azot dozu ve tavuk gübresi uygulamalarının koçan, kalite ve tane özelliklerine olumlu etkide bulunduğunu açıklamışlardır.

Yahlizade ve Öktem (2025:143); azot ve solucan gübresi uygulamalarının at dişi mısırdaki verim ve bazı verim özelliklerine

etkisini incelemek amacıyla, Şanlıurfa koşullarında yürüttükleri çalışmada SY Prosperic at dişi mısır çeşidinde azot (N) ve solucan gübresi (SG) uygulamalarının verim ve verim unsurlarına etkisini araştırmışlardır. Ana parselleri azotlu gübre dozları, alt parselleri ise solucan gübresi dozlarının oluşturulduğu çalışmada azotlu gübre dozlarını 15 kg da⁻¹ (N1), 20 kg da⁻¹ (N2), ve 25 kg da⁻¹ (N3), solucan gübresi dozlarını ise 0 (SG 0), 250 (SG1), 300 (SG2), 350 (SG3), 400 (SG4) kg da olarak belirlemişlerdir. Çalışmalarında; bitki boyu, bitki sap kalınlığı, bin tane ağırlığı, koçanda tane sayısı, tane verimi ve tanede protein oranı değerleri incelemişlerdir. Farklı dozlarda uygulanan azot ve solucan gübrelere mısır bitkisinde verim ve kalite unsurları üzerine olumlu etkilerinin olduğunu gözlemlemişlerdir. Şanlıurfa koşullarında SY Prosperic at dişi mısır çeşidi için 400 kg da⁻¹ solucan gübresi ile birlikte verilen 15 kg da⁻¹ N uygulamasını önermişlerdir.

Özel (2019:46), Şanlıurfa koşullarında en uygun solucan gübresi dozunun 750 kg da⁻¹ olduğunu bildirmiştir (Resim 3).

Resim 3. Solucan gübresinin toprağa uygulanması



Kaynak: Özel (2019).

Mısır bitkisinde verim ve kalitede önemli bir unsur toprağın organik madde içeriğidir. Topraktaki organik maddenin temel kaynağının humus olduğu, humik asitin ise humusun en aktif maddesi olduğu açıklanmıştır (Kaçar ve Katkat, 2011: 678). Bu bağlamda, Harran Ovası koşullarında ikinci ürün olarak yetiştirilen atdışi mısıra humik asit uygulamalarının verim ve verim unsurları üzerine etkisini belirlemek amacıyla yürütölen bir çalışmada 0 (kontrol), 100, 200, 300, 400, 500, 600, 700, 800, 900, 1000 ve 1200 ml HA da⁻¹ düzeylerinde ekim öncesi toprağa karıştırılmıştır.

Araştırma sonucunda, bitkide yaprak sayısının arttığı, koçan kalınlığı, koçanda tane ağırlığı, bin tane ağırlığı ve tane verimi değeriğerlerinin kontrol uygulamasından itibaren arttığı, 700 ml HA da⁻¹ uygulamasında en yüksek değere ulaşıldı açıklanmıştır. (Öktem, Çelik, & Öktem 2017:268) .

Deniz yosunu da mısır bitkisinde sıklıkla kullanılmış, özellikle biostimölant etkisinden dolayı olumlu sonuçlar alınmıştır. Bilindiğı gibi biostimölantlar Şanlıurfa gibi yetiştirme periyodundaki yüksek sıcaklık stresine karşı dayanıklılığı arttırmaktadır. Öktem ve Ağaçkesen (2025), Şanlıurfa koşullarında at dişi mısır bitkisine farklı miktarlardaki deniz yosunun bazı bitkisel ve koçan özelliklerini belirlemek amacıyla yaptıkları çalışmadan deniz yosunu miktarları kontrol, 100 ml da⁻¹, 400 ml da⁻¹, 600 ml da⁻¹ ve 800 ml da⁻¹ olarak belirlemişlerdir. Deniz yosununu bitkiler 6-8 yapraklı iken ve ilk uygulamadan 20 gün sonra da yapraktan ikinci uygulamayı yapmışlardır. Bitki yaş ağırlığı, bitki boyu, sap kalınlığı, koçan ağırlığı, sap ağırlığı, bitki kuru ağırlığı, yaprak/sap oranı, yaprak sayısı, tepe püskölü çiçeklenme süresi değeriğerlerini incelemiş deniz yosunun incelenen özelliklerde kontrol parseline göre olumlu etkisinin bulunduğunu saptamışlardır. Araştırma sonucuna göre, Şanlıurfa ikinci ürün yetiştirme koşullarında, mısır bitkisine deniz yosunu uygulamalarının önerilebileceğini açıklamışlardır.

Diğer bir organik gübre ise, diğer organik materyallerden farklı değeriğerlendirilmesi gereken yarasa gübresidir. İnek, tavuk, koyun vb. gübreler ne kadar doğal olsa da kullandıkları yemler, kimyasal gübrelerin kullanıldığı tarımdan elde edilmiştir. Oysa

yarasalar doğal ortamdaki böcek ve meyveleri yiyerek beslendikleri için bu gübre tamamen doğal bir yapıdadır.

Şanlıurfa ikinci ürün koşullarında yarasa gübresinin mısır bitkisinde verim ve verim unsurlarına etkisinin incelendiği bir çalışmada uygulama yöntemlerine göre farklı sonuçlar elde edilmiştir. Özkan ve Öktem (2025:53), SY Atomic ve Pioneer PR32T83 mısır çeşitlerine yarasa gübresini 5 farklı şekilde uygulamışlardır. Deneme konularını kontrol, topraktan sıvı (1 lt da^{-1}), topraktan katı (50 kg da^{-1}), yapraktan sıvı (3 kez 500 cc da^{-1}), topraktan katı (50 kg da^{-1}) + yapraktan sıvı (3 kez 500 cc da^{-1}), topraktan sıvı (1 lt da^{-1}) + yapraktan sıvı (3 kez 500 cc da^{-1}) olarak belirlemişlerdir. Bölünmüş parseller deneme desenine göre kurdukları denemede ana parselleri çeşitler, alt parselleri ise yarasa gübresi uygulamalarından oluşturmuşlardır. Araştırma sonucunda çeşit ortalamalarına göre, en yüksek tane veriminin yarasa gübresinin topraktan katı ($1588.59 \text{ kg da}^{-1}$), topraktan sıvı ($1557.66 \text{ kg da}^{-1}$), topraktan sıvı + yapraktan sıvı ($1586.15 \text{ kg da}^{-1}$), yapraktan sıvı ($1436.63 \text{ kg da}^{-1}$) uygulamalarından elde ettiklerini, kontrol parselinin ise (1203 kg da^{-1}) en düşük verimi verdiğini açıklamışlardır.

Kaynakça/References

Ahmad, S., Khan, A. A., Kamran, M., Ahmad, I., Ali, S. & Fahad, S. (2018). Response of maize cultivars to various nitrogen levels. *European Journal of Experimental Biology*, 8 (1-2): 1-4.

Anonim (2025). Toros Tarım <https://www.toros.com.tr/tr/gubre-faaliyetleri> (12.12.2025).

Aydeniz, A. & Brohi, A. (1991). Gübreler ve Gübreleme. Cumhuriyet Üniversitesi, Tokat Ziraat Fakültesi Yayınları No:10, Ders Kitabı No:3, Tokat.

Cengizer, Z. & Öktem, A.G. (2023). Farklı dozlarda ve farklı dönemlerde uygulanan yavaş salınlımlı azotlu gübrenin atdışı mısırdı (*Zea mays* L. var. *indentata*) verim ve verim unsurlarına etkisi. *MAS Journal of Applied Sciences*, 8(3), 438-450.

Boztepe, A. (2022). Harran Ovası koşullarında tatlı mısırdı (*Zea mays* L. *Saccharata* Sturt.) farklı azot dozlarının ve sıra üzeri mesafelerinin verim ve verim özellikleri üzerine etkisi. Harran Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi

Cihangir, H. & Öktem, A. (2015). Diyarbakır koşullarında farklı organik bitki besleme uygulamalarının tatlı mısır bitkisinin (*Zea mays* L. *saccharata* Sturt) taze koçan verimi üzerine etkisi. *Uludağ Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, 29(2), 69-81.

El-Hosary, A.A., Hammam, G.Y., El-Gedwy, E.S.M., El-Hosary, A.A.A. & Sidi, M.E. (2019). Response of white maize hybrids to various nitrogen fertilizer rates in Qalyubia, Egypt. *Bioscience Research*, 16(3): 2475-2485.

Ekinci, E. & Öktem, A. G. (2024). Farklı miktarlardaki azot ve tavuk gübresi uygulamalarının atdışı mısırın (*Zea mays* L. *indentata*) koçan ve tane özellikleri ile kaliteye etkileri. *Nevşehir Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 13(1), 1-17.

Kaçar, B. & Katkat, V. (2011). Bitki Besleme. Nobel Yayınevi, Ankara.

Öktem, A. & Ülger, A. C. (1998). Harran ovası koşullarında 10 mısır (*Zea mays* L.) genotipinin fosfor kullanımının belirlenmesi. *Harran Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, 2(4), 71-80.

Öktem, A. (2008). Effect of nitrogen on fresh ear yield and kernel protein content of sweet corn (*Zea mays* L. *saccharata*) under upper Mesopotamia region of Turkey. *Indian Journal of Agricultural Sciences*, 78(1), 50.

Öktem, A., Öktem, A.G. & Emeklier Y. (2010). Effect of nitrogen on yield and some quality parameters of sweet corn. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 41:832-847.

Öktem, A., Çelik, A. & Öktem, A. G. (2017). Toprağa humik asit uygulamasının mısır bitkisinin (*Zea mays* L. *indendata*) verim ve bazı verim karakterleri üzerine etkisi. *KSÜ Doğa Bilimleri Dergisi*, 20, 268-272.

Öktem, A.G. & Öktem, A. (2020). Effect of farmyard manure application on yield and some quality characteristics of popcorn (*Zea mays* L. *everta* Sturt) at the organic farming. *Journal of Agriculture and Ecology Research International*, 21(9), 35-42.

Öktem, A.G., Ağaçkesen, M.N. & Öktem, A. (2025 a). Yavaş Salımlı Azotlu Gübrenin Cin Mısırdaki (*Zea mays* L. *everta*) Bazı Bitkisel ve Koçan Özelliklerine Etkisi. *Euroasia Matematik, Mühendislik, Doğa ve Tıp Bilimleri Dergisi Medical Sciences*, 12(3), 537-547.

Öktem, A. G., Ağaçkesen, M. N. & Öktem, A. (2025 b). Effect of Slow-Release Nitrogen Fertilizer with NBPT Inhibitor on Popcorn (*Zea mays* L. *everta*) Yield and Quality. *Turkish Journal of Field Crops*, 30(1), 1-10.

Öktem, A.G. & Ağaçkesen, M.N. (2025). İkinci ürün mısır bitkisine farklı miktarlardaki deniz yosunu uygulamalarının bazı bitkisel ve koçan özelliklerine etkisi. *Meetcon- Work Uluslararası Gıda Tarım ve Veteriner Bilimleri Kongresi*, 14-16 Aralık, Şanlıurfa/Türkiye (basımda).

Özel, M.R. (2019). Farklı düzeylerdeki organik solucan gübresinin atdışı mısırın (*Zea mays* L. *indentata*) verim ve verim unsurlarına etkisi. Harran Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek lisans tezi.

Özkan, G. A. & Öktem, A. G. (2025). Farklı yarası gübresi uygulama yöntemlerinin atdışı mısırın (*Zea mays* L. *indentata*) verim ve verim unsurlarına etkisi. *Mustafa Kemal Üniversitesi Tarım Bilimleri Dergisi*, 30(2), 534-546.

Saraçoğlu, M. & Öktem, A. (2021). The effect of nitrogen application in different doses by fertigation method on grain yield, yield components and quality of corn (*Zea mays* L.). *Applied Ecology & Environmental Research*, 19(6), 5017-5031

Tüik (2025). Türkiye İstatistik Kurumu <https://www.tuik.gov.tr/> (Erişim Tarihi:21.12.2025)

Yahlizade, Z. B. & Öktem, A. G.(2025). Farklı dozlarda azot ve solucan gübresi uygulamalarının at dişi mısır (*Zea mays* L. *Indentata*) üzerinde verim ve verim unsurlarına etkisi. *Erciyes Tarım ve Hayvan Bilimleri Dergisi*, (Advanced Online Publication), 143-151.

Zelege, A., Alemayehu, G. & Yihenew, G.S. (2018). Effects of planting density and nitrogen fertilizer rate on yield and yield related traits of maize (*Zea mays* L.) in Northwestern, Ethiopia. *Advances in Crop Science and Technology*, 6 (2): 1 -5.

BÖLÜM 5

ARPA ISLAHINDA VERİM İSTİKRARI, STRES TOLERANSI VE HASTALIK DİRENCİNE ENTEĞRE YAKLAŞIMLAR

İLKER YÜCE ¹

Giriş

Arpa (*Hordeum vulgare* L.), kültüre alınan en eski tahıl türlerinden biridir ve geniş çevresel uyum kabiliyeti ve çeşitli kullanım alanları nedeniyle küresel tarımda stratejik bir rol oynamaya devam etmektedir. Ilıman, Akdeniz ve yarı kurak bölgelerde yetiştirilen arpa, hayvan yemi, insan beslenmesi, malt ve bira endüstrileri ile diyet lifi, özellikle β -glukan açısından zengin sağlık odaklı gıda ürünleri için önemli bir hammadde olarak kullanılmaktadır (Jayakodi & ark., 2024:8; Panahi & Khalilpour Shadbad, 2024:22). Kullanım alanlarının geniş olması, arpa yetiştiriciliğini verimlilik, kalite ve sürdürülebilirliğin kesişim noktasına yerleştirir.

Geleneksel arpa ıslah programları tarihsel olarak tane verimi için fenotipik seleksiyonla yürütölmüş ve bu da yirminci yüzyılda önemli genetik kazanımlara yol açmıştır. Ancak, verim odaklı

¹ Arş. Gör. Dr., Sivas Bilim ve Teknoloji Üniversitesi, Tarla Bitkileri Bölümü, Orcid: 0000-0002-9761-3561

seleksiyonun tek başına mevcut ve öngörülen tarım koşulları altında yetersiz olduğu kanıtlanmıştır. İklim değişikliği, kuraklık, tuzluluk ve don gibi abiyotik stresleri yoğunlaştırırken, aynı zamanda hızla evrimleşen patojenlerin neden olduğu biyotik streslerin sıklığını ve şiddetini de artırmıştır (Slawin, Ajayi & Mahalingam, 2024:18; Borrego-Benjumea & ark., 2021:24). Bu biyotik ve abiyotik stres koşulları, ıslah önceliklerini temelden yeniden şekillendirerek, odak noktasını tek özellikli iyileştirmeden çok özellikli optimizasyona kaydırmıştır.

Tane verimi, arpa ıslahında merkezi hedef olmaya devam etmekle birlikte, artık çok sayıda küçük etkili lokus ve güçlü genotip $\times$ çevre ($G \times E$) etkileşimlerinden etkilenen karmaşık bir niceliksel özellik olarak kabul edilmektedir (Du & ark., 2024:20; Åstrand & ark., 2024:13). Sonuç olarak, verim iyileştirme stratejileri, tek lokasyonda maksimum performans yerine, farklı çevre koşullarında verim istikrarını giderek daha fazla vurgulamaktadır. Farklı lokasyonlarda arazi denemeleri, istikrar analizleri ve genomik tahmin yaklaşımları, bu karmaşıklığı yakalamak ve uzun vadeli genetik çeşitliliği sürdürmek için vazgeçilmez araçlar haline gelmiştir (Raffo & ark., 2025:16).

Verim ve istikrarla yakından ilişkili olan fenolojik özellikler, özellikle çiçeklenme zamanı ve olgunlaşma süresi, çevresel adaptasyonda belirleyici bir rol oynamaktadır. Gelişim sürecinin planlanması, arpa genotiplerinin son kuraklıktan kaçınmasını, don hasarının önlenmesini ve tane dolumunu uygun iklim koşullarıyla senkronize etmesini sağlar. Son zamanlarda yapılan genom çapında ilişki çalışmaları ve çok ebeveynli popülasyonlar, çiçeklenme zamanı ve ilgili adaptif özelliklerin altında yatan geniş allel çeşitliliğini ortaya çıkarmış ve zıt agroekolojik koşullar altında hedefe yönelik ıslah için değerli fırsatlar sunmuştur (Dang & ark., 2022:16; Cosenza & ark., 2024:17).

Buna paralel olarak, abiyotik stres toleransı ikincil bir özellik olmaktan çıkıp birincil ıslah kriteri haline gelmiştir. Kuraklık toleransı, önemli gelişim aşamalarında su mevcudiyetinin verim potansiyelini büyük ölçüde sınırladığı yağmurla bağımlı sistemlerde özellikle kritiktir (Song & ark., 2024:13). Benzer şekilde, tuzluluk, soğuk stresi ve aşırı yağış hem sulanan hem de marjinal ortamlarda arpa üretimini giderek daha fazla kısıtlamakta ve strese dayanıklı genotiplerin tanımlanmasını ve kullanılmasını gerekli kılmaktadır (Chen & ark., 2025:17; Rastogi, Mankar & Septiningsih, 2025:19). Fizyolojik fenotipleme, transkriptomik ve genom çapında haritalama alanındaki ilerlemeler, stres toleransı mekanizmalarının incelenmesini ve bunların ıslah süreçlerine entegre edilmesini kolaylaştırmıştır.

Hastalık direnci, modern arpa ıslahının bir başka vazgeçilmez bileşenidir. Külleme, pas, ağ lekesi, yaprak lekesi ve başak yanıklığı gibi başlıca yaprak ve başak hastalıkları, dünya çapında önemli verim ve kalite kayıplarına neden olmaya devam etmektedir. Patojen popülasyonlarının hızlı evrimi, tek bir ana direnç geninin dayanıklılığını azaltmış ve genom çapında ilişki haritalama ve genomik seleksiyon ile desteklenen poligenik direnç ve direnç gen piramidine doğru bir geçişe yol açmıştır (Guo & ark., 2024:11; Sallam & ark., 2024:24).

Son olarak, tane kalitesi özellikleri arpa çeşitlerinin ekonomik değerini ve son kullanım uygunluğunu belirler. Maltlama kalitesi parametreleri, tane protein bileşimi ve β -glukan içeriği, bira, gıda ve yem sektörlerine hizmet eden ıslah programlarının temel hedefleridir (Leišová-Svobodová & ark., 2024:9; Wan & ark., 2025:15). Verim ve kalite arasında optimum dengeyi sağlamak, arpa ıslahının en zorlu yönlerinden biri olmaya devam etmekte ve bütünleştirici ıslah stratejilerinin gerekliliğini pekiştirmektedir.

Temel Islah Hedefleri Olarak Tane Verimi ve Verim İstikrarı

Tane Verimi

Tane verimi, dünya çapında arpa ıslah programlarının birincil hedefi olmaya devam etmektedir. Ancak, karmaşık kantitatif kalıtım ve güçlü çevresel bağımlılık nedeniyle genetik iyileştirilmesi doğası gereği zordur. Verim, her biri küçük etkilere sahip çok sayıda lokus tarafından yönetilen, kardeş sayısı, başakta tane sayısı ve bin tane ağırlığı gibi çok sayıda verim bileşeninin etkileşimi sonucu ortaya çıkan bir özelliktir (Du & ark., 2024:20; Pham & ark., 2024:16). Sonuç olarak, yalnızca verim için fenotipik seleksiyon, özellikle heterojen ve strese yatkın ortamlarda, genellikle yavaş ve istikrarsız genetik kazanımlara yol açar.

Son zamanlarda yapılan genom çapında ilişki çalışmaları (GWAS) ve meta-QTL analizleri, arpada verimin genetik yapısının anlaşılmasını önemli ölçüde genişletmiştir. Birden fazla popülasyon ve ortamdan gelen verileri entegre eden meta-analitik yaklaşımlar, arpa genomu boyunca dağılmış yüzlerce QTL'yi tanımlamış ve verimin birkaç ana lokustan ziyade, oldukça dağınık ve eklemeli bir genetik sistem tarafından kontrol edildiğini doğrulamıştır (Du & ark., 2024:20; Genievskaaya, Abugalieva & Turuspekoy, 2025:19). Bu bulgular, kümülatif küçük etkili varyasyonu yakalayabilen genom çapında ıslah stratejilerinin gerekliliğini vurgulamaktadır.

Genotip × Çevre Etkileşimi ve Seleksiyona Etkisi

Arpada tane veriminin belirleyici özelliklerinden biri, genellikle farklı yerlerde ve yıllarda genotiplerin önemli ölçüde yeniden sıralanmasına neden olan genotip × çevre (G×E) etkileşiminin büyüklüğüdür. Sıcaklık rejimleri, yağış düzenleri, toprak verimliliği ve yönetim yoğunluğundaki çevresel değişkenlik, verim ifadesini güçlü bir şekilde modüle edebilir ve böylece sınırlı sayıda ortamda yapılan seleksiyonun etkinliğini azaltabilir (Åstrand & ark., 2024:13).

Birçok çoklu çevre çalışması, optimal ortamlarda üstün performans gösteren genotiplerin, marjinal veya stres koşullarında sıklıkla zayıf adaptasyon yeteneği sergilediğini göstermiştir (Debela & ark., 2025:22). Bu istikrarsızlık, elverişli ortamlarda maksimum verim için seçimden, çeşitli agroekolojik bölgelerde kabul edilebilir performans istikrarı ile yüksek ortalama verimi birleştiren genotiplerin belirlenmesine doğru bir değişikliğe yol açmıştır. Sonuç olarak, verim istikrarı, verim potansiyeli kadar önemli bir ıslah hedefi olarak ortaya çıkmıştır.

Verim İstikrarı

Verim istikrarı, bir genotipin, zıt iklim ve toprak koşullarına sahip ortamlarda tutarlı performansını sürdürme kapasitesini ifade etmektedir. Kararlılık odaklı seleksiyon, genellikle yıllık değişkenliğin yüksek olduğu yağmura bağımlı ve düşük girdi sistemlerinde yetiştirilen arpa için özellikle önemlidir (Åstrand & ark., 2024:13; Slawin, Ajayi & Mahalingam, 2024:18). Çoklu ortam denemelerine dayanan kararlılık analizleri, kararlı genotiplerin genellikle orta düzeyde verim potansiyeline sahip olduğunu, ancak üstün adaptasyon kabiliyetine sahip olduğunu ortaya koymuş ve duyarlılık ile sağlamlık arasındaki dengeyi vurgulamıştır.

Islah açısından, verim istikrarı fenoloji, kök mimarisi, stres toleransı ve besin kullanım verimliliği gibi adaptif özelliklerle yakından bağlantılıdır. Verim istikrarı ölçütlerini fizyolojik ve agronomik özelliklerle entegre eden çalışmalar, istikrarlı genotiplerin genellikle aşırı özellik değerlerinden ziyade optimize edilmiş gelişim zamanlaması ve gelişmiş stres direnci sergilediğini göstermiştir (Du & ark., 2024:20; Song & ark., 2024:13).

Verim ve İstikrarın İyileştirilmesi için Genomik Tahmin

Güçlü $G \times E$ etkileşimi altında geleneksel seleksiyonun sınırlamaları, arpa ıslahında genomik tahmin (GP) kullanımını hızlandırmıştır. Sınırlı sayıda lokusu hedefleyen marker destekli

seleksiyondan farklı olarak, GP, genom çapında marker bilgilerini kullanarak verim ve verim istikrarı gibi karmaşıık özellikler için bireylerin ıslah değerini tahmin etmektedir (Åstrand & ark., 2024:13). Bu yaklaşıım, poligenik özellikler için özellikle etkilidir ve erken nesillerde seleksiyona olanak tanıyarak ıslah döngüsünün süresini kısaltır.

Yazlık ve kışlık arpa ıslah programlarından elde edilen deneysel veriler, GP modellerinin, özellikle çoklu ortam veri kümeleri üzerinde eğitildiğinde, geleneksel fenotipik seleksiyondan daha iyi performans gösterebileceğini göstermektedir (Åstrand & ark., 2024:13; Raffo & ark., 2025:16). Ayrıca, G×E etkileşiminin ve çevresel kovaryansların tahmin modellerine dahil edilmesinin, zıt ortamlarda verim için tahmin doğruluğunu daha da artırdığı gösterilmiştir (Cammarano & ark., 2021:11).

Yüksek Verimli Fenotipleme ve Omik Verilerin Entegrasyonu

Yüksek verimli fenotipleme ve omik teknolojilerindeki son gelişmeler, verim odaklı ıslah stratejilerini daha da güçlendirmiştir. Metabolomik, yakın kızılötesi spektroskopi ve genomik verilerin entegrasyonu, verimle ilgili fizyolojik süreçler için dolaylı seleksiyonu mümkün kılmış ve hem verim hem de maltlama özellikleri için tahmin doğruluğunu artırmıştır (Raffo & ark., 2025:16). Bu tür bütünleştirici yaklaşıımlar, doğrudan verim ölçümünün çevresel faktörler nedeniyle karışabileceği stres koşullarında özellikle değerlidir.

Yüksek verimli fenotipleme ile genomik tahminin birleştirilmesi, ıslahçıların verimin altında yatan fizyolojik bileşenlere ayırmasına olanak tanıyarak daha bilinçli seleksiyon kararları alınmasını kolaylaştırır. Bu sistem düzeyindeki yaklaşıım, artan çevresel belirsizliğin karakterize ettiği iklim değişikliği senaryolarında genetik çeşitliliği sürdürmek için giderek daha önemli görülmektedir (Jayakodi & ark., 2024:8).

Fenoloji, Çiçeklenme Zamanı ve Çevresel Uyum

Arpa Islahında Fenolojinin Önemi

Fenolojik gelişim, özellikle çiçeklenme zamanı ve olgunlaşma süresi, arpada çevresel uyumun temel belirleyicisidir ve verim oluşumu ve istikrarını doğrudan etkiler. Çiçeklenme başlangıcı ve başaklanma zamanı, arpa bitkilerinin terminal kuraklık, tane dolumu sırasında sıcaklık stresi ve erken gelişim aşamalarında don hasarı gibi olumsuz çevre koşullarından kaçınma veya bunlara tolerans gösterme derecesini belirler (Dang & ark., 2022:16; Genievskaya & ark., 2024:22). Sonuç olarak, fenoloji, iklime dirençli arpa üretimi için en stratejik ıslah kriterlerinden biri olarak kabul edilmektedir.

Arpa, geniş bir enlem ve rakım aralığında yetiştirilmesini sağlayan olağanüstü bir fenolojik plastisite sergiler. Bu plastisite, birlikte gelişim hızını belirleyen vernalizasyon gereksinimi, fotoperiyot duyarlılığı ve erkencilikteki varyasyonlar sayesinde elde edilir (Cosenza & ark., 2024:17). Islah programları, bu çeşitliliği, belirli agroekolojik bölgelere uygun çeşitler geliştirmek için kullanır ve stresden kaçmak için erken olgunlaşmayı, biyokütle birikimi ve verim potansiyeli için daha uzun büyüme süresi ile dengeler (Åstrand & ark., 2024:13).

Çiçeklenme Zamanı ve Gelişim Özelliklerinin Genetik Kontrolü

Arpada çiçeklenme zamanı, başlıca adaptif lokuslar ve çok sayıda küçük etkili geni içeren karmaşık bir genetik ağ tarafından kontrol edilir. Genom çapında ilişki çalışmaları (GWAS) ve çok ebeveynli popülasyonlar, fenolojik özelliklerin altında yatan geniş allel çeşitliliğini ortaya çıkarmıştır (Dang & ark., 2022:16; Cosenza & ark., 2024:17). Bu çalışmalar, çiçeklenme zamanının oldukça

poligenik olduğunu ve çevresel koşullar tarafından güçlü bir şekilde modüle edildiğini göstermektedir.

Son zamanlarda yapılan çok lokuslu GWAS yaklaşımları, zıt vernalizasyon ve fotoperiyot rejimleri altında çiçeklenme zamanının genetik yapısını incelemede özellikle etkili olmuştur. Örneğin, Dang & ark. (2022:16), arpa MAGIC popülasyonunda başaklanma süresini kontrol eden yeni alleller tanımlayarak, nadir ve adaptif varyasyonları yakalamak için çok ebeveynli tasarımların değerini vurgulamıştır. Benzer şekilde, Genievskaya & ark. (2024:22), çiçeklenme zamanı, bitki boyu ve verim ile ilgili özellikleri ortaklaşa etkileyen QTL sıcak noktalarını bildirerek, fenolojik genlerin pleiotropik doğasını vurgulamıştır.

Epistatik etkileşimler, çiçeklenme zamanının kalıtımını daha da karmaşık hale getirir. Çünkü lokuslar arasındaki etkileşimler belirli çevresel bağlamlarda gelişim zamanlamasını önemli ölçüde değiştirebilir. Epistaz ve çevresel duyarlılığı inceleyen çalışmalar, fenolojik özelliklerin ifadesinin yalnızca tek lokus etkilerine dayalı olarak güvenilir bir şekilde tahmin edilemeyeceğini göstermiş ve genom çapında ıslah stratejilerinin gerekliliğini pekiştirmiştir (Afsharyan & ark., 2020:9).

Verim İstikrarı ve Stres Toleransında Fenoloji

Fenolojik gelişimin uygun çevresel pencerelerle uyumlu hale getirilmesi, arpanın verim istikrarını sağlamasının temel mekanizmasıdır. Erken çiçek açan genotipler, sezon sonundaki kuraklık ve sıcaklık stresinden kaçınabilir, ancak vejetatif büyümenin kısalması nedeniyle genellikle verim potansiyelinde azalma gösterir. Öte yandan, geç çiçek açan genotipler uygun koşullar altında daha yüksek verim elde edebilir, ancak terminal strese karşı daha savunmasızdır (Du & ark., 2024:20; Song & ark., 2024:13).

Bu faktörler, ıslah kararları için önemli sonuçlar doğurur. Kuraklığa eğilimli ortamlarda, erken başaklanma seleksiyonu verim istikrarının artmasıyla ilişkilendirilirken, yüksek girdi veya daha serin ortamlarda, uzamış büyüme süresi genellikle avantajlıdır (Slawin, Ajayi & Mahalingam, 2024:18). Bu zıt tepkiler, evrensel olarak erkenci veya geççi genotiplerden ziyade, ortama özgü fenolojik ideotiplerin önemini vurgulamaktadır.

Islahta Geniş ve Spesifik Adaptasyon

Fenolojik özellikler, bir arpa çeşidinin geniş mi yoksa spesifik mi adaptasyon sergilediğini belirlemede önemli bir rol oynamaktadır. Geniş adaptasyonlu genotipler genellikle orta düzeyde çiçeklenme süresine ve fenolojik plastisiteye sahiptir, bu da çeşitli ortamlarda istikrarlı performans sağlamaktadır (Åstrand & ark., 2024:13). Buna karşılık, spesifik adaptasyonlu çeşitler, kısa büyüme mevsimleri veya kuraklığa eğilimli bölgeler gibi dar tanımlı ortamlar için optimize edilmiştir ve bu ortamlarda verim elde etmek için kesin fenolojik zamanlama esastır.

Fenolojik özellikleri içeren genomik tahmin modelleri, farklı ortamlarda verim tahmininde gelişme göstermiş ve gelişimle ilgili özelliklerin seleksiyon endekslerine entegre edilmesinin değerini ortaya koymuştur (Raffo & ark., 2025:16). Bu yaklaşımlar, ıslahçıların çiçeklenme zamanı, verim potansiyeli ve strese dayanıklılık açısından optimal kombinasyonlara sahip genotipleri seçmelerine olanak tanıyarak hem adaptasyon kabiliyetini hem de genetik kazancı artırmaktadır.

Islahta Abiyotik Stres Toleransı

Arpa Üretiminde Başlıca Kısıtlayıcı Faktörler Olarak Abiyotik Stresler

Abiyotik stresler, dünya çapında arpa üretiminde en ciddi ve verimi sınırlayan faktörlerden bazılarıdır.

Çoğunlukla ılıman iklimlerde, yağmurla sulanan ve marjinal ortamlarda yetiştirilen bir tahıl olan arpa, tek başına veya kombinasyon halinde sık sık kuraklık, tuzluluk, soğuk ve don stresine maruz kalmaktadır (Slawin, Ajayi & Mahalingam, 2024:18; Borrego-Benjumea & ark., 2021:24). İklim değişikliği, bu streslerin sıklığını, süresini ve şiddetini artırarak verim istikrarı ve çeşitlerin adaptasyon kabiliyeti üzerindeki etkilerini güçlendirmiştir.

Biyotik streslerin aksine, abiyotik stresler genellikle güçlü uzamsal ve zamansal değişkenlik gösterir, bu da fenotipleme ve seçimi zorlaştırır. Sonuç olarak, abiyotik stres toleransı için ıslah, tek stres faktörlerini hedeflemekten, geniş ve plastik adaptif tepkilere sahip genotipler geliştirmeye doğru kaymıştır (Song & ark., 2024:13; Rastogi, Mankar & Septiningsih, 2025:19).

Kuraklık Stresi

Kuraklık stresi, özellikle Akdeniz, yarı kurak ve karasal iklimlerde arpa verimliliğini etkileyen en kritik abiyotik kısıtlama olarak kabul edilmektedir. Sürgün verme, başaklanma ve tane dolumu gibi önemli gelişim aşamalarında su eksikliği, biyokütle birikimi, başak verimliliği ve tane ağırlığı üzerindeki etkileriyle verimi önemli ölçüde azaltabilir (Song & ark., 2024:13; Habtegebriel & ark., 2025:11).

Genetik analizler, arpada kuraklık toleransının kök yapısı, ozmotik uyum, terleme verimliliği ve fenolojik kaçış mekanizmaları ile ilişkili çok sayıda lokus içeren oldukça poligenik bir özellik olduğunu ortaya koymuştur. Genom çapında yapılan ilişki çalışmaları hem fide hem de yetişkin bitki aşamalarında kuraklıkla ilişkili özelliklerle bağlantılı çok sayıda QTL'yi tanımlamış ve kuraklık tepkilerinin gelişim aşamasına özgü olduğunu vurgulamıştır (Slawin, Ajayi & Mahalingam, 2024:18; Badr & ark., 2025:14). Önemli olarak, birkaç çalışma kuraklık toleransı ve verim potansiyelinin mutlaka birbirine zıt özellikler olmadığını göstermiş

ve uygun seleksiyon stratejileriyle eşzamanlı iyileştirme fırsatları olduğunu ortaya koymuştur (Song & ark., 2024:13).

Tuzluluk Stresi

Tuzluluk stresi, uygun olmayan su yönetimi ve iklim değişikliği nedeniyle toprak tuzlanmasının şiddetlendiği sulanan ve kıyı bölgelerinde arpa yetiştiriciliği için giderek artan bir tehdit oluşturmaktadır. Arpa genellikle diğer tahıllara göre tuza daha dayanıklı olsa da ekili ve yabancı germplazmda tuzluluk toleransı açısından önemli genetik farklılıklar bulunmaktadır (Chen & ark., 2025:17).

Arpada tuzluluk toleransı, iyon homeostazı, ozmotik düzenleme ve stres sinyal yolları gibi karmaşık fizyolojik mekanizmaları içerir. Son zamanlarda yapılan karşılaştırmalı genomik ve transkriptomik çalışmalar, tuz stresi toleransına katkıda bulunan C₃HC₄ tipi çinko parmak proteinleri gibi aday gen ailelerini tanımlamıştır. Genom çapında haritalama yaklaşımları, tuzluluk toleransının çok sayıda küçük etkili lokus tarafından kontrol edildiğini ortaya koymuş ve tek gen yaklaşımları yerine genom çapında seçim stratejilerinin gerekliliğini vurgulamıştır (Chen & ark., 2025:17).

Soğuk ve Don Stresi

Soğuk ve don stresi, yüksek enlem, yüksek rakım ve karasal bölgelerde arpa yetiştiriciliğinin önündeki en büyük engellerden biridir. Erken gelişim aşamalarında düşük sıcaklık stresi fide oluşumunu bozabilirken, üreme aşamalarında meydana gelen don olayları tane oluşumunu ve verimi ciddi şekilde azaltabilir (Rastogi, Mankar & Septiningsih, 2025:19).

Genom çapında yapılan ilişki çalışmaları, soğuğa alışma, don toleransı ve stres sonrası iyileşme ile ilişkili lokusları belirlemiş ve arpada soğuk toleransının genetik karmaşıklığını vurgulamıştır

(Rastogi, Mankar & Septiningsih, 2025:19). Bu alışmalar, soğuk toleransının fenolojik özellikler ve gelişim zamanlaması ile yakından bağlantılı olduğunu göstererek, ıslah programlarında soğuk toleransının çiçeklenme zamanı ve büyüme alışkanlığı ile entegre edilmesinin önemini vurgulamaktadır.

Aşırı Su Stresi

Aşırı su stresi, düzensiz yağış düzenleri ve zayıf toprak drenajı nedeniyle arpa üretiminde giderek daha önemli bir kısıtlama olarak ortaya ıkmiştır. Aşırıyı suya maruz kalmış topraklardaki oksijen eksikliği, kök solunumunu, besin alımını ve genel bitki metabolizmasını bozar, bu da büyüme ve verimin azalmasına yol açmaktadır (Borrego-Benjumea & ark., 2021:24).

Genom çapında ilişki haritalama ve transkriptomik analizler, aşırı sulu koşullarda anaerobik metabolizma, aerenkima oluşumu ve hormonal düzenlemede rol oynayan aday lokusları ve genleri tanımlamıştır (Borrego-Benjumea & ark., 2021:24; Zhu & ark., 2024:14). Bu bulgular, özellikle yağış değişkenliğinin arttığı bölgeler için su basmasına toleranslı arpa eşitleri yetiştirmek için değerli hedefler sunmaktadır.

Çoklu Stres Toleransı için Bütünleştirici Islah Stratejileri

Doğal tarla ortamlarında, arpa bitkileri genellikle aynı anda veya sırayla birden fazla abiyotik strese maruz kalır. Bu nedenle, tekli stres toleransı için ıslah, daha geniş bir adaptasyon kapasitesi ile birleştirilmedike sınırlı faydalar sağlayabilir. Son zamanlarda yapılan çalışmalar, genomik araçlarla desteklenen birleşik bir ıslah erevesi içinde kuraklık, tuzluluk, soğuk ve aşırı su toleransını entegre etmenin önemini vurgulamaktadır (Slawin, Ajayi & Mahalingam, 2024:18; Jayakodi & ark., 2024:8).

Çoklu stres fenotipleme verilerini ve ortama özgü kovaryansları içeren genomik seleksiyon modelleri, karmaşık stres

toleransı özellikleri için seleksiyon verimliliğini artırma konusunda umut vaat etmektedir. Ayrıca, yerel türler ve yabancı arpa genotiplerinden elde edilen genetik çeşitliliğin kullanılması, stres direncini artırmak için kritik bir adaptif allel rezervuarı sağlamaktadır (Jayakodi & ark., 2024:8).

İslahta Hastalık Direnci

Arpa Geliştirmede Hastalık Direncinin Önemi

Hastalık direnci, çeşitli üretim ortamlarında mantar patojenlerinin neden olduğu önemli verim ve kalite kayıpları nedeniyle modern arpa yetiştiriciliğinin vazgeçilmez bir bileşenidir. Yaprak ve başak hastalıkları sadece tane verimini düşürmekle kalmaz, aynı zamanda tane kalitesini, maltlama performansını ve piyasa değerini de olumsuz etkiler (Kunze & ark., 2024:18; Sallam & ark., 2024:24). İklim koşullarının giderek değişken hale gelmesi, patojenlerin hayatta kalmasını, üremesini ve coğrafi yayılımını kolaylaştırarak hastalık baskısını daha da yoğunlaştırmış ve böylece hastalıklara direnç ıslahının önemini artırmıştır.

Tarihsel olarak, arpa ıslahı büyük ölçüde tek bir ana direnç genine dayanıyordu; ancak patojen popülasyonlarının hızlı evrimi, sıklıkla direnç kırılmalarına yol açmıştır. Bu sınırlama, dayanıklılığı artırmak için ıslah stratejilerini poligenik, kantitatif direnç ve direnç lokuslarının piramitlenmesine kaydırmıştır (Guo & ark., 2024:11; Noe & ark., 2025:13).

Külleme Direnci

Blumeria graminis f. sp. *hordei*'nin neden olduğu külleme, arpanın en yaygın ve ekonomik açıdan en önemli hastalıklarından biri olmaya devam etmektedir. Küllemeye direncin genetik temeli karmaşıktır ve hem ana direnç genlerini hem de kantitatif yetişkin bitki direncini içerir (Guo & ark., 2024:11).

Genom çapında ilişki çalışmaları, fide ve yetişkin bitki direnci ile ilişkili çok sayıda lokus tanımlamış ve kültür eşitleri ve yerel türlerin germplazmında önemli allel çeşitliliği olduğunu ortaya koymuştur (Guo & ark., 2024:11). Markr destekli seleksiyon, GWAS tabanlı seleksiyon ve genomik tahminin karşılaştırılmalı değerlendirmeleri, genomik tahminin, özellikle direnç, birçok küçük etkili lokus tarafından kontrol edildiğinde, kantitatif külleme direncini iyileştirmede üstün performans sağladığını göstermiştir (Noe & ark., 2025:13). Bu bulgular, genom çapında yaklaşımların rutin ışlah süreçlerine entegrasyonunu desteklemektedir.

Pas Hastalıkları: Arpa Yaprak Pası ve Sarı Pas

Arpa yaprak pası (*Puccinia hordei*) ve sarı pas (*Puccinia striiformis* f. *sp. hordei*), ılıman ve yüksek rakımlı bölgelerde arpa üretimi için büyük tehditlerdir. Bu hastalıklar, özellikle uygun nem ve sıcaklık koşullarında ciddi verim kayıplarına neden olabilir (Amouzoune & ark., 2024:14; Singh & ark., 2024:12).

Genom çapında ilişki haritalaması hem fide hem de yetişkin bitki aşamalarında etkili olan çoklu direnç lokuslarını ortaya çıkarmıştır, bu da dayanıklı pas direncinin genellikle poligenik olduğunu göstermektedir (Amouzoune & ark., 2024:14). Sarı pas direnci üzerine yapılan çalışmalar, geniş spektrumlu koruma sağlayabilecek nadir direnç allellerini yakalamak için coğrafi olarak çeşitli germplazmların önemini daha da vurgulamaktadır (Singh & ark., 2024:12). Bu tür allellerin seçkin ışlah materyaline entegrasyonu, uzun vadeli direncin korunması için kritik öneme sahiptir.

Ağsı Leke ve Arpa Yaprak Lekesi Hastalıkları

Pyrenophora teres'in neden olduğu ağsı leke ve *Rhynchosporium commune*'nin neden olduğu arpa yaprak lekesi, dünya çapında en yıkıcı arpa hastalıkları arasındadır. Her iki hastalık

da yüksek patojen değişkenliği gösterir, bu da dirençli ıslahı zorlaştırır (Ijaz & ark., 2024:9; Rehman & ark., 2025:23).

Son GWAS çalışmaları, ağsı leke ve arpa yaprak lekesine direnç için genellikle birkaç kromozomda dağılmış olan çoklu marker-özellik ilişkilerini tanımlamıştır (Ijaz & ark., 2024:9). İnce haritalama ve fonksiyonel analizler, arpa yaprak lekesine dirençle ilişkili reseptör benzeri kinaz ve reseptör benzeri protein genlerinin kümelerini ortaya çıkarmış ve direnç piramidinin hedeflenebileceği moleküler sıcak noktaları vurgulamıştır (Eckstein & ark., 2024:25). Bu sonuçlar, karmaşık direnç özelliklerini incelemek için genom çapında yaklaşımların değerini vurgulamaktadır.

Fusarium Başak Yanıklığı ve Mikotoksin Birikimi

Fusarium başak yanıklığı (FHB), deoksinivalenol gibi mikotoksinlerin birikimi yoluyla verim ve tahıl güvenliği üzerinde ikili etkisi nedeniyle özellikle zorlu bir hastalıktır. Arpada FHB'ye direnç oldukça kantitatif olup morfolojik, fenolojik ve fizyolojik özelliklerden etkilenir (Sallam & ark., 2024:24; Tucker & ark., 2024:20).

Birden fazla çalışmadan elde edilen verileri birleştiren meta analizler, FHB direncinin çok sayıda küçük etkili QTL tarafından yönetildiğini ve bunların çoğunun başaklanma tarihi ve bitki mimarisini de etkilediğini göstermiştir (Sallam & ark., 2024:24). Geleneksel ve yerli arpa çeşitlerinin değerlendirilmesi, modern kültür bitkilerinin direnç tabanını genişletmek için kullanılabilecek değerli kısmi direnç kaynaklarını ortaya çıkarmıştır (Tucker & ark., 2024:20).

Sonuç

Arpa (*Hordeum vulgare* L.) ıslahı, iklim değişikliği, artan çevresel değişkenlik ve sürdürülebilir tarım sistemlerine olan talebin artması nedeniyle köklü bir dönüşüm geçirmektedir. Bu bölümde

özetlenen kanıtlar, modern arpa ıslahının artık sadece verim maksimizasyonuna dayanamayacağını, aynı zamanda verim istikrarı, çevresel adaptasyon, abiyotik ve biyotik streslere tolerans, kaynak kullanım verimliliği ve son kullanım kalitesini de ele alması gerektiğini göstermektedir. Güçlü genotip $\times$ çevre etkileşimleriyle karakterize edilen üretim sistemlerinde, tek özellikli seleksiyon stratejilerinin yetersiz olduğu kanıtlanmış ve bu da çok özellikli, bütünleştirici ıslah çerçevelerinin gerekliliğini pekiştirmiştir. Hem poligenik hem de çevreye duyarlı özellikler olan tahıl verimi ve verim istikrarı, genom çapında ıslah stratejilerinin merkezi hedefleri haline gelmiştir. Genom çapında ilişki çalışmaları ve genomik tahminlerdeki ilerlemeler, çeşitli ortamlarda verim ve verim istikrarının altında yatan kümülatif küçük etkili lokusları yakalama yeteneğini önemli ölçüde geliştirmiştir.

Fenolojik özelliklerin, özellikle çiçeklenme zamanı ve olgunluğun önemli rolü, zıt agroekolojik koşullar altında çevresel adaptasyonu, stres önlemeyi ve verim direncini artırmak için gelişim zamanlamasını optimize etmenin önemini daha da vurgulamaktadır. Kuraklık, tuzluluk, soğuk ve su basmasına karşı direnç dahil olmak üzere abiyotik stres toleransı, ikincil bir husus olmaktan ziyade birincil bir ıslah hedefi olarak ortaya çıkmıştır. İncelenen çalışmalar, bu stres tepkilerinin karmaşık genetik yapılar tarafından kontrol edildiğini ve fenoloji, bitki yapısı ve fizyolojik plastisite ile yakından bağlantılı olduğunu göstermektedir. Benzer şekilde, tek bir ana gen yerine poligenik ve kantitatif dirence dayanan dayanıklı hastalık direnci, hızla evrimleşen patojen popülasyonları karşısında uzun vadeli üretkenliği ve istikrarı sağlamak için vazgeçilmez hale gelmiştir.

Yüksek verimli fenotipleme, çoklu omik entegrasyon ve pangenom tabanlı analizlerdeki son gelişmeler, ıslah döngülerini hızlandırmakta ve birden fazla karmaşık özelliğin eşzamanlı olarak iyileştirilmesini mümkün kılmaktadır. Sonuç olarak, çağdaş arpa

ıslahı, genomik araçları, çoklu çevre verilerini ve fizyolojik bilgileri entegre eden sistem tabanlı bir yaklaşım gerektirir. Böyle bir yaklaşım, küresel tarımda mevcut ve gelecekteki zorlukları karşılayabilecek, iklime dayanıklı, verimli ve yüksek kaliteli arpa genotiplerinin geliştirilmesi için sağlam bir temel sağlar.

Kaynakça

Afsharyan, N. P., Sannemann, W., Léon, J., & Ballvora, A. (2020). Effect of epistasis and environment on flowering time in barley reveals a novel flowering-delaying QTL allele. *Journal of Experimental Botany*, 71(3), 893-906.

Amouzoune, M., Rehman, S., Benkirane, R., Udupa, S., Mamidi, S., Kehel, Z., ... & Amri, A. (2024). Genome wide association study of seedling and adult plant leaf rust resistance in two subsets of barley genetic resources. *Scientific Reports*, 14(1), 15428.

Åstrand, J., Odilbekov, F., Vetukuri, R., Ceplitis, A., & Chawade, A. (2024). Leveraging genomic prediction to surpass current yield gains in spring barley. *Theoretical and Applied Genetics*, 137(12), 260.

Badr, A., El-Shazly, H. H., Mahdy, M., Schierenbeck, M., Helmi, R. Y., Börner, A., & Youssef, H. M. (2025). GWAS identifies novel loci linked to seedling growth traits in highly diverse barley population under drought stress. *Scientific Reports*, 15(1), 10085.

Debela, K. B., Yohannes, D. B., Beyene, T. M., & Bantte, K. (2025). Harnessing genotype-by-environment interaction and stability analysis of taro (*Colocasia esculenta* (L.) Schott) genotypes for resilient breeding and food security in Southwest Ethiopia. *BMC Plant Biology*, 25(1), 1562.

Borrego-Benjumea, A., Carter, A., Zhu, M., Tucker, J. R., Zhou, M., & Badea, A. (2021). Genome-wide association study of waterlogging tolerance in barley (*Hordeum vulgare* L.) under controlled field conditions. *Frontiers in plant science*, 12, 711654.

Cammarano, D., Ronga, D., Francia, E., Akar, T., Al-Yassin, A., Benbelkacem, A., ... & Pecchioni, N. (2021). Genetic and management effects on barley yield and phenology in the Mediterranean basin. *Frontiers in Plant Science*, 12, 655406.

Chen, K., Wang, S., Xu, X., Zheng, X., Wu, H., Huang, L., ... & Fu, L. (2025). Genome-Wide Identification, Characterization, and Comparison of C3HC4 Family Genes in Salt Tolerance Between Barley and Rice. *Plants*, 14(15), 2404.

Cosenza, F., Shrestha, A., Van Inghelandt, D., Casale, F. A., Wu, P. Y., Weisweiler, M., ... & Stich, B. (2024). Genetic mapping reveals new loci and alleles for flowering time and plant height using the double round-robin population of barley. *Journal of Experimental Botany*, 75(8), 2385-2402.

Dang, V. H., Hill, C. B., Zhang, X. Q., Angessa, T. T., McFawn, L. A., & Li, C. (2022). Multi-locus genome-wide association studies reveal novel alleles for flowering time under vernalisation and extended photoperiod in a barley MAGIC population. *Theoretical and Applied Genetics*, 135(9), 3087-3102.

Du, B., Wu, J., Wang, Q., Sun, C., Sun, G., Zhou, J., ... & Lu, B. (2024). Genome-wide screening of meta-QTL and candidate genes controlling yield and yield-related traits in barley (*Hordeum vulgare* L.). *Plos one*, 19(5), e0303751.

Eckstein, P. E., Griffith, L. J., Zhang, X. M., Turkington, T. K., Colin, M. G., Holden, S., ... & Beattie, A. D. (2024). An island of receptor-like genes at the Rrs13 locus on barley chromosome 6HS co-locate with three novel sources of scald resistance. *Theoretical and Applied Genetics*, 137(11), 249.

Genievskaya, Y., Chudinov, V., Abugalieva, S., & Turuspekoy, Y. (2024). Novel QTL hotspots for barley flowering time, plant architecture, and grain yield. *Agronomy*, 14(7), 1478.

Genievskaya, Y., Abugalieva, S., & Turuspekoy, Y. (2025). Identification of QTLs associated with grain yield-related traits of spring barley. *BMC Plant Biology*, 25(1), 1-19.

Guo, J., Zhao, C., Gupta, S., Platz, G., Snyman, L., & Zhou, M. (2024). Genome-wide association mapping for seedling and adult resistance to powdery mildew in barley. *Theoretical and applied genetics*, 137(3), 50.

Habtegebriel, M. H., Feyissa, T., Setotaw, T. A., & Melkie, Y. (2025). Screening of barley (*Hordeum vulgare* L.) for early seedling growth traits for drought tolerance under polyethylene glycol 6000. *Agrosystems, Geosciences & Environment*, 8(3), e70203.

Ijaz, U., Zhao, C., Shahbala, S., & Zhou, M. (2024). Genome-Wide association study for identification of marker-trait associations conferring resistance to scald from globally collected barley germplasm. *Phytopathology*®, 114(7), 1637-1645.

Jayakodi, M., Lu, Q., Pidon, H., Rabanus-Wallace, M. T., Bayer, M., Lux, T., ... & Stein, N. (2024). Structural variation in the pangenome of wild and domesticated barley. *Nature*, 636(8043), 654-662.

Kunze, K. H., Meints, B., Massman, C., Gutiérrez, L., Hayes, P. M., Smith, K. P., ... & Sorrells, M. E. (2024). Genome-wide association of an organic naked barley diversity panel identified quantitative trait loci for disease resistance. *The Plant Genome*, 17(4), e20530.

Leišová-Svobodová, L., Psota, V., Zavřelová, M., Kříž, M., Mařík, P., & Nesvadba, Z. (2024). Malting quality molecular markers for barley breeding. *Czech Journal of Genetics and Plant Breeding*, 60(2), 70-78.

Noe, S. M., Singh, P. K., Odilbekov, F., Johansson, E., & Chawade, A. (2025). Comparing wMAS, GWAS, and genomic prediction for selecting powdery mildew-resistant spring barley genotypes. *BMC genomics*, 26:1091.

Panahi, B., & Khalilpour Shadbad, R. (2024). Navigating the microalgal maze: a comprehensive review of recent advances and future perspectives in biological networks. *Planta*, 260(5), 114.

Pham, A. T., Maurer, A., Pillen, K., Nguyen, T. D., Taylor, J., Coventry, S., ... & March, T. J. (2024). A wild barley nested association mapping population shows a wide variation for yield-associated traits to be used for breeding in Australian environment. *Euphytica*, 220(2), 24.

Raffo, M. A., Sarup, P., Jensen, J., Guo, X., Jensen, J. D., Orabi, J., ... & Christensen, O. F. (2025). Genomic prediction for yield and malting traits in barley using metabolomic and near-infrared spectra. *Theoretical and Applied Genetics*, 138(1), 24.

Rastogi, K., Mankar, S. P., & Septiningsih, E. M. (2025). Genome-wide association study for traits related to cold tolerance and recovery during seedling stage in rice. *Crop Science*, 65(1), e70003.

Rehman, S., Al-Jaboobi, M., Verma, R. P. S., Sanchez Garcia, M., & Visioni, A. (2025). Genome-wide association mapping of net form net blotch resistance in barley at seedling and adult plant stages. *Frontiers in Agronomy*, 7, 1525588.

Sallam, A. H., Haas, M., Huang, Y., Tandukar, Z., Muehlbauer, G., Smith, K. P., & Steffenson, B. J. (2024). Meta-analysis of the genetics of resistance to Fusarium head blight and deoxynivalenol accumulation in barley and considerations for breeding. *Plant Breeding*, 143(1), 2-25.

Singh, D., Ziems, L., Chettri, M., Dracatos, P., Forrest, K., Bhavani, S., ... & Park, R. F. (2024). Genetic mapping of stripe rust resistance in a geographically diverse barley collection and selected biparental populations. *Frontiers in Plant Science*, 15, 1352402.

Slawin, C., Ajayi, O., & Mahalingam, R. (2024). Association mapping unravels the genetic basis for drought related traits in different developmental stages of barley. *Scientific Reports*, 14(1), 25121.

Song, R., Shi, P., Xiang, L., He, Y., Dong, Y., Miao, Y., & Qi, J. (2024). Evaluation of barley genotypes for drought adaptability: based on stress indices and comprehensive evaluation as criteria. *Frontiers in Plant Science*, 15, 1436872.

Tucker, J. R., Badea, A., Blackwell, B. A., MacEachern, D., & Mills, A. (2024). Bringing Barley Back: Analysis of Heritage Varieties for Use as Germplasm Sources to Improve Resistance against the Most Devastating, Contemporary Disease in Canada, Fusarium Head Blight (*Fusarium graminearum*). *Plants*, 13(6), 799.

Wan, G., Lu, Z., Ren, R., Zhang, D., Si, E., Yao, L., ... & Meng, Y. (2025). The Barley Glycosyltransferase Gene KOB1 Implicated in β -Glucan Biosynthesis by a Genome-Wide Association Study. *Plants*, 14(21), 3269.

Zhu, J., Yin, H., Cao, C., Sun, C., Zhang, M., Hong, Y., ... & Xu, R. (2024). Comparative Transcriptome Analyses Reveal the Mechanisms Underlying Waterlogging Tolerance in Barley. *Plants*, 14(1), 28.

BÖLÜM 6

İKLİM DEĞİŞİKLİĞİNİN TÜRKİYE’DE BAKLAGİL YEM BİTKİLERİ YETİŞTİRİCİLİĞİNE ETKİLERİ

1. HASAN KALE¹
2. UĞUR BAŞARAN²

Giriş

Dünyada nüfus artışına ilişkin öngörüler ve iklimsel değişimler gelecekte insanlığın ihtiyacı olana gıdanın üretiminde sorular yaşanabileceğine işaret etmektedir. Küresel nüfusun 2050 yılına kadar yaklaşık iki katına ulaşmasının beklendiği göz önüne alındığında, gıda arzının sürdürülebilirliği giderek daha büyük bir sorun haline gelmektedir (Rahut, Aryal, Manchanda, & Sonobe, 2022, s. 107-131). Diğer taraftan iklim krizi, iklim değişikliği ile mücadele kapsamında kimyasal kullanımına getirilmek istene kısıtlamalar, çevresel sorunlar ve yükselen girdi maliyeleri üretimin artırılmasını kısıtlamaktadır. Bu bağlamda baklagil bitkilerinin önemi daha da belirginleşmekte; özellikle azot bağlama kapasiteleri, çevresel koşullara katkıları ve biyolojik çeşitliliği desteklemeleri açısından kritik bir rol üstlenmektedirler (Dhaliwal, et al., 2020, s. 9615; Palmero, Fernandez, Garcia, & Haro, 2022, s. 126514). Bu özellikleri

¹ Dr. Öğr. Üyesi, Yozgat Bozok Üniversitesi, Ziraat Fakültesi Tarla Bitkileri Bölümü, Orcid: 0000-0003-4736-1498

² Prof. Dr. Yozgat Bozok Üniversitesi, Ziraat Fakültesi Tarla Bitkileri Bölümü,, Orcid: 0000-0002-6644-5892

onlara sürdürülebilir tarım uygulamaları açısından farklı bir önem kazandırmaktadır. Baklagiller toprak ve çevre üzerindeki olumlu etkileri yanında özellikle yüksek protein içerikleri ile insan ve hayvan beslenmesinde önemli bir boşluğu doldur (Semba, Ramsing, Rahman, Kraemer, & Bloem, 2021, s. 100520).

İklim değişikliği, son yüzyılda küresel tarımsal üretimi etkileyen en önemli çevresel sorunlardan biri haline gelmiştir. Atmosferdeki sera gazı konsantrasyonlarının artmasıyla birlikte küresel ortalama sıcaklıklar yükselmiş, yağış rejimleri değişmiş ve aşırı iklim olaylarının sıklığı ve şiddeti artmıştır. Hükümetler arası İklim Değişikliği Paneli (IPCC), bu değişimlerin tarımsal üretim sistemleri üzerinde doğrudan ve dolaylı etkiler oluşturduğunu vurgulamaktadır (IPCC, 2022).

Bu bölümün amacı, iklim değişikliğinin Türkiye’de baklagil yem bitkileri yetiştiriciliği üzerindeki mevcut ve potansiyel etkilerini bilimsel literatür ışığında ortaya koymak ve bu etkilerin tarımsal üretim sistemleri üzerindeki sonuçlarını değerlendirmektir. Bu kapsamda bölümde; Türkiye’de yaygın olarak yetiştirilen baklagil yem bitkilerinin ekolojik istekleri, sıcaklık ve yağış değişimlerine verdikleri tepkiler, kuraklık ve aşırı iklim olaylarının verim ve yem kalitesi üzerindeki etkileri ele alınmıştır.

İklim Değişikliğinin Tarım Üzerindeki Küresel Etkileri

Küresel ölçekte sıcaklık artışı, bitkilerin fenolojik gelişim süreçlerini önemli ölçüde etkilemektedir. Artan sıcaklıklar, özellikle tropikal ve yarı kurak bölgelerde ürünlerin büyüme süresini kısaltmakta, fotosentez kapasitesini sınırlandırmakta ve verim kayıplarına neden olmaktadır (Lobell & Gourdjı, 2012, s. 1686–1697). Bununla birlikte, yüksek enlemlerde sıcaklık artışı bazı ürünler için üretim potansiyelini artırabilse de, bu olumlu

etkinin çoğu bölgede sınırlı kaldığı bildirilmektedir (Porter, et al., 2014).

Yağış rejimlerinde meydana gelen değişimler, tarım üzerindeki iklim değişikliği etkilerinin bir diğer önemli boyutunu oluşturmaktadır. Kuraklık sıklığının artması, özellikle yağışa dayalı tarım yapılan bölgelerde ürün verimliliğini olumsuz etkilemektedir. FAO küresel tarım alanlarının yaklaşık %80'inin doğrudan yağışa bağlı olduğunu ve bu nedenle iklim değişikliğine karşı son derece hassas olduğunu belirtmektedir (FAO, 2020). Aşırı yağışlar ise toprak erozyonu, besin maddesi kayıpları ve bitki kök bölgesinde oksijen yetersizliği gibi sorunlara yol açmaktadır.

İklim değişikliği aynı zamanda tarımsal üretimde hastalık, zararlı ve yabancı ot dinamiklerini de değiştirmektedir. Artan sıcaklıklar ve değişen nem koşulları, birçok zararlı ve patojenin coğrafi yayılım alanını genişletmekte, yeni türlerin farklı ekosistemlere yerleşmesine olanak tanımaktadır (Deutsch, et al., 2018, s. 916-919). Bu durum, tarımsal üretimde kimyasal mücadele ihtiyacını artırarak ekonomik maliyetleri yükseltmekte ve çevresel riskleri beraberinde getirmektedir.

Su kaynakları üzerindeki baskının artması, iklim değişikliğinin tarım üzerindeki dolaylı etkilerinden biridir. Tarımsal sulama, küresel tatlı su kullanımının yaklaşık %70'ini oluşturmakta olup, artan sıcaklıklar ve azalan su kaynakları sulama suyu teminini zorlaştırmaktadır (FAO, 2020). Bu durum, özellikle suya duyarlı ürünlerin yetiştirildiği bölgelerde üretim sürdürülebilirliğini tehdit etmektedir.

İklimsel sorunlar yem bitkileri ekiminde de önemli sorunlara verim kayıplarına hasat harman ve depolama gibi alanlarda güçlüklerin oluşmasına neden olabilmektedir. Bu gelişmeler hayvansal üretimi de tehdit edebilir. Baklagil yem bitkilerinin

önemi yalnızca hayvancılıkla sınırlı değildir. Bu bitkiler, simbiyotik Rhizobium bakterileri aracılığıyla atmosferik azotu toprağa bağlayarak kimyasal azotlu gübre kullanımını azaltmakta, toprak verimliliğini ve organik madde içeriğini artırmaktadır (Crews & Peoples, 2004, s. 279-297). Bu yönüyle baklagil yem bitkileri, sürdürülebilir tarım ve çevre dostu üretim sistemlerinin temel unsurları arasında yer almaktadır. Ayrıca ekim nöbeti sistemlerinde kullanıldıklarında, toprak yapısını iyileştirmekte ve sonraki ürünlerin verimini olumlu yönde etkilemektedirler (Kebede, 2021, s. 767998).

İklim Değişikliğinin Baklagil Yem Bitkileri Üzerine Etkileri

Artan sıcaklıklar, baklagil yem bitkilerinin gelişim süreçlerini doğrudan etkileyerek büyüme, verim ve yem kalitesinde önemli değişimlere neden olmaktadır (IPCC, 2021).

Baklagil yem bitkilerinde çimlenme ve çıkış, sıcaklığa son derece duyarlı gelişme evreleridir. Optimum sıcaklık aralığının üzerinde gerçekleşen sıcaklıklar, çimlenme oranını düşürmekte ve çıkış süresini uzatmaktadır (Bewley, Bradford , Hilhorst , & Nonogaki, 2013, s. 27-83) Türkiye’de artan ilkbahar sıcaklıkları ve düzensiz yağışlar, özellikle fiğ ve üçgül gibi tek yıllık baklagillerde düzensiz çıkışlara ve bitki sıklığında azalmaya yol açmaktadır (Türkeş, 2012, s. 125-149)

Sıcaklık artışı, baklagil yem bitkilerinde vejetatif gelişme süresini kısaltarak bitkilerin erken olgunlaşmasına neden olmaktadır. Bu durum, fotosentez süresinin azalmasıyla birlikte biyokütle üretimini sınırlamakta ve kuru ot veriminde düşüşlere yol açmaktadır (Hatfield & Prueger, 2015, s. 4-10). Yonca ve üçgül gibi çok yıllık baklagillerde artan sıcaklıklar, biçim aralıklarını kısaltmakta ve bitki ömrünü olumsuz etkilemektedir.

Çiçeklenme ve tohum bağlama dönemleri, baklagil yem bitkilerinin sıcaklık stresine en hassas olduğu evrelerdir. Yüksek sıcaklıklar, polen canlılığını azaltmakta, döllenme başarısını düşürmekte ve tohum veriminde önemli kayıplara neden olmaktadır (Prasad, Bheemanahalli, & Jagadish, 2017, s. 114-121) Türkiye’de yaz aylarında artan sıcaklık dalgaları, özellikle tohumluk üretimi yapılan yonca ve fiğ alanlarında verim istikrarını tehdit etmektedir.

Sıcaklık: Sıcaklık, yem amaçlı baklagil türlerinin gelişimini ve fizyolojisini güçlü biçimde etkileyen temel çevresel faktörlerden biridir. Artan sıcaklıklar hem fotosentez hem de nodül fonksiyonları üzerinde doğrudan etkilere sahiptir. Yüksek sıcaklık stresinin baklagiller üzerinde olumsuz etkileri yaygın olarak belgelenmiştir. Sıcaklık ekstremeleri, gelişme dönemleri boyunca özellikle çiçeklenme ve tohum oluşumu gibi kritik aşamalarda bitki performansını kısıtlar. Literatürde bildirildiği üzere, baklagillerin birçok türü hem ısı hem de soğuk stresine karşı hassastır ve bu durum gelişim aşamalarında verim kayıplarına yol açabilir. Artan sıcaklıklar, bitki metabolizmasını bozarak fotosentez ve solunum dengelerini etkiler. Örneğin sıcaklık stresi, klorofil yapısını ve fotosentez sistemlerinin etkinliğini bozabilir, bu da bitkinin enerji üretimini düşürür ve büyümeyi sınırlar. Hem yüksek hem de düşük sıcaklıklar, protein ve membran yapılarında bozulmalara neden olabilir; bu da sonucunda oksidatif stres ve hücrel hasar riskini yükseltir (Bhandari, et al., 2017, s. 68).

Kuraklık stresi, baklagillerde nodül oluşumunu ve *Rhizobium* bakterilerinin aktivitesini azaltarak biyolojik azot fiksasyonunu sınırlandırmakta; bu durum hem bitki gelişimini hem de yem kalitesini olumsuz yönde etkilemektedir (Zahran, 1999, s. 4).

Baklagillerde nodül oluşumu ve simbiyotik azot fiksasyonu da sıcaklıktan doğrudan etkilenir. Yüksek sıcaklıklar, nodül

sayısını ve azotase aktivitesini azaltabilir; bu da *Medicago sativa*, *Vicia faba* ve *Trifolium* gibi türlerde azot fiksasyon kapasitesini zayıflatabilir. Nodüllerin ve simbiyotik bakterilerin sıcaklık toleransı, bitki toleransından farklı olabilir ve bunun sonucunda nodül gelişimi ve işlevselliği olumsuz etkilenebilir. Özellikle sıcaklık 30 °C'yi aştığında nodül aktivitesinde düşüşler bildirilmektedir. Soğuk sıcaklıklar da yem baklagilleri için stres faktörüdür. Düşük sıcaklıklar nodülasyon sürecini geciktirir ve Rhizobium bakterilerinin etkinliğini azaltarak azot fiksasyonunu sınırlar. Optimum sıcaklığın altındaki koşullar, kök infeksiyonunun yavaşlamasına ve nodül gelişiminin engellenmesine yol açabilir; böylece bitkilerin büyüme ve verim potansiyeli düşebilir (Yavaş & Ünay, 2018, s. 270-278).

CO₂ artışı: Artan atmosferik karbondioksit (CO₂) konsantrasyonları, C₃ fotosentez yapan yem baklagillerinde büyüme, biyokütle üretimi, nitrojen fiksasyonu ve stres tepkileri üzerinde belirgin etkilere sahiptir. Genel olarak CO₂ seviyesi yükseldiğinde fotosentez hızı ve su kullanım verimliliği artmakta, bu da özellikle *Medicago sativa* (yonca) gibi yem türlerinde toplam kuru madde verimini olumlu yönde etkilemektedir. Bu mekanizma, bitkilerin artan [CO₂] altında daha fazla karbon özümlemesini sağlayarak büyümeyi artırmasına yardımcı olur. Aynı zamanda biyolojik N₂ fiksasyonu süreci, bitkilerin karbon-azot dengesini korumada önemli bir rol oynar; böylece légumlerde karbon gereksinimi karşılanırken, azot bağlanmasıyla birlikte C/N dengesi düzenlenir (Brooks & Szeto, 2024 , s. 2178-2191). Yüksek CO₂ konsantrasyonlarının yem baklagiller üzerinde görülen etkilerinden biri de azot fiksasyonunun artmasıdır. Örneğin *Vicia faba* (fiğ/bakla) gibi türlerde, yükseltilmiş CO₂ koşulları altında fotosentez etkinliği ve su tasarrufu artmakta, bu da kuraklık stresinin etkilerini azaltarak verimi ve N₂

bağlanmasını olumlu yönde etkilemektedir. Ancak bu etki, özellikle pod doldurma dönemi gibi gelişim evrelerinde azot bağlanmasının azalmasıyla protein içeriğinin düşmesine de neden olabilir; bu durum kuraklık ile etkileşen CO₂ etkisinin bir sonucu olarak rapor edilmiştir (Palmero, Fernandez, Garcia, & Haro, 2022, s. 161-173). Benzer şekilde yonca gibi baklagillerde yapılan deneylerde de CO₂ seviyesinin nodüllerdeki azot fiksasyonunu ve bitki büyümesini artırdığı, bu sayede C/N dengesinin daha iyi korunduğu bildirilmiştir (Brooks & Szeto, 2024, s. 2178-2191). Üçgül (*Trifolium* spp.) ve diğer yem baklagillerinde yapılan CO₂ çalışmaları, genel eğilimin yükseltilmiş CO₂'nin fotosentezi ve su tasarrufunu iyileştirdiği, bunun da kuraklık ve diğer çevresel streslerin etkisini azaltabildiği yönünde olduğunu belirtmektedir. Ayrıca baklagillerde oksidatif stres göstergelerinin CO₂ artışı altında daha düşük seviyelerde seyretme eğiliminde olduğu, bu durumun antioksidan mekanizmaların farklı şekilde aktive olmasıyla ilişkili olabileceği bulunmuştur (AbdElgawad, Farfan-Vignolo, Vos, & Asard, 2015, s. 1-10).

Kuraklık: Baklagil bitkilerinde simbiyotik azot bağlanma süreci, toprakta suyun yetersiz olması durumundan kolaylıkla etkilenmektedir. *Medicago sativa* ve *Vicia faba* gibi türlerde, toprak neminin azalmasıyla birlikte N₂ fiksasyon kapasitesinde düşüş meydana geldiği bildirilmektedir (Zahran, 1999, s. 4). Su kısıtı altında, nodüllerin oluşumu, büyümesi ve işlevselliği; kök ve sürgünlerdeki metabolik süreçlere kıyasla daha hassas bir yanıt göstermektedir.

Nodül gelişimi ve azot bağlanmasının kuraklığa verdiği tepki, bitkinin fenolojik evresine bağlı olarak farklılık göstermektedir. Özellikle vejetatif dönemde ortaya çıkan su stresi, generatif evreye göre nodül oluşumu ve N₂ fiksasyonu üzerinde daha olumsuz etkilere sahiptir. Bununla birlikte, kuraklığa karşı

duyarlılığın *Rhizobium* suşuna göre değiştiği bilinmektedir. Bazı yem baklagillerinde, örneğin *M. sativa*'da, su stresinin azot fiksasyonu üzerinde ya hiç etkili olmadığı ya da etkisinin oldukça sınırlı kaldığı da rapor edilmiştir (Yavaş & Ünay, 2018). Ayrıca, baklagillerin simbiyotik ilişki kurdukları *Rhizobium* bakterileri ile nodülleşme süreçleri de kuraklıkla bozulur. Kurak ortamda nodül sayısı ve azot fiksasyon etkinliği azalabilir; bu da bitkinin azot alım kapasitesinin düşmesine ve toplam verimin azalmasına yol açar. *Trifolium* (üçgül) gibi yem baklagillerde yapılan değerlendirmelerde, şiddetli su stresinin toplam azot bağlama kapasitesini düşürdüğü ve bu durumun bitkisel biyokütle ile birlikte nitrojen içeriğini de olumsuz etkilediği bildirilmiştir (Silva, Rathor, Poudel, & Thilakarathna, 2023, s. 382-396)..

Mürdümük (*Lathyrus sativus*) gibi türlerde yapılan çalışmalar da kuraklığın çimlenme oranını, kök ve sürgün gelişimini sınırladığını ve genotipler arasında farklı kuraklık toleranslarının bulunduğunu göstermiştir. Bazı genotipler kuraklık koşullarında daha yüksek çimlenme ve gelişim başarıları sergilerken, diğerleri belirgin performans kaybı göstermektedir (Aslan & Atış, 2018, s. 218-231).

Türkiye’de İklim Değişikliğinin ve Baklagil Yem Bitkileri Yetiştiriciliğine Etkileri

Türkiye, coğrafi konumu ve farklı iklim tiplerinin geçiş kuşağında yer alması nedeniyle iklim değişikliğine karşı hassas bölgeler arasında değerlendirilmektedir. Akdeniz Havzası’nda yer alan ülkeler için yapılan projeksiyonlar, Türkiye’nin iklim değişikliğinden olumsuz yönde etkilenme riskinin yüksek olduğunu ortaya koymaktadır (Giorgi & Lionello, 2008, s. 90-104).

Türkiye’de son yıllarda yapılan gözlemsel çalışmalar, sıcaklık artışı, yağış rejimindeki düzensizlikler ve kuraklık sıklığındaki artışın belirgin hale geldiğini göstermektedir (Türkeş, 2012, s. 125-149). İklim modellerine dayalı senaryolar, bu eğilimlerin 21. yüzyıl boyunca daha da güçleneceğini öngörmektedir (IPCC, 2021).

Türkiye’de hayvancılık sektörü, tarımsal üretimin temel bileşenlerinden biri olup sürdürülebilirliği büyük ölçüde kaliteli ve yeterli yem kaynaklarının varlığına bağlıdır. Yem giderleri, hayvansal üretim maliyetlerinin %60–70’ini oluşturmakta; bu durum kaba yem üretiminin artırılmasını stratejik bir zorunluluk haline getirmektedir (Alçiçek, Kılıç, Ayhan, & Özdoğan, 2010, s. 1-10; FAO, 2020). Türkiye’de meraların büyük bir kısmının verim gücünü kaybetmiş olması ve kaba yem açığının devam etmesi, yem bitkileri tarımının önemini daha da artırmaktadır (Hristov, et al., 2013, s. 5045–5069)

Yem bitkileri içerisinde baklagil yem bitkileri, hem hayvansal üretim hem de tarımsal ekosistemler açısından özel bir yere sahiptir. Yonca (*Medicago sativa*), korunga (*Onobrychis sativa*), fiğ (*Vicia spp.*) ve üçgül (*Trifolium spp.*) gibi baklagil yem bitkileri; yüksek ham protein içerikleri, sindirilebilirlik düzeyleri ve lezzetlilikleri sayesinde ruminant beslenmesinde vazgeçilmez yem kaynaklarıdır (Açıkgöz, 2001, s. 584). Bu özellikleriyle baklagil yem bitkileri, hayvansal verimin ve ürün kalitesinin artırılmasına doğrudan katkı sağlamaktadır. Tüik bitkisel üretim verilerine göre 2024 yılında baklagil yem bitkilerinden yonca, üçgül, korunga, mürdümük, fiğ üretimi toplam 33471 ton olarak kaydedilmiştir (TÜİK, 2024).

Türkiye’nin farklı ekolojik bölgelerinde baklagil yem bitkilerinin yaygın olarak yetiştirilebilmesi, bu bitkileri iklim koşullarına uyum açısından da önemli kılmaktadır. Ancak son yıllarda sıcaklık artışları, düzensiz yağış rejimleri ve artan

kuraklık riski, yem bitkileri üretiminde verim ve kalite dalgalanmalarına yol açmaktadır (Türkeş, 2012, s. 125 - 149). Bu durum, baklagil yem bitkilerinin iklim değişikliği bağlamında yeniden değerlendirilmesini gerekli kılmaktadır.

Türkiye’de son yıllarda gözlenen iklim değişikliği eğilimleri, baklagil yem bitkileri yetiştiriciliği açısından önemli riskler ve bazı bölgeler için sınırlı fırsatlar ortaya koymaktadır. Akdeniz Havzası’nda yer alan Türkiye, iklim değişikliğine karşı hassas bölgelerden biri olarak değerlendirilmekte olup, özellikle sıcaklık artışı, yağış rejimlerindeki düzensizlikler ve kuraklık sıklığındaki artış, baklagil yem bitkilerinin büyüme ve verim potansiyelini doğrudan etkilemektedir (Giorgi & Lionello, 2008, s. 90-104; Türkeş, 2012, s. 125-149).

Uzun dönemli meteorolojik gözlemler, Türkiye genelinde yıllık ortalama sıcaklıklarda belirgin bir artış eğilimi olduğunu göstermektedir. Özellikle yaz aylarında artan sıcaklıklar, yonca (*Medicago sativa*), fiğ (*Vicia spp.*) ve üçgül (*Trifolium spp.*) gibi serin mevsim baklagil yem bitkilerinde ısı stresi oluşturarak fotosentez hızını düşürmekte, büyüme süresini kısaltmakta ve kuru ot veriminde azalmaya neden olmaktadır (Açıkgöz, 2001, s. 584; Türkeş, 2012, s. 125-149). İklim projeksiyonları, 21. yüzyılın sonuna doğru Türkiye’de sıcaklıkların 2–4 °C artabileceğini ve bu artışın özellikle iç ve güney bölgelerde daha belirgin olacağını ortaya koymaktadır (IPCC, 2021). Bu durum, baklagil yem bitkilerinde erken çiçeklenme, biçim sayısında azalma ve yem kalitesinde düşüş riskini artırmaktadır.

Yağış rejimlerindeki değişimler de baklagil yem bitkileri üretimini önemli ölçüde etkilemektedir. Türkiye’de ilkbahar ve yaz yağışlarında azalma, yağışların zamansal dağılımında düzensizlik ve kısa süreli şiddetli yağış olaylarında artış gözlenmektedir (Türkeş, 2012, s. 125-149). Baklagil yem

bitkilerinin büyük bir kısmı, özellikle erken gelişme dönemlerinde yeterli toprak nemine ihtiyaç duymaktadır. Bu nedenle düzensiz yağışlar, çimlenme ve fide gelişimini olumsuz etkilemekte; kurak dönemler ise verim kayıplarına yol açmaktadır. Buna karşın, ani ve şiddetli yağışlar toprak erozyonunu artırarak kök gelişimini ve azot fiksasyonunu sınırlandırmaktadır (Crews & Peoples, 2004, s. 279-297).

Adaptasyon ve Uyum Stratejileri

Kuraklığa ve Sıcağa Dayanıklı Çeşitlerin Geliştirilmesi

Baklagil yem bitkilerinin kuraklığa ve sıcak stresine dayanma potansiyeli, üretim verimliliği ve sürdürülebilirliği açısından hayati öneme sahiptir. Akdeniz ve benzeri yarı kurak iklimlerde, fiğ (*Vicia sativa* L.) gibi baklagil türleri üzerinde yürütülen çalışmalar, kuraklık toleransı yüksek genotiplerin belirlenmesinin verim stabilitesi için kritik olduğunu göstermektedir; fiğ çeşitlerinde farklı kuraklık stresi düzeylerinde çimlenme ve fide gelişim tepkilerindeki varyasyonlara yönelik deneysel analizler, hassas ve tolerant çeşitlerin belirlenebileceğini ortaya koymuştur. Bu da kuraklığa dayanıklı baklagil yem bitkisi ıslahı için temel bir stratejidir. Ayrıca ICARDA gibi uluslararası kurumlar, kuru alanlarda yetişen yem baklagillerinin genetik kaynaklarını koruyarak yerel adaptasyona uygun çeşit geliştirme çalışmalarını desteklemektedir; bunlar özellikle *Vicia sativa* gibi türlerde genetik çeşitliliğe dayalı ıslah programlarını kapsamaktadır (Çiftçi & Açıkbaş, 2023, s. 288-299).

Ekim Zamanı ve Üretim Tekniklerinin Değiştirilmesi

Baklagil yem bitkilerinde ekim zamanının ve üretim tekniklerinin iklim değişikliğine uyumlu olacak şekilde optimize edilmesi de önemli bir stratejidir. Değişen yağış rejimleri ve artan sıcaklıklara bağlı olarak uygun ekim tarihinin

belirlenmesi, bitkilerin kritik gelişim dönemlerinde stres koşullarından kaçınmasını sağlar. Örneğin, fiğ ve korunga gibi türlerde erken ilkbahar veya geç sonbahar ekimi, bitkilerin çimlenmeden önce toprağın neminden yararlanmasına yardımcı olabilir. Ayrıca baklagil–tahıl karışım sistemleri gibi agroekolojik üretim tekniklerinin uygulanması, tek başına baklagil ekimine göre daha yüksek toplam kaba yem verimi sağlayarak üretim riskini azaltabilir; böylece iklim değişikliğinin olumsuz etkilerine karşı sistemin dayanıklılığı artabilir (Kchaou, Benyoussef, Jebari, Harbaoui, & Berndtsson, 2023, s. 338)

Sulama ve Toprak Yönetimi Uygulamaları

Sulama ve toprak yönetimi, özellikle kurak ve yarı kurak bölgelerde baklagil yem bitkilerinin adaptasyonunu destekleyen başlıca uygulamalardır. Su kaynaklarının giderek kısıtlandığı iklim koşullarında, suyu etkin kullanmaya yönelik sistemlerin (örneğin damla sulama gibi su tasarrufu sağlayan yöntemler) benimsenmesi, bitkilerin su stresinden korunmasında önemli rol oynar. Toprak yönetimi ise organik maddece zengin toprak profilinin korunması ve erozyonun önlenmesiyle doğrudan ilişkilidir. Ayrıca toprak yapısını iyileştiren uygulamalar, kök gelişimini destekler ve baklagil yem bitkilerinin çevresel dalgalanmalara karşı dirençlerini artırır. Bu bağlamda, sürdürülebilir toprak yönetimi uygulamaları iklim değişikliğine uyum sürecinin ayrılmaz bir parçası olarak kabul edilmektedir (Güvenç & Tosun, 2025, s. 6-13).

Sürdürülebilir Tarım Yaklaşımları

Sürdürülebilir tarım, iklim değişikliğine uyum stratejilerinin merkezinde yer alır ve baklagil yem bitkileri yetiştiriciliğinde ekosistem hizmetlerini koruyan uygulamalarla uyumlu hale getirilmelidir. Baklagillerin azot fiksasyonu yetenekleri

sayesinde topraklarda organik azot birikimi artar ve böylece kimyasal gübre ihtiyacı azalır; bu durum hem maliyetleri düşürür hem de sera gazı salımlarını azaltır. Ayrıca çok yıllık baklagil türlerinin kullanımı, toprak örtüsünü sürekli tutarak erozyonu ve su kaybını minimize eder. Çeşitli besin maddelerini sağlayan karma sistemlerin benimsenmesi de biyolojik çeşitliliği artırır ve üretim sistemlerinin çevresel streslere karşı genel direncini yükseltir (Muir, et al., 2025).

Sonuç

Türkiye’de baklagil yem bitkileri üretimi, özellikle fiğ, korunga ve yonca gibi türlerde, iklim değişikliğinin etkileri nedeniyle giderek daha hassas bir duruma gelmektedir. Artan sıcaklıklar, düzensiz yağış rejimleri, kuraklık ve aşırı hava olayları, hem çimlenme ve fide gelişimini hem de verim ve yem kalitesini olumsuz yönde etkilemektedir. Özellikle İç Anadolu, Ege ve Güneydoğu Anadolu Bölgelerinde kuraklık ve sıcaklık stresinin etkisi belirgin olup, bu durum üretim risklerini artırmaktadır.

Literatür bulguları, farklı baklagil çeşitlerinin iklim stresine karşı farklı tolerans seviyelerine sahip olduğunu göstermektedir. Kuraklığa dayanıklı çeşitlerin belirlenmesi ve yaygınlaştırılması, ekim zamanlarının iklim koşullarına göre optimize edilmesi ve uygun sulama ile toprak yönetimi uygulamalarının benimsenmesi, üretim kayıplarını azaltmada kritik stratejilerdir. Ayrıca sürdürülebilir tarım yaklaşımları, özellikle azot fiksasyonu yapan baklagil türlerinin toprak sağlığı ve verimlilik üzerindeki olumlu etkileri, uzun vadeli iklim değişikliği uyumu açısından önemli bir avantaj sağlamaktadır.

Sonuç olarak, Türkiye’de baklagil yem bitkileri üretiminde iklim değişikliğine uyum sağlamak için, genetik ıslah çalışmalarının desteklenmesi, üretim tekniklerinin modernize

edilmesi ve sürdürülebilir tarım uygulamalarının yaygınlaştırılması gerekmektedir. Bu önlemler, hem verim kayıplarının önlenmesine hem de hayvancılık sektörünün yem güvenliğinin korunmasına katkı sağlayacaktır.

Kaynakça

- AbdElgawad, H., Farfan-Vignolo, E., Vos, D., & Asard, H. (2015). Elevated CO₂ mitigates drought and temperature-induced oxidative stress differently in grasses and legumes. *Plant Science*, 231:1-10.
- Açıkgöz, E. (2001). Yem Bitkileri. U. Ü. Vakfı. içinde Bursa: Bursa : Uludağ Üniversitesi Ziraat Fakültesi Tarla Bitkileri Bölümü.
- Alçıçek, A., Kılıç, A., Ayhan, V., & Özdoğan, M. (2010). Türkiye’de kaba yem üretimi ve sorunları. *Ziraat Mühendisleri Odası Dergisi*, 1-10.
- Aslan, H., & Atış, İ. (2018). Bazı Yaygın Mürdümük Çeşitlerinde Kuraklık Stresinin Çimlenme Ve Fide Gelişimine Etkisi. *Mustafa Kemal Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, 23(2): 218-231.
- Bewley, J. D., Bradford , K., Hilhorst , H., & Nonogaki, H. (2013). *Seeds: Physiology of development, germination and dormancy (3rd ed.)*. New York: Springer.
- Bhandari, K., Sharma, K., Rao, B., Siddique, K., Gaur, P., Agrawa, S., . . . Nayyar, H. (2017). Temperature sensitivity of food legumes: a physiological insight. *Acta Physiol Plant*, 39:68.
- Brooks, M. D., & Szeto, R. C. (2024). Biological nitrogen fixation maintains carbon/nitrogen balance and photosynthesis at elevated CO₂. *Plant, Cell & Environment*, 47(6):2178-2191.

- Crews, T., & Peoples, M. (2004). Legume versus fertilizer sources of nitrogen: *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 102: 279–297.
- Çiftçi, H., & Açıkbaş, S. (2023). Kuraklık Stresinin Yaygın Fiğ (*Vicia sativa* L.) Çeşitlerinin Çimlenme ve Fide Gelişimine Etkisi. *Türkiye Tarımsal Araştırmalar Dergisi*, 10(3), 288-299.
- Deutsch, C. A., Tewksbury, J., Tigchelaar, M., Battisti, D., Merrill, S., Huey, R., & Naylor, R. (2018). Increase in crop losses to insect pests in a warming climate. *Science*, 361(6405):916-919.
- Dhaliwal, S. K., Talukdar, A., Gautam, A., Sharma, P., Sharma, V., & Kaushik, P. (2020). Developments and Prospects in Imperative. *International Journal of Molecular Sciences*, 9615.
- FAO. (2020). *The state of food and agriculture 2020: Overcoming water challenges in agriculture*. Rome.
- Giorgi, F., & Lionello, P. (2008). Climate change projections for the Mediterranean region. *Global and Planetary Change*, 63(2-3):90-104.
- Güvenç, M., & Tosun, B. (2025). İklim değişikliğinin yem bitkileri üzerine etkisi. *Sürdürülebilir Hayvan Besleme. 1. Baskı*. (s. 6-13). içinde Ankara: Türkiye Klinikleri.
- Hatfield, J. L., & Prueger, J. H. (2015). Temperature extremes: Effect on plant growth and development. *Weather and Climate Extremes*, 10 (A):4-10.
- Hristov, A. N., Oh, J., Firkins, J., Dijkstra, J., Kebreab, E., Waghorn, G., . . . Tricarico, J. (2013). SPECIAL TOPICS—

- Mitigation of methane and nitrous oxide emissions. *Journal of Animal Science*, 91:5045–5069.
- IPCC. (2021). *Sixth Assessment Report: Climate Change 2021: The Physical Science Basis*. Cambridge: Cambridge University Press.
- IPCC. (2022). *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Kchaou, R., Benyoussef, S., Jebari, S., Harbaoui, K., & Berndtsson, R. (2023). Forage Potential of Cereal–Legume Mixtures as an Adaptive. *Sustainability*, 15:338.
- Kebede, E. (2021). Contribution, Utilization, and Improvement of Legumes-Driven Biological Nitrogen Fixation in Agricultural Systems. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 5:767998.
- Lobell, D. B., & Gourdji, S. M. (2012). The Influence of Climate Change on Global Crop Productivity. *Plant Physiology*, 1686–1697.
- Muir, J. P., Dubeux Junior, J., dos Santos, M., Foster, J., Ferreira, R., Jr, M., . . . Brady, J. (2025). Sustainable Warm-Climate Forage Legumes: Versatile Products. *Grasses*, 4(2):16.
- Palmero, F., Fernandez, J., Garcia, F., & Haro, R. (2022). A quantitative review into the contributions of biological nitrogen fixation to agricultural systems by grain legumes. *European Journal of Agronomy*, 136(1):126514.
- Porter, J. R., Xie, L., Challinor, A. J., Cochrane, K., Howden, S. M., Iqbal, M. M., . . . Travasso, M. I. (2014). Food security and food production systems. In *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability* (s. 485-533). içinde Cambridge University Press.

- Prasad, P. V., Bheemanahalli, R., & Jagadish, S. (2017). Field crops and the fear of heat stress - opportunities, challenges and future directions. *Field Crops Research*, 200:114-121..
- Rahut, D. B., Aryal, J. P., Manchanda, N., & Sonobe, T. (2022). Expectations for household food security in the coming decades: A global scenario. *Future foods*, 107-131.
- Semba, R. D., Ramsing, R., Rahman, N., Kraemer, K., & Bloem, M. (2021). Legumes as a sustainable source of protein in human diets. *Global Food Security*, 28:100520.
- Silva, C. D., Rathor, P., Poudel, H., & Thilakarathna, M. (2023). Effects of Drought Stress on Red Clover-Grass Mixed Stands Compared to Grass Monoculture Stands in Nitrogen-Deficient Systems. *Nitrogen*, 4(4): 382-396.
- TÜİK. (2024). *Bitkisel üretim istatistikleri*. <https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=Bitkisel-Uretim-Istatistikleri-2024-53447> (Erişim tarihi: 14 Aralık 2025).
- Türkeş, M. (2012). Türkiye’de gözlenen ve öngörülen iklim değişikliği, kuraklık ve çölleşme. *Ankara Üniversitesi Çevre Bilimleri Dergisi*, 4(2):1 - 32.
- Yavaş, İ., & Ünay, A. (2018). Baklagillerde Kök, Nodül Oluşumu ve Azot Fiksasyonu Üzerine Bazı Küresel İklim Değişikliği Parametrelerinin Etkisi. *Uluslararası Tarım ve Yaban Hayatı Bilimleri Dergisi*, 4(2):270-278.
- Zahran, H. H. (1999). Rhizobium-Legume Symbiosis and Nitrogen Fixation under Severe Conditions and in an Arid Climate. *Microbiology and Molecular Biology Reviews*, 63(4).

BÖLÜM 7

SON ZAMANLARDA GENOTİPLERİN DEĞERLENDİRİLMESİNDE ÇOK SIK KULLANILAN GGE BİPLOT ANALİZ TEKNİĞİNİN UYGULAMALARI VE YORUMLANMASI

ENVER KENDAL¹
MEHMET SALİH SAYAR²

Giriş

Tarımsal alanlarda bilimsel bir araştırma yapmak bu araştırmadan veri elde etmek ve bu verileri değerlendirmek için hem kıymetli zamanımızı alır hem de oldukça pahalıdır. Bu anlamda elde edilen verileri en güzel şekilde analiz etmek, değerlendirmek, tüm paydaşlarla paylaşmak kolay bir şekilde anlaşılmasını sağlamak oldukça kıymetlidir. Ancak farklı çevrelerde çok sayıda genotiple yürütülen tarımsal araştırmalardan elde edilen verileri analiz etmek, yorumlamak oldukça karmaşık olup kavrama yeteneğimizle bazen

¹Profesör, Mardin Artuklu Üniversitesi, Kızıltepe Tarım Bilimleri ve Teknolojileri Fakültesi, Tarla Bitkileri Bölümü, Mardin, Türkiye, 0000-0002-8812-8847

²Profesör, Dicle Üniversitesi, Bismil Meslek Yüksek Okulu, Bitkisel ve Hayvansal Üretim Bölümü, Bismil, Diyarbakır, Türkiye, 0000-0002-5834-5277

bu karmaşıklığı yorumlamada ya da karşıdaki araştırmacıların anlaması konusunda güçlüklerle karşılaşmaktayız (Kendal ve ark., 2016). Bu nedenle, bu karmaşık bağlantıları ve etkileşimleri içeren büyük veri kümelerini tam olarak anlamak için grafiksel şekiller arzu edilmekte ve bu grafikler bu karmaşıklıkları yorumlamak için işimizi kolaylaştırmakta, hatta kesinlikle gerekli kılmaktadır. Bu anlamda yeni geliştirilen GGE biplot metodolojisi, grafiksel analizleri elde etmek için ve karmaşık araştırma sonuçlarını yorumlamak için ve okuyuculara benimsetmek için üstün bir yaklaşım olarak geliştirilmiştir (Yan and Kang, 2002; Kendal ve Şener, 2015). Tarımsal alanlarda bilimsel bir araştırma yapmak bu araştırmadan veri elde etmek ve bu verileri değerlendirmek için hem kıymetli zamanımızı alır hem de oldukça pahalıdır. Bu anlamda elde edilen verileri en güzel şekilde analiz etmek, değerlendirmek, tüm paydaşlarla paylaşmak kolay bir şekilde anlaşılmasını sağlamak oldukça kıymetlidir. Ancak farklı çevrelerde çok sayıda genotiple yürütülen tarımsal araştırmalardan elde edilen verileri analiz etmek, yorumlamak oldukça karmaşık olup kavrama yeteneğimizle bazen bu karmaşıklığı yorumlamada ya da karşıdaki araştırmacıların anlaması konusunda güçlüklerle karşılaşmaktayız (Kendal ve ark., 2016). Bu nedenle, bu karmaşık bağlantıları ve etkileşimleri içeren büyük veri kümelerini tam olarak anlamak için grafiksel şekiller arzu edilmekte ve bu grafikler bu karmaşıklıkları yorumlamak için işimizi kolaylaştırmakta, hatta kesinlikle gerekli kılmaktadır. Bu anlamda yeni geliştirilen GGE biplot metodolojisi, grafiksel analizleri elde etmek için ve karmaşık araştırma sonuçlarını yorumlamak için ve okuyuculara benimsetmek için üstün bir yaklaşım olarak geliştirilmiştir (Yan and Kang, 2002; Kendal ve Şener, 2015) .

Çoklu çevre denemelerinden (ÇÇD) elde edilen verileri değerlendirirken denemede yer alan çeşitleri değerlendirilmek ve mega-çevreleri (büyük çevre grupları) tanımlamak en önemli amaçlarımız arasındadır. Hesaplanan verim, çeşit (Ç), çevre (Ç) ve çeşit $\times$ çevre etkileşiminin (ÇÇ veya GE) birleşik bir sonucu olsa da, çeşitlerin değerlendirilmesi ve mega-çevrelerin tanımlaması için yalnızca Ç(G) ve ÇÇ (GE) önemlidir. Temel bileşen analizinde (PCA) GGE (yani G + GE) biplotu, Çevre merkezli çoklu çevrelerde ölçülen verilerinin ilk iki simetrik ölçekli temel bileşenden (PC1 ve PC2) meydana gelmektedir. GGE biplotu, çoklu çevrede yürütülen çalışmalardan elde edilen verilerin Çeşit (G) artı çeşit $\times$ çevre interaksiyonunu grafikler üzerinde görsel olarak çeşitleri değerlendirmemizi ve mega-çevre tanımlamalarını yapmamızı kolaylaştıracak şekilde tasarlanmıştır (Kendal ve Sayar, 2016; Yan ve ark., 2000).

Bir genotipin fenotipik anlamı, genotip (G) ve çevre (E) bileşenlerinin ve aralarındaki etkileşimlerin (G $\times$ E) bir karışımıdır. Genotip $\times$ çevre etkileşimleri, yüksek performans gösteren genotiplerin seçim sürecini karmaşık hale getirmektedir. Bitki ıslahçıları tarafından genotiplerin farklı çevrelerdeki performansını değerlendirmek için birden fazla lokasyonlarda deneme çalışmalarını yaygın olarak sürdürmektedir (Delacy vd. 1996). Genotip $\times$ çevre etkileşim eşkilleri ortaya çıkarmak için ortak regresyon analizleri (Finlay & Wilkinson 1963; Eberhart & Russell 1966; Perkins & Jinks 1968), ana etkiler ve çarpımsal interaksiyonlar analizi (Gauch, 1992; Kılıç, 2014) ve genetik korelasyon analizi (Burdon, 1977; Yamada 1962) gibi çok sayıda yöntem geliştirilmiştir. Bu yöntemler genellikle birden fazla çevrede yürütülen deneme verilerini analiz etmek için kullanıldığı gibi genotip $\times$ çevre etkileşimini incelemek için de kullanılmaktadır (Ades & Garnier 1997; Johnson & Burdon, 1990; Sayar ve Han, 2016; Wu & Matheson, 2005).

Genotip, genotip x çevre (GGE) biplot analizi ise bu yöntemlerin bazı işlevlerini birlikte uygulamak için yakın zamanda geliştirilmiştir. Toplam varyasyon içerisinde çevre varyasyonun çoğunu açıklarken, genellikle genotip ve genotip $\times$ çevre interaksyonun küçük kısmını açıklamaktadır (Yan & Rajcan 2002). Bununla birlikte, özellikle genotip x çevre etkileşimi tanımlandığında, çeşitleri değerlendirmek için yalnızca genotip ve genotip x çevre etkileşimi önemlidir (Cooper & Hammer, 1996). Bu yüzden, Yan ve ark., (2000) bu iki yöntemi bilinçli bir şekilde bir araya getirmiş ve bu karışımı genotip, genotip x çevre (GGE) olarak adlandırmıştır. Gabriel'in (1971) önerisinden sonra, biplot tekniği, çoklu çevre şartlarında yürütülen çalışmalardan elde edilen verilerin genotip çevre interaksyon etkisini göstermek için kullanılmış ve GGE biplotu olarak adlandırılmıştır (Yan, 2002; Yan ve ark., 2000).

GGE biplotu, genotip çevre inetraksyonunu iki yönlü bir tabloda grafiksel olarak gösteren bir veri görselleştirme aracı olarak ortaya çıkarılmıştır (Yan ve ark., 2000). GGE biplotu aşağıda belirtilen amaçlar için etkili bir araç olarak kullanılmaktadır : çoklu çevre şartlarda yürütülen denemelerde yer alan genotiplerin hangi çevrelere sepesifik uyum hangi çevrelere genel uyum sağladığını tespit etmek ve bu konuda yapılacak önerilerde, genotiplerin performansını ve stabilite durumlarını değerlendirmek ve lokasyonları test etmek ve bunları değerlendirmek için son zamanlarda bir analiz yöntemi olarak ortaya çıkmıştır(Güngör ve Dumlupınar, 2022).

GGE biplot analizi, tarımsal araştırmalarda genotip çevre interaksyonlarına ait verilerin değerdendirilmesinde giderek daha fazla kullanılmaktadır (Butrón ve ark., 2004; Crossa ve ark., 2002; Dehghani ve ark., 2006; Kaya ve ark., 2006; Ma ve ark., 2004; Yan & Hunt 2001). Bununla birlikte, diğer alanlarda da sebep sonuç ilişkilerini ortaya çıkarmak için kullanılabilir.

Bu çalışma, bir örnek olay incelemesi olarak, temsili olarak farklı çeşitlerin kullanıldığı ve çevrelerde yürütülen bir araştırmadan elde edilen verilerin GGE Biplot analiz yöntemi ile değerlendirmek ve yorumlamak üzere ele alınmıştır. Biplot analiz yöntemi daha çok grafiklerin görsel olarak yorumlanması temeline dayanmaktadır. Bu anlamda interaksiyonların yorumlanmasında araştırmacıların işini oldukça kolaylaştırmaktadır.

Bu nedenle bu bölüm, genotip ve genotip-çevre (GGE) biplot tekniğinin bu hedeflerin her birine ulaşmak için nasıl kullanılabileceğini ayrıntılı olarak açıklamaktadır. GGE biplot analizinden elde edilen farklı grafiklerin nasıl yorumlanması gerektiği konusunda açıklayıcı bilgileri içermektedir.

Materyal ve metod

Bu çalışmada GGE Biplot analiz tekliğini açıklamak ve yorumlamak için örnek olarak ele alınmış ve temsili verilere dayanmaktadır. Örnek veriler çok sayıda (yedi) lokasyonda ve beş çeşit ile yürütülen bir araştırmadan elde edilen verilerin (verim/kg/da) analizini ele almakta ve GGE Biplot metodolojisine göre yorumlanmaktadır.

Bu metod ile oluşturulan dört ana grafikte şu konular ele alınmıştır:

- 1) Temsili olarak araştırmada kullanılan çevreler arasındaki bağlantıları ve temsili olarak kullanılan çeşitlerden hangi çeşitlerin bu çevrelerdeki sepesifik veya genel uyumlarını araştırmak,
- 2) Temsili olarak kullanılan çevrelerden temel çevreyi belirlemek için mega (büyük)-çevreyi araştırmak, Her mega-çevre içinde en uygun çevreyi belirlemek ve maliyeti azaltmak ve her mega-çevre için en uygun çeşide karar vermek ve böylece çeşit önerilerini yapmak,
- 3) Temsili olarak kullanılan çeşitlerden hangilerinin en stabil olduğunu veya hangilerinin stabil olmadığını veya hangilerinin yüksek verimli olduğunu veya düşük verimli olduğunu göstermek,

4) Temsili olarak kullanılan çeşit ve çevrelere ait verilerden “temsili ideal bir çevre” elde etmek ve araştırmada kullanılan temsili çeşitleri grafik ile oluşturulan ideal çevreye göre ideal olup olmadığı veya elverişli olup olmadığını göstermek üzere çeşit x çevre interaksyonunu anlamak için bu çalışma tasarlanmıştır.

Bulgular

Bu çalışmada temsili olarak kullanılan çeşit sayısı ve çevre sayısı ayrıca bu çeşit ve çevrelere ait temsili verim (kg/da) değerleri Tablo 1’de verilmiştir. Bu çalışmada kullanılan temsili çeşitlerin verim değerleri 496-545 kg/da arasında değişim göstermiştir. En yüksek temsili verim Çeşit 4’ten en düşük temsili verim ise Çeşit 1’den elde edilmiştir. Çeşit 4’ü, Çeşit 5, Çeşit 2 ve Çeşit 3 takip etmiştir. Bu açıklama grafiklerde temsili çeşitler hakkında yorum yaparken teyit açısından oldukça önemlidir. Bu çalışmada kullanılan temsili çevrelerden elde edilen temsili verim değerleri 284-694 kg/da arasında değişim göstermiştir. En yüksek temsili verim E3’ten en düşük temsili verim ise E1’den elde edilmiştir.

Tablo:1. Bu çalışmada kullanılan çevre, çeşit ve bunlardan elde edilen temsili değerler

Çeşitler	Çevreler (Lokasyonlar) (kg/da)						Ortalama
	E1	E2	E3	E4	E5	E6**	
Çeşit 1***	215	485	694	545	535	504*	496
Çeşit 2	277	490	670	615	596	539	531
Çeşit 3	258	446	707	603	573	490	513
Çeşit 4	310	481	722	650	560	546	545
Çeşit 5	360	408	677	642	615	510	535
Ortalama	284	462	694	611	576	518	

*:Kullanılan veriler gerçek veriler değildir temsildir, **: Kullanılan çevreler temsili çevrelerdir, ***:Kullanılan çeşitler temsildir.

E3'ü, E4, E5, E6 ve E2 takip etmiştir. Bu açıklama da grafiklerde temsili çevreler hakkında yorum yaparken teyit açısından oldukça önemlidir.

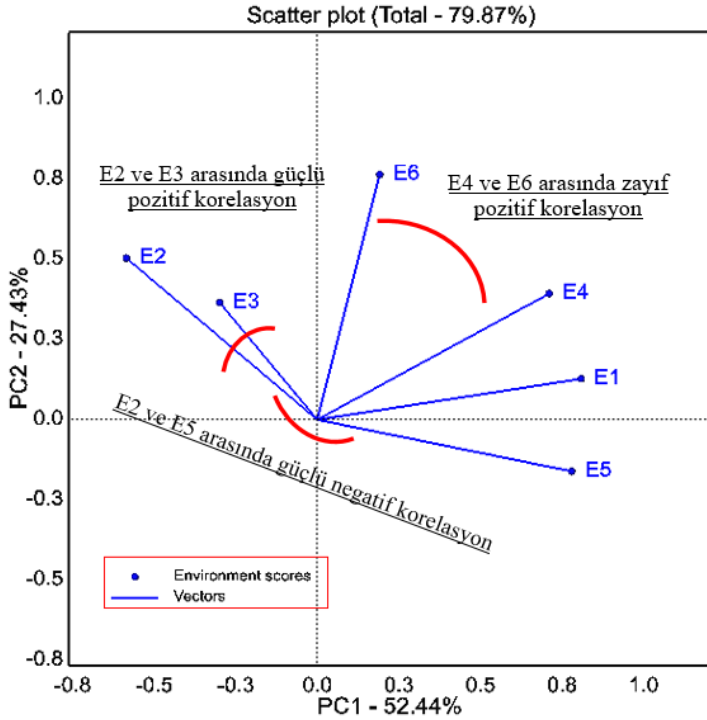
Bu çalışmada temsili olarak kullanılan çeşitler ile çevreler arasındaki ilişkiler

GGE Biplot tekniği ile herhangi bir araştırmanın yürütüldüğü çevreler ile bu çalışmada kullanılan çeşitler arasındaki ilişkiler ile çevrelerin durumları ile çeşitlerin bu çevrelerdeki performansları hakkında görsel olarak farklı açılardan grafiklerle görülebilmektedir (Şekil 1, 2, 3, 4). Temsili verilerle yapılan GGE Biplot analizinde, iki temel bileşen varyasyonun toplam % 80.28'ini, PC1 varyasyonun %51.47, PC2 ise %28.81'ini açıklamaktadır. Temsili çeşit, çevre ve verim sonuçları dört bölümde açıklanmaktadır: Birinci bölüm, çevreler arasındaki ilişkileri, mega çevre grupları ve çeşitlerin çevrelere uyum kabiliyetlerini göstermektedir; ikinci bölüm, her çevre için en uygun çeşitleri göstermektedir; üçüncü bölüm, çeşitlerin performansları ve stabilite sonuçlarını vermektedir; dördüncü bölüm ise çeşitlerin tüm çevrelere göre ideal veya elverişli olup olmadığını veya adaptasyonunu hakkında görsel olarak bilgi vermektedir.

Çevreler arasındaki ilişkiler, mega çevre grupları ve çeşitlerin çevrelere uyum kabiliyetleri

Çalışmada kullanılan çevreler arasındaki ilişkilerin özeti Şekil 1'de verilmiştir. Biplot orijini ile çevre işaretleyicilerini birleştiren çizgiler çevre vektörleri olarak adlandırılmaktadır. İki çevreye ait vektörlerin arasındaki açı, iki çevre arasındaki korelasyon katsayısıyla ilişkilidir. İki çevrenin vektörleri arasındaki açının kosinüsü, iki çevre arasındaki korelasyon katsayısını yaklaşık olarak vermektedir (Kroonenberg, 1995; Yan, 2002). Çevrelere ait vektörlerin açılara baktığımızda, beş alan olduğu görülmektedir (Şekil 1).

Şekil 1. Çevreler arasındaki ilişkiler

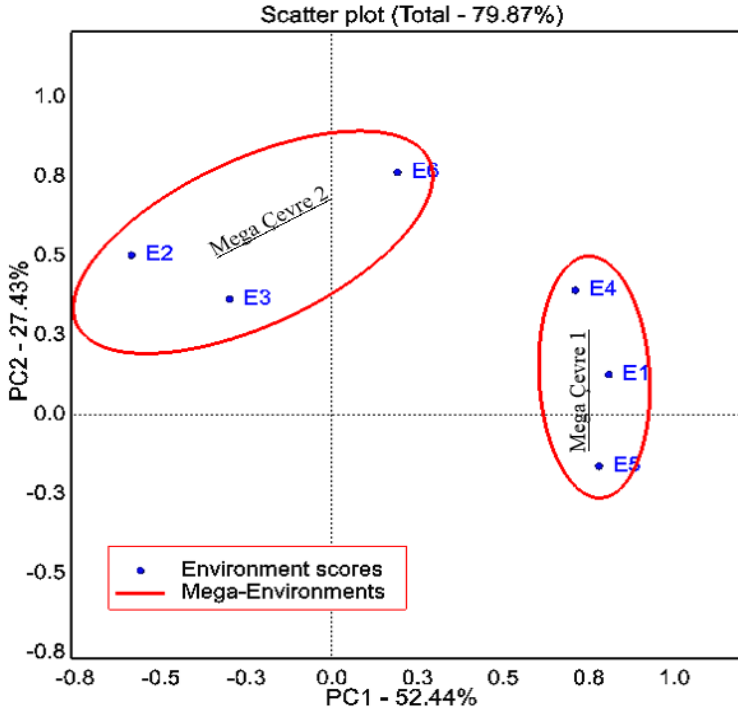


Çevrelere ait vektörlere baktığımızda E2 ile E3 arasında güçlü pozitif korelasyon, E2 ile E5 arasında ise güçlü negatif korelasyon, E4 ile E6 arasında da zayıf pozitif bir korelasyon olduğu görülmektedir. Kısacası çevrelere ait vektörlerin açılarına bakarak, pozitif veya negatif ayrıca güçlü veya zayıf korelasyon konusunda karar vermemizi görsel olarak kolaylaştırmaktadır (Kendal ve ark., 2019).

Çevrelerin benzerliklerini veya farklılıklarını Mega çevreleri oluşturarak görebilmek mümkündür. Temsili veriler ile oluşturulan mega çevre grafiğinde(Şekil 2) iki temel Mega grup olduğu görülmektedir. Birinci grup E1, E4 ve E5'i içerirken, ikinci grup ise E2, E3 ve E6' yı içermektedir (Şekil 2). Bu gruptandırma hem coğrafi mesafe hem de alan türü ile örtüşmektedir. Çok çevrede yürütülen çalışmalarda çevrelerin özellik yönünden farklılıklarını

veya benzerliklerini ortaya çıkarmak ve daha sonra yapılacak çalışmalarda benzer şartlara sahip çevrelerden (Mega grup) birini bırakarak diğerlerini elemek hem maliyeti azaltacak hem de işimizi kolaylaştıracaktır.

Şekil 2.Mega çevre grupları

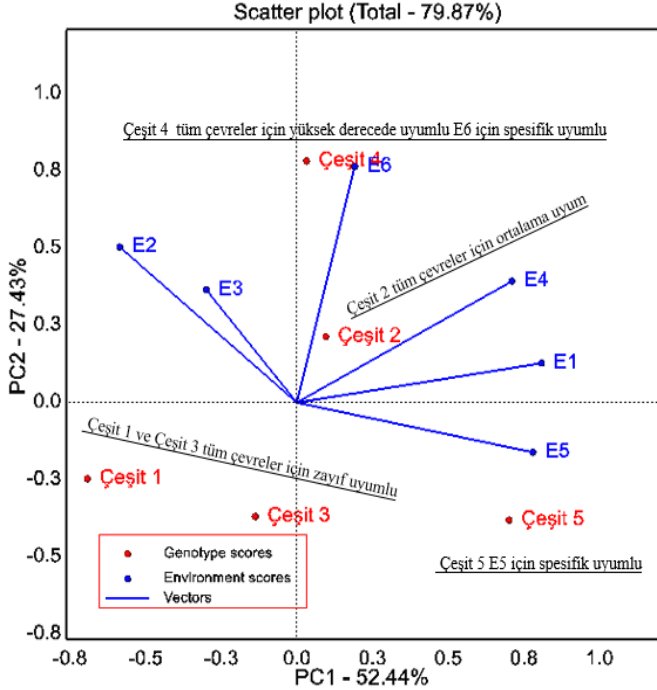


Ayrıca benzer şartlara sahip çevrelerde çalışma yapmak yerine daha farklı şartlara sahip daha farklı bölgelere çalışmanın önünü açmaktadır. Böylece çalışmalar ekolojik olarak bir birinden oldukça farklı olan çevrelerde yürütülmesine olanak sağlamaktadır. Böylece araştırmada kullanılan çeşitlerin gerçek performansları ortaya çıkarılabilmektedir.

GGE biplot analizinde çeşitlerin çevrelere uyumları hakkında görsel olarak bize bilgiler vermektedir (Şekil 3). Grafik üzerinde çeşitlerin konumlandıkları bölge ile çevreye olan yakınlıkları veya uzaklıkları ile çeşitlerin grafiğin merkezine ve

çevrelere ait vektörlerin merkezine olan yakınlık ve uzaklıklarına göre bu çeşitlerin özel uyum, genel uyum yetenekleri konusunda bilgiler sunmaktadır.

Şekil 3: Temsili çeşitlerin temsili çevrelere olan uyum kabiliyetleri



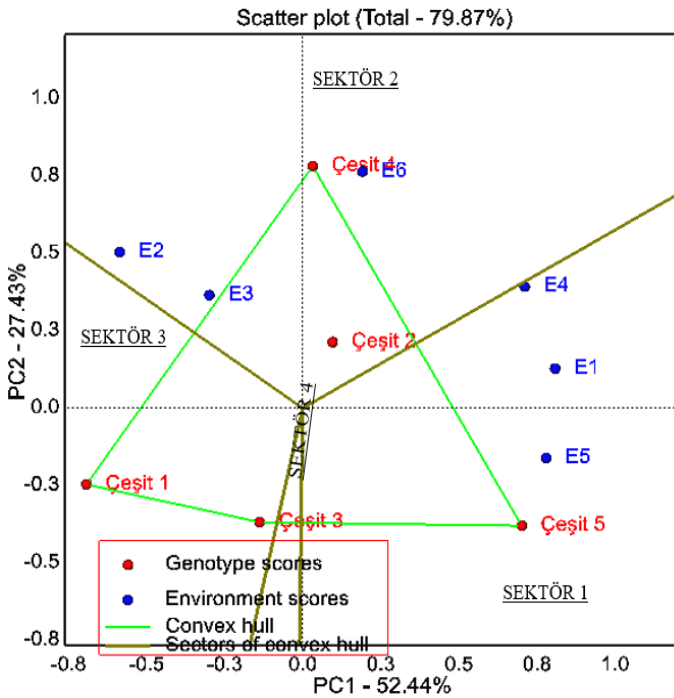
Bu açıklamalarına göre temsili Çeşit 4'ün genelde tüm çevrelerin merkezinde yer aldığı için genel uyum özelde ise temsili E6'ya en yakın noktada konumlandığı için bu çevreye özel uyum gösterdiğini söylemek mümkündür. Çeşit 2 grafiğin merkezine yakın noktada ve vektörlerin ortasında konumlandığı için tüm çevrelere orta uyum göstermektedir. Çeşit 5 ise E5' en yakın noktada ve diğer çevrelerden uzak bir noktada konumlandığı için sadece E5 için özel uyum sergilemiştir. Çeşit1 ve Çeşit 3 ise hem çevrelerin konumlandığı bölgelerin tam tersi istikametinde ve grafiğin merkezinden uzak bölgelerde konumlandıklarından dolayı bu her iki çeşidin bu çevrelere zayıf veya kötü uyum sergilediklerini

dolayısıyla yapılacak üretimlerde bu iki çeşidin bu çevrelerde yetiştirilmemesi gerektiğini söylemek mümkündür (Şekil 3).

Mega grup çevreler için en uygun çeşitleri belirleyen sektör analizi (Hangi çeşit, hangi çevre grubu için en uygun)

GGE biplotun çokgen görünümü sektör analizi(Şekil 4) olarak adlandırılır, her çevrede ve çevre grubunda en iyi çeşitleri göstermektedir (Yan & Hunt 2002).

Şekil 4. Çeşit ve çevrelerin sektör analizi



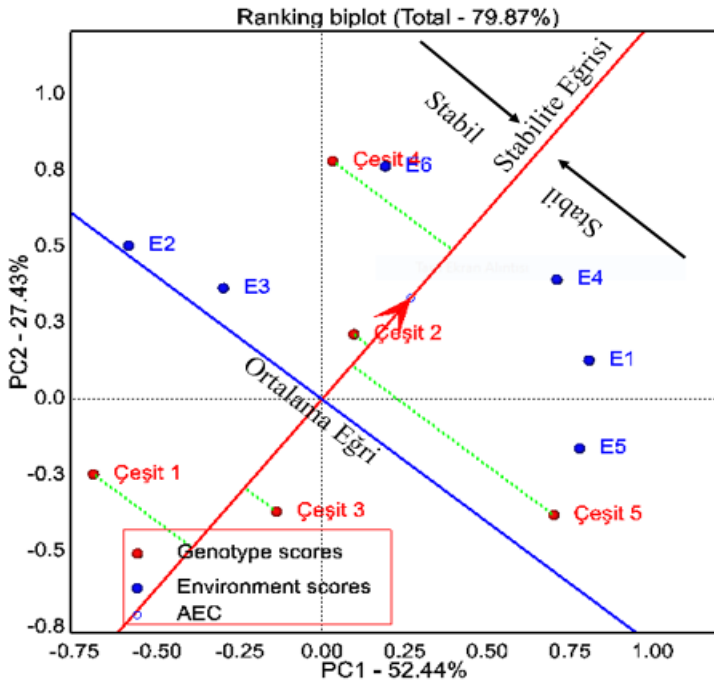
Çokgen, biplot orijininden en uzakta olan çeşitlerin işaretleyicilerini birleştirerek oluşturulur, böylece diğer tüm çeşitler çokgenin içinde kalır. Barlar, çokgenin kenarlarına veya uzantılarına dik olan çizgilerdir (Yan 2002). 1. bar, Çeşit 4 ve Çeşit 5 ve yakın grubunu birbirine bağlayan kenara diktir; 2. bar, Çeşit 5 ve Çeşit 3 ve yakın grubunu birbirine bağlayan kenara diktir ve bu böyle devam eder. Bu dört bar, biplotu(grafiği) dört bölüme ayırır ve dört alan bu dört

bölümün dördüne dağılmıştır. Her çeyrekte yer alan köşe çeşitler, o çeyrekte yer alan çevreler için en yüksek performans gösteren çeşitlerdir. 1. Sektörde yer alan E5, E1 ve E4 çevrelerinde en yüksek performans Çeşit 5' te, 2. Sektörde yer alan E2, E3 ve E6 çevre grubunda en yüksek performans Çeşit 4 ve Çeşit 2'de görüldüğünü, 3. ve 4. sektörde köşede yer alan Çeşit 1 ile Çeşit 3 dört bölgenin tamamında en düşük performans sergilediklerini söylemek mümkündür.

Çeşitlerin çevrelerdeki performansları ve stabiliteeleri

Temsili olarak çalışmada kullanılan 5 adet çeşidin 6 farklı çevredeki stabilite durumları Şekil 5'te gösterilmiştir.

Şekil 5: Çeşitlerin farklı çevrelerdeki stabilite durumları



Biplot orijininin sol üstten sağ alta doğru uzanan eğriye ortalama çevre eksenidir ve bu eksen tüm çevrelerin ortalama birinci ve ikinci temel bileşen skorları ile tanımlanır. Bu eğrinin sol tarafından

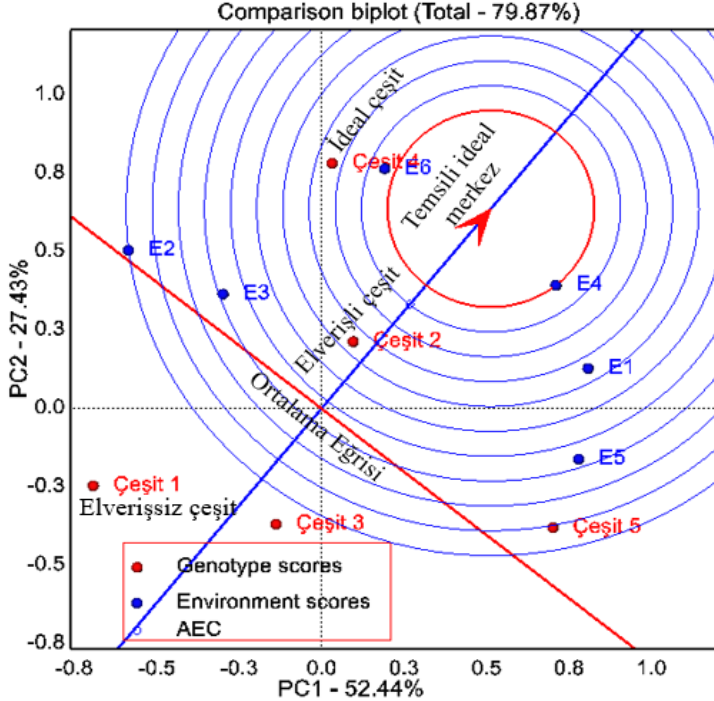
yer alan çeşitler (Çeşit 1 ve Çeşit 3) düşük verim performansına sahip olurken, eğrinin sağ tarafında yer alan çeşitler(Çeşit 2 ve Çeşit 5 gibi) yüksek performansa sahip olmaktadır. Eğrinin sağında ve en ilerde yer alan çeşitler ise(Çeşit 4) en iyi performans sergilediklerini söylemek mümkündür. Orijinden geçen ve ortalama çevre eksenine dik olan ve ok ile belirlenen eğri ise genotiplerin istikrarı hakkında bize bilgi vermektedir. Bu ekseninde, biplot orijininin herhangi bir yöne doğru olan sapma(Çeşit 5), daha büyük genotip çevre etkileşimini ve düşük stabilite durumunu, orijindeki eksene(eğri) yakınlık (Çeşit 2) ise yüksek istikrarı göstermektedir (Yan & Hunt 2002). Geniş çaplı seleksiyon için ideal genotipler, hem yüksek ortalama verime hem de yüksek istikrara sahip olanlardır. Biplotta, orijine yakındırlar ve ortalama çevre ekseninden en kısa vektöre sahiptirler. Bu açıklamaya göre Çeşit 2 tüm çevreler için en stabil çeşit olarak görülmektedir. Öte yandan, belirli bir seçim için ideal genotipler, yüksek ortalama verime sahip ancak düşük istikrar gösteren ve belirli çevrelere en iyi şekilde yanıt veren genotiplerdir (Rakshit ve ark. 2012). Buna göre Çeşit 5 birinci Mega çevre (E1, E4 ve E5) için Çeşit 4 ise mega-çevre 2 (E2, E3 ve E6) için en ideal çeşit olduklarını söylemek mümkündür. Ayrıca ortalama eğrinin altında yani solunda yer alan Çeşit 1 ve Çeşit 3 oldukça düşük performans gösterdikleri ve istikrarlı çeşit olmadıklarını söyleyebiliriz. Bu GGE biplot analizi, yapılan ıslah çalışmalarında seleksiyonda stabilite eğrisi üzerinde ve yakınında konumlanan yani stabilite eğrisinden sapma derecesi düşük olan genotipleri pozitif seleksiyonda seçmemize yardımcı olmaktadır.

Çevre ortalamaları üzerinden oluşturulan temsili ideal merkeze göre ideal, elverişli ve elverişsiz çeşitler

Temsili olarak çalışmada kullanılan 5 adet çeşidin 6 farklı çevredeki elverişlik durumları Şekil 6'da gösterilmiştir. Biplot orijininin sol üstten sağ alta doğru uzanan eğriye ortalama çevre eksenini denir ve bu eksen tüm çevrelerin ortalama birinci ve ikinci temel bileşen skorları ile tanımlanır. Bu eğrinin sol

tarafından yer alan çeşitler (Çeşit 1 ve Çeşit 3) düşük verim performansına sahip olurken, eğrinin sağ tarafında yer alan çeşitler(Çeşit 2 ve Çeşit 5 gibi) yüksek performansa sahip olmaktadır.

Şekil 6: Temsili ideal çevreye göre ideal ve elverişli çeşitler



Eğrinin sağında ve ideal merkeze en yakın yerde konumlanan çeşitler ise(Çeşit 4) en iyi performans sergilediklerini söylemek mümkündür (Yan & Hunt 2002). İdeal merkeze en yakın olan Çeşit 4 en ideal çeşit, İdeal merkez ile ortalama eğri arasında yer alan Çeşit 2 ve Çeşit 5 elverişli, ortalama eğrinin altında yer alan Çeşit 1 ve Çeşit 3 ise elverişsiz çeşitler olduklarını söylemek mümkündür. Bu GGE biplot analizi, yapılan ıslah çalışmalarında seleksiyonda ideal merkezin ortasında ve yakınında konumlanan genotipleri pozitif seleksiyonda seçmemize yardımcı olmaktadır.

Tartışma

GGE biplot analizi, ana etkiler ve çarpımsal etkileşim (Gauch 1992), ortak regresyon ve genetik korelasyon yöntemlerinin bazı özelliklerini bir arada kullanarak genotip x çevre etkileşimini görsel olarak yorumlanmasına olanak sağlayan ve araştırmacıların son dönemlerde çokça başvurduğu bir analiz metodudur (Yan & Wu, 2008). Birinci tanımlama, denemeler arasındaki genetik korelasyona benzer şekilde, çevreler arasındaki karşılıklı ilişkiyi göstermektedir. Çevreler arasındaki karşılıklı ilişkilerin grafiği, denemeler arasındaki korelasyonu gösterir. Denemeler arasındaki ilişkinin göreceli eğilimi açısından, GGE biplotu, genetik korelasyonu kullanılarak yapılan tahminlerle aynı deseni göstermektedir. En yüksek korelasyon E2 ve E3 arasında, bu çevrelerin birinci gruptaki diğer denemeler (E5 gibi) arasında ise negatif veya sıfır korelasyon görülmektedir. Bu analizin en zayıf tarafı Biplot, GGE varyasyonunun %100'ünü açıklamadığı sürece bazı tutarsızlıkların ortaya çıkma ihtimali mevcuttur. Bu yüzden tutarlılık güçlü varyasyona bağlı olduğu için tutarlı sonuçlar için varyasyonu % 100' e yaklaştırmamızda fayda vardır. İkinci tanımlama, genotipler ve çevreler arasındaki etkileşimi görselleştirme yeteneğini göstermektedir (hangisi çeşit hangi çevreye uyumlu). GGE biplot, genotip ana etkisi ile genotip x çevre etkileşimi anlamına geldiği bildirilmektedir (Ma Ve ark., 2004; Tekdal ve Kendal, 2018). Bunların her ikisi de temel bileşen analizinin istatistiksel modeline dayanmaktadır. GGE biplot analizi, çevre merkezli temel bileşen analizine dayanırken, ana etkiler ve çarpımsal etkileşim analizi ise çift merkezli temel bileşen analizi olarak adlandırılmaktadır (Akcura ve ark., 2011; Kroonenberg 1995). Bununla birlikte, amaç "hangi çeşit hangi çevreye uyumlu" ise, ana etkiler ve çarpımsal etkileşim yanıltıcı olabilir (Yan & Ma 2006). GGE biplot, ana etkiler ve çarpımsal etkileşimin sahip olmadığı birçok görsel yoruma sahip olup özellikle herhangi bir çaprazlama genotip x çevre etkileşiminin görselleştirilmesine olanak tanımaktadır. Genotip çevre

etkileşiminin bu kısmı genellikle bir ıslah programı için çok önemli olup ayrıca, farklı toplamsal ana etkiler ve çarpımsal etkileşim aile modelleriyle karşılaştırıldığında (Dias & Krznowskib 2003; Zobel ve ark., 1988), GGE biplotu genellikle en iyi ana etkiler ve çarpımsal etkileşim modeline yakın olduğu bildirilmektedir (Yan & Ma 2006, Tekdal ve Kendal, 2018). Dahası, GGE biplotu, toplam düzeyden ziyade genotipik düzeyi temsil eden ilk temel bileşen puanını açıklama açısından biyolojik amaçlar için daha mantıklı olduğu bildirilmektedir (Yan ve ark., 2000). Üçüncü tanımlama, hem genotiplerin ortalama performansı hem de stabilite temelinde genotipler arasındaki karşılıklı ilişkiyi görselleştirmektir. Genotip ortalamalarının ve istikrarlarının görselleştirme grafiği, dört gruba ayrılmış farklı genotip gruplarını göstermektedir (Kendal ve ark., 2019). Birinci grup, yüksek verim ve yüksek istikrar ile oldukça arzu edilen bir gruptur. Yüksek verim ancak düşük istikrara sahip grup, belirli bir seleksiyon için arzu edilirken, düşük verim ve düşük istikrara sahip grup, kuraklığa, soğuğa hastalığa dayanıklılık seleksiyonu gibi özel ıslah amaçları için bir tercih olabilir. En istenmeyen grup ise düşük verim ancak yüksek istikrara sahip gruptur. Sınıflandırma, ortak regresyon kullanan birey davranış grafikleri üzerine yapılan önceki çalışmalara (Finlay & Wilkinson 1963) benzerdir. Dahası, GGE biplot, sadece farklı genotip gruplarını değil, aynı zamanda tercih ettikleri çevreleri de göstermektedir. Klasik ortak regresyon yönteminin bilgilendirici olduğu varsayılırsa, GGE biplot analizinin sonuçları da benzer şekilde bilgilendirici olduğunu söylemek mümkündür.

GGE biplotunun sınırlamaları, toplam genotip ve genotip x çevre etkileşiminin yalnızca küçük bir bölümünü açıklayabilmesidir. Bu durum, genotip ana etkisinin, genotip x çevre etkileşiminden önemli ölçüde küçük olduğu ve genotip x çevre etkileşim modelinin karmaşık olduğu durumlarda ortaya çıkabilmektedir. Bu durumlarda, birinci ve ikinci temel bileşenlerden oluşan GGE biplotu, çoklu çevre denemelerinin değerlendirilmesinde en önemli modellerden biri gösterilmiş olsa bile, bazen GGE'yi açıklamak için

yetersiz kalabilmektedir (Yan & Rajcan 2002). Hipotez testine olanak tanıyan geleneksel yaklaşımların aksine, GGE biplot yaklaşımı ciddi bir istatistiksel test içermemektedir. Bu nedenle, GGE biplot, karar verici olmaktan ziyade hipotez oluşturunca olarak daha iyi kullanılmaktadır(Yan & Rajcan 2002).

Sonuç ve öneriler

Bitki ıslah çalışmalarında çoklu çevre şartlarında çok sayıda genotip ile yürütülen çalışmalarda en uygun çevreleri ve en uygun genotipleri belirlemek ve seleksiyon yapmak için grafiksel olarak araştırmacılara oldukça yardımcı olan ve araştırmacıların işini kolaylaştıran bir metod olarak görülmektedir. Normal analiz yöntemlerinde verileri yorumlamak oldukça karmaşık bir durum oluştururken GGE biplot sayesinde oluşturulan grafiklerle bu karmaşıklık bertaraf edilmekte ve daha sade bir gözlem ile oldukça basit bir şekilde yorumlama yapmak imkanı sağlanmaktadır. Çevreler arasındaki korelasyon ilişkilerini, büyük çevre gruplarını, genotip çevre ilişkilerini, özel çevreleri, yüksek veya düşük performans gösteren genotipleri, stabil genotipleri, ideal genotipleri belirleyen ve bu kolaylığı araştırmacılara sunan bir metod olarak değerlendirilmektedir. Bu nedenle çoklu çevre şartlarında çok sayıda genotip ile yapılan denemelerin değerlendirilmesinde bu metodun ıslahçılar tarafından kullanılması önerilmektedir. Ayrıca bitki gruplarına ek olarak, hayvan çalışmaları, ekoloji çalışmaları, birey (insan) çalışmaları gibi farklı alanlarda özellikle birey çevre ilişkilerinin etkileşimi olan alanlarda rahatlıkla kullanılması önerilmektedir.

Kaynakça

Ades, P.K., Garnier-Géré, P.-H. (1997). Making sense of provenance $\times$ environment interaction in *Pinus radiata*. Pp. 113–119 in Burdon, R.D.; Moore, J.M. (ed.) “İUFRO ’97 genetics of radiata Pine”. Proceedings of NZ Fri-iUFrO Conference 1–4 December and Workshop 5 December, rotorua, New Zealand. FRI Bulletin No.203.

Akcura, M., Taner, S., & Kaya, Y. (2011). Evaluation of bread wheat genotypes under irrigated multi-environment conditions using GGE biplot analyses.

Burdon, R.D. (1977). genetic correlation as a concept for studying genotype-environment interaction in forest tree breeding. *Silvae Genetica* 26(5–6): 168–175.

Butrón, A., Velasco, P., Ordás, A., Malvar, R.A. (2004). Yield evaluation of maize cultivars across environments with different levels of pink stem borer infestation. *Crop Science* 44: 741–747.

Cooper, M., Hammer, G.I. (1996). Plant Adaptation and Crop improvement. CAB international, Wallingford. CROSSA, J., Cornelius, P.L., Yan, W. (2002). Biplots of linear-bilinear models for studying crossover genotype $\times$ environment interaction. *Crop Science* 42: 136144.

Dehghani, H.A., Ebadi, Yousefi, A. (2006). Biplot analysis of genotype by environment interaction for barley yield in iran. *Agronomy Journal* 98: 388–393.

Delacy, I.H., Basford, K.E., Cooper, M., Bull, J.K. (1996). Analysis of multi environment trials an historical perspective. In Cooper, M., Hammer, G.L. (ed.) Plant Adaptation and Crop improvement. CAB iinternational.

Dias, C.T. Dos S., Krzanowskib, W.J. (2003). Model selection and cross validation in additive main effect and multiplicative interaction models. *Crop Science* 43: 865–873

Eberhart, S.A., Russel, W.A. (1966). Stability parameters for comparing varieties. *Crop Science* 6: 36–40.

Finlay, K.W., Wilkinson, G.N. (1963). The analysis of adaptation in a plant breeding programme. *Australian Journal of Agricultural Research* 14: 742–754.

Gabriel, K.R. (1971). The biplot graphic of matrices with application to principal component analysis. *Biometrics* 58: 453–467.

Gauch, H.G. (1992). *Statistical Analysis of regional Yield Trials: AMMI Analysis of Factorial Designs*. elsevier, Amsterdam, Netherlands.

Güngör, H., Çakir, M. F., & Dumlupinar, Z. (2022). Evaluation of triticale: genotype by environment interaction and GGE Biplot Analysis. *JAPS: Journal of Animal & Plant Sciences*, 32(6).

Johnson, G.R., Burdon, R.D. (1990). Family-site interaction in *Pinus radiata*: implications for progeny testing strategy and regionalized breeding in New Zealand. *Silvae Genetica* 39: 55–62.

Kaya, Y.M., Akcura; Taner, S.(2006). GGE-biplot analysis of multi-environment yield trials in bread wheat. *Turkish Journal of Agriculture & Forestry* 30: 325–337.

Kendal, E., & Sayar, M. S. (2016). The stability of some spring triticale genotypes using biplot analysis. *JAPS: Journal of Animal & Plant Sciences*, 26(3).

Kendal, E., & Sener, O. (2015). Examination of genotype× environment interactions by GGE biplot analysis in spring durum wheat. *Indian J. Genet*, 75(3), 341-348.

Kendal, E., Sayar, M. S., Tekdal, S., Aktas, H., & Karaman, M. (2016). Assessment of the impact of ecological factors on yield and quality parameters in triticale using GGE biplot and AMMI analysis. *Pakistan Journal of Botany*, 48(5), 1903-1913.

Kendal, E., Tekdal, S., & Karaman, M. (2019). Proficiency of biplot methods (AMMI and GGE) in the appraisal of Triticale genotypes in multiple environments. *Applied Ecology & Environmental Research*, 17(3).

Kılıç, H. (2014). Additive main effects and multiplicative interactions (AMMI) analysis of grain yield in barley genotypes across environments. *Journal of agricultural sciences*, 20(4), 337-344.

Kroonenberg, P.M. (1995). introduction to Biplots for $g \times e$ Tables. University of Queensland, Brisbane.

Ma, B.L., Yan, W., Dwyer, L.M., Frégeau-reid, J., Voldeng, H.D., Dion, Y., Nass, H. (2004). Graphic analysis of genotype, environment, nitrogen fertilizer, and their interaction on spring wheat yield. *Agronomy Journal* 96: 169–180.

Perkins, J.M., Jinks, J.L. (1968). environmental and genotype-environmental interactions and physical measures of the environment. *Heredity* 25: 29–40.

Rakshit, S., Ganapathy, K. N., Gomashe, S. S., Rathore, A., Ghorade, R. B., Kumar, M. N., ... & Patil, J. V. (2012). GGE biplot analysis to evaluate genotype, environment and their interactions in sorghum multi-location data. *Euphytica*, 185(3), 465-479.

SAS Institute Inc. (1999). SAS language and Procedures. Usage 2, Version 6.WU, H.X.; MATHeSON, A.C. (2005). Genotype

by environment interactions in an Australia wide radiata pine diallel mating experiment: implications for regionalized breeding. *Forest Science* 51: 29–40.

Sayar, M. S., & Han, Y. (2016). Forage yield performance of forage pea (*Pisum sativum* spp. *arvense* L.) genotypes and assessments using GGE biplot analysis. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 18(6), 1621-1634.

Tekdal, S., & Kendal, E. (2018). AMMI model to assess durum wheat genotypes in multi-environment trials. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 20(1), 153-166.

Yamada, Y. (1962). Genotype $\times$ environment interaction and genetic correlation of the same trait under different environments. *Japanese Journal of Genetics* 37: 498–509.

Yan, W. (2002). Singular-value partitioning in biplot analysis of multi-environment trial data. *Agronomy Journal* 94: 990–996.

Yan, W., & Wu, H. X. (2008). Application of GGE biplot analysis to evaluate genotype (G), environment (E), and $G \times E$ interaction on *Pinus radiata*: A case study. *New Zealand Journal of Forestry Science*, 38(1), 132-142.

Yan, W., Hunt, I.A. (2001). Genetic and environmental causes of genotype by environment interaction for winter wheat yield in Ontario. *Crop Science* 41: 19–25.

Yan, W., Hunt, I.A., Sheng, Q., Szlavnicka, Z. (2000). Cultivar evaluation and mega environment investigation based on the gge biplot. *Crop Science* 40: 597–605.

Yan, W., MA, B.L. (2006). Model Diagnosis and gge Biplot Analysis. eastern Cereal and Oilseed research Centre, Agriculture and Agri-food Canada. 39 p.

Yan, W., Rajcan, I.R. (2002). Biplot analysis of test sites and trait relations of soybean in Ontario. *Canadian Journal of Plant Science* 42: 11–20.

Yan, W., Tinker, N.A. (2005). An integrated biplot analysis system for displaying, interpreting, and exploring genotype $\times$ environment interaction. *Crop Science* 45: 1004–1016.

Zobel, R.W., Wright, M.J., Gauch, H.G. (1988). Statistical analysis of a yield trial. *Agronomy Journal* 80: 388–393.

BÖLÜM 8

BRASSİCACEAE FAMILİYASI TOHUM KABUĞU MÜSİLAJI

1. Yusuf Arslan¹

2. İlhan Subaşı²

1. Giriş

Bitkisel kökenli biyopolimerler arasında yer alan müsilağlar, yüksek molekül ağırlıklı ve su ile etkileşime girerek jel benzeri yapı oluşturabilen polisakkarit bileşiklerdir. Bu bileşikler, bitkilerde çoğunlukla tohum kabuğu, yaprak ve kök dokularında sentezlenmekte; fizyolojik olarak ise su tutma, çimlenme kolaylaştırma ve çevresel streslere karşı koruma gibi işlevler üstlenmektedir. Özellikle *Brassicaceae* familyasına ait türlerin tohum kabuklarında yoğunlaşan müsilağ fraksiyonu, tohumun hidrasyon kapasitesini artırarak erken dönem gelişimi destekleyen bir mikro-ortam oluşturmaktadır.

Doğal polisakkaritlere yönelik ilginin artmasında, sentetik katkı maddelerine yönelik kısıtlamalar, tüketici tercihlerinin değişmesi ve sürdürülebilir üretim yaklaşımlarının ön plana çıkması belirleyici olmuştur. Bu bağlamda, *Brassicaceae* kökenli müsilağlar; yenilenebilir, biyobozunur ve toksik olmayan yapıları sayesinde gıda, farmasötik ve çevresel uygulamalar için güçlü adaylar olarak değerlendirilmektedir.

¹ Prof. Dr., Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi Ziraat Fakültesi, Tarla Bitkileri, Bölümü. Orcid: 0000-0001-8496-6037

² Doç. Dr., Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi Ziraat Fakültesi, Tohum Bilimi ve Teknolojisi Bölümü. Orcid: 0000-0001-7237-937X

Familya, dünya genelinde yaklaşık 340 cins ve 3.700'den fazla tür içermektedir (Warwick vd., 2010). Familyaya ait türler, yalnızca tarımsal üretimde değil, aynı zamanda gıda, ilaç, kozmetik ve endüstriyel uygulamalarda da kullanılmaktadır. Son zamanlarda doğal polisakkaritlere ilginin artmasıyla, familyaya mensup türlerin müsilaaj içeriklerine olan ilgi de artmıştır. Familyaya ait türlerden elde edilen polisakkaritler, özellikle tohum kabuklarında yoğunlaşmıştır. Özellikle asıl üretim amacı yağı ve yağlı tohum küspesi olan ketencik ve kanola bitkilerinin tohumlarının kabuk kısmı, aslında hayvan beslenmesi için istenmeyen bileşikler içermektedir. Bu kısmının soyularak alınması, bu bitkilerden elde edilecek olan yağlı tohum küspesinin hem besleme değerini hem de ekonomik değerini artıracaktır. Tohumdan ayrılan kabuk yüksek oranda müsilaaj içereceğinden dolayı, ekonomik anlamda, diğer çıktılarından daha değerli bir ürün elde edilmiş olacaktır.

Doğal polisakkaritlere olan talep, özellikle gıda ve ilaç endüstrilerinde her geçen gün artış göstermektedir. Gıda endüstrisinde emülgatör, stabilizatör, kıvam artırıcı ve jel oluşturuıcı olarak yaygın şekilde kullanılan müsilaajlar; ürün dokusunun iyileştirilmesi, raf ömrünün uzatılması ve işleme esnasında stabilitenin artırılması gibi fonksiyonel özellikler sağlamaktadır (Mudgil & Barak, 2013). Ayrıca, biyoyumluluk, toksik olmama ve yenilenebilir olması nedeniyle farmasötik formülasyonlarda da bağlayıcı, kontrollü salım matrisi veya kapsülasyon ajanı olarak kullanılmaktadır (Saha & Bhattacharya, 2010). Çevresel sürdürülebilirlik ve geniş fonksiyonel özellik yelpazesinin çokluğuyla doğal hidrokolloidlerin sentetik olanlara kıyasla kıyasla daha avantajlı olmasına neden olmaktadır. Son yıllarda yapılan çalışmalarda *Lepidium*, *Capsella*, *Sisymbrium*, *Raphanus* ve *Camelina* gibi birçok cinsin türlerinin tohumlarının yüksek oranda müsilaaj içerdiği ve kimyasal, fonksiyonel ve reolojik özelliklerinin

endüstriyel kullanıma uygun nitelikte olduğu bildirilmiştir (Násir vd., 2020).

Müsilajların karekterize edilmesinde kullanılan faktörlerden biri de monosakkarit profilleridir. Farklı türlerden elde edilen müsilajların; su tutma kapasitesi, şişme indeksi, viskozite yapısı da farklılık gösterecektir. Polisakkaritlerin bileşiminin türlere göre değişiklik göstermesi, endüstriyel kullanım alanlarını da çeşitlendirecektir. Örneğin; galakturonik asit ağırlıklı müsilajlar, jel oluşturma ve su bağlama kapasitesini artırdığı; molekül büyüklüğünün çözeltinin viskozitesini arttırdığı, yüksek dallanma derecesi, polimer zincirlerinin su içinde daha homojen dağılmasını sağladığı bildirilmiştir (Swanson, 2003).

Ülkemiz, diğer birçok familyada olduğu gibi *Brassicaceae* familyasına ait tür çeşitliliğinde de oldukça zengin bir ülkedir. Son sınıflandırmada, *Brassicaceae* familyasına mensup 91 cins ve bu cinslere mensup 571 tür, 65 alt tür ve 24 olduğu bildirilmiştir (Al-Shehbaz vd., 2007). Familyanın türleri, farklı coğrafi bölgelere ve ekolojik koşullara uyum sağlamıştır. Farklı yükselti ve ekolojik şartlar, doğal tozlanmalar genetik ve morfolojik farklılaşmayı beraberinde getirmiştir. Sonuç olarak da gerek çevreden gerekse de genetik farklılıklardan kaynaklı olarak farklı kompozisyona ve içeriğe sahip genotiplerin ortaya çıkmış olması muhtemeldir. Bu durum, ülkemiz doğal florasında müsilaj üretimi açısından değerlendirilebilecek çok sayıda yerel tür bulunduğu anlamına gelmektedir. Ancak bu türlerin önemli bir kısmı henüz detaylı kimyasal ve fonksiyonel analizlere tabi tutulmamıştır. Bitkisel kaynaklı müsilaj eldesi konusunda araştırmaların artması, bölgesel ve yerel bitkisel kaynakların ekonomik değerini artırarak kırsal kalkınmaya katkı sağlayacaktır.

Familya içerisinde müsilağ elde edilen türler, özellikle *Brassica*, *Camelina*, *Sinapis*, *Lepidium*, *Arabidopsis* ve *Erysimum* cinslerinde yoğunlaşmaktadır (Meyer vd., 2011).

Tablo 1: Önemli Brassicaceae Türleri ve Müsilaj İçerikleri

Tür Adı	Yaygın Adı	Müsilağ İçeren Kısım	Müsilağ Verimi (%)	Ana Bileşenleri	Polisakkarit
<i>Sinapis alba</i>	Beyaz hardal	Tohum kabuğu	10-15	Rhamnogalakturnan, arabinoz, galaktoz	
<i>Brassica juncea</i>	Esmer hardal	Tohum kabuğu	8-12	Glukuronik asit, arabinoz, galaktoz	
<i>Lepidium sativum</i>	Tere	Tohum	15-20	Arabinogalaktan, ramnoz, galakturonik asit	
<i>Brassica napus</i>	Kanola	Tohum	5-8	Mannoz, galaktoz, glukoz	
<i>Arabidopsis thaliana</i>	Fare kulağı teresi	Tohum	2-5	Pektik selüloz	polisakkaritler,
<i>Camelina sativa</i>	Ketencik	Tohum	10-15	%75 polisakkarit, protein	%12

2. Bitkisel Kökenli Müsilajların Fonksiyonel ve Reolojik Özellikleri

Müsilağlar, yapısal olarak çoğunlukla heteropolisakkarit karakterinde olup; arabinoz, galaktoz, ramnoz, ksiloz, glukoz ve galakturonik asit gibi monomerlerin farklı oranlarda bağlanmasıyla oluşmaktadır. Bu biyopolimerlerin kimyasal yapılarındaki farklılıklar, fonksiyonel ve reolojik davranışlarını da değiştirmektedir.

Bitkisel müsilağların kimyasal yapılarının farklı olması, onların geniş bir fonksiyonel ve reolojik özellik yelpazesine sahip

olmasına imkân sağlamaktadır. Müsilajların viskozite özellikleri, jel oluşumu, su ve yağ tutma özellikleri ve film oluşturma özellikleri, bir çok alanda kullanım imkanı sunmaktadır.

Tablo 2: Brassicaceae Müsilajlarının Fonksiyonel Özellikleri

Özellik	<i>Sinapis alba</i>	<i>Brassica juncea</i>	<i>Lepidium sativum</i>	Metod
Su tutma kapasitesi (g/g)	25.3 ± 1.2	18.7 ± 0.9	35.6 ± 1.8	AACC Metodu 56-30
Yağ tutma kapasitesi (g/g)	3.2 ± 0.3	2.8 ± 0.2	4.1 ± 0.4	Beuchat (1977) metodu
Emülsiyon aktivitesi (%)	68.5 ± 2.1	62.3 ± 1.8	75.4 ± 2.3	Pearce & Kinsella (1978)
Emülsiyon stabilitesi (saat)	24.5 ± 1.5	18.7 ± 1.2	32.6 ± 2.1	-

3. Biyolojik Aktivite ve Farmasötik Uygulamalar

Brassicaceae müsilajları, çeşitli biyolojik aktivitelere sahiptir. Bunları, dört farklı alt başlık halinde verebiliriz.

3.1. Antioksidan Aktivite

Genellikle içeriklerinde bulunan fenolik bileşikler, flavonoidler, karbonhidrat yapılarına bağlı indirgen özellikler, protein-polisakkarit kompleksleri ve Maillard reaksiyonu ürünleri ile ilişkilendirilmektedir. Tohum kaynaklı polisakkaritlerin çoğu yapısal olarak nötr veya hafif asidik karakter taşımakla birlikte, yapılarında bulunan glukuronik asit, galakturonik asit ve sülfat grupları, bu polisakkaritlerin radikal süpürücü özelliklerinin güçlü olduğunu göstermektedir (Razavi & Cui, 2016). Bitkisel kökenli müsilajların antioksidan kapasitesinin araştırılması, hem doğal

antioksidan kaynaklarının ortaya çıkarılması ve tanımlanması, hem de gıda formülasyonlarında doğal ve sürdürülebilir katkıların elde edilmesinin sağlaması bakımından önem taşımaktadır (Thakur vd., 2019).

Brassicaceae türlerinden elde edilen müsilajlarda antioksidan aktivite, çoğunlukla DPPH, ABTS, FRAP, CUPRAC gibi spektrofotometrik yöntemlerle değerlendirilmiştir. Örneğin, *Lepidium sativum* (tere) tohumundan ekstrakte edilen müsilajın yüksek DPPH radikal süpürme kapasitesine sahip olduğu ve bunun özellikle yapısındaki fenolik maddeler ile uronik asit içerikleriyle bağlantılı olduğu bildirilmiştir (Saeed vd., 2019). Benzer şekilde, *Sinapis alba* ve *Brassica rapa* türlerinden elde edilen müsilaj fraksiyonlarının hem DPPH hem de ABTS analizlerinde belirgin antioksidan aktivite sergilediği ve bunun polisakkarit zincirlerindeki fonksiyonel gruplara bağlı olduğu belirtilmiştir (Kaur & Sharma, 2020).

Antioksidan aktivitenin önemli belirleyicilerinden biri de müsilajların moleküler ağırlığı ve şube yapısıdır. Düşük molekül ağırlıklı polisakkaritlerin genellikle daha yüksek radikal süpürme kapasitesi gösterdiği, buna karşılık yüksek molekül ağırlıklı ve daha kompleks yapıya sahip polisakkaritlerin oksidatif stabilite üzerinde daha koruyucu bir etki sağladığı rapor edilmiştir (Wang vd., 2020).

Brassicaceae müsilajlarının antioksidan aktivitesinin bir diğer önemli yönü ise metal iyonlarını şelatlama kapasiteleridir. Bazı *Brassicaceae* türlerinden elde edilen polisakkaritlerin Fe^{2+} ve Cu^{2+} gibi prooksidan metal iyonlarını bağlama yeteneğine sahip olduğu, dolayısıyla lipid oksidasyonunu engelleyebildiği belirtilmiştir (Hassan vd., 2021). Bu özellik özellikle gıda endüstrisinde, oksidatif bozulmanın azaltılması amacıyla doğal katkı maddesi olarak kullanım potansiyelini artırmaktadır.

3.2. *Brassicaceae* Müsilajlarının Antiülser Aktivitesi

Bitkisel polisakkaritlerin mide mukozasını koruma, inflamasyonu azaltma ve oksidatif stresi engelleme gibi özellikleri göz önüne alındığında, *Brassicaceae* kaynaklı müsilağların antiülser aktivite potansiyeli önemle incelenmesi gereken bir konu hâline gelmektedir (Singh vd., 2020). *Brassicaceae* familyasında yer alan türlerin tohum ve yapraklarından elde edilen polisakkaritler genellikle arabinan, galakturonan, ramnogalakturonan ve glukuronik asit türevlerini içermektedir. Bu bileşiklerin hidrofilik karakteri ve jel oluşturan özellikleri, gastrik mukozanın iritan maddelere karşı korunmasını sağlayan fiziksel bir bariyer oluşturduğu bildirilmiştir (Razavi & Cui, 2016).

Ülser oluşumunda oksidatif stresin önemli bir rol oynadığı, *Lepidium sativum*, *Brassica oleracea*, *Eruca sativa* ve *Sinapis alba* gibi *Brassicaceae* türlerinden elde edilen polisakkaritlerin serbest radikal süpürme, metal iyonu şelatlama ve lipid peroksidasyonunu engelledikleri için antiülser aktiviteye doğrudan katkı sağladığı bildirilmektedir (Hassan vd., 2021). Antiülser özellik taşıyan doğal polisakkaritler, kontrollü salım tabletleri, mukoadheziv ilaç taşıyıcı sistemler, biyopolimer bazlı kapsüller ve gastro-retentif formülasyonlar için uygun adaylar olarak değerlendirilmektedir. Bu polisakkaritlerin şişme kapasitesi, jel oluşturma yeteneği, biyoyumluluk ve düşük toksisite gibi avantajları, antiülser ilaçların hedefe yönelik ve uzun süreli salımında önemli bir rol oynamaktadır (Li vd., 2020).

Lepidium sativum tohum müsilağının siklooksijenaz (COX) yolları üzerindeki düzenleyici etkileri sayesinde inflamasyon belirteçlerini azalttığı ve gastrik iyileşmeyi desteklediği bildirilmiştir (Saeed vd., 2019). Benzer şekilde, *Eruca sativa* ekstraktlarında bulunan polisakkarit ve fenolik bileşik kombinasyonu, mide mukozasının yenilenmesini hızlandırarak ülser dokusunun küçülmesine yardımcı olmaktadır (Khan vd., 2020). Bazı polisakkaritlerin gastrik asit salınımını azaltarak mide pH'sını

dengede tuttuğu ve böylece mukozal doku üzerindeki asidik yıpranmayı azalttığı belirtilmiştir. Bu durum, *Brassica oleracea* türüyle yapılan deneysel çalışmalarla desteklenmiştir (Alqasoumi vd., 2018).

3.3. *Brassicaceae* Müsilajlarının Antiinflamatuvar Aktivitesi

Brassicaceae familyasından elde edilen polisakkaritlerin özellikle ramnogalakturnan, arabinogalakturnan ve galakturonik asit türevlerinden zengin olduğu bilinmektedir. Bu yapılar, inflamatuvar hücrelerin aktivasyonunu sınırlandırma, oksidatif stresi azaltma ve inflamatuvar medyatörlerin salınımını kontrol altına alma gibi mekanizmalarla antiinflamatuvar etki göstermektedir (Li vd., 2020). Familyaya ait birçok türün polisakkarit ekstraktlarının pro-inflamatuvar sitokinleri (TNF- α , IL-1 β , IL-6) baskıladığı ve aynı zamanda anti-inflamatuvar sitokinlerin (IL-10) sentezini artırdığı çeşitli çalışmalarda rapor edilmiştir. Örneğin *Lepidium sativum* tohum müsilajının, lipopolisakkarit (LPS) kaynaklı makrofaj aktivasyonunda NO (nitrik oksit) retimini düşürdüğü ve iNOS ekspresyonunu azalttığı belirtilmiştir (Saeed vd., 2019). Benzer şekilde, *Eruca sativa* yapraklarından elde edilen polisakkarit fraksiyonlarının COX-2 ve LOX enzim aktivitelerini inhibe ederek inflamatuvar eikozanoidlerin oluşumunu sınırlandırdığı bildirilmiştir (Khan vd., 2020). Lahana ve brokoli gibi türlerden elde edilen polisakkaritlerin, inflamatuvar bağırsak hastalıkları (IBD) modellerinde kolon dokusunda demi azalttığı, MPO aktivitesini düşürdüğü ve doku bütünlüğünü koruduğu bildirilmiştir (Alqasoumi vd., 2018). Antiinflamatuvar etkilerinin, yalnızca biyokimyasal etkiyle değil, aynı zamanda bağırsak florası üzerindeki olumlu etkisiyle de ilişkili olabileceği, polisakkarit yapıları, prebiyotik özellik göstererek yararlı bakterilerin çoğalttığı ve bozulan bağırsak dengesinin yeniden sağlanmasına katkıda bulunabileceği de bildirilmiştir (Hassan vd., 2021).

3.4. *Brassicaceae* Müsilajlarının Yara İyileştirme Özelliği

Müsilajlar, hidrofilik yapıları, biyouyumlulukları, düşük toksisiteye sahip olmaları ve epitelizasyon sürecini destekleyici özellikleri sebebiyle tıbbi kullanım açısından önemli bir potansiyele sahip oldukları bildirilmektedir (Razavi & Cui, 2016). *Brassicaceae* familyasından elde edilen polisakkaritlerin özellikle yüksek su tutma kapasitesi, koruyucu jel oluşturma yeteneği ve proliferatif aktiviteleri destekleyen yapıları sayesinde yara dokusunun nemli ve stabil bir ortamda iyileşmesine imkân tanıdığı bildirilmektedir (Li vd., 2020).

Familyanın türlerinde bulunan müsilajların temel etkilerinden biri de hidrojel film tabakası oluşturarak yaranın kurumasını engellemesi ve bu sayede epitel hücre göçünü hızlandırmasıdır. Örneğin *Lepidium sativum* tohum müsilajının oluşturduğu jel tabakasının yara bölgesinde koruyucu bir bariyer görevi gördüğü, serbest radikalleri bağlayarak oksidatif hasarı azalttığı ve fibroblast proliferasyonunu desteklediği çeşitli çalışmalar tarafından gösterilmiştir (Saeed vd., 2019). Bu özellikler, müsilajın hem nem tutucu hem de hafif antimikrobiyal bir etki göstermesi ile birleşerek yara iyileşmesi için ideal bir ortam oluşturur.

Brassicaceae familyasının bir diğer önemli üyesi olan *Eruca sativa*, hem yaprak hem de tohumlarından elde edilen polisakkaritler sayesinde yara iyileştirici etkinlik göstermektedir. Bu bitkinin müsilajları; kollajen sentezini artırma, granülasyon dokusu oluşumunu hızlandırma ve epitelizasyon süresini kısaltma gibi etkileriyle bilinmektedir (Khan vd., 2020). *Brassica oleracea* türleri de yara iyileştirme sürecinde önemli bir potansiyele sahiptir. Lahana türlerinden elde edilen polisakkarit ekstraktlarının, deneysel modellerde yara yüzeyini hızla kapattığı, hidroperoksit birikimini

azalttığı ve doku rejenerasyonunu hızlandırdığı bildirilmiştir (Alqasoumi vd., 2018).

Brassicaceae müsilağlarının yara iyileştirici etkisinin yalnızca biyokimyasal mekanizmalardan gelmediği, aynı zamanda mukoadhezif ve reolojik özelliklere de bağlı olduğu bu etkinin de müsilağların yüksek viskozitesi ve jel oluşturma kapasitesi sebebiyle, yara üzerine uygulandıklarında güçlü bir yapışma ve koruyucu kaplama etkisi gösterdiği, bu özelliğin de tıbbi hidrojellerde aranan en temel kriterlerden biri olduğu bildirilmektedir. (Chen vd., 2020).

4. *Brassicaceae* Müsilağlarının Gıda Endüstrisinde Uygulamaları

Günümüzde, doğal ürünlere olan talebin artması ile bitkisel kaynaklı polisakkaritlere olan talebi de artırmıştır. Bitkisel polisakkarit kaynaklarından biri olan familyanın müsilağlarının gıda ürünlerinde kullanım alanlarını beş alt başlık halinde verebiliriz.

4.1. Kıvam Artırıcı ve Stabilizatör Olarak Kullanım

Özellikle; süt ürünleri, çorba ve soslar, bitkisel temelli içecekler, dondurma ve dondurulmuş tatlılar gibi gıdalarda yaygın olarak kullanılma potansiyeline sahiptir. *Lepidium sativum* müsilağının yoğurt ve kefir benzeri fermente ürünlerde kıvam artırıcı olarak etkili olduğu ve serum ayrılmasını azalttığı bildirilmektedir (Razavi vd., 2021).

4.2. Emülgatör ve Emülsiyon Stabilizatörü

Özellikle yağlı gıda sistemlerinde, müsilağların doğal yüzey aktif bileşenleri, ürünün raf ömrünü uzatmaktadır. *Camelina sativa* müsilağının düşük yağlı salata soslarında başarılı bir stabilizatör olduğu gösterilmiştir (Moghadam vd., 2019).

4.3. Yenilebilir Kaplama ve Film Üretiminde Kullanım

Çevre dostu, biyoçözünür film ve kaplama üretimine uygundurlar. Bu kaplamalar; taze meyve ve sebzelerin raf ömrünün uzatılmasında, kuruyemiş ve tohum ürünlerinde oksidasyonu azaltmada, et ve balık ürünlerinde nem kaybını önlemede kullanılabilirler. *Camelina* ve *Raphanus* tohum müsilaajlarından üretilen biyofilmlerin antioksidan eklenmesiyle aktif ambalaj malzemesi olarak kullanılabileceği belirtilmiştir (Kumar vd., 2022).

4.4. Glütensiz Ürün Formülasyonlarında Kullanım

Jel oluşturma özellikleri, glütensiz ekmek ve hamur ürünlerinde yaygın bir kullanım alanı sunmaktadır. *Brassicaceae* türlerine ait polisakkaritler; hamur viskozitesini artırmak, pişmiş ürünün gözenek yapısını iyileştirmek ve bayatlamayı geciktirmek amacıyla kullanılmaktadır. Ayrıca, *Lepidium sativum* müsilaajının glütensiz ekmeklerde hamur elastikiyetini artırdığı ve ekmek hacmini yükselttiği bildirilmiştir (Haque vd., 2019).

4.5. Fonksiyonel Gıda ve Diyet Ürünlerinde Kullanım

Yüksek lif içeriğine sahip olmaları nedeniyle prebiyotik etki gösterebilmekte, bağırsak fonksiyonlarını düzenlemekte ve düşük kalorili ürünlerde hacim artırıcı olarak kullanılmaktadırlar. Gıda takviyelerinde, diyet lif karışımlarında ve fonksiyonel içeceklerde doğal lif kaynağı olarak değerlendirilmektedirler.

5. Diğer Endüstriyel Uygulamalar

5.1. Kozmetik Endüstrisinde Kullanımları

Familyaya ait türlerin tohumlarından veya bitki dokularından elde edilen müsilaajlar; su bağlama kapasitesi, jel oluşturma yeteneği, emülsiyon stabilitesi ve biyolojik güvenlikleri nedeniyle geniş bir uygulama alanı bulmaktadırlar (Garti & Leser, 2001). Tohum müsilaajlarının oluşturduğu ince ve yarı geçirgen film, cilt yüzeyinde

nem kaybını azaltarak daha uzun süreli hidrasyon sağlamaktadır (Barak & Mudgil, 2014). *Brassicaceae* tohumlarından elde edilen polisakkaritlerin yüzey gerilimini düşürme ve faz ayrılmasını engelleme yetenekleri, krem ve losyonların yayılabilirliğini artırmakta ve raf ömrünü uzatmaktadır (Garti & Leser, 2001).. *Brassicaceae* müsilaajlarında düşük iritasyon profili rapor edilmiş olup, hassas ciltlere yönelik kozmetik ürünlerde kullanım için uygun olduğu bildirilmiştir (Shahidi & Ambigaipalan, 2015).

5.2. *Brassicaceae* Müsilaajlarının Tekstil Endüstrisinde Kullanımı

Tekstil baskıcılığında baskı patı içinde kullanılan kıvamlaştırıcılar, boyarmaddenin kumaş üzerinde kontrollü yayılmasını ve baskı kalitesinin artmasını sağladığı, *Brassicaceae* polisakkaritlerinin yüksek viskozite oluşturma ve kesme incilmesi gösterme özellikleriyle tekstil baskı patlarında doğal kıvamlaştırıcı olarak değerlendirildiği bildirilmektedir (Güçlü & Şahin, 2018). Ayrıca, familyanın müsilaajlarının film oluşturma ve bağlayıcılık özellikleri, apre işlemlerinde, kumaş üzerinde ince bir tabaka oluşturarak kumaşın tutumunu iyileştirdiği, mukavemetini artırdığı ve yüzey düzgünlüğünü geliştirdiği bildirilmektedir (Barak & Mudgil, 2014). Bitkisel polisakkarit aprelerinin, özellikle pamuk, keten, kenevir gibi doğal lifli kumaşlarda daha belirgin performans gösterdiği de bildirilmektedir (Kumar & Singh, 2021).

6. *Brassicaceae* Müsilaajlarının Çevresel Uygulamaları

Günümüzde artan çevresel kirliliği, su kaynaklarının kirlenmesi ve sürdürülebilir arıtım teknolojilerine olan ihtiyaç, doğal ve çevre dostu çözümleri önemini artırmaktadır. Özellikle su arıtımı, ağır metal giderimi, biyosorpsiyon, toprak iyileştirme ve çevresel biyomateryal üretimi gibi alanlarda bu doğal polisakkaritlerin kullanımı giderek yaygınlaşmaktadır.

Günümüzde endüstriyel faaliyetler sonucu oluşan atık sularda ağır metaller ve sentetik boyalar önemli bir kirlilik kaynağıdır. *Brassicaceae* türlerinden elde edilen müsilağ ve gımlar, fonksiyonel hidroksil, karboksil ve sülfat grupları sayesinde ağır metal iyonlarıyla kolayca bağ oluşturabilmektedir (Kumar & Singh, 2021). *Lepidium sativum* ve *Raphanus sativus* gibi türlerden elde edilen müsilağların Cu^{2+} , Pb^{2+} , Cd^{2+} ve Cr^{6+} iyonlarını çözeltiden etkin bir şekilde uzaklaştırabildiği bildirilmektedir (Mishra vd., 2020). Doğal polisakkaritler sentetik adsorbanlara kıyasla biyobozunur olmaları ve düşük maliyetli üretimleri, bu biyopolimerleri çevre dostu bir alternatif hâline getirmektedir. Ağır metal iyonlarını bağlama kapasiteleri nedeniyle, *Brassicaceae* müsilağlarının su arıtma proseslerinde biyosorbent olarak kullanılabileceği de belirtilmektedir (Farooq vd., 2010).

Müsilağların su arıtımında en önemli kullanım alanlarından biri de flokülasyon prosesleridir. Yüksek viskozite oluşturma ve partikül bağlayıcılığı sayesinde bu biyopolimerler su içerisindeki askıda katı maddeleri, kolloidal parçacıkları ve organik kirleticileri hızla çöktürebilmektedir (Barak & Mudgil, 2014). Özellikle *Sinapis alba* ve *Camelina sativa* tohum müsilağlarının su kaynaklarında bulanıklık gideriminde yüksek verim sağladığı bildirilmiştir (Násir vd., 2020). Bunun yanı sıra müsilağ bazlı kaplamaların, pestisitlerin kontrollü salınımı için çevre dostu kapsülasyon materyali olarak kullanılabileceği belirtilmiştir (Shahidi & Ambigaipalan, 2015).

7. Değerlendirme ve Sonuç

Doğal biyopolimerlere yönelik talebin artması, çevre dostu üretim süreçlerine yönelim ve sürdürülebilir hammadde ihtiyacı, bitkisel kaynaklı polisakkaritlerin ticari önemini artmasından dolayı *Brassicaceae* familyasına ait bitkilerden elde edilen müsilağların ekonomik açıdan önemli bir değer oluşturabileceği görülmektedir. Bu çerçevede, *Brassicaceae* türlerinden elde edilen biyopolimerlerin

Üretim maliyetleri, tedarik zinciri sürdürülebilirliği ve potansiyel pazar büyüklüğü gibi kriterler üzerinden araştırmaların yapılması faydalı olabilecektir.

Doğal gum ve müsilaj pazarının küresel ölçekte büyüdüğü 2024 yılı itibarıyla 12 milyar USD değerine ulaştığı ve 2030’a kadar yıllık %6–8 oranında büyüme göstermesinin beklendiği bildirilmektedir (Market Research Future, 2023). *Brassicaceae* familyası, özellikle *Sinapis alba*, *Raphanus sativus*, *Lepidium sativum*, *Camelina sativa* ve gibi türler, yüksek biyopolimer verimini düşük maliyetle sunma imknı verebilecek özelliktedir. Bu türler ülkemiz iklim şartlarında kolayca yetiştirilebileceği için hammadde temini açısından herhangi bir sorun yaşanmayacaktır.

Brassicaceae türleri, tohum ve kabuk fraksiyonlarında yüksek oranda su çözünür polisakkarit içermeleri nedeniyle endüstriyel üretim için uygundur. Özellikle *Lepidium sativum* müsilajının kuru tohum ağırlığının %20–30’unu oluşturması, bu bitkinin ekonomik olarak cazip bir müsilaj kaynağı olmasını sağlamaktadır (Barak & Mudgil, 2014).

Brassicaceae gumları ve müsilajları, yenilenebilir, toksik olmayan ve biyobozunur özellikleri nedeniyle sürdürülebilir biyopolimer kategorisinde değerlendirilmektedir. Üretim süreçlerinde çevresel etki minimaldir ve çoğunlukla kimyasal kullanımına ihtiyaç duyulmamaktadır. Ayrıca retim artıklarının hayvan yemi veya organik gübre olarak kullanılabilir (Chemat vd., 2019). Sentetik polimerlerin üretim süreçleri, yüksek enerji gerektirmekte ve çevreye zararlı yan ürünler oluşturabilmektedir. Buna karşılık, *Brassicaceae* bazlı ürünlerin üretimi, evre dostu teknolojilerle kolayca uyum sağlayarak düşük çevresel maliyet sunmaktadır (Sharma vd., 2020). Özellikle mikropplastiklerin yasaklanması, biyobozunur film ve kapsülasyon materyallerine talebi artırmakta ve *Brassicaceae* polisakkaritlerinin

ekonomik değerini yükseltmektedir (Shahidi & Ambigaipalan, 2015). Doğal müsilaşlar yenilenebilir, biyobozunur ve toksik olmayan yapıları nedeniyle sürdürülebilir biyomalzemeler kapsamında değerlendirilmekte bu polisakkaritler, gıda, farmasötik, kozmetik, çevre teknolojileri ve biyomedikal uygulamalar gibi geniş bir kullanım potansiyeline sahiptir (Barak & Mudgil, 2014). Ancak mevcut literatür, *Brassicaceae* familyasının müsilaş potansiyelinin tam anlamıyla ortaya çıkarılması için kapsamlı araştırmalara ihtiyaç olduğunu göstermektedir. *Brassicaceae* türlerinin tarımsal üretim potansiyelinin yüksek olması, yerel üreticiler için yeni gelir kaynakları oluşturabilir. Bu bitkilerin atıl tarım alanlarında kolayca yetiştirilebilmesi, kırsal kalkınmaya destek sağlayarak bölgesel ekonomiyi katkıda bulunabilir.

Brassicaceae müsilaşlarının gelecek araştırmalarındaki en kritik başlıklardan biri, moleküler yapı analizlerinin derinleştirilerek moleküler ağırlık dağılımı, dallanma yoğunluğu, monosakkarit kompozisyonu, bağlanma tipleri gibi yapısal özellikleri ve biyopolimerlerin fonksiyonel davranışlarının belirlemesidir (Williams & Phillips, 2009). Mevcut çalışmalar, birçok *Brassicaceae* türünün müsilaş yapısının henüz tam olarak karakterize edilmediğini göstermektedir.

Gelecekteki çalışmaların, çapraz bağlama tekniklerinin geliştirilmesi, nanopartikül ve mikrokapsülasyon sistemlerinde kullanım, biyobozunurluk kinetiklerinin modellenmesi, toksikolojik ve biyoyuymululuk testlerinin yapılması gibi başlıklara odaklanması gerekmektedir;

Brassicaceae familyasında birçok tür henüz gum veya müsilaş üretimi açısından değerlendirilmemiştir (Warwick vd., 2010). Genotipler arası farklılıklar, biyopolimer kompozisyonu ve verimi üzerinde önemli etkilere sahiptir. Bu nedenle gelecekteki araştırmaların; yüksek müsilaş verimli genotiplerin belirlenmesi ve

moleküler markör destekli seleksiyon sistemlerinin geliştirilmesi, çevresel etkilerin biyopolimer sentezi üzerine etkilerinin araştırılması gibi konulara odaklanması gerekmektedir. Islah programları ile daha yüksek verimli ve kaliteli biyopolimer üreten *Brassicaceae* çeşitlerinin geliştirilmesi mümkündür.

Brassicaceae gum ve müsilağlarının endüstriyel potansiyeli yüksek olmakla birlikte, ekonomik fizibilite çalışmaları sınırlıdır. Gelecekte yapılacak ekonomik değerlendirmelerde; üretim maliyet optimizasyonu, yeni pazar stratejileri, yaşam döngüsü analizleri (LCA), karbon ayak izi değerlendirmeleri gibi parametrelerin incelenmesi gerekmektedir (Sharma vd., 2020). Biyopolimer pazarının büyümesi, bu ürünlerin ekonomik değerini artıracak ve sürdürülebilir tarım modelleriyle entegrasyonu kolaylaştıracaktır.

Doğal hidrokolloid üretiminin çevresel etkilerinin minimize edilmesi gelecekte büyük önem kazanacaktır. *Brassicaceae* türlerinin birçok tarım sistemine uyumlu olması, düşük girdi ihtiyacı ve çevre dostu karakteri, bu ürünleri sürdürülebilir biyomalzeme kaynakları hâline getirmektedir. Ancak gelecekte su kullanımı, toprak sağlığı, biyoçeşitlilik etkileri ve üretim artıklarının değerlendirilmesi gibi ekolojik konuların daha detaylı çalışılması gerekmektedir (Chemat vd., 2019).

Kaynakça

Alqasoumi, S. I., Al-Rehaily, A. J., & Abdel-Kader, M. (2018). Gastroprotective effects of *Brassica oleracea* extract against ethanol-induced gastric mucosal injury in rats. *Journal of Ethnopharmacology*, 222, 120–128.

Al-Shehbaz IA, Mutlu B, Dönmez AA (2007). The Brassiceae (Cruciferae) of Turkey, updated. *Turk Journal Botanic* 31: 327–336.

Barak, S., & Mudgil, D. (2014). Plant gum polysaccharides and their industrial applications: A review. *International Journal of Biological Macromolecules*, 65, 72–81.

Chemat, F., Vian, M. A., & Cravotto, G. (2019). Green extraction of natural products: Concept and principles. *International Journal of Molecular Sciences*, 20(17), 3967.

Chen, H., Zhang, M., & Xie, B. (2020). Polysaccharide-based biomaterials and their applications in drug delivery. *Carbohydrate Polymers*, 237, 116136.

Farooq, U., Kozinski, J. A., Khan, M. A., & Athar, M. (2010). Biosorption of heavy metal ions using wheat based biosorbents—a review of the recent literature. *Bioresource Technology*, 101(14), 5043-5053.

Garti, N., & Leser, M. E. (2001). Emulsions: Effects of surfactants and polymeric additives. In *Food emulsions* (pp. 283–326). CRC Press.

Güçlü, G., & Şahin, B. (2018). Doğal kıvamlaştırıcıların tekstil baskıcılığında kullanımı: Bir derleme. *Tekstil ve Mühendis*, 25(110), 101–113.

Hassan, M., Rehman, S., & Latif, S. (2021). Chelating and radical scavenging properties of plant-derived polysaccharides: A review. *Journal of Food Biochemistry*, 45(2), e13567.

Kaur, M., Singh, S., & Kaur, H. (2018). Isolation and characterization of seed mucilage from selected plant species. *Journal of Food Science and Technology*, 55(7), 2576–2583.

Kaur, R., & Sharma, S. (2020). Characterization and antioxidant potential of mucilage extracted from selected *Brassicaceae* seeds. *International Journal of Biological Macromolecules*, 152, 1157–1164.

Khan, A., Rehman, N., & Zia, M. (2020). Wound healing and anti-inflammatory potential of *Eruca sativa* polysaccharides. *BMC Complementary Medicine and Therapies*, 20, 112.

Kumar, V., & Singh, A. (2021). Natural polysaccharides for textile applications: Properties and potential uses. *Carbohydrate Polymers*, 256, 117519.

Kumar, P., Verma, R., & Sharma, R. (2022). Biopolymer-based edible films from seed mucilage: Functional properties and food applications. *Journal of Food Packaging and Shelf Life*, 33, 100–112.

Li, X., Wang, Z., & Zhang, Y. (2020). Structural characteristics and bioactivities of pectic polysaccharides in medicinal plants. *Food Hydrocolloids*, 103, 105–118.

Meyer, R. S., DuVal, A. E., & Jensen, H. R. (2011). Patterns and processes in crop domestication: an historical review and quantitative analysis of 203 global food crops. *New Phytologist*, 196(1), 29–48.

Mishra, S., Singh, P., & Rathore, D. (2020). Plant-derived mucilages as efficient biosorbents for heavy metals: A review. *Environmental Technology & Innovation*, 20, 101094.

Moghadam, M., Razavi, S. M. A., & Mohammadifar, M. A. (2019). Emulsion stabilization properties of Camelina seed mucilage. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 568, 197–205.

Mudgil, D., & Barak, S. (2013). Composition, properties and health benefits of plant-derived mucilages: A review. *International Journal of Biological Macromolecules*, 62, 1–6.

Mudgil, D., & Barak, S. (2020). Plant-derived polysaccharides: Sources, chemistry, and applications. *Carbohydrate Polymers*, 238, 116203.

Násir, M., Hussain, S., & Khan, M. (2020). Mucilage polysaccharides in environmental applications: A comprehensive review. *Journal of Polymers and the Environment*, 28, 2445–2458.

Násir, N., Ahmad, M., Mansoor, Q., & Zafar, M. (2020). Seed mucilage in selected *Brassicaceae* species: Physicochemical and functional characterization for potential industrial applications. *Industrial Crops and Products*, 145, 112088.

Razavi, S. M. A., & Cui, S. W. (2016). Polysaccharides from plant seeds: A review of structure–function relationships. *Food Hydrocolloids*, 52, 629–647.

Razavi, S. M. A., Mohammadi, A., & Habibi, M. E. (2021). Functional properties of *Lepidium sativum* seed gum and its applications in dairy products. *Food Science & Nutrition*, 9, 1457–1470.

Saeed, F., Afzaal, M., & Ahmad, N. (2019). Functional and antioxidant properties of mucilage extracted from garden cress

(*Lepidium sativum* L.) seeds. *Journal of Food Processing and Preservation*, 43(5), e13922.

Saha, D., & Bhattacharya, S. (2010). Hydrocolloids as thickening and gelling agents in food: A review. *Journal of Food Science and Technology*, 47(6), 587–597.

Shahidi, F., & Ambigaipalan, P. (2015). Phenolics and polyphenolics in foods, beverages and spices: Antioxidant activity and health effects. *Journal of Functional Foods*, 18, 820–897.

Sharma, R., Garg, P., & Kumar, V. (2020). Plant-derived polysaccharides for sustainable industrial applications. *International Journal of Biological Macromolecules*, 158, 612–621.

Sharma, P., Kumar, A., & Saini, M. (2021). Ultrasound-assisted extraction of plant polysaccharides: A review. *Food Reviews International*, 37(8), 770–794.

Thakur, V., Sharma, M., & Singh, S. (2019). Plant-derived gums and mucilages as functional bioactive ingredients: A review. *International Journal of Biological Macromolecules*, 123, 1225–1235.

Wang, Y., Zhou, S., & Hu, X. (2020). Antioxidant mechanisms of natural polysaccharides and their applications in food preservation: A review. *Food Chemistry*, 331, 127–203.

Warwick, S. I., Mummenhoff, K., Sauder, C., Koch, M. A., & Al-Shehbaz, I. A. (2010). Closing the gaps: Phylogeny and biogeography of the *Brassicaceae* based on nuclear ITS and plastid phytochrome B sequences. *Plant Systematics and Evolution*, 285, 209–232.

Williams, P. A., & Phillips, G. O. (2009). Handbook of hydrocolloids (2nd ed.). *Woodhead Publishing*.

BÖLÜM 9

ROLES OF ENDOGENOUS PHYTOHORMONES IN ABIOTIC STRESS TOLERANCE OF MAJOR FIELD CROPS: A REVIEW

TİMUÇİN TAŞI

Introduction

Earth has undergone several mass extinction events over its 4.5-billion-year history, yet each time it has demonstrated a remarkable ability to rebuild its ecological and biological diversity (Benton, 2016). The most recent major mass extinction occurred during the Cretaceous–Paleogene period, which marked the disappearance of the dinosaurs. This event was triggered by the impact of an asteroid approximately 10 km in diameter in the Yucatán region, releasing energy equivalent to tens of billions of Hiroshima-scale explosions (Alvarez et al., 1980). The massive quantities of dust and aerosols injected into the atmosphere severely restricted sunlight penetration for an estimated 10-15 years, leading to the collapse of photosynthesis and the extinction of nearly 75–80% of all species (Renne et al., 2013). Nonetheless, small burrowing mammals, certain avian lineages, and limited groups of

¹ Doç.Dr, Balıkesir Üniversitesi, Kepsut MYO, Veterinerlik, Orcid: 0000-0002-2144-9064

plant species survived, forming the biological foundation for subsequent ecological evolution (Brusatte, 2015). As in previous extinction events, Earth entered a regeneration phase in which ecosystems gradually reorganized and recovered.

The rapid increase in fossil fuel consumption following the onset of the industrial revolution in the 1760s led to a pronounced rise in atmospheric greenhouse gas concentrations, laying the foundation for anthropogenic climate change (Steffen et al., 2015; IPCC, 2021). Although the green revolution initiated in Mexico during the 1940s and later implemented globally aimed to meet the growing food demands of an expanding population, its reliance on intensive synthetic fertilizer inputs, large-scale irrigation, and mechanization substantially amplified the environmental impacts of agriculture (Evenson and Gollin, 2003; Pingali, 2012). The expansion of heavy industry during the industrial revolution (particularly iron and steel production), combined with the dramatic surge in nitrogen-based fertilizer use during the green revolution, has driven an unprecedented accumulation of CO₂, N₂O, CH₄, and other atmospheric pollutants in the modern era (Davidson, 2009).

Throughout the 20th century, technological advancements improved overall quality of life but simultaneously generated large-scale environmental consequences, including global warming, climate anomalies, and ecosystem degradation. Consequently, many scientists have adopted the term anthropocene to emphasize the dominant influence of human activities on geological and earth system processes (Crutzen, 2002; Waters et al., 2016). While recent technological and industrial developments have aimed to meet the rising global demand for food and energy, they have also imposed unsustainable pressures that increasingly threaten the stability of the global ecological balance.

As major advances continue to be made in science and technology, mitigating the negative ecological consequences of these developments has become a critical priority. Global warming and climate change pose severe risks not only to human health but also to countless plant and animal species now facing potential extinction (IPCC, 2021). While numerous institutions are working to develop sustainable and ecosystem-friendly solutions, strategies aimed at enhancing the resilience of field crops, which form the foundation of the global food chain have gained particular importance. Unlike humans and animals, which can seek protective micro-environments during periods of crisis, plants remain anchored to their environment and thus require biological and physiological adjustments that enhance their tolerance to environmental stresses.

As in humans and animals, protective production systems have also been proposed for plants, including greenhouse cultivation, hydroponic systems, agroforestry, permaculture, and vertical farming. In an era marked by increasing abiotic stresses such as drought, high heat, and salinity, these systems offer viable solutions particularly for low-biomass, fast-growing leafy crops (Benke and Tomkins, 2017; FAO, 2022). However, major cereals such as wheat, barley, maize, and rice possess specific physiological requirements and substantial biomass accumulation capacities, making it highly challenging to cultivate them efficiently within closed production systems. These cereals are inherently suited to field-based agriculture that relies on large cultivation areas and area-dependent yield, and achieving maximum productivity per unit area in conventional field conditions remains essential for sustaining the global population (Ray et al., 2013).

Enhancing the resilience of economically important field crops to the increasing threats of drought and high temperature expected in the future has become an urgent necessity. Consequently, plant breeding programs in recent years have increasingly focused

on developing genotypes and cultivars with enhanced tolerance to abiotic stresses (Ghag et al., 2023). In this context, the biochemical responses and tolerance indicators exhibited by plants under stress conditions have emerged as key selection criteria. Under abiotic and biotic stresses, plants develop a range of morphological and physiological adaptive responses, including leaf size reduction, leaf rolling, and the downward extension of roots into deeper soil layers (Mittler, 2006). Additionally, in major field crops exposed to drought, heat, and salinity, these physical adjustments are supported by hormonal signaling pathways that orchestrate phytochemical and physiological regulations to maintain survival and sustain productivity.

To survive under abiotic stress conditions, plants synthesize a range of phytohormones that play central roles in stress perception and signaling. Absciscic acid (ABA), Indole-3-Acetic Acid (IAA), Gibberellins (GA), Ethylene (ET), Cytokinins (CK), Jasmonic Acid (JA), Salicylic Acid (SA), and Brassinosteroids (BR) represent the major endogenous hormones most frequently activated in field crops exposed to drought, heat, and salinity stresses (Peleg and Blumwald, 2011; Verma et al., 2016). This review aims to provide an integrated assessment of the underlying mechanisms of these phytohormones under stress conditions, the specific stress types in which each hormone is predominantly activated, and their physiological functions in major field crops, including wheat, barley, maize, and rice.

Endogenous Hormonal and Enzymatic Defenses in Field Crops

Abscisic Acid (ABA)

ABA is a central stress-responsive phytohormone that rapidly accumulates in field crops, particularly under water-deficit related abiotic stresses (Xin et al., 2025). ABA biosynthesis increases under drought, salinity, and extreme temperatures through the induction of

NCED (9-cis-epoxycarotenoid dioxygenase) genes, thereby activating a suite of protective mechanisms that minimize water loss (Iuchi et al., 2001). These responses collectively facilitate plant acclimation to adverse conditions and enhance survival potential (Çeçen, 2004).

In rice (*Oryza sativa* L.), drought stress has been shown to elevate ABA concentrations several-fold in both leaf and root tissues, accelerating stomatal closure and reducing transpiration (Sah et al., 2016). Similarly, in wheat (*Triticum aestivum* L.), ABA accumulation in leaves and roots plays an essential role not only in stomatal regulation but also in the synthesis of osmoprotective metabolites such as proline and soluble sugars under water stress (Zhang et al., 2025). Controlled drought experiments in maize (*Zea mays* L.) further indicate that ABA promotes deeper rooting and modulates lateral root development (Zhang et al., 2021; Li et al., 2022).

Under salinity stress, elevated ABA levels have been reported in the root zones of rice and barley genotypes, where ABA-dependent pathways activate genes involved in maintaining ion homeostasis, particularly Na⁺/K⁺ balance (Jiang et al., 2024). ABA also plays a prominent role in thermal stress responses in field crops. Recent proteomic and phosphoproteomic studies in maize demonstrate that ABA-associated signaling contributes to the induction of heat shock proteins (HSPs), thereby enhancing heat tolerance (Xue et al., 2025). Conversely, in wheat and barley, exposure to low temperatures activates cold-responsive genes that regulate antioxidant defenses (including ABA and proline pathways) and signaling mechanisms involved in cold acclimation. However, a consistent and direct link between ABA accumulation and antifreeze protein induction in cereals has yet to be fully established (Liu et al., 2022).

Importantly, ABA accumulation in field crops is not uniform across all stress types (Singh and Roychoudhury, 2023). The highest ABA levels are typically observed under drought stress, followed by salinity and heat stress (Zhang et al., 2020). Beyond its roles in abiotic stress, ABA also participates indirectly in certain biotic defense reactions, where it contributes to the plant's response to pathogen invasion (Bharath et al., 2021).

Ethylene (ET)

ET is produced by plants in response to a wide range of biotic and abiotic stress factors, including mechanical injury, pathogen attack, water deficit, salinity, oxidative stress, and extreme temperatures. In major field crops such as wheat, maize, cotton, soybean, rice, and potato, elevated ET production is considered a common component of abiotic stress responses. Beyond its stress-related functions, ET, being a gaseous phytohormone, plays central roles in natural developmental processes such as fruit ripening, leaf abscission, and the regulation of root and shoot architecture.

In field crops, ET biosynthesis is typically triggered by abiotic stresses such as drought, salinity, and low temperature. These stressors enhance the expression of ACS (1-aminocyclopropane-1-carboxylic acid synthase) and ACO (ACC oxidase) genes, thereby accelerating ET production (Kazan, 2015; Voesenek and Bailey-Serres, 2015). When ACS and ACO genes are transcriptionally activated, they encode the corresponding enzymes that catalyze the conversion of ACC to ethylene. Under stress conditions, the expression and enzymatic activities of ACS and ACO are tightly regulated, leading to rapid increases in ET levels (Khan et al., 2024).

ET signaling modulates root system architecture and stomatal dynamics, shaping the plant's adaptive responses related to water use and gas exchange. It also contributes to cellular protection by regulating ROS-scavenging systems (SOD, CAT, POD, etc.).

Importantly, ET exhibits extensive hormonal cross-talk with JA, SA, ABA, and GA. These interactions help coordinate the balance between growth and defense. For instance, ET and ABA may act synergistically under stress to promote stomatal closure and restrict growth, whereas ET–JA and ET–SA interactions enhance the activation of defense-related genes (Kazan, 2015; Voesenek and Bailey-Serres, 2015). Thus, ET functions not merely as a stress hormone but as a central integrator within the plant’s hormonal signaling network.

In rice, ET emission under abiotic stress not only modulates defense mechanisms but also engages in dynamic cross-talk with ABA and GA. ET–ABA interactions support stomatal closure and minimize water loss, whereas antagonism between ET and GA reprograms growth to optimize stress adaptation. These regulatory interactions play a crucial role in balancing growth and defense pathways in rice seedlings exposed to environmental constraints (Lu et al., 2022).

Jasmonic Acid (JA)

JA is a key regulator of plant defense responses against both biotic (pathogens and agricultural pests) and abiotic stresses. Under drought, salinity, low temperature, or mechanical injury, JA levels rise markedly, triggering defense-related metabolic pathways. JA strengthens cellular protection by enhancing antioxidant enzyme systems involved in the control of reactive oxygen species (ROS), such as SOD, CAT and APX, thereby limiting oxidative damage. Owing to these functions, JA plays a central role in shaping stress tolerance in major field crops (Wasternack and Hause, 2013).

Studies in cereals demonstrate that JA participates in multiple layers of physiological regulation under stress. In wheat, rice and maize, JA accumulation enhances the expression of defense-related genes and modulates the critical balance between growth and stress

tolerance. Under drought and salinity, JA production in rice partially restricts growth while optimizing the efficiency of energy use. In maize and wheat, JA improves metabolic resilience by coordinating stress responses in both root and shoot tissues (Kazan and Manners, 2012). Moreover, JA signaling engages in extensive crosstalk with GA, ABA, ET and other hormonal pathways, regulating the balance between growth and defense, stress tolerance mechanisms, and reproductive development (Yang et al., 2019). Although several studies highlight potential interactions between JA–GA and JA–ABA pathways in spike development and stress tolerance, experimental evidence specifically demonstrating these mechanisms in barley remains limited.

JA contributes to the coordinated regulation of whole-plant stress adaptation through its dense hormonal network interactions. In particular, its reciprocal interactions with ABA and ET are decisive for stomatal behavior, activation of defense genes and the management of energy allocation. Crosstalk between JA and GA or CK further shapes the balance between growth suppression and defense activation. During stress, temporary restriction of growth and preferential allocation of resources to defense processes are largely orchestrated through JA-centered hormonal integration (Wasternack and Feussner, 2018). Therefore, JA represents an essential phytohormone for sustaining stress tolerance, metabolic robustness and yield stability in field crops.

Salicylic Acid (SA)

SA is an endogenous phenolic phytohormone that plays a pivotal role in plant responses to both biotic and abiotic stresses. It functions as a key signaling molecule in defense against pathogens and is essential for the activation of systemic acquired resistance (SAR), which establishes long-lasting, whole-plant immunity (Vlot et al., 2009). SA induces a broad set of pathogenesis-related (PR)

genes including PR-1, PR-2 (β -1,3-glucanase), and PR-5 (thaumatin-like proteins) and enhances cellular antioxidant capacity by increasing the activities of SOD, POD, and CAT thereby strengthening intracellular defense mechanisms.

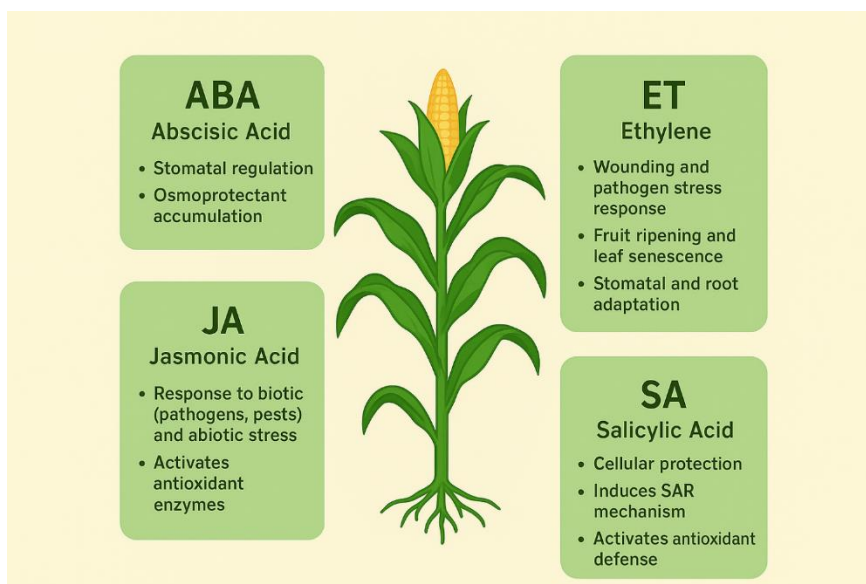
In major field crops, SA contributes significantly to maintaining yield and grain quality by enhancing resistance to disease-causing agents. In wheat, maize, rice and barley, SA accumulation has been associated with improved control of oxidative stress, maintenance of photosynthetic efficiency and increased pathogen resistance (Hanif et al., 2024). In maize, SA also participates in regulating leaf senescence, tassel and silk development, and broader adaptive responses under environmental stress conditions (Hayat et al., 2010).

Beyond its well-established role in biotic stress resistance, SA also responds to abiotic stresses. Under drought, salinity and low-temperature stress, endogenous SA levels generally increase, activating a suite of tolerance-related mechanisms. SA strengthens antioxidant defenses by enhancing SOD, CAT and POD activities, thereby helping regulate reactive oxygen species (ROS) and supporting the maintenance of photosynthetic performance under stress (Vlot et al., 2009; Hayat et al., 2010).

In wheat and maize, SA mediated responses improve stomatal regulation, root system architecture and oxidative balance under water deficit and salinity, collectively enhancing physiological resilience. In rice, SA contributes to balancing growth and defense under salt stress and cooperates with ABA to enhance tolerance. In barley, SA exhibits synergistic interactions with GA and CK during tillering and spike development, whereas under severe stress it can act antagonistically with ET, promoting survival through a shift in resource allocation (Rivas-San Vicente and Plasencia, 2011).

The interaction network established by SA with other phytohormones is central to maintaining the delicate balance between growth and defense in field crops. SA exhibits growth-supportive relationships with GA and CK, helping sustain developmental processes under mild stress. Conversely, its antagonistic interactions with ABA and ET fine-tune defense activation during more severe stress episodes. This integrative hormonal coordination underlies both stress adaptation and yield stability in major cereal crops such as wheat, maize, rice and barley (Raskin, 1992).

Figure 1. The fundamental functions of stress hormones



Indole-3-Acetic Acid (IAA)

IAA (C₁₀H₉NO₂) is the most abundant natural auxin in plants and serves as a key organic compound regulating growth and development in major field crops (Taiz et al., 2015). By promoting cell elongation, it directs root and shoot formation and orchestrates plant responses to light (phototropism) and gravity (gravitropism)

(Davies, 2010). In addition, IAA functions as a primary signaling molecule controlling essential physiological processes such as embryo development, fruit maturation, and meristem differentiation. In field crops, IAA plays a particularly crucial role in shaping root system architecture, thereby optimizing water and nutrient uptake and enhancing adaptation to variable environmental conditions (Taiz et al., 2015).

Studies on maize (*Zea mays L.*) exposed to waterlogging stress have shown that reduced oxygen availability triggers structural and metabolic adjustments in the root zone. In some maize genotypes, waterlogging induces auxin biosynthesis or transport pathways, resulting in elevated free IAA accumulation. This increase promotes adventitious root formation, which enhances gas exchange and oxygen acquisition under submerged conditions (Singh et al., 2023; Yan et al., 2024). These findings indicate that root restructuring under hypoxic stress relies on coordinated hormonal and genetic regulation.

In rice (*Oryza sativa L.*) subjected to salinity stress, IAA metabolism undergoes pronounced modulation. Salt-stressed plants accumulate oxidized (OxIAA, DiOxIAA and derivatives) and conjugated forms of IAA, which is considered an adaptive mechanism that prevents excessive free IAA buildup while maintaining auxin signaling homeostasis (Isobe and Miyagawa, 2022). Moreover, Aux/IAA proteins such as OsIAA20 exhibit increased expression under both salinity and drought conditions, contributing to enhanced stress tolerance. This demonstrates that IAA metabolism and signaling play an integral role in coordinating stress adaptation processes (Zhang et al., 2022).

In wheat (*Triticum aestivum L.*), exogenous IAA application has been reported to partially mitigate salt-induced growth inhibition, improving both shoot/root development and yield components (Tariq et al., 2024). Another study found that

inoculation with AMF (arbuscular mycorrhizal fungi), known to regulate water and ion balance, enhanced endogenous IAA production in salt-stressed wheat and significantly improved stress tolerance. These findings highlight the potential role of IAA as a beneficial hormonal regulator under salinity stress (Coutinho et al., 2024). Collectively, these results show that IAA functions not only as a growth hormone but also as a dynamic regulatory molecule supporting physiological adaptation under adverse environmental conditions.

Overall, IAA in field crops is not merely a developmental hormone but a central integrator of growth and stress signaling. Under stresses such as drought, salinity, and waterlogging, plants actively reprogram IAA metabolism and signaling to enhance adaptive responses, indirectly supporting yield stability.

Gibberellic Acid (GA)

Gibberellic acids such as GA₁, GA₃, and GA₄ are key growth regulators in field crops, controlling essential developmental processes including seed germination, stem elongation, leaf expansion, and reproductive development (Cheng et al., 2022). In cereals such as wheat, barley, maize, and rice, these hormones promote internode elongation and thereby increase plant height. They also play critical roles in seed germination and grain filling (Castro-Camba et al., 2022). Through GA mediated regulation, field crops exhibit faster seedling establishment, proper spike formation, and, in some species, the release of seed dormancy. For this reason, GA functions as a secondary yet influential regulator of growth and yield formation in field crops (Kwon and Paek, 2016).

Under abiotic stress conditions, GA biosynthesis and signaling pathways are substantially reprogrammed. Stresses such as drought, salinity, and low temperature suppress GA20-oxidase and GA3-oxidase genes while activating GA2-oxidase genes, leading to

reduced levels of bioactive GA. As GA declines, DELLA proteins accumulate and temporarily restrain growth, enabling the redirection of metabolic energy toward stress tolerance (Achard et al., 2006). GA acts in close coordination with other hormones during stress responses. ABA, the major antagonist of GA, rises under stress and reinforces growth inhibition. In contrast, IAA promotes cell elongation synergistically with GA under non-stress conditions, but during stress, auxin transport and sensitivity are adjusted under the influence of elevated ABA (Colebrook et al., 2014). Ethylene, particularly under hypoxic conditions such as waterlogging, interacts with GA signaling to regulate adaptive processes including stem elongation and adventitious root formation (Voesenek and Bailey-Serres, 2015). Thus, GA contributes to a dynamic regulatory network that balances growth and survival under stress.

A recent study on wheat (*Triticum aestivum* L.) seedlings reported that water deficit markedly decreased levels of bioactive GA₁ and GA₄ in leaves, while a slight increase was observed in root tips. Concurrently, GA biosynthesis genes were downregulated and GA-inactivation/catabolic genes (GA2-oxidases) were upregulated. These findings highlight that GA metabolism is reprogrammed under stress, suppressing leaf expansion while maintaining root system function (Ptošková et al., 2022).

Cytokinins (CK)

Cytokinins (CKs) are essential plant hormones that regulate key physiological processes such as cell division, differentiation, and the delay of leaf senescence (Kieber and Schaller, 2018). In cereals including wheat, barley, and maize, CKs directly influence major yield components particularly tillering, spike and ear formation, and grain filling thereby shaping overall productivity (Chen et al., 2019; Koprna et al., 2021). Previous studies have demonstrated that CK-oriented metabolic adjustments can enhance spike productivity in

wheat, and that manipulation of the CKX gene family leads to significant increases in grain number (Chen et al., 2019).

Under abiotic stress conditions, CK release is extensively reprogrammed. In many plant species, drought and salinity cause a decline in CK levels, shifting the root–shoot balance toward root development and thereby improving water acquisition an important adaptive advantage (Chen et al., 2019). Conversely, elevating CK levels or inducing the expression of CK biosynthesis genes such as IPT can delay leaf senescence (stay green), maintain photosynthetic capacity, and stabilize carbon–nitrogen metabolism under stress, ultimately mitigating yield losses (Joshi et al., 2019; Song et al., 2022).

In modern breeding, genes controlling CK homeostasis including CKX, IPT, and LOG are increasingly regarded as strategic targets to enhance abiotic stress tolerance and maintain yield stability in cereals (Chen et al., 2019; Song et al., 2022). Overall, CKs function not only as growth-promoting hormones but also as central integrators that coordinate stress signaling with developmental regulation, thereby contributing significantly to yield stability (Kieber and Schaller, 2018; Joshi et al., 2019).

During stress responses, CKs interact with ABA and GA through both antagonistic and synergistic mechanisms. Under stress, GA and CK generally promote growth, whereas ABA suppresses growth to prioritize survival. The balance among these hormonal pathways is crucial for coordinating growth–defense trade-offs in field crops (Joshi et al., 2019).

Brassinosteroids (BR)

Brassinosteroids (BRs) are essential steroidal phytohormones that play pivotal roles in regulating plant growth, development, and stress responses. In field crops, BRs are endogenously activated under challenging environmental conditions

such as drought, salinity, low temperatures, and heavy metal stress, where they trigger cellular defense and adaptation mechanisms. BRs support plant survival by sustaining photosynthetic activity, regulating stomatal behavior, enhancing cell wall flexibility, and maintaining balanced root–shoot architecture under stress (Vriet et al., 2012; Nolan et al., 2020).

BRs interact with ABA to coordinate the balance between growth and defense, particularly in processes related to stomatal closure and water management (Wei and Li, 2020). In rice, studies have shown that BR accumulation under salinity stress strengthens antioxidant defense systems, reduces ROS accumulation, maintains ion homeostasis, and enhances membrane stability (Wei and Li, 2020). Research in barley further demonstrates that BRs act synergistically with GA and CK to promote tillering and spike development, whereas under drought conditions they exhibit antagonistic interactions with ABA and ET, contributing to the conservation of metabolic energy (Kagale and Rozwadowski, 2011; Planas-Riverola et al., 2019).

Overall, BRs act as both growth regulators and central modulators of stress adaptation in field crops. Through their interconnected signaling networks with GA, CK, ABA, and ET, BRs help optimize survival, yield maintenance, and developmental processes under adverse environmental conditions. For these reasons, BRs are increasingly recognized as strategic targets in modern agricultural biotechnology and stress tolerance research (Vriet et al., 2012).

Figure 2. The fundamental functions of growth hormone

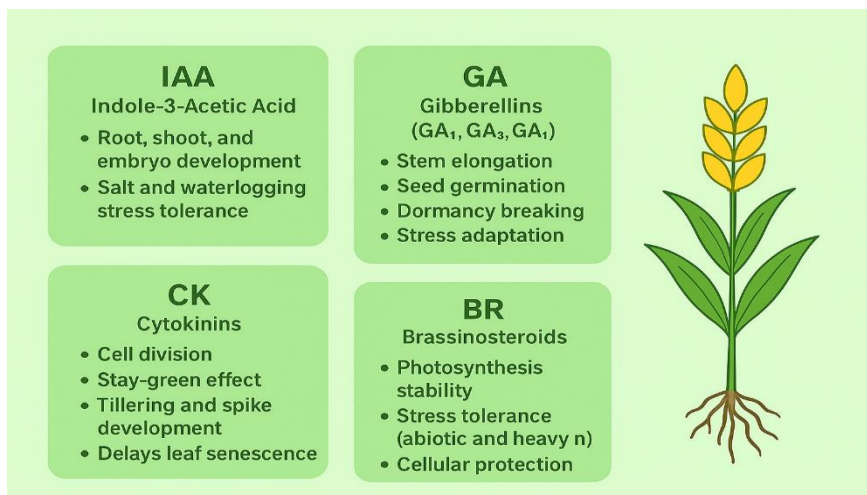


Table 1. Endogenous phytohormones and abiotic stress responses in field crops

Phytohormone	Main functions	Key abiotic stresses	Key mechanisms	Example field crops mentioned
Abscisic acid (ABA)	Principal stress hormone stomatal closure, osmotic adjustment, induction of protective genes	Drought, salinity, extreme temperatures (heat/cold)	NCED induction triggers rapid ABA biosynthesis, promoting stomatal closure, accumulation of osmoprotectants (proline, soluble sugars), and root architectural adjustments; ABA also induces HSP expression under heat stress and regulates seed dormancy by inhibiting germination.	Rice, wheat, maize, barley
Indole-3-acetic acid (IAA)	Main natural auxin, cell elongation,	Waterlogging (flooding),	Stress alters IAA biosynthesis and	Maize, rice, wheat

Phytohormone	Main functions	Key abiotic stresses	Key mechanisms	Example field crops mentioned
	root/shoot growth, adventitious root formation	salinity, drought	transport; conjugation and oxidation (e.g., OxIAA) prevent overaccumulation and maintain hormonal balance. IAA shapes root system architecture to optimize water and ion uptake, and it also regulates apical dominance, phototropism, and gravitropism.	
Gibberellins (GA)	Regulate seed germination, stem elongation, leaf expansion, reproductive development and breaking of seed dormancy	Drought, salinity, low temperature	Stress down-regulates GA biosynthesis genes (GA20ox/GA3ox) and up-regulates GA2ox, leading to reduced active GA levels and DELLA accumulation, which restricts growth to enhance stress tolerance; responses are tissue-specific (e.g., roots vs. leaves).	Wheat, barley, maize
Ethylene (ET)	Gaseous regulator of senescence, root morphology, stress signalling, promotes fruit ripening and leaf abscission	Drought, flooding, salinity, extreme temperatures	Stress induces ACS/ACO expression, increasing ethylene production; ET regulates stomatal and root responses, interacts with ABA, GA, JA, and SA signaling networks, and modulates ROS-scavenging systems.	Rice, wheat, maize

Phytohormone	Main functions	Key abiotic stresses	Key mechanisms	Example field crops mentioned
Cytokinins (CK)	Promote cell division, delay leaf senescence (stay-green), affect tillering/inflorescence development, contribute to nitrate uptake and release of apical dominance,	Drought, salinity, low temperature	CK levels often decline under drought and salinity, shifting the root-to-shoot balance; manipulation of CK homeostasis genes (IPT, CKX, LOG) can maintain photosynthetic capacity and support yield stability under stress.	Wheat, barley, maize
Jasmonic acid (JA)	Regulator of defense responses and stress-induced metabolic reprogramming	Drought, salinity, low temperature, mechanical injury	Induces defense gene expression, up-regulates antioxidant enzymes (SOD, CAT, APX), coordinates trade-off between growth and defense via cross-talk with ABA/ET/GA/CK.	Wheat, rice, maize, barley
Salicylic acid (SA)	Phenolic regulator of defense (SAR), antioxidant responses, involved in herbivore defense, promotes secondary metabolite biosynthesis, and interacts antagonistically with SA	Drought, salinity, low temperature (also biotic stresses)	Activates PR genes (PR-1, PR-2, PR-5), enhances SOD/CAT/POD activities, helps maintain photosynthetic capacity and ion balance under stress; interacts with ABA, ET, GA, CK and SA	Wheat, maize, rice, barley
Brassinosteroids (BR)	Steroidal growth regulators that also enhance stress tolerance, Developmental roles, Programmed Cell Death/senescence, and	Drought, salinity, low temperature, heavy metal stress	Maintain photosynthesis and membrane stability, strengthen antioxidant defenses, modulate stomatal behavior	Rice, barley, (general cereals)

Phytohormone	Main functions	Key abiotic stresses	Key mechanisms	Example field crops mentioned
	target of rapamycin – autophagy interaction		and ion homeostasis; cross-talk with ABA, GA, CK, ET.	

Conclusion

This review demonstrates that endogenous phytohormones form a central regulatory network governing the tolerance of major field crops including wheat, maize, rice, and barley to abiotic stress conditions. Phytohormones such as ABA, ET, SA, and JA are primarily activated under biotic and abiotic stress and function as key stress-related signals in crops exposed to multiple environmental constraints. Under extreme conditions, these hormones orchestrate stomatal regulation, the release of osmoprotective compounds, fruit ripening, leaf abscission, cellular protection, and the activation of defense pathways such as the SAR response and antioxidant systems (SOD, POD, CAT). By integrating external stress cues with developmental programs, they help field crops maintain essential physiological functions under harsh agricultural conditions.

On the other hand, Phytohormones such as IAA, CK, GA, and BR, act mainly as growth-regulating hormones. They play primary roles in seed germination, stem elongation, the breaking of seed dormancy, stay-green maintenance, tillering, spike and cob formation, photosynthetic performance, and the coordinated regulation of cell, root, and shoot development. Under abiotic and biotic stress, they operate in coordination with stress-associated hormones to sustain growth defense balance.

Importantly, phytohormones should not be categorized as strictly stress hormones or “growth hormones. In both development and stress adaptation, they function through continuous communication and extensive cross-talk. These interactions enable

precise coordination between survival mechanisms and yield components (tillering capacity, spike/panicle development, grain formation). The coordinated action of all eight hormones constitutes an indispensable foundation for field crops to maintain both productivity and vitality under abiotic stress conditions.

Kaynakça

Achard, P., Cheng, H., Grauwe, L. D., Decat, J., Schoutteten, H., Moritz, T., Dominique, V.D.S., Peng, J. & Harberd, N.P. (2006). Integration of plant responses to environmentally activated phytohormonal signals. *Science*, 311, 91-94. <https://dx.doi.org/10.1126/science.1118642>

Alvarez, L. W., Alvarez, W., Asaro, F., & Michel, H. V. (1980). Extraterrestrial cause for the cretaceous-tertiary extinction. *Science*, 208, 1095–1108.

Bharath, P., Gahir, S., & Raghavendra, A.S. (2021). Absciscic acid-induced stomatal closure: An important component of plant defense against abiotic and biotic stress. *Frontiers in Plant Science*, 12, 615114. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.615114>

Benton, M. J. (2016). *Vertebrate paleontology*. Wiley-Blackwell, Fourth edition, pp.1-453, School of Earth Sciences University of Bristol, UK

Benke, K., & Tomkins, B. (2017). Future food-production systems: Vertical farming and controlled-environment agriculture. *Sustainability: Science, Practice and Policy*, 13(1), 13–26. <https://doi.org/10.1080/15487733.2017.1394054>

Brusatte, S. L. (2015). *The Rise and Fall of the Dinosaurs*. HarperCollins.

Castro-Camba, R., Sánchez, C., Vidal, N., & Vielba, J.M. (2022). Plant development and crop yield: The role of gibberellins. *Plants (Basel)*, 11(19), 2650. <https://doi.org/10.3390/plants11192650>

Chen, L., Zhao, J., Song, J., & Jameson, P. E. (2019). Cytokinin dehydrogenase: A genetic target for yield improvement in wheat. *Plant Biotechnology Journal*, 18(3), 614–630. <https://doi.org/10.1111/pbi.13305>

Cheng, J., Hill, C. B., Shabala, S., Li, C., & Zhou, M. (2022). Manipulating GA-related genes for cereal crop improvement. *International Journal of Molecular Sciences*, 23(22), 14046. <https://doi.org/10.3390/ijms232214046>

Colebrook, E.H., Thomas, S.G., Phillips, A.L., & Hedden, P. (2014). The role of gibberellin signalling in plant responses to abiotic stress. *Journal Experiment Biology*, 217(1), 67-75. <https://doi.org/10.1242/jeb.089938>

Coutinho, R., Gokarn, K., Chavan, S., & Chakraborty, P. (2024). Use of IAA-producing plant growth-promoting bacteria for the amelioration of salt and drought stress in wheat. *International Journal of Agricultural and Natural Sciences*, 17(3), 274–291. <https://www.ijans.org/index.php/ijans/article/view/910>

Crutzen, P. J. (2002). *Geology of mankind*. Nature, Chapter 10, 415, 23.

Çeçen, Ö. (2004). Investigation of the effects of exogenous JA, NAA and ABA on maize plant (*Zea mays L.*) exposed to drought stress. Master's thesis, Van Yüzüncü Yıl University. <https://gcris.yyu.edu.tr/items/d92f5c97-65f9-4daa-a2ff-e24c6aa9e510>

Davidson, E. A. (2009). The contribution of manure and fertilizer nitrogen to atmospheric nitrous oxide since 1860. *Nature Geoscience*, 2, 659-662. <https://doi.org/10.1038/ngeo608>

Davies, P. J. (2010). *Plant hormones: Biosynthesis, signal transduction, action!* (3rd ed.). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-1-4020-2686-7>

Evenson, R. E., & Gollin, D. (2003). Assessing the impact of the green revolution. *Science*, 300 (5620), 758–762. <https://doi.org/10.1126/science.1078710>

FAO (2022). The future of sustainable agriculture and food systems. Food and Agriculture Organization of the United Nations.

Ghag, S. B., Alok, A., Rajam, M. V., & Penna, S. (2023). Designing climate-resilient crops for sustainable agriculture: A silent approach. *Plant and Microbial Biology*, 42(10), 6503-6522. <https://doi.org/10.1007/s00344-022-10880-2>

Hanif, S., Mahmood, A., Javed, T., Bibi, S., Zia, M.A., Asghar, S., Naeem, Z., Ercisli, S., Rahimi, M., & Ali, B.(2024). Exogenous application of salicylic acid ameliorates salinity stress in barley (*Hordeum vulgare* L.). *BMC Plant Biology*, 24(1), 270. <https://10.1186/s12870-024-04968-y>

Hayat, Q., Hayat, S., Irfan, M., & Ahmad, A. (2010). Role of salicylic acid in plant abiotic stress. *Environmental and Experimental Botany*, 68(1), 14-25. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2009.08.004>

IPCC (2021). Sixth Assessment Report (AR6): The Physical Science Basis. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>

Isobe, T., & Miyagawa, H. (2022). Facilitation of auxin biosynthesis and metabolism by salt stress in rice plants. *Bioscience, Biotechnology, and Biochemistry*, 86(7), 824–831. <https://doi.org/10.1093/bbb/zbac070>

Iuchi, S., Kobayashi, M., Taji, T., Naramoto, M., Seki, M., Kato, T., & Shinozaki, K. (2001). Regulation of drought tolerance by gene manipulation of 9-cis-epoxycarotenoid dioxygenase, a key enzyme in abscisic acid biosynthesis in Arabidopsis. *The Plant Journal*, 27(4), 325-333. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/11532178/>

Jiang, W., Wang, X., Wang, Y., Du, Y., Zhang, S., Zhou, H., Feng, N., Zheng, D., Ma, G., & Zhao, L. (2024). S-ABA enhances rice salt tolerance by regulating Na⁺/K⁺ balance and hormone

homeostasis. *Metabolites*, 14 (4), 181.
<https://doi.org/10.3390/metabo14040181>

Joshi, S., Choukimath, A., Isenegger, D., Panozzo, J., Spangenberg, G., & Kant, S. (2019). Improved wheat growth and yield by delayed leaf senescence using developmentally regulated expression of a cytokinin biosynthesis gene. *Frontiers in Plant Science*, 10, 1285.
<https://doi.org/10.3389/fpls.2019.01285>

Kagale, S., & Rozwadowski, K. (2011). EAR motif-mediated transcriptional repression in plants: an underlying mechanism for epigenetic regulation of gene expression. *Epigenetics*, 6 (2), 141-146. <https://doi.org/10.4161/epi.6.2.13627>

Kazan, K., & Manners, J. M. (2012). JAZ repressors and the orchestration of phytohormone crosstalk. *Trends Plant Science*, 17 (1), 22-31. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2011.10.006>

Kazan, K. (2015). Diverse roles of jasmonates and ethylene in abiotic stress tolerance. *Trends in Plant Science*, 20 (4), 219-229.
<https://doi.org/10.1016/j.tplants.2015.02.001>

Khan, S., Alvi, A.F., Saify, S., Iqbal, N., & Khan, N.A. (2024). The ethylene biosynthetic enzymes, 1-Aminocyclopropane-1-Carboxylate (ACC) Synthase (ACS) and ACC Oxidase (ACO): The less explored players in abiotic stress tolerance. *Biomolecules*, 14(1), 90. <https://doi.org/10.3390/biom14010090>

Kieber, J.J., & Schaller, G.E. (2018) Cytokinin signaling in plant development. *Development*, 145 (4), 149344.
<https://doi.org/10.1242/dev.149344>

Koprna, R., Humplík, J. F., Špíšek, Z., Bryksová, M., Zatloukal, M., Mik, V., Novák, O., Nisler, J., & Doležal, K. (2021). Improvement of tillering and grain yield by application of cytokinin derivatives in wheat and barley. *Agronomy*, 11 (1), 67.
<https://doi.org/10.3390/agronomy11010067>

Kwon, C.T., & Paek, N.C. (2016). Gibberellic acid: A key phytohormone for spikelet fertility in rice grain production. *International Journal of Molecular Sciences*, 17(5), 794. <https://doi.org/10.3390/ijms17050794>

Li, W., Lin, Q., Wang, J., Liu, X., & Zhang, H. (2022). ZmDRO1 regulates root system architecture and drought adaptation in maize. *Plant Physiology*, 188 (2), 753-768. <https://doi.org/10.1093/plphys/kiac401>

Liu, Q., Zhang, X., Su, Y. H., & Zhang, X. S. (2022). Genetic mechanisms of cold signaling in wheat (*Triticum aestivum* L.). *Life*, 12 (5), 700. <https://doi.org/10.3390/life12050700>

Lu, Z., Yu, H., Xie, Q., & Li, J. (2022). Ethylene regulates rice seedling growth and stress responses through interaction with ABA and GA signaling pathways. *Frontiers in Plant Science*, 13, 834512. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.834512>

Mittler, R. (2006). Abiotic stress, the field environment and stress combination. *Trends in Plant Science*, 11(1), 15-19. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2005.11.002>

Nolan, T.M., Vukašinović, N., Liu, D., Russinova, E., & Yin, Y. (2020). Brassinosteroids: Multidimensional regulators of plant growth, development, and stress responses. *The Plant Cell*, 32 (2), 295–318. <https://doi.org/10.1105/tpc.19.00335>

Planas-Riverola, A., Gupta, A., Betegón-Putze, I., Bosch, N., Ibañes, M., & Caño-Delgado, A. I. (2019). Brassinosteroid signaling in plant development and adaptation to stress. *Development*, 146 (5), dev151894. <https://doi.org/10.1242/dev.151894>

Ptošková, K., Szecówka, M., Jaworek, P., Tarkowská, D., Petřík, I., Pavlović, I., Novák, O., Thomas, S. G., Phillips, A. L., & Hedden, P. (2022). Changes in the concentrations and transcripts for gibberellins and other hormones in a growing leaf and roots of wheat

seedlings in response to water restriction. *BMC Plant Biology*, 22, 284. <https://doi.org/10.1186/s12870-022-03667-w>

Peleg, Z., & Blumwald, E. (2011). Hormone balance and abiotic stress tolerance in crop plants. *Current Opinion in Plant Biology*, 14(3), 290-295. <https://doi.org/10.1016/j.pbi.2011.02.001>

Pingali, P.L. (2012). Green revolution: impacts, limits, and the path ahead. *PNAS*, 109(31), 12302-12308. <https://doi.org/10.1073/pnas.0912953109>

Raskin, I. (1992). Role of salicylic acid in plants. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*, 43, 439-463.

Ray, D. K., Mueller, N. D., West, P. C., & Foley, J. A. (2013). Yield trends are insufficient to double global crop production by 2050. *PLOS ONE*, 8(6), e66428. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0066428>

Renne, P.R., Deino, A.L., Hilgen, F.J., Kuiper, K.F., Mark, D.F., Mitchell, W.S., Morgan, L.E., Mundil, R., & Smit, J. (2013). Time scales of critical events around the Cretaceous-Paleogene boundary. *Science*, 339(6120), 684-687. <https://doi.org/10.1126/science.1230492>

Rivas-San Vicente, M., & Plasencia, J. (2011). Salicylic acid beyond defence: Its role in plant growth and development. *Journal of Experimental Botany*, 62 (10), 3321-3338. <https://doi.org/10.1093/jxb/err031>

Sah, S. K., Reddy, K. R., & Li, J. (2016). Absciscic acid and abiotic stress tolerance in crop plants. *Frontiers in Plant Science*, 7, 571. <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.00571>

Singh, A., & Roychoudhury, A. (2023). Absciscic acid in plants under abiotic stress: crosstalk with major Phytohormones. *Plant Cell Report*, 42(6), 961-974. <https://doi.org/10.1007/s00299-023-03013-w>

Singh, Z., Singh, H., Garg, T., Mushahary, K.K.K., & Yadav, S.R. (2023). Genetic and hormonal blueprint of shoot-borne adventitious root development in rice and maize. *Plant Cell Physiology*, 63 (12), 1806-1813. <https://doi.org/10.1093/pcp/pcac084>

Song, Y., Li, C., Zhu, Y., Guo, P., Wang, Q., Zhang, L., Wang, Z., & Di, H. (2022). Overexpression of ZmIPT2 gene delays leaf senescence and improves grain yield in maize. *Frontiers in Plant Science*, 13, 963873. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.963873>

Steffen, W., Richardson, K., Rockström, J., Cornell, S.E., Fetzer, I., Bennett, E.M., Biggs, R., Carpenter, S.R., de Vries, W., de Wit, C.A., Folke, C., Gerten, D., Heinke, J., Mace, G.M., Persson, L.M., Ramanathan, V., Reyers, B., Sörlin, S. (2015). Sustainability. Planetary boundaries: guiding human development on a changing planet. *Science*, 347(6223), 1259855. <https://doi.org/10.1126/science.1259855>

Taiz, L. Zeiger, E., Moller, I.M. & Murphy, A. (2015). *Plant Physiology and Development*. 6th Edition, Sinauer Associates, Sunderland, CT. <https://www.scirp.org/reference/referencespapers?referenceid=1752778>

Tariq, J., Ashraf, M. Y., & Ilyas, A. (2024). Mitigation of salt stress in wheat through the application of indole acetic acid. *Pakistan Journal of Biotechnology*, 21(2), 392-400. <https://doi.org/10.34016/pjbt.2024.21.02.924>

Verma, V., Ravindran, P., & Kumar, P. P. (2016). Plant hormone-mediated regulation of stress responses. *BMC Plant Biology*, 16(1):1-10. <https://doi.org/10.1186/s12870-016-0771-y>

Vlot, A. C., Dempsey, D. A., & Klessig, D. F. (2009). Salicylic acid, a multifaceted hormone to combat disease. *Annual Review of*

Phytopathology, 47, 177-206.
<https://doi.org/10.1146/annurev.phyto.050908.135202>

Voeseek, L. A. C. J., & Bailey-Serres, J. (2015). Flood adaptive traits and processes: An overview. *New Phytologist*, 206 (1), 57-73.
<https://doi.org/10.1111/nph.13209>

Vriet, C., Russinova, E., & Reuzeau, C. (2012). Boosting crop yields with plant steroids. *Plant Cell*, 24 (3), 842-857.
<https://doi.org/10.1105/tpc.111.094912>

Wasternack, C., & Hause, B. (2013). Jasmonates: Biosynthesis, perception, signal transduction and action in plant stress response, growth and development. *Annals of Botany*, 111 (6), 1021–1058.
<https://doi.org/10.1093/aob/mct067>

Wasternack, C., & Feussner, I. (2018). The oxylipin pathways: Biochemistry and function. *Annual Review of Plant Biology*, 69, 363-386. <https://doi.org/10.1146/annurev-arplant-042817-040440>

Waters, C.N., Zalasiewicz, J., Summerhayes, C., Barnosky, A.D., Poirier, C., Gałuszka, A., Cearreta, A., Edgeworth, M., Ellis, E.C., Ellis, M., Jeandel, C., Leinfelder, R., McNeill, J.R., Richter, D.d., Steffen, W., Syvitski, J., Vidas, D., Waple, M., Williams, M., Zhisheng, A., Grinevald, J., Odada, E., Oreskes, N., Wolfe, A.P. (2016). The Anthropocene is functionally and stratigraphically distinct from the Holocene. *Science*, 351(6269), aad2622.
<https://doi.org/10.1126/science.aad2622>

Wei, Z., & Li, J. (2020). Brassinosteroids regulate root growth, development, and yield in crops. *Journal of Integrative Plant Biology*, 62 (5), 590-619. <https://doi.org/10.1111/jipb.12863>

Xin, Q., He, Y., & Gu, H. (2025). Molecular insights into ABA-mediated regulation of stress tolerance and development in plants. *International Journal of Molecular Sciences*, 26 (16), 7872.
<https://doi.org/10.3390/ijms26167872>

Xue, H., Zhang, Z., Wang, X., Zhou, Y., Chen, Y., & Liu, S. (2025). Integrating proteomic and phosphoproteomic profiles provide new insights into ABA-dependent signal regulation network in maize response to heat stress. *BMC Plant Biology*, 25, 792. <https://doi.org/10.1186/s12870-025-06821-2>

Yang, J., Duan, G., Li, C., Liu, L., Han, G., Zhang, Y., & Wang, C. (2019). The crosstalks between jasmonic acid and other plant hormone signaling highlight the involvement of jasmonic acid as a core component in plant response to biotic and abiotic stresses. *Frontier Plant Science*, 10, 1349. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.01349>

Yan, D., Gao, Y., Zhang, Y., Li, D., Dirk, L.M.A., Downie, A.B., & Zhao, T. (2024). Raffinose catabolism enhances maize waterlogging tolerance by stimulating adventitious root growth and development. *J Experiment Botany*, 75 (18), 5955-5970. <https://doi.org/10.1093/jxb/erae284>

Zhang, A., Yang, X., Lu, J., Song, F., Sun, J., Wang, C., Lian, J., Zhao, L., & Zhao, B. (2022). OsIAA20, an Aux/IAA protein, mediates abiotic stress tolerance in rice through an ABA pathway. *Plant Science*, 308, 110903. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2021.110903>

Zhang, C., Zhang, Y., Gao, J., & Wang, Y. (2021). Overexpression of ZmbZIP4 enhances drought tolerance in maize by modulating root system architecture. *Journal of Experimental Botany*, 72 (15), 5402-5415. <https://doi.org/10.1093/jxb/erab243>

Zhang, H., Zhu, J., Gong, Z., & Zhu, J.K. (2020). Abiotic stress responses mediated by abscisic acid in cereal crops. *Nature Reviews Genetics*, 21 (11), 677-692. <https://doi.org/10.1038/s41576-020-0253-6>

Zhang, Y., Zhao, Y., Hou, X., Zhang, C., Wang, Z., Zhang, J., Liu, X., Shi, X., Duan, W., & Xiao, K. (2025). Wheat TaPYL9-involved signalling pathway impacts plant drought response through regulating distinct osmotic stress-associated physiological indices. *Plant Biotechnology Journal*, 23 (2), 352-373. <https://doi.org/10.1111/pbi.14501>

BÖLÜM 10

MİKROBİYAL GÜBRE UYGULAMALARINDA SORUNLAR, SINIRLAMALAR VE GELECEK PERSPEKTİFLERİ

İlhan SUBAŞI ¹
Yusuf ARSLAN ²

Giriş

Mikrobiyal gübreler, 21. yüzyıldaki tarımsal girişimlerin aşması gereken besleme sorunlarının çözümü ve sürdürülebilir yeşil tarımda verimlilik artışı hedeflerine en yenilikçi çözümler arasında yer alacaktır. Küresel ölçekte artan nüfusu beslerken çevresel sürdürülebilirliği de sağlamak bir zorunluluktur. Bu gübreler, çevre ve gıda güvenliği üzerindeki etkileri göz önüne alındığında geleneksel kimyasal gübrelere alternatif olarak sunulan biyoteknolojik ürünlerdir (Vessey, 2003; Roupheal & Colla, 2020). Biyolojik formülasyonlar, atmosferik azot fiksasyonu yanında bitki

¹ Doç. Dr. ; Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi, Ziraat Fakültesi Tohum Bilimi ve Teknolojisi Bölümü. ilhansubasi@gmail.com ORCID No: 0000-0001-7237-937X

² Prof. Dr.; Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi, Ziraat Fakültesi Tarla Bitkileri Bölümü. yarslantarm@gmail.com ORCID No: 0000-0001-8496-6037

alımı için hazır formda olmayan ve kullanılamayan besin maddelerinin alınabilir forma dönüştürmesi gibi çok yönlü potansiyellere sahip canlı mikroorganizmalar içermektedir (Glick, 2012; Singh vd., 2023). Mikrobiyal gübreler, sentetik gübrelere kıyasla biyolojik, kimyasal ve fiziksel toprak ekosistem sağlığını iyileştirir. Yeşil ve ekolojik tarımsal üretimin uzun vadede daha sürdürülebilir olmasını sağlar. Bu potansiyel, özellikle açlığın sona erdirilmesi, sorumlu tüketim ve üretim konularında Birleşmiş Milletler'in Sürdürülebilir Kalkınma Hedefleriyle doğrudan uyumludur.

Laboratuvar çalışmalarından elde edilen bulgularla kanıtlanmış olan mikrobiyal gübrelerin başarısının, tutarlı ve yaygın bir şekilde saha uygulamalarına başarılı bir şekilde aktarılmasının önünde büyük ve karmaşık zorluklar bulunmaktadır (Mitter vd., 2019; Poudel vd., 2021). Bu ürünler, canlı oldukları için elleçlenmeleri, depolanmaları, taşınmaları ve uygulanmaları çok hassastır. Saha koşullarında kontrol edilemeyen değişkenlik (örneğin toprak tipi, iklim, topraktaki doğal mikrobiyota popülasyonu ve tarımsal uygulamalar), laboratuvarlarda optimize edilmiş suşların performansını önemli ölçüde etkileyebilir. Bu bakımdan sahalardan elde edilen verilerin laboratuvar verileri ile veya başka saha çalışmaları ile örtüşmemesi gibi tutarsızlıklar ve kalite kontrolünün yeterli olmaması gibi sorunlar mevcuttur.

Bu bölüm, mikrobiyal gübre teknolojisinin mevcut durumuna ilişkin eleştirel bir inceleme yapmayı amaçlamaktadır. Bunu yaparken, mikrobiyal gübre teknolojisinin benimsenmesini sınırlayan temel biyolojik, teknik ve sosyo-ekonomik sorunların ayrıntılı bir açıklamasını ihtiva etmektedir. Suş özgülüğü, uygulanmayan kalite kontrol önlemleri ve tutarsız saha performanslarıyla ilgili başlıca sınırlamalar burada bilimsel kanıtlarla ortaya konmaktadır. Bu bölümde bu zorlukların üstesinden gelmeye yönelik yenilikler, genomik, sentetik biyoloji,

nanoteknoloji ve mikrobiyom mühendisliğinde 2023 ile 2025 yılları arasında yapılan çığır açıcı keşiflerden bahsedilecektir.

Biyolojik ve Ekolojik Sorunlar

Rekabet ve Kolonizasyon Başarısızlığı: Bir mikrobiyal gübre toprağa uygulandığında, içerdiği mikroorganizmalar (inokülanlar) hayatta kalmak, çoğalmak ve rizosferde (kök çevresi) kolonize olmak için toprakta zaten yerleşik olan milyonlarca mikroorganizmayla rekabet etmek zorundadır (Martínez-Hidalgo & Hirsch, 2017; Bashan vd., 2014). Yerli mikrobiyal topluluklar, bulundukları ortama on binlerce yıldır uyum sağlamışlardır ve genellikle yeni gelenlere karşı rekabet avantajına sahiptirler. Besin, su ve kök yüzeyindeki bağlanma alanları için verilen bu mücadeleye rağmen, çalışmalar, anında toprakta uyum sağlayamayan inokülan suşların popülasyonunun hızla düştüğünü ve beklenen faydayı sağlayamadığını göstermektedir (de Souza vd., 2015; Santoyo vd., 2021).

Abiyotik Stres Faktörlerinin Etkisi: Mikrobiyal gübrelerin performansı, toprak ve iklim koşullarına son derece duyarlıdır. Toprak pH'ı, sıcaklık, nem, tuzluluk, organik madde içeriği ve ağır metal kirliliği gibi abiyotik stres faktörleri, mikroorganizmaların metabolik aktivitelerini ve hayatta kalma oranlarını doğrudan etkiler (Kaljeet vd., 2023). Örneğin, yüksek sıcaklıklar birçok mezofilik bakteri suşunun ölümüne yol açabilirken, kuraklık spor oluşturmamayan türlerin aktivitesini tamamen durdurabilir. Benzer şekilde, asidik veya alkali topraklar, birçok faydalı mikrobun enzim aktivitesini (örneğin, nitrogenaz) inhibe ederek işlevlerini yerine getirmesini engeller (Jiang vd., 2021). Bu nedenle, laboratuvarıda ideal koşullarda geliştirilen bir suş, değişken ve stresli tarla koşullarında genellikle aynı performansı gösteremez.

Biyotik Faktörler: Toprak ekosistemi, sadece rekabetçi mikropları değil, aynı zamanda bakteri ve mantarları avlayan protozoalar ve nematodlar gibi predatörleri de içerir (Csorba vd., 2024). İnoküle edilen faydalı mikroorganizmalar, bu predatörler için kolay bir besin kaynağı olabilir, bu da popülasyonlarının hızla azalmasına yol açar. Ayrıca, bitki patojenlerinin varlığı da dolaylı bir sorun teşkil edebilir. Bitki strese girdiğinde kök salgılarının kimyası değişir ve bu durum faydalı mikropların kolonizasyonunu olumsuz etkileyebilir.

Teknik ve Formülasyon Sorunları

Formülasyonun Kalitesi ve Raf Ömrü: Mikrobiyal gübrelerin başarısındaki en kritik teknik darboğazlardan biri formülasyondur. Formülasyonun amacı, mikroorganizmaları üretimden tarlaya uygulanana kadar canlı, stabil ve etkin tutmaktır. Ancak piyasadaki birçok ürün, bu hedefe ulaşmada yetersiz kalmaktadır.

Katı formülasyonlar olarak turba, linyit, vermikülit gibi taşıyıcılar kullanılır. Bu materyallerin sterilizasyonunun yetersiz olması, kontaminasyona ve raf ömrünün kısılmasına neden olur (Meena vd., 2023; Bashan vd., 2014). Ayrıca, bu taşıyıcılar ağır olabilir ve tozuma sorunları yaratarak uygulamayı zorlaştırabilir.

Sıvı formülasyonlar uygulama kolaylığı sunsalar da, genellikle daha kısa raf ömrüne sahiptirler ve sıcaklık dalgalanmalarına karşı çok daha hassastırlar (Timmusk vd., 2017). Son yıllarda, mikroorganizmaları korumak için polimerler veya biyoplastikler gibi materyallerin kullanıldığı mikroenkapsülasyon teknikleri geliştirilmektedir, ancak bu teknolojilerin maliyeti hala yüksektir.

Depolama ve Lojistik Zorlukları: Mikrobiyal gübreler canlı ürünlerdir ve bu nedenle "soğuk zincir" benzeri hassas bir lojistik

yönetimi gerektirirler (Yadav vd., 2020). Yüksek sıcaklıklara maruz kalma, ürünün etkinliğini tamamen yok edebilir. Özellikle gelişmekte olan ülkelerdeki yetersiz depolama altyapısı ve uzun tedarik zincirleri, ürünün çiftçiye ulaştığında canlılığını yitirmesine neden olmaktadır.

Uygulama Hataları: Mikrobiyal gübrelerin etkinliği, doğru zamanda, doğru dozda ve doğru yöntemle uygulanmasına bağlıdır. Çiftçilerin bu konudaki bilgi eksikliği yaygın bir sorundur (Malusá & Vassilev, 2014). Örneğin, tohum kaplama uygulamasının pestisit kaplamalarıyla birlikte yapılması mikroorganizmaları öldürebilir veya UV ışığına maruz kalacak şekilde gündüz saatlerinde yapılan yaprak uygulamaları başarısız olabilir.

Sosyo-Ekonomik ve Yasal Sorunlar

Çiftçi Farkındalığı ve Güven Eksikliği: Çiftçiler genellikle kimyasal gübrelerin hızlı ve gözle görülür etkilerine alışkındır. Mikrobiyal gübrelerin etkileri ise genellikle daha yavaş, kümülatif ve toprak sağlığının iyileşmesi gibi daha az görünür faydalar şeklinde ortaya çıkar (Terry vd., 2022). Sahadaki performans tutarsızlıkları ve bilgi eksikliği, çiftçilerin bu yeni teknolojiyi benimseme konusunda tereddüt etmesine ve risk almaktan kaçınmasına neden olmaktadır (Singh vd., 2023).

Yüksek Başlangıç Maliyeti ve Ekonomik Risk: Kaliteli ve güvenilir mikrobiyal gübrelerin fiyatı, bazı durumlarda sübvansile edilen kimyasal gübrelerden daha yüksek olabilir. Çiftçi, kanıtlanmış bir yöntem yerine belirsiz bir sonuç sunan yeni bir teknolojiye yatırım yapmayı ekonomik bir risk olarak görebilir (Reed vd., 2022).

Yetersiz Yasal Düzenleme ve Kalite Kontrol: Mikrobiyal gübre pazarı, birçok ülkede hala yetersiz düzenlenmektedir. Bu durum, piyasada düşük kaliteli, kontamine veya vaat edilen

mikroorganizma sayısını içermeyen ürünlerin dolaşmasına neden olmaktadır. Standart kalite kontrol protokollerinin, suş kayıt sistemlerinin ve şeffaf etiketleme zorunluluklarının olmaması hem çiftçiye mağdur etmekte hem de sektörün geneline olan güveni sarsmaktadır (Bashan vd., 2014; FAO, 2021; Ditta vd., 2018).

Mikrobiyal Gübre Teknolojisinin Temel Sınırlamaları

Sorunların ötesinde, teknolojinin doğasından kaynaklanan ve aşılması daha zor olan bazı temel sınırlamalar mevcuttur.

Biyolojik Sınırlamalar (Spesifiklik ve Ortam Bağımlılığı) : Mikroorganizmaların etkinliği bitki genotipine, toprak tipine ve iklim koşullarına yüksek derecede bağımlıdır. Mikrobiyal gübre suşlarının, spesifik bitki genotipleri, toprak tipi ve iklim koşullarına aşırı bağlı olması genel etkinlik beklentisini boşa çıkarır (Martínez-Hidalgo & Hirsch, 2017). Bir *Rhizobium* suşunun sadece belirli bir baklagilde etkin olması, örneğin bir yonca türünde çok etkili olabilirken, başka bir yonca türünde veya fasulyede hiç nodül oluşturmaması ve yine aynı *Pseudomonas* türünün farklı topraklarda değişkenlik göstermesi tipik örneklerdir (Kaljeet vd., 2023). Bu örneklerde olduğu gibi farklı ortam ve toprak türü de etkinlik sınırlayıcı bir etken olabilir. *Bacillus mucilaginosus* gibi potasyum çözücü bakteriler, potasyumun bol olduğu feldspat içeren topraklarda etkiliyken, killi topraklarda aynı performansı göstermeyebilir.

Performans Sınırlamaları: Laboratuvar ve sera koşullarında sağlanan başarıların, tarla ortamında tekrarlanamamasındaki en önemli nedenler mikroorganizma-toprak-bitki ilişkilerinin karmaşıklığıdır (Bashan vd., 2014; Mitter vd., 2019). Laboratuvarda hektar başına 40 kg N fikse etme potansiyeli gösteren bir *Azotobacter* suşu, tarlada yerli mikroplarla rekabet, kuraklık ve besin sınırlaması gibi nedenlerle sadece 5-10 kg N fikse edebilir. Bu durum, beklenti ile gerçeklik arasında bir uçurum yaratır.

Formülasyon Sınırlamaları: Canlı organizmaların uzun ömürlü, dayanıklı, uygulanabilir formülasyonlarının hâlâ istenen düzeyde başarıya ulaşamaması ve bu eksikliğin sahanın ölçeklendirilmesinin önünde büyük engel olduğu söylenebilir (Meena vd., 2023; Timmusk vd., 2017). Sıvı formülasyonların raf ömrü genellikle 6 aydan kısadır ve soğuk zincir gerektirir. Turba bazlı katı formülasyonlar 1 yıla kadar dayanabilse de depolama sırasında nem kontrolü kritik öneme sahiptir. Bu, geniş ölçekli dağıtım ve stoklama için büyük bir engeldir.

Sistemik Sınırlamalar: Piyasadaki denetim ve test eksikliği ve etiketleme yetersizliğinden dolayı düşük kaliteli ürünler, sektör geneline zarar vermektedir ve çiftçi nezdinde teknolojinin benimsenmesini zayıflatmaktadır (Malusá & Vassilev, 2014; Reed vd., 2022). Piyasada satılan bir ürünün etiketinde 10^9 CFU/g bakteri içerdiği belirtilse de bunu bağımsız olarak doğrulayacak standart ve zorunlu bir test mekanizması çoğu ülkede yoktur. Bu durum, kalitesiz ürünlerin pazarı domine etmesine yol açar.

Gelecek Perspektifleri; Yeni Nesil Çözümler ve Yenilikçi Yaklaşımlar

Yukarıda sıralanan sorunlar ve sınırlamalar, bilim ve teknolojiadaki ilerlemeler sayesinde aşılabilecek potansiyele sahiptir. Özellikle son yıllardaki gelişmeler (2023-2025), mikrobiyal gübrelerin geleceği için heyecan verici bir yol haritası sunmaktadır.

Akıllı Konsorsiyumlar ve Mikrobiyom Mühendisliği: Gelecek, tek bir "süper suş" yerine, farklı görevleri yerine getiren ve birbirleriyle sinerji içinde çalışan mikroorganizma topluluklarının (konsorsiyumlar) kullanımına doğru evrilmektedir. Bu yaklaşım, tek bir suşun başarısız olabileceği değişken koşullarda sistemin direncini ve etkinliğini artırır (Mishra vd., 2021; Lyu vd., 2022). Örneğin, bir konsorsiyum; azot fikse eden bir bakteri, fosfor çözen

bir mantar, kuraklık stresini azaltan bir ACC deaminaz üreticisi ve bir biyokontrol ajanı içerebilir.

Daha da ileri bir yaklaşım olan bitki mikrobiyom mühendisliği, toprağa dışarıdan mikrop eklemek yerine, bitkinin kendi doğal mikrobiyomunu istenen yönde şekillendirmeyi hedefler. Bu, bitkinin kök salgıları aracılığıyla faydalı mikropları çağırmasını sağlayacak bitki genotipleri geliştirmek veya toprağa faydalı mikropları cezbeden özel organik bileşikler (biyostimülantlar) eklemek yoluyla yapılabilir (Mohan vd., 2022).

Genomik, Sentetik Biyoloji ve CRISPR ile Hassas Tasarım: Yüksek verimli suşların genomlarının dizilenmesi ve transkriptomik analizler, onların başarılarının ardındaki genetik mekanizmaları aydınlatmaktadır. Bu bilgi, belirli bir toprak tipi veya stres koşulu için en uygun suşları seçmek amacıyla makine öğrenmesi algoritmaları ile birleştirilebilir (Cohen vd., 2021).

Sentetik Biyoloji ve CRISPR/Cas: Bu devrim niteliğindeki teknolojiler, mikroorganizmaları programlamayı mümkün kılmaktadır. Örneğin, CRISPR-dCas9 gibi araçlar kullanılarak bir bakterinin genetik devresi şu şekilde tasarlanabilir: Bakteri, sadece bitki kökünden belirli bir kimyasal sinyal (örneğin, flavonoid) aldığında azot fiksasyon genlerini aktive eder (Russell vd., 2024). Bu, enerjinin boşa harcanmasını önler ve fiksasyon verimliliğini artırır. Benzer şekilde, sentetik biyoloji ile bitkiye azot fiksasyonu yeteneği kazandırma (örneğin, nitrojenaz gen kümesinin bitki genomuna entegrasyonu) yönündeki çalışmalar devam etmektedir. CRISPR/Cas teknolojisi ile bitki besin kullanım verimliliğini engelleyen genler susturularak ve verimliliği artıran genleri aktive edilerek hassas tasarlanmış mikrobiyal gübreler oluşturulabilir.

Gelişmiş Formülasyon: Nanoteknoloji ve Biyopolimerler: Formülasyon sorunlarının üstesinden gelmek için nanoteknoloji ve polimer bilimi umut verici çözümler sunmaktadır.

Nano-enkapsülasyon: Mikroorganizmalar, biyolojik olarak parçalanabilen polimerlerden (örneğin, aljinat, kitosan) yapılmış nano veya mikro boyutlu kapsüllerin içine hapsedilebilir. Bu kapsüller, mikropları UV ışığı, kuraklık ve pH değişimleri gibi dış stres faktörlerinden korur (Saberı vd., 2021). Ayrıca, bu kapsüller "kontrollü salınım" mekanizmasıyla tasarlanabilir; yani, mikropları sadece toprakta belirli bir nem veya kimyasal sinyal varlığında serbest bırakırlar.

Hidrojeller ve Biyoplastikler: Su tutma kapasitesi yüksek olan süper emici hidrojeller, taşıyıcı materyal olarak kullanılarak mikroorganizmalar için nemli bir mikro çevre yaratabilir ve kuraklık koşullarında hayatta kalma şanslarını artırabilir (Ribeiro vd., 2024). Biyoplastik bazlı kaplamalar ise tohum uygulamalarında hem mikropları koruyabilir hem de toprağa yavaşça salınarak organik madde kaynağı olabilir.

Dijital Tarım ve Hassas Uygulama: Gelecekte mikrobiyal gübreler, hassas tarım teknolojileriyle entegre bir şekilde kullanılacaktır. Drone'lar veya uydular aracılığıyla elde edilen veriler, bitkilerin tarlanın hangi bölgelerinde besin eksikliği yaşadığını veya strese girdiğini belirleyebilir. Bu bilgiye dayanarak, değişken düzeyli gübreleme uygulama teknolojisine sahip akıllı traktörler, mikrobiyal gübreleri sadece ihtiyaç duyulan bölgelere, ihtiyaç duyulan miktarda uygulayabilir (Nagchaudhuri vd., 2023). Bu yaklaşım hem maliyeti düşürür hem de ürünün etkinliğini maksimize eder.

Sonuç ve Genel Değerlendirme

Mikrobiyal gübreler, tarımın geleceği için teorik olarak muazzam artılar sunsa da pratik uygulamaları halen önemli zorluklar ve sınırlamalarla doludur. Biyolojik karmaşıklık, teknik yetersizlikler ve sistemik engeller, bu teknolojinin potansiyelini tam olarak gerçekleştirmesini önlemektedir. Çiftçilerin yaşadığı hayal

kırıklıkları ve pazardaki güvenilirlik sorunları, bu engellerin somut birer yansımasıdır.

Ancak, karamsar bir tablo çizmek yerine, bu zorlukları birer araştırma ve inovasyon fırsatı olarak görmek daha yapıcı bir yaklaşımdır. Genomik, sentetik biyoloji, nanoteknoloji ve dijital tarım gibi disiplinler arası alanlardaki ilerlemeler, daha önce aşilamaz görünen sorunlara yönelik somut çözümler sunmaktadır. Geleceğin mikrobiyal gübreleri, tek bir suştan oluşan basit bir formülasyon yerine, belirli bir ekosistem için özel olarak tasarlanmış, çok fonksiyonlu, strese dayanıklı ve akıllı mikroorganizma konsorsiyumları olacaktır.

Bu potansiyelin gerçeğe dönüşmesi için; Bilim Dünyasının temel mekanizmaları anlamaya ve yeni nesil teknolojileri geliştirmeye devam etmesi, özel sektörün kalite standartlarına uyan, güvenilir ve yenilikçi ürünler geliştirmesi ve çiftçi eğitimine yatırım yapması ve kamu otoritelerinin de şeffaf bir yasal çerçeve oluşturması, kalite kontrolünü sağlaması ve bu sürdürülebilir teknolojinin benimsenmesini teşvik edici politikalar uygulaması gerekmektedir (Ditta vd., 2018; Malusá & Vassilev, 2014).

Bu entegre yaklaşım ile daha bütüncül bir şekilde bilim camiası, kamu ve özel sektörün iş birliği, etik ve yasal standartların oluşturulması ve yaygın eğitim ile mikrobiyal gübrelerin potansiyelinin reel tarımda karşılık bulması mümkündür.

Kaynakça

Bashan, Y., de-Bashan, L. E., Prabhu, S. R., & Hernandez, J. P. (2014). Advances in plant growth-promoting bacterial inoculant technology: Formulations and practical perspectives (1998–2013). *Plant and Soil*, 378 (1), 1-33. <https://doi.org/10.1007/s11104-013-1956-x>

Cohen, S., Rokach, L., Motro, Y., Moran-Gilad, J., & Veksler-Lublinsky, I. (2021). minMLST: machine learning for optimization of bacterial strain typing. *Bioinformatics*, 37(3), 303-311.

Csorba, C., Hackl, E., Reichenauer, T., van der Putten, W., & Sessitsch, A. (2024). *Sustainable use and conservation of soil microorganisms and invertebrates contributing to bioremediation and nutrient cycling*. Food & Agriculture Org.

De Souza, R., Ambrosini, A., & Passaglia, L. M. P. (2015). Plant growth-promoting bacteria as inoculants in agricultural soils. *Genetics and Molecular Biology*, 38(4), 401-419.

Ditta, A., Imran, M., Mehmood, S., Rizwan, M., & Mahmood, A. (2018). Chapter 5 - Microbial Biofertilizer Formulations and Advances in the Role of their Quality Control. In *Biofertilizers for Sustainable Agriculture and Environment* (pp. 79-103). Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-13-0212-9_5.

FAO. (2021). *The State of the World's Biodiversity for Food and Agriculture*. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations.

Glick, B. R. (2012). Plant growth-promoting bacteria: mechanisms and applications. *Scientifica*, 2012. <https://doi.org/10.6064/2012/963401>

Jiang, Y., Jiao, Y., Xin, G., & Li, Y. (2021). Soil pH and temperature influence the effectiveness of biofertilizers in field trials: A meta-analysis. *Science of the Total Environment*, 765, 144370.

Kaljeet, S. S., Zahid, A., Ahmad, A., & Yusoff, W. M. W. (2023). Enhancing Biofertilizer Efficacy and Shelf-Life Using Nanotechnology: A Review. *Applied Sciences*, 13 (7), 3999.

Lyu, D., Backer, R., & Smith, D. L. (2022). Three plant growth-promoting rhizobacteria alter morphological development,
--203--

physiology, and flower yield of *Cannabis sativa* L. *Industrial Crops and Products*, 178, 114583.

Malusá, E., & Vassilev, N. (2014). A contribution to set a legal framework for biofertilisers. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 98, 6599–6607.

Martínez-Hidalgo, P., & Hirsch, A. M. (2017). The nodule microbiome: N₂-fixing rhizobia do not live alone. *Phytobiomes Journal*, 1 (2), 70-82.

Meena, A. K., Mishra, P. K., Bisht, S. S., Rakshit, A., & Kundu, S. (2023). Bioformulation and its role in sustainable agriculture: Current scenario and future prospects. *Agriculture* , 13(2), 404.

Mishra, S., Li, H., & Maiti, D. (2021). Plant microbiome: A key player in sustainable agriculture. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 38, 102196.

Mitter, B., Brader, G., Afzal, M., Compant, S., Naveed, M., & Sessitsch, A. (2019). Advances in elucidating beneficial interactions between plants, soil, and bacteria. In *Plant–Microbe Interactions in Agro-Ecological Perspectives* (pp. 195-212). Springer, Singapore.

Mohan, R., Zhang, F., Pericak, O., Wynkoop, M., Schwab, N., Spells, S., ... & Zamioudis, C. (2022). Microbiome-based sustainable agriculture targeting plant protection. In *Understanding the Microbiome Interactions in Agriculture and the Environment* (pp. 139-183). Singapore: Springer Nature Singapore.

Nagchaudhuri, A., Pandya, J., Nnebedum, B., Mitra, M., & Nindo, C. (2023). Leveraging Smart Farming Technologies for Optimal pH Adjustments With Variable Rate Lime Application. In *International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference* (Vol. 87356, p. V007T07A009). American Society of Mechanical Engineers.

Poudel, A., Jumpponen, A., Schlatter, D. C., Paulitz, T. C., Garrett, K. A., & Kinkel, L. L. (2021). Microbiome networks: a systems framework for identifying candidate microbial assemblages for disease management and plant performance. *Phytopathology*, 111 (1), 60-72.

Reed, M. L. E., Weinstein, J., Macfadyen, S., Storer, P. J., & Zimmermann, J. (2022). Biofertilizer adoption: A review of uptake pathways and pervading barriers. *Agronomy for Sustainable Development*, 42, 38.

Ribeiro, A. B., Moreira, H., Pereira, S. I., Godinho, M., da Silva Sousa, A. S., Castro, P., ... & Ramos, Ó. L. (2024). Bio-based superabsorbent hydrogels for nutrient release. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 12(2), 112031.

Rouphael, Y., & Colla, G. (2020). Editorial: Biostimulants in agriculture. *Frontiers in Plant Science*, 11, 40.

Russell, S. J., Garcia, A. K., & Kaçar, B. (2024). A CRISPR interference system for engineering biological nitrogen fixation. *Msystems*, 9(3), e00155-24.

Saberi Riseh, R., Ebrahimi-Zarandi, M., Gholizadeh Vazvani, M., & Skorik, YA (2021). Bitki büyümesini teşvik eden bakterilerin polisakkaritlerle kapsüllenmesi yoluyla bitkilerde kuraklık stresinin azaltılması. *Uluslararası Moleküler Bilimler Dergisi*, 22 (23), 12979.

Santoyo, G., Orozco-Mosqueda, M. D. C., & Glick, B. R. (2021). Plant growth-promoting bacterial consortia and their interactions with plants and soil. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 105, 8159–8170.

Singh, R. P., Jha, P. N., Glick, B. R., & Singh, M. (2023). Biofertilizers: Role in Plant Growth and Soil Health. *Advances in Agronomy*, 174, 101-145.

Terry, C. A., Thomson, L. J., White, J., & Rodriguez, A. (2022). Adoption Barriers for Biofertilizers and Biostimulants: Insights from Australian Growers. *Agriculture*, 12 (10), 1613.

Timmusk, S., Behers, L., Muthoni, J., Muraya, A., & Aronsson, A. C. (2017). Perspectives and challenges of microbial application for crop improvement. *Frontiers in Plant Science*, 8, 49.

Vessey, J. K. (2003). Plant growth promoting rhizobacteria as biofertilizers. *Plant and Soil*, 255 (2), 571-586.

Yadav, A. N., Verma, P., Kumar, S., Sangwan, P., Mishra, L. S., Panjiar, N., ... & Singh, B. P. (2020). Biodiversity of the microbial communities associated with agro-ecosystems and their potential applications. *Environmental Sustainability*, 3, 305-324.

GEÇİCİ KAPAK

*Kapak tasarımı
devam ediyor.*