

Sustainable Agriculture

Drought Stress, Plant Nutrition
and Plant Health



Edited by
Figen Eraslan Inal

BİDGE Yayınları

Sustainable Agriculture: Drought Stress, Plant Nutrition and Plant Health

Editör: FİGEN ERASLAN İNAL

ISBN: 978-625-8673-30-2

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

Dünya genelinde artan nüfus, iklim değişikliğinin etkilerinin giderek belirginleşmesi ve doğal kaynaklar üzerindeki baskının artması, tarımsal üretim sistemlerinin yeniden değerlendirilmesini zorunlu kılmaktadır. Bu bağlamda sürdürülebilir tarım, yalnızca verim artışını değil; aynı zamanda çevresel dengeyi, doğal kaynakların korunmasını ve gelecek nesillerin gıda güvenliğini esas alan bütüncül bir yaklaşım olarak öne çıkmaktadır.

İklim değişikliğinin tarım üzerindeki en önemli etkilerinden biri olan kuraklık stresi, bitkilerin büyüme ve gelişimini sınırlayan temel abiyotik stres faktörlerinden biridir. Suya erişimin kısıtlandığı koşullarda bitkilerin fizyolojik, biyokimyasal ve moleküler düzeyde verdiği tepkiler; verim, kalite ve bitki sağlığı üzerinde doğrudan belirleyici olmaktadır. Bu nedenle kuraklık stresinin etkilerinin doğru anlaşılması ve yönetilmesi, sürdürülebilir tarım uygulamalarının temel bileşenlerinden biri hâline gelmiştir.

Bitki besleme, bitkilerin stres koşullarına dayanıklılığını artırmada kilit rol oynamaktadır. Dengeli ve bilinçli besin elementi yönetimi, yalnızca büyüme ve verimi desteklemekle kalmamakta; aynı zamanda bitkilerin su kullanım etkinliğini artırarak kuraklık gibi olumsuz çevresel koşullara karşı tolerans geliştirmelerine katkı sağlamaktadır. Özellikle makro ve mikro besin elementlerinin fizyolojik süreçler üzerindeki etkileri, bitki sağlığının korunması açısından büyük önem taşımaktadır.

Bitki sağlığı ise sürdürülebilir üretim sistemlerinin merkezinde yer almakta; besleme, çevresel stresler ve biyotik etmenler arasındaki etkileşimlerin bir sonucu olarak

şekillenmektedir. Sağlıklı bitkiler, hem stres koşullarına karşı daha dirençli olmakta hem de uzun vadede tarımsal ekosistemlerin sürdürülebilirliğini desteklemektedir.

Bu bölüm, sürdürülebilir tarım çerçevesinde kuraklık stresi, bitki besleme ve bitki sağlığı arasındaki karşılıklı ilişkileri bilimsel temeller ışığında ele almayı amaçlamaktadır. Sunulan bilgiler ve değerlendirmelerin, araştırmacılara, öğrencilere ve uygulayıcılara yol gösterici olacağı ve sürdürülebilir tarımsal üretim yaklaşımlarının geliştirilmesine katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

Prof. Dr. FİGEN ERASLAN İNAL

ISPARTA UYGULAMALI BİLİMLER ÜNİVERSİTESİ

İÇİNDEKİLER

SÜRDÜRÜLEBİLİR TARIMDA BİTKİ GELİŞİMİNİ TEŞVİK EDEN RİZOBAKTERİLERİN ÇOK YÖNLÜ ROLLERİ	1
---	---

GİZEM AKSU

KURAKLIK STRESİNİN TARIMSAL ÜRETİM VE BİTKİ BESLENME FİZYOLOJİSİ ÜZERİNE ETKİLERİ	26
--	----

FİGEN ERASLAN İNAL

Microgranular (micro Granule, Micro-granule) Fertilizers	46
--	----

SAHRİYE SÖNMEZ, İLKER SÖNMEZ

PLANT NUTRITION AND PLANT HEALTH RELATIONSHIPS	66
---	----

İLKER SÖNMEZ, SAHRİYE SÖNMEZ

BÖLÜM 1

SÜRDÜRÜLEBİLİR TARIMDA BİTKİ GELİŞİMİNİ TEŞVİK EDEN RİZOBAKTERİLERİN ÇOK YÖNLÜ ROLLERİ

Gizem AKSU¹

Giriş

Modern tarım uygulamalarında verim artışını sağlamak amacıyla kimyasal gübrelerin yoğun ve uzun süreli kullanımı, tarımsal üretimde kısa vadeli kazanımlar sağlamakla birlikte, uzun vadede toprak sağlığı ve çevresel sürdürülebilirlik açısından ciddi sorunlara yol açmaktadır. Toprak yapısının bozulması, besin elementleri dengesizlikleri, yeraltı ve yüzey sularının kirlenmesi ile biyolojik çeşitliliğin azalması, kimyasal girdilere dayalı üretim sistemlerinin en önemli olumsuz sonuçları arasında yer almaktadır. Bu bağlamda, çevre dostu, sürdürülebilir ve ekosistem temelli alternatif yaklaşımlara olan ihtiyaç giderek artmaktadır.

Bu arayış, son yıllarda tarımsal üretimde biyogübrelerin ve özellikle bitki gelişimini teşvik eden rizobakterilerin (Plant Growth-Promoting Rhizobacteria, PGPR) önemini ön plana çıkarmıştır. Bitki gelişimini teşvik eden rizobakteriler, bitki kök bölgesinde (rizosferde) kolonize olarak bitki gelişimini doğrudan ve dolaylı mekanizmalar aracılığıyla destekleyen faydalı

mikroorganizmalardır. Bu bakteriler, atmosferik azotun biyolojik fiksasyonu, fosfor gibi çözünlüğü sınırlı besin elementlerinin bitkiler tarafından alınabilir forma dönüştürülmesi ve çeşitli fitohormonların sentezi yoluyla bitki büyümesini doğrudan teşvik etmektedir. Bunun yanı sıra, bitkilerin abiyotik (kuraklık, tuzluluk, ağır metal stresi gibi) ve biyotik (patojenler) stres koşullarına karşı dayanıklılığını artıran önemli biyolojik işlevler üstlenmektedirler.

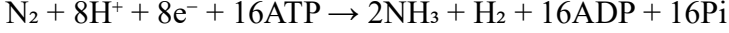
Bitki gelişimini teşvik eden rizobakterilerin tarımsal sistemlerdeki katkısı yalnızca bitki büyümesi ile sınırlı değildir. Antibiyotik ve siderofor üretimi, uçucu organik bileşiklerin (VOC) salınımı ve indüklenmiş sistemik direnç mekanizmalarının aktive edilmesi gibi süreçler aracılığıyla bitki hastalıklarının baskılanmasında da önemli rol oynamaktadırlar. Bu çok yönlü etkileşimler, PGPR'yi hem bitki besleme hem de bitki koruma açısından entegre çözümler sunan biyolojik girdiler haline getirmektedir. Dolayısıyla, PGPR temelli biyogübreler, kimyasal gübre ve pestisit kullanımının azaltılmasına katkı sağlayarak sürdürülebilir tarım uygulamalarının temel bileşenlerinden biri olarak değerlendirilmektedir.

Bu çalışmada, bitki gelişimini teşvik eden rizobakterilerin biyogübre olarak tarımsal üretimdeki rollerini belirleyen temel biyolojik mekanizmalar ele alınmaktadır. Özellikle bitki besin elementlerinin alınabilirliği, bitki büyüme düzenleyicilerin üretimi ve stres toleransının artırılması bağlamında PGPR'nin çok işlevli etkileri vurgulanmaktadır.

Azot Fiksasyonu

DNA, RNA, proteinler, enzimler ve lipitler gibi hayati biyomoleküllerin ana bileşeni olan azot, bitki büyümesinde ve metabolik aktivitelerde önemli bir rol oynamaktadır. Atmosferde yüksek konsantrasyonda azot (%78 N₂) bulunmasına rağmen, bitkiler bu serbest azotu doğrudan kullanamaz (Shin vd., 2016). Atmosferik azot, bitki kullanımı için amonyağa (NH₃) dönüştürülür; buna azot fiksasyonu denir. Eğer bu süreç, bir nitrojenaz enzimi içeren diazotrofik mikroorganizmalar aracılığıyla gerçekleşirse, buna biyolojik azot fiksasyonu denir (Ali vd., 2017). Nitrojenaz enzimi, elektron taşıma mekanizmalarını kullanarak yoğun enerji

tüketen biyokimyasal bir döngü ile azot gazını amonyağa indirger ve kimyasal reaksiyon şu şekilde gerçekleşir:



Bitkiler için gerekli azotu sağlayan çevre dostu, sürdürülebilir bir mekanizma olan biyolojik azot fiksasyonu (Shah ve Wu, 2019), kimyasal azotlu gübrelere olan bağımlılığı azaltmak için yeni bir stratejidir. Azot fiksasyonunu sağlayan metaloenzim iki bileşenden oluşur. Birincisi, elektron taşıyıcı görevi gören bir demir proteini olan dinitrojenaz redüktaz, ikincisi ise bir metal kofaktör olan dinitrojenazdır (Seefeldt vd., 2018). Metal kofaktörlerine göre sınıflandırılan üç tip nitrojenaz enzimi bulunmaktadır; bunlar molibden, vanadyum ve demir içeren nitrojenazlardır (Harris vd., 2018). Bu enzimlerin aktivitesi nif genleri tarafından kodlanmaktadır (Glick, 1995).

Azot bağlayan bakteriler, simbiyotik ve simbiyotik olmayan bakteriler olmak üzere iki gruba ayrılır. Serbest yaşayan bir konağa ihtiyaç duymayan Siyanobakteriler, Azospirillum, Pseudomonas, Azotobacter, Acetobacter ve Nostoc türleri ile yaşamak için bir konağa ihtiyaç duyan Frankia ve Rhizobium türleri yaygındır (Bhattacharyya ve Jha, 2012; Umar vd., 2020). Simbiyotik bakteriler ve konakları arasındaki karmaşık süreç, enfeksiyon, yerleşme ve kök nodüllerinin oluşumu şeklinde gerçekleşir (Giordano ve Hirsch, 2004). Topraktaki bakteriler, köklerden salgılanan flavonoidler tarafından uyarılır ve nodül faktörleri üretir; bu sinyaller bitki tarafından alınır ve buna karşılık bitkinin kök hücrelerinde değişiklikler başlar. Bakteriler, enfeksiyon iplikleriyle kök tüylerini enfekte eder ve köke doğru ilerler. Bakteriler kökün korteks bölgesine ulaştığında, bitki bakterilerle birlikte kök nodülleri oluşturur. Bu nodüllerin içinde bakteriler, atmosferik azotu bitkinin kullanabileceği amonyağa dönüştürür (Oldroyd ve Downie, 2008). Ticari olarak yaygın kullanılan azotlu biyolojik gübreler, Rhizobium, Azotobacter ve Azospirillum gibi çeşitli bakterilerin karışımından oluşur ve baklagillere uygulanır (Vassilev vd., 2015; Adeleke vd., 2019).

Fosfor Çözünürlüğü

Nükleotidlerin, fosfolipidlerin ve enzimlerin ana bileşeni olan fosfor, ATP üretimi, RNA sentezi ve sinyal iletiminde rol oynar (Sharma vd., 2013) ve tohum çimlenmesini, kök ve sürgün uzamasını destekler (Wyngaard vd., 2016). Toprakta organik ve inorganik formlarda büyük miktarda fosfor bulunmaktadır, ancak bitkiler bunun %0,1'inden faydalanabilir ve %95–99'u hareketsiz, çözünmez ve çökelmiş haldedir (Khan vd., 2009; Billah vd., 2019). Topraktaki fosfor, toprağın pH durumuna bağlı olarak hareketsiz hale gelir; yüksek pH değerlerinde Ca^{2+} ve Mg^{2+} gibi katyonlarla, düşük pH değerlerinde ise Fe^{3+} ve Al^{3+} ile etkileşime girer (Ali vd., 2017; Alaylar vd., 2020). Toprakta bulunan fosfor miktarı yeterli olmadığından, bitkilerin ihtiyaç duyduğu miktar kimyasal gübrelerle karşılanır ve bu miktar her yıl yaklaşık 52,3 milyar tona ulaşmaktadır (FAO, 2020). Bu gübrelerin yüksek miktarı çevresel risklere ve su kaynaklarının kirlenmesine neden olmaktadır. Bu olumsuz etkiler sebebiyle, çevre dostu olmalarından dolayı kimyasal gübreler yerine biyolojik gübre uygulamaları tercih edilmektedir (Zaidi vd., 2009). Fosfor çözücü mikroorganizmalar, organik ve inorganik fosforu bitki tarafından alınabilecek formlara hidrolize ederler. Azospirillum, Bacillus, Pseudomonas, Nitrosomonas, Erwinia, Serratia, Rhizobium, Xanthomonas, Enterobacter ve Pantoea bakteri türleri fosfor çözme yeteneğine sahiptir (Rawat vd., 2021; Djuuna vd., 2022). Fosfor çözme yeteneğine sahip bakteriler farklı stratejiler kullanır (Kalayu, 2019) ve mineralizasyon büyük ölçüde toprak pH'ına bağlıdır. Bakteriler, metabolitler üreterek toprak pH'ını değiştirir ve rizosfer asitlendirmesi yoluyla fosforu çözerek mineralize ederler. Üretilen organik asitlerle (süksinik asit ve tartarik asit) toprağın pH'ı düşer (Chen vd., 2006), bu da fosforun iki değerlikli veya üç değerlikli formlarının tek değerlikli formlara dönüştürülmesini sağlar (Satyaprakash vd., 2017). Başka bir şekilde, fosforun çözünmesi proton salınımıyla gerçekleşir (Satyaprakash vd., 2017). Bu mekanizmada, köklerden ve mikroorganizmalardan proton-ATPaz aktivitesi yoluyla salınan H^+ iyonları toprağın pH'ını düşürür. Başka bir mekanizma ise, organik fosfor bileşiklerinin mikroorganizmalar tarafından hidrolitik enzimler yoluyla inorganik fosfata dönüştürülmesidir ve bu süreçte fosfataz, C–P liyaz, fitaz ve

fosfonoasetat hidrolaz gibi hidrolitik enzimler rol almaktadır (Ingle ve Padole, 2017).

Bitki Büyüme Düzenleyicilerinin (BBD) Üretimi

Bitki büyüme düzenleyicileri, düşük miktarlarda üretilen ve bitki büyümesini uyarmak için sinyaller sağlayan organik bileşiklerdir (Damam vd., 2016). Ayrıca bitkilerin çevreleriyle etkileşime girerek tepki vermelerini sağlayan habercilerdir. Bitki büyüme düzenleyicileri, üretildikleri bitki kısımlarından diğer kısımlara taşınabilir ve böylece büyüme, gelişme, hücre farklılaşması ve meyve olgunlaşması gibi fizyolojik süreçleri destekleyebilirler (Davies, 2010). Bitkiler çeşitli faktörler nedeniyle stres altındayken bile, bitki büyüme düzenleyicileri hücrel aktiviteleri sürdürür ve bitkinin stresten daha az zarar görmesini sağlar. Bazı bitki büyümesini teşvik eden bakteriler, bitkiler gibi, bitki büyüme düzenleyicileri üretebilirler. Azospirillum, Enterobacter, Pseudomonas ve Bacillus türleri, bitki büyüme düzenleyicileri üreterek bitki büyümesini ve gelişimini teşvik ederler (Ahmed vd., 2023). Oksinler, özellikle indol-3-asetik asit (IAA), bitki büyüme düzenleyicileri arasında en kapsamlı şekilde araştırılan grubu oluşturmakta ve bakteriler tarafından yaygın olarak üretilerek bitki-bakteri etkileşimlerini teşvik etmektedir. İndol-3-asetik asit, hücre bölünmesini, uzamasını, farklılaşmasını ve birincil ve ikincil köklerin büyümesini teşvik etmekte, ayrıca jeotropizm ve fototropizmi düzenlemede kritik bir rol oynamaktadır (Grobelak vd., 2015). Pseudomonas suşlarının yüksek düzeyde IAA ürettiği bilinmektedir (Mushtaq vd., 2021), bu da kök gelişimini artırarak bitkinin su ve besin elementini daha fazla almasını sağlamaktadır. Lwin vd. (2012), Bacillus ve Serratia türlerine ait bakterileri izole etmiş ve IAA üretim kapasitelerini test etmiştir. Tüm izolatlar arasında, Bacillus türlerine ait bakterilerin IAA üretiminde daha verimli olduğu belirlenmiştir. Rizofosferik bakterilerin yaklaşık %80'i, bitkilerle etkileşimleri sırasında ikincil bir metabolit olarak IAA sentezleyebilmektedir (Vessey, 2003). Bakterilerde, indol-3-asetik asit üretimi, L-triptofanın indol-3-piruvat (IPyA) ve indol-3-asetamid (IAM) gibi ara maddeler yoluyla biyolojik olarak aktif formlara dönüştürülmesiyle gerçekleşir (Duca vd., 2014). Bakteriler

tarafından sentezlenen IAA, hem fitostimülan hem de bitki patojenlerinin inhibitörü olarak işlev gördüğü için bitki kaynaklı olanlara göre daha etkili kabul edilmektedir (Spaepen ve Vanderleyden, 2011). Gibberellinler, dormansiye sonlandırır, bodurluğu önler, sürgün uzamasına, çiçeklenmeye ve meyve olgunlaşmasına yardımcı olurlar (Spaepen ve Vanderleyden, 2011). Bitkilerle ilişkili bakteriler tarafından üretilen gibberellinler, kök uzamasını teşvik ederek, kök yüzey alanını ve kök ucu sayısını artırarak bitki gelişiminde önemli bir rol oynarlar (Bhattacharyya ve Jha, 2012). *Achromobacter*, *Azospirillum*, *Acinetobacter*, *Azotobacter*, *Bacillus* ve *Rhizobium* bakterileri gibberellin üretebilirler (Radhakrishnan ve Lee, 2016; Kang vd., 2014). Bakteriler tarafından üretilen gibberellin, kuraklık ve tuzluluk gibi abiyotik stres koşulları altında bitki adaptasyonunu da destekleyerek bitkilerin stresten daha az etkilenmesine yardımcı olur (Kang vd., 2019). Sitokinin, hücre bölünmesini uyarır, kloroplast ve antosiyanin sentezini artırır, yaprak yaşlanmasını geciktiren, tohum çimlenmesini, sürgün ve kök gelişimini destekleyen bir bitki büyüme düzenleyicisidir (Riefler vd., 2005). Bitkilerin hem endojen hem de eksojen sitokininlere ihtiyacı vardır, bu nedenle bitkinin sitokinin üreten bakterilerle ilişki kurması çok önemlidir. *Bacillus*, *Azospirillum*, *Arthrobacter* ve *Paenibacillus* türleri sitokinin üretme kapasitesine sahiptir (Nieto ve Frankenberger, 2017; Sansinenea, 2019; Cassan vd., 2020). Sitokinin biyosentezi, izopentenil transferaz (IPT) enzimi tarafından katalize edilir ve ipt genleri, hem bitkilerde hem de bazı mikroorganizmalarda doğal olarak bulunan bu enzimi kodlar. Bitkiyle ilişkili bakteriler tarafından üretilen sitokininler, fotosentetik potansiyeli artırarak bitki büyümesini ve gelişimini iyileştirir (Backer vd., 2018). Bazı patojenler de sitokinin üretmektedir, ancak bunlar uyarıcı ve destekleyici olmaktan ziyade inhibitör görevi görürler (Gupta vd., 2015). Akhtar vd. (2019), yaptıkları çalışmada sitokinin üreten bakterilerin bazı fitopatogenik aktiviteler gerçekleştirdiğini bildirmişlerdir. Etilen, çok düşük konsantrasyonlarda aktive edilebilen gaz halindeki bir stres hormonudur ve stres koşulları altında yüksek konsantrasyonlarda üretimi bitki büyümesini engeller (Ma vd., 2017). Bitki yaşlanması,

yaprak dökülmesi ve ürün veriminde azalma gibi olumsuz etkileri vardır (Nadeem vd., 2009; Masood vd., 2012). Stres koşulları altında, etilenin öncüsü olan ACC (1-aminosiklopropan-1-karboksilat), bitkiler tarafından daha fazla salgılanır (Prasad vd., 2017). Etilenin olumsuz etkilerini azaltmak için, bu ACC'nin ACC deaminaz tarafından amonyak ve α -ketobütirata dönüştürülmesi gerekmektedir. Bu hidrolizi gerçekleştirebilen bazı bakteriler vardır (Olanrewaju vd., 2017) ve bitkilerin bu bakterilerle ilişki kurması oldukça önemlidir (Mayak vd., 2004). *Bacillus*, *Azospirillum*, *Rhizobium*, *Achromobacter* ve *Enterobacter* (Misra ve Chauhan, 2020; Cortes-Patirio vd., 2021; Maqbool vd., 2021; Shahid vd., 2020; Saghafi vd., 2019) stres koşulları altında ACC deaminaz sentezleyerek bitki direncini artırabilir. Bakteriler tarafından üretilen 1-aminosiklopropan-1-karboksilat (ACC) deaminaz, etilenin bitki büyümesini azaltan seviyelere ulaşmasını engelleyerek bitkilerin stres toleransını artırmaktadır (Pérez-Montaña et al., 2014; Ruzzi ve Aroca 2015). Lim ve Kim (2013), kuraklık stresi altında biber bitkilerine *B. licheniformis* aşılama ve ACC deaminaz üretiminin arttığını ve bitkilerin kuraklık stresine karşı daha dirençli olduğunu belirlemişlerdir. Bitkileri stres faktörleri altında patojenlere veya hastalıklara karşı koruyan bitki büyüme düzenleyicisi absisik asittir (Masood vd., 2012; Nazar vd., 2014). Tuzlu koşullar altında yürütülen çalışmalarda çeltik *Bacillus* ve *Pseudomonas*, krizantem ise *Bacillus licheniformis* ile aşılanmıştır. Uygulama yapılan bitkilerde yüksek dozda ABA üretilmiş ve tuzluluk stresi hafifleyerek, fotosentez ve biyokütle artış göstermiştir (Shahzad vd., 2017; Zhou vd., 2017).

Biyolojik Kontrol Mekanizmaları

Biyolojik kontrol, bitki patojenlerinin gelişimini sınırlayarak kontrol altına alan, pestisitlere alternatif bir yöntemdir. *Agrobacterium*, *Alcaligenes*, *Arthrobacter*, *Bacillus*, *Enterobacter*, *Erwinia*, *Pseudomonas*, *Rhizobium*, *Serratia*, *Stenotrophomonas*, *Streptomyces* ve *Xanthomonas* bakterileri, farklı mekanizmalar kullanarak bitki patojenlerinin gelişimini sınırlarlar (Bonaterra vd., 2022). Bu etki mekanizmaları arasında rekabetçi dışlama, antibiyotik üretimi (hidrojen siyanür, amonyak, siderofor) ve

sistemik direncin (ISR) indüklenmesi yer almaktadır. Biyolojik kontrol mekanizmaları arasında bakteriler, bitki patojenleriyle alan ve besin maddeleri için rekabet eder ve bakterilerin patojenlerle mücadele etmek ve üstün gelmek için çok hızlı büyümeleri gerekmektedir. Çalışmalara göre, bakterilerin yetersiz olduğu biyolojik kontrol çalışmaları, zayıf rizosfer kolonizasyonu ile ilişkilendirilmiştir (Raaijmakers vd., 1999). Öncelikle, bakterilerin rizosfer bölgesinde yeterli ve kalıcı bir popülasyon yoğunluğu oluşturabilmeleri gerekmektedir; bu süreç, bakterilerin kök sistemini başarılı bir şekilde kolonize etme yeteneğine bağlıdır ve bu da etkili biyolojik kontrol için kritik bir sınırlayıcı faktördür (Bloembergen ve Lugtenberg, 2001). Bitkiler, bakterileri kök yüzeyine göç etmeye teşvik etmek için kimyasal sinyaller gönderirler (Olanrewaju vd., 2019) ve rizosferden şekerler, amino asitler, organik asitler, vitaminler ve fenolik bileşikler salgırlar (Vacheron vd., 2013). Bakteriler, kolonizasyon sırasında bu kemoçekicileri algılayacak şekilde farklılaşmıştır. Bakterilerin patojenlerle olan dolaylı ancak önemli antagonizmi, besin ve kök yüzeyi nişleri için bu kaynaklara bağlıdır (Philippot vd., 2013). Antibiyotik üretimi, bakteriler tarafından kullanılan biyolojik kontrol stratejilerinden biridir ve çeşitli patojenlere karşı antagonistik aktivite gösterir. Bu mekanizma *Pseudomonas*, *Bacillus*, *Streptomyces* ve *Stenotrophomonas* gibi antimikrobiyal bileşikler sentezlediği bilinen bakterilerle bağlantılıdır. Düşük konsantrasyonlarda bile etkili olan bu antibiyotikler, hücre duvarı sentezine müdahale ederek, membran bütünlüğünü değiştirerek ve küçük ribozomal alt birimde başlatma komplekslerinin oluşumunu engelleyerek patojenin hayatta kalmasını bozan toksinler olarak işlev görürler (Duffy vd., 2003; Singh ve Sachan, 2013). Antibiyotik üretimi bitki büyümesi, sıcaklık, oksijen, pH gibi çevresel faktörlerden etkilenmektedir (Raaijmakers vd., 2002). Birçok bakteri ikincil antibiyotik üretme kapasitesine sahiptir, ancak birini üretmek için uygun koşullar diğerini üretmek için uygun olmayabilir (Duffy ve Défago 1999). Bu nedenle, değişken koşullar altında daha yüksek biyolojik kontrol sağlayabilmek için bakterilerin kombinasyonunu uygulamak, olumlu sonuç alma ihtimalini artıracaktır. Bazı bakteriler, hidrojen

siyanür (HCN) ve amonyak (NH₃) gibi uçucu ikincil metabolitler üreterek bitkiyi çeşitli patojenlere karşı korumaktadır. Bitkilerde siyanür, etilen biyosentezinin bir yan ürünüdür ve β -siyanoalanin sentaz enzimi tarafından detoksifiye edilir. Bakterilerde ise glisin hidrogen siyanür sentaz enzimi tarafından oksidatif dekarboksilasyonu sonucu üretilir. Hidrojen siyanürün büyük bir kısmı bitkiler tarafından detoksifiye edilir ve düşük konsantrasyonlarda sinyal molekülü olarak metabolik süreçleri düzenler. Bunun yanında yüksek konsantrasyonlarda otçullara karşı koruyucu aktivite göstermekte bu nedenle biyolojik kontrol ajanı olarak kullanılmaktadır (Siegien vd., 2006). Güçlü bir biyolojik ajan olarak, hidrojen siyanür üreten bakteriler aynı zamanda bitkinin vejetatif büyümesini ve verimini de teşvik etmektedir (Rijavec ve Lapanje, 2016). *Bacillus*, *Pseudomonas* ve *Serratia* tarafından patojenlere karşı üretilen amonyak (Agbodjato vd., 2015), bitkinin azot ihtiyacını karşılayan azot fiksasyonunun ilk kararlı ürünüdür. Optimum seviyenin üzerinde zararlı etkileri olmasına rağmen, verimliliği artırmak için kullanılır (Elliott vd., 2007). Siderofor sentezi, patojen çoğalmasını önleyen bakteriyel mekanizmalardan biridir; rizosferde demiri bağlayarak demir eksikliği yaratır ve patojen çoğalmasını engeller. Kimyasal olarak sideroforlar, demiri bağladıkları fonksiyonel gruplara göre α -hidroksil-karboksilat, katekol, hidroksamat veya karışık tip olarak sınıflandırılır (Neilands, 1995). Sideroforlar, demirin bağlanmasını ve taşınmasını kolaylaştıran güçlü şelatlayıcı ajanlar olarak işlev görür ve bunları üreten bakteriler bitki büyümesini teşvik etmektedir (Sayyed vd., 2004), hastalık ve zararlıların etkilerini azaltmaktadır (Compant vd., 2005). *Pseudomonas* suşları, yalnızca kendi sideroforlarını değil, aynı zamanda yabancı sideroforları da tanıyabilen ek reseptörlere sahiptir. Bu şekilde, patojenlerin demiri kullanmasını engeller ve demiri daha etkili bir şekilde kullanarak geliştirirler (Larkin ve Tavantzis, 2013). Patojen olmayan bakteriler, bitkilerde İndüklenmiş Sistemik Direnç (ISR) adı verilen bir yanıtı tetikleyerek hastalıklara karşı bir savunma mekanizması geliştirirler (Gupta vd., 2015; Khan vd., 2019). Bu mekanizma, organik asitler, sideroforlar, liposakkaritler, etilen ve jasmonat gibi hormonlar tarafından uyarılan

ve bitki savunma tepkilerini aktive eden bir sinyal iletim yoludur (Niranjan vd., 2005; Verhagen vd., 2004; Pieterse vd., 2014). Etki mekanizması olarak, patojen doğrudan ölmez, ancak konuk bitkinin biyokimyasal ve fizyolojik reaksiyonları aktive edilir ve kitinaz, proteinaz, peroksidaz vb. üretimi yoluyla patojenlere karşı mekanik ve fiziksel destek sağlanır (Labuschagne vd., 2010). Sistemik direncin indüklenmesinde bakterilerin rolü, çok sayıda çalışma ile geniş çapta gösterilmiştir (Pieterse vd., 2001; Siddiqui ve Shaukat, 2002). Bunlar arasında, indüklenmiş sistemik direnci (ISR) etkili bir şekilde tetikleme yetenekleriyle bilinen *Pseudomonas* ve *Bacillus* türleri en kapsamlı şekilde araştırılmıştır (Choudhary vd., 2007). Bu suşlar, NRP-1 proteinini içeren jasmonik asit ve etilen bağımlı bir sinyal yolu aracılığıyla ISR'yi başlatır (Van Loon ve Bakker, 2005). İndüklenmiş sistemik direnç ilk olarak *Arabidopsis thaliana*'da gözlemlenmiş ve üç ISR yolunun üretildiği bildirilmiştir (Solano vd., 2008; Choudhary vd., 2007). Birinci yol salisilik aside bağlıdır ve patojen saldırısına yanıt olarak ortaya çıkar; ikinci yol jasmonik aside bağlıdır ve yaralanma durumunda meydana gelir; üçüncü yol ise RISR (Rizobakteri Kaynaklı Sistemik Direnç) olarak bilinir ve patojenik olmayan rizofosferik bakteriler tarafından gerçekleştirilir (Choudhary vd., 2007).

Uçucu Organik Bileşikler (VOC'ler)

Bakteriler tarafından üretilen uçucu organik bileşikler (VOC'ler), birincil ve ikincil metabolizmanın ürünleridir. Bu bileşikler, hücre için gerekli besin maddelerinin parçalanması sırasında birincil metabolizmanın yan ürünleri olarak ve besin açısından fakir ortamlarda kaynak rekabetine yanıt olarak ikincil metabolizma sürecinde sentezlenir. Uçucu organik bileşiklerin potansiyel etkileri, yüksek buhar basınçlarından (0,01 kPa), kolay salınım ve buharlaşma özelliklerinden kaynaklanmaktadır (Ortíz-Castro vd., 2009). Bu nedenle, katı, sıvı ve gazların heterojen karışımları arasında yayılabilirler. Ryu vd. (2003) tarafından yapılan ilk çalışma, PGPR'lerin *Arabidopsis thaliana*'nın gelişimini ve büyümesini artıran uçucu bileşikler ürettiğini göstermiştir. Mikrobiyal VOC'ler, antibakteriyel, antifungal ve antinematod ajanlar olarak bitkilerde sistemik direnç oluşturmaya yardımcı

olabilir ve bitkileri patojen ve zararlılara karşı daha dirençli hale getirebilirler (Russo vd., 2022). Hücreler arası iletişimde sinyal molekülleri olarak işlev gören VOC'ler, hem bakteri hem de bakteri-bitki etkileşimlerini düzenleyen çok yönlü bileşiklerdir. Bakteriler, asetoin, 2,3-bütandiol ve hidrojen siyanür gibi çeşitli VOC'ler üretebilir. Bu bileşikler, çiçeklenmeyi uyarma, fotosentezi artırma ve abiyotik stres faktörlerine karşı sistemik bitki direncini aktive etme gibi birçok hayati süreci düzenler (Schulz ve Dickschat, 2007; Kanchiswamy vd., 2015). Bitki büyümesini teşvik eden bakterilerin (PGPR'ler) abiyotik stres toleransını artırmasının etkili yollarından biri, kök bölgesine saldıkları uçucu ve uçucu olmayan bileşiklerle bitki fizyolojisini düzenlemektir. Uçucu organik bileşikler (VOC'ler), topraktaki ara boşluklar yoluyla köklere ulaşarak bitkiyle doğrudan temas etmeden etkileşime girer ve önemli iletişim sinyalleri görevi görür. Ayrıca, bitki büyümesini teşvik eden bakteriler (PGPR'ler) tarafından üretilen VOC'ler bitkilerde demir alımını kolaylaştırmaktadır. Bu, bitkilerin besin eksiklikleri altında gelişimlerini sürdürmelerine ve genel fizyolojik dirençlerini artırmalarına yardımcı olmaktadır. Bu nedenle, VOC'ler sadece büyümeyi teşvik eden sinyaller olarak değil, aynı zamanda stres koşulları altında bitkinin hayatta kalmasını kolaylaştıran önemli ekolojik aracı moleküller olarak da öne çıkmaktadır. Bakteriyel topluluk çeşitliliği, uçucu organik bileşiklerin (VOC'ler) üretimini hem niceliksel hem de niteliksel olarak önemli ölçüde etkileyebilir. Bu etkinin temelinde, türler arası tamamlayıcılık, kolaylaştırma veya antagonistik ilişkiler gibi mikroorganizma etkileşimleri yatmaktadır. Uçucu organik bileşik (VOC) çeşitliliğinin artması hem bitki büyümesini teşvik edici hem de bitki patojenlerini baskılayıcı işlevlerin kapsamını genişletebilir.

Sonuç

Biyogübreler, özellikle bitki gelişimini teşvik eden rizobakterilere (PGPR) dayalı uygulamalar, kimyasal gübrelere kıyasla çevre dostu, sürdürülebilir etkili bir alternatif sunmaktadır. Bitki gelişimini teşvik eden rizobakteriler; atmosferik azot fiksasyonu, fosfat çözünürlüğünün artırılması gibi mekanizmalar yoluyla bitkilerin besin alımını iyileştirmenin yanı sıra, oksinler,

giberellinler, sitokininler ve absisik asit gibi çeşitli fitohormonların sentezi aracılığıyla bitki büyüme ve gelişimini desteklemektedir. Bununla birlikte, PGPR'lerin etkisi yalnızca besin teminiyle sınırlı olmayıp; antibiyotikler, sideroforlar, uçucu organik bileşikler (VOC'ler) ve sistemik direnç yanıtlarını uyaran enzimlerin üretimi yoluyla bitkilerin biyotik ve abiyotik stres koşullarına karşı korunmasına da katkı sağlamaktadır. Bu çok yönlü etkileşimler, bitki-mikroorganizma-rizosfer ilişkilerinin bütüncül bir çerçevede ele alınmasını gerekli kılmakta ve toprak sağlığı ile tarımsal verimliliğin iyileştirilmesinde önemli bir rol oynamaktadır.

Gelecekteki araştırmaların; mikrobiyal konsorsiyumlar içerisindeki sinerjik etkileşimlerin daha ayrıntılı biçimde anlaşılmasına, belirli toprak ve ürün tiplerine özgü bakteri suşu kombinasyonlarının optimize edilmesine ve PGPR'lerin genetik ve metabolik işleyişini ortaya koymak amacıyla omik tabanlı yaklaşımların yaygınlaştırılmasına odaklanılması gerekmektedir. Uzun vadede, PGPR temelli biyogübrelerin tarım sistemlerine entegrasyonu; gıda güvenliğinin artırılması, toprakların biyolojik olarak yenilenmesi ve iklim değişikliğine daha dayanıklı tarımsal üretim modellerinin geliştirilmesi açısından umut verici bir yol sunmaktadır.

Kaynakça

Adeleke, B. O., Olanrewaju, O. S., & Glick, B. R. (2019). Biofix: A cost-effective nitrogen fixing inoculant for agricultural use. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 12(4), 129–139. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-04150-2>

Agbodjato NA, Noumavo PA, Baba-Moussa F, Salami HA, Sina H, Sèzan A, Bankolé H, Adjanohoun A, Baba-Moussa L. Characterization of potential plant growth promoting rhizobacteria isolated from Maize (*Zea mays* L.) in central and Northern Benin (West Africa). *Applied and Environmental Soil Science*. 2015 Oct;2015. <https://doi.org/10.1155/2015/901656>

Ahmed, T.; Noman, M.; Qi, Y.; Shahid, M.; Hussain, S.; Masood, H.A.; Xu, L.; Ali, H.M.; Negm, S.; El-Kott, A.F.; et al. Fertilization of Microbial Composts: A Technology for Improving Stress Resilience in Plants. *Plants* 2023, 12, 3550. <https://doi.org/10.3390/plants12203550>

Akhtar, M. J., Baloch, M. S., & Lee, Y. (2019). Phosphorus-mobilizing rhizobacterial strain *Bacillus cereus* GS6 improves symbiotic efficiency of soybean on an Aridisol amended with phosphorus-enriched compost. *Pedosphere*, 27(6), 1049–1061.

Alaylar, B.; Egamberdieva, D.; Gulluce, M.; Karadayi, M.; Arora, N.K. Integration of molecular tools in microbial phosphate solubilization research in agriculture perspective. *World J. Microbiol. Biotechnol.* 2020, 36, 1–12.

Ali, M.A.; Naveed, M.; Mustafa, A.; Abbas, A. The good, the bad, and the ugly of rhizosphere microbiome. In *Probiotics and Plant Health*; Springer: Singapore, 2017; pp. 253–290.

Backer, R., Rajeev, P., Vessey, J., & Maheshwari, D. (2018). Plant growth promoting rhizobacteria: Context, mechanisms of action and roadmap to commercialization of biostimulants for sustainable agriculture. *Frontiers in Plant Science*, 9, 1473. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.01473>

Bhattacharyya, P., & Jha, D. K. (2012). Plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR): Emergence in agriculture. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 28(4), 1327–1350. <https://doi.org/10.1007/s11274-011-0979-9>

Billah, M., Tanvir, R., & Islam, R. (2019). Phosphorus and phosphate solubilizing bacteria: Keys for sustainable agriculture. *Geomicrobiology Journal*, 36(10), 904–916. <https://doi.org/10.1080/01490451.2019.1654043>

Bloembergen, G.V.; Lugtenberg, B.J.J. Molecular basis of plant growth promotion and biocontrol by rhizobacteria. *Curr. Opin. Plant Biol.* 2001, 4, 343–350.

Bonaterrea, L., Jiménez, J. A., & López, G. (2022). Biological control mechanisms of *Pseudomonas* spp. for suppression of phytopathogenic bacteria. *Sustainability*, 14(12), 15514. <https://doi.org/10.3390/su142315514>

Cassan, F., Perrin, R., & Boucher, M. (2020). Plant growth-promoting rhizobacteria: Mechanisms and practical applications. *Agronomy*, 10(7), 956. <https://doi.org/10.3390/agronomy10070956>

Chen, X., Liu, Z., & Xie, X. (2006). Comparative analysis of the complete genome sequence of the plant growth-promoting bacterium *Bacillus amyloliquefaciens* FZB42. *Nature Biotechnology*, 25(9), 1007–1014. <https://doi.org/10.1038/nbt1250>

Choudhary, D., Prakash, A., & Johri, J. (2007). Plant growth-promoting rhizobacteria: Emerging trends in agriculture. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 28, 1327–1350. <https://doi.org/10.1007/s12045-016-0421-6>

Compant S, Reiter B, Sessitsch A, Nowak J, Clément C, Ait Barka E. Endophytic colonization of *Vitis vinifera* L. by plant growth promoting bacterium *Burkholderia* sp. strain PsJN. *Applied and Environmental Microbiology*. 2005;71(4):1685-93. <https://doi.org/10.1128/AEM.71.4.1685-1693.2005>

Cortes-Patirio, L. R., García, A. L., & Solano, R. (2021). Plant growth-promoting bacteria as biofertilizers: A sustainable solution for future agriculture. *Agronomy*, 11(6), 1181. <https://doi.org/10.3390/agronomy11061181>

Damam, M., Ismail, M. K., & Darweesh, M. (2016). Plant growth-promoting rhizobacteria and their potential applications in

Dr. Öğr. Üyesi, Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Toprak Bilimi ve Bitki Besleme Bölümü, Orcid [0000-0003-2014-9454](https://orcid.org/0000-0003-2014-9454)

agriculture. *Journal of Plant Growth Regulation*, 35(2), 273–289.
<https://doi.org/10.1007/s00344-016-9570-7>

Davies, P.J. The plant hormones: Their nature, occurrence, and functions. In *Plant Hormones*; Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 2010; pp. 1–15.

Djuuna, I.A.F.; Prabawardani, S.; Massora, M. Population Distribution of Phosphate-solubilizing Microorganisms in Agricultural Soil. *Microbes Environ.* 2022, 37, ME21041.

Duca, D., Mercado-Blanco, J., & Rivas, R. (2014). Plant growth promoting rhizobacteria: A promising tool to improve crop yields. *Environmental Science and Pollution Research*, 21(17), 10780–10790. <https://doi.org/10.1007/s11356-014-2832-6>

Duffy, B.; Schouten, A.; Raaijmakers, J.M. Pathogen self-defense: Mechanisms to counteract microbial antagonism. *Annu. Rev. Phytopathol.* 2003, 41, 501–538.

Duffy, B.K.; Défago, G. Environmental factors modulating antibiotic and siderophore biosynthesis by *Pseudomonas fluorescens* biocontrol strains. *Appl. Environ. Microbiol.* 1999, 65, 2429–2438.

Elliott GN, Chen WM, Chou JH, Wang HC, Sheu SY, Perin L, Reis VM, Moulin L, Simon MF, Bontemps C, Sutherland JM. *Burkholderia phymatum* is a highly effective nitrogen fixing symbiont of *Mimosa* spp. and fixes nitrogen ex planta. *New Phytologist*. 2007;173(1):168-80. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2006.01894.x>

FAO. World Fertilizer Trends and Outlook to 2020; Food and Agriculture Organization of the United Nations: Rome, Italy, 2017.

Giordano, W.; Hirsch, A.M. The expression of MaEXP1, a *Melilotus alba* expansin gene, is upregulated during the sweetclover

Sinorhizobium meliloti interaction. Mol. Plant Microbe Interact. 2004, 17, 613–622.

Glick, B.R. The enhancement of plant growth by free living bacteria. Can. J. Microbiol. 1995, 41, 109114.

Grobelak, A., Napora, A., & Kacprzak, M. (2015). Plant growth regulators produced by plant-associated bacteria. Environmental Science and Pollution Research, 22(9), 6909–6920. <https://doi.org/10.1007/s11356-015-4467-x>

Gupta, R., Saxena, A., & Prasad, A. (2015). Role of plant growth-promoting rhizobacteria in enhancing plant growth. Agricultural Research, 4(2), 118–126. <https://doi.org/10.1007/s40003-015-0152-7>

Harris, D. F., Lukoyanov, D. A., Shaw, S., Compton, P., Tokmina-Lukaszewska, M., Bothner, B., Kelleher, N., Dean, D. R., & Seefeldt, L. C. (2018). Mechanism of N₂ reduction catalyzed by Fe-nitrogenase involves reductive elimination of H₂. Biochemistry, 57(5), 701–710. <https://doi.org/10.1021/acs.biochem.7b01142>

Ingle, K. P., & Padole, D. A. (2017). Phosphate solubilizing microbes: An overview. International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences, 6(1), 844–852. <https://doi.org/10.20546/ijcmas.2017.601.099>

Kalayu, E. (2019). The role of plant growth-promoting rhizobacteria in plant development. Phytochemistry Reviews, 18(4), 1245–1260. <https://doi.org/10.1007/s11101-019-09688-1>

Kanchiswamy CN, Malnoy M, Maffei ME. 2015 Chemical diversity of microbial volatiles and their potential for plant growth and productivity. Front. Plant Sci. 6, 151. (doi:10.3389/fpls.2015.00151)

Kang, S. M., Khan, A. L., Waqas, M., Asaf, S., Lee, K. E., Park, Y. G., et al. (2014). Plant-growth-promoting rhizobacteria: Potential candidates for gibberellins production and crop growth promotion. In Use of microbes for the alleviation of soil stresses (Vol. 1, pp. 1–19). Springer.

Kang, S. M., Khan, A. L., Waqas, M., Asaf, S., Lee, K. E., Park, Y. G., et al. (2019). Integrated phytohormone production by the plant growth-promoting rhizobacterium *Bacillus tequilensis* SSB07 induced thermotolerance in soybean. *Journal of Plant Interactions*, 14, 416–423. <https://doi.org/10.1080/17429145.2019.1640294>

Khan, M. A., Bano, A., Rahman, M. A., Guo, J., Kang, Z., & Babar, M. A. (2019). Comparative physiological and metabolic analysis reveals a complex mechanism involved in drought tolerance in chickpea (*Cicer arietinum* L.) induced by PGPR and PGRs. *Scientific Reports*, 9(1), 2097. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-38702-8>

Khan, M. S., Zaidi, A., Wani, P. A., & Oves, M. (2009). Role of plant growth-promoting rhizobacteria in the remediation of metal-contaminated soils. *Environmental Chemistry Letters*, 7(1), 1–19. <https://doi.org/10.1007/s10311-008-0155-0>

Labuschagne, N., Pretorius, T., & Idris, A. H. (2010). Plant growth promoting rhizobacteria as biocontrol agents against soil-borne plant diseases. In D. K. Maheshwari (Ed.), *Plant growth and health promoting bacteria* (pp. 211–230). Springer.

Larkin, R.P.; Tavantzis, S. Use of biocontrol organisms and compost amendments for improved control of soilborne diseases and increased potato production. *Am. J. Potato Res.* 2013, 90, 157–167.

Lim, J., & Kim, C. (2013). Enhancement of plant growth by a phosphate-solubilizing bacterium, *Pseudomonas putida*, and its

potential as a biocontrol agent. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 13(4), 804–813. <https://doi.org/10.4067/s0718-95162013000400012>

Lwin, M. N., Ramesh, P., & Zaw, A. (2012). *Pseudomonas* and *Bacillus* species as potential PGPR for enhancing rice productivity. *International Journal of Agriculture and Biology*, 14(1), 1–8 .

Ma, Y., Weng, W., Zhang, M., & Zheng, X. (2017). Ethylene synthesis and signaling regulation in plants. *Journal of Experimental Botany*, 68(9), 2511–2523. [https://doi.org/10.1093/jxb/erx140​;:contentReference\[oaicite:0\]{index=0}](https://doi.org/10.1093/jxb/erx140​;:contentReference[oaicite:0]{index=0})

Maqbool, M., Ali, S., & Khan, A. M. (2021). Role of PGPR in enhancing stress tolerance in plants. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 20, 101271. <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2019.101271>

Masood, A., Iqbal, N., & Khan, N. A. (2012). Role of ethylene in alleviation of cadmium-induced photosynthetic capacity inhibition by sulfur in mustard. *Plant Cell & Environment*, 35, 524–533. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.2012.02537.x>

Mayak, S., Tirosh, T., & Glick, B. R. (2004). Plant growth-promoting bacteria that confer resistance to water stress in tomatoes and peppers. *Plant Science*, 166(2), 459–463. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2003.10.012>

Misra, S., & Chauhan, R. (2020). Role of rhizobacteria in plant growth promotion and biocontrol. *Biological Control*, 144, 104209. <https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2019.104209>

Mushtaq, Z., Rauf, A., Khalil, A., & Noor, M. (2021). Soil microbial communities and their role in sustainable agricultural

practices. *International Journal of Microbiology*, 2021, Article 1534367. <https://doi.org/10.1155/2021/1534367>

Nadeem, S. M., Bano, A., & Ditta, A. (2009). Rhizobacteria containing ACC-deaminase confer salt tolerance in maize grown on salt-affected fields. *Canadian Journal of Microbiology*, 55(11), 1302–1309. <https://doi.org/10.1139/w09-092>

Nazar, R., Iqbal, M., & Niaz, A. (2014). Involvement of ethylene in reversal of salt-inhibited photosynthesis by sulfur in mustard. *Physiologia Plantarum*, 152(2), 331–344. <https://doi.org/10.1111/ppl.12183>

Neilands, J. B. (1995). Siderophores and their role in plant nutrition. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*, 46, 723–746. <https://doi.org/10.1146/annurev.pp.46.060195.003443>

Nieto, K. F., & Frankenberger, W. T. (2017). Microbial production of cytokinins. In *Soil Biochemistry* (pp. 191–248). Routledge.

Niranjan, R., Shetty, S., & Reddy, R. (2005). Plant growth-promoting rhizobacteria: Potential green alternative for plant productivity. In Z. A. Siddiqui (Ed.), *PGPR: Biocontrol and Biofertilization* (pp. 197–216). Springer.

Olanrewaju, O. S., Glick, B. R., & Babalola, O. O. (2017). Mechanisms of action of plant growth promoting bacteria. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 33(11), 1–16. <https://doi.org/10.1007/s11274-017-2364-9>

Olanrewaju, O.S.; Ayangbenro, A.S.; Glick, B.R.; Babalola, O.O. Plant health: Feedback effect of root exudates-rhizobiome interactions. *Appl. Microbiol. Biotechnol.* 2019, 103, 1155–1166.

Oldroyd, G. E., Murray, J. D., Poole, P. S., & Downie, J. A. (2008). The rules of engagement in the legume-rhizobial symbiosis. *Annual Review of Genetics*, 45, 119–144. <https://doi.org/10.1146/annurev-genet-110410-132549>

Ortíz-Castro, R., Contreras-Cornejo, H. A., Macías-Rodríguez, L., & López-Bucio, J. (2009). The role of microbial signals in plant growth and development. *Plant Signaling & Behavior*, 4(8), 701–712.

Pérez-Montaña, F.; Alías-Villegas, C.; Bellogín, R.; Del Cerro, P.; Espuny, M.; Jiménez-Guerrero, I. Plant growth promotion in cereal and leguminous agricultural important plants: From microorganism capacities to crop production. *Microbiol. Res.* 2014, 169, 325–336.

Philippot, L.; Raaijmakers, J.M.; Lemanceau, P.; van der Putten, W.H. Going back to the roots: The microbial ecology of the rhizosphere. *Nat. Rev. Microbiol.* 2013, 11, 789–799.

Pieterse, C. M. J., Van der Does, D., Zamioudis, C., Leon-Reyes, A., & Van Wees, S. C. M. (2014). Induced systemic resistance by beneficial microbes. *Annual Review of Phytopathology*, 52, 347–375. <https://doi.org/10.1146/annurev-phyto-080614-120207>

Pieterse, C. M. J., Van Wees, S. C. M., Hoffland, E., Van Pelt, J. A., & Van Loon, L. C. (2001). Induced systemic resistance in *Arabidopsis*: Triggering, signaling, and expression. *European Journal of Plant Pathology*, 107(1), 51–61. <https://doi.org/10.1023/A:1008747926678>

Prasad, R., Kumar, S., & Gupta, N. (2017). Biofortification of staple crops for improved human health. *Frontiers in Plant Science*, 8, 1011. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.01011>

Raaijmakers, J.M.; Bonsall, R.F.; Weller, D.M. Effect of population density of *Pseudomonas fluorescens* on production of 2,4 diacetylphloroglucinol in the rhizosphere of wheat. *Phytopathology* 1999, 89, 470–475.

Raaijmakers, J.M.; Vlami, M.; de Souza, J.T. Antibiotic production by bacterial biocontrol agents. *Antonie Leeuwenhoek* 2002, 81, 537–547.

Radhakrishnan, R., & Lee, S. (2016). Plant growth-promoting rhizobacteria and their applications. *Microorganisms*, 4(4), 8–15. <https://doi.org/10.3390/microorganisms4010008>

Rawat, P.; Das, S.; Shankhdhar, D.; Shankhdhar, S.C. Phosphate-Solubilizing Microorganisms: Mechanism and Their Role in Phosphate Solubilization and Uptake. *J. Soil Sci. Plant Nutr.* 2021, 21, 49–68.

Riefler, M., Novak, O., Strnad, M., & Schmülling, T. (2005). *Arabidopsis* cytokinin receptor mutants define a role for cytokinin in regulating root and shoot growth. *The Plant Cell*, 17(2), 554–568. <https://doi.org/10.1105/tpc.104.029091>

Rijavec T, Lapanje A. Hydrogen cyanide in the rhizosphere: not suppressing plant pathogens, but rather regulating availability of phosphate. *Frontiers in Microbiology*. 2016; 7:1785. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2016.01785>

Russo, A., Pollastri, S., Ruocco, M., Monti, M. M., & Loreto, F. (2022). Volatile organic compounds in the interaction between plants and beneficial microorganisms. *Journal of Plant Interactions*, 17(1), 840–852. DOI:10.1080/17429145.2022.2107243

Ruzzi, M.; Aroca, R. Plant growth-promoting rhizobacteria act as biostimulants in horticulture. *Sci. Hortic.* 2015, 196, 124–134.

Ryu, C. M., Farag, M. A., Hu, C. H., Reddy, M. S., Kloepper, J. W., & Paré, P. W. (2003). Bacterial volatiles promote growth in *Arabidopsis*. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 100(8), 4927–4932. <https://doi.org/10.1073/pnas.0730845100>

Saghafi, D., Alireza, M., & Mohammad, A. (2019). Rhizobacteria and plant growth promotion. *Microorganisms*, 7(12), 49. <https://doi.org/10.3390/microorganisms7120049>

Sansinenea, E. (2019). Plant growth-promoting microorganisms: Key agents for plant health and productivity. *Microorganisms*, 7(4), 112. <https://doi.org/10.3390/microorganisms7040112>

Satyaprakash, R., Srivastava, A. K., & Sengar, A. (2017). Phytoremediation of soil contaminated with heavy metals by plant growth-promoting rhizobacteria. *Environmental Pollution*, 225, 135–142. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.02.045>

Sayyed RZ, Naphade BS, Chincholkar SB. Ecologically competent rhizobacteria for plant growth promotion and disease management. *Recent Trends in Biotechnology*. 2004;1:1-6.

Schulz S, Dickschat JS. 2007 Bacterial volatiles: the smell of small organisms. *Nat. Prod. Rep.* 24, 814–842. (doi:10.1039/b507392h)

Seefeldt, L. C., Hoffman, B. M., Peters, J. W., Raugei, S., Beratan, D. N., Antony, E., & Dean, D. R. (2018). Energy transduction in nitrogenase. *Accounts of Chemical Research*, 51(9), 2179–2186. <https://doi.org/10.1021/acs.accounts.8b00112>

Shah, F., & Wu, W. (2019). The role of soil microbes in soil fertility and their effects on plant growth. *Frontiers in Plant Science*, 10, 1214. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.01214>

Shahid, M., Kumar, P., & Zaidi, A. (2020). Application of plant growth-promoting rhizobacteria for improving plant growth under abiotic stress. *Ecology and Evolution*, 10(6), 3052–3066. <https://doi.org/10.1002/ece3.6035>

Shahzad, M., Rasool, A., & Khan, M. A. (2017). Potential of plant growth-promoting rhizobacteria in agricultural sustainability. *Agronomy for Sustainable Development*, 37(1), 6. <https://doi.org/10.1007/s13593-017-0435-4>

Sharma, S. B., Sayyed, R. Z., Trivedi, M. H., & Gobi, T. A. (2013). Phosphate solubilizing microbes: Sustainable approach for managing phosphorus deficiency in agricultural soils. *SpringerPlus*, 2(1), 1–14. <https://doi.org/10.1186/2193-1801-2-587>

Shin, W., Islam, R., Benson, A., Joe, M. M., Kim, K., Gopal, S., Samaddar, S., Banerjee, S., & Sa, T. (2016). Role of diazotrophic bacteria in biological nitrogen fixation and plant growth improvement. *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer*, 49(1), 17–29. <https://doi.org/10.7745/KJSSF.2016.49.1.017>

Siddiqui, Z. A., & Shaukat, S. S. (2002). Role of plant growth-promoting rhizobacteria in the biological control of soilborne plant diseases. *Pakistan Journal of Phytopathology*, 14(1), 57–67.

Siegień I, Bogatek R. Cyanide Action in Plants—from toxic to regulatory. *Acta Physiologiae Plantarum*. 2006 Oct 1;28(5):483–497. <https://doi.org/10.1007/BF02706632>

Singh, R.; Sachan, N.S. Review on biological control of soil borne fungi in vegetable crops. *HortFlora Res. Spectr.* 2013, 2, 72–76.

Solano, B., Maicas, S., & Manñero, M. (2008). Microbial production of secondary metabolites and their application in agriculture. *Microorganisms*, 33(1), 56–67.

Spaepen, S., & Vanderleyden, J. (2011). Plant growth-promoting effects of bacterial exopolysaccharides. *FEMS Microbiology Letters*, 323(1), 1–8. <https://doi.org/10.1111/j.1574-6968.2011.02331.x>

Umar, W.; Ayub, M.A.; ur Rehman, M.Z.; Ahmad, H.R.; Farooqi, Z.U.R.; Shahzad, A.; Rehman, U.; Mustafa, A.; Nadeem, M. Nitrogen and phosphorus use efficiency in agroecosystems. In *Resources Use Efficiency in Agriculture*; Springer: Singapore, 2020; pp. 213–257.

Vacheron, J.; Desbrosses, G.; Bouffaud, M.L.; Touraine, B.; Moëgne-Loccoz, Y.; Muller, D.; Legendre, L.; Wisniewski-Dyé, F.; Prigent-Combaret, C. Plant growth-promoting rhizobacteria and root system functioning. *Front. Plant Sci.* 2013, 4, 356.

Van Loon, L. C., & Bakker, P. A. H. M. (2005). Induced resistance and plant defense responses. In L. C. Van Loon (Ed.), *Induced Resistance to Disease in Plants* (pp. 43–69). Springer.

Vassilev, N., Anisimova, T., & Boron, A. (2015). Phosphate solubilizing microorganisms and their role in sustainable agriculture. *Biology and Fertility of Soils*, 51(3), 325–338. [https://doi.org/10.1007/s00374-015-0997-3​;contentReference\[oaicite:1\]{index=1}](https://doi.org/10.1007/s00374-015-0997-3​;contentReference[oaicite:1]{index=1})

Verhagen, B. W., Pijnenburg, M. A., & Lefeber, R. H. (2004). Biological control of plant diseases by rhizobacteria. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 52(22), 6875–6883. <https://doi.org/10.1021/jf040172n>

Vessey, J. K. (2003). Plant growth promoting rhizobacteria as biofertilizers. *Plant and Soil*, 255(1), 1–14. <https://doi.org/10.1023/A:1023955501577>

Wyngaard, J., De, M. M., & Mendez, P. (2016). Phosphate solubilization by rhizospheric bacteria and their interaction with plants. *Environmental Science and Pollution Research*, 23(17), 17112–17121. <https://doi.org/10.1007/s11356-016-6735-9>

Zaidi, A., Wani, P. A., & Khan, M. S. (2009). Phosphorus solubilizing microorganisms: their potential role in sustainable agriculture. *Phytochemistry Reviews*, 8(2), 259–269. <https://doi.org/10.1007/s11101-009-9125-3>

Zhou, H., Yang, M., & Wang, X. (2017). Microbial biocontrol agents for integrated management of root and soilborne diseases. *Microbiological Research*, 204, 87–98. <https://doi.org/10.1016/j.micres.2017.02.003>

BÖLÜM 2

Kuraklık Stresinin Tarımsal Üretim ve Bitki Beslenme Fizyolojisi Üzerine Etkileri

Figen ERASLAN İNAL¹

Giriş

Kuraklık stresi, küresel iklim değişikliğiyle birlikte tarımsal üretimi ve bitki beslenmesini tehdit eden en önemli çevresel stres faktörlerinden biri olarak öne çıkmaktadır. Özellikle son yıllarda sıcak hava dalgalarının ve kuraklık olaylarının sıklığı ve şiddetinde gözlenen artış, tarımsal üretimde ciddi kayıplara ve besin elementi dengesizliklerine yol açmaktadır.

Bitkiler yaşam süreçleri içerisinde değişik stres koşulları ile karşılaşır. Stres altında bitkilerin gelişmeleri, metabolizmaları ve verimleri önemli ölçüde olumsuz etkilenir. Kuraklık, yetersiz beslenme, tuzluluk, düşük ve yüksek sıcaklık, toprak ve atmosfer kirliliği, radyasyon bitkisel üretimde verimi sınırlandıran abiotik streslerdir. Belirtilen abiotik stresler içerisinde kuraklık bitkisel üretimi sınırlandıran en önemli stres faktörüdür. Bitkiler kuraklık stresi ile kökleri yeterince su alamadığında veya transpirasyon oranının çok yüksek olduğu durumlarda karşılaşır. Bu iki koşul

¹ Prof. Dr., Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Ziraat fakültesi, Toprak Bilimi ve Bitki Besleme Bölümü, Orcid: 0000-0001-5688-1802

kurak ve yarı kurak bölgelerde sıklıkla oluşur. Bitkiler kuraklığa tolerans bakımından önemli farklılık gösterdiği gibi, aynı bitkinin değişik çeşitleri arasında da önemli farklılıklar görülür. Kuraklık etkisi ile bitkilerde yaprakların nispi nem içeriğinin (NNİ) ve yaprak su potansiyelinin düşmesi fotosentez oranını azaltmaktadır. (Lawlor and Cornic, 2002). Stomaların kapanması ile fotosentez oranı ve içsel CO₂ konsantrasyonu azalmakta, bu da sonuç olarak fotosentez metabolizmasını inhibe etmektedir. Kuraklık stresinde stomaların kapanması bitkilerin beslenme durumlarını da olumsuz etkilemektedir (Oren et al., 1999).

Kuraklık stresi, bitkilerde su kaybını artırırken, su alımını ve kullanımını sınırlar. Bu durum, bitkilerin su potansiyelinin azalmasına, hücre turgorunun düşmesine ve nisbi nem içeriğinin azalmasına neden olur. Bu fizyolojik değişiklikler, bitkide bir dizi hasara yol açar ve büyüme ile gelişmeyi olumsuz etkiler. Kuraklık stresi altında, bitkilerde yaprak büyüklüğü azalır, gövde uzaması yavaşlar ve kök gelişimi genellikle artar. Bu adaptasyonlar, bitkinin su kaybını azaltmaya ve mevcut suyu daha etkin kullanmaya yönelik savunma mekanizmalarıdır. Ayrıca, kuraklık stresi fotosentez, fenoloji, su ve besin ilişkileri, asimilasyon ve solunum gibi temel fizyolojik süreçleri de bozar (Farooq et al., 2009).

Bitki ıslahçıları, kurağa dayanıklı çeşitleri geliştirmeye yönelik çalışmalar yürütmektedirler. Islah çalışmalarında pek çok morfolojik ve fizyolojik özellikler dikkate alınarak bitki çeşitleri arasında seleksiyon yapmak sonuca ulaşmada izlenen temel yöntemlerdir. Kurağa dayanıklı bitki çeşitlerinin seçiminde bitkilerin fizyolojik ve biyokimyasal mekanizmalarındaki değişimlerin bilinmesi oldukça önemlidir.

Kuraklık Stresinin Tarımsal Üretime Etkileri

Kuraklık, tarımsal üretimde önemli verim kayıplarına yol açan abiyotik stres faktörlerinin en başında gelmektedir. Kuraklık

stresi, bitkilerin büyüme ve gelişimini olumsuz etkileyerek, özellikle tahıllar ve endüstriyel bitkilerde ciddi ürün kayıplarına neden olmaktadır. Türkiye’de özellikle buğday gibi stratejik ürünlerde kuraklık stresinin bitkinin büyüme evresine, kuraklığın süresine ve şiddetine bağlı olarak % 92’ye varan verim kayıplarına yol açtığı belirtilmiştir (Çobanoğlu, 2022). Benzer şekilde, Sahel bölgesinde yapılan bir çalışmada, kuraklığın ve düzensiz yağışın tarımsal verim üzerinde belirgin olumsuz etkileri olduğu ve bu etkinin iklim değişikliğiyle birlikte artacağı öngörülmektedir (Boubacar, 2010). Türkiye’de yapılan bölgesel analizlerde de, tarımsal üretimin yağış ve sıcaklık değişimlerinden büyük ölçüde etkilendiği, özellikle Trakya bölgesinde meteorolojik ve tarımsal kuraklık yıllarının sıklığının arttığı ve bu durumun tarımsal üretim üzerinde baskı oluşturduğu belirlenmiştir (Gür et al., 2022).

Kuraklık stresinin tarımsal üretim üzerindeki etkileri sadece kısa vadeli değildir; uzun vadede de tarımsal üretimin sürdürülebilirliğini tehdit etmektedir. Brezilya’da yapılan uzun dönemli bir analizde, kuraklık şiddetinin özellikle son on yılda iki katına çıktığı ve kuraklığın tarımsal üretim üzerindeki etkisinin zamanla arttığı tespit edilmiştir. Yıllık ve mevsimsel kuraklıkların, özellikle yılın ilk iki çeyreğinde meydana geldiğinde, tarımsal üretim üzerinde daha güçlü negatif etkiler yarattığı, tek yıllık bitkilerin çok daha fazla etkilendiği ve kuraklığın etkisinin bölgesel olarak da farklılık gösterdiği ortaya konmuştur (Cavalcanti et al., 2023).

Kuraklık stresinin bitki gelişimi üzerindeki etkileri, bitki türüne, genotipik farklılıklara, stresin şiddetine ve süresine bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Örneğin, *Triticum spelta* genotiplerinde yapılan bir çalışmada, farklı su stresi uygulamalarında kuru madde verimi, tane verimi ve 1000 tane ağırlığında istatistiksel olarak önemli azalmalar gözlenmiştir. Ancak bazı genotiplerin (SP434, SP521 ve SP2) kuraklığa karşı daha

toleranslı olduğu ve bu genotiplerde verim kaybının daha az olduğu rapor edilmiştir (Erdem & Tutuş, 2023). Benzer şekilde, enginar çeşitlerinde mannitol ile oluşturulan kuraklık stresinin, tohum çimlenmesi ve vejetatif büyüme parametreleri üzerinde çeşitlere ve uygulama konsantrasyonlarına bağlı olarak farklı etkiler gösterdiği, bazı çeşitlerin daha yüksek klorofil, prolin ve antioksidan içeriğiyle strese daha iyi yanıt verdiği belirlenmiştir (Onus et al., 2023). Kuraklık stresinin bitki gelişimi ve verimi üzerindeki etkileri, tür ve çeşit farklılıklarına göre değişiklik gösterebilir. Nohut, ayçiçeği, enginar ve salatalık gibi farklı bitki türlerinde yapılan çalışmalar, kuraklık stresinin fotosentez, su kullanımı, büyüme ve verim gibi parametrelerde önemli azalmalar oluşturduğunu göstermektedir. Örneğin, nohut genotiplerinde yapılan bir çalışmada, kuraklık stresine en dayanıklı genotipin en yüksek büyüme ve fotosentetik aktiviteye sahip olduğu, su kullanım etkinliğinin ise genotipler arasında farklılık gösterdiği rapor edilmiştir (Krouma, 2010). Ayieğinde ise, kuraklık stresine dayanıklı çeşitlerin daha yüksek antioksidan enzim aktivitesine sahip olduğu ve bu sayede stresin olumsuz etkilerini daha iyi tolere edebildiği gösterilmiştir (Kavas et al., 2012).

Kuraklık stresinin tarımsal üretim üzerindeki etkileri, sadece bitkisel üretimle sınırlı değildir; hayvansal üretim ve doğal kaynaklar da olumsuz etkilenmektedir. Kuraklık nedeniyle mera alanlarında taze ot veriminde azalma, yem fiyatlarında artış ve yem tedarikinde sorunlar yaşanmakta, bu da hayvansal ürünlerde verim kaybına yol açmaktadır (Yılmaz, 2023).

Kuraklık Stresinin Bitki Beslenmesi ve Fizyolojisi zerine Etkileri

Kuraklık stresi, bitkilerde büyüme ve gelişmeyi doğrudan etkileyen en önemli abiyotik stres faktörlerinden biridir. Özellikle su kaynaklarının miktar ve kalitesindeki azalmalar, ekonomik öneme

sahip bitkilerin normal fizyolojik işlevlerinde değişikliklere yol açmaktadır. Bu durum, stres koşullarına dayanıklı bitki türlerinin yetiştirilmesini ve bu türlerin tolerans mekanizmalarının açıklanmasını önemli hale getirmiştir. Son yıllarda yapılan çalışmalar, kuraklık stresinin bitkilerde fotosentez, su kullanımı, antioksidan savunma sistemleri ve osmotik ayarlama gibi temel fizyolojik süreçleri etkilediğini göstermektedir (Ors & Ekinci, 2015). Bu süreçlerin bozulması, bitki büyümesinde yavaşlama, yaprak alanında azalma, klorofil içeriğinde düşüş ve verim kayıpları ile sonuçlanmaktadır.

Kuraklık stresi, bitkilerin topraktan besin maddesi alımını da olumsuz etkiler. Su eksikliği, köklerin toprakta hareketini ve besin maddelerine erişimini sınırlar. Özellikle K, Ca, P ve Na gibi makro besin elementlerinin alımı kuraklık durumunda değişir. Şeker pancarında, K uygulamalarının kuraklık koşullarında bitkinin Na/K oranını düşürdüğü ve K, P içeriklerini artırdığı, bunun da kuraklık stresinin olumsuz etkilerini azaltmada K'un kritik rol oynayabileceği ortaya konmuştur (Altay & Aksu, 2020). Benzer şekilde, arpa bitkisinde yapılan bir çalışmada, K eksikliği altında kuraklık stresinin yaprak alanı, biyokütle ve su kullanım etkinliğini önemli ölçüde azalttığı, ayrıca düşük potasyum koşullarında abscisik asit (ABA) seviyesinin arttığı ve bunun da bitki terlemesini azalttığı belirlenmiştir. Potasyumun osmoregülasyon üzerindeki etkisi sayesinde, bitkiler kuraklık stresine karşı daha dirençli hale gelmektedir (Tavakol et al., 2018).

Kuraklık stresi altında bitkilerde besin elementi alımındaki azalma, ürün kalitesinde de düşüşe neden olmaktadır. Kuraklık stresinin bitki beslenmesi üzerindeki etkileri, sadece makro besin elementleriyle sınırlı değildir. Kuraklık stresi, bitkilerin su alımını ve besin elementi alımını doğrudan etkileyerek, bitki beslenmesinde dengesizliklere yol açmaktadır. Kuraklık koşullarında toprakta suyun azalması, besin elementlerinin bitki kökleri tarafından

alınmasını zorlaştırmakta ve bu durum bitki dokularında makro ve mikro besin elementlerinin azalmasına neden olmaktadır. Kirazda yapılan bir çalışmada, kuraklık stresinin N, P, K, Ca, Mg, Zn, Mn ve Cu konsantrasyonlarını düşürdüğü, ancak bazı anaçların (örneğin CAB 6) kuraklık koşullarında beslenme performansını koruyabildiği gösterilmiştir (Küçükyumuk et al., 2015). Kuraklık stresinin bitki beslenmesi üzerindeki etkileri, özellikle mineral madde alımı ve besin elementlerinin yapraklarda birikimi açısından önemlidir. Badem ağaçları üzerinde yapılan bir araştırmada, kuraklık koşullarında yapraklarda potasyum (K), magnezyum (Mg), kalsiyum (Ca), sodyum (Na) ve klor (Cl) konsantrasyonlarının arttığı, bor (B) konsantrasyonunun ise azaldığı belirlenmiştir. Aynı şekilde, tuzluluk stresinde de benzer bir mineral birikimi gözlemlenmiştir. Bu bulgular, kuraklık ve tuzluluk koşullarında bitki beslenmesinin değiştiğini ve gübreleme stratejilerinin bu stres faktörleri göz önünde bulundurularak planlanması gerektiğini göstermektedir (Kucukyumuk et al., 2024).

Kuraklık stresi, bitki beslenmesinde sadece makro elementlerin değil, aynı zamanda mikro elementlerin de önemini artırmaktadır. Molibden (Mo) uygulamasının, buğdayda su kullanım kapasitesini, antioksidan enzim aktivitelerini ve ozmotik ayarlama ürünlerini artırdığı; bunun sonucunda da kuraklık toleransını geliştirdiği gösterilmiştir. Mo uygulaması, özellikle antioksidan savunma ve ozmotik ayarlama yeteneği düşük olan çeşitlerde daha belirgin etki göstermektedir (Wu et al., 2014).

Kuraklık stresine karşı bitki beslenmesinin yönetiminde, K ve Si gibi besin elementlerinin yeterli düzeyde sağlanması önemlidir. Potasyum, osmoregülasyon ve stomatal kontrol üzerinde kritik rol oynar ve kuraklık stresinin olumsuz etkilerini azaltır. Silisyum ise, kök endodermal silifikasyonu artırarak hücre su dengesini iyileştirir ve bitki beslenmesini destekler (Janislampi, 2012). Ayrıca, K iyonları osmotik ayarlama da önemli rol oynarken, Si

uygulamalarının da kök endodermal silifikasyonu artırarak hücre su dengesini iyileştirdiği ve bitki beslenmesini desteklediği gösterilmiştir (Farooq et al., 2009).

Kuraklık stresi altında bitkilerde besin elementi taşınımı ve dağılımı da değişmektedir. Özellikle apoplastik ve simplastik alanlarda iyon konsantrasyonları, osmotik regülasyonun sağlanmasında kritik rol oynamaktadır. Fasulye çeşitlerinde yapılan bir çalışmada, kuraklık stresine dayanıklı çeşitlerin apoplastik ve simplastik alanlar arasında osmotik regülasyonu sürdürebilme kapasitesinin daha yüksek olduğu, prolin ve ABA birikiminin yanı sıra K^+ , Na^+ ve Ca^{2+} iyonlarının dağılımında da önemli değişiklikler olduğu gösterilmiştir (Sağlam et al., 2012). Ayrıca, prolin, çözünür şekerler, çözünür proteinler ve inorganik iyonların (K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+}) birikimini artırır ve böylece bitkinin su içeriğini yükseltir. Aynı zamanda, süperoksit dismutaz, peroksidaz, katalaz ve askorbat peroksidaz gibi antioksidan enzimlerin aktivitesini artırarak oksidatif zararı azaltır (Wang et al., 2022).

Kuraklık stresinin bitki beslenmesi üzerindeki etkileri, kök ve sürgün arasındaki besin dağılımını da değiştirir. Özellikle, kök/sürgün oranı artar ve kök gelişimi teşvik edilir. Bu adaptasyon, bitkinin toprakta daha derin ve geniş bir alandan su ve besin maddesi almasını sağlar (Zhang et al., 2023). Ayrıca, kuraklık stresi altında bitkilerde abscisik asit (ABA), sitokinin, salisilik asit, auksin ve gibberellin gibi bitki büyüme düzenleyicilerinin seviyeleri değişir ve bu hormonlar bitkinin stres tepkilerini yönetirler (Farooq et al., 2009; Johnson, 1987).

Kuraklık stresi, yapraklarda stomataların kapanmasına yol açar. Stomatal kapanma, su kaybını azaltırken, aynı zamanda CO_2 alımını sınırlar ve fotosentez hızını düşürür. Bu süreçte, özellikle CO_2 fiksasyonunda görevli enzimlerin aktivitesi azalır ve ATP sentezi bozulur. Fotosentezdeki bu azalma, bitkinin enerji üretimini ve büyümesini sınırlar. Ayrıca, kuraklık stresi sırasında

fotorespirasyon yoluyla reaktif oksijen türleri (ROS) oluşur ve bu moleküller biyolojik makromoleküllere zarar verir (Farooq et al., 2009).

Kuraklık stresinin şiddetine bağlı olarak bitkilerde farklı fizyolojik tepkiler ortaya çıkmaktadır. Orta düzeyde stres altında bazı bitkiler daha canlı ve gelişmiş olabilirken, şiddetli stres altında gelişme geriler ve bazı metabolitlerin (örneğin amino asitler) birikimi artar (Sconiers et al., 2020). Ayrıca, kuraklık stresinin şiddeti arttıkça, fotosentez, terleme ve stomatal iletkenlik gibi parametrelerin iyileşme hızı da azalır. Özellikle uzun süreli su eksikliği sonrası yeniden sulama ile bu fizyolojik parametrelerin toparlanması gecikir ve tam iyileşme sağlanamayabilir (Mıyashita et al., 2005).

Kuraklık stresinin fotosentez üzerindeki etkileri, farklı bitki türlerinde ve genotiplerinde değişkenlik gösterebilir. Örneğin, nohut genotiplerinde yapılan bir çalışmada, kuraklığa daha dayanıklı genotiplerin daha yüksek fotosentetik aktivite ve su kullanma etkinliği gösterdiği, ayrıca osmotik ayarlama yeteneklerinin daha iyi olduğu belirlenmiştir (Krouma, 2010). Kuraklık stresi, bitkilerde su kaybını azaltmak için stomatal kapanmaya neden olurken, bu durum aynı zamanda fotosentez hızını da sınırlar. Su eksikliğiyle birlikte, yaprak sıcaklığı artar ve bu değişiklikler bitki su stresi indeksleriyle izlenebilir. Örneğin, su eksikliğiyle birlikte net fotosentez hızının doğrusal olarak azaldığı ve su stresinin belirli bir eşiği aştığında fotosentezin tamamen durduğu gösterilmiştir (Idso et al., 1984). Benzer şekilde, *Calystegia soldanella* üzerinde yapılan bir araştırmada, kuraklık stresinin büyüme ve fotosentez hızını önemli ölçüde azalttığı, ancak klorofil içeriğinde belirgin bir değişiklik olmadığı, bunun da fotosistem II' nin etkinliğinin korunduğunu gösterdiği belirtilmiştir (Bae et al., 2013).

Kuraklık Stresine Karşı Bitki Adaptasyon Mekanizmaları

Bitkiler, kuraklık stresine karşı çeşitli morfolojik, fizyolojik ve biyokimyasal adaptasyon mekanizmaları geliştirmiştir. Bu mekanizmalar arasında kök sisteminin derinleşmesi, yaprak alanının küçülmesi, stomataların kapanması, osmotik ayarlama, antioksidan enzim aktivitesinin artması ve stresle ilişkili genlerin ekspresyonu yer almaktadır (Farooq et al., 2009). Özellikle düşük moleküllü osmolitler (prolin, glisin betain, şekerler) ve antioksidan enzimler (SOD, CAT, POD, APX) bitkilerin kuraklık stresine karşı dayanıklılığında önemli rol oynamaktadır. Bu mekanizmalar arasında en önemlilerinden birisi de osmotik ayarlama. Osmotik ayarlama, bitkilerin hücrelerinde su kaybını önlemek amacıyla düşük moleküllü osmolit maddeler (prolin, glisin betain, şekerler vb.) biriktirmesiyle gerçekleşir. OA, bitkilerin hücre içi su potansiyelini düşürerek turgor kaybını önlemesine ve suyu daha etkin kullanmasına olanak tanır. Bu sayede hücre turgoru korunur ve bitki hayatta kalabilir. Literatürde, osmotik ayarlamının kuraklık stresinde verim kaybını azaltmada önemli bir rol oynadığı, farklı bitki türlerinde ve genotiplerinde osmotik ayarlama kapasitesinin verim ile pozitif ilişkili olduğu gösterilmiştir. Özellikle buğdayda yapılan çalışmalarda, yüksek osmotik ayarlama kapasitesine sahip genotiplerin kuraklık stresinde daha yüksek verim verdiği ortaya konmuştur (Blum et al., 1999). Ayçiçeği ve buğday gibi türlerde yapılan çalışmalar, yüksek OA kapasitesine sahip hatların, düşük OA kapasitesine sahip olanlara göre kuraklık altında daha fazla su alabildiğini, daha yüksek biyokütle ve tane verimi elde ettiğini göstermiştir. Özellikle ayçiçeğinde, OA kapasitesi yüksek olan hatlar, kuraklık döneminde yaklaşık %30 daha fazla tane verimi sağlamıştır (Chimenti et al., 2002). Benzer şekilde, çok sayıda bitki türünde yapılan karşılaştırmalı analizlerde, OA ile kuraklık stresi altında verim arasında pozitif ve anlamlı bir ilişki olduğu ortaya konmuştur.

Kuraklık stresine karşı bitki-mikroorganizma ilişkileri de önemli bir adaptasyon stratejisi olarak öne çıkmaktadır. Bitki büyümesini teşvik eden rizobakteriler (PGPR), kök morfolojisini değiştirme, stresle ilişkili genleri düzenleme, bitki hormonlarını ve stres sinyal yollarını etkileme, uçucu organik bileşikler ve ekzosakkaritler üretme gibi mekanizmalarla kuraklık stresini hafifletebilmektedir. PGPR uygulamaları, su ve besin alım etkinliğini artırmakta, stres hormon düzeylerini ayarlayarak ve sistemik direnç mekanizmalarını indüklemektedir (Sharma et al., 2025). Ayrıca, arbusküler mikoriza mantarları (AMF), bitkilerin fotosentetik aktivitesini, su kullanım etkinliğini, osmoprotektan üretimini ve antioksidan aktivitelerini artırarak kuraklık stresine karşı bitki performansını iyileştirmektedir (Santander et al., 2017).

Kuraklık stresine karşı genetik ve biyoteknolojik yaklaşımlar da giderek önem kazanmaktadır. CRISPR/Cas9 gibi yeni nesil gen düzenleme teknolojileri, osmotik stres toleransında rol oynayan genlerin hedeflenerek bitkilerde kuraklık toleransının artırılmasını mümkün kılmaktadır. Bu teknolojiler, osmotik ayarlama, iyon homeostazı ve stres sinyal yolları gibi temel süreçlerde görev alan genlerin düzenlenmesiyle, kuraklık stresine dayanıklı yeni bitki çeşitlerinin geliştirilmesine olanak sağlamaktadır (Tripathy et al., 2025).

Kuraklık stresine karşı bir diğer önemli adaptasyon mekanizması ise kök sisteminin derinleşmesi ve yaygınlaşmasıdır. Derin ve yaygın kök sistemine sahip bitkiler, toprakta daha derin katmanlardaki suya ulaşarak kuraklık stresine karşı daha dayanıklı olabilmektedir. Ayrıca, bitkilerde stomaların kapanması, yaprak alanının küçülmesi ve transpirasyonun azaltılması gibi fizyolojik tepkiler de su kaybını minimize etmeye yöneliktir (Farooq et al., 2009).

Kuraklık Stresinin Yönetimi ve Tarımsal Üretime Yansımaları

Kuraklık stresinin tarımsal üretim üzerindeki olumsuz etkilerini azaltmak için çeşitli yönetim stratejileri geliştirilmiştir. Bunlar arasında, kuraklığa dayanıklı ve yüksek verimli çeşitlerin kullanımı, uygun sulama tekniklerinin uygulanması, bitki besin elementi yönetiminin optimize edilmesi, organomineral gübrelerin tercih edilmesi ve bitki-mikroorganizma ilişkilerinin teşvik edilmesi yer almaktadır. Ayrıca, tarımsal üretimde mekanizasyonun artırılması, modern tarım tekniklerinin uygulanması ve tarımsal desteklerin etkin kullanımı da kuraklık stresinin etkilerini azaltmada önemli rol oynamaktadır (Tandoğan, 2022).

Türkiye’de yapılan çalışmalar, tarımsal destek ödemeleri ile tarımsal üretim düzeyi arasında uzun dönemli bir ilişki olduğunu ve destek ödemelerinin tarımsal üretimi artırıcı etkisinin bulunduğunu göstermektedir. Ancak, bu etkinin kalıcı olabilmesi için desteklerin sürdürülebilir ve hedefe yönelik olması gerekmektedir (Çakmak & Sağdıç, 2021). Tarımsal üretimde verim ve kaliteyi artırmak, üretim maliyetlerini düşürmek ve kuraklık gibi çevresel stres faktörlerinin etkisini azaltmak için yeterli işletme büyüklüğü ve modern tarım tekniklerinin zamanında uygulanması önerilmektedir (Köse et al., 2021).

Kuraklık stresinin tarımsal üretime etkileri, özellikle bitki büyümesi ve verimi üzerinde belirgin şekilde gözlemlenmektedir. Nevşehir ili örneğinde yapılan bir çalışmada, meteorolojik ve hidrolojik kuraklık analizleri ile birlikte tarımsal ürünlerin verim değerleri incelenmiş ve kuraklık olaylarının tarımsal üretim üzerinde en önemli olumsuz etkileri oluşturduğu tespit edilmiştir. Bu çalışmada, kuraklık olaylarının şiddeti ve süresi arttıkça, tarımsal üretimde de ciddi azalmalar meydana gelmiştir (Pekin et al., 2022). Benzer şekilde, Aydın ilinde yapılan bir başka çalışmada, 1995-2020 yılları arasında artan arazi yüzey sıcaklığı ve azalan NDVI (Normalize Fark Bitki İndeksi) değerleri ile birlikte tarımsal kuraklığın arttığı ve bunun da verim üzerinde olumsuz etkiler

yarattığı ortaya konmuştur. Uydu verileriyle yapılan bu analiz, tarımsal kuraklığın erken tespitinin ve izlenmesinin önemini vurgulamaktadır (Atak & Tonyaloğlu, 2024).

Kuraklık stresinin tarımsal üretim üzerindeki etkileri, sadece bitki fizyolojisiyle sınırlı değildir; aynı zamanda toprak özelliklerinde de önemli değişikliklere yol açar. Iowa’da 2012 yılında yaşanan kuraklık deneyimi, suyun yetersizliği ve yüksek sıcaklıkların mısır ve soya fasulyesi gibi ürünlerde kritik gelişme dönemlerinde ciddi stres oluşturduğunu göstermiştir. Kuraklık, toprakta çatlama, kabuklaşma ve toprak yapısının bozulması gibi sorunlara neden olmuş, bu da toprak koruma planlamasının ve sürdürülebilir toprak yönetiminin önemini bir kez daha ortaya koymuştur (Sawyer et al., 2013).

Kuraklık stresinin yönetimi ve tarımsal üretimde sürdürülebilirliğin sağlanması için çeşitli stratejiler geliştirilmiştir. Bunlar arasında, kuraklığa dayanıklı çeşitlerin seçimi, ozmotik ayarlama kapasitesi yüksek genotiplerin tercih edilmesi, antioksidan savunma sistemlerinin güçlendirilmesi ve uygun gübreleme uygulamaları yer almaktadır. Ayrıca, uzaktan algılama teknolojileri ve uydu verileri kullanılarak tarımsal kuraklığın erken tespiti ve izlenmesi mümkün hale gelmiştir. Bu teknolojiler, geniş alanlarda bitki sağlığı ve nem koşullarının zamanında ve mekansal olarak ayrıntılı bir şekilde izlenmesini sağlayarak, tarımsal kuraklığın etkilerinin azaltılmasına katkı sunmaktadır (Atak & Tonyaloğlu, 2024).

Kuraklık stresi altında bitki beslenmesinin optimize edilmesi, tarımsal üretimin sürdürülebilirliği açısından kritik öneme sahiptir. Özellikle potasyum gibi makro besin elementlerinin kuraklık toleransında rol oynadığı gösterilmiştir. Kuraklık primingi ve ek potasyum uygulamasının, buğdayda ozmotik ayarlama ve yaprak hidrolik iletkenliğini artırarak, kuraklık sonrası verim kayıplarını minimize ettiği belirlenmiştir. Bu uygulamalar, prolin ve glisin

betain gibi ozmolitlerin birikimini artırmakta ve ilgili genlerin ekspresyonunu düzenlemektedir (Sun et al., 2025).

Kuraklık stresi, bitki beslenmesi üzerinde de önemli etkilere sahiptir. Su eksikliği, bitkilerin topraktan besin elementlerini almasını zorlaştırmakta ve özellikle azot, fosfor, potasyum gibi makro besin elementlerinin alımında azalmaya neden olmaktadır. Kuraklık stresinin bitki beslenmesi üzerindeki etkileri sadece makro besin elementleriyle sınırlı değildir. Özellikle silisyumun (Si) bitkilerde kuraklık toleransını artırıcı etkileri üzerine yapılan çalışmalar, bu elementin bazı bitki türlerinde büyümeyi ve besin alımını iyileştirdiğini ortaya koymuştur. Ancak, bu etkinin genotip spesifik olduğu ve tüm bitki türlerinde aynı derecede görülmediği de vurgulanmıştır. Örneğin, buğdayda yapılan bir çalışmada, yüksek Si biriktiren çeşitlerde Si uygulamasının osmotik stres sırasında büyümeyi bir miktar iyileştirdiği, fakat kuraklık stresinde anlamlı bir etki göstermediği belirtilmiştir. Bu nedenle, Si gübrelemesinin kuraklık stresine karşı evrensel bir çözüm olmadığı, genotip bazında değerlendirilmesi gerektiği ifade edilmiştir (Thorne et al., 2021).

Kuraklık stresi, bitki kök bölgesindeki mikrobiyal topluluklar ve kök salgıları üzerinde de önemli değişikliklere yol açmaktadır. Son yıllarda yapılan araştırmalar, kuraklık stresinin kök eksudatları ve rizosfer mikrobiomu arasındaki karşılıklı etkileşimleri değiştirdiğini ve bu değişimlerin bitkinin kuraklığa adaptasyonunda önemli rol oynadığını göstermektedir. Bitki, köklerinden salgıladığı maddelerle rizosferdeki mikrobiyal topluluğu şekillendirirken, bu mikroorganizmalar da bitkinin su ve besin alımını, stres toleransını ve büyümesini etkileyebilmektedir (Chen et al., 2022). Özellikle arbusküler mikoriza mantarlarının (AMF) bitki performansını iyileştirici etkileri dikkat çekicidir. AMF, bitkilerde fotosentetik aktiviteyi, su kullanım etkinliğini, osmotik madde üretimini, antioksidan aktiviteleri ve gen ekspresyonunu artırarak kuraklık stresine karşı bitkiyi desteklemektedir (Santander et al., 2017).

Kuraklık stresinin tarımsal üretim ve bitki beslenmesi üzerindeki olumsuz etkilerini azaltmak için çeşitli yönetim stratejileri geliştirilmiştir. Bunlar arasında, kuraklığa dayanıklı ve yüksek verimli çeşitlerin seçimi ve yetiştirilmesi, organomineral ve biyolojik gübrelere kullanımı, uygun sulama tekniklerinin uygulanması ve toprak organik maddesinin artırılması yer almaktadır (Saygı, 2022).

Sonuç

Kuraklık stresi, küresel iklim değişikliğinin etkisiyle sıklığı ve şiddeti artan, tarımsal üretim ve bitki beslenmesi üzerinde çok yönlü ve yıkıcı sonuçlara yol açan bir çevresel stres faktörüdür. Kuraklık, bitkisel üretimde verim kayıplarına, ürün kalitesinde düşüşlere ve besin elementi alımında ciddi aksaklıklara neden olmaktadır. Kuraklık stresi, tarımsal üretim ve bitki beslenmesi üzerinde çok yönlü ve derinlemesine etkiler oluşturan temel bir abiyotik stres faktörüdür.

Kuraklık, toprakta mevcut suyun azalmasıyla birlikte bitkilerin büyüme, gelişme ve verim potansiyelini sınırlar. Bu durum, hem fizyolojik hem de biyokimyasal süreçlerde önemli değişikliklere yol açar ve bitki beslenmesi ile tarımsal üretimin sürdürülebilirliğini tehdit eder. Kuraklık stresi tarımsal üretim ve bitki beslenmesi üzerinde çok yönlü ve karmaşık etkilere sahiptir. Bitki fizyolojisi, beslenme, mikrobiyal etkileşimler, genetik çeşitlilik ve tarımsal yönetim uygulamaları bu sürecin temel bileşenleridir. Kuraklık stresinin etkilerini azaltmak için multidisipliner yaklaşımların, yenilikçi teknolojilerin ve sürdürülebilir tarım uygulamalarının bir arada değerlendirilmesi gerekmektedir. Literatürde sunulan bulgular, kuraklık stresinin hem bitki fizyolojisi hem de tarımsal üretim açısından kritik bir tehdit olduğunu ve bu tehdide karşı bütüncül stratejilerin geliştirilmesinin zorunlu olduğunu ortaya koymaktadır.

Kuraklık stresinin etkilerini azaltmak ve tarımsal üretimde sürdürülebilirliği sağlamak için, bitki beslenmesi stratejilerinin ve tarımsal yönetim uygulamalarının stres koşullarına göre yeniden yapılandırılması gerekmektedir. Bu kapsamda, kuraklığa dayanıklı çeşitlerin geliştirilmesi, besin elementi yönetiminin optimize edilmesi, antioksidan savunma sistemlerinin güçlendirilmesi ve modern izleme teknolojilerinin kullanılması, tarımsal üretimin geleceği açısından kritik öneme sahiptir.

Kaynakça

Altay, H., & Aksu, G. (2020). The Effects of Potassium Applications on Drought Stress In Sugar Beet: Part Iı. Plant Nutrition Content. *Journal of Scientific Perspectives*, . <https://doi.org/10.26900/jsp.4.015>

Atak, B. K., & Tonyaloğlu, E. E. (2024). Agricultural Drought Analysis Based on Remote Sensing: The Case of Aydin, Türkiye. *Turkish Journal of Forest Science*, . <https://doi.org/10.32328/turkjforsci.1508796>

Bae, C., Hwang, J., Bae, J., Choi, S., Lim, S., Choi, D., Kim, J., Choo, Y., Hwang, J., & Choi, S. (2013). Physiological Responses of Calystegia soldanella under Drought Stress. *Journal of Ecology and Environment*, . <https://doi.org/10.5141/ecoenv.2013.255>

Blum, A., Zhang, J., & Nguyen, H. (1999). Consistent differences among wheat cultivars in osmotic adjustment and their relationship to plant production. *Field Crops Research*, . [https://doi.org/10.1016/s0378-4290\(99\)00064-7](https://doi.org/10.1016/s0378-4290(99)00064-7)

Boubacar, I. (2010). The Effects of Drought on Crop Yields and Yield Variability in Sahel. *00000*, . <https://doi.org/10.22004/ag.econ.56322>

Çakmak, E., & Sağdıç, E. N. (2021). Tarımsal Destek Ödemeleri ile Tarımsal Üretim Düzeyi Arasındaki Nedensellik

İlişkisi: Türkiye Örneği. *İnsan ve Toplum Bilimleri Araştırmaları Dergisi*, . <https://doi.org/10.15869/itobiad.851919>

Cavalcanti, F., Helfand, S. M., & Moreira, A. (2023). Climate Change, Drought, and Agricultural Production in Brazil.

Chen, Y., Yao, Z., Sun, Y., Wang, E., Tian, C., Sun, Y., Liu, J., Sun, C., & Tian, L. (2022). Current Studies of the Effects of Drought Stress on Root Exudates and Rhizosphere Microbiomes of Crop Plant Species.. *Int J Mol Sci*, . <https://doi.org/10.3390/ijms23042374>

Chimenti, C., Pearson, J., & Hall, A. (2002). Osmotic adjustment and yield maintenance under drought in sunflower. *Field Crops Research*, . [https://doi.org/10.1016/s0378-4290\(02\)00029-1](https://doi.org/10.1016/s0378-4290(02)00029-1)

Çobanoğlu, M. S. (2022). Bazı Buğday Çeşitlerinde Kuraklık Stresinin Önlenmesinde Kullanılabilecek Farklı Yöntemler. *Muş Alparslan University Journal of Agriculture and Nature*, .

Erdem, H., & Tutuş, Y. (2023). Kuraklık stresinin Triticum spelta genotiplerinin verim ve verim bileşenleri üzerine olan etkileri. *Harran Tarım ve Gıda Bilimleri Dergisi*, . <https://doi.org/10.29050/harranziraat.1241691>

Farooq, M., Wahid, A., Kobayashi, N., Fujita, D., Basra, S. M. A., Farooq, M., Basra, S., Wahid, A., Kobayashi, N., Fujita, D., & Kobayashi, N. (2009). Plant drought stress: effects, mechanisms and management. *Agronomy for Sustainable Development*, . <https://doi.org/10.1051/agro:2008021>

Gür, M., Bakanoğulları, F., Kivrak, C., Bahar, E., & Kivrak, C. (2022). Assessment of Meteorological and Agricultural Drought Analysis in Kırklareli province. *Tekirdağ Ziraat Fakültesi Dergisi*, . <https://doi.org/10.33462/jotaf.1060752>

Idso, S., Pinter, P., Reginato, R., Clawson, K., Idso, S. B., Pinter, P. J., Reginato, R. J., Clawson, K. L., Idso, S., Pinterjr, P.,

Reginato, R., & Clawson, K. (1984). Stomatal conductance and photosynthesis in water hyacinth: Effects of removing water from roots as quantified by a foliage-temperature-based plant water stress index. *Agricultural and Forest Meteorology*, .
[https://doi.org/10.1016/0168-1923\(84\)90052-2](https://doi.org/10.1016/0168-1923(84)90052-2)

Janislampi, K. W. (2012). Effect of Silicon on Plant Growth and Drought Stress Tolerance. *All Graduate Theses and Dissertations*, .

Johnson, J. D. (1987). 9. Stress physiology of forest trees: The role of plant growth regulators. *Plant Growth Regulation*, .
<https://doi.org/10.1007/bf00043955>

Kavas, M., Yücel, A. M., Baloglu, M. C., Aydın, G., & Öktem, H. A. (2012). Antioxidative and physiological responses of two sunflower (*Helianthus annuus*) cultivars under PEG-mediated drought stress. *Turkish Journal of Botany*, .

Köse, M. A., Turan, A., İslam, A., & Öztürk, D. (2021). Bulancak İlçesinde Tarımsal İşletmelerin ve Üretim Faaliyetlerinin İncelenmesi. *Karadeniz Sosyal Bilimler Dergisi*, .
<https://doi.org/10.38155/ksbd.875405>

Krouma, A. (2010). Plant water relations and photosynthetic activity in three Tunisian chickpea (*Cicer arietinum* L.) genotypes subjected to drought. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, .

Küçükyumuk, C., Küçükyumuk, Z., Erdal, İ., & İnal, F. E. (2015). Effects of Different Sweet Cherry Rootstocks and Drought Stress on Nutrient Concentrations. *Tarım Bilimleri Dergisi*, .

Kucukyumuk, Z., Suarez, D. L., & Kucukyumuk, C. (2024). Influence of drought and salt stress on almond nutrition. *Journal of Plant Nutrition*,. <https://doi.org/10.1080/01904167.2024.2414745>

Lawlor, D.W., Cornic, G., 2002. Photosynthetic carbon assimilation and associated metabolism in relation to water deficits in higher plants. *Plant Cell Environ.* 25, 275-294.

metabolism and the role of ATP. *Ann. Bot.* 89, 1-15.

Miyashita, K., Tanakamaru, S., Maitani, T., & Kimura, K. (2005). Recovery responses of photosynthesis, transpiration, and stomatal conductance in kidney bean following drought stress. *Environmental and Experimental Botany*, .
<https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2004.03.015>

Onus, A. N., Tongur, T., & Kılıc, T. O. (2023). Using Mannitol as Drought Stress Agent on Globe Artichoke [*Cynara cardunculus* var. *scolymus* (L.) FIORI]. *Anadolu Tarım Bilimleri Dergisi*, . <https://doi.org/10.7161/omuanajas.1353386>

Ors, S., & Ekinci, M. (2015). Kuraklık stresi ve bitki fizyolojisi. *Derim*, .

Pekin, M. A., Çamalan, G., & Oğuz, K. (2022). Drought Analysis and Impact of Drought on Crop Yield in Nevşehir City. *Nevşehir Bilim ve Teknoloji Dergisi*, .
<https://doi.org/10.17100/nevbiltek.1180084>

Sağlam, A., Güler, S. N., Kadioğlu, A., & Demiralay, M. (2012). Apoplastic and symplastic solute concentrations contribute to osmotic adjustment in bean genotypes during drought stress. *Turkish Journal of Biology*,

Santander, C., Aroca, R., Ruiz-lozano, J. M., Olave, J., Cartes, P., Borie, F., & Cornejo, P. (2017). Arbuscular mycorrhiza effects on plant performance under osmotic stress. *Mycorrhiza*, .
<https://doi.org/10.1007/s00572-017-0784-x>

Sawyer, J., Robertson, A., Mallarino, A., Lenssen, A., Hodgson, E., Helmers, M. J., Hart, C. E., Hanna, M., Guzman, J., Elmore, R., & Al-kaisi, M. (2013). Drought Impact on Crop

Production and the Soil Environment: 2012 Experiences from Iowa
. *Staff General Research Papers*, .

Sconiers, W. B., Rowland, D., & Eubanks, M. D. (2020). Pulsed drought: The effects of varying water stress on plant physiology and predicting herbivore response. *Crop Science*, .
<https://doi.org/https://>

Sharma, A., Shukla, P., & Pandey, P. (2025). Significance of Plant Growth-Promoting Rhizobacteria in Alleviating Drought Stress in Crop Plants Under a Changing Climate for Sustainable Agricultural Production. *Microorganisms for Sustainability*, .
https://doi.org/10.1007/978-981-96-3748-5_5

Sun, C., Xu, L., Ullah, A., Liu, X., Sun, J., Jiang, D., Tian, Z., & Dai, T. (2025). Drought priming combined with additional potassium application enhances wheat tolerance to post-anthesis drought via osmotic adjustment and leaf hydraulic conductance. *Plant Physiology and Biochemistry*, .
<https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2025.109984>

Tandoğan, N. Ş. (2022). How Effective is Agricultural Mechanization on Agricultural Production? A Panel Data Analysis. *Tarım Ekonomisi Dergisi*, .
<https://doi.org/10.24181/tarekoder.1013081>

Tavakol, E., Jáklí, B., Cakmak, I., Dittert, K., Karlovsky, P., Pfohl, K., & Senbayram, M. (2018). Optimized potassium nutrition improves plant-water-relations of barley under PEG-induced osmotic stress. *Plant and Soil*, . <https://doi.org/10.1007/s11104-018-3704-8>

Thorne, S. J., Hartley, S. E., & Maathuis, F. J. M. (2021). The Effect of Silicon on Osmotic and Drought Stress Tolerance in Wheat Landraces.. *Plants (Basel)*, . <https://doi.org/10.3390/plants10040814>

Tripathy, S., V., D., Sharma, S. S., & Sahoo, J. P. (2025). CRISPR plants against osmotic stress: Methods and applications. *Crispr for Climate Smart and Sustainable Agriculture Genome Modified Plants and Microbes in Food and Agriculture*, . <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-24135-2.00012-8>

Wang, Y., Gun, S., Li, Y., & Qu, L. (2022). Meta-Analysis of Effects of Melatonin Treatment on Plant Drought Stress Alleviation. *Agriculture*, . <https://doi.org/10.3390/agriculture12091335>

Wu, S., Hu, C., Tan, Q., Nie, Z., & Sun, X. (2014). Effects of molybdenum on water utilization, antioxidative defense system and osmotic-adjustment ability in winter wheat (*Triticum aestivum*) under drought stress.. *Plant Physiol Biochem*, . <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2014.08.022>

Yılmaz, G. (2023). Kuraklık ve Sıcak Hava Dalgasının Tarımsal Üretim Üzerine Etkileri. *Doğal Afetler ve Çevre Dergisi*, . <https://doi.org/10.21324/dacd.1220462>

Zhang, Z., Chai, X., Zhang, B., Lu, Y., Gao, Y., Tariq, A., Li, X., & Zeng, F. (2023). Potential role of root-associated bacterial communities in adjustments of desert plant physiology to osmotic stress.. *Plant Physiol Biochem*, . <https://doi.org/10.1016/j.p>

BÖLÜM 3

MICROGRANULAR (MICRO GRANULE, MICRO-GRANULE) FERTILIZERS

SAHRİYE SÖNMEZ¹
İLKER SÖNMEZ²

Introduction

The increasing rise in stress conditions occurring as a result of climate changes worldwide causes plants to be exposed to drought more frequently and to be unable to utilize their potentials sufficiently, and this situation leads to the occurrence of yield losses in plants. Moreover, the fact that more than 50% of agricultural lands have become unusable today and these decreases in the productivity of agricultural areas have further increased the importance of ways to enhance the yield to be obtained from existing areas.

Achieving high yield and quality in plant production depends not only on the amount of nutrients present in the soil but also on the effective uptake of these nutrients by plants. In this regard,

¹ Prof. Dr., Akdeniz University, Faculty of Agriculture, Department of Soil Science and Plant Nutrition, ORCID: 0000-0003-2753-2296.

² Assoc. Prof. Dr., Akdeniz University, Faculty of Agriculture, Department of Soil Science and Plant Nutrition, ORCID: 0000-0001-7264-7805.

fertilization techniques are considered one of the most critical components of agricultural production systems. In recent years, with the developments in plant nutrition technologies, new-generation fertilizers that enable more efficient and environmentally sensitive use of nutrient elements have come to the forefront. Among these fertilizers, microgranular fertilizers draw attention with their advantages of high water solubility, homogeneous distribution, low dose requirement, and early-stage nutrient supply (Rathke, Behrens, & Diepenbrock, 2006).

It is reported that the global microgranular fertilizer market is steadily growing and that interest in microgranular fertilizers has increased with rising demands for sustainable agriculture (Sharma, 2025). In Türkiye, the use of microgranular fertilizers has increased in recent years and is particularly preferred in the cultivation of maize, sunflower, wheat, vegetables, and fruits. Products developed by domestic manufacturing companies (TorosTarım, 2025; IGSAŞ, 2025) are recommended as starter fertilizers applied together with the seed. However, the number of academic studies conducted in this field is still limited. Therefore, the effects of microgranular fertilizers on nutrient transport and yield components in different plant species under varying climatic and soil conditions need to be investigated more comprehensively (Thielicke et al., 2022)

In this section, information is provided on the characteristics of microgranular fertilizers, their agricultural effects and the effects of studies conducted on microgranular fertilizers.

Definition, Classification, and Characteristics

Microgranular fertilizers are fertilizers formulated in the form of granules with a particle size much smaller than that of macro-granules (2–4 mm), which can be applied together with the seed and are developed to deliver the nutrients required by the plant during the early growth period directly to the root zone, and are

generally designed for starter fertilization or precise micronutrient applications.

The granule sizes in microgranular fertilizers generally range between 0.7 and 1.4 mm. This small and homogeneous structure enables the fertilizer to interact easily with the soil. When macrogranular and microgranular fertilizers are compared in terms of structure; while a maximum of 50.000 fertilizer granules per decare fall with the application of 25 kg per decare of macrogranular fertilizers with a diameter of 2–4 mm, this number reaches 6.500.000 granules with the application of 4 kg per decare of microgranular fertilizers. The number of granules per decare is very high; thus, a more homogeneous distribution is achieved in the seed zone (TorosTarım, 2025). Moreover, its free-flowing and non-dusting form facilitates application with machinery. The low moisture content preserves the structural integrity of the granules, and due to low hygroscopicity, no caking occurs even in humid environments. The color of microgranular fertilizers is generally in light gray, white, or brown tones. Upon contact with water, they dissolve rapidly and allow the formation of a homogeneous solution.

The pH values of microgranular fertilizers range between neutral and slightly acidic reactions. This characteristic enables microgranular fertilizers to function compatibly with the soil and facilitates the uptake of nutrients (Thielicke et al., 2022; Marschner, 2012).

Microgranular fertilizers include various types, namely P- and N-rich microgranules (for starter purposes), microgranules supplemented with micronutrients (Fe, Zn, Mn, Cu, etc.), organomineral microgranules, and fertilizers with controlled-release properties. One of the main components of microgranular fertilizers, especially P- and N-containing fertilizers intended for starter purposes, is phosphorus (P_2O_5), and phosphorus is generally present in a highly water-soluble form. In N-containing microgranular

fertilizers, nitrogen is generally present in ammonium form. Ammonium nitrogen remains in a more stable form in the soil and can be taken up by the plant in a controlled manner. In addition to P and N, Mg, S, and micronutrients (Fe, Zn, B, Cu, Mo, and Mn) are also added to microgranular fertilizers. Mg (MgO) may be added to microgranular fertilizers because it plays a role in chlorophyll synthesis and increases photosynthetic capacity, while S (SO_3) may be added because it plays a role in protein synthesis and enzymatic activities. Microgranular fertilizers are also enriched with micronutrients such as Fe, Zn, B, Cu, Mo, and Mn. These elements are of vital importance for plant health. Some microgranular fertilizers are produced using slow-release technology. In this way, nutrients remain active in the soil for a long time and are taken up by the plant gradually (TorosTarım, 2025; IGSAŞ, 2025; GubreTAŞ, 2025; Altıntar, 2025; AWI, 2025).

Microgranular fertilizers are applied to an area close to the seedbed during sowing. Through this application method, especially elements with low mobility in the soil, such as phosphorus, are ensured to reach the root zone directly. In germinating plants, the presence of phosphorus near the root zone is absolutely essential for plants to access this nutrient element, which has limited mobility in the soil. Proper placement of the fertilizer around the seed allows the plant to take up the phosphorus it requires at the correct time. Since microgranular fertilizer applications are made directly to the root zone, the use efficiency of phosphorus in the fertilizer reaches the highest level. In this way, early root development of the plant is promoted, supporting rapid growth during the seedling stage and the formation of a stronger root system (Eulenstein, Ahlborn & Thielicke, 2024). Therefore, microgranular fertilizers enable the concentrated and precise application of nutrient elements to plants. They are generally used in situations where a high level of accuracy and uniformity in nutrient element distribution is required. Although

they are applied in smaller amounts compared to conventional basal fertilizers, microgranular fertilizers are reported to exhibit high performance in terms of nutrient use efficiency and yield increase per unit area (Geist et al., 2023).

One of the most important advantages of microgranular fertilizers is their ability to reduce environmental losses. In particular, losses such as phosphorus fixation, volatilization, and leaching are minimized. In addition, the easy integration of microgranular fertilizers into modern agricultural mechanization systems, their ability to be applied simultaneously with sowing, and their provision of energy savings also offer an economic contribution to production processes (Eulenstein et al., 2024).

Benefits of Microgranular Fertilizer Use

The use of microgranular fertilizers has many benefits. The proximity of the microgranule to the seed/plant increases the accessibility of phosphorus by the root in the early period due to the low mobility of phosphorus (especially in cold and clay-dominated soils); thus, root development and early growth are supported. It contains a high proportion of water-soluble phosphorus. Owing to its high phosphorus content, it contributes to yield increase by providing the energy required by plants. By promoting rooting after homogeneous germination through a greater amount of fertilizer placed in the seedbed, it positively affects plant development. It helps achieve high yields with a good start. It has environmentally friendly technology that prevents fertilizer waste. It provides effective fertilization under drought conditions (TorosTarım, 2025).

With its small granule size, a sufficient local concentration around the seed can be achieved even with lower per-hectare P amounts (e.g., studies compared with DAP). This is particularly effective during phosphorus-limited early growth periods (Geist et al., 2023).

In N-containing microgranular fertilizers, nitrogen supports the development of the plant's green biomass while simultaneously minimizing nitrogen losses. In microgranular fertilizers, Mg (MgO) plays a role in chlorophyll synthesis and increases photosynthetic capacity, while S plays a role in protein synthesis and enzymatic activities. The presence of these two elements contributes to the regular maintenance of the plant's metabolic activities. Micronutrients such as Fe, Zn, B, Cu, Mo, and Mn in microgranular fertilizers are of vital importance for plant health. For example, zinc supports hormone production and root elongation, while iron plays a role in chlorophyll production.

With the iron, zinc, and manganese contained in its composition, it contributes to the micronutrient nutrition of plants during the early growth period. Since it contains the nutrient elements that plants require in greater amounts during the early period, it supports plant development. As the nutrient elements are equal in each fertilizer granule, it helps ensure homogeneous plant development.

The microgranular fertilizers with slow-release technology situation reduces nutrient losses while also preventing environmental pollution (TorosTarım, 2025; IGSAŞ, 2025; GubreTAŞ, 2025; Altıntar, 2025; AWI, 2025). It is known that studies have been reported indicating that when microgranules are used together with organic components, biostimulants, or mycorrhizal inoculum, they positively affect soil microbial activity and nutrient mobilization (Fišarová et al., 2024).

Recommendations on the Application of Microgranular Fertilizers

Microgranular fertilizers, as starter fertilizers, should be preferred only in situations where the soil P level is low or early root development is critical. When soil P is high, they are not preferred because the difference is small (Geist et al., 2023).

It is recommended as a starter fertilizer because its effect reaches the maximum with controlled placement near the seed (2×2 or similar starter placement) (IGSAŞ, 2025). Since combining mycorrhizae with bacterial PGPR or humic/organic additives causes a synergistic effect, their joint application is recommended; however, local testing of these combinations is required (Thielicke et al., 2022).

If a choice is to be made among microgranular fertilizers that exhibit controlled-release properties, biodegradable-coated products should be preferred; it is recommended that the long-term effects of plastic-coated controlled-release fertilizers on soil be taken into consideration (Song et al., 2024).

Application doses and timings of microgranular fertilizers recommended by different fertilizer manufacturers for some plants are given in Table 1 (IGSAŞ, 2025; Altıntaş, 2025; AWI, 2025).

As shown in Table 1, the application rates recommended by fertilizer manufacturers vary depending on the composition of the fertilizers. However, when considering application times, they are all similarly recommended: application to the soil either at seed sowing or seedling planting, or in early spring for fruit production.

Table 1. Application amounts and timing of microgranular fertilizers recommended by different fertilizer manufacturers for some plants.

Suggestions	Crops	Application Rate	Application Time
1	Maize, Sunflower, Cotton	2-4 kg/da	During seed sowing
	Potato, Sugar Beet, Carrot	3-5 kg/da	During seed sowing
	Soybean	2-3 kg/da	During seed sowing
	Rapeseed	3-4 kg/da	During seed sowing
	Cereals	2-4 kg/da	During seed sowing
	Tomato, Eggeplant, Pepper, Cucumber	3-5 kg/da	During seedling planting
	Citrus (Orange, Mandarin, Lemon)	2-4 kg/da	It is recommended to apply to the soil at the determined dose in early spring.
		0.1-0.25 kg/tree	
	Stone Fruits (Peach, Apricot, Plum, Cherry, Walnut, Olive, Hazelnut)	2-4 kg/da	It is recommended to apply to the soil at the determined dose in early spring.
		0.1-0.25 kg/ tree	
	Soft-Seeded Fruits (Apple, Pear, Quince, Grape)	2-4 kg/da	It is recommended to apply to the soil at the determined dose in early spring.
		0.1-0.25 kg/ tree	
2	Maize, Sunflower, Rice, Tobacco	2-4 kg/da	During seed sowing
	Wheat, Barley, Canola, Cotton	2-4 kg/da	During seed sowing
	Greenhouse and Open-Field Vegetables	3-5 kg/da	During seedling planting
	Cotton, Potato, Sugar Beet	2-4 kg/da	During seed sowing
3	Maize, Sunflower, Rice, Tobacco	3-5 kg/da	During seed sowing
	Wheat, Barley, Canola	2-4 kg/da	During seed sowing
	Cotton	2-4 kg/da	During seed sowing
	Potato, Sugar Beet	4-6 kg/da	During seed sowing
	Greenhouse and Open-Field Vegetables	3-5 kg/da	During seed sowing

Source; 1- (IGSAŞ, 2025), 2- (Altıntar, 2025) 3- (AWI, 2025)

Studies Conducted on Microgranular Fertilizers

Jankowski, Sokolski & Olszewski (2019) investigated the effects of microgranular starter fertilizer (MSF) applied to the seed zone on the biomass during autumn growth and on the micronutrient content and micronutrient uptake after harvest of winter oilseed rape

(*Brassica napus* L.). The study was conducted at the Agricultural Experimental Station in Bałcyny (Northeastern Poland) between 2012 and 2015. During autumn growth, they determined that micronutrient concentrations (especially Mn and Fe) were higher in the roots of winter oilseed rape than in the leaves; they also found that MSF application in autumn increased Cu, Zn, and Fe contents while decreasing Mn levels in the leaves. MSF application at sowing increased Zn, Mn, and Fe concentrations in the roots, and during autumn growth, micronutrient uptake was determined as 481.0 g Fe ha⁻¹, 81.8 g Mn ha⁻¹, 56.5 g Zn ha⁻¹, and 7.7 g Cu ha⁻¹. It was reported that MSF improved micronutrient uptake of winter oilseed rape in autumn, and that in post-harvest biomass, the highest Fe and Mn contents were detected in the roots, while the highest Cu and Zn concentrations were found in the seeds. MSF increased the micronutrient content of seeds (Cu, Mn, and Fe) and straw (Cu, Zn, Mn, and Fe); in treatments where NPK fertilizer was applied before sowing (standard or half of the standard dose), it was determined that MSF application at sowing decreased Cu and Mn concentrations and increased Zn and Fe contents in post-harvest residues (roots). It was found that the uptake of micronutrient elements (Cu, Zn, Mn, Fe) by seeds and stems was significantly higher under the effect of MSF, and that MSF application in autumn reduced micronutrient uptake by the roots of winter oilseed rape.

Thielicke et al. (2022) investigated the effects of a reduced-P-content organomineral microgranular fertilizer (Startec) and different biostimulant combinations (mycorrhizal fungi, humic substances, soil bacteria) on yield and phosphorus balance in maize (*Zea mays*) grown on marshland soils in Germany, in comparison with standard phosphorus application using DAP. As a result, they determined that Startec applications showed equivalent performance to DAP in terms of yield, but with a much lower phosphorus surplus (average ~4.5 kg P₂O₅ ha⁻¹ compared with ~43.7 kg P₂O₅ ha⁻¹ in

DAP). They determined that biostimulants alone or in combination did not provide statistically significant yield increases every year; however, in some years, the humic + mycorrhizal combination showed positive effects. The study also found that climatic years (intra-annual weather and soil conditions) were more decisive than biostimulants. Although these results indicate that microgranules and biostimulants can be included in sustainable fertilizer strategies, they emphasize that attention should be paid to application conditions. In addition, while this study reveals the importance of the soil–application–chemistry relationship under field conditions, they stated that the microgranular strategy was successful even in cases where soil P was high (3.9 g P/100 g soil). Overall, it was stated that microgranular fertilizers could be an alternative to obtain similar yields by reducing P doses compared to DAP and to reduce environmental risks.

In a study conducted by Jankowski et al. (2018) over a three-year period (2012–2015) at the Agricultural Experimental Station in Bałcyny (northeastern Poland), the effects of microgranular starter fertilizer (MSF) applied to the seed zone on the autumn growth, overwintering success, and biomass yield of winter oilseed rape (*Brassica napus* L.) were investigated. It was determined that MSF did not adversely affect seedling emergence, increased the dry matter (DM) content of rosette leaves in autumn by 15% to 24% (without affecting taproot length or weight), and contributed to a 6% increase in the overwintering success of the oilseed rape plant. It was determined that MSF increased seed yield (0.26–0.44 Mg ha⁻¹), decreased the harvest index (from 0.401 to 0.380), and reduced root biomass yield (0.51–0.69 Mg ha⁻¹). It was found that the use of MSF did not show negative effects on overwintering success or the yield of winter oilseed rape and reduced or even eliminated the need for conventional pre-sowing NPK fertilizer. It was stated that the

application of MSF at sowing reduced fertilization costs and minimized environmental hazards.

Jankowski & Sokolski (2018) conducted a three-year study investigating the effects of applying microgranular starter fertilizer (MSF) to the seed zone on the autumn and post-harvest macronutrient content of winter oilseed rape (*Brassica napus* L.). The study was carried out at the Agricultural Experimental Station in Bałcyny (northeastern Poland) between 2012 and 2015. The application of MSF in addition to pre-sowing NPK (NPK + MSF) contributed to increases in the macronutrient contents of leaf rosettes (N, P, K, and Ca) and roots (N, P, and K) of winter oilseed rape before the end of the growing season. The application of MSF together with NPK fertilization significantly reduced the P and Mg contents in winter oilseed rape seeds. MSF application increased the macronutrient content of the straw; however, the magnitude of this effect varied depending on the pre-sowing NPK dose applied. MSF application (independent of NPK doses) increased the N, P, Mg, and Ca contents in the roots of winter oilseed rape, while reducing the K content. In treatments where MSF was combined with the standard pre-sowing NPK dose, nutrient uptake increased by 12–24% for N, 14–22% for P, 13–26% for K, 11–24% for Mg, and 18–24% for Ca (75–90 days after sowing). MSF application increased macronutrient uptake by the straw, but reduced macronutrient uptake by the roots (318–332 days after sowing).

Haraga & Szilagyi (2019) examined the effects of microgranular fertilization on pollination and yield of hybrid maize seed. In the study, it was determined that the effectiveness of microgranular fertilizer application at sowing in seed maize and its effect on pollination shortened the period from sowing to emergence by an average of 2 days, which helped rapid development during the early vegetation stages. In addition, at the 4-leaf stage, the roots of maize treated with microgranular fertilizer at sowing developed 20%

more than those of the control group; at the 8-leaf stage, a 20% difference in root development was observed; and it was determined that the plants developed more rapidly and reached the flowering stage 4–5 days earlier compared to the control group. It was reported that earlier onset of flowering compared to the control provided better protection against drought by limiting protandric effects and thus enabled the attainment of a higher proportion of pollinated kernels; that plant height and vigor increased significantly compared to the control, showing better resistance to diseases and lodging; and that superior ear development in terms of size and higher thousand-kernel weight were obtained. In addition, the study determined that the plot fertilized with microgranular fertilizer had a yield 1104 kg ha⁻¹ higher than the control.

Madjar, Iancu & Scaeteanu (2023), in their study conducted in 2019 in Ilfov County, Grădiştea (Poland), investigated yield variability of the maize hybrid (P0268) under an initial microgranular fertilizer application of 25 kg·ha⁻¹. As a result of the study, it was determined that the microgranular fertilizer accelerated germination by enabling rapid plant growth and positively affected the development of the root system. The effectiveness of the microgranular fertilizer was proven throughout all vegetative stages of maize, and in the unfertilized control treatment, it was determined that plants exhibited stronger and more intense green coloration, along with well-developed root systems and stems. At harvest time, grain yield in the fertilized treatments was 229 kg·ha⁻¹ and was found to be higher compared to the control. In this study, the effectiveness of microgranular fertilizer application on maize yield was demonstrated; however, under the climatic conditions of 2019, economic efficiency was determined to be low.

Fišarová et al. (2024) evaluated the effectiveness of microgranular biochar (MicroCHAR) and powdered biochar as soil amendments in improving soil function and enhancing the growth

and yield of pea, maize, and wheat plants. In their research conducted under greenhouse and field conditions on degraded, drought-prone soils, they combined biochar application with arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) and determined that the combination of amendments affected soil nutrient status in various ways; in all cases, the availability of extractable potassium (K) increased, whereas AMF inoculation applied alone reduced calcium (Ca) availability, but this reduction did not occur when AMF was applied together with biochar. They determined that, compared to the control, MicroCHAR positively affected root biomass and pea P content, but that biochar did not increase N or K. They reported that crop yield increased significantly with the addition of MicroCHAR and that the rate of mycorrhization of plant roots increased by 260%; this effect was observed under both greenhouse and field conditions. As a result of this study, while it was suggested that the application of MicroCHAR to certain soils could provide reliable benefits for some crops, it was stated that the observed effects could be soil- and crop-specific; they also indicated that optimizing nutrient and microorganism coatings on microgranular biochar could open important avenues for future studies aimed at improving crop yields in degraded agricultural soils.

Eulenstein, Ahlborn & Thielicke (2024) (Chaure, Mendhe, Bhalerao, & Shaikh, 2012) conducted an agricultural economic evaluation of the direct application of mineral microgranular fertilizer and organomineral microgranular fertilizer to the maize seedbed, compared with a commonly used mineral band fertilizer in temperate climate regions. In the study, the aim was to reduce phosphorus inputs while maintaining the yield of maize plants (*Zea mays*). In the study, dry matter yields were determined through a three-year field experiment using two phosphorus-reduced microgranular fertilizers as well as a standard diammonium phosphate (DAP) fertilization method. In the organomineral

microgranular fertilizer application, a 15% higher dry matter yield (2.8 Mg per hectare) was obtained compared to the DAP application, whereas higher yields achieved using mineral microgranular fertilizer were determined only in a single year. The higher yield of the organomineral microgranular fertilizer and the lower phosphorus amounts resulting from the use of this product led to a moderate phosphorus surplus of 2.7 kg P ha⁻¹, while DAP fertilization caused a surplus of 25.5 kg per hectare. It was determined that the phosphorus balance in plots fertilized with mineral microgranular fertilizer followed a pattern similar to that of the organomineral microgranular fertilizer. Consequently, it was reported that the direct application of both microgranular fertilizers beneath maize could represent an alternative to the widespread DAP fertilization in maize cultivation on fertile soils.

Chaure et al. (2012), in their study conducted between 2007 and 2009 at the Jalgaon Banana Research Station to investigate the effects of microgranular sulfur (WG) on soil properties, nutrient uptake, banana growth, and yield parameters, determined that the application of 12 g sulfur per plant in two splits using microgranular sulfur (WG) resulted in a significantly higher number of hands per bunch, maximum bunch weight, and yield compared to the control. They also found that the application of 9 g sulfur per plant in two splits using microgranular sulfur (WG) recorded 137 hands per bunch, a bunch weight of 19.6 kg, and a yield of 87.0 t ha⁻¹, and was at the same level as the application of 12 g sulfur per plant. It was reported that soil pH and EC values were lower in treatments where sulfur was applied via WG, and that higher nutrient uptake was recorded in the treatment where 12 g sulfur per plant was applied in two splits via WG.

Geist et al. (2023) conducted field experiments comparing in-row inoculation strategies applied alone and in combination with the standard starter fertilizer diammonium phosphate (DAP) (20.1 kg P

ha⁻¹), microgranular fertilizer (MG) (2.4 kg P ha⁻¹), and *Bacillus atropheus* as well as mycorrhizal fungi (*Rhizogloinus irregulare*, *Funneliformis mosseae*, and *Funneliformis caledonium*), due to the need for alternative strategies to support early maize development and reduce P surplus. In the study, they measured the soil microbial community within and between maize rows using quantitative PCR (qPCR)-based assessments of eight fungal and bacterial groups. As a result of the study, they determined that yield did not differ between fertilization with DAP or MG and the unfertilized control; however, the combined microorganism inoculation (MO) increased yield by 4.2%. They found that the composition of the soil microbial community was not affected by the MO application, but that within maize rows at one field site, a significant 9.3% increase in the total microbial gene copy number and a significant 18% decrease in the relative abundance of the bacterial phylum Bacillota (Firmicutes) occurred. Therefore, they concluded that in-row MO application represents a promising option that could replace starter fertilization.

In their study focusing on the evaluation of microgranular fertilizers in terms of agricultural mechanization and energy efficiency, Sağlam & Tan (2024) stated that microgranular fertilizers offer advantages such as effective nutrition at low application rates, balanced distribution of nutrients in the soil, and reduced environmental losses. In the study, base fertilizers commonly used in Türkiye were compared with microgranular applications, and it was emphasized that microgranules particularly support early plant growth during the seedling stage. In addition, they reported that, from a mechanization perspective, microgranular fertilizers have advantages due to low energy consumption and the possibility of precise dosing. As a result of the study, it was stated that this work is one of the few sources highlighting the economic and environmental benefits of microgranular fertilizers under Turkish conditions.

Conclusions and Recommendations

Microgranular fertilizers are fertilizer forms that enable rapid and efficient access to nutrients, particularly during the early growth stages of plants, and have gained increasing importance among modern plant nutrition approaches. Studies and practical applications indicate that, despite being applied at low rates, microgranular fertilizers enhance nutrient use efficiency and positively affect plant growth, root system development, and final yield. In particular, the localized and homogeneous placement of nutrients with limited mobility in soil, such as phosphorus, close to the seedbed stimulates early root development and improves plant tolerance to stress conditions.

Field and greenhouse studies reported in the literature demonstrate that microgranular fertilizers promote early emergence, increase root biomass, improve macro- and micronutrient uptake, and, under certain conditions, enhance yield in crops such as maize, winter oilseed rape, banana, pea, wheat, and various vegetable species. Moreover, compared with conventional basal fertilizers, microgranular fertilizers have been shown to significantly reduce phosphorus surpluses and environmental losses, thereby aligning with the objectives of sustainable agriculture. Organomineral and biostimulant-containing microgranular fertilizers may provide additional benefits under suitable soil and climatic conditions; however, their effectiveness can vary depending on year-to-year variability and environmental factors.

Although the use of microgranular fertilizers has increased in Türkiye in recent years, academic studies evaluating their effects under different soil types, crop species, and climatic conditions remain limited. Available findings suggest that microgranular fertilizers offer significant advantages when used rationally as starter fertilizers, particularly in phosphorus-deficient soils or in cold and heavy-textured soils. Nevertheless, it should be considered that the

effectiveness of microgranular fertilizer applications may be limited in soils with high native nutrient levels.

Accordingly, the following recommendations regarding the use of microgranular fertilizers can be proposed:

1. Microgranular fertilizers should be applied based on soil analysis results, especially under conditions where early-season nutrition is critical.
2. For starter fertilization, controlled and precise placement techniques in the seedbed should be preferred.
3. Combined applications with mycorrhizal fungi, plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR), and organic amendments should be tested under local conditions to elucidate potential synergistic effects.
4. In controlled-release microgranular fertilizers, the use of biodegradable-coated products is recommended, taking environmental sustainability into consideration.
5. Long-term, multi-location studies including economic analyses are needed under Turkish conditions to comprehensively evaluate the effects of microgranular fertilizers on yield, quality, and environmental impacts.

In conclusion, when applied using appropriate products, rates, and application strategies, microgranular fertilizers represent an important fertilization alternative that enhances crop productivity and nutrient use efficiency, reduces environmental risks, and contributes to sustainable agricultural practices.

References

- Altintar. (2025). *Altintarım*. Startmaster 11-48-0 (5SO₃)+ ME Mikro Granül Taban Gübresi- Teknik Bilgi Sayfası.: <https://www.altintar.com/Products/Detail/149>. adresinden alındı
- AWI. (2025). *Agro Work International*. Allstart 11-45-0 (12.5SO₃)+ ME Mikro Granül Başlangıç Gübresi- Teknik Bilgi Sayfası.: <https://awi.com.tr/tr/urunler/allstart-40>. adresinden alındı
- Chaure, J., Mendhe, A., Bhalerao, & Shaikh, N. (2012). Effect of microgranular sulphur on nutrient uptake, soil properties and yield of banana. *An Asian Journal of Soil Science*, 7(1), s. 138-142.
- Eulenstein, F., Ahlborn, J., & Thielicke, M. (2024). The potential of microgranular fertilizers to reduce nutrient surpluses when growing maize (*Zea mays*) in regions with high livestock farming intensity. *Life*, 14(1), s. 81.
- Fišarová, L., Berchová, K., Lukáč, M., Beesley, L., Vosátka, M., Hausenblas, M., & Trakal, L. (2024). Microgranular biochar improves soil fertility and mycorrhization in crop systems. *Soil Use and Management*, 40(2), s. e13068.
- Geist, L., Wolfer, R., Thiem, R., Thielicke, M., E.-L. B., Eulenstein, F., & Müller, M. E. (2023). Alternative Starter Fertilization Strategies in Maize (*Zea mays* L.) Cultivation: Agronomic Potential of Microgranular Fertilizer and Plant Growth-Promoting Microorganisms and their impact on the soil native microbial community. *Agronomy*, 13, s. 2900.
- GubreTAŞ. (2025). *Gübretaş*. Mikro granül gübreler, Teknik dökümanı.: <https://www.gubretas.com.tr/tr/urun/gf-earlyfert>. adresinden alındı

- Haraga, L., & Szilagyi, L. (2019). The effects of micro-granulated fertilization on pollination and yield of hybrid seed corn. *Scientific Papers. Series A. Agronomy*, *LXII*, (No. 1.).
- IGSAŞ. (2025). *IGSAŞ. Mikro granül gübreler teknik dökümanı*: <https://www.igsas.com.tr/urunler/mikro-granul-gubre/igsas-start-11-48-06-so3me>. adresinden alındı
- Jankowski, K., & Sokolski, M. (2018). The effect of a micro-granular starter fertilizer on the biomass quality of winter oilseed rape. *Journal of Elementology*, *23*(4), s. 1243-1255.
- Jankowski, K., Sokolski, M., & Olszewski, J. (2019). Effect of micro-granular starter content of winter rapeseed biomass. *Journal of Elementology*, *24*(2), s. 449-460.
- Jankowski, K., Sokolski, M., Boguska, B., & Dubis, N. (2018). Micro-Granulated Starter Fertilizer Effects on Growth and Productivity of Winter Oilseed Rape. *Agronomy Journal*, *110*, s. 2250–2258.
- Madjar, R., Iancu, C., & Scaeteanu, G. (2023). Microgranular starter fertilizer effects on growth and productivity of a high-yield maize hybrid cultivated under climatic conditions of Ilfov County. *Scientific Papers. Series A. Agronomy*, *Vol. LXVI*, (No.1).
- Marschner, P. (2012). *Marshner's Mineral nutrition of higher plants (3rd ed.)*. . Boston: Academic Press.
- Rathke, G., Behrens, T., & Diepenbrock, W. (2006). Integrated nitrogen management strategies to improve seed yield, oil content and nitrogen efficiency of winter oilseed rape (*Brassica napus* L.): a review. *Agric Ecosyst Environ.*, *117*(2-3), 80–108.

- Sağlam, C., & Tan, F. (2024). Ayçiçeği üretiminde uygulanan azotlu gübreleme yöntemlerinin verim üzerine etkilerinin değerlendirilmesi. C. & Sağlam içinde, *Tarımsal Mekanizasyon ve Enerji Üzerine Güncel Araştırmalar* (s. 192-199). Ankara: IKSAD Yayınları.
- Sharma, A. (2025). *Straits Research*. Microgranular Fertilizer Market : <https://straitsresearch.com/report/microgranular-fertilizer-market> adresinden alındı
- Song, Y., Ma, L., Duan, Q., Xie, H., Dong, X., Zhang, H., & Yu, L. (2024). Development of Slow-Release Fertilizers with Function of Water Retention Using Eco-Friendly Starch Hydrogels. *Molecules*, 29(20), s. 4835.
- Thielicke, M., Ahlborn, J., Zivotic, L., Saljnikov, E., & Eulenstein, F. (2022). Microgranular fertilizer and biostimulants as alternatives to diammonium phosphate fertilizer in maize production on marshland soils in northwest Germany. *Zemljiste I Biljka* 7, s. 53-66.
- TorosTarım. (2025). *Mikro granül gübreler teknik dökümanı*. <https://www.toros.com.tr>: https://www.toros.com.tr/wp-content/uploads/2024/06/toros-micro_teknik-dokuman.pdf adresinden alındı

BÖLÜM 4

PLANT NUTRITION AND PLANT HEALTH RELATIONSHIPS

1. İLKER SÖNMEZ¹

2. SAHRIYE SÖNMEZ²

Introduction

The most important factors in plant production are ensuring plant nutrition and controlling pests and diseases. Fertilization to ensure plant growth results in healthy plants and crops, while successful plant nutrition practices can also help build plant resistance to diseases that negatively impact plant growth. Pests, diseases, and climatic factors are among the most significant constraints hindering plant growth, and minimizing the effects of these factors can only be achieved through effective plant nutrition practices.

Today, climatic factors play a significant role in the development of disease and pesticides, and control methods are

¹ Assoc.Prof.Dr, Akdeniz University Faculty of Agriculture, Soil Science and Plant Nutrition, Orcid: 0000-0001-7264-7805, ilkersonmez@akdeniz.edu.tr,

² Prof.Dr, Akdeniz University Faculty of Agriculture, Soil Science and Plant Nutrition,, Orcid: 0000-0003-2753-229, ssonmez@akdeniz.edu.tr

generally achieved through chemical pesticides. It is known that prolonged application of the same type of pesticides can lead to the development of immune mechanisms in plants, diminishing their effectiveness. This necessitates continuous search for new chemical solutions. Numerous studies have demonstrated that plant nutrition mechanisms enhance plant immunity and make plants more resistant to diseases and pests. Furthermore, inadequate or unbalanced nutritional conditions can make plants vulnerable to certain diseases and pests. Such plants are susceptible to diseases arising from nutrient imbalances, while also becoming more susceptible to disease due to the negative effects of various biotic and abiotic factors, leading to significant problems such as yield loss, product quality, and marketing problems. This review will evaluate the interactions between plant nutrition and plant diseases and pests.

The effectiveness of nutrients against plant diseases and pests

Passive and active disease control mechanisms are activated through nutrient management. Mineral nutrients maintain plant resistance and regulate metabolic activity associated with pathogen virulence. Adequate nutrition is crucial for maintaining disease resistance. Plants contain antimicrobial compounds and possess active response mechanisms. These mechanisms, when nutrients required for the synthesis or induction of antimicrobial compounds are sufficient, allow the accumulation of inhibitory phytoalexins, phenols, flavonoids, and other defensive compounds at infection sites in resistant plants (Huber and Haneklaus, 2007). Because the interaction between nutrients and disease pathogens is complex, the effects of each nutrient on specific diseases and pests, as well as the mechanisms of tolerance or resistance to a particular pathogen, are evaluated in this section.

Nitrogen: Nitrogen, the most important macronutrient required for normal plant growth and development, plays a significant role in

various metabolic and physiological processes such as photosynthesis, amino acid synthesis, respiration, and the tricarboxylic acid (TCA) cycle (Foyer et al., 2011). Different forms of nitrogen (NH_4^+ and NO_3^-) have been reported to have various effects on plant disease resistance (Bolton and Thomma 2008; Mur et al., 2017). Nitrogen prevents plants from becoming diseased by increasing the activity of antagonistic microorganisms. Plants deficient in nitrogen are more susceptible to diseases and pests due to their poor development. Healthy plants show greater resistance to diseases and pests. Excess nitrogen increases sugar and amino acid formation in leaves, creating an environment conducive to the growth and development of pathogens.

The plant's susceptibility to diseases and pests decreases (Elibüyük et al., 2004). In some plants, it has been observed that as the N content exceeds adequate levels, the amount of fungus-inhibiting compounds decreases. Excessive fertilization with N increases excessive and weak vegetative growth, which can increase the effects of various diseases. The reason for the susceptibility of excess nitrogen to diseases may be that it makes plants more susceptible to infection by supporting watery growth and thinner cell walls; that increased plant density may lead to more humid air around the plants, which can cause diseases; and that delayed maturity may prolong the period of infection and disease development (Anonymous, 2015). Clubroot, Rhizoctonia canker, and Fusarium wilts observed in fruit and vegetable plants can be controlled by liming to increase soil pH and fertilizing with nitrate-based nitrogen (Huber, 1989).

Sufficient levels of N and P can compensate for tissue losses caused by root rot diseases such as take-all and Pythium by promoting root development in cereal crops (Huber, 1980). Nitrate nitrogen can alleviate the severity of black scurf disease (*Rhizoctonia solani*) in potatoes and root rot in beans, peas and

wheat, whereas ammonium nitrogen has been reported to exacerbate these diseases (Anonymous, 2015). At high $\text{NO}_3\text{-N}$ levels, the risk of disease in *Fusarium oxysporum*, *Botrytis cinerea*, *Rhizoctonia solani*, and *Pythium* species decreases. Conversely, at high $\text{NH}_4\text{-N}$ levels, the risk of disease in *Pyricularia*, *Thielaviopsis basicola*, *Sclerotium rolfsii*, and *Gibberella zeae* species decreases (Dordas, 2008). However, soil-borne pathogens such as potato scab (*Streptomyces scabies*) and early blight are exacerbated by $\text{NO}_3\text{-N}$ but mitigated by $\text{NH}_4\text{-N}$.

The severity of various diseases in plants in cases of insufficient or excessive nitrogen levels is given in Table 1.

Table I. Effect of nitrogen level on the severity of various diseases

Pathogen or disease	Low N	High N	References
<i>Puccinia graminis</i>	decrease	increase	Howard et al. (1994)
<i>Erysiphe graminis</i>	decrease	increase	Büschbell and Hoffmann (1992)
<i>Oidium lycopersicum</i>	decrease	increase	Hoffland et al. (2000)
<i>Pseudomonas syringae</i>	decrease	increase	Hoffland et al. (2000)
<i>Alternaria solani</i>	increase	decrease	Blachinski et al. (1996)
<i>Fusarium oxysporum</i>	increase	decrease	Woltz and Engelhar (1973)

Excess nitrogen promotes the formation of excess cells and plasma in plants, resulting in loose tissues. As a result, pests such as spider mites, aphids, whiteflies, and thrips, especially those with stinging, sucking mouthparts, have been shown to attack plants with these types of persistent, tender tissues, finding more reproductive organs in tissues where they can extract more sap (Toros et al., 2001). Excessive nitrogen fertilizer promotes lush, verdant plant growth that attracts pest populations. Plant dry weight, leaf area, leaf chlorophyll content, and grain yield increase in plants treated with nitrogen fertilizer. Increased nitrogen fertilization leads to increased biosynthesis or accumulation of proteins, free amino acids, and

sugars that can attract insects (Bala et al., 2018). Studies have shown that aphid, leaf moth and whitefly populations increase with increasing nitrogen application rates (Jauset et al., 1998; Godfrey et al., 1999; Randhawa and Aulakh, 2013).

Phosphorus: Phosphorus is a component of many organic molecules in the cell and plays an effective role in energy metabolism, RNA-DNA synthesis, phytin structure in grains and seeds, and phospholipid formation. It strengthens plant tissues, thereby increasing the resistance of plants to diseases and pests (Kacar, 2020). In general, optimal phosphorus supply increases disease resistance in plants (Prabhu et al., 2007). It has been shown that phosphorus is most beneficial in controlling fungal diseases when strong root development enables plants to recover from disease (Huber and Graham, 1999).

Phosphorus application increases the volume of the root system and increases protein synthesis and cellular activity of plant tissues, making them more resistant to nematodes. Phosphorus application has been effective against root rot in rice and tobacco, downy mildew in grapes and potatoes, and rust in celery (Prabhu et al., 2009a). P fertilization in potatoes has been shown to increase leaf resistance to *Phytophthora*, but proportionally higher phosphorus levels relative to potassium and nitrogen increase the incidence of powdery mildew (*Erysiphe graminis*) in cereals, *Gibberella* root and stem rot in corn, *Phomabetae* rot in beets, *Botrytis fabae* (gray mold) in field beans, *Fusarium* spp. in alfalfa, *Fusarium* wilt in tomatoes, and rust (*Puccinia* spp.) in cereals (Bergmann, 1992). Phosphate applied to the roots of hydroponically grown cucumber plants increases their resistance to powdery mildew (*Sphaerotheca fuliginea*), suggesting a nutritional defense mechanism (Reuveni et al., 2000). There is evidence that foliar application of phosphite in the form of phosphoric acid (H_3PO_3) or its salts can inhibit pathogens

such as *Phytophthora* and other members of the order Peronosporales (Lobato et al., 2008; Brunings et al., 2009).

Potassium: K plays important roles in enzyme activation, protein synthesis, photosynthesis, osmoregulation, stomatal movement, energy transfer, phloem transport, cation-anion balance, stress resistance, yield and quality (Marschner, 2012). Potassium is the plant nutrient that plants take up the most after nitrogen. Plants absorb potassium in the form of K^+ ions in their growing environment. Potassium has very important biochemical and physiological functions. In potassium deficiency, plants suffer more damage from frost (Table 2). This is explained by the lack of sufficient water in plant cells (Aktaş, 1995).

Table 2. Effects of potassium on potato plants against frost damage (Grewal and Singh, 1980).

K application (kg ha ⁻¹)	Tuber yield (ton ha ⁻¹)	Leaf K content (mg g ⁻¹ DW)	Frost damaged leaves (%)
0	2.39	24.4	30
42	2.72	27.6	16
84	2.87	30.0	7

In plants with sufficient K supply, the synthesis of high molecular weight compounds (such as proteins, starches and cellulose) and phenol concentration have increased significantly, which has reduced the concentrations of low molecular weight compounds (soluble sugars, organic acids, amino acids, and amides) necessary for disease development in plant tissues, making the plant less susceptible to disease (Prasad et al., 2010). Plants fed with sufficient potassium have increased total phenolic content. Phenols play an important role in the plant's defense mechanism by forming a mechanical barrier within the plant, as they act as precursors to lignin and suberin (Perrenoud, 1990).

K deficiency reduces the amount of natural antifungal compounds in the infected area of the plant. Potassium plays a central role in the development of thick cuticles, which act as a physical barrier against infection or penetration by sucking insects (Anonymous, 2015). It has been reported that potassium applications can reduce fungal diseases by 70%, bacterial diseases by 69%, insect damage by 63%, and viral diseases by 41% (Table 3).

Table 3. Effectiveness of potassium against diseases and pests in plants (Perrenoud, 1990)

Parasite Group	Total	Number – () % of indications		
		Incidence decreased	Incidence unchanged	Incidence increased
Fungal diseases	1549	1080 (70)	112 (7)	357 (23)
Insects and mites	459	290 (63)	39 (9)	130 (28)
Nematodes	111	37 (33)	4 (4)	70 (63)
Viruses	186	76 (41)	14 (7)	96 (52)
Bacteria	144	99 (69)	14 (10)	31 (21)
Total	2449	1582 (65)	183 (7)	684 (28)

The high susceptibility of potassium-deficient plants to parasitic diseases stems from potassium's metabolic functions. Potassium can prevent disease attack by supporting the development of thicker outer walls in epidermal cells. In potassium-deficient plants, protein synthesis is impaired and simple N compounds, such as amides used by invasive plant pathogens, accumulate. Tissue hardening and stomatal opening patterns are closely related to the intensity of infestation (Marschner, 2012).

The positive effect of potassium in certain bacterial and fungal diseases is shown in Table 4.

Table 4. The effect of potassium on some bacteria, fungal and viral diseases (Prabhu et al., 2009b)

Plant	Pathogen microorganisms	Diseases	Pathogen
Carnation	Bacteria	Bacterial wilt	<i>Pseudomonas caryophylli</i>
Cucumber		Bacterial wilt	<i>Erwinia tracheiphila</i>
Apple		Fire Blight	<i>Erwinia amylovora</i>
Potato		Scab disease	<i>Streptomyces scabies</i>
Bean	Fungus	Root rot	<i>Rhizoctonia solani</i>
Banana		Fusarium Wilt	<i>Fusarium oxysporum</i> f. sp. <i>cubense</i>
Citrus		Brown fruit rot	<i>Phytophthora parasitica</i>
Beet		Damping-off	<i>Pythium ultimum</i>
Pumpkin	Virus	Necrotic ringspot	Tobacco ringspot virus
Potato		Mosaic	Potato mosaic virüs
Barley		Yellow dwarf virus	Barley yellow dwarf virus
Spinach		Mosaic	Cucumber virus

In potassium deficiency, the decline in enzyme activity and the insufficient synthesis of organic compounds reduce the resistance of plants to diseases and pests, especially fungal diseases. The amount of soluble assimilates in plant cells affect pathogen development; obligate parasites, such as rust and mould diseases, require these assimilates to complete their life cycles. Therefore, plants with potassium deficiency are more susceptible to each pest group compared to adequately nourished plants (Marschner, 2012; Krauss, 2001). When a plant is infected by a fungus, its natural defense mechanisms are activated. Potassium increases the production of phenolic compounds and flavonoids that inhibit the fungus in fungal infections.

Calcium: Calcium is found in plant tissues in the form of free calcium ions, bound to non-diffusible ions, and as oxalate, carbonate, and phosphate salts. In seeds, calcium is most commonly found in the form of phytic acid salts. Calcium is found in high amounts in

cell walls and membranes in the form of pectate (Aktaş, 1995; White and Broadley, 2003). This is because there are many calcium binding sites in cell walls and the movement of calcium within the cytoplasm is limited. Calcium in the form of pectates plays a fundamental role in strengthening cell walls and plant tissues. Calcium pectates protect plant tissues and fruits against fungal and bacterial infections (Kacar et al., 2006).

Calcium is an essential element that serves as a component of cell walls and membranes, thus contributing to cell structure and maintaining physical barriers against invading pathogens (White and Broadley, 2003). Plants deficient in calcium have been observed to be more susceptible to disease infection, and exogenous calcium supplementation has been shown to attenuate the plant's pathogen resistance response. A decrease in plant calcium concentration increases susceptibility to fungi, which primarily invades xylem tissue and lyse the cell walls of conducting vessels, leading to plant wilting (Hirschi, 2004).

Calcium is another important nutrient that influences disease susceptibility in two ways. First, Ca is important for the stability and function of plant membranes, and when Ca is deficient, low-molecular-weight compounds (e.g., sugars and amino acids) leak from the cytoplasm into the apoplast, which promotes pathogen infection (Marschner, 2012). Second, Ca is an essential component of cell wall structure, as calcium polygalacturonates are required in the middle lamella for cell wall stability. When Ca concentrations decrease, susceptibility to fungi that preferentially invade the xylem and lyse the cell walls of conducting vessels increases, leading to wilting symptoms. Furthermore, plant tissues with low Ca levels are much more susceptible to parasitic diseases during storage than tissues with normal Ca levels. Therefore, treating fruits with Ca before storage is an effective treatment to prevent losses from both physiological disorders and fruit rot (Dordas, 2008). When sufficient

calcium is present in the soil, a significant reduction in damage caused by *Plasmodiophora brassicae*, the pathogen responsible for clubroot disease in cruciferous vegetables, grey mould disease in roses, and storage rot caused by *Alternaria* in pears has been observed (Myers and Campbell 1985; Volpin and Elad, 1991). Calcium applications have been reported to be effective against clubroot (*Plasmodiophora brassicae*) in broccoli and cabbage, *Phytophthora* root rot (*Phytophthora nicotianae*) in citrus, grey mould (*Botrytis cinerea*) in cucumber and aubergine, and powdery mildew (*Erysiphe orontii*) in tomato (Rahman and Punja, 2009).

Magnesium: Magnesium, a central atom in chlorophyll molecules and one of the most important elements of photosynthesis, decreases chlorophyll levels and inhibits photosynthesis (Papenbrock et al., 2000). Magnesium (Mg) is a vital cation that affects various physiological functions within plants, whether in excess or deficiency (Wang et al., 2020). Furthermore, because it is found in young phloem tissues at high Mg concentrations and extracellularly in Mg deficiency, it can colonize phloem tissues and affect the entry pathway of pathogens into the plant (Nome et al., 2009). Under Mg-deficient conditions, a nutrient-rich environment supporting various phytopathogens is created due to the accumulation of sucrose and starch in leaf tissue (Huber and Jones, 2013).

Magnesium sulphate fertilization reduces *Phytophthora infestans* and *Rhizoctonia solani* infections in potatoes, while magnesium chloride application has shown the same effect on rust in wheat. Root rot in asparagus has been found to be associated with poor drainage conditions, hydrogen sulphide formation in the soil, and a high K:Mg ratio. It has been reported that viral necrosis in vines increases with both excessive and deficient Mg (Bergmann, 1992). Kiss and Pozsar (1977) reported that Mg fertilisation reduced *Botrytis* and *Phytophthora* infections in tomatoes, prevented viral infections by 73%, and reduced *Cercospora beticola*, *Pleospora*

betae, and *Pseudomonas phaseolicola* infections in sugar beets by 50-60%. This increase in resistance stems from magnesium's positive effect on ATP and nucleic acid metabolism.

Sulphur: Sulfur is an important structural component of proteins, enzymes, and amino acids in plants. It participates in the synthesis of certain compounds, such as cysteine and methionine, which are the building blocks of proteins. Biotin is involved in the synthesis of hormones and some enzymes (Aktaş, 1995). The sulphur-containing amino acid (SAA) cysteine serves as a precursor to numerous biomolecules that play important roles in plant disease resistance. Cysteine inhibits spore germination and mycelial growth in a concentration-dependent manner in *Phaeomoniella chlamydospora* and *Phaeoacremonium minima*, two major causative agents of grapevine stem disease (Roblin et al., 2018).

Another important sulphur-containing amino acid that plays a central role in different defense reactions against biotic stresses in plants is methionine. Sarosh et al. (2005) reported a significant reduction in disease severity in a susceptible pearl millet cultivar (*Pennisetum glaucum*) infected with *Sclerospora graminicola* when treated with methionine. Methionine treatment induces the production of hydrogen peroxide (H_2O_2), an important element in plant defense signalling, leading to increased expression of various defense-related genes in grapevine (*Vitis vinifera*) (Boubakri et al., 2013).

Sulphur-containing defense compounds are effective in initiating signal transduction pathways associated with pathogen detection and various defense processes regulated by plant hormones and ROS (Kunstler et al., 2020). Therefore, sulphur can be considered a fundamental plant macronutrient in resistance to plant diseases. Sulphur-containing secondary metabolites play an important role in plant disease resistance and can be classified as phytoalexins and phytoanticipins according to their mechanisms of

action (Nwachukwu et al., 2012). In plants deficient in sulphur, there is a general reduction in the gene responsible for the synthesis of sulphur-containing secondary metabolites, and therefore the biosynthesis of the S-containing phytoalexin (Kamalexin) is also inhibited. Two reactive sulphur species, hydrogen sulphide and sodium sulphite, have been reported to play important roles in plant disease resistance (Gao et al., 2012; Chen et al., 2014).

Iron: Iron has important physiological functions in plants and activates many enzymes by catalyzing numerous biochemical reactions. For example, iron activates the catalase and peroxidase enzymes, which act as electron carriers in the respiratory chain, oxidation reactions, and energy metabolism. Iron deficiency negatively affects cell division and leaf growth. Iron also affects protein synthesis. Iron deficiency has been observed to reduce protein quantity while increasing soluble organic nitrogen compounds (Kacar and Katkat, 2006). Iron (Fe) is an essential micronutrient required by plants and pathogens, with both positive and negative effects on both the host and host disease resistance (Kieu et al., 2012; Aznar et al., 2015).

Iron plays a powerful role in *Pseudomonads* that have adapted to produce iron chelating agents called siderophores in iron-deficient soils. These agents suppress certain fungal pathogens by depriving them of iron (Calvent et al., 2001). In *Fusarium* wilt, the reduction in iron availability triggered by siderophore-producing fluorescent *pseudomonads* has been reported as the main mechanism for reducing disease incidence in tomato *Fusarium* wilt (De Weger et al., 1986; Alabouvette, 1999; Hussain et al., 2016). Foliar application of Fe can increase the resistance of apples and pears to *Sphaeropsis malorum* and of cabbage to *Olpidium brassicae* (Graham, 1983). Fe can control or reduce the severity of various diseases such as rust on wheat leaves, smut on wheat, and

Colletotrichum musae on bananas (Graham and Webb, 1991; Graham, 1983).

Zinc: Zinc plays a role in the activation of numerous enzymes and is present in the structures of various enzymes. It is an important element in the synthesis of tryptophan, a key component of certain proteins (Turan and Horuz 2012). Generally, plants deficient in Zn are more susceptible to pathogen attack (Streeter et al., 2001). Phenolic compounds and flavonoids, which inhibit fungi in the infection zone and other parts of the plant, increase. The production and transport of these compounds are largely controlled by the plant's nutrition, and a deficiency in essential nutrients such as K, Mn, Cu, Zn, and B reduces the amount of natural antifungal compounds in the infected area of the plant (Anonymous, 2015).

Zinc fertilization plays an important role in activating the plant's defense mechanism (Çakmak, 2000), and zinc compounds also inhibit or limit the growth of many phytopathogenic bacteria (Adaskaveg and Hine, 1985). Zinc also prevents damage to the cell membrane by superoxide radicals and the resulting flow of nutrients into the intercellular space, thus preventing the creation of a favorable environment for pathogen growth (Mengel and Kirkby, 2001).

An increase in bacterial infections has been observed in zinc deficiency. Mycorrhizal fungus development is slow. In this disease, the bacteria causing the infection to infect the roots. *Pseudomonas* is particularly common in areas where cotton is grown. Zinc fertilization limits the effectiveness of bacteria. It has been determined that the adverse effects caused by cereal root and crown rot pathogens in plants can be reduced by zinc applications. Zinc is also required for the resilience of biological membranes. This prevents pathogens from entering the plant. *Alternaria* damage, which appears on young leaves and fruit skins due to zinc deficiency in plants, has also been observed. Manganese/zinc application can

be used to control *Alternaria* blight (Marschner, 2012). It has been determined that zinc application in wheat prevents root rot caused by *Fusarium graminearum* (Grewal et al., 1996). Küçükyumuk et al. (2014) determined the resistance of zinc to *Pythium* rot at increasing doses. Zinc reduces disease development by inhibiting the production of fusaric acid, one of the virulence factors produced by pathogenic *Fusarium* species (Duffy et al., 2003).

Manganese: Manganese is responsible for the activation of numerous vital enzymes in plants, and the MnSOD enzyme, which contains manganese, prevents damage to cells during the breakdown of H_2O_2 , which is formed as a result of the reduction of molecular oxygen in plant cells (Turan and Horuz 2012).

Manganese has long been known to contribute to the suppression of fungal and bacterial diseases and is one of the active ingredients in some fungicides. Manganese plays a key role in the production of phenolic compounds and lignin, two of the most important substances plants use to combat diseases. When a plant is infected with a fungus, its natural defense mechanisms are triggered. Phenolic compounds are toxic to many disease pathogens, and lignin acts as a physical barrier to the penetration of disease organisms. Plants respond to fungal infections by generating oxygen radicals ($O^=$ and OH^-) and hydrogen peroxide (H_2O_2), which damage disease organisms and host plant tissue (Anonymous, 2015). Manganese is an essential trace element in preventing the growth of both root and leaf diseases in plants. Manganese fertilization can control many diseases, including powdery mildew, downy mildew, wheat head disease, leaf spot, and others (Dordas, 2008).

Manganese plays a role in the ability of wheat and barley to resist the 'take-all' disease (*Gaeumannomyces graminis*). This disease develops in neutral or alkaline soil pH and is highly sensitive to acidic soil. The availability of manganese in the root zone and the Mn content of the roots have a direct effect on the severity of the

disease in the entire plant (Anonymous, 2015). Manganese has been reported to reduce the severity of smut disease in wheat and barley (Reis et al., 1982; Graham et al., 1984; Brennan, 1992). Manganese fertilization can control a range of pathogenic diseases such as powdery mildew, downy mildew, fungal diseases affecting the whole plant, leaf spot and others (Brennan, 1992; Huber and Graham, 1999; Heckman et al., 2003; Simoglou and Dordas, 2006). Manganese also helps suppress these diseases by inhibiting the synthesis of enzymes such as aminopeptidase and pectin methyl esterase, which are particularly important for fungal disease pathogens (Tüfenkçi et al., 2012).

Copper: Copper plays an important role in various physiological processes in plants, including lignin formation in cell walls, the activities of various enzymes (tyrosinase, ascorbic acid oxidase, etc.), reduction and oxidation reactions, and chlorophyll-vitamin A synthesis (Turan and Horuz, 2012). Copper inhibits the synthesis of metabolites involved in the defense mechanism of plants and the accumulation of these metabolites in plant tissues (Lawrence et al., 2007). Plants with low copper content show an increase in disease incidence due to reduced lignification (Marschner, 2012). Copper fertilization in plants reduces the severity of fungal and bacterial diseases associated with cell wall stability and lignification (Broadley et al., 2012).

Copper is an essential nutrient for higher plants, fungi, and bacteria, and copper fertilization has reduced the severity of a wide variety of fungal and bacterial diseases. While copper is known to control diseases through foliar application, leaf diseases have often been controlled by applying copper to the soil. When plants are infected with a fungus, natural defense mechanisms are triggered, leading to increased production of phenolic compounds and flavonoids that inhibit the fungus both at the site of infection and elsewhere in the plant. Copper detoxifies oxygen radicals and

hydrogen peroxide, limiting damage to plant cells (Anonymous, 2015).

Copper compounds and their various combinations have been reported to reduce the severity of sheath blight (*Rhizoctonia solani*) in rice (Khaing et al., 2014) and bacterial canker (*Clavibacter michiganensis* subsp. *michiganensis*) in tomatoes (Bastas, 2014). Furthermore, it has been noted to be effective against mildew, leaf/glume blotch, leaf rust, and take-all in wheat; common scab in potatoes; wilt in tomatoes and cotton; and nematodes in sugar beet (Anonymous, 2015).

Boron: Boron has significant effects on lignin formation, cell wall formation, respiration, IAA and phenol metabolism, and the structural and functional properties of biological membranes in plants (Marschner, 2012). Boron's disease-preventative effect stems from its role in plant cell wall structure, which increases cell wall strength, stabilizes cell membrane functions, and positively influences phenolic compound and lignin synthesis through its role in metabolic reactions (Brown et al., 2002).

The increased need for boron due to the excessive use of nitrogen and lime in apple orchards exacerbates boron deficiency, leading to various physiological disorders such as corky kernels in apples, core rot in sugar beets, hollow stems in cauliflower, brown heart in radishes, and crown disease in tobacco (Turan and Horuz, 2012). Boron deficiency leads to an increase in pathogens. Symptoms of boron deficiency include cracked stems in celery, stalk rot or brown rot in cauliflower, heart rot and internal black spot in beets, top rot in tobacco, internal cork in apples, yellowing of terminal leaves in alfalfa, and browning in potatoes (Blevins & Lukaszewski, 1998). It has been determined that boron applications prevent root rot caused by *Fusarium solani* in beans, wilt caused by *Verticillium albo-atrum* in tomatoes, and powdery mildew caused by *Blumeria graminis* in wheat (Graham and Webb, 1991; Marschner,

2012). Ali et al. (2016) reported that the combined use of zinc and boron in onions reduced the severity of *Alternaria porri* and *Stemphylium vesicarium* diseases caused by *Alternaria* and increased onion yield.

Silicon: Silicon is a bioactive element that has beneficial effects on the mechanical and physiological properties of plants. In plants that receive sufficient silicon, water loss through the cuticle is reduced due to the accumulation of Si in the epidermis. The accumulation of Si in the epidermis increases the plant's resistance to fungal diseases. Silicon reduces abiotic and biotic stresses and increases the resistance of plants to pathogenic fungi. In cereals and rice, it strengthens the plant's stem, enabling it to stand upright and preventing lodging (Aktaş, 1995; Dordas, 2008).

Increased Si significantly reduces the number of lesions on young leaves, indicating increased disease resistance (Osuna-Canizalez et al., 1991). An increase in the activity of antioxidant enzymes (peroxidase, polyphenol oxidase, phenylalanine ammonia lyase, and lipoxygenase) was also observed after Si application (Shetty et al., 2011). These enzymes are considered the second line of defense against pathogen entry into the host (Pozza et al., 2015).

Increased silicon in plants has been shown to increase the difficulty for sucking insects such as aphids or leafhoppers. Reducing the feeding of these insects may also help prevent the spread of viral diseases that can be transmitted by insects (Anonymous, 2015). The damage caused by *Spodoptera fragiperda* in maize has been reduced by increasing the silicon content in plant tissue (Goussain et al., 2008). Silicon application has prevented damage from the sugarcane stalk borer *Eldana sacchari* (Keeping and Meyer 2002), and silicon has been shown to be effective in reducing powdery mildew infection in cucumbers (Liang et al., 2005). Silicon applications have prevented rice blast and brown spot

in rice, rust diseases in beans, and powdery mildew in barley, cucumber, and grapes (Anonymous, 2015).

Molybdenum: Molybdenum is an element that plays an important role in the synthesis of ascorbic acid, the structure of nitrogenase and nitrate reductase, and the content and synthesis of chlorophyll in plants (Turan and Horuz 2012). Sufficient levels of molybdenum and other micronutrients in plants strengthens the plant's defense mechanisms. Molybdenum application promotes lectin production from glycoproteins in sweet potatoes, increasing resistance to *Ceratocystis funbriota* and *Phytophthora infestans* in potatoes (Reuveni and Reuveni, 1998). It has been reported that Mo applied to tomato roots reduces *Verticillium* wilt symptoms and reduces a toxin produced by *Myrothecium roridum*, a melon pathogen. It has been suggested that the effect of Mo deficiency on plant diseases may be indirect, through its role in N metabolism (Anonymous, 2015).

Conclusion

Fertilization is carried out to ensure the growth of plants and the production of high-quality products. Each plant nutrient element makes an important contribution to plant growth. When there is an excess or deficiency of these nutrients, not only is plant growth negatively affected, but it is also observed that certain diseases and pests cause damage to the plants. In this context, the concept of Plant Nutrition & Plant Health Relationships comes to the fore. Balanced and adequate nutrition is an important issue that should be considered as the most important defense mechanism of living organisms against diseases and pests. Organisms with strong immune systems can be more resistant to external factors or pathogens. In this context, ensuring that plants are adequately nourished can minimize the negative effects of pathogens and pests

on plants. By ensuring adequacy in the preparation of fertilization programs and taking into account the relationship between disease factors and nutrients, it is possible to further strengthen plant health.

References

Adaskaveg, J. E., & Hine, R. B. (1985). Copper tolerance and zinc sensitivity of Mexican strains of *Xanthomonas campestris* pv. *vesicatoria*, causal agent of bacterial spot of pepper. *Plant Disease*, 69, 993-996.

Aktaş, M. (1995). Bitki Besleme ve Toprak Verimliliği. Ankara Üniversitesi Ziraat Fakültesi Yayınları, Ders Kitabı No:416, s:251-257.

Alabouvette, C. (1999). Fusarium wilt suppressive soils: An example of disease-suppressive soils. *Australas. Plant Pathology*. 28, 57–64.
<https://doi.org/10.1071/AP99008>

Ali, H., Nisha, H.A.C., Hossain, M.B., & Islam, M.R. (2016). Evaluation of combined effect of micronutrients ($ZnSO_4$ +Borax) and fungicides to control the purple blotch complex of onion (*Allium cepa*). *American Journal of Plant Sciences*, 7, 715-723.
<https://doi.org/10.4236/ajps.2016.75065>

Anonymous (2015). Spectrum Analytic. The Relationship between nutrients and other elements to plant diseases. Washington C.H., Ohio.

Aznar, A., Chen, N. W. G., Thomine, S. & Dellagi, A. (2015). Immunity to plant pathogens and iron homeostasis. *Plant Science*, 240, 90–97. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2015.08.022>

Bala, K., Sood, A.K., Pathania, V.S. & Thakur, S. (2018). Effect of plant nutrition in insect pest management: A review. *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*. 7(4): 2737-2742.

Bastas, K. K. (2014). Effects on tomato bacterial canker of resistance inducers and copper compound in greenhouse. *Selcuk Journal of Agriculture and Food Sciences*, 28, 1–10.

Bergmann, W. (1992). Nutritional Disorders of Plants. Development, Visual and Analytical Diagnosis. Gustav Fischer Verlag Jena, Stuttgart, New York.

Blachinski, D., Shtienberg, D., Dinoor, A., Kafkafi, U., Sujkowski, L.S., Zitter, T.A. & Fry, W.E. (1996) Influence of foliar application of nitrogen and potassium on *Alternaria* diseases in potato, tomato and cotton, *Phytoparasitica* 24, 281–292.

Blevins, D.G. & Lukaszewski, K.M. (1998). Boron in plant structure and function. *Ann. Rev. Plant Physiol.* 49, 481–500. <https://doi.org/10.1146/annurev.arplant.49.1.481>

Bolton, M.D. & Thomma, B.P.H.J. (2008). The complexity of nitrogen metabolism and nitrogen-regulated gene expression in plant pathogenic fungi. *Physiological and Molecular Plant Pathology*, 72: 104–110. <https://doi.org/10.1016/j.pmpp.2008.07.001>

Boubakri, H., Wahab, M. A., Chong, J., Gertz, C., Gandoura, S., Mliki, A., Bertsch, C. & Soustre-Gacougnolle, I. (2013). Methionine elicits H₂O₂ generation and defense gene expression in grapevine and reduces *Plasmopara viticola* infection. *Journal of Plant Physiology*, 170: 1561–1568. <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2013.06.008>

Brennan, R.F. (1992) The role of manganese and nitrogen nutrition in the susceptibility of wheat plants to take-all in western Australia, *Fertilizer Res.* 31, 35–41.

Broadley, M., Brown, P., Cakmak, I., Rengel, Z. & Zhao, F. (2012). Function of nutrient: micronutrients, in Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants, ed. P. Marschner (Sydney: Academic Press), 191–248. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-384905-2.00007-8>

Brown, P.H., Bellaloui, N., Wimmer, M.A., Basil, E.S., Ruiz, J., Hu, H., Pfeffer, H., Dannel, F. & Romheld, V. 2002. Boron in plant biology. *Plant Biology*. 4:205-223. <https://doi.org/10.1055/s-2002-25740>

Brunings, A.M., Datnoff, L. E. & Simonne, E. H. 2009. Phosphorous acid and phosphoric acid: when all P sources are not equal. University of Florida IFAS Extension, Publication HS1010.

Büschbell, T. & Hoffmann, G.M. (1992) The effects of different nitrogen regimes on the epidemiologic development of pathogens on winterwheat and their control, *Journal of Plant Diseases and Protection*, 99, 381–403.

Calvente, V., de Orellano, M.E., Sansone, G., Benuzzi, D. & de Tosetti, M.I.S. (2001). Effect of nitrogen source and pH on siderophore production by *Rhodotorula* strains and their application to biocontrol of phytopathogenic moulds. *Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology*, 26: 226–229. <https://doi.org/10.1038/sj.jim.7000117>

Çakmak, İ. (2000). Tansley Review No. 111 Possible roles of zinc in protecting plant cells from damage by reactive oxygen species, *New Phytologist*, 146: 185-205.

Chen, J., Liu, T. W., Hu, W. J., Simon, M., Wang, W. H., Chen, J., Liu, X. & Zheng H. (2014). Comparative proteomic analysis of differentially expressed proteins induced by hydrogen sulfide in *Spinacia oleracea* leaves. *PLoS One* 9:e105400. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0105400>

De Weger, L., Van Boxtel, R., Van der Burg, B., Gruters, R., Geels, F., Schippers, B. & Lugtenberg, B. (1986). Siderophores and outer membrane proteins of antagonistic, plant-growth-stimulating, root-colonizing *Pseudomonas* sp. *Journal of Bacteriology*. 165, 585–594. <https://doi.org/10.1128/jb.165.2.585-594.1986>

Dordas C. (2008). Role of nutrients in controlling plant diseases in sustainable agriculture. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 28, 33–46.

Duffy, B.K., Schouten, A., & Raaijmakers, J.M. (2003). Pathogen self-defense: Mechanisms to counteract microbial antagonism. *Annual Review Phytopathology*, 41, 501-538. <https://doi.org/10.1146/annurev.phyto.41.052002.095606>

Elibüyük, E.A., Karaman, M.R., İnal, A. & Özer, Z. (2004). Bitkilerin Beslenmesi ile Bitki Hastalık ve Zararlıları Arasındaki Etkileşimler. Türkiye 3. Ulusal Gübre Kongresi, 11-13 Ekim, Tokat.

Foyer, C. H., Noctor, G. & Hodges, M. (2011). Respiration and nitrogen assimilation: Targeting associated metabolism as a means to enhance nitrogen use efficiency. *Journal of Experimental Botany*, 62:1467–1482. <https://doi.org/10.1093/jxb/erq453>

Gao, R., Ng, F.K.L., Liu, P. & Wong, S.M. (2012). Hibiscus chlorotic ringspot virus coat protein upregulates sulfur metabolism genes for enhanced pathogen defense. *Molecular Plant-Microbe Interactions*, 25:1574–1583. <https://doi.org/10.1094/MPMI-08-12-0203-R>

Godfery, L.D., Keillor, K., Hutmacher, R.B. & Cisneros, J.J. (1999). Interaction of cotton aphid population dynamics and cotton fertilization regime in California. *Cotton Proceeding Belt wide Cotton Conference*, Orlando, Florida, USA, 2:1008-1011.

Goussain, M.M., Prado, E. & Moraes, J.C. (2005). Effect of silicon applied to wheat plants on the biology and probing behaviour of the greenbug *Schizaphis graminum* (Rond.) *Neotrop. Entomology*, 34:807-813.

Graham, D.R. (1983) Effects of nutrients stress on susceptibility of plants to disease with particular reference to the trace elements, *Advances in Botanical Research*, 10, 221–276.

Graham D.R. & Webb M.J. (1991) Micronutrients and disease resistance and tolerance in plants, in: Mortvedt J.J., Cox F.R., Shuman L.M., Welch R.M. (Eds.), *Micronutrients in Agriculture*, 2nd ed., Soil Science Society of America, Inc. Madison, Wisconsin, USA, pp. 329–370.

Grewal, J.S. & Singh, S.N. (1980). Effect of potassium nutrition on frost damage and yield of potato plants on alluvial soils of Punjab (India). *Plant and Soil*, 57: 105 – 110.

Grewal, J.S., Graham, R.D., Rengel, Z. 1996. Genotypic variation in zinc efficiency and resistance to crown rot disease (*Fusarium graminearum*) in wheat. *Plant and Soil*, 186:2019-226.

Heckman J.R., Clarke B.B., Murphy J.A. (2003) Optimizing manganese fertilization for the suppression of take-all patch disease on creeping bentgrass, *Crop Science*, 43:1395–1398.
<https://doi.org/10.2135/cropsci2003.1395>

Hirschi, K. D. (2004). The calcium conundrum both versatile nutrient and specific signal. *Plant Physiology*, 136:2438–2442.
<https://doi.org/10.1104/pp.104.046490>

Hoffland E., Jegger M.J. & van Beusichem M.L. (2000) Effect of nitrogen supply rate on disease resistance in tomato depends on the pathogen, *Plant and Soil* 218, 239–247.

Howard D.D., Chambers A.Y., Logan J. (1994) Nitrogen and fungicide effects on yield components and disease severity in wheat, *Journal of Production Agriculture*, 7:448–454.
<https://doi.org/10.2134/jpa1994.0448>

Huber, D.M. (1980) The role of mineral nutrition in defense. In: Horsfall JG, Cowling EB (eds) Plant disease: An advanced treatise; Vol 5: How plants defend themselves. New York: Academic Press, pp 381-406.

Huber, D.M. (1989) Introduction. In: Engelhard AW (ed) Soilborne plant pathogens: management of diseases with macro-and microelements. St Paul, Minn: APS Press, pp 1-8

Huber, D.M. & Graham, R.D. (1999) The role of nutrition in crop resistance and tolerance to disease, in: Rengel Z. (Ed.), Mineral nutrition of crops fundamental mechanisms and implications, Food Product Press, New York, pp. 205–226.

Huber, D.M. & Jones, J.B. (2013). The role of magnesium in plant disease. Plant and Soil, 368, 73–85. <https://doi.org/10.1007/s11104-012-1476-0>

Huber, D.M., Haneklaus, S. (2007). Managing Nutrition to Control Plant Disease. Landbauforschung Völkenrode. 4 (57):313-322.

Hussain, I., Alam, S., Khan, I., Shah, B. & Naeem, A. (2016). Study on the biological control of fusarium wilt of tomato. Journal of Entomology and Zoology Studies. 4, 525–528.

Jauset, A.M., Sarasúa, M.J., Avila, J. & Albajes, R. (1998). The impact of nitrogen fertilization on feeding site selection and oviposition by *Trialeurodes vaporariorum* Entomologia Experimentalis et Applicata. 86:175-182. <https://doi.org/10.1046/j.1570-7458.1998.00278.x>

Kacar, B., Katkat, V. & Öztürk, Ş. (2006). Kalsiyum. Bitki Fizyolojisi, Nobel Yayınları, s: 171-172.

Kacar, B. (2020). Sürdürülebilir Tarımda İnsan ve hayvanlarda Fosfor. Nobel Yayınları, 2588, pp.53-71.

Keeping, M.G. & Meyer, J.H. (2002). Calcium silicate enhances resistance of sugarcane to the African stalk borer *Eldana saccharina*. *Agricultural and Forest Entomology*, 4:265-274. <https://doi.org/10.1046/j.1461-9563.2002.00150.x>

Khaing, E.E., Ahmad, Z. A. M., Yun, W. M. & Ismail, M.R. (2014). Effects of silicon, copper and zinc applications on sheath blight disease severity on rice. *World Journal of Agricultural Research*, 2, 309–314. <https://doi.org/10.12691/wjar-2-6-11>

Kieu, N. P., Aznar, A., Segond, D., Rigault, M., Simond-Côte, E., Kunz, C., et al. (2012). Iron deficiency affects plant defense responses and confers resistance to *Dickeya dadantii* and *Botrytis cinerea*. *Molecular Plant Pathology*, 13:816–827. <https://doi.org/10.1111/j.1364-3703.2012.00790.x>

KISS, S.A. & Pozsar, B.I., (1977). Resistance Increased by Magnesium Nutrition. *Acta Agronomica Academiae Scientiarum Hungaricae*, 26:156-173.

Krauss, A., 2001. Potassium and biotic stres. Presented at the 1st Faubafertilizar-IPI Workshop on Potassium in Argentina's Agricultural Systems. <http://www.ipipotash.org/presentn/pabs.html>

Kunstler, A., Gullner, G., Ádám, A.L., Nagy, J.K. & Kiraly, L. (2020). The versatile roles of sulfur-containing biomolecules in plant defense - A road to disease resistance. *Plants* 9:1705. <https://doi.org/10.3390/plants9121705>

Küçükyumuk, Z., Özgönen Özkaya, H., Erdal, İ. & Eraslan, F. (2014). Effect of zinc and glomus intraradices on control of pythium deliense plant growth parameters and nutrient concentrations of cucumber. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj- Napoca*, 42(1), 138-142. <https://doi.org/10.15835/nbha4219346>

Lawrence, E., Datnoff, W.H., Don, M.H. (2007). Mineral Nutrition and Plant Disease, APS Press, St Paul, MN, 278.

Liang, Y.C., Sun, W.C., Si, J., Rönheld, V. (2005). Effects of foliar and root applied silicon on the enhancement of induced resistance to powdery mildew in *Cucumis sativus*. *Plant Pathology*, 54:678-685.
<https://doi.org/10.1111/j.1365-3059.2005.01246.x>

Lobato, M.C., Olivieri, F.P., Altamiranda, E.A.G., Wolski, E.A., Daleo, G.R., Caldiz, D.O. & Andreu, A.B. (2008). Phosphite compounds reduce disease severity in potato seed tubers and foliage *European Journal of Plant Pathology*, 122:349-358.
<https://doi.org/10.1007/s10658-008-9299-9>

Marschner, P. (2012). Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants, 3rd Edn. London: Academic Press, 178–189.

Mengel, K. & Kirkby, E.A. 2001. Principle of Plant Nutrition, 5th ed. Kluwer, Amsterdam, Netherlands, p.847.

Mur, L.A., Simpson, C., Kumari, A., Gupta, A. K. & Gupta, K. J. (2017). Moving nitrogen to the centre of plant defense against pathogens. *Annals of Botany*, 119, 703–709.
<https://doi.org/10.1093/aob/mcw179>

Myers, D.F. & Campbell, RN. (1985). Lime and the control of elubroot of crucifers: effects of pH, calcium, magnesium, and their interactions. *Phytopathology*. 75:670-673.

Nome, C., Magalhaes, P. C., Oliveira, E., Nome, S., and Laguna, I. G. (2009). Differences in intracellular localization of corn stunt spiroplasmas in magnesium treated maize. *Biocell*, 33, 133–136.
<https://doi.org/10.32604/biocell.2009.33.133>

Nwachukwu, I.D., Slusarenko, A.J. & Gruhlke, M.C.H. (2012). Sulfur and sulfur compounds in plant defence. *Natural Product*

<https://doi.org/10.1177/1934578X1200700323>

Osuna-Canizalez, F. J., Datta, S. K. & Bonman, J. M. (1991). Nitrogen form and silicon nutrition effects on resistance to blast disease of rice. *Plant and Soil*, 135:223–231. <https://doi.org/10.1007/BF00010910>

Papenbrock, J., Mock, H.P., Tanaka, R., Kruse, E., Grimm, B. (2000). Role of Magnesium chelatase activity in the early steps of the tetrapyrrole biosynthetic pathway. *Plant Physiology*. 122:1161-1169. <https://doi.org/10.1104/pp.122.4.1161>

Perrenoud, S., 1990. Potassium and Plant Health. IPI Research Topics No.3, 2nd rev.edition. Basel/Switzerland.

Pozza, E.A., Pozza, A.A.A. & Botelho, D.M.S. (2015). Silicon in plant disease control. *Revista Ceres*, 62:323–331. <https://doi.org/10.1590/0034-737X201562030013>

Prabhu, A.S., Fageria, N.K., Huber, D.M. & Rodrigues, F.A. (2007) Potassium and Plant Disease. In: Datnoff, L.E., Elmer, W.H. and Huber, D.M., Eds., *Mineral Nutrition and Plant Disease*, The American Phytopathological Society Press, Saint Paul, 57-78.

Prabhu, A.S., Fageria, N.D., Berni, R.F., Rodrigues, F.A. (2009a). Phosphorous and plant disease. In *Mineral Nutrition and Plant Disease*. (pp. 45-55)

Prabhu, A. S., Fageria, N. K., & Huber, D. M. (2009b). Potassium Nutrition and Plant Diseases. In *Mineral Nutrition and Plant Disease*. (pp. 57-78)

Prasad, D., Singh, R. & Singh, A. (2010). Management of sheath blight of rice with integrated nutrients. *Indian Phytopathology*, 63, 11–15.

Rahman, M., & Punja, Z. K. (2009). Calcium and plant disease. In *Mineral nutrition and plant disease*. (pp.79-94)

Randhawa; H.S. & Aulakh, S.S. (2013). Effect of nitrogen levels and varieties on the incidence of leaf folder and stem borer of basmati rice in Punjab. *Agricultural Science Digest*, 6(5):564-565. <https://doi.org/10.5958/0976-0547.2014.00039.1>

Reuveni, R. and Reuveni, M. (1998). Foliar-fertilizer therapy a concept in integrated pest management. *Crop Protection*, 17:111-118. [https://doi.org/10.1016/S0261-2194\(97\)00108-7](https://doi.org/10.1016/S0261-2194(97)00108-7)

Reuveni, R., Dor, G., Raviv, M., Reuveni, M. & Tuzun, S. 2000. Systemic resistance against *Sphaerotheca fuliginea* in cucumber plants exposed to phosphate in hydroponics system, and its control by foliar spray of mono-potassium phosphate. *Crop Protection*, 19:355-361. [https://doi.org/10.1016/S0261-2194\(00\)00029-6](https://doi.org/10.1016/S0261-2194(00)00029-6)

Roblin, G., Octave, S., Faucher, M., Fleurat-Lessard, P. & Berjeaud, J.M. (2018). Cysteine: A multifaceted amino acid involved in signaling, plant resistance and antifungal development. *Plant Physiology and Biochemistry*, 129:77–89. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2018.05.024>

Sarosh, B. R., Sivaramakrishnan, S. & Shetty, H. S. (2005). Elicitation of defense related enzymes and resistance by l-methionine in pearl millet against downy mildew disease caused by *Sclerospora graminicola*. *Plant Physiology and Biochemistry*, 43:808–815. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2005.06.009>

Shetty, R., Frette, X., Jensen, B., Shetty, N. P., Jensen, J. D., Jorgensen, H. J. L., Newman, M., Christensen, L.P (2011). Silicon-

induced changes in antifungal phenolic acids, flavonoids, and key phenylpropanoid pathway genes during the interaction between miniature roses and the biotrophic pathogen *Podosphaera pannosa*. *Plant Physiology*, 157:2194–2205. <https://doi.org/10.1104/pp.111.185215>

Simoglou K. & Dordas C. (2006) Effect of foliar applied boron, manganese and zinc on tan spot in winter durum wheat. *Crop Protection*, 25, 657–663. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2005.09.007>

Streeter, T.C., Rengel, Z., Neate, S.M. & Graham, R.D. (2001). Zinc fertilization increases tolerance to *Rhizoctonia solani* (AG 8) in *Medicago truncatula*. *Plant and Soil*, 228:233–242. <https://doi.org/10.1023/A:1004874027331>

Turan, M. & Horuz, A. (2012) Bitki Beslemenin Temel İlkeleri. Bitki Besleme. Gübretaş Rehber Kitaplar Dizisi, Ankara, p.123-347.

Tüfenkçi, Ş., Yanar, Y., Şahin, S. & Yanar, D. (2012). Kültür Bitkilerinde Beslenme ve Hastalık-Zararlı İlişkileri. Bitki Besleme. Gübretaş Rehber Kitaplar Dizisi, Ankara, p.791-836.

Volpin, H. & Elad, Y. (1991). Influence of calcium nutrition on susceptibility of rose flowers to *Botrytis* blight. *Phytopathology*. 81(11): 1390-1394. <https://doi.org/10.1094/Phyto-81-1390>

Wang, Z., Hassan, M. U., Nadeem, F., Wu, L., Zhang, F. & Li, X. (2020). Magnesium fertilization improves crop yield in most production systems: A meta-analysis. *Frontiers in Plant Science*, 10:1727. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.01727>

White, P.J, Broadley, M.R. (2003). Calcium in plants. *Annals of Botany*, 92:487-511. <https://doi.org/10.1093/aob/mcg164>

Woltz, S.S. & Engelhar, A.W. (1973) Fusarium wilt of chrysanthemum effect of nitrogen source and lime on disease development, *Phytopathology* 63, 155–157.

