

T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ



**MİKROBİYAL GÜBRELERİN KISITLI SULAMA ALTINDA YETİŞEN
HIYAR BİTKİSİNİN GELİŞİMİ, BAZI FİZYOLOJİK ve BİYOKİMYASAL
ÖZELLİKLERİ ve VERİMİ ÜZERİNE ETKİSİ**

Gökhan UÇAR

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

TOPRAK BİLİMİ ve BİTKİ BESLEME

ANABİLİM DALI

DOKTORA TEZİ

TEMMUZ 2025

ANTALYA

T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ



**MİKROBİYAL GÜBRELERİN KISITLI SULAMA ALTINDA YETİŞEN
HIYAR BİTKİSİNİN GELİŞİMİ, BAZI FİZYOLOJİK ve BİYOKİMYASAL
ÖZELLİKLERİ ve VERİMİ ÜZERİNE ETKİSİ**

Gökhan UÇAR

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

TOPRAK BİLİMİ ve BİTKİ BESLEME

ANABİLİM DALI

DOKTORA TEZİ

TEMMUZ 2025

ANTALYA

T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**MİKROBİYAL GÜBRELERİN KISITLI SULAMA ALTINDA YETİŞEN
HIYAR BİTKİSİNİN GELİŞİMİ, BAZI FİZYOLOJİK ve BİYOKİMYASAL
ÖZELLİKLERİ ve VERİMİ ÜZERİNE ETKİSİ**

Gökhan UÇAR
TOPRAK BİLİMİ ve BİTKİ BESLEME
ANABİLİM DALI
DOKTORA TEZİ

**Bu tez T.C. Tarımsal Araştırmalar ve Politikalar Genel Müdürlüğü tarafından
TAGEM/TSKAD/A/23/A9/P1/6205 nolu proje ile desteklenmiştir**

TEMMUZ 2025

T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MİKROBİYAL GÜBRELERİN KISITLI SULAMA ALTINDA YETİŞEN
HIYAR BİTKİSİNİN GELİŞİMİ, BAZI FİZYOLOJİK ve BİYOKİMYASAL
ÖZELLİKLERİ ve VERİMİ ÜZERİNE ETKİSİ

Gökhan UÇAR
TOPRAK BİLİMİ ve BİTKİ BESLEME
ANABİLİM DALI
DOKTORA TEZİ

Bu tez 11/07./2025 tarihinde jüri tarafından Oybirliği ile kabul edilmiştir.

Doç. Dr. İlker UZ (Danışman)
Prof. Dr. İbrahim ORTAŞ
Prof. Dr. Erdem YILMAZ
Doç. Dr. İsmail Emrah TAVALI
Dr. Öğr. Üyesi Hüseyin OK

ÖZET

MİKROBİYAL GÜBRELERİN KISITLI SULAMA ALTINDA YETİŞEN HIYAR BİTKİSİNİN GELİŞİMİ, BAZI FİZYOLOJİK ve BİYOKİMYASAL ÖZELLİKLERİ ve VERİMİ ÜZERİNE ETKİSİ

Gökhan UÇAR

Doktora Tezi, Toprak Bilimi ve Bitki Besleme Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. İlker UZ

Temmuz 2025; 174 sayfa

Hıyar (*Cucumis sativus* L.) dünya genelinde yaygın olarak yetiştirilen önemli sebze türlerinden biridir. Hıyarın verim düzeyi, tüm gelişim dönemleri boyunca sağlanan sulama suyunun miktarından büyük ölçüde etkilenmektedir. Kuraklık stresi, bitkilerde çeşitli fizyolojik ve biyokimyasal değişimlere yol açmakta olup, özellikle yaprak kloroplastlarında reaktif oksijen türleri (ROS) dengesinin bozulmasına neden olmaktadır. Bu türler, hücresel düzeyde proteinler, lipitler ve DNA üzerinde oksidatif hasar oluşturarak hücre işlevlerinin bozulmasına yol açmaktadır. Ancak, bitki büyümesinin su kısıtına karşı verdiği yanıt, arbusküler mikorizal mantarlar (AMF) ve bitki büyümesini teşvik eden rizobakteriler (PGPR) gibi toprak kökenli yararlı mikroorganizmalar aracılığıyla düzenlenebilmektedir. Bununla birlikte, bu mikroorganizmaların bitkilerin sınırlı sulama koşullarına karşı gösterdiği direnç üzerindeki etkileri ve mekanizmaları henüz tam olarak anlaşılamamıştır.

Bu çalışmada, 2023 sonbahar ve 2024 ilkbahar dönemlerinde, üç farklı sulama düzeyi (%100, %75 ve %50 ESTK) ve beş farklı gübreleme stratejisinin (kontrol, kimyasal gübre, PGPR, AMF ve PGPR+AMF) hıyar bitkisinin morfolojik, fizyolojik, biyokimyasal ve meyve kalite özellikleri ile toprak biyolojik aktiviteleri üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Morfolojik özellikler kapsamında, mikrobiyal gübre uygulamaları bitki boyu, gövde çapı, yaprak sayısı, yaprak alanı ve yaş/kuru ağırlıklarda anlamlı artışlar sağlamıştır. Su kısıtıyla birlikte büyüme parametrelerinde azalma gözlenmiş, ancak AMF ve PGPR uygulamaları bu azalmayı sınırlandırmıştır. Fizyolojik parametrelerden yaprak oransal su içeriği (YOSİ), klorofil a, b, toplam klorofil içeriği değerleri su kısıtı altında düşerken elektrolit geçirgenlik (EG) artmıştır; mikrobiyal uygulamalar bu olumsuz etkileri hafifletmiştir. AMF pigment düzeylerini ve su içeriğini korurken, PGPR membran stabilitesini desteklemiş; kombine uygulama fizyolojik tepkileri güçlendirmiştir. Biyokimyasal parametrelerde, su stresi malondialdehit (MDA), süperoksit dismutaz (SOD), peroksidaz (POD), prolin ve toplam fenol içeriklerini artırmıştır. Mikrobiyal gübre uygulamaları bu yanıtları güçlendirmiş, AMF ve PGPR MDA seviyelerini düşürüp antioksidan enzim aktivitelerini ve prolin birikimini artırmıştır. Meyve verimi ve kalite parametreleri, mikrobiyal uygulamalarla anlamlı düzeyde artmış; meyve sayısı, verim, renk, sertlik, tat ve dış görünüş gibi özellikler iyileşmiştir. Meyvede N, P, K, Ca, Mg, Fe, Mn, Zn ve Cu içerikleri artmış; özellikle P ve Zn düzeyleri AMF uygulamalarında yüksek bulunmuştur. Kök kolonizasyonu, AMF spor sayısı ve bakteri sayısı, mikrobiyal uygulamalarda artmıştır. Kombinasyon uygulamaları

en yüksek düzeyleri sağlamış; tekli uygulamalar da kontrol gruplarına göre daha yüksek değerler göstermiştir. Toprak enzim aktiviteleri (glolamilin ilişkili toprak proteini (GRSP), dehidrogenaz, alkalın fosfotaz (ALP) ve β -glukosidaz), tüm mikrobiyal uygulamalarda anlamlı şekilde artmıştır. GRSP artışı toprak yapısını desteklemiş, diğer enzimler mikrobiyal aktivite ve besin dönüşüm kapasitesinin arttığını göstermiştir.

Genel olarak, mikrobiyal gübre uygulamaları (özellikle kombine kullanımlar), su kısıtı koşullarında hıyar bitkisinin büyüme, fizyolojik ve biyokimyasal tepkilerinde olumlu etkiler sağlamış; meyve kalitesini ve toprak biyolojik aktivitelerini artırmıştır. Tekli uygulamalar da birçok parametrede kimyasal gübre ile benzer veya üstün sonuçlar vermiştir. Bu çalışma, mikrobiyal gübre uygulamalarının hıyar bitkisinde morfolojik, fizyolojik, biyokimyasal ve mikrobiyolojik parametreler üzerinde sağladığı olumlu etkileri kapsamlı bir şekilde ortaya koymuştur. Ancak, farklı mikrobiyal suşların karşılaştırmalı etkilerinin değerlendirilmesi, mikrobiyal topluluk dinamiklerinin analiz edilmesi ve toprak-mikroorganizma-bitki etkileşimlerinin moleküler düzeyde araştırılması, mikrobiyal gübrelemenin etki mekanizmalarının daha derinlemesine anlaşılmasına önemli katkılar sunacaktır.

ANAHTAR KELİMELEER: AMF, Hıyar, Mikrobiyal gübre, PGPR, Su kısıtı

JÜRİ: Doç Dr. İlker UZ

Prof. Dr. İbrahim ORTAŞ

Prof. Dr. Erdem YILMAZ

Doç. Dr. İsmail Emrah TAVALI

Dr. Öğr. Üyesi Hüseyin OK

ABSTRACT

THE EFFECT OF MICROBIAL FERTILIZERS ON THE GROWTH, SOME PHYSIOLOGICAL AND BIOCHEMICAL CHARACTERISTICS, AND YIELD OF CUCUMBER PLANTS GROWN UNDER WATER DEFICIT

Gökhan UÇAR

PhD Thesis in Department of Soil Science and Plant Nutrition

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. İlker UZ

July 2025; 174 pages

Cucumber (*Cucumis sativus* L.) is among the most extensively cultivated vegetable crops worldwide. Its yield potential is highly sensitive to the amount of irrigation water supplied throughout the plant's developmental stages. Drought stress induces a range of physiological and biochemical alterations in plants, notably disrupting the homeostasis of reactive oxygen species (ROS) within chloroplasts of the leaves. These ROS cause oxidative damage to cellular components such as proteins, lipids, and DNA, thereby impairing normal cellular functions. Nonetheless, the plant's response to water stress can be modulated by beneficial soil microorganisms, particularly arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) and plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR). Despite growing evidence, the role of these microorganisms in enhancing plant tolerance to deficit irrigation conditions remains incompletely understood.

In the present study, the effects of three irrigation regimes (100%, 75%, and 50% of available soil water capacity, ESTK) and five fertilization strategies (control, chemical fertilizer, PGPR, AMF, and a combined PGPR+AMF treatment) were evaluated on the morphological, physiological, biochemical, fruit quality attributes, and soil biological activities of cucumber plants under controlled conditions. Regarding morphological traits, microbial fertilizer applications significantly improved plant height, stem diameter, leaf number, leaf area, and both fresh and dry biomass. While water stress led to a general decline in growth parameters, AMF and PGPR applications effectively mitigated these adverse effects. For physiological responses, leaf relative water content (YOSI), chlorophyll a, chlorophyll b, and total chlorophyll content, declined under increasing water deficit. However, microbial applications alleviated these reductions. AMF treatments were particularly effective in maintaining chlorophyll content and leaf water status, whereas PGPR improved membrane stability; the combined application enhanced these responses more markedly. In terms of biochemical indicators, drought stress resulted in elevated levels of malondialdehyde (MDA), superoxide dismutase (SOD), peroxidase (POD), proline, and total phenolics, reflecting heightened oxidative and osmotic stress responses. Microbial treatments reinforced these biochemical defenses, as AMF and PGPR notably reduced MDA accumulation while increasing antioxidant enzyme activities and proline content. Microbial fertilizer applications also significantly enhanced fruit yield and quality traits, including fruit number, total yield, external appearance, taste, firmness, and color. Moreover, the concentrations of essential macro- and micronutrients (N, P, K, Ca, Mg, Fe, Mn, Zn, and Cu) in fruits increased, with AMF-based treatments particularly improving phosphorus and zinc content. Soil microbial

activity indicators—such as root colonization rates, AMF spore counts, and bacterial population densities—were substantially elevated under microbial inoculation treatments. Combination treatments yielded the highest values, though single microbial applications also outperformed both the chemical fertilizer and control treatments. Additionally, microbial applications led to significant increases in soil enzyme activities, including glomalin-related soil protein (GRSP), dehydrogenase, alkaline phosphatase (ALP), and β -glucosidase. GRSP accumulation contributed to improved soil structure, while the other enzymes indicated enhanced microbial activity and nutrient transformation potential.

In conclusion, microbial fertilizer applications, especially the combined use of AMF and PGPR, conferred multiple agronomic and ecological benefits by enhancing cucumber plant growth, physiological and biochemical resilience under water-limited conditions, fruit quality, and soil biological function. While combined treatments offered the most pronounced effects, single microbial inoculants also demonstrated excellent performance across several parameters. Nevertheless, further investigations focusing on the comparative efficacy of diverse microbial strains, dynamics of the rhizosphere microbiome, and molecular level soil–microbe–plant interactions are warranted to advance the understanding of microbial fertilization.

KEYWORDS: AMF, Cucumber, Microbial fertilizer, PGPR, Water deficit

COMMITTEE: Assoc. Prof. Dr. İlker UZ

Prof. Dr. İbrahim ORTAŞ

Prof. Dr. Erdem YILMAZ

Assoc. Prof. Dr. İsmail Emrah TAVALI

Asst. Prof. Dr. Hüseyin OK

ÖNSÖZ

Bu çalışmanın planlandığı dönemde, tüm dünyayı etkisi altına alan COVID-19 pandemisi, tarımsal üretimin ve gıda güvenliğinin ne denli hayati olduğunu bizlere bir kez daha hatırlatmıştır. Tarımsal üretimin sürdürülebilirliği açısından su kaynaklarının korunması ve etkin kullanımı her zamankinden daha önemli hâle gelmiştir. Küresel ısınma ve iklim değişikliğine bağlı olarak gelecekte yaşanması muhtemel kuraklık ve su kısıtı sorunları, tarımsal üretimi doğrudan tehdit etmektedir. Bu bağlamda, su kıtlığı koşullarında bitki gelişimini destekleyebilecek tarımsal yönetim stratejilerinin geliştirilmesi gerekliliği ortaya çıkmıştır. Son yıllarda mikrobiyal gübre olarak bilinen yararlı toprak mikroorganizmalarına, özellikle AMF ve PGPR'lara olan ilgi artmıştır. Bu çalışmada, tüm gelişim evrelerinde suya yüksek düzeyde ihtiyaç duyan hıyar bitkisinde bu mikrobiyal uygulamaların, su kısıtı koşullarındaki büyüme ve verim üzerindeki etkileri ile bu etkilerin altında yatan fizyolojik ve biyokimyasal mekanizmaların ortaya konulması hedeflenmiştir.

Çalışmamın her aşamasındaki kıymetli katkıları ve yol göstericiliği için değerli tez danışman hocam Doç. Dr. İlker UZ'a teşekkür ve şükranlarımı sunarım. Tez izleme komitemde yer alan saygıdeğer Prof. Dr. İbrahim ORTAŞ ve Prof. Dr. Erdem YILMAZ hocalarıma katkıları, eleştirileri ve önerileri için teşekkürü bir borç bilirim. Bu zorlu süreçte katkılarını ve desteklerini esirgemeyen birçok kişi ve kuruma teşekkür borçluyum. AMF materyalini sağlayan Toprak, Gübre ve Su Kaynakları Merkez Araştırma Enstitüsünden Dr. Çağlar SAGUN'a; bakteri materyalini sağlayan Dr. Dilek KAYA'ya; projenin gerçekleşmesinde önemli katkıları bulunan TAGEM Toprak ve Su Kaynakları Dairesi Koordinatörü Dr. Kadriye KALINBACAK'a ve TAGEM'e; arazi ve laboratuvar çalışmalarında büyük desteklerini gördüğüm BATEM Toprak ve Su Kaynakları Bölümünden M. Ensar ERTÜRK, Tuğba Hasibe UYSAL, Murat ŞİMŞEK, Dr.Ömer ÖZBEK, İbrahim Aydın KILINÇ, Mustafa KİREZ ve Ayşenur KARABOYUN ve bölüm başkanı Doç. Dr. Filiz ÖKTÜREN ASRİ'ye; fide üretiminde katkı sunan BATEM Sebzecilik Bölümüne; analiz çalışmalarında olanak sağlayan BATEM Bitki Sağlığı ve Gıda Teknolojileri Bölümüne; bakterilerin çoğaltılmasında destek veren Dr. Serap Melike SÜLÜ'ye ve BATEM idaresine en içten teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca, çalışmam boyunca manevi desteğini her zaman hissettiğim eşimin değerli ailesine; kıymetli kardeşim ve ailesine, seradaki tüm çalışmalarda hep yanımda olan, emekleriyle bu çalışmanın görünmeyen mimarları olan, manevi destekleriyle gücümü tazeleyen, haklarını ödeyemeyeceğim sevgili annem Sema UÇAR ve kıymetli babam Hasan UÇAR'a; bu sürecin en yoğun döneminde dünyaya gelen, aynı zamanda arazi çalışmalarında serada bana eşlik eden canım kızım Aysima UÇAR'a; çalışmanın yazım sürecinde doğarak bana umut ve motivasyon kaynağı olan küçük kızım Bilge UÇAR'a ve en önemlisi her koşulda desteğini ve sevgisini eksik etmeyen, bu süreçte beni daima motive eden kıymetli eşim Hanife UÇAR'a sonsuz teşekkür ederim.

Bu çalışmanın, konuya ilgi duyan araştırmacılara katkı sunması ve ileride yapılacak benzer çalışmalara ışık tutması en büyük temennimdir.

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	iii
ÖNSÖZ	v
AKADEMİK BEYAN	viii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xi
ÇİZELGELER DİZİNİ	xiv
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK TARAMASI	7
2.1. Kuraklık ve Hıyar Bitkisi Üzerindeki Etkileri	7
2.2. Mikoriza	10
2.3. Arbusküler Mikoriza Mantarı	10
2.4. AMF ve Kuraklık	13
2.5. AMF ve Hıyar Bitkisi	21
2.6. PGPR.....	23
2.7. PGPR ve Kuraklık.....	25
2.8. PGPR ve Hıyar bitkisi.....	30
2.9. AMF ve PGPR	32
2.10. AMF ve PGPR'nin Toprak Özelliklerine Etkisi	34
3. MATERYAL VE METOT	37
3.1. Materyal	37
3.2. Yöntem.....	40
3.2.1. Morfolojik gözlemler	45
3.2.2. Fizyolojik	45
3.2.3. Biyokimyasal.....	46
3.2.4. Meyve özellikleri.....	48
3.2.5. AMF kök kolonizasyonu	49
3.2.6. AMF spor ve bakteri sayısı	50
3.2.7. Toprak enzimleri	50
3.2.8. İstatistiksel analiz.....	53
4. BULGULAR ve TARTIŞMA	55

4.1. Bitki su tüketimi	55
4.2. Morfolojik özellikler.....	55
4.3. Fizyolojik özellikler.....	67
4.4. Yaprak besin elementleri	74
4.5. Biyokimyasal özellikler	78
4.6. Verim ve meyve özellikleri	87
4.7. Kök kolonizasyonu	101
4.8. AMF Spor ve Bakteri Sayısı.....	103
4.9. Toprak Enzimleri	107
4.10. Korelasyon.....	113
5. SONUÇLAR	125
6. KAYNAKLAR	127
7. EKLER.....	165
ÖZGEÇMİŞ	

AKADEMİK BEYAN

Doktora Tezi olarak sunduğum “**Mikrobiyal Gübrelerin Kısıtlı Sulama Altında Yetişen Hıyar Bitkisinin Gelişimi, Bazı Fizyolojik ve Biyokimyasal Özellikleri ve Verimi Üzerine Etkisi**” adlı bu çalışmanın, akademik kurallar ve etik değerlere uygun olarak yazıldığını belirtir, bu tez çalışmasında bana ait olmayan tüm bilgilerin kaynağını gösterdiğimi beyan ederim.

11/07/2025

Gökhan UÇAR

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

%	: Yüzde
$\mu\text{g g}^{-1}$	: Mikrogram/gram
kob g^{-1}	: Koloni oluşturan birim/gram
mg kg^{-1}	: Miligram/kilogram
kg	: Kilogram
g cm^{-3}	: Gram/santimetreküp
mm	: Milimetre
cm	: Santimetre
cm^2	: Santimetrekare
ppm	: Milyonda kısım (part per million)
kg m^{-3}	: kilogram/metreküp
kg m^{-2}	: kilogram/metrekare
t ha^{-1}	: ton/hektar
$\text{m}^3 \text{ ha}^{-1}$	: metreküp/hektar
μM	: mikromol/litre
Mg ha^{-1}	: megagram/hektar
g L^{-1}	: gram/litre
mg L^{-1}	: miligram/litre
U g^{-1}	: enzim birimi/gram
$\mu\text{mol g}^{-1}$	: mikromol/gram
GAE g^{-1}	: gallik asit eşdeğeri/gram
kg cm^{-2}	: kilogram/santimetrekare
mg g^{-1}	: miligram/gram

Kısaltmalar

ABA : Absisik asit

ACC : 1-aminosiklopropan-1-karboksilik asit

ALP : Alkalın fosfataz

AMF : Arbusküler mikorizal mantar

APX : Askorbat peroksidaz

CAT : Katalaz

ESTK : Elverişli su tutma kapasitesi

Etc : Bitki su tüketimi

GR : Glutasyon redüktaz

GRSP : Glomalin ilişkili toprak proteini

IAA : Indol-3-asetik asit

MDA : Malondialdehit

OM : Organik madde

PEG : Polietilen glikol

PGPR : Bitki büyümesini teşvik eden rizobakteriler

pNP : p-nitrofenol

POD : Peroksidaz

ROS : Reaktif oksijen türleri

SA : Salisilik asit

SÇKM: Suda çözünebilir kuru madde

SKE : Su kullanım etkinliği

SOD : Süperoksit dismutaz

TK : Tarla kapasitesi

TPF : Trifenil formazan

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 3.1. Deneme serasının uydu görüntüsü üzerinden lokasyonu	37
Şekil 3.2. Deneme deseni.....	42
Şekil 4.1. Farklı sulama düzeylerinde gübre uygulamalarının bitki boyu üzerine etkisi. Aynı sulama ve dönem içinde farklı harflerle gösterilen ortalamalar (n=3), Tukey's HSD testine göre istatistiksel olarak farklılık göstermektedir ($p<0.05$).....	57
Şekil 4.2. Farklı sulama düzeylerinde gübre uygulamalarının gövde çapı üzerine etkisi. Aynı sulama ve dönem içinde farklı harflerle gösterilen ortalamalar (n=3), Tukey's HSD testine göre istatistiksel olarak farklılık göstermektedir ($p <0.05$).	59
Şekil 4.3. Farklı sulama düzeylerinde gübre uygulamalarının bitki yaş ağırlığı üzerine etkisi. Aynı sulama ve dönem içinde farklı harflerle gösterilen ortalamalar (n=3), Tukey's HSD testine göre istatistiksel olarak farklılık göstermektedir ($p<0.05$).	61
Şekil 4.4. Farklı sulama düzeylerinde gübre uygulamalarının bitki kuru ağırlığı üzerine etkisi. Aynı sulama ve dönem içinde farklı harflerle gösterilen ortalamalar (n=3), Tukey's HSD testine göre istatistiksel olarak farklılık göstermektedir ($p<0.05$).	61
Şekil 4.5. Farklı sulama düzeylerinde gübre uygulamalarının kök yaş ağırlığı üzerine etkisi. Aynı sulama ve dönem içinde farklı harflerle gösterilen ortalamalar (n=3), Tukey's HSD testine göre istatistiksel olarak farklılık göstermektedir ($p<0.05$).	63
Şekil 4.6. Farklı sulama düzeylerinde gübre uygulamalarının kök kuru ağırlığı üzerine etkisi. Aynı sulama ve dönem içinde farklı harflerle gösterilen ortalamalar (n=3), Tukey's HSD testine göre istatistiksel olarak farklılık göstermektedir ($p<0.05$).	64
Şekil 4.7. Farklı sulama düzeylerinde gübre uygulamalarının yaprak sayısı üzerine etkisi. Aynı sulama ve dönem içinde farklı harflerle gösterilen ortalamalar (n=3), Tukey's HSD testine göre istatistiksel olarak farklılık göstermektedir ($p<0.05$).	65
Şekil 4.8. Farklı sulama düzeylerinde gübre uygulamalarının yaprak alanı üzerine etkisi. Aynı sulama ve dönem içinde farklı harflerle gösterilen ortalamalar (n=3), Tukey's HSD testine göre istatistiksel olarak farklılık göstermektedir ($p<0.05$).	67
Şekil 4.9. Farklı sulama düzeylerinde gübre uygulamalarının YOSİ üzerine etkisi. Aynı sulama ve dönem içinde farklı harflerle gösterilen ortalamalar (n=3), Tukey's HSD testine göre istatistiksel olarak farklılık göstermektedir ($p<0.05$).	69
Şekil 4.10. Farklı sulama düzeylerinde gübre uygulamalarının klorofil-a üzerine etkisi. Aynı sulama ve dönem içinde farklı harflerle gösterilen ortalamalar (n=3), Tukey's HSD testine göre istatistiksel olarak farklılık göstermektedir ($p<0.05$).	71
Şekil 4.11. Farklı sulama düzeylerinde gübre uygulamalarının klorofil-b üzerine etkisi. Aynı sulama ve dönem içinde farklı harflerle gösterilen ortalamalar (n=3), Tukey's HSD testine göre istatistiksel olarak farklılık göstermektedir ($p<0.05$).	72
Şekil 4.12. Farklı sulama düzeylerinde gübre uygulamalarının toplam klorofil üzerine etkisi. Aynı sulama ve dönem içinde farklı harflerle gösterilen ortalamalar (n=3), Tukey's HSD testine göre istatistiksel olarak farklılık göstermektedir ($p<0.05$).	72
Şekil 4.13. Farklı sulama düzeylerinde gübre uygulamalarının elektrolit geçirgenlik üzerine etkisi. Aynı sulama ve dönem içinde farklı harflerle gösterilen ortalamalar (n=3), Tukey's HSD testine göre istatistiksel olarak farklılık göstermektedir ($p<0.05$).	74
Şekil 4.14. Farklı sulama düzeylerinde gübre uygulamalarının MDA üzerine etkisi. Aynı sulama ve dönem içinde farklı harflerle gösterilen ortalamalar (n=3), Tukey's HSD testine göre istatistiksel olarak farklılık göstermektedir ($p<0.05$).	80

Şekil 4.15. Farklı sulama düzeylerinde gübre uygulamalarının SOD üzerine etkisi. Aynı sulama ve dönem içinde farklı harflerle gösterilen ortalamalar (n=3), Tukey's HSD testine göre istatistiksel olarak farklılık göstermektedir ($p<0.05$).	82
Şekil 4.16. Farklı sulama düzeylerinde gübre uygulamalarının POD üzerine etkisi. Aynı sulama ve dönem içinde farklı harflerle gösterilen ortalamalar (n=3), Tukey's HSD testine göre istatistiksel olarak farklılık göstermektedir ($p<0.05$).	83
Şekil 4.17. Farklı sulama düzeylerinde gübre uygulamalarının prolin üzerine etkisi. Aynı sulama ve dönem içinde farklı harflerle gösterilen ortalamalar (n=3), Tukey's HSD testine göre istatistiksel olarak farklılık göstermektedir ($p<0.05$).	85
Şekil 4.18. Farklı sulama düzeylerinde gübre uygulamalarının toplam fenol üzerine etkisi. Aynı sulama ve dönem içinde farklı harflerle gösterilen ortalamalar (n=3), Tukey's HSD testine göre istatistiksel olarak farklılık göstermektedir ($p<0.05$).	86
Şekil 4.19. Farklı sulama düzeylerinde gübre uygulamalarının meyve sayısı üzerine etkisi. Aynı sulama ve dönem içinde farklı harflerle gösterilen ortalamalar (n=3), Tukey's HSD testine göre istatistiksel olarak farklılık göstermektedir ($p<0.05$).	89
Şekil 4.20. Farklı sulama düzeylerinde gübre uygulamalarının verim üzerine etkisi. Aynı sulama ve dönem içinde farklı harflerle gösterilen ortalamalar (n=3), Tukey's HSD testine göre istatistiksel olarak farklılık göstermektedir ($p<0.05$).	89
Şekil 4.21. Farklı sulama düzeylerinde gübre uygulamalarının meyve sertliği üzerine etkisi. Aynı sulama ve dönem içinde farklı harflerle gösterilen ortalamalar (n=3), Tukey's HSD testine göre istatistiksel olarak farklılık göstermektedir ($p<0.05$).	95
Şekil 4.22. Farklı sulama düzeylerinde gübre uygulamalarının SÇKM üzerine etkisi. Aynı sulama ve dönem içinde farklı harflerle gösterilen ortalamalar (n=3), Tukey's HSD testine göre istatistiksel olarak farklılık göstermektedir ($p<0.05$).	99
Şekil 4.23. Farklı sulama düzeylerinde gübre uygulamalarının kök kolonizasyonu üzerine etkisi. Aynı sulama ve dönem içinde farklı harflerle gösterilen ortalamalar (n=3), Tukey's HSD testine göre istatistiksel olarak farklılık göstermektedir ($p<0.05$).	103
Şekil 4.24. Farklı sulama düzeylerinde gübre uygulamalarının AMF spor sayısı üzerine etkisi. Aynı sulama ve dönem içinde farklı harflerle gösterilen ortalamalar (n=3), Tukey's HSD testine göre istatistiksel olarak farklılık göstermektedir ($p<0.05$).	105
Şekil 4. 25. Farklı sulama düzeylerinde gübre uygulamalarının GRSP üzerine etkisi. Aynı sulama ve dönem içinde farklı harflerle gösterilen ortalamalar (n=3), Tukey's HSD testine göre istatistiksel olarak farklılık göstermektedir ($p <0.05$).	108
Şekil 4.26. Farklı sulama düzeylerinde gübre uygulamalarının ALP üzerine etkisi. Aynı sulama ve dönem içinde farklı harflerle gösterilen ortalamalar (n=3), Tukey's HSD testine göre istatistiksel olarak farklılık göstermektedir ($p<0.05$).	110
Şekil 4.27. Farklı sulama düzeylerinde gübre uygulamalarının dehidrogenaz üzerine etkisi. Aynı sulama ve dönem içinde farklı harflerle gösterilen ortalamalar (n=3), Tukey's HSD testine göre istatistiksel olarak farklılık göstermektedir ($p<0.05$).	111
Şekil 4. 28. Farklı sulama düzeylerinde gübre uygulamalarının beta-glukosidaz üzerine etkisi. Aynı sulama ve dönem içinde farklı harflerle gösterilen ortalamalar (n=3), Tukey's HSD testine göre istatistiksel olarak farklılık göstermektedir ($p<0.05$).	113
Şekil 4.29. Sonbahar dönemi yaprak besin elementleri ve meyve özellikleri arasındaki pearson korelasyonları	114

Şekil 4.30. İlkbahar dönemi yaprak besin elementleri ve meyve özellikleri arasındaki pearson korelasyonları	115
Şekil 4.31. Sonbahar dönemi toprak biyolojik özellikleri ve yaprak besin elementleri arasındaki pearson korelasyonları	116
Şekil 4.32. İlkbahar dönemi toprak biyolojik özellikleri ve yaprak besin elementleri arasındaki pearson korelasyonları	117
Şekil 4.33. Sonbahar dönemi bitki gelişimi ve toprak biyolojik özellikleri arasındaki pearson korelasyonları	118
Şekil 4.34. İlkbahar dönemi bitki gelişimi ve toprak biyolojik özellikleri arasındaki pearson korelasyonları	119
Şekil 4.35. Sonbahar döneminde bitki gelişimi ve meyve mineral madde arasındaki pearson korelasyonları	120
Şekil 4.36. İlkbahar döneminde bitki gelişimi ve meyve mineral madde arasındaki pearson korelasyonları	121
Şekil 4.37. Sonbahar döneminde bitki gelişimi ve fizyolojik özellikler arasındaki pearson korelasyonları	122
Şekil 4.38. İlkbahar döneminde bitki gelişimi ve fizyolojik özellikler arasındaki pearson korelasyonları	122
Şekil 4.39. Sonbahar döneminde bitki fizyolojik, biyokimyasal ve meyve parametreleri arasındaki pearson korelasyonları.....	124
Şekil 4.40. İlkbahar döneminde bitki fizyolojik, biyokimyasal ve meyve parametreleri arasındaki pearson korelasyonları.....	124

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 3.1. Deneme alanı toprağının bazı fiziksel ve kimyasal özellikleri.....	37
Çizelge 3.2. Deneme alanı toprağının makro ve mikro besin element içerikleri.....	38
Çizelge 3.3. Deneme alanının 2023-24 yıllarına ait sıcaklık ve yağış verileri ve çok yıllık ortalamalar	38
Çizelge 3.4. Hıyar bitkisinin özellikleri.....	39
Çizelge 3.5. Denemede kullanılan bakterinin özellikleri.....	39
Çizelge 3.6. Denemede kullanılan sulama suyunun özellikleri	40
Çizelge 3.7. Denemeye ait ana ve alt konular.....	41
Çizelge 3.8. Sonbahar dönemi sulama miktarları ve tarihleri.....	44
Çizelge 3.9. İlkbahar dönemi sulama miktarları ve tarihleri	44
Çizelge 3.10. Kimyasal gübrelemede kullanılan gübreler ve miktarları	44
Çizelge 3.11. BSA standartlarının hazırlanışı.....	51
Çizelge 4.1. Sonbahar ve ilkbahar dönemlerinde sulama uygulamalarına göre bitki su tüketimi	55
Çizelge 4.2. Farklı sulama düzeylerinde gübre uygulamalarının yaprak makro besin elementleri üzerine etkisi. Aynı sulama ve dönemdeki farklı harflerle gösterilen ortalama (n=3) değerler, Tukey's HSD testine göre istatistiksel olarak farklılık göstermektedir (p< 0.05).....	77
Çizelge 4.3. Farklı sulama düzeylerinde gübre uygulamalarının yaprak mikro besin elementleri üzerine etkisi. Aynı sulama ve dönemdeki farklı harflerle gösterilen ortalama (n=3) değerler, Tukey's HSD testine göre istatistiksel olarak farklılık göstermektedir (p < 0.05).....	78
Çizelge 4.4. Farklı sulama düzeylerinde gübre uygulamalarının meyve mineral maddesi (makro elementler) üzerine etkisi. Aynı dönem içinde farklı harflerle gösterilen ortalamalar (n=3), Tukey's HSD testine göre istatistiksel olarak farklılık göstermektedir (p<0.05).....	92
Çizelge 4.5. Farklı sulama düzeylerinde gübre uygulamalarının meyve mineral maddesi (mikro elementler) üzerine etkisi. Aynı dönem içinde farklı harflerle gösterilen ortalamalar (n=3), Tukey's HSD testine göre istatistiksel olarak farklılık göstermektedir (p <0.05).....	93
Çizelge 4.6. Farklı sulama düzeylerinde gübre uygulamalarının meyve mineral maddesi (mikro elementler) üzerine etkisi. Aynı dönem içinde farklı harflerle gösterilen ortalamalar (n=3), Tukey's HSD testine göre istatistiksel olarak farklılık göstermektedir (p <0.05).....	97
Çizelge 4.7. Farklı sulama düzeylerinde gübre uygulamalarının meyve tat ve dış görünüşü üzerine etkisi. Aynı dönemdeki farklı harflerle gösterilen ortalama (n=3) değerler, Tukey's HSD testine göre istatistiksel olarak farklılık göstermektedir (p < 0.05).	101
Çizelge 4.8. Farklı sulama düzeylerinde gübre uygulamalarının bakteri sayısı üzerine etkisi. Aynı sulama uygulaması ve dönemdeki farklı harflerle gösterilen ortalama (n=3) değerler, Tukey's HSD testine göre istatistiksel olarak farklılık göstermektedir (p<0.05).....	107

1. GİRİŞ

Küresel gıda sistemleri, insan faaliyetleriyle hızlanan iklim değişikliğinin etkisiyle giderek artan sıklıkta ve şiddette ortaya çıkan kuraklık tehdidi altında bulunmaktadır (Wheeler ve von Braun, 2013; Magnan vd. 2021). Bilimsel projeksiyonlar, iklim değişikliğinin etkilerini azaltmaya yönelik stratejilerin en kararlı şekilde uygulansa dahi, kuraklık olaylarının beş ila on kat daha sık yaşanacağını öngörmektedir (Naumann vd. 2018). Sadece bir yıllık şiddetli kuraklık bile, tarımsal üretimden ekonomiye kadar birçok sektörde ciddi etkiler yaratma potansiyeline sahiptir. Ayrıca, su arzı ile talebi arasındaki farkın küresel düzeyde beş kata kadar çıkabileceği tahmin edilmekte, bu durum tarımda yeterli sulamanın sağlanamayacağı riskini gündeme getirmektedir. Öte yandan, dünya nüfusunun 2050 yılına kadar 9 milyara ulaşması beklenmektedir ve tarımsal üretimde gerekli artış sağlanmadığı takdirde yaklaşık 2.5 milyar insanın (%31) yetersiz beslenme riskiyle karşı karşıya kalacağı öngörülmektedir (Dawson vd. 2016). İklim değişikliğinin etkileri de hesaba katıldığında, bu sayıya yaklaşık 1.7 milyar (%21) insanın eklenebileceği düşünülmektedir (Dawson vd. 2016). Bu bağlamda, küresel gıda sistemlerinin hem üretkenliğinin artırılması hem de iklim değişikliğine bağlı stres faktörlerine ve özellikle kuraklığa karşı dayanıklılığının geliştirilmesi, gıda güvenliğinin sürdürülebilirliği açısından kritik bir gerekliliktir. Dolayısıyla, kuraklığa dayanıklı tarım uygulamalarının geliştirilmesi yönünde özel araştırmalara ve yenilikçi yaklaşımlara duyulan ihtiyaç gün geçtikçe artmaktadır.

Kuraklık, dünya genelinde en yaygın görülen abiyotik stres faktörlerinden biri olup, tarımsal verimlilik üzerinde ciddi düşüşlere neden olmaktadır. Su yetersizliği, bitkilerde fizyolojik, morfolojik ve moleküler düzeyde çok yönlü tepkilere yol açarak gelişim süreçlerinin tamamını olumsuz etkilemektedir (Goodger ve Schachtman, 2010). Türkiye, Akdeniz Havzası'nda yer alması nedeniyle iklim değişikliğinin etkilerini en yoğun şekilde hisseden ülkeler arasında yer almaktadır. Artan sera gazı emisyonlarına bağlı olarak sıcaklık değerleri yükselmekte, yağış rejimlerinde düzensizlikler meydana gelmekte ve ekstrem hava olaylarının sıklığında kayda değer artışlar gözlenmektedir. 1950 sonrası dönemde Türkiye genelinde donlu gün sayılarında azalma yaşanırken, sıcak gün ve gece sayılarında anlamlı artışlar kaydedilmiştir (Türkeş, 2012). Bu durum, doğal iklim değişkenliğinin ötesinde, iklim sisteminde yapısal ve kalıcı değişimlere yol açmaktadır. Sıcak hava dalgalarının sıklığı, süresi ve şiddeti artarken, mevsimsel yağışların dağılımında düzensizlikler ve toplam yağış miktarında azalmalar meydana gelmektedir (Coşgun, 2023). Özellikle Güneydoğu Anadolu, İç Anadolu ve Akdeniz Bölgelerinde su kaynakları üzerindeki baskı artmakta; Konya Kapalı Havzası ile Fırat-Dicle Havzalarında ciddi su açıklarının oluşacağı öngörülmektedir (Coşgun, 2023; Turan, 2018). Türkiye'nin yarı kurak ve yarı nemli iklim özellikleri, kuraklık etkilerini daha belirgin hâle getirmekte ve tarımsal üretim üzerinde doğrudan tehdit oluşturmaktadır. Kuraklık yalnızca kısa süreli yağış eksiklikleriyle sınırlı kalmamakta, uzun vadeli toprak nemi yetersizliği ve verimlilik düşüşleriyle de tarımsal faaliyetleri olumsuz yönde etkilemektedir (Partigöç ve Soğancı, 2019).

Sıcaklık artışı ve azalan yağışlar; toprak neminin azalmasına, bitkisel stres düzeyinin yükselmesine ve zararlı organizmaların etkisinin artmasına neden olmaktadır (Tarım ve Orman Bakanlığı, 2021). TÜSİAD'ın projeksiyonlarına göre, 2040–2049 döneminde Türkiye genelinde tarımsal verimde %8–9 oranında kayıplar yaşanabileceği öngörülmekte; bu durum, yalnızca gıda güvenliğini değil, aynı zamanda kırsal kalkınma

ve ekonomik istikrarı da tehdit edebilecek bir risk olarak değerlendirilmektedir. Tarım sektörü hem su kaynaklarına bağımlılığı hem de iklim değişkenliğine karşı yüksek duyarlılığı nedeniyle çevresel risklere en açık sektörlerden biridir. 2007-2008 yılları arasında Türkiye’de yaşanan kuraklık, özellikle sonbahar ve kış aylarında yağışların uzun dönem ortalamalarının altında kalmasıyla belirginleşmiştir. Marmara, Ege, İç Anadolu ve Akdeniz bölgelerinde etkili olmuş, meteorolojik kuraklık zamanla tarımsal ve hidrolojik kuraklığa dönüşerek hem su kaynaklarında azalmaya hem de ciddi tarımsal ürün kayıplarına yol açmıştır (Türkeş, 2012b). Standart yağış indeksi kullanılarak yapılan kuraklık analizleri sonucunda, kuraklık yaşanan yıllar ve bu dönemlere karşılık gelen bölgelerde bitkisel üretim verimliliği detaylı şekilde incelenmiştir. Özellikle 2004, 2007, 2008 ve 2013 yıllarında kuraklık görülen bölgelerde tarımsal üretimde %30’a varan oranlarda verim kayıplarının meydana geldiği belirlenmiştir (Oğuz vd. 2017). Bu veriler, iklim değişikliğine bağlı kuraklıkların yalnızca çevresel değil, aynı zamanda sosyo-ekonomik düzeyde de ciddi sonuçlar doğurduğunu ortaya koymaktadır. Bu bağlamda, Türkiye’nin tarımsal planlamalarında; iklim uyumu, su verimliliği ve sürdürülebilir arazi yönetimi gibi başlıkların öncelikli hedefler hâline getirilmesi kaçınılmaz bir gereklilik olarak öne çıkmaktadır.

Bitkiler yaşam döngüleri boyunca birçok çevresel etkenle karşı karşıya kalmakta; bu etkenlerin önemli bir kısmı canlı biyotik değil, sıcaklık, su, ışık, tuz gibi abiyotik faktörlerden kaynaklanmaktadır (Nagarajan ve Nagarajan, 2010). Abiyotik stres faktörleri, bitkilerin büyüme, gelişme, üretim ve hayatta kalma yeteneklerini kısıtlayan, canlı olmayan çevresel koşulların neden olduğu stres türlerini ifade eder. Bu tür stres, metabolik sapmalara, fotosentetik etkinliğin azalmasına ve hücresel düzeyde ölümcül bozukluklara neden olabilir (Huang vd. 2011; Ahluwalia vd. 2021). Her bitki türü, belirli bir çevresel aralıkta optimum büyüme gösterir; bu aralığın dışındaki koşullar bitki için stres uyarısıdır. Örneğin halofitik türler tuzluluğa tolerans gösterirken, birçok kültür bitkisi için aynı koşullar ölümcül olabilir (Pareek vd. 2010). Bitkiler bu stres sinyallerini algılayarak gen ekspresyonlarında değişiklikler oluşturur, fitohormon düzeylerini düzenler ve çeşitli fizyolojik adaptasyon mekanizmalarını devreye sokar. Abiyotik stres faktörleri arasında düşük ve yüksek sıcaklık, su dengesizlikleri, toprak tuzluluğu, besin elementi noksanlıkları, ağır metal toksisitesi ve ışık şiddetindeki değişimler yer alır (Nagarajan ve Nagarajan, 2010). Bu faktörlerin her biri, bitki gelişiminin belirli evrelerinde farklı etki biçimlerine sahiptir.

Yüksek sıcaklık stresi, özellikle çiçeklenme ve dane dolumu gibi kritik evrelerde, polen canlılığını düşürerek verimi azaltır. Sıcaklık artışı proteinlerin denatürasyonuna, hücre zarlarının akışkanlığının bozulmasına ve enzim aktivitesinin düşmesine yol açar (Rock vd. 2010). Örneğin buğdayda 35 °C üzerindeki sıcaklıklar, dane dolum süresini kısaltarak verimi düşürmektedir. Düşük sıcaklıklar ise hücre zarlarının katılaşmasına ve buz kristallerinin oluşumuna neden olarak hücre ölümüne yol açabilir. Soğuğa duyarlı bitkilerde, özellikle genç dokular bu durumdan daha fazla etkilenmektedir. Arabidopsis gibi model bitkilerde, soğuk stresine karşı çeşitli genetik düzenleme mekanizmalarının aktive edildiği belirlenmiştir (Bohnert vd. 2006). Topraktaki yüksek tuz konsantrasyonları ise ozmotik stres ve iyon toksisitesine yol açar. Na⁺ ve Cl⁻ iyonlarının aşırı birikimi fotosentezi baskılar, klorofil yıkımına neden olur ve sonuçta bitki metabolizması zarar görür. Bitkiler bu duruma karşı Na⁺ iyonlarını vakuollerde depolayarak zararı minimize etmeye çalışır (Amtmann ve Leigh, 2010).

Aşırı sulama ya da drenaj yetersizliği, kök bölgesinde oksijen eksikliğine yol açarak anaerobik koşulları tetikler ve kök çürümeye neden olur. Muz, narenciye ve birçok meyve türü, su baskınlarına karşı oldukça hassastır. Bazı bitkiler, koşullara uyum sağlamak amacıyla köklerinde aerenkima dokusu oluşturarak oksijenin kök sistemine taşınımını artıran adaptif mekanizmalar geliştirebilmektedir. (Nagarajan ve Nagarajan, 2010). Öte yandan kuraklık, dünya genelinde en yaygın ve en etkili abiyotik stres türlerinden biri olarak kabul edilir ve tarımsal verimde dramatik düşüşlere neden olmaktadır (Goodger ve Schachtman, 2010). Su kısıtı, bitkilerde fotosentez oranının azalmasına, hücre içi su potansiyelinin düşmesine, klorofil yıkımına ve sıcaklık artışına neden olur. Stomaların kapanmasıyla CO₂ alımı azalır ve net fotosentez sınırlanır. Bu stres koşullarında, bitkiler ozmotik dengeyi sağlamak için prolin, mannitol ve glisin betain gibi ozmolitleri biriktirerek zararları azaltmaya çalışır (Brosché vd. 2010).

Kuraklık stresi ayrıca bitkinin morfolojisini değiştirerek, kök büyümesini teşvik ederken yaprak alanını sınırlandırır, yaprak sayısını azaltır ve erken yaprak dökümünü teşvik eder (Fahad vd. 2017). Bu değişiklikler, transpirasyon kaybını azaltmak amacıyla geliştirilmiş adaptasyonlardır. Örneğin mısır ve domates bitkilerinde kök/sürgün oranı kuraklık koşullarında anlamlı şekilde artmaktadır (Pareek vd. 2010). Kuraklığa karşı bitkilerde bazı transkripsiyon faktörleri (örneğin, DREB, MYB, NAC, WRKY) aktive edilerek stresle ilişkili genlerin ifadesi artırılır. Aynı zamanda, absisik asit (ABA) hormon düzeyinde artış gözlemlenir ve bu artış stres sinyal iletim yollarını tetikleyerek genetik düzeyde adaptif yanıtları başlatır (Rock vd. 2010). Arabidopsis, buğday ve pirinç gibi bitkilerde yapılan çalışmalar, toleranslı genotiplerin bu moleküler yanıtları daha güçlü bir şekilde aktive ettiğini göstermektedir. Kuraklık stresi, özellikle sebze türlerinde, yüksek su gereksinimleri nedeniyle daha yıkıcı sonuçlara yol açmakta; bu durum, fotosentez oranında düşüşe, turgor kaybına ve büyüme geriliğine neden olmaktadır. Marul ve domates gibi bitkilerde bu etkiler net biçimde gözlemlenmiş, verim kayıpları %13 ila %94 arasında rapor edilmiştir. Bu oranın stresin süresine ve şiddetine bağlı olarak değişkenlik gösterdiği belirtilmektedir (Malhi vd. 2021; Kusvuran vd. 2016; Bulgari vd. 2019).

Bitki mikrobiyomu, bitkinin toprak üstü (filosfer) ve toprak altı (rizosfer) bölgelerinde, yüzeyinde ve çevresinde yaşayan mikrobiyal toplulukları ifade eder. Bu topluluklar, bitki sağlığı ve verimliliğinde belirleyici unsurlardır (Berendsen vd. 2012; Mueller ve Sachs, 2015). Son derece karmaşık ve dinamik bir yapıya sahip olan mikrobiyom, araştırılması güç bir ekosistemdir. Rizosfer mikrobiyal çeşitliliğindeki artış, bitki sağlığıyla pozitif yönde ilişkilidir ve bu çeşitlilik, bitki adaptasyonunu ve stres toleransını artırabilir (Lau ve Lennon, 2012). Mikrobiyom besin alımını artırma, hastalık baskılanmasını sağlama ve abiyotik streslere karşı toleransı geliştirme gibi çeşitli faydalar sağlayarak sürdürülebilir tarımsal üretimde stratejik bir rol üstlenmektedir (Berendsen vd. 2012; Bulgarelli vd. 2013; Lakshmanan vd. 2014).

Mikrobiyomun bu olumlu etkileri çeşitli mekanizmalarla ortaya çıkmaktadır. Patojenlerin baskılanması, oksalat gibi organik asitler salgılayarak fosfor (P) çözünürlüğünü ve kation değişim kapasitesini artırması, bitki hormonları (ABA, salisilik asit (SA) ve 1-aminosiklopropan-1-karboksilik asit (ACC) deaminaz gibi maddelerin salınımıyla reaktif oksijen türlerinin (ROS) düzenlenmesi bu mekanizmalar arasında yer almaktadır (Bolan, 1991; Berendsen vd. 2012; Naylor ve Coleman-Derr, 2017). Bitkiler rizosfer mikrobiyomunu kök eksüdatları yoluyla yönlendirir; rizodepozisyonla açığa çıkan karbon (C) bileşenleri, mikrobiyal bolluğu ve çeşitliliği şekillendirir. Organik

asitler (malat, sitrat, oksalat vb.) seçici etkileriyle mutualistik ilişkilerin evrimine katkı sağlar. Konak bitki mikrobiyom kompozisyonunda belirleyici olmakla birlikte, toprak tipi, mevsimsel değişiklikler ve bitki gelişim evresi de mikrobiyal yapıyı etkileyen çevresel faktörlerdendir (Berg, 2009; Bakker vd. 2012; Chaparro vd. 2013). Ayrıca, organik gübre kullanımı mikrobiyal heterojenliği artırarak faydalı mikrobiyal toplulukların gelişimini teşvik etmektedir (Bulluck vd. 2002; Hartmann vd. 2015).

Toprak, mikrobiyal çeşitliliği yüksek, dinamik bir ekosistemdir ve bu mikroorganizmalar toprak oluşumu ile C ve azot (N) döngüsü gibi ekosistem süreçlerinde temel roller üstlenir (Bardgett ve Van der Ruten, 2014; Van der Heijden vd. 2008; Bender vd. 2016). Bitkiler, rizosfer, rizoplan ve endofitik bölgelerde mutualist, kommensal ya da antagonist ilişkiler kurabilecek mikroorganizmalar için çeşitli habitatlar sağlar. Özellikle rizosfer, mikrobiyal etkileşimlerin en yoğun yaşandığı ve bu ilişkilerin bitki gelişimini doğrudan etkileyebildiği bölgedir (Yadav vd. 2015). Tarımsal uygulamalarda kullanılan faydalı mikroorganizmalar, biyogübre, biyopestisit ve stres azaltıcı biyolojik ajanlar olarak sınıflandırılmaktadır. Prokaryotik (Örn: PGPR) ya da ökaryotik (Örn: Trichoderma, AMF) kökenli olan bu organizmalar, rizosfer, rizoplan veya endofitik bölgelerde yer alabilir. Bu mikroorganizmaların su ve besin alımını iyileştirme, fitohormon üretimi ve patojen baskılama gibi doğrudan ve dolaylı etkileri, sürdürülebilir tarımın başarısı açısından kritik öneme sahiptir (Glick, 2014; Vejan vd. 2016).

Küresel iklim değişikliğinin yoğunlaşmasıyla birlikte, su kısıtlılığı küresel bir çevre sorunu haline gelmektedir (Piao vd. 2010; Mathur vd. 2018). Türkiye'nin de içinde bulunduğu kurak ve yarı kurak bölgelerde, su kıtlığı tarımsal üretimi sınırlayan en önemli faktördür. Su verimliliğinin daha iyi anlaşılmasını içeren sürdürülebilir tarım uygulamaları, sınırlı su ortamlarında başarılı bir yönetim aracı olarak kabul edilmektedir (Bacon, 2004; Howell, 2001). Kısıtlı sulamanın birçok bahçe ve tarla bitkisinin büyümesi ve verimliliği üzerindeki etkileri çeşitli araştırmacılar tarafından rapor edilmiştir (Abd El-Mageed vd. 2016; Badal vd. 2013). Hıyar, dünya çapında yetiştirilen en önemli bitkisel ürünlerden biridir. Hıyar veriminin su kısıtının artışı ile doğrusal bir ilişki içinde azaldığı bildirilmiştir (Amer vd. 2009). Hıyar verimi, büyüme dönemlerinin tamamında sulama suyu miktarından önemli ölçüde etkilenmektedir. En az verimli sulama rejimlerinin, meyve verme dönemlerinde su kısıtlılığı olan rejimler olduğu bildirilmiştir (Mao vd. 2003).

Hıyar, *Cucurbitaceae* (kabakgiller) familyasına ait tek yıllık bir kültür bitkisi olup, genetik kökeni ve evrimi bakımından anavatanının Güney Asya ve özellikle Hindistan bölgesi olduğu kabul edilmektedir (Tatlioglu, 1997). Morfolojik olarak sürünücü ya da tırmanıcı gövde yapısına sahip olan bitki, meyveleri taze tüketilen, düşük kalorili ve yüksek su içeriği ile öne çıkan bir sebzedir. Diyet lifi, C ve K vitaminleri, potasyum ve antioksidan bileşikler bakımından zengin olması nedeniyle sindirim sistemini destekleyici, detoksifiye edici ve kardiyovasküler sağlığı koruyucu etkileri bulunmaktadır (Sattar vd. 2024). Hıyar, dünya genelinde yaygın olarak yetiştirilen bir sebze olup, 2023 yılında dünya toplam üretimi yaklaşık 109 milyon ton olarak gerçekleşmiştir. Bu üretimin önemli bir kısmı Çin, Hindistan, Rusya ve ABD gibi ülkelerde yapılmış ve Türkiye aynı yıl içinde 1.9 milyon ton üretimle dünya sıralamasında Çin'in ardından ikinci sırada yer almıştır (FAOSTAT, 2023). Türkiye'de özellikle Akdeniz, Ege ve Marmara bölgelerinde yoğun olarak açık tarla ve örtü altı koşullarında yetiştirilen hıyar, iç piyasada taze tüketiminin yanı sıra turşuluk olarak da yaygın şekilde değerlendirilmektedir.

Hıyar bitkisiyle yapılan bir çalışmada, su eksikliğinin verim üzerindeki etkileri incelenmiştir. Sera koşullarında yapılan çalışmada, bitkiler 4 farklı sulama düzeyinde (K1=100, K2=75, K3=50, K4=25, K5=0) sulanmıştır. Sulama seviyeleri verim, meyve uzunluğu ve çapı, meyve verimi ve kuru madde içeriğinde farklı etkiler olduğu belirlenmiştir. K1 seviyesinde en yüksek verim ve kalite sağlanırken, sulamanın tamamen kesildiği K5 düzeyinde verim % 957.1 oranında azalmıştır. Su kullanım etkinliği açısından değerlendirilen bitkilerde en yüksek su kullanım etkinliği K1 'de elde edilmiş, bunu K2 ve K3 seviyeleri izlemiştir. Araştırmacılar çalışma sonucunda kuraklık stresinin hıyarda verim ve kalite değerlerinin olumsuz etkilediğini belirtmişlerdir (Ayaş ve Demirtaş, 2009).

2017'de Arshad tarafından yapılan bir çalışmada örtü altında yetişen hıyar bitkisinin veriminin su stresinden nasıl etkilendiği ortaya koyulmuştur. Sulama hıyar bitkilerinde günde bir, iki, üç, dört ve beş defa 45'er dakika arayla beşer dakika boyunca olarak uygulanmıştır. Çalışmada en düşük verimi günde bir defa sulama yapılan ve en fazla verimi ise beş defa sulama yapılan denemeden elde etmişlerdir. Sonuç olarak artan sulama suyu sıklığı ile %30 daha fazla verim elde edilebileceğini göstermişlerdir.

Kuraklık stresinin etkileri, bitkilerde morfolojik düzeyde kök-sürgün oranında artış, yaprak alanında küçülme, su kullanım etkinliğinde azalma ve hücresel düzeyde prolin birikimi gibi adaptasyonlarla karşılanmaya çalışılmaktadır. Ancak bu doğal adaptasyonların çoğu, şiddetli ve uzun süreli kuraklık koşullarında yetersiz kalabilmektedir. Bu noktada AMF gibi biyolojik çözümler önem kazanmaktadır (Malhi vd. 2021). AMF ile bitki kökleri arasında kurulan simbiyotik ilişki sayesinde, bitkiler topraktan su ve mineral alımını daha verimli hâle getirir. Kuraklık koşullarında AMF inokülasyonu yapılan bitkilerde kılcal kök yoğunluğunda ve uzunluğunda artış sağlanmakta; bu da daha geniş bir toprak hacminden su temin edilmesine olanak tanımaktadır. Bu simbiyoz ile stomatal iletkenlik ve fotosentetik verimlilik yükselirken antioksidan savunma sistemleri güçlenerek kuraklık koşullarındaki bitki stresi önemli ölçüde azalmaktadır (Baslam ve Goicoechea, 2012; Bakr vd. 2018). Ayrıca bu simbiyotik birliktelikle, mikorizal bitkilerde metil jasmonat, indol-3-asetik asit (IAA) ve nitrik oksit gibi sinyal moleküllerinin seviyelerinde artış gözlemlenmiştir. Bu moleküller, bitkilerin kuraklığa karşı savunma tepkilerini düzenleyen hormonal yolları aktive etmektedir (Zou vd. 2017; Bahadur vd. 2011).

Chverasekaran (2024) tarafından gerçekleştirilen meta-analiz çalışmasında AMF, özellikle *Funneliformis mosseae* ve *Rhizophagus irregularis* türlerinin, kuraklık stresi altındaki bitkilerde fotosentez oranı, stomatal iletkenlik, terleme oranı, oransal su içeriği, su potansiyeli ve su kullanım etkinliği (SKE) gibi fizyolojik parametreler üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Toplam 60 çalışmadan elde edilen 473 gözlem sonucuna göre, AMF inokülasyonu fotosentez oranında en yüksek etkiyi oluşturmuş, bunu stomatal iletkenlik ve terleme oranı izlemiştir. Su ilişkili parametrelerde ise, AMF uygulamaları bitkilerin oransal su içeriği, su potansiyeli ve SKE değerlerini anlamlı şekilde artırmıştır. Özellikle *F. mosseae*, *R. irregularis*'e kıyasla daha yüksek su kullanım etkinliği sağlamış, bu durum suyun yapraklara taşınımını kolaylaştırarak stomatal açıklığın korunmasına ve dolayısıyla fotosentezin sürdürülmesine katkı sağlamıştır.. Bu bulgular, AMF'nin özellikle su ilişkili fizyolojik mekanizmalar üzerinden kuraklık toleransını artırarak sürdürülebilir tarım uygulamalarında önemli bir biyolojik araç olabileceğini ortaya koymaktadır.

Son yıllarda, PGPR çevresel stres faktörlerine karşı direnç sundukları için çok dikkat çekmiştir (Svehya vd. 2010). Çalışmalar, PGPR ile aşılanan bitki büyümesi için faydalı olduğunu ve su stresini azalttığını belirtmiştir (Sarma ve Saikia, 2014). Su stresini tolere etmek için PGPR, kök morfolojisini değiştirerek bitkilere yardımcı olur, bu da daha iyi ve daha fazla toprak nem içeriği, mineral çözünürlüğü ve besin emilimi ile sonuçlanmaktadır (Glick, 2014). PGPR tarafından üretilen ACC deaminaz enzimi, ACC'yi a-ketobütirat ve amonyağa ayrıştırarak (Santos vd. 2020) ACC içeriğinin azaltılmasında hayati bir rol oynar ve daha sonra bitkilerde etilen üretimini azaltır. Örneğin, ACC deaminaz içeren PGPR suşu *Achromobacter piechaudii* ARV8'in hem kuraklığa tabi tutulmuş domates hem de biber fidelerinin yaş ve kuru ağırlıklarını önemli ölçüde arttırdığı ve geçici su kısıtı stresine maruz kalan domates fidelerinde etilen üretimini azalttığı gösterilmiştir (Mayak vd. 2004).

Abiyotik stres faktörleri, bitki büyüme ve gelişimini sınırlayarak tarımsal üretimde ciddi kayıplara yol açmaktadır. Bu stres faktörlerinden biri olan kuraklık stresi, özellikle yarı kurak ve kurak bölgelerde verimliliği ciddi ölçüde sınırlandırmaktadır. Kuraklık koşullarında bitkilerin gösterdiği fizyolojik, morfolojik ve genetik uyum mekanizmaları, stresin etkilerini azaltmada önemli rol oynamaktadır. Bitkilerin AMF ve PGPR inokülasyonu, bitkilerin kuraklık stresine karşı verdiği tepkiyi fizyolojik, biyokimyasal ve moleküler düzeylerde olumlu yönde değiştirerek tarımsal sürdürülebilirliğe katkı sağlayabilecek çevre dostu bir strateji sunmaktadır. Bu nedenle, AMF ve PGPR temelli biyogübre uygulamaları, kuraklığa karşı dayanıklı tarım sistemlerinin geliştirilmesinde umut verici bir alternatif olarak değerlendirilmektedir.

2. KAYNAK TARAMASI

2.1. Kuraklık ve Hıyar Bitkisi Üzerindeki Etkileri

Dünya genelinde tarımsal üretimi etkileyen önemli çevresel stres faktörlerinden biri kuraklıktır. Kuraklık, yağışın uzun süreli azalmasıyla oluşan ve bitkilerde su kıtlığına yol açarak büyüme, gelişim ve verimde ciddi kayıplara neden olan abiyotik bir stres faktörüdür (Fahad vd. 2017). Bu durum, özellikle iklim değişikliği ile birlikte daha belirsiz bir şekilde ortaya çıkan düzensiz yağış desenleri ve sıcaklık artışları nedeniyle daha da şiddetlenmektedir (Khan vd. 2018). Hıyar, dünyanın en yaygın ve suyu seven sebzelerinden biri olup (Nwofia vd. 2015), özellikle meyve oluşumu döneminde yüksek su ihtiyacı nedeniyle kuraklık stresine oldukça hassas bir üründür (Swiader ve Ware, 2002). Bu hassasiyet, özellikle suyun sınırlı olduğu bölgelerde üretimi olumsuz etkilemekte ve tarımsal verimliliği tehdit etmektedir.

Kuraklık stresi, hıyar bitkilerinde ciddi morfolojik, fizyolojik ve biyokimyasal değişimlere yol açmaktadır. Özellikle, su yetersizliği durumunda bitkinin fotosentetik kapasitesi azalmış, stomatal iletkenlik ve transpirasyon oranları düşmüş, karbon dioksit (CO_2) alımı ise sınırlanmıştır (Das vd. 2024). Bu süreçlerin tümü, ışık enerjisinin kullanılamamasına ve bunun sonucunda ROS'un hücrelerde birikmesine neden olmaktadır. ROS birikimi, hücresel membran fosfolipidlerinin peroksidasyonunu artırarak oksidatif strese yol açmakta ve hücresel hasarın göstergesi olan malondialdehit (MDA) seviyelerinin yükselmesine neden olmaktadır (Mittler, 2002). Sonuç olarak, bu tür etkiler hıyar bitkilerinde hücre zarı stabilitesini bozarak büyüme ve ürün kalitesinde ciddi kayıplar yaratmaktadır (Das vd. 2024).

Kuraklık stresi altında hıyarın büyüme ve verimi, su kısıtının bitkisel fizyolojiyi bozması sonucu ciddi şekilde azalmaktadır. Özellikle, stomatal kapanma nedeniyle fotosentetik oranlarda düşüş, bitkinin C asimilasyonunu sınırlamakta ve gelişim süreçlerini olumsuz etkilemektedir (Das vd. 2024). Bununla birlikte, damla sulama sistemi ile yapılan kontrollü çalışmalarda, sulama sıklığının verim üzerinde belirleyici bir faktör olduğu belirtilmiştir (Arshad, 2017). Özellikle, günde beş kez sulama yapılan uygulamalarda (T5), bitki başına meyve sayısı (33.8 adet) ve verim (57.6 t ha^{-1}) gibi yüksek değerler elde edilmiştir. Bu sonuçlar, özellikle sürekli su temininin hıyar bitkisi için önemini ve yetersiz sulamanın büyümeyi sınırlandırıcı etkisini vurgulamaktadır.

Kritik gelişim dönemlerindeki su kısıtı, hıyar bitkisinde gelişimsel süreçleri daha belirgin bir şekilde etkiler. Özellikle, çiçeklenme evresindeki kuraklık stresi bitki başına dal sayısını, boyunu ve klorofil içeriğini önemli ölçüde düşürerek bitki büyümesini sınırlar (Das vd. 2024). Buna ek olarak, araştırmalar, kuraklığın neden olduğu membran hasarını ölçmek için MDA seviyelerinin bir indikatör olarak kullanılabileceğini ve bunun, çiçeklenme öncesi evrede büyük bir artış gösterdiğini ortaya koymuştur (Barzegar vd. 2017). Bu durum, kuraklık sırasında hücre zarı stabilitesinin azaldığını ve bunun bitki gelişimi için kritik bir problem oluşturduğunu göstermektedir.

Kuraklık stresi, hıyarın verimini yalnızca toplam üretim miktarı açısından değil, aynı zamanda ürünün besin kalitesi yönünden de etkilemektedir. Polietilen glikol (PEG) kullanılarak yapılan stres simülasyonlarında, fotosentetik pigmentlerin seviyelerinde büyük düşüşler gözlenmiş ve fotokimyasal etkinliğin azaldığı belirlenmiştir (Li vd. 2011).

Bu azalmalar, bitkinin enerji üreten süreçlerinde bozulmaya neden olmanın yanı sıra, ürünün renk ve besin değerlerini de olumsuz etkileyebilir. Ayrıca, uzun süreli kuraklık koşulları, oksidatif stresle bağlantılı olarak hücrelerde lipid peroksidasyonuna yol açar ve bu durum, meyve kalitesinde ciddi bozulmalara sebep olur (Mittler, 2002). Hıyar üzerinde yapılan araştırmalar, kuraklık stresine karşı dayanıklı genotiplerin seçilmesi ve bu genotiplerin daha az su ile yüksek verim sağlayabilme potansiyelinin artırılmasının sürdürülebilir tarım uygulamaları açısından büyük bir öneme sahip olduğunu vurgulamaktadır (Das vd. 2024; Arshad, 2017).

Das vd. (2024)'nin 109 farklı hıyar genotipi ile yaptığı çalışmada, hıyar bitkisinin su stresi altında fizyolojik, biyokimyasal ve moleküler etkilerini anlayarak, su stresine dayanıklılığın ana mekanizmalarını belirlemeyi hedeflemişlerdir. Çalışmada, farklı hıyar genotipleri kullanılarak su stresi uygulanan bitkilerin kök sistemi yapısı, fotosentez verimliliği, su kullanımı verimliliği gibi çeşitli fizyolojik ve biyokimyasal özellikleri değerlendirmişlerdir. Ayrıca, su stresinin neden olduğu hücresel hasarı izlemek için ROS ve MDA gibi oksidatif stres biyomarkerleri ölçmüşlerdir. Su stresi uygulamaları sırasında, dayanıklı genotipler kök uzunluğu, kök hacmi ve kök yüzey alanında daha az azalma gösterirken, hassas genotipler bu parametrelerde daha fazla azalma göstermiştir. Fizyolojik olarak, toleranslı genotipler daha iyi fotosentetik stabiliteye sahipken, gözenekliliğin azalması ozmotiğin korunmasına yardımcı olmuştur. Moleküler düzeyde ise, su stresi altında reaktif oksijen türlerinin temizlenmesi için süperoksit dismutaz (SOD), katalaz (CAT) ve askorbit peroksidaz (APX) gibi enzimlerin aktiviteleri artmıştır.

Kuzey Çin Ovası'nda sera ortamında yetiştirilen hıyar bitkisinin farklı sulama suyu oranları altında gelişimini ve verimini incelemişlerdir. Uygulanan sulama miktarları, T1 için $2.280 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$, T2 için $3.300 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$, T3 için $4.965 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$, T4 için $6.540 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ ve T5 için $6.960 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ olarak belirlenmiştir. Sulama suyu uygulamalarıyla bitki gelişimi, meyve verimi ve su verimliliği gözlemlenmiştir. Elde edilen bulgular, sulama miktarı arttıkça hıyar bitkisinin toplam veriminin belirgin şekilde yükseldiğini (T5 uygulamasında 193.5 t ha^{-1}) göstermektedir. Araştırma, hıyar bitkisi için en uygun sulama koşullarının, özellikle meyve gelişiminde kritik olduğu ve sulama suyu yönetiminin bitki verimi ve su verimliliğini artırmada önemli bir rol oynadığını ortaya koymuştur (Mao vd. 2003).

Hıyar bitkisinin kök bölgesine %125 (S1), %100 (S2) ve %75 (S3) sulama düzeylerinde uygulanan "waterpad" (polimerlerin kâğıt ve jüt arasına ped ya da sandviç şekline getirilerek oluşturulan, kullanıma hazır ticari bir ürün) polimerinin verim ve kalite özelliklerine etkisini belirlemek amacıyla Söylemez vd. (2020) kokopit ve perlit topraksız yetiştiricilik ortamında bir sera çalışması yapmışlardır. Elde edilen sonuçlara göre, sulama düzeylerinin azaltılması ile toplam verim, toplam meyve sayısı, ortalama meyve ağırlığı, kök, sürgün ve yaprak kuru ağırlıkları, bitki boyu, gövde çapı ve klorofil içeriği azalmıştır. Sulama düzeyinin S1'den S3'e düşürülmesi ile toplam verim perlit ortamında %40.66 ve kokopit ortamında %30.08 oranında azalma gösterirken, S1 ve S2 sulama düzeyleri arasında verim ve meyve sayısı bakımından önemli bir farklılık bulunmamıştır.

Küresel iklim değişikliği ve su kaynaklarının giderek azalması, tarımsal üretimde suyun etkin kullanımını zorunlu hale getirmiştir. Özellikle kurak ve yarı kurak bölgelerde, kısıntılı sulama gibi su tasarrufu sağlayan stratejilerin, ürün verimi ve toprak sağlığı üzerindeki etkilerinin bilimsel olarak değerlendirilmesi büyük önem arz etmektedir.

2008–2011 yılları arasında Alomran vd. (2013) tarafından Suudi Arabistan'ın çöl ikliminde sera koşullarında yapılan çalışmada, kısıntılı sulamanın toprak tuzluluğu ve hıyar verimi üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Çalışma, 2008–2011 yılları arasında, dört farklı sulama düzeyi (40%, 60%, 80% ve 100% ET) ile yürütülmüştür. Bulgulara göre, en yüksek verim 15.0 kg m^{-2} ile tam sulama (100% ET) uygulamasında elde edilirken, en yüksek su verimliliği 61.9 kg m^{-3} ile %40 ETc uygulamasında sağlanmıştır. Bununla birlikte, %40 ET düzeyinde uygulanan sulama, toprakta belirgin tuzluluk artışına yol açmış (EC: 3.6 dS m^{-1}), verim ise önemli ölçüde düşmüştür (9.1 kg m^{-2}). Sonuçlar, hıyar üretiminde, özellikle gelişme döneminde %80 ET düzeyinde uygulanan kısıntılı sulamanın optimum su kullanımı ve verim arasında denge sağladığını, bunun yanı sıra çevresel etkilerin azaltılmasına katkı sunduğunu göstermiştir.

İklim değişikliği ve su kaynaklarının giderek azalması, tarımsal üretimde verimli sulama ve sürdürülebilir gübreleme stratejilerinin geliştirilmesini zorunlu kılmaktadır. Bu bağlamda yapılan çalışma, Mısır'ın kurak iklim koşullarında yetiştirilen hıyar bitkisinin verim ve gelişimi üzerine farklı kısıtlı sulama düzeyleri (1.0, 0.84 ve 0.64 ET) ile yedi farklı gübreleme yönteminin etkilerini incelemiştir. Araştırma sonucunda, 1.0 ET sulama düzeyi ve tavuk gübresi ile desteklenen yüksek azotlu gübreleme (T7) kombinasyonunun, 41.90 Mg ha^{-1} meyve verimi, yüksek klorofil içeriği ve en geniş yaprak alan ile en başarılı sonuçları verdiği belirlenmiştir. Buna karşın, su ve azotun yetersiz olduğu kombinasyonlarda verimin ciddi şekilde düştüğü gözlemlenmiştir. 0.84 ET düzeyi su kullanım verimliliği açısından avantaj sağlarken, 0.64 ET seviyesinde bitki fizyolojisinde olumsuz etkiler gözlenmiştir (Amer vd, 2009).

Kuraklık stresi, hıyar bitkisinin fizyolojisi üzerinde ciddi olumsuz etkiler yaratmakta ve bu stresin yönetimi tarımsal sürdürülebilirlik açısından kritik bir öneme sahip olmaktadır. Bir çalışmada, 5-aminolevulinik asit (ALA) ön uygulamasının, hıyar fidelerinde PEG-6000 ile simüle edilen kuraklık stresine karşı fizyolojik ve biyokimyasal tepkileri üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Bitkiler, $3 \text{ }\mu\text{M}$ ALA ile iki gün boyunca ön işlem gördükten sonra %10 PEG içeren Hoagland çözeltisi ile sulanarak kuraklık koşullarına maruz bırakılmıştır. Elde edilen veriler, ALA uygulamasının kuraklık kaynaklı büyüme inhibisyonunu azalttığını, solmuş yaprak oranını %83.3'ten %48.2'ye düşürdüğünü ve reaktif oksijen türlerinin (O_2^- , H_2O_2) birikimini önemli ölçüde sınırladığını göstermiştir. Ayrıca, ALA uygulaması ile antioksidan savunma sistemine ait SOD, CAT, APX ve glutatyon redüktaz (GR) gibi enzimlerin aktiviteleri anlamlı şekilde artmıştır (Li vd. 2011).

Artan su kıtlığı, iklim değişikliği ve tarımsal üretimdeki sürdürülebilirlik gereksinimi, özellikle sera koşullarında yetiştirilen sebzelerde su kullanım verimliliğini artırmaya yönelik sulama stratejilerinin geliştirilmesini gerekli kılmıştır. Yapılan tüm çalışmaların ortak amacı, hıyar bitkisinde farklı kısıtlı sulama düzeylerinin ve uygulama yöntemlerinin verim, fizyolojik parametreler ve su kullanım verimliliği üzerindeki etkilerini belirlemek olmuştur. Al-Omran vd. (2014), Suudi Arabistan'da yürüttükleri serada ve açık alanda yapılan çalışmada, hıyar bitkisinin orta gelişim döneminde uygulanan %60 ve %80 ET düzeylerinde sulamaya tolerans gösterdiğini; en yüksek su verimliliği (%40 ET) sağlanmasına rağmen verimde düşüş gözlemlendiğini ortaya koymuştur. Costa vd. (2007) tarafından yapılan derleme çalışmasında ise, düzenli ve kısmi kök bölgesi kurutması gibi kısıntılı sulama tekniklerinin fizyolojik temelleri açıklanmış ve bu yöntemlerin kontrollü stres altında su tasarrufu sağlarken, meyve

kalitesini artırabileceği vurgulanmıştır. Parkash vd. (2021) ise ABD'nin güney yüksek ovalarında yürüttükleri iki yıllık tarla çalışmasında, %80 ET düzeyinde sulamanın fotosentez hızı, yaprak alanı ve verim bakımından tam sulamaya benzer sonuçlar verdiğini; %60 ve %40 düzeylerinde ise belirgin verim kayıpları yaşandığını rapor etmiştir. Khan vd. (2024) tarafından yapılan bir başka çalışmada, sera koşullarında %100 ET sulama ile en yüksek biyokütle ve meyve verimi ($2.49 \text{ kg bitki}^{-1}$) elde edilirken, %80 ve %60 ET düzeylerinde anlamlı verim kaybı olmadan su tasarrufu sağlandığı; %40 sulama düzeyinde ise tüm morfolojik ve verim parametrelerinde ciddi azalma görüldüğü bildirilmiştir. Bu sonuçlar, kurak ve yarı kurak iklimlerde kısıtlı sulama yönetiminin, kaynakların etkin kullanımı ve sürdürülebilir sebze üretimi açısından büyük potansiyel taşıdığını göstermektedir. Kuraklık stresinin tarımsal üretimde verim ve kalite üzerindeki olumsuz etkileri, hıyar gibi suya duyarlı sebze türlerinde fizyolojik ve biyokimyasal dayanıklılık mekanizmalarının anlaşılmasını ve yeni stres azaltma stratejilerinin geliştirilmesini gerektirmektedir.

2.2. Mikoriza

Simbiyoz terimi (Yunanca: sym, “ile”; ve biosis, “yaşamak”) genellikle farklı biyolojik türler arasındaki yakın ve çoğunlukla uzun vadeli etkileşimleri tanımlar. Bu terim ilk kez 1879 yılında Alman mikolog Heinrich Anton de Bary tarafından kullanılmış ve “birbirine benzemeyen organizmaların bir arada yaşaması” olarak tanımlanmıştır De Bary (1879). Birliktelikteki her iki türün de fayda sağladığı simbiyotik ilişkilerdir. Bitkiler ve mantarlar arasındaki mutualistik ilişkiler içinde mikoriza dünyadaki en yaygın olanıdır. Mantar, konukçu bitkinin topraktan inorganik N ve P absorbe etmesine yardımcı olur. Mantar bitkinin köklerindeki hücrelere nüfuz ederek bitkiye topraktan fosfor ve diğer besinleri sağlar (Brundrett 2004).

Mikorizalar, çoğu bitki türünün kökleri ile mantarlar arasında oluşan simbiyotik birlikteliklerdir. Mikoriza terimi Yunanca: mykes = mantar veya fungus ve rhiza = kök kelimelerinden gelmektedir. Kelime anlamı “mantar-kök” olan mikoriza terimi ilk kez 1885 yılında Alman orman patoloğu A.B. Frank tarafından tanımlanan mantar-ağaç birlikteliklerine uygulanmıştır. Şimdiye kadar morfoloji ve anatominin yanı sıra konukçu bitki taksonomisi veya mantar taksonomisi temelinde yedi tip mikoriza yıllar içinde genel kullanıma girmiştir (Srivastava vd. 1996; Smith ve Read 1997). Bunlar: ektomikoriza, endomikoriza veya arbusküler mikoriza, erikoid mikoriza, arbutoid mikoriza, monotropoid mikoriza, ekt-endomikoriza ve orkid mikorizadır. Fosil kanıtlar (Remy vd. 1994) ve DNA dizi analizi (Simon vd. 1993), AMF'nin 400-460 milyon yıl önce, ilk bitkiler karada kolonileşirken ortaya çıktığını ileri sürmüştür.

2.3. Arbusküler Mikoriza Mantarı

AMF, *Mucoromycota* filumunun *Glomeromycotina* alt filumuna ait olup (Spatafora vd. 2016), ekosistemlerde kritik roller üstlenen yaygın toprak mikroorganizmalarıdır. Kara bitkisi türlerinin yaklaşık %80'i ve kara bitkisi ailelerinin %90'ı ile simbiyotik bir birliktelik kurarak, bitkiler ve mantarlar arasında fotosentetik karbonhidratlar ile besin maddelerinin değişimini sağlamaktadır (Wang ve Qiu, 2006; Smith ve Read, 2008). AMF, tropik ormanlardan çöllere, meralardan tarımsal ekosistemlere kadar çok geniş bir dağılıma sahip olup (Brundrett, 1991), bitki büyümesine ve sağlığına önemli katkılar sağlar. Küresel düzeyde AMF tür zenginliği

tahmini, 350 ila 12.000 tür arasında değişmekte olup, bu mantarların genetik çeşitliliğinin incelenmesi devam etmektedir (Kivlin vd. 2011; Opik vd. 2014; Baldrian vd. 2021).

AMF'nin kara bitkileriyle olan mutualistik simbiyotik ilişkisi, fotosentetik karbonhidratlar ve lipidlerin, bitki için su ve besin alımını artıran mekanizmalarla değişimini içermektedir (Smith ve Read, 2010a; Salmeron-Santiago vd. 2023; Keymer vd. 2017). Bu mantarlar, köklerin kortikal hücreleri içinde gelişen ve bitki-mantar alışverişine olanak sağlayan özel bir anatomik yapı oluşturur (Corradi ve Bonfante, 2012). AMF-bitki simbiyoz süreci, fiziksel temas başlamadan önce kök salgılarıyla başlar. Özellikle, konukçu bitkiler besin eksikliği yaşadığında köklerinden salgıladıkları strigolaktonlar gibi kimyasal bileşikler yoluyla, mantar sporlarının çimlenmesi ve hif dallanmasında etkili olan genleri aktive etmektedir (Besserer vd. 2006; Akiyama vd. 2005). Buna karşılık, AMF tarafından salgılanan lipokitoooligosakkaritler gibi mikorizal faktörler, ortak simbiyoz sinyal yolunu tetikleyerek kök epidermal hücrelerinde kalsiyum iyonlarının (Ca^{+2}) artışına neden olur. Bu süreç, mantarın köklere kolonize olabilmesi için bitkiye ait genlerin aktivasyonu ile sonuçlanır (Cope vd. 2019).

AMF'nin bitkiyle temas ettiği kök epidermal hücrelerinde oldukça kompleks bir süreç gerçekleşir. Öncelikle, hücre çekirdeği mantarın köke gireceği öngörülen noktaya doğru hareket eder ve burada endoplazmik retikulum ve hücre iskeleti birleşerek bir “ön penetrasyon aparatı” (PPA) oluşturur (Kosuta vd. 2003; Genre vd. 2008). PPA, hiflerin bitki hücrelerine giriş yolu boyunca yön gösterir. AMF tarafından, hipopodyum adı verilen ve kök hücrelerine bağlantısını sağlayan özelleşmiş bir yapı üretilir (Bruijn, 2020). Bu yapı, mantarın epidermisi geçerek kök korteksine girmesine olanak tanır. Kortekste ise mantar, bitki hücrelerinde kolonizasyonu genişletir ve arbuskül adı verilen, aşırı dallı ve ağaç benzeri yapılar oluşturur (Floss vd. 2013). Bu arbusküller, bitki ve mantar arasında geniş bir yüzey alanı sağlayarak besin ve su değişimini artırır (Genre vd. 2005).

AMF kolonizasyonu tamamlandıktan sonra, kök korteksine yerleşen mantarlar ince filamentli ekstraradikal hifler geliştirmeye başlar. Bu hifler, toprağa doğru uzanarak bitkinin erişemediği tükenme bölgesinin kapsamını genişletir ve bu sayede konukçu bitki için su ve besin alım kapasitesini iyileştirir (Gutjahr ve Paszkowski, 2013). Bazı AMF türleri, konukçu bitkiden aldıkları enerji için vesikül adı verilen lipid depolama organları oluşturabilir (Smith ve Smith, 1997). AMF yapıları, kök hücrelerinde karmaşık ve işlevsel bir ağ oluşturarak bitki-mantar simbiyozunu güçlendiren bir mekanizma sunar.

AMF bitki kökleriyle kurduğu simbiyotik ilişki, konukçu bitkiye çeşitli ekolojik avantajlar sağlamaktadır. AMF'nin mikroskopik boyuttaki ekstraradikal miselleri, bitki köklerinin erişemediği küçük toprak gözeneklerindeki suya ulaşabilme yeteneğine sahiptir (Kakouridis vd. 2022). Bununla birlikte, hif yüzeylerinde bulunan glomalin (GRSP) glikoproteini, toprak partiküllerini birbirine bağlayarak toprak agregasyonunu artırmakta ve toprak gözenekliliğini iyileştirmektedir (Syamsiyah vd. 2018). Bu yapısal değişiklikler, toprağın su tutma kapasitesini ve hidrolik iletkenliğini artırarak, konukçu bitkinin su ve suda çözünen besin elementlerinin alımını olumlu yönde etkilemektedir (Pauwels vd. 2023; Clark ve Zeto, 2000).

AMF'nin besin elementi alımını artırmadaki rolü, özellikle P açısından önemlidir. AMF ve köklerin toprak ortamına salgıladığı organik asitler, kalsiyum fosfat veya demir

fosfat gibi çözünürlüğü düşük P formlarıyla etkileşime girerek, bitki tarafından alınabilir formlara dönüştürülmesini sağlamaktadır (Verino vd. 2021; Tawaraya vd. 2006). Besin elementi alımının iyileşmesi, fotosentez hızını artırarak bitki boyu ve biyokütle üretiminde önemli artışlar sağlamaktadır (Shen vd. 2022).

Mikro besin elementleri açısından değerlendirildiğinde, çinko (Zn), bor (B) ve demir (Fe) gibi metal iyonlarının hareketliliği, organik asitlerin ve fenollerin salgılanmasıyla kolaylaştırılmaktadır (Haselwveter vd. 2020). Bu mikro besin elementleri, bitkilerde çeşitli yapısal, sinyal iletim ve sentez yollarında kullanıldığından, alımlarının artması vejetatif gelişim ve üretkenlik üzerinde olumlu etkiler yaratmaktadır (Marschner, 1995; Ishfaq vd. 2022; Narayan vd. 2022).

AMF kolonizasyonu, konukçu bitkilerde sadece besin elementi alımını iyileştirmekle kalmaz, aynı zamanda biyotik ve abiyotik stres koşullarına karşı da dayanıklılık sağlamaktadır. Artan mikro besin elementi alımı, patojen organizmalar ile topraktaki yüksek ağır metal konsantrasyonu, tuzluluk veya düşük sıcaklıklar gibi çevresel stres faktörlerine karşı bitkisel direnci artırmaktadır (Zhu vd. 2022). AMF, stres tepkilerini poliaminler gibi biyostimülantların üretimini kontrol eden yollar (Zhang vd. 2020b) ve suyun hücre zarlarından geçişini sağlayan akuaporinler gibi kanal proteinleri (Krajinski vd. 2000) aracılığıyla düzenlemektedir (Kaur ve Suseela, 2020).

AMF, yaşam döngülerini tamamlayabilmek için konukçu bitkilerden C kaynağı sağlamak zorunda olan zorunlu biyotroflardır (Smith ve Read, 2008). AMF genomlarında birincil metabolik yollarındaki enzimleri kodlayan genlerin çoğunun eksik olduğu tespit edilmiştir (Kobayashi vd. 2018). Örneğin, glikoz üreten polisakkarit hidrolazları, tiamin sentaz, tip-I yağ asidi sentaz ve B6 vitamini türevlerinin dönüşümünü kodlayan genler AMF'de bulunmamaktadır (Tisserant vd. 2013; Wewer vd. 2014). Bu nedenle, AMF'ler metabolik ihtiyaçlarını karşılamak amacıyla heksoz (Solaiman, 1997; Douds, 2000) ve lipid (Luginbuehs vd. 2017; Jiang vd. 2017) gibi maddeleri konukçu bitkilerden edinir.

AMF, ekosistem işlevlerini etkileme potansiyeli açısından diğer toprak mikroorganizmalarından farklı bir konuma sahiptir. Bunun nedeni, AMF'nin eş zamanlı olarak hem konukçu bitki kökü hem de toprak gibi iki farklı habitatda bulunabilmesidir. Bu özellik, AMF'nin aynı anda bitkiler, toprak ve diğer toprak mikroorganizmalarıyla etkileşime girebilmesini sağlamaktadır (Smith ve Read, 2008; Powel ve Rillig, 2018). Allen'ın (2007) tanımıyla AMF, "mikroskobik birimler halinde paketlenmiş makroskobik organizmalardır". Bireysel hiflerin 2-20 µm çapında olmasına rağmen, oluşturdukları miselyal ağlar bitki köklerinden onlarca santimetre uzağa yayılabilmektedir (Jakobsen vd. 1992). AMF hifleri, besin arayışında ve rizosferin ötesindeki mikrobiyal topluluklarla etkileşimde bulunmak için köklerin etrafındaki besin tükenme bölgesini aşabilmektedir (Smith ve Read, 2008; Yuan vd. 2021).

AMF, ekosistem mühendisleri ve önemli faydalı bitki simbiyontları olarak besin elementlerinin bitkiler tarafından alınabilirliğini artırarak toprak verimliliğini ve bitki gelişimini iyileştiren biyo-gübre potansiyeline sahiptir (Daniel vd. 2022). AMF'nin bitkilerle birlikte evrimleşmiş olması, onları hedeflenen ürün geliştirme çalışmaları için ideal adaylar haline getirmektedir (Redecker vd. 2000; Bahadur vd. 2019). Bununla birlikte, AMF'nin tarımsal uygulamalardaki etkinliği, bitki ve AMF türlerinin kombinasyonu, inokulum kalitesi (Deja-Sikora vd. 2023), çevresel koşullar (Zaller vd.

2011) ve sentetik gübrelerin varlığı (Kim vd. 2017) gibi faktörlere bağlı olarak değişkenlik gösterebilmektedir. Özellikle *Rhizophagus irregularis* (eski adıyla *Glomus intraradices*), *Funneliformis mosseae* (eski adıyla *Glomus mosseae*) ve *Gigaspora* türleri (*G. rosea*, *G. margarita*, *G. gigantea*) (Malbreil vd. 2014), hem stres koşullarında hem de stressiz ortamlarda tarımsal üretimi desteklemek amacıyla en yoğun araştırılan AMF arasında yer almaktadırlar.

Sonuç olarak, AMF; tarımsal ekosistemlerde verim artışını destekleyen temel unsurlar arasında yer almaktadır. Besin ve su alımını artırma potansiyelleri sayesinde, tarımsal arazilerde sürdürülebilirlik ve verimli bitki yetiştiriciliği açısından önemli rol oynarlar. Günümüzde iklim değişikliği ve tarımda artan su kıtlığı göz önüne alındığında, AMF'nin tarımsal kullanılabilirliği, tarımsal verimliliği artırma ve kaynak kullanımını optimize etme bağlamında stratejik bir fırsat sunmaktadır.

2.4. AMF ve Kuraklık

Kuraklık, çoğunlukla su kısıtı veya su stresi olarak tanımlanır ve bitkilerin normal gelişimi ile büyümesi için yeterli su düzeyinin bulunmaması halinde ortaya çıkar (Marulanda ve Barea, 2009). Kök bölgesine suyun ulaşamaması ya da erişilebilir olmaması, terleme hızının düşmesi veya ROS oluşumunun artması ve sonuç olarak oksidatif stresin ortaya çıkması, bitkilerde kuraklık stresinin başlıca nedenleri arasında yer alır (Auge, 2001; Barzana vd. 2012).

AMF, incelenen kara bitkilerinin yaklaşık %80'i ile simbiyotik birliktelikler kurarak, besin maddelerini bitkiye aktarabilme yetenekleriyle bilinmektedir (Smith ve Read, 2008). Bununla birlikte, AMF'nin işlevleri sadece besin alışverişiyle sınırlı değildir; özellikle bitki-su ilişkilerini iyileştirmede de önemli roller üstlenirler (Augé, 2001). Su mevcudiyeti, bitki büyümesini sınırlayan temel unsurlardan biridir ve iklim değişikliği bağlamında giderek daha acil bir konu hâline gelmektedir (Mathur vd. 2018). Bitkiler, su kısıtlılığına karşı toleranslarını artırmak ve olumsuz etkileri hafifletmek amacıyla, aralarında AMF ile simbiyotik ilişkilerin de bulunduğu çeşitli stratejiler geliştirmişlerdir (Auge, 2001; Mo vd. 2016). AMF birlikteliğine sahip bitkilerin, gelişmiş bitki beslenmesi ve ozmoregülasyon gibi mekanizmalar sayesinde kuraklıkla daha etkin biçimde baş edebildiği bildirilmektedir (Auge vd. 2015).

Yapılan araştırmalar, AMF'nin bitki-su ilişkilerindeki etkisini yalnızca bitki beslenmesi ve ozmoregülasyonun artması ile ilişkilendirirken (Ruiz-Lozano, 2003; Mo vd. 2016), dolaylı bulgular AMF'nin doğrudan su taşıyabileceğini de ortaya koymaktadır (Faber, 1991; Ruiz-Lozano ve Azcón, 1995; Khalvati vd. 2005). AMF, bitki-su dinamiklerini birkaç dolaylı mekanizma yoluyla olumlu yönde etkileyebilir (Augé, 2001). Özellikle stoma iletkenliğinin (Kaschuk vd. 2009; Augé vd. 2015) ve kök hidrolik özelliklerinin (Aroca vd. 2007; Maurel vd. 2008) düzenlenmesinde rol oynayarak, bitkilerin ozmoregülasyon yeteneğini geliştirir (Ruiz-Lozano, 2003; Wu ve Xia, 2006) ve kuraklık kaynaklı oksidatif stresi azaltır (Porcel ve Ruiz-Lozano, 2004; Talbi vd. 2015). AMF'nin konukçu bitkiye doğrudan su taşıyabildiğini öne süren çalışmalar sınırlı sayıdadır. Faber vd. (1991) tarafından, besin maddesi taşınımını incelerken, hif ağı kesilmeyen bitkilerin kesilenlere oranla %37 daha fazla transpirasyon yaptığını tespit edilmiştir. Khalvati vd. (2005) ise köklerin ayrı tutulduğu bir kompartmana AMF'nin

erişimine izin verildiğinde, deney sonunda söz konusu kompartmanın başlangıca göre %4 daha az ağırlığa sahip olduğunu gözlemlemiştir.

Bitkilerde su taşınması hem simplastik hem de apoplastik yollarla gerçekleşirken, çevresel koşullara bağlı olarak bu iki yolun göreceli katkısı da düzenlenebilmektedir (Barzana vd. 2012). Su mevcudiyetinin sınırlı olduğu durumlarda tercih edilen simplastik yol (Steudle ve Peterson, 1998; Steudle, 2000), ozmotik bir gradyanı izleyerek, suyun plazma membranları ya da plazmodesmata yoluyla hücreden hücreye geçmesini gerektirdiği için daha yavaş işlemektedir (Steudle ve Peterson, 1998; Barzana vd. 2012). Öte yandan, bitkiler su stresi altında değilken tercih edilen apoplastik yol, suyun hücre duvarı ve matriksi boyunca çok daha az dirençle karşılaşarak doğrudan ve kesintisiz bir biçimde hareket etmesini sağlaması nedeniyle daha hızlıdır (Steudle ve Peterson, 1998; Steudle, 2000).

Hem AMF hem de bitkiler, arbuskül-bitki hücresi arayüzünde akuaporinlere sahiptir (Aroca vd. 2007; Maurel vd. 2008; Aroca vd. 2009; Li vd. 2013) ve AMF'nin kuraklık koşullarında kök hidrolik iletkenliğini ile simplastik akışı artırdığı gösterilmiştir (Aroca vd. 2007; Maurel vd. 2008). Barzana vd (2012) tarafından yapılan bir çalışmada, AMF birlikteliği bulunan bitkilerin hem kuraklık hem de kuraklık dışı koşullarda apoplastik su akışının arttığı ve aynı zamanda AMF'ye sahip olmayan bitkilere kıyasla su iletim yolları arasında daha fazla geçiş yapabildiği tespit edilmiştir. Bu bulgular, AMF hiflerinin köklerdeki apoplastik akışa su katkısında bulunabileceğine işaret etmekte ve AMF'nin, kök evapotranspirasyon yolunun bir uzantısı olarak davranarak, bitki transpirasyonunun hifal hücre zarının dış kısımlarındaki hifler boyunca su akışını yönlendirebileceğini göstermektedir.

Mikorizal hifler kökün sekiz santimetre ötesine kadar uzanabilmekte ve bir gram toprakta 30 metreye varan hif ağı bulunabilmektedir (Douds ve Millner, 1999; Gianinazzi vd. 2010). Hiflerin toprak içinde yayılması sırasında, su geçirgenliğini artıran kanallar oluşur (Jansa vd. 2006). Bu kanallar su hareketini kolaylaştırmanın yanı sıra, hiflerin toprak agregatlarını bir arada tutmasıyla erozyon oranlarının da düşmesine katkı sağlar. AMF, hidrofobik özellikteki GRSP salgılayarak toprak parçacıklarının birbirine yapışmasını sağlar ve agregatlardaki su kaybını azaltarak toprak yapısının iyileştirilmesine katkıda bulunur (Jansa vd. 2006). AMF türlerinin çeşitliliği yüksek olan topraklarda, genellikle suya dayanıklı agregatların yüzdesi daha yüksek bulunur; bu da daha kaliteli bir toprak yapısına işaret eder (Schreiner ve Bethlenfalvay, 1997).

Bitkilerin AMF ile simbiyozu, hafif ya da şiddetli kuraklık koşullarında kök kalınlığı ve uzunluğu, yaprak alanı, bitki biyokütlesi, ayrıca besin alımı ve taşınmasını artırarak genel bitki büyümesinde iyileşmeye katkıda bulunur (Chandrasekaran, 2022). Liu vd. (2016), mikorizasyonun hem yeterli sulama hem de kurak koşullarda toplam kök uzunluğu, kök çapı ve hacminde artış sağlayarak konukçu bitkilerin kök morfolojisini etkilediğini göstermiştir. Köklerdeki bu yapısal değişimlerin, kök putresin sentetazları ve ornitin dekarboksilaz gibi enzimler ile IAA yollu fitohormon dengesini düzenleyen endojen poliamin metabolizmasıyla ilişkili olabileceği bildirilmektedir (Wu ve Zou, 2017).

Farklı mikoriza türleri su kısıtı koşulları altında farklı etkiler gösterebilmektedir. Huang vd. (2011) tarafından sera koşullarında gerçekleştirilen çalışmada, kavun

(*Cucumis melo* L.) fidelerinde üç farklı arbusküler mikoriza türünün (*Glomus mosseae*, *G. versiforme* ve *G. intraradices*) su kısıtı altındaki fizyolojik ve fotosentetik tepkiler üzerindeki etkilerini incelemeyi amaçlamışlardır. Araştırmada, tam sulama ve su kısıtı olmak üzere iki farklı sulama düzeyi altında mikoriza aşılı ve kontrol grupları karşılaştırılmıştır. Bulgular, mikoriza aşılmasının kuraklık koşullarında bile büyüme ve fizyolojik performansı olumlu yönde etkilediğini ortaya koymuş; özellikle *G. mosseae*'nin yüksek kök kolonizasyon oranı ile su ve mineral alımını artırarak en güçlü etkiyi sağladığı belirlenmiştir. Bu sonuçlar, AMF türlerinin, özellikle de *G. mosseae*'nin, kuraklık stresine karşı bitkisel dayanıklılığı artırmada etkili bir biyolojik araç olabileceğini göstermektedir.

AMF türlerinin tekli veya birden fazla türü içeren konsorsiyumların kullanımı su kısıtı altında bitkilerin gelişimini etkilemektedir. Al-Karaki ve Williams (2021) tarafından yürütülen çalışma, farklı su kısıtı koşulları altında yetiştirilen soya bitkilerinin büyüme, beslenme ve fizyolojik tepkilerini, üç farklı AMF inokulantı (M1, M2, M3) ile karşılaştırmalı olarak değerlendirmeyi amaçlamıştır. M1 yalnızca *Rhizophagus intraradices* türünü içerirken; M2, *R. clarus*, *R. intraradices*, *Septoglomus deserticola* ve *Funneliformis mosseae*'den; M3 ise *R. intraradices*, *R. aggregatum*, *F. mosseae* ve *Claroideoglomus etunicatum*'dan oluşan çoklu tür karışımlarını içermektedir. Denemede iyi sulama (%90 TK), orta düzey (%60 TK) ve şiddetli (%30 TK) su kısıtı altında, mikoriza aşılanmış ve aşılanmamış bitkilerin kuru madde, kök ve gövde ağırlığı gibi büyüme parametreleri ile stomatal iletkenlik, yaprak su içeriği ve mineral alımları incelenmiştir. Bulgular, AMF ile aşıl原因an bitkilerin, özellikle su kısıtı durumlarında, aşılanmamış kontrollere kıyasla daha iyi büyüme ve beslenme performansı sergilediğini ortaya koymuştur. En dikkat çekici sonuçlar, orta ve şiddetli kuraklık koşullarında M2 inokulantının su kullanım etkinliği, besin elementi alımı ve stomatal iletkenliği en fazla artırarak bitkiyi kuraklık stresine karşı en etkili biçimde koruduğunu göstermiştir. Bu koruyucu etkinin, AMF'nin kök yüzey alanını artıran hif yapıları aracılığıyla su ve besin emilimini iyileştirmesi ve buna bağlı olarak bitkinin fizyolojik süreçlerinin devamlılığını sağlamasından kaynaklandığı belirtilmiştir.

AMF simbiyozu, kuraklık stresine karşı bitki dayanıklılığını artıran çok yönlü biyokimyasal ve fizyolojik mekanizmaları tetiklemektedir. Bu mekanizmalar arasında besin ve su alımının, enzimatik ve enzimatik olmayan antioksidanların aktivitesinin, ozmolit üretiminin, akuaporin gen ekspresyonunun ve hormon dengesinin iyileştirilmesi yer almaktadır (Mittler, 2002; Marulanda vd. 2007; Ruíz-Sánchez vd. 2010). Mikorizal bitkilerde, yaprak su potansiyeli, gaz değişim kapasitesi, stoma iletkenliği ve fotosentetik oran gibi parametrelerde anlamlı artışlar gözlenmiştir (Ruíz-Sánchez vd. 2010). AMF'nin, özellikle ABA düzeylerini ve çözünebilir şeker birikimini etkileyerek stoma iletimini düzenlediği bildirilmektedir (Porcel ve Ruiz-Lozano, 2004; Porcel vd. 2006; Ruiz-Lozano vd. 2006). *Glomus intraradices* ile kolonize edilen mısır bitkilerinde, GintAQPF1 ve GintAQPF2 aquaporin genlerinin kuraklık altında daha fazla ifade edildiği saptanmış; bu durum hif büyümesiyle artan su absorpsiyon kapasitesiyle ilişkilendirilmiştir (Li vd. 2013; Rapparini ve Peñuelas, 2014).

Besin ve su alımının iyileştirilmesi

AMF, bitkilerin su alımını belirgin şekilde artırarak su stresine karşı toleranslarını geliştiren önemli bir biyolojik unsur olarak kabul edilir. Bu mantarlar, bitkilerin kök

sistemleriyle etkileşime girerek köklerin erişemediği alanlardan su temin edilmesini sağlar. Kök yüzey alanını genişleten uzamış hif ağları sayesinde hem su hem de besin alım kapasitesini yükseltirler (Zhang vd. 2019). Özellikle kurak ve yarı kurak bölgelerde tarımsal üretim için hayati öneme sahip olan bu özellikleri bitkilere suya erişimde avantaj sağlayarak turgor basıncının korunmasına yardımcı olur. Yapılan çalışmalar, mikorizal bitkilerin mikorizasız bitkilere kıyasla su stresine daha dayanıklı olduğunu göstermektedir (Wu vd. 2011b).

AMF, bitki gelişimi için gerekli besin (özellikle N ve P) alımını da kolaylaştırarak ürün verimini artırır (Wu vd. 2021). Kök yüzey alanındaki artış, bitkilerin daha geniş bir toprak hacmine erişimini sağlayarak su ve besin elementlerinin daha etkin şekilde alımına imkân tanır (Xiao vd. 2017). Ayrıca, ince kök tüyleri ve yan köklerin gelişimini teşvik ederek su emilimini kolaylaştırır (Xiao vd. 2017). Özellikle kuraklık stresi altında fotosentetik verimlilik artışı, artan klorofil içeriği ve membran stabilitesine yönelik iyileşmeler, mikorizal bitkilerin kurak koşullara uyum sağlamasına katkıda bulunmaktadır (Pagano, 2014; Zhang vd. 2018; Gong vd. 2013).

AMF'nin su alımındaki ve agregatlaşmadaki rolü

AMF'nin su alımını artırmadaki işlevi, özellikle kuraklık koşulları altında hâlâ tartışma konusudur (Augé, 2001; Smith vd. 2010). Bitki-hif su ilişkilerinin doğası gereği, köklerin ve mantarların bireysel etkilerini ayırmak güçtür (Ruth vd. 2011). Bu amaçla, kök sistemini hif ağından ayırmaya yarayan özel bölmeli saksı sistemleri tasarlanırsa da (Faber vd. 1991; Ruiz-Lozano ve Azcón, 1995), AMF'nin toplam bitki su alımına ne ölçüde katkı sağladığını belirlemeye yönelik çalışmalar sınırlı sayıdadır. Örneğin, *Glomus intraradices* aşılantısı arpa bitkileriyle çalışan Ruth vd (2011) çalışmalarında hifal su akışının, bitkinin toplam su alımının yaklaşık %20'sini oluşturduğunu saptamış ve önceki bulguları doğrulamıştır.

Mikorizal simbiyoz, kök hidrolik iletkenliği gibi bitki hidrolik özelliklerini düzenleyerek bitki su içeriğini iyileştirebilir. Her ne kadar bazı çalışmalar AMF'nin kök hidrolik iletkenliği üzerindeki etkisini artırdığını (Sanchez-Blanco vd. 2004; Aroca vd. 2008), bazıları ise azalttığını (Aroca vd. 2007; Ruiz-Lozano vd. 2009) bildirirse de genel görüş AMF'nin bitkilerin su dengesine olumlu katkı sağladığı yönündedir.

AMF'nin oluşturduğu mikorizal yapılar, kuraklık toleransında büyük önem taşır. Kök bölgesinin ötesine uzanan hifler, bir anlamda kök sisteminin uzantısı gibi davranarak geniş bir toprak hacmine nüfuz eder ve su alımını iyileştirir (Allen, 1982). Bitki-AMF simbiyozu ayrıca toprak yapısının korunmasına ve iyileştirilmesine katkıda bulunarak, kuraklık dirençliliğini ikinci bir mekanizma üzerinden de destekler (Augé, 2001; Ruiz-Lozano, 2003). Toprak parçacıklarını bir arada tutan GRSP salgısı ve agregat oluşumu süreci ise bu etkilerin önemli bileşenlerindendir (Rillig ve Mummey, 2006; Singh vd. 2011; Miransari vd. 2007). AMF'nin salgıladığı GRSP, topraklarda su tutma kapasitesine katkıda bulunan kritik bir glikoprotein olarak tanımlanmaktadır (Rillig, 2004). Toprak agregatlarının oluşumunu teşvik ederek, suyun toprağa daha iyi nüfuz etmesini sağlar ve kuraklık koşullarında tarımsal sürdürülebilirliği destekler. Örneğin, Rillig ve Mummey (2006) çalışmalarında yüksek GRSP içeriğine sahip toprakların, düşük GRSP seviyesine sahip topraklara göre suyu daha uzun süre tutarak kuraklık koşullarında daha dirençli olduğunu saptamıştır.

Hiflerin köklerden (10–20 µm) daha küçük çapa (2–5 µm) sahip olması, kuruyan topraklardaki küçük gözeneklere ulaşabilme kabiliyeti verir. Böylece bitkilerin, kök etrafında oluşan su ve besin tükenme bölgelerini aşarak toprağı daha kapsamlı incelemesi mümkün hâle gelir (Miransari vd. 2007; Smith vd. 2010, 2011), bu da kök büyümesinin artmasına yol açabilir (Miransari vd. 2007; Subramanian vd. 2006).

Besin elementi alımı

AMF, bitki kökleriyle kurdukları simbiyotik ilişki aracılığıyla özellikle P alımında hayati bir rol oynamaktadır. Fosfor, toprakta genellikle çözünmeyen formlarda bulunduğundan, bitki kökleri tarafından doğrudan alımı sınırlıdır. Ancak AMF, kök sisteminin ötesine yayılan ekstraradikal hifleri sayesinde daha geniş bir toprak hacmine erişerek fosfat iyonlarını absorbe eder ve arbusküller aracılığıyla bitkiye taşır (Smith ve Read, 2008). Bu mekanizma, özellikle düşük fosforlu koşullarda bitkinin büyüme ve biyokütle artışını önemli ölçüde desteklemektedir (Smith vd. 2011). Ayrıca AMF, P çözünürlüğünü artırmak amacıyla organik asitler ve fosfataz enzimleri gibi bileşiklerin salınımını uyararak toprakta biyoyararlı P miktarını artırmaktadır (Jansa vd. 2011; Richardson vd. 2009). AMF'nin sadece fosfor değil, azot alımı üzerinde de önemli etkileri bulunmaktadır. Özellikle amonyum (NH_4^+) formundaki azotu hif ağı aracılığıyla bitkiye taşıyabilmeleri, düşük N koşullarında bitki N kullanım verimliliğini belirgin şekilde artırmaktadır (Govindarajulu vd. 2005; Hodge ve Storer, 2015). AMF, bitki tarafından doğrudan alınamayan N bileşiklerini mobilize etmesi ve bu süreçte N taşıma genlerinin ekspresyonunu artırması, simbiyozun besin alımındaki rolünü daha da güçlendirmektedir (Guether vd. 2009). Bu mekanizmalar, N asimilasyonunda görevli enzimlerin aktivitesindeki artışla birlikte çalışır ve söz konusu etkiler hem P alımına bağlı hem de ondan bağımsız olarak gerçekleşebilir (Ruiz-Lozano ve Azcón, 1996). Nitekim Lee vd. (2012) izotopla işaretlenmiş N kullanarak yaptıkları çalışmada, mikorizal simbiyozun kuraklık koşullarında bitki performansını öncelikle su durumu ve N alımını iyileştirerek artırdığını; bu iyileşmenin sonucunda ise protein ve amino asit içeriklerinde anlamlı artış sağlandığını göstermiştir.

AMF, sadece P ve N gibi makro elementlerin değil, aynı zamanda potasyum (K), kalsiyum (Ca) ve mikro elementlerin (Fe, Zn, Cu, Mn) alınmasında da önemli bir rol üstlenmektedir. AMF'nin ekstraradikal hifleri, kök sisteminin ötesine uzanarak bitki için erişilemeyen toprak hacimlerinden mineralleri mobilize eder ve bu minerallerin bitki köklerine taşınmasını sağlar (Begum vd. 2019). Yapılan çalışmalar, AMF ile aşıl原因an bitkilerde yaprak dokularında Fe, Zn, K ve Ca konsantrasyonlarının anlamlı düzeyde arttığını göstermiştir (Founoune-Mboup vd. 2024). Özellikle *Funneliformis mosseae* türü ile inoküle edilen bitkilerde hem mikro hem de makro element alımı belirgin şekilde artmış, bu da biyokütle birikimini ve besin değerini yükseltmiştir. AMF'nin, topraktaki mikro besin elementlerini, mikrobiyal aktivite ve enzimatik süreçlerle daha erişilebilir formlara dönüştürerek bitkinin alımını kolaylaştırdığı gösterilmiştir (Teotia vd. 2017). Ayrıca, AMF kolonizasyonu ile artan hif ağı, K ve Ca gibi mobilitesi sınırlı elementlerin taşınımında da etkili olup, özellikle su stresi altındaki koşullarda bu iyonların köklere ulaştırılmasını desteklemektedir (Bhantana vd. 2021). Sonuç olarak, AMF, bitkilerin hem makro hem de mikro besin elementlerini daha etkin kullanmalarını sağlayarak tarımsal verimliliği ve ürün kalitesini artıran sürdürülebilir bir biyolojik araç olarak öne çıkmaktadır.

Antioksidanlar

Mikorizal bitkilerde kuraklık direncini artırıcı bir diğer temel etken, antioksidan savunma sisteminin güçlenmesidir (Ruiz-Lozano, 2003). Kuraklık koşulları, singlet oksijen ($^1O_2$), süperoksit anyonu ($O_2^{\cdot-}$), hidrojen peroksit (H_2O_2) ve hidroksil ($\cdot OH$) radikalleri gibi aşırı düzeyde ROS üretilmesine neden olarak hücre hasarı veya hücre ölümüne yol açar (Smirnoff, 1993). Bitkiler, bu yüksek ROS seviyelerine karşı antioksidan bileşikler ve enzimlerden oluşan karmaşık bir yanıt ağı geliştirmiştir. Bu sistem doğrudan (örneğin ROS'u etkisizleştirme) veya dolaylı (örneğin hormon aracılı savunma gen ifadelerinin düzenlenmesi) tepkilerle işleyebilir (Apel ve Hirt, 2004; Kwak vd. 2006). Oksidatif stres, antioksidan savunma sistemi yetersiz kaldığında ve yeterli hücrel redoks dengesi korunmadığında ortaya çıkar. Antioksidan mekanizma, hem enzimatik (SOD, APX, CAT vb.) hem de enzimatik olmayan (askorbat, glutatyon, flavonoidler, karotenoidler, tokoferoller vb.; Mittler, 2002) bileşenleri kapsar.

Bu antioksidanlar yalnızca ROS'u doğrudan uzaklaştırmakla kalmaz, aynı zamanda hücrel redoks durumunun hassas sensörleri olarak da görev yaparlar. Bu sayede, hücre içi ROS düzeyini dengelemek için birçok sinyal mekanizması tetiklenir. AMF simbiyozunun kuraklık stresine karşı direnci artırması, genellikle antioksidan seviyelerinin veya aktivitelerinin yükselmesiyle ilişkilendirilir (Wu vd. 2006, b; Ruiz-Sánchez vd. 2010; Baslam ve Goicoechea, 2012). Ruiz-Sánchez vd. (2010), mikorizal simbiyozun fotosentetik performansı geliştirerek bitkilerin kuraklık yanıtını iyileştirdiğini, ancak asıl etkinin glutatyon birikimi üzerinden gerçekleştiğini ve bunun, membran lipidlerindeki oksidatif zarar ile düşük hidrojen peroksit seviyelerinde azalmayla bağlantılı olduğunu göstermiştir. Aynı araştırmada, mikorizal bitkilerde glutatyon seviyeleri artarken, askorbat seviyelerinin mikorizasız bitkilere kıyasla azaldığı rapor edilmiştir. Bu kapsamlı bulgular, kuraklık kaynaklı oksidatif strese karşı mikorizal korumanın, AMF simbiyozunun konukçu bitkilerin kuraklık direncini artırdığına dair önemli bir mekanizma olabileceğini göstermektedir (Ruiz-Lozano, 2003). Bir meta-analiz de AMF uygulanan bitkilerde antioksidan enzim düzeylerindeki artış paralelinde kuraklık stresinin azaldığına dikkat çekmiştir (Chandrasekaran, 2022).

Birçok çalışma, AMF simbiyozunun SOD, guaiakol peroksidaz, peroksidaz (POD) ve CAT gibi enzimlerin aktivitelerini yükselterek bitkilerin kuraklık stresini hafifletmesine yardımcı olduğunu kanıtlamıştır (Ruiz-Lozano vd. 1996). SOD aktivitesindeki artış, bu enzimi kodlayan genlerin transkript analizleriyle de desteklenmiştir (Ruiz-Lozano vd. 2001). Soya fasulyesi bitkilerinde, kuraklık koşullarına karşı korumanın artan GR aktivitesiyle ve buna bağlı olarak daha düşük glutatyon düzeyleri ile biyomoleküllerdeki oksidatif hasarın azalmasıyla ilişkili olduğu belirtilmiştir (Porcel vd. 2003; Ruiz-Lozano vd. 2001). Farklı antioksidan enzimlerin etkinliğini tetikleyen bu süreçler, fotosentetik aktivitede, bitki biyokütlesinde ve besin maddesi durumundaki iyileşmelerle bağlantılı bulunmuştur (Alguacil vd. 2003; Roldán vd. 2008).

AMF'de antioksidan enzim aktivitesini artırarak ROS'un nötralize edilmesini ve kuraklık toleransının gelişmesini sağlar. Örneğin, *Rhizophagus intraradices* ve *Funneliformis mosseae* ile aşıl原因an Kafkas böğürtleninde (*Celtis caucasica*) antioksidan enzim aktivitesinin artışı H_2O_2 varlığını azaltarak büyümeyi teşvik etmiştir (Sepahvand vd. 2021). Benzer biçimde, *G. etunicatum* aşılması, kuraklık altındaki Antep fıstığının

antioksidan enzimlerini geliştirmiş ve bitki büyümesini yükseltmiştir (Abbaspour vd. 2012). Aynı şekilde, *G. etunicatum*, *G. intraradices* ve *G. mosseae* türlerinin çalı at kuyruğunda (*Ephedra foliate*) SOD, CAT, APX ve GR aktivitelerini artırdığı ve bitki gelişimini desteklediği rapor edilmiştir (Al-Arjani vd. 2020). Bununla birlikte, belirli bir antioksidan bileşik ya da enzimin tepkisi, konukçu bitkinin ve mantarın türüne göre değişiklik gösterebilir. Örneğin, AMF aşılması bitki köklerinden H_2O_2 salgısını artırarak kuraklık stresinin hafifletilmesine de katkıda bulunabilir. Özellikle düşük H_2O_2 salınımı, ROS üretimindeki ani artış ile bitkiye zarar verebildiğinden, bu dengenin kurulması önem taşır. Üç yapraklı portakal (*Poncirus trifoliata*) örneğinde, *F. mosseae* ile yapılan aşılama H_2O_2 miktarının artması kuraklık stresine karşı bitki toleransını yükseltmiş ve bu da biyokütle ve genel büyüme performansındaki artışla sonuçlanmıştır (Huang vd. 2017; Zou vd. 2015).

Enzimatik olmayan antioksidan bileşikler de AMF aracılı kuraklık direnciyle ilişkilidir. Fenilpropanoid biyosentez yolunun bileşenleri (özellikle flavonoidler), karotenoidler, α -tokoferol ve diğer ikincil metabolitler bu süreçte rol oynar (Zou vd. 2021). Bazı bulgulara göre köklerdeki AMF gen transkripsiyonundaki artış, bölgesel antioksidan aktiviteye doğrudan katkı sağlayabilmektedir (Zou vd. 2021). Bu veriler bir arada değerlendirildiğinde, AMF'nin antioksidan sistemi güçlendirerek kuraklık stresi altındaki bitkilere önemli avantajlar kazandırdığı, böylece büyüme ve verimi desteklediği sonucuna varılmaktadır.

Ozmolitler

Su kısıtı koşullarında, stoma iletkenliğinin azalması ve CO_2 'ye karşı difüzyon direncinin artması sonucu bitki su potansiyeli artabilir. Ancak, topraktan su alımının devam edebilmesi için su potansiyelinin düşürülmesi gerekir. Bu amaçla bitkiler, ozmolit adı verilen uyumlu maddelerin (compatible solutes) birikimine dayanan “ozmotik ayarlama” ya da “ozmoregülasyon” mekanizmalarını kullanır (Munns, 1988; Serraj ve Sinclair, 2002). Ozmolit birikimi, hücrelerin ozmotik potansiyelini azaltarak su emilimini ve turgor korunmasını sağlarken; aynı zamanda hücre zarı ve proteinleri koruma görevini de üstlenir (Serraj ve Sinclair, 2002). Ozmolitlerin, ROS'ları etkisizleştirme sürecinde temizleyici rol oynayabileceği bildirilmektedir (Hoekstra vd. 2001).

Özellikle prolin gibi amino asitler, poliamin gibi diğer azotlu bileşikler ve çeşitli şekerler ile şeker alkoller, kuraklığın olumsuz etkilerini hafifletebilen tipik metabolitlerdir. AMF'nin aracılık ettiği biyokimyasal değişiklikler ise çoğunlukla bu koruyucu ozmolitlerin birikimi etrafında şekillenir. Pek çok bitki türünde AMF'nin kök kolonizasyonu, su sınırlayıcı ortamlarda prolin birikimini tetikler (Ruiz-Lozano vd. 1995; Azcón vd. 1996; Goiochea vd. 1998; Yooyongwech vd. 2013). Bu artan prolin birikimi, ozmoprotektan rolü sayesinde AMF kaynaklı kuraklık direnci ile ilişkilendirilmiştir. Bunun aksine, bazı araştırmalarda su açığına karşı prolin seviyeleri yükselse de mikorizal bitkilerdeki prolin miktarının mikorizasız bitkilere oranla daha düşük olduğu gözlenmiştir (Ruiz-Lozano ve Azcón, 1997; Ruiz-Sánchez vd. 2010; Abbaspour vd. 2012; Doubková vd. 2013). Bu durum, mikorizal bitkilerin daha yüksek kuraklık toleransına sahip olduğuna ve daha az strese maruz kaldığına işaret eder. Prolin ayrıca bir ROS temizleyicisi olarak denatürasyona karşı koruma sağlayabilir ve membran ile hücre altı yapıların stabilizasyonuna katkıda bulunur (Kishor vd. 2005). Serbest poliamin gibi diğer çözünebilir azotlu bileşiklerin seviyeleri de kuraklık altında artış göstererek,

ozmoprotektan olarak görev yapıp mikorizal bitkilere kuraklık direnci kazandırabilir (Goicoechea vd. 1998).

AMF kuraklık koşullarında artan ozmolit seviyeleri sayesinde ROS kaynaklı oksidatif stresi azaltır. Nitekim at kuyruğu bitkisi üzerinde gösterildiği gibi, *Glomus etunicatum*, *Glomus intraradices* ve *G. mosseae* ozmolit üretimini artırarak kuraklığın tetiklediği oksidatif hasarı azaltmış ve bitki büyümesini desteklemiştir (Al-Arjani vd. 2020). Benzer şekilde, Antep fıstığı kuraklık koşullarında *G. etunicatum* ile aşılandığında prolin seviyelerinde artış gözlenmiş, bu da oksidatif hasarı azaltarak bitki büyümesi ve gelişimini iyileştirmiştir (Abbaspour vd. 2012).

Akuaporinler

AMF, bitkilerin kuraklık stresi altındaki su kullanım verimliliğini artırma potansiyeliyle dikkat çeken simbiyotik organizmalardır. Bu simbiyozun fizyolojik etkileri, büyük ölçüde su taşınımı ve düzenlenmesiyle ilgili bitki genlerinin ekspresyon düzeyleri üzerinden şekillenmektedir. Bu bağlamda, özellikle hücrel su hareketliliğinde kilit rol oynayan membran proteinleri olan akuaporinler, hem bitkisel hem mikorizal düzeyde önemli düzenleyici bileşenler olarak ön plana çıkmaktadır (Conner vd. 2013; Maurel vd. 2008).

Akuaporinler; kök ve yaprak gibi su taşıma açısından aktif bitki dokularında, plazma membranı üzerinden su ve yüksüz küçük moleküllerin geçişini düzenleyen integral proteinlerdir. Bu işlevleri sayesinde, kök hidrolik iletkenliğini artırarak suyun topraktan bitkiye taşınmasını kolaylaştırır; aynı zamanda stoma iletkenliğini düzenleyerek transpirasyonu dengeleyip su kullanımını optimize ederler (Ruiz-Lozano vd. 2006, 2009; Aroca vd. 2008). AMF kolonizasyonunun tetiklediği gen ekspresyon değişiklikleri, kuraklık stresine karşı bitki direncinin temelini oluşturur. Akuaporin genlerinin artan ekspresyonu, suyun bitki dokuları arasında daha etkin şekilde dağılmasını sağlayarak hidrasyonu artırır ve kuraklık koşullarında büyüme performansını destekler (Li, Hu vd. 2013).

AMF kolonizasyonunun ardından hem bitki hem de mantara ait akuaporin genlerinin ekspresyon düzeyleri, çevresel koşullara bağlı olarak değişiklik gösterebilir. Özellikle kuraklık altında, bazı akuaporin genlerinin ekspresyonunda belirgin bir azalma bildirilmiştir (Porcel vd. 2006; Aroca vd. 2007). Ancak bu azalma, protein düzeylerinde veya fonksiyonel aktivitede (örneğin fosforilasyon durumu ya da membran yerleşimi) doğrudan bir azalmayı yansıtmamaktadır. Örneğin, *G. intraradices* ile aşılanmış *Phaseolus vulgaris* bitkileri üzerinde yapılan çalışmalarda, mikorizal bireylerin kuraklık koşullarında kontrol bitkilerine kıyasla daha düşük akuaporin gen ekspresyonuna rağmen kök hidrolik iletkenliği ve yaprak transpirasyon oranlarında da azalma gözlenmiştir (Aroca vd. 2007). Bu sonuçlar, mikorizal bitkilerin su tasarrufu sağlayan bir fizyolojik ayarlamaya gittiğini ve bu düzenlemenin akuaporin aktivitesiyle sınırlı olmadığını göstermektedir.

Buna karşın, bazı çalışmalarda kuraklık koşullarında akuaporin ekspresyonunun arttığı da bildirilmiştir. Li vd. (2012), mısır bitkilerinde hem bitkisel hem mikorizal akuaporin genlerinin ekspresyonunun kuraklık altında yükseldiğini ve bu artışın protein birikimi ile kök su içeriğinde eşzamanlı artışa neden olduğunu göstermiştir. Bu bulgular,

AMF'nin yalnızca bitkiye ait değil, aynı zamanda mantar kökenli akuaporinlerin de regülasyonunda aktif rol oynadığını ve bu iki sistemin koordineli bir şekilde çalışarak bitkinin su ilişkilerini optimize ettiğini düşündürmektedir. Benzer biçimde, Bárzana vd. (2012), "hücreden hücreye" ve apoplastik su taşınım yollarını ayırmak için özel teknikler kullanarak, mikorizal köklerde kuraklık sırasında apoplastik akışın arttığını göstermiştir. Bu artış, mikorizal bitkilerin farklı su taşınım yollarını esnek biçimde kullanarak stres koşullarına uyum sağladığını göstermektedir.

Bitki-AMF simbiyozunda yalnızca su değil, aynı zamanda besin alışverişi de gerçekleşmektedir. Bu ilişkinin moleküler mekanizmaları henüz tam olarak aydınlatılamamış olmakla birlikte, akuaporinlerin bu süreçte de görev alabileceği öngörülmektedir. Örneğin, *Medicago truncatula*'nın periarbusküler membranlarında çeşitli akuaporinlerin varlığı gösterilmiş; bazı akuaporinlerin yalnızca su değil, aynı zamanda amonyak veya amonyum gibi N bileşiklerinin taşınımında da rol alabileceği öne sürülmüştür (Uehlein vd. 2007). Bu durum, simbiyotik N taşınımının da akuaporinler aracılığıyla düzenlenebileceği yönünde yeni sorular doğurmuştur.

Fitohormonlar

AMF bitkilerdeki hormonal dengeyi değiştirebileceği ve dolayısıyla su stresini yönetmede büyük etkiye sahip olduğu bilinmektedir. Özellikle IAA seviyelerindeki artış, stomaların gelişimi ve işleyişinde önemli bir rol oynar. Bazı durumlarda bu hormonal değişim, bitkinin transpirasyonla su kaybını daha etkin şekilde düzenlemesini sağlayan stoma yoğunluğunda yükselişe neden olabilir (Chareesri vd. 2020). AMF kolonizasyonunun, pirinç bitkilerinde daha düşük ABA seviyeleriyle de ilişkili olduğu gözlenmiştir. ABA genel olarak su stresine hızlı bir tepki olarak stoma kapanmasına yol açıp terlemeyi azaltırken, daha yüksek AMF kolonizasyonu altında bitkinin ABA seviyesi düşmekte; bu da kuraklık koşullarının daha verimli yönetilmesine katkıda bulunmaktadır (Bharath vd. 2021). Bu bağlamda, kuraklık koşullarında hormon dengesinin değişmesi, AMF kolonizasyonunun konukçu bitkilerde kuraklık etkilerini azalttığı olası mekanizmalardan biri olarak kabul edilmektedir.

2.5. AMF ve Hıyar Bitkisi

AMF, bitki kökleriyle simbiyotik ilişkiler kurarak toprakta çözünürlüğü düşük olan besin maddelerinin bitkiler tarafından daha etkin alınmasını sağlayan, sürdürülebilir tarım açısından önemli mikroorganizmalardır. Özellikle P ve Zn gibi hareketliliği sınırlı elementlerin alınmasını kolaylaştıran AMF, aynı zamanda bitki büyümesini teşvik eden fitohormon üretimi, su alımı ve abiyotik stres toleransı gibi birçok faydayı da beraberinde getirmektedir (Çiftçi vd., 2010; Ortaş, 2010; Wang vd. 2008; Chen vd. 2017). Son yıllarda yapılan çalışmalar, AMF uygulamalarının hıyar bitkisinde hem gelişim hem de verim parametreleri üzerinde önemli etkiler yarattığını göstermektedir (Tüfenkçi vd. 2012; Ahmad vd. 2018; Chen vd. 2017; Ortaş, 2010).

AMF uygulamaları, hıyar fidelerinde erken dönem büyüme parametrelerini olumlu yönde etkilemektedir. Tüfenkçi vd. (2012) tarafından yürütülen çalışmada, dört farklı hibrit hıyar çeşidinde uygulanan *Glomus intraradices*, *G. etunicatum* ve *Gigaspora margarita* türlerinin hipokotil uzunluğu, kotiledon genişliği ve kök uzunluğu gibi fide gelişim özelliklerini anlamlı düzeyde artırdığı belirlenmiştir. Benzer şekilde, Chen vd.

(2017), farklı AMF kombinasyonları ile inoküle edilen hıyar fidelerinde bitki boyu, gövde çapı, kuru ağırlık ve kök/sürgün oranında önemli artışlar gözlemlenmiş; özellikle genetik olarak uzak türlerin birlikte kullanımının bu parametrelerde daha yüksek iyileşme sağladığını rapor etmiştir. Ayrıca, bu simbiyotik ilişkinin fotosentez oranı ve klorofil içeriği gibi fizyolojik özellikler üzerindeki katkısı da vurgulanmıştır.

AMF'nin en dikkat çeken etkilerinden biri, bitkinin topraktan besin elementi alımını artırmasıdır. Çiftçi vd (2010) tarafından tuz stresi altında yürütülen bir çalışmada, *Glomus mosseae*, *Glomus intraradices* ve *G. fasciculatum* türlerinin steril ortamda uygulanmasının bitki büyümesini anlamlı düzeyde artırdığı, bu etkinin özellikle P, Zn ve Mn alımındaki artışla ilişkili olduğu belirtilmiştir. Wang vd. (2008) ise, saksı denemelerinde *G. mosseae* uygulamasının hem N hem de P konsantrasyonlarını artırdığını, buna karşın K ve Fe düzeylerinin azaldığını rapor etmiştir. Bu farklılıklarda, türler arası işlevsel farklılıkların ve bitki ile mikoriza uyumunun etkili olduğu düşünülmektedir.

Besin alımındaki iyileşmeler, doğrudan verim artışı olarak da kendini göstermektedir. Ortaş (2010), Adana koşullarında yaptığı uzun dönemli tarla çalışmalarında, farklı *Glomus* türlerinin kullanımıyla fide tutma oranı ve meyve veriminde önemli artışlar gözlemlenmiş, özellikle yerli mikoriza inokulumlarının verime olan katkısının belirgin olduğunu vurgulamıştır. Aynı doğrultuda, Ahmad vd. (2018), *Glomus versiforme* ile yapılan AMF inokulasyonunun hıyar bitkilerinde meyve verimini artırdığını ve Na birikimini azaltarak tuzluluk stresine karşı toleransı artırdığını bildirmiştir.

AMF, hıyar bitkisinin abiyotik stres koşullarına karşı dayanıklılığını artırmadaki rolü son yıllarda birçok çalışmada detaylı şekilde ortaya konmuştur. Özellikle düşük sıcaklık, yüksek sıcaklık, tuzluluk, alkalilik ve patojen baskısı gibi stres koşullarında AMF'nin bitki fizyolojisi üzerindeki düzenleyici etkileri dikkat çekicidir. Örneğin, düşük sıcaklık koşullarında *Funneliformis mosseae* ile inoküle edilen hıyar bitkilerinde köklerde H₂O₂ birikiminin %42'ye varan oranda azaldığı, NADPH oksidaz aktivitesinin düşürüldüğü ve plazma membranı ATPaz aktivitelerinin (H⁺-ATPaz, Ca²⁺-ATPaz ve V-ATPaz) arttığı belirlenmiştir. Bu değişimler ATP seviyelerinde ve ilgili gen ekspresyonlarında artışa yol açarak düşük sıcaklık stresine karşı hücrel enerji dengesini koruyarak toleransı artırmıştır (Liu vd. 2014).

Benzer şekilde, kısa süreli yüksek sıcaklık stresine maruz bırakılan hıyar fidelerinde *Diversispora versiformis* ile yapılan AMF inokulasyonu, bitki boyu, gövde çapı, biyokütle ve klorofil indeksini anlamlı düzeyde artırmıştır. Ayrıca, sukroz, fruktoz, glukoz, betain ve prolin gibi ozmolit seviyelerinde yükselme sağlanmış; bu durum, sıcaklık stresine karşı ozmotik düzenlemeyi desteklemiştir. Aynı çalışmada, CsPIP (plazma membranı intrinsek proteinleri) ve CsHsp70 (ısı şok proteinleri) genlerinin ekspresyon düzeylerinin değiştiği, özellikle CsPIP1;6 ve CsHsp70-8'in artış gösterdiği bildirilmiştir (Liu vd. 2023).

Tuzluluk stresi altında yapılan bir çalışmada ise, *Glomus versiforme* uygulaması ile birlikte 28-homobrassinolide (steroid yapılı bitki hormonu) püskürtmesinin fotosentez, besin alımı ve antioksidan enzim aktivitelerinde belirgin artışlar sağladığı; özellikle SOD, POD ve CAT gibi enzimlerin aktivitesinin artmasıyla Na⁺ birikiminin

azaldığı ve hücre zarının zarar görmesinin önlendiği gözlenmiştir (Ahmad vd. 2018). Alkalilik koşullarında yapılan başka bir çalışmada, AMF uygulanan bitkilerde verim, toplam biyokütle ve net fotosentez oranlarının yükseldiği, yaprak dokularında P, K, Mg, Fe ve Zn gibi besin maddelerinin daha yüksek düzeylerde tutulduğu bildirilmiştir (Rouphael vd. 2010).

Al-Hinai vd. (2024) tarafından yürütülen çalışmada, AMF kuraklık stresi altındaki hıyar bitkilerinde büyüme, fizyolojik dayanıklılık ve stres toleransı üzerindeki etkileri, sulama rejimleri ile birlikte değerlendirilmiştir. Bitkiler, toprak su tutma kapasitesinin %80'i ile tam sulama ve %60'ı ile kuraklık stresi uygulanan iki farklı sulama düzeyinde yetiştirilmiş; her iki rejimde de kontrol (AMF uygulanmamış), yerel (*Rhizoglossum arabicum*, *R. custos* ve *Septoglossum viscosum*) ve ticari (*Funneliformis mosseae* dâhil beş tür içeren) AMF inokulumları ile potasyum silikat uygulamasının bireysel ve kombinasyon etkileri araştırılmıştır. Bulgular, özellikle kuraklık koşullarında AMF uygulamasının bitki boyu, sürgün yaş ağırlığı, SPAD değeri, fotosistem II (Fv/Fm) verimliliği, prolin ve glisin betain birikimi ile CAT aktivitesi gibi parametrelerde anlamlı artış sağladığını göstermiştir. Ticari ve yerel AMF türlerinin çoğu parametrede benzer düzeyde etki gösterdiği belirlenmiştir. Potasyum silikatın tek başına uygulanması, kök yaş ve kuru ağırlıklarında azalmaya yol açmış; buna karşılık AMF ile birlikte uygulandığında sinerjik bir etki oluşturarak bu olumsuzlukları telafi etmiş ve bitkilerin kuraklık stresine karşı dayanıklılığını daha da artırmıştır. Ayrıca Küçükymuk vd. (2014) tarafından AMF'nin toprak kökenli patojenlere karşı biyolojik savunma sistemi oluşturduğu da gösterilmiştir. *Glomus intraradices* ile yapılan inokulasyon, *Pythium deliense* kaynaklı kök çürüklüğü hastalığına karşı direnci artırmış, Zn ile birlikte uygulandığında bu biyokontrol etkisinin daha da güçlendiği görülmüştür,

Sonuç olarak, çok sayıda bilimsel çalışma, AMF uygulamalarının hıyar bitkisinde hem vejetatif gelişim hem de generatif dönem parametreleri üzerinde önemli ve olumlu etkiler oluşturduğunu ortaya koymaktadır. Bu olumlu etkilerin temelinde, besin elementi alımının artırılması, fotosentez kapasitesinin geliştirilmesi ve genel bitki fizyolojisinin iyileştirilmesi yatmaktadır. Bununla birlikte, farklı AMF türlerinin bitki üzerindeki etkilerinde belirgin farklılıklar gözlenmesi, bitki-mantar uyumunun dikkate alınarak uygun tür seçiminin yapılmasını gerekli kılmakta; bu da gelecekte hedefe yönelik ve tür odaklı mikorizal uygulamaların önemini artırmaktadır. Özellikle abiyotik stres koşullarında, AMF uygulamaları fotosentezin desteklenmesi, hücresel enerji metabolizmasının düzenlenmesi, ozmotik dengenin korunması ve antioksidan savunma sistemlerinin güçlendirilmesi yoluyla stresin olumsuz etkilerini azaltmakta; bu sayede bitkilerin büyüme ve gelişimini destekleyen etkili bir biyolojik adaptasyon mekanizması sunmaktadır.

2.6. PGPR

Bitki büyümesini teşvik eden rizobakteriler (PGPR), bitki konakçısında kolonize olabilen ve hem büyümeyi hem de stres toleransını artırabilen geniş bir mikrobiyal grup olarak tanımlanmaktadır (Lugtenberg ve Kamilova, 2009). Bu bakteriler, bitki ile etkileşime girdiklerinde olumlu fizyolojik tepkiler oluşturarak, yerel mikrobiyal topluluklar üzerinde baskın bir yapı sergiler ve bu yönüyle PGPR olarak nitelendirilir (Jha ve Saraf, 2015). Söz konusu mikroorganizmalar, bitki dokusu içinde endofitik olarak ya da rizosfer ve filosfer gibi dış ortamlarda tek başlarına veya birlikte kolonize olabilirler

(Oleńska vd. 2020; Santoyo vd. 2016). Bu bağlamda rizosfer, bitki köklerini çevreleyen ve kök eksüdalarının belirleyici olduğu, karmaşık yapıya sahip bir mikrobiyal ekolojik niş olarak öne çıkar (Berendsen vd. 2012). Bitkiler, bu alandaki mikrobiyal yaşamı yönlendirmek ve sürdürmek amacıyla C bazlı metabolitler, sakkaritler, amino asitler, organik asitler, sekonder metabolitler ve su gibi çeşitli bileşikler salgılar (Bertin vd. 2003; Lugtenberg ve Kamilova, 2009). Gargallo-Garriga vd. (2018), bu kök eksüdalarının, çevresel strese bağlı olarak miktar ve içerik açısından değişebildiğini belirtmiştir.

Rizosferik bakteriler, genellikle bu eksüdaları besin kaynağı olarak kullanma yeteneğine sahip olduklarından, bu mikroorganizmaların rizosferde kalıcılığı ve etkin kolonizasyonu, sahip oldukları metabolik çeşitlilikle doğrudan ilişkilidir (Goswami vd. 2016; Oleńska vd. 2020; Philippot vd. 2013). Bitki gelişimini ve stres toleransını artıran bu mikroorganizmalar, söz konusu etkiyi doğrudan veya dolaylı mekanizmalar aracılığıyla gerçekleştirmektedir. Doğrudan mekanizmalar arasında bitkinin makro ve mikro besin elementlerine erişiminin artırılması, fitohormon sentezinin düzenlenmesi ve ozmolitler ile vitamin gibi ikincil metabolitlerin üretilmesi yer alırken; dolaylı mekanizmalar, fitopatojen mikroorganizmalara karşı antagonistik etki ve indüklenmiş sistemik direnç gibi savunma tepkilerini kapsamaktadır (Goswami vd. 2016). Bu karmaşık ve birbiriyle ilişkili süreçler hem bitki büyümesini hem de beslenmesini etkileyerek, farklı stres koşullarında bile bitkinin gelişimini destekleyen bütüncül bir destek sistemi oluşturur (Amaya-Gómez vd. 2020; Lugtenberg ve Kamilova, 2009; Oleńska vd. 2020).

Bu mekanizmaların etkinliği, özellikle ozmotik stres (kuraklık ve tuzluluk gibi) ve düşük besin konsantrasyonu gibi koşullarda daha belirgin hâle gelmekte ve bu mikroorganizmaların tarımsal sistemlerde kullanım potansiyelini ön plana çıkarmaktadır (Goswami vd. 2016). PGPR'nin sunduğu en önemli avantajlardan biri, bitkilerin besin alım kapasitesini artırarak dışsal gübre uygulamalarına olan bağımlılığı azaltmalarıdır. Adesemoye vd. (2009), bu bakterilerin özellikle N, P ve K gibi temel besin elementlerinin kullanılabilirliğini artırarak gübreleme kaynaklı çevresel riskleri azalttığını vurgulamaktadır. Bu bağlamda Wang vd. (2020), farklı PGPR suşlarının düşük doz gübre uygulamaları altında bile buğday (*Triticum aestivum*) gelişimini ve verimini artırdığını belirtmiştir.

Besin kullanılabilirliğini artırmada etkin olan mikrobiyal mekanizmalar; N fiksasyonu, Fe şelasyonu, kükürt (S) oksidasyonu ve P, K ile Zn gibi elementlerin çözünürlüğünü içermektedir. N fikse eden bakteriler ise simbiyotik ya da serbest yaşayan diazotroflar olarak iki grupta sınıflandırılmaktadır. Simbiyotik N fiksatörleri, genellikle baklagillerle mutualistik ilişki kuran *Allorhizobium*, *Azorhizobium*, *Bradyrhizobium*, *Mesorhizobium*, *Rhizobium* ve *Sinorhizobium* gibi türleri kapsar ve kök nodülleri oluşturarak atmosferik azotu bitki için kullanılabilir forma dönüştürürler (Lindstrom ve Mousavi, 2020; Vessey, 2003). Öte yandan, serbest yaşayan diazotroflar bitki dokusuna doğrudan nüfuz etmeseler bile, rizosferde kurdukları yakın ilişki aracılığıyla sabitlenen azotun bitki tarafından kullanılabilir hâle gelmesini sağlarlar (Goswami vd. 2016). Bu gruba ait mikroorganizmalar çok daha çeşitli olup *Acetobacter*, *Arthrobacter*, *Azoarcus*, *Azospirillum*, *Azotobacter*, *Bacillus*, *Burkholderia*, *Citrobacter*, *Clostridium*, *Enterobacter*, *Erwinia*, *Herbaspirillum*, *Klebsiella*, *Kluyvera*, *Phyllobacterium*, *Pseudomonas*, *Serratia* ve *Streptomyces* gibi birçok türe ait örnekler literatürde yer almaktadır (Mahmud vd. 2020; Oleńska vd. 2020).

Örnek olarak, *Azospirillum spp.* ve *Bacillus pumilus* suşlarının mısır ve buğdayda N birikimini ve tane verimini artırdığı; *Bacillus* türlerinin domates (*Solanum lycopersicum*) bitkisinde benzer şekilde azot birikimini desteklediği gösterilmiştir (Garcia De Salamone vd. 1996; Kuan vd. 2016; Sabry vd. 1997; Adesemoye vd. 2010). Ayrıca, *Serratia* cinsine ait türlerin, *Nothofagus alpina* (rauli kayını) bitkisinde klorofil içeriğini, büyüme parametrelerini ve N birikimini artırdığı da Martinez vd. (2018) tarafından bildirilmiştir.

2.7. PGPR ve Kuraklık

Kuraklık stresi, bitkilerde fotosentez oranında düşüş, stomatal kapanma, kök ve sürgün gelişiminde azalma gibi ciddi fizyolojik ve morfolojik değişimlere yol açarak verimde önemli kayıplara neden olmaktadır (Ahluwalia vd. 2021). Bu stres faktörüne karşı bitkisel savunma mekanizmalarını desteklemek amacıyla PGPR'lar önemli bir strateji olarak öne çıkmaktadır (Ojuederie vd. 2019). PGPR'lar, bitkilerin su stresi altında daha iyi performans göstermesini sağlayacak şekilde antioksidan sistemleri güçlendirebilmekte, ozmotik dengeyi koruyan uyumlu maddelerin birikimini teşvik edebilmekte ve kök sistem mimarisini değiştirebilmektedir (Ahmad vd. 2022; Vociante vd. 2022). Özellikle su içeriğinin korunması, eksopolisakkarit üretimi (EPS) ile desteklenerek kök çevresinde hidratlı bir mikro çevre oluşturulmakta, bu da bitkilerin susuzlukla mücadele etmesini kolaylaştırmaktadır (Chang vd. 2007). Buna ek olarak, PGPR uygulamaları, abiyotik stresler altında bitkide meydana gelen ROS birikimini azaltarak hücrel zararın önüne geçmektedir (Ahluwalia vd. 2021; Ahmad vd. 2022).

PGPR'lar tarafından üretilen spesifik bileşikler ve enzimler de kuraklık stresinin hafifletilmesinde kritik rol oynamaktadır. Örneğin, ACC deaminaz enzimi sayesinde bitkilerde stres yanıtı olarak artan etilen düzeyleri düşürülmekte ve böylece büyüme baskılanması önlenmektedir (Ojuederie vd. 2019; Ahmad vd. 2022). Ayrıca, *Pseudomonas putida* gibi türler tarafından sentezlenen IAA kök sisteminin gelişimini teşvik ederek su ve besin alımını artırmakta, dolayısıyla bitkinin kuraklıkla başa çıkma kapasitesini yükseltmektedir (Patten ve Glick, 2002). EPS üretimi sayesinde ise toprağın su tutma kapasitesi artırılarak hem kök çevresi korunmakta hem de biyofilm oluşumu ile bitkilerin strese karşı dayanıklılığı desteklenmektedir (Chang vd. 2007). Bunun yanı sıra, PGPR'ların uçucu organik bileşikler ve siderofor üretimi gibi ek mekanizmalarla da bitkisel stres toleransını güçlendirdiği gösterilmiştir (Vociante vd. 2022; Zboralski ve Filion, 2023).

Günümüzde PGPR'ların tarım sistemlerinde kuraklık stresine karşı kullanımı giderek daha fazla önem kazanmaktadır. PGPR'ların kuraklık stresinde etkinliğinin, kullanılan su kısıtı derecesi ve çevresel koşullara bağlı olarak değişmekle birlikte, doğru su kısıtı yönetimi ve uygun PGPR türü seçimi ile bu etkiler maksimize edilebilmektedir (Ahmad vd. 2022; Ojuederie vd. 2019). Özellikle multifonksiyonel PGPR suşlarının, birden fazla mekanizma üzerinden etkili olarak hem su eksikliğine hem de toprakta biriken tuz gibi diğer stres faktörlerine karşı koruma sağladığı belirtilmektedir (Ahluwalia vd. 2021; Mohamed vd. 2021). Ayrıca, PGPR'ların sadece tarımsal üretimi artırmakla kalmayıp aynı zamanda ekosistem sağlığını da koruma potansiyeline sahip olduğu vurgulanmaktadır (Vociante vd. 2022; Mohamed vd. 2021). Ancak bu biyolojik ajanların saha koşullarındaki performanslarının artırılması için, PGPR-bitki etkileşimlerinin moleküler düzeyde daha derinlemesine anlaşılması ve çevresel stres

koşullarına uyum sağlayabilen suşların seçimi kritik öneme sahiptir (Ahmad vd. 2022; Zboralski ve Fillion, 2023).

Besin alınabilirliğinin artırılması

Toprakta bulunan P, çeşitli metal iyonlarıyla (alüminyum, Ca, Fe gibi) etkileşime girerek çözünmeyen bileşikler hâline dönüşme eğilimindedir. Bu durum, bitki kökleri tarafından P'nin doğrudan alınabilirliğini ciddi şekilde sınırlandırır (Goswami vd. 2016). Bu nedenle, P'nin bitki için kullanılabilir formuna dönüştürülmesi, P çözücü PGPR'ların en temel ve belgelenmiş işlevlerinden biridir (Alori vd. 2017). Yapılan araştırmalara göre, bu mikroorganizmaların tarımsal sistemlere entegre edilmesi, P gübrelemesinde yaklaşık %33 oranında bir azalma sağlamaktadır (Granada vd. 2018). Bu çözme işlemi, genellikle glukonik, 2-ketoglukonik, asetik, laktik, malik, süksinik, tartarik, oksalik ve sitrik asit gibi organik asitlerin salınımı yoluyla toprağın pH'nın düşürülmesiyle gerçekleşmektedir. Buna ek olarak, bazı bakteriler organik P bileşiklerini, asit fosfatazlar, fitazlar ve fosfonatazlar gibi enzimler aracılığıyla hidrolize ederek, bitki tarafından alınabilen inorganik formlara dönüştürebilmektedir (Rodriguez ve Fraga, 1999; Sharma vd. 2013).

Fosfor çözücü bakteriler, başta *Arthrobacter*, *Aspergillus*, *Azotobacter*, *Bacillus*, *Pseudomonas* ve *Serratia* olmak üzere çeşitli türlerdir ve farklı bitki türlerinde büyümeyi destekleme potansiyeline sahiptir. Bu bakterilerin başarıyla uygulandığı bitki türleri arasında *Rubus idaeus* (ahududu) (Orhan vd. 2006), *Vicia faba* (bakla) (Borgi vd. 2020), *Fragaria ananassa* (çilek) (Güneş vd. 2009), mısır (Vyas ve Gulati, 2009), *Oryza sativa* (pirinç) (Lavakush vd. 2014) ve buğday (Anzuay vd. 2015; Emami vd. 2020; Kaur ve Reddy, 2015; Kumar vd. 2014) yer almaktadır.

Fosfor çözücülüğünün yanı sıra, K ve Zn gibi diğer makro ve mikro besin elementlerinin bakteriyel çözülmesi üzerine yapılan çalışmalar, bu minerallerin biyoyararlanımını artırarak bitki büyümesini desteklediğini göstermektedir. Bu çözücülüğün de temelinde, organik asit üretimi mekanizması yer almaktadır. Zn çözücü PGPR suşlarının mısır, soya fasulyesi, buğday ve pirinçte Zn alımını artırdığı ve bitkilerin dokularında Zn seviyesini yükselttiği rapor edilmiştir (Goteti vd. 2013; Hussain vd. 2015; Kamran vd. 2017; Khvee vd. 2017; Ramesh vd. 2014; Vaid vd. 2014). Benzer şekilde, K çözücü PGPR suşlarının buğday, pirinç, çavdar, karabiber, tütün ve patlıcan çeşitli bitkilerde K içeriğini ve büyüme performansını önemli ölçüde artırdığı belirlenmiştir (Bakhshveeh vd. 2017; Han ve Lee, 2005; Sangeeth vd. 2012; Sheng ve He, 2006; Sun vd. 2020; Xiao vd. 2017; Zhang ve Kong, 2014).

Fe ve Cu gibi bazı mikro besin elementleri yüksek konsantrasyonlarda toksik olabilmekle birlikte hem mikrobiyal hem de bitkisel metabolizma için esastır. Özellikle Fe, toprakta ferrik formda bol miktarda bulunmasına rağmen, bu form bitki ve mikroorganizmalar tarafından doğrudan kullanılamaz. Bazı PGPR türleri, siderofor adı verilen düşük molekül ağırlıklı organik bileşikler üretmek suretiyle demirin alınabilirliğini artırmaktadır (Goswami vd. 2016). Bu sideroforlar, Fe gibi metalleri bağlayarak bitkinin kullanımına sunar. Örneğin, *Burkholderia cepacia* JFW16 suşu ile aşılanan *Astragalus sinicus* bitkisinde, Fe içeriği artmış ve Fe alımıyla ilişkili gen ekspresyonunda pozitif yönde değişimler tespit edilmiştir (Zhou vd. 2018). Benzer şekilde, *Pseudomonas* GRP3 suşunun *Vigna radiata* (maş fasulyesi) üzerinde

uygulandığı denemelerde, bitki dokusunda hem Fe hem de klorofil içeriğinde belirgin bir artış gözlenmiştir (Sharma vd. 2003). Ayrıca, mikrobiyal sideroforların *Pisum sativum* (bezelye) üzerinde uygulanması sonucunda Fe eksikliği belirtilerinin azaldığı bildirilmiştir (Lurthy vd. 2020).

PGPR, aynı zamanda elementel kükürdü oksitleyerek biyolojik olarak kullanılabilir sülfat formuna dönüştürmekte ve bu sayede bitki büyümesini desteklemektedir. *Thiobacillus* cinsi, mısır ve yer fıstığı bitkilerinde hem büyümeyi hem de S alımını artırma potansiyeline sahip en yaygın S oksitleyici bakteriler arasında yer almaktadır (Anveham vd. 2007; Pourbabaee vd. 2020). Bununla birlikte, *Dyella thiooxydans* ve *Microbacterium phyllosphaerae* gibi diğer PGPR suşlarının da mısırdaki benzer etki gösterdiği, ayrıca *Proteus mirabilis* ve *Pseudomonas* sp. türlerinin sırasıyla *Foeniculum vulgare* (rezene) ve *Allium sativum* (sarımsak) bitkilerinde hem büyümeyi hem de toprakta kükürt içeriğini artırdığı ortaya konmuştur (Anveham vd. 2014; Dhiman vd. 2019; Youssif vd. 2015).

Besin maddelerinin biyoyararlanımına ilişkin kısıtlamalara ek olarak, ozmotik stresin (örneğin kuraklık ve tuzluluk) de besin alımını olumsuz etkilediği bilinmektedir. Su stresi, stomaların kapanmasına neden olarak hem su hem de besin emilimini azaltmakta; bu durum, bitkide birçok metabolik süreci sekteye uğratmaktadır (Xiong ve Zhu, 2002). Ancak PGPR uygulaması, bu tür stres koşullarında da bitkilerin besin alım kapasitesini artırabilmektedir. Nitekim, *Lactuca sativa* (marul) bitkisine su stresi altında uygulanan PGPR inokulantlarının doku besin içeriğini artırdığı (Şahin vd. 2015) ve benzer şekilde, tuzlu koşullarda yetiştirilen çilek bitkilerinde de besin elementlerinin artış gösterdiği bildirilmiştir (Karlıdağ vd. 2013).

Fitohormon üretimi ve düzenlemesi

Fitohormonlar, bitkilerin büyüme ve gelişmesinin pek çok yönünü düzenleyen ve aynı zamanda abiyotik stres koşullarında kritik roller üstlenen biyolojik düzenleyicilerdir (Egamberdieva vd. 2017; Goswami vd. 2016). PGPR'ler, bitki kök eksüdatlarını kullanarak oksin, sitokinin, gibberellin ve ABA gibi çeşitli fitohormonları sentezleyebilmekte, ayrıca strese bağlı olarak artan etilen üretiminin öncüsü olan ACC parçalayabilen ACC deaminaz enzimi üretmektedirler. Böylece etilen sentezi baskılanarak bitkinin stres yanıtları daha dengeli hâle getirilebilmektedir (Glick, 2005).

IAA üreten *Ochrobactrum*, *Pseudomonas putida* ve *Bacillus megaterium* izolatlarının su stresine maruz kalan mısırdaki kök ve sürgün büyümesini olumlu yönde etkilediği; *Streptomyces* spp. ve *Bacillus amyloliquefaciens* S-134 suşlarının da buğdayda benzer etkiler gösterdiği belirlenmiştir (Raheem vd. 2018; Yveigeri vd. 2012). Tuz stresi altında *Pseudomonas* spp.'nin buğdayın kök gelişimini artırdığı, düşük besin koşullarında *Serratia* sp. 5D'nin nohutta büyümeyi teşvik ettiği ve IAA üreten mikrobiyal konsorsiyumların N içeriği ve tohum verimini artırdığı raporlanmıştır (Zaheer vd. 2016; Perez Fernveez ve Alexveer, 2017). Bu etkilerin, etilen üretiminin baskılanması ile birlikte daha da belirginleştiği bildirilmektedir (Lopez-Bucio vd. 2007; Poupin vd. 2016).

Abiyotik stres koşullarında önemli rol oynayan bir diğer fitohormon olan ABA, köklerde sentezlenip yapraklara taşınarak stomaların kapanmasını sağlar ve transpirasyonu sınırlandırır (Vishwakarma vd. 2017). ABA aynı zamanda stres yanıt

genlerini aktive ederek bitkinin su içeriği ve kök gelişimini düzenler (Cutler vd. 2010; Sah vd. 2016). *Bacillus megaterium* ile yapılan çalışmalar, yabancı tip domateste büyümeyi artırırken ABA sentezleyemeyen mutantlarda büyümenin baskılandığını ve etilen üretiminin arttığını göstermiştir (Porcel vd. 2014).

Gibberellinler, sitokininler, ve jasmonik asit gibi diğer hormonlar da PGPR tarafından sentezlenebilmektedir. Bu hormonlar, büyüme ve stres toleransını sinerjik biçimde artırmakta; örneğin *Sphingomonas* sp. LK11 suşu, tuz stresine karşı domateste büyümeyi artırırken, *Bacillus pumilus* SE34 gibi türler JA ve etilen yollarını aktive ederek bitki savunmasını güçlendirmektedir (Halo vd. 2015; Yan vd. 2002). Ayrıca, *Leifsonia xyli*, *Bacillus tequilensis* ve *Bacillus aryabhattai* gibi bakterilerin çok sayıda aktif gibberellin formu üreterek fotosentetik pigmentleri ve sürgün uzunluğunu artırdığı belirlenmiştir (Kang vd. 2014b; Park vd. 2017; Kang vd. 2019a).

Antioksidanlar

PGPR'lerin kuraklık stresi altındaki bitkilerde antioksidan savunma sistemlerini aktive ederek oksidatif hasarı önemli ölçüde azalttığı bildirilmektedir. Bu bakteriler, ROS etkisiz hâle getiren antioksidan enzimlerin aktivitesini artırmak suretiyle, bitki hücrelerinde kuraklık kaynaklı zararlı etkileri hafifletmektedir. Özellikle *Bacillus altitudinis* FD48 ve *Bacillus methylotrophicus* RABA6 suşları ile yapılan uygulamalarda, SOD, POD, CAT ve APX enzimlerinin aktivitesinde anlamlı artış gözlenmiştir. Bu artış, kuraklık stresine maruz kalan pirinç bitkilerinde su stresi belirtilerinin hafifletilmesine katkı sağlamıştır (Narayanasamy vd. 2020). Benzer şekilde, *Bacillus megaterium* (MU2) suşu da buğday bitkilerinde SOD, POD, CAT, APX ve GR enzim aktivitesini artırarak, kuraklık koşullarında kontrol grubuna göre bitkilerin stres toleransını anlamlı şekilde yükseltmiştir (Rashid vd. 2022). Bu bulgular, PGPR'lerin oksidatif stresin hafifletilmesinde önemli rol oynayan antioksidan savunma mekanizmalarını uyararak, kuraklık gibi olumsuz çevresel faktörlere karşı bitki direncini artırabileceğini göstermektedir.

Abiyotik stres koşulları altında ortaya çıkan ROS birikimi, bitki hücrelerinde oksidatif hasara yol açarak fizyolojik süreçleri olumsuz yönde etkiler. Bu bağlamda, antioksidan enzim aktivitesinin modülasyonu, ROS düzeylerinin düzenlenmesinde ve hücrel dengeyi korumada önemli bir savunma mekanizması olarak öne çıkmaktadır. Kuraklık stresine maruz kalan *Mentha piperita* (nane) bitkisinin *Pseudomonas fluorescens* WCS417 ve *Bacillus amyloliquefaciens* GB03 ile aşılınması, çeşitli antioksidan enzimlerin gen ekspresyon seviyelerinde artışa neden olmuş ve bu durum, bitki büyümesinde belirgin bir iyileşme ile sonuçlanmıştır (Chiappero vd. 2019).

Benzer şekilde, kuraklık stresi altındaki pirinç bitkilerine laboratuvar koşullarında oluşturulmuş belirli PGPR suşlarından oluşan bir konsorsiyumun uygulanması, SOD, CAT ve POD gibi antioksidan enzim aktivitesini yükseltmiş ve hücre içi H₂O₂ seviyelerinin düşmesini sağlamıştır (Gusain vd. 2015). Ayrıca, *Bacillus* türlerinin uygulanması yalnızca endojen H₂O₂ seviyelerini düşürmekle kalmamış, aynı zamanda PSII'nin fotosentetik verimliliğini (Fv/Fm oranı) ve *Solanum tuberosum* (patates) bitkisinin büyüme parametrelerini de iyileştirmiştir (Gururani vd. 2013). Öte yandan, *Pseudomonas mendocina* Palleroni suşu ile yapılan uygulamalar, su stresi altında marul

bitkisinde antioksidan enzim aktivitesini artırarak stres toleransının güçlenmesine katkı sağlamıştır (Kohler vd. 2008).

Ozmolitler

Kuraklık stresi gibi abiyotik çevre koşulları altında, bitki hücrelerinde ROS birikimi yaygın olarak görülmekte olup, bu durum DNA, lipid ve protein gibi temel hücresel bileşenlerde oksidatif hasara yol açmaktadır. Bu hasarın önlenmesinde, prolin gibi ozmolitlerin önemli rol oynadığı bilinmektedir. Prolin, yalnızca ozmotik dengeyi düzenlemekle kalmaz, aynı zamanda ROS'u nötralize etme kapasitesi sayesinde antioksidan savunma sisteminin bir parçası olarak görev yapar (Das ve Roychoudhury, 2014). Bu bağlamda PGPR, kuraklık stresine maruz kalan bitkilerde prolin birikimini teşvik ederek oksidatif hasarı azaltmakta ve stres toleransını artırmaktadır. Artan prolin düzeylerinin, kuraklık koşulları altında stresin hafifletilmesiyle doğrudan ilişkili olduğu bildirilmiştir (Sati vd. 2023).

Örneğin, hıyar bitkisinde *Bacillus cereus* AR156, *Bacillus subtilis* SM21 ve *Serratia* sp. XY21 suşları ile yapılan PGPR aşılama, aşılanmamış kontrol bitkilerine kıyasla yapraklardaki prolin seviyesini artırmış; ayrıca klorofil içeriğini iyileştirerek solgunluk semptomlarını önemli ölçüde azaltmıştır (Wang vd. 2012). Benzer şekilde, mısır bitkisinde *Bacillus* türleriyle yapılan aşılama sonucunda prolin birikimi artmış ve kontrol grubuna göre daha yüksek biyokütle elde edilmiştir (Vardharajula vd. 2011).

Ayrıca, kuraklık stresi koşullarında *Thymus vulgaris*, *Santolina chamaecyparissus*, *Lavveula dentata* ve *Salvia officinalis* gibi aromatik çalı türlerinde gerçekleştirilen PGPR uygulamaları, bitkilerin besin alımı ve morfolojik özelliklerinde olumlu etkiler yaratmıştır. Özellikle *Bacillus* sp. ve *Enterobacter* sp. gibi rizobakteriler, serbest radikallerin giderilmesinde rol oynayan prolin üretimini artırarak bu bitkilerin kuraklığa karşı dirençlerini geliştirmiştir. Örneğin, *L. dentata* yapraklarında prolin içeriğinde belirgin bir artış gözlenmiştir (Armada vd. 2015). Buğday bitkisinde *Bacillus megaterium* ile yapılan aşılama yalnızca prolin birikimini artırmakla kalmamış, aynı zamanda bağış su içeriği, protein düzeyi ile klorofil a, klorofil b ve karotenoid içeriklerini de anlamlı ölçüde iyileştirmiştir (Rashid vd. 2022). Tüm bu bulgular, PGPR'lerin ozmolit sentezini teşvik ederek bitki metabolizmasını stabilize ettiklerini ve kuraklık stresine karşı etkili bir savunma mekanizması sunduklarını ortaya koymaktadır.

Hücre Dışı Polimerik Maddeler Üretimi

Hücre dışı polimerik maddeler (EPS), biyofilm matrisini oluşturan biyopolimerlerdir. EPS toprakta su tutma oranını artırır ve toprağın kuruma oranını azaltır (Flemming ve Wuertz, 2019). Kuraklık stresine maruz kalan bitkiler için PGPR'ler tarafından üretilen EPS, rizosferde hidrofilik biyofilmler oluşturmaya yardımcı olarak kuraklığa toleransı artırır (Rolli vd. 2015). PGPR aşılanmış mısır su stresine maruz kaldığında, *Bacillus spp.* kuraklık koşulları altında daha fazla EPS üreterek su ve besin alımını iyileştirmiş ve aşılanmamış bitkilere kıyasla biyokütleyi artırmıştır (Vardharajula vd. 2011). PGPR'nin EPS üretimi de asma için kuraklık stresini hafifletmiştir (Rolli vd. 2015).

2.8. PGPR ve Hıyar bitkisi

PGPR, bitki kök bölgesinde kolonize olarak çeşitli mekanizmalarla bitki büyümesini artıran faydalı mikroorganizmalardır. Bu bakteriler, N fiksasyonu, P çözücülüğü, siderofor üretimi, fitohormon sentezi (özellikle IAA, gibberellinler ve sitokininler) ve patojen baskılama gibi özellikleri sayesinde bitkilerin biyotik ve abiyotik stres koşullarına karşı dayanıklılığını artırmakta ve verimliliklerini yükseltmektedir (Pérez-García vd. 2023; Kang vd. 2015; Zapata-Sifuentes vd. 2022). Hıyar, dünya genelinde yaygın olarak yetiştirilen bir sebze türü olup, stres faktörlerine karşı hassasiyeti nedeniyle PGPR uygulamalarından büyük ölçüde fayda görebilmektedir (Patel vd. 2021; Song vd. 2024). PGPR'nin hıyar bitkisi üzerindeki etkileri, çimlenmeden meyve kalitesine kadar pek çok gelişim parametresinde olumlu sonuçlar vermektedir.

Çimlenme aşamasında, *Azospirillum brasilense*, *Herbaspirillum seropedicae* ve *Burkholderia phytofirmans* gibi PGPR türleri ile yapılan tohum aşılama çalışmalarının, çimlenme oranını %9'a kadar artırdığı ve kök uzunluğu ile fide canlılığını anlamlı düzeyde iyileştirdiği gösterilmiştir (Mangmang vd. 2015). Benzer şekilde, *Bacillus cereus*, *Acinetobacter radioresistens*, *Pseudomonas paralactis* ve *Sinorhizobium meliloti* gibi bakterilerin bioprimering uygulamaları, çimlenme indeksini %50, fide canlılık değerini %60 ve radikula uzunluğunu %11 oranında artırmıştır (Pérez-García vd. 2023). Bu türlerin ayrıca antioksidan bileşik üretimini artırarak fidelerin stres koşullarına karşı daha dayanıklı hale gelmelerini sağladığı belirtilmiştir.

Fide döneminden itibaren PGPR uygulamalarının bitki gelişimine katkısı oldukça belirgindir. Özellikle *Rhodobacter sphaeroides*, *Lactobacillus plantarum* ve *Saccharomyces cerevisiae* ile yapılan inokulasyonlar, gövde ve kök uzunluklarını, yaş ve kuru biyokütleyi artırmakta; aynı zamanda klorofil içeriğini ve amino asit birikimini yükselterek fizyolojik iyileşmelere neden olmaktadır (Kang vd. 2015). Öte yandan, *Providencia rettgeri*, *Advenella incenata*, *Acinetobacter calcoaceticus* ve *Serratia plymuthica* gibi çok işlevli bakterilerle yapılan uygulamalar, hıyar fidelerinde bitki boyu, kök hacmi, kök yüzey alanı, yaprak klorofil içeriği ve antioksidan enzim aktivitelerini artırarak büyüme performansını iyileştirmiştir (Li vd. 2020).

PGPR'lerin besin elementlerinin alımına katkısı da bilimsel olarak kanıtlanmıştır. *Chlorobium limicola* ve *Rhodopseudomonas palustris* ile yapılan uygulamalarda topraktaki N, P ve K bitki tarafından alınabilirliğinin arttığı, bunun da kök ve gövde dokularında Fe ve Zn gibi mikro elementlerin birikimini sağladığı görülmüştür (Shao vd. 2014). Aynı şekilde, *Streptomyces* türleri ile yapılan çalışmalarda, fosfat çözünürlüğü ve siderofor üretimi yoluyla köklerin besin alım kapasitesinin iyileştiği ve bu durumun net fotosentez oranı ile ilişkili olarak biyokütle üretimini artırdığı rapor edilmiştir (Omar vd. 2022).

Meyve kalitesi ve verim açısından PGPR'lerin katkısı özellikle seracılıkta önemlidir. *Pseudomonas putida* suşu P3-57'nin serada yapılan uygulamaları, aromatik bileşenlerin artmasına ve meyve suyu miktarının yükselmesine neden olmuştur. Ayrıca, bu uygulamalarla meyve protein içeriği ve antioksidan enzim aktiviteleri artmış, nitrat birikimi ise azalmıştır (Alipour Kafi vd. 2021). Aynı şekilde, *Acinetobacter radioresistens* ve *Sinorhizobium meliloti* gibi türlerle yapılan inokulasyonlar da meyve

çapı, uzunluğu, biyokütlesi ve besin içeriği gibi parametreleri pozitif yönde etkilemiştir (Zapata-Sifuentes vd. 2022).

Kuraklık stresi altında PGPR uygulamalarının hıyar gelişimi üzerindeki olumlu etkileri pek çok çalışmada gösterilmiştir. Wang vd. (2012), *Bacillus cereus* AR156, *Bacillus subtilis* SM21 ve *Serratia sp.* XY21 türlerinden oluşan bir konsorsiyumun kuraklık koşullarında hıyar yapraklarında klorofil içeriğini koruduğunu, MDA birikimini ve zararlara bağlı iyon sızıntısını azalttığını belirtmiştir. Ayrıca, bu konsorsiyum SOD aktivitesini artırmış ve Rubisco büyük/küçük alt birimlerini kodlayan genlerin baskılanmasını önlemiştir. Benzer şekilde, Qin vd. (2025), *Paenibacillus polymyxa* HL14-3 inokulasyonunun stomatal kapanmayı artırarak abiyotik stres altında su kaybını önlediğini ve abiyotik sinyal iletiminde önemli rol oynayan ABA birikimini tetiklediğini rapor etmiştir. Zapata-Sifuentes vd. (2024), *Pseudomonas paralactis* ve *Acinetobacter radioresistens* gibi PGPR suşlarının, düşük nem içeriğinde dahi fenol, flavonoid ve antioksidan aktiviteyi artırarak biyokimyasal savunmayı güçlendirdiğini bildirmiştir. Nadeem vd. (2017), biyokömür, kompost ve PGPR'nin sinerjik kullanımının, özellikle *Pseudomonas fluorescens* ile birlikte uygulandığında, %50 TK koşullarında bile bitki büyümesini iyileştirdiğini, klorofil içeriğini artırdığını ve iyon dengesini sağladığını raporlamıştır.

Kuraklık koşullarında PGPR'nin etkisi yalnızca fizyolojik değil, aynı zamanda moleküler düzeyde de gözlenmiştir. Li vd. (2019), *Paenibacillus beijingensis* BJ-18 ve *Bacillus sp.* L-56 içeren biyo-gübrelerin süper emici polimer (SAP) ile birlikte uygulanmasının, su stresinde stresle ilişkili genlerin (CsCAT, CsAPX2, CsLEA11) ekspresyonunu azalttığını ve toprak enzim aktivitelerini artırarak hıyar büyümesini teşvik ettiğini göstermiştir.

Tuzlu koşullarda PGPR uygulamaları, hıyar bitkisinin büyüme parametrelerini önemli ölçüde iyileştirmektedir. Patel vd. (2021), tuz toleranslı *Pseudomonas fluorescens* ve *Bacillus* suşlarının uygulanmasıyla hem normal hem de tuzlu koşullarda kök-gövde uzunluğu, biyokütle, klorofil içeriği ve besin elementi alımında belirgin artışlar gözlemlenmiştir. Aynı şekilde, Saberi-Riseh vd. (2020), bu bakterilerin prolin, toplam şeker ve fenolik bileşikler gibi ozmolit ve antioksidan içerikleri artırdığını, bunun da tuz stresine karşı dayanımı güçlendirdiğini ifade etmiştir. Kang vd. (2014) tarafından yapılan bir çalışmada, *Burkholderia cepacia*, *Acinetobacter calcoaceticus* gibi PGPR türlerinin hem ozmotik hem de tuzluluk stresine karşı fitohormon dengesini koruduğu, Na birikimini azalttığı ve K-P alımını desteklediği gösterilmiştir.

PGPR'nin biyotik stres koşullarında özellikle toprak kökenli hastalık etmenlerine karşı koruyucu etkileri literatürde güçlü bir şekilde desteklenmektedir. Islam vd. (2016), *Phytophthora capsici* kaynaklı taç çürüklüğüne karşı *Pseudomonas stutzeri*, *Bacillus subtilis* ve *Stenotrophomonas maltophilia* suşlarının, hıyar köklerini başarılı şekilde kolonize ettiğini ve hastalık şiddetini önemli ölçüde azalttığını belirtmiştir. Bu suşlar aynı zamanda IAA üretimi, N fiksasyonu ve antifungal etkileriyle büyümeyi teşvik edici özellikler sergilemiştir.

Sonuç olarak, PGPR uygulamaları hıyar bitkisinde çimlenme evresinden meyve verimine kadar olan tüm gelişim süreçlerinde bitki büyümesini teşvik etmekte, besin elementlerinin alımını artırmakta ve meyve kalite parametrelerini iyileştirmektedir. Bu

olumlu etkiler, başta azot fiksasyonu, fosfat çözünürlüğünün artırılması, siderofor üretimi ve fitohormon sentezi olmak üzere çeşitli biyolojik mekanizmalarla gerçekleşmektedir. Aynı zamanda, PGPR'lerin hormon modülasyonu, antioksidan savunma sistemlerini güçlendirme ve kök sistem mimarisini iyileştirme gibi çok yönlü etkileri sayesinde hıyar bitkisinin abiyotik stres koşullarına karşı dayanıklılığı önemli ölçüde artmaktadır. Bu bulgular, PGPR'leri hem tarımsal verimliliği artıran hem de çevre dostu sürdürülebilir tarım uygulamaları için değerli bir biyolojik araç olarak öne çıkarmaktadır.

2.9. AMF ve PGPR

Bitkiler, rizosfere kök eksüdatları salgılayarak çevresindeki mikroorganizmalarla iletişim kurmakta ve bu mikroorganizmalar aracılığıyla organik maddelerin ayrışmasını sağlayarak bitki için kullanılabilir hale gelmelerini teşvik etmektedir (Dennis vd. 2010; Philippot vd. 2013; Coskun vd. 2017). AMF simbiyozu, kök sistemlerinin bir uzantısı gibi işlev görerek, mantar miselleri aracılığıyla C bileşiklerini hiposfere aktarmakta ve burada bakteriler için uygun bir yaşam alanı oluşturmaktadır. Bu etkileşim, AMF misellerinin, bitki ile diğer mikroorganizmalar arasında rizosferin ötesinde iletişimi mümkün kılan bir köprü gibi görev yapmasını sağlamaktadır (Kaiser vd. 2015).

İn vitro iki bölmeli sistemlerde yapılan deneyler, bazı bakterilerin AMF'nin canlı veya ölü hifleri üzerinde farklı düzeylerde gelişebildiğini ve bu bakterilerin ya hiflerden doğrudan beslenebildiğini ya da canlı miselyumdan salınan C kaynaklarını kullanabildiğini göstermiştir (Toljveer vd. 2006). AMF tarafından salgılanan metabolitler arasında amino asitler, organik asitler ve fosfat esterleri yer almaktadır. Bu metabolitlerin miktarı, örneğin P seviyesine bağlı olarak değişiklik gösterebilmektedir (Luthfiana vd. 2021).

Rizosfer ve AMF etkisindeki hiposfer, birlikte "mikorizosfer" olarak adlandırılmaktadır (Johansson vd. 2004). AMF eksudatlarının, bakteri toplulukları üzerinde doğrudan etkiler yarattığı gösterilmiş ve bu durum AMF ile bakteriler arasında güçlü bir karşılıklı etkileşimi ortaya koymuştur. Bu ilişki, ilk olarak 1959 yılında Mosse tarafından fark edilmiş, daha sonraki çalışmalarda ise spesifik AMF-bakteri etkileşimlerinin bitki büyümesi üzerindeki olumlu etkileri gösterilmiştir (Azcón, 1989).

AMF sporları, spor yüzeyinde veya hifal yapılarda çeşitli bakteri türlerini barındırmaktadır. *Bacillales*, *Sphingomonadales*, *Burkholderiales*, *Pseudomonadales* ve *Actinomycetales* gibi gruplara ait bakteriler, özellikle *Funneliformis caledonium*, *F. mosseae* ve *Racocetra alborosea* gibi AMF türlerinin sporlarıyla ilişkili bulunmuştur (Selvakumar vd. 2016). Bu bakterilerden bazıları spor çimlenmesini ve kök kolonizasyonunu teşvik ederek AMF'nin etkisini artırmakta ve bu tür bakteriler mikoriza yardımcı bakteriler (MHB) olarak adlandırılmaktadır (Garbaye, 1994).

Ayrıca, AMF ile birlikte uygulanan fosfat çözücü bakterilerin, P mobilizasyonunu artırdığı ve bu etkileşimin her iki organizmanın da büyümesini desteklediği belirlenmiştir (Taktek vd. 2015). Ancak bazı bakteri türlerinin AMF gelişimini baskıladığı da gösterilmiştir. Örneğin, *Bacillus chitinosporus* LA6a ve *B. laterosporus* LA6b, *Glomus clarum* NT4 sporlarının çimlenmesini engellemiştir (Xavier ve Germida, 2003).

PGPR ve AMF'nin birlikte uygulanması, bu iki mikroorganizma grubunun sinerjik etkileriyle daha güçlü fizyolojik ve besinsel tepkilerin oluşmasına olanak tanımaktadır. PGPR'lerin mikorizal mantar kolonizasyonunu artırıcı etkisi, MHB kavramıyla tanımlanmakta ve kök gelişimi ile AMF yerleşimini teşvik eden kimyasal sinyallerin rol oynadığı gösterilmektedir (Artursson vd. 2006; Toro vd. 1997). Nitekim *Glomus intraradices* ve *Bacillus subtilis*'in birlikte uygulandığı çalışmalarda, kaya fosfatından daha fazla P mobilizasyonu sağlanarak bitkilerin P alımı ve kuru madde üretiminde önemli artışlar gözlenmiştir (Toro vd. 1997). Benzer şekilde, *Rhizophagus irregularis* ve PGPR kombinasyonları, domates ve çilek bitkilerinde hem meyve kalitesi hem de toplam verimi artırmıştır (Bortolot vd. 2024). Bu sinerjik etkilerin ardında; kök sisteminin daha iyi gelişimi, hifosferde mikrobiyal çeşitliliğin artışı ve besin elementlerinin daha etkili taşınması gibi çok yönlü mekanizmalar yer almaktadır (Savastano ve Bais, 2024; Artursson vd. 2006). Dolayısıyla, AMF ve PGPR'nin birlikte uygulanması, sadece bireysel katkılarından öte, bitki gelişimini bütüncül şekilde destekleyen bir biyolojik iş birliği modeli sunmaktadır.

PGPR ve AMF, kuraklık ve tuzluluk gibi abiyotik stres koşullarında bitki gelişimini destekleyici rolleriyle sürdürülebilir tarım uygulamalarında giderek daha fazla önem kazanmaktadır. Bu mikroorganizmalar, tek başlarına uygulandıklarında bitkinin su alım kapasitesini, besin elementi kullanım verimliliğini ve oksidatif stresle başa çıkma özelliklerini artırmaktadır. Ancak birlikte uygulandıklarında, sinerjik etkileri sayesinde daha güçlü fizyolojik ve biyokimyasal iyileşmeler sağladıkları bildirilmektedir. Örneğin, *Rhizophagus irregularis* ve *Variovorax paradoxus* ile birlikte inokule edilen domates bitkilerinde, net fotosentez oranının, ozmotik madde birikiminin (özellikle prolin), kök hidrolik iletkenliğinin ve akuaporinlerin fosforilasyon seviyelerinin arttığı tespit edilmiştir (Calvo-Polanco vd. 2016). Benzer şekilde, hıyar bitkisi üzerinde yürütülen tarla koşulu denemelerinde AMF ve PGPR'nin birlikte uygulanması, tam sulama yapılmayan durumlarda bile verimi %33'e kadar artırmış; aynı zamanda meyve kalitesi ve su kullanım etkinliği üzerinde olumlu etkiler oluşturmuştur (Bicer vd. 2022).

AMF ve PGPR'nin eş zamanlı uygulanması, tekil inokulasyonlara veya inokulasyonsuz kontrol gruplarına kıyasla bitkilerin kuraklık stresine karşı daha yüksek tolerans göstermelerini sağlamaktadır (Anlı vd. 2020; Begum vd. 2022; Marulanda vd. 2006; Vivas vd. 2003). PGPR'lerin, özellikle *Bacillus* türlerinin, AMF gelişimini destekleyerek bu mantarların bitki üzerindeki olumlu etkilerini kuvvetlendirdiği ortaya konmuştur. Örneğin, *Bacillus* sp. uygulaması, *Glomus spp.* ve *G. intraradices* gibi AMF türlerinin kök kolonizasyonunu artırarak marul bitkisinde kuraklık kaynaklı stresin hafifletilmesine katkı sağlamıştır (Vivas vd. 2003). Benzer şekilde, *Glomus versiforme* ve *Bacillus methylotrophicus*'un birlikte uygulanması, tütün bitkisinde antioksidan enzim aktivitelerini artırmış, ayrıca N, P ve K alımını iyileştirmiştir (Begum vd. 2022). Kuraklık koşullarında yürütülen diğer çalışmalarda da hurma ağacı (*Phoenix dactylifera*) ve *Retama sphaerocarpa* gibi türlerde su ve besin alımının arttığı, buna bağlı olarak morfolojik gelişimin olumlu yönde etkilendiği bildirilmiştir (Anlı vd. 2020; Marulanda vd. 2006).

Nohut ve soya gibi baklagillerde de benzer olumlu etkiler gözlemlenmiştir. PGPR ve AMF'nin birlikte kullanımıyla kuraklık altında nohut bitkilerinde %24'e varan verim artışı sağlanırken, özellikle yalnızca generatif döneminde sulama yapılan uygulamalarda bu sinerjinin daha belirgin hale geldiği tespit edilmiştir (Laranjeira vd. 2021). Benzer

şekilde, *Glomus etunicatum* ve *Bradyrhizobium japonicum*'un soya bitkisine birlikte uygulanması, yaprak su içeriği, su potansiyeli ve tohum veriminde belirgin iyileşmeler sağlamış, bu etkinin kuraklığa karşı bir “kaçınma” mekanizması olarak işlediği belirtilmiştir (Aliasgharzad vd. 2006). Marul bitkisinde yapılan çalışmalarda da PGPR ve AMF uygulamaları ile prolin ve şeker birikiminin arttığı, antioksidan enzim aktivitesinin yükseldiği ve oksidatif zararın azaldığı görülmüştür (Ouhaddou vd. 2023). Tüm bu bulgular, PGPR ve AMF'nin hem ayrı ayrı hem de birlikte uygulanmalarının kuraklık ve tuzluluk gibi çevresel stres koşullarında bitkilerin hayatta kalma, gelişme ve verim potansiyelini önemli ölçüde artırdığını ortaya koymaktadır.

AMF ve PGPR'nin birlikte uygulanması, çoğu durumda bitki büyümesi ve besin alımı üzerinde sinerjik etki göstermektedir. *Bacillus* türleri gibi PGPR'ler, AMF ile birlikte uygulandığında ürün verimini artırabilmektedir (Nanjundappa vd. 2019; Uçar vd. 2025). Uçar et al. (2025) tarafından yürütülen çalışmada, *Bacillus* türleriyle *Glomus intraradices* AMF ile kimyasal gübrenin birlikte uygulanmasının, sera koşullarında yetiştirilen marul bitkisinde hem verimi hem de yapraklardaki besin elementi içeriğini anlamlı düzeyde artırdığı ortaya konulmuştur. Aynı zamanda, bazı PGPR'lerin AMF kolonizasyonunu artırarak bitki büyümesine doğrudan katkı sağladığı da gösterilmiştir (Wilkes vd. 2020). Ayrıca, kışlık buğdayda *Bacillus amyloliquefaciens* ve *Rhizophagus intraradices*'in beraber inokulasyonu arbuskül sayısını ve glomalin üretimini artırarak AMF biyokütlesinde bir artışa işaret etmiştir (Wilkes vd. 2020). Özellikle, bir meta-analiz, PGPR ve AMF ikili aşılmasının gelişmiş faydalara sahip olmasına rağmen, PGPR aşılmasının her zaman AMF kolonizasyonunu artırmadığını, bu da diğer mekanizmaların ikili aşılamanın gelişmiş faydalarından sorumlu olabileceğini düşündürmektedir (Primieri vd. 2022). Belirli AMF ve PGPR türlerinin etkileşimlerini anlamak ve bitki-AMF-PGPR ilişkilerinde besin maddelerinin rolünü araştırmak için daha fazla çalışmaya ihtiyaç vardır (Primieri vd. 2022).

2.10. AMF ve PGPR'nin Toprak Özelliklerine Etkisi

Toprak sağlığı, sürdürülebilir tarımın temel taşlarından biridir ve bu sağlığın korunmasında AMF ile PGPR kritik bir rol oynamaktadır. AMF, bitki kökleriyle simbiyotik ilişkiler kurarak toprak yapısının iyileşmesine katkıda bulunurken; PGPR, çeşitli metabolik faaliyetleri sayesinde mikrobiyal topluluğun zenginleşmesini ve toprak fonksiyonlarının devamlılığını destekler. AMF ve PGPR'nin birlikte kullanımı, özellikle bitki-bakteri-mantar etkileşimi ekseninde toprak enzim aktivitelerini artırmakta ve biyolojik verimliliği iyileştirmektedir (El-Sawah vd. 2021).

AMF ve PGPR'nin sinerjik etkilerinin özellikle kuraklık gibi abiyotik stres koşullarında toprak fonksiyonları üzerinde belirgin sonuçlar doğurduğu bildirilmiştir. Khan vd. (2024), *Acaulospora laevis* ve *Bacillus subtilis*'in birlikte uygulanmasının mısır bitkisinin kök fizyolojisini iyileştirdiğini, mikrobiyal biyokütle karbonunu ve enzimatik aktiviteleri (örneğin, dehidrogenaz ve fosfataz) artırdığını ortaya koymuştur. Bu tür bir mikrobiyal müdahale, toprakta su verimliliği, kök hidrolik iletkenliği ve besin alımı gibi parametreleri olumlu yönde etkileyerek toprak sağlığını desteklemektedir.

Yu vd. (2022) tarafından çok yıllık yem bitkisi üzerinde yürütülen bir çalışmada ise AMF ve PGPR'nin toprağın fizikokimyasal özellikleri üzerindeki olumlu etkileri vurgulanmıştır. Özellikle toprak azotu, alkalin fosfataz ve üreaz aktivitelerinde anlamlı

artışlar gözlenmiş; elektriksel iletkenlik ve pH düzeylerinde düşüş raporlanmıştır. Bu bulgular, mikrobiyal inokulantların yalnızca bitki büyümesini değil, aynı zamanda toprağın mikrobiyal enzimatik kapasitesini ve kimyasal dengeyi optimize ederek toprak sağlığının temel belirteçlerine olumlu katkı sağladığını göstermektedir.

Toprak sağlığının korunmasında C:N:P stokiyometrisinin önemi, Hidri vd. (2019) tarafından yem bitkisi üzerinde yapılan araştırmada ortaya konmuştur. Çalışmada *Rhizopagus intraradices* ve *Bacillus subtilis*'in birlikte uygulanması, özellikle tuzlu koşullarda, toprak enzim aktivitelerini (üreaz, alkalın fosfataz, β -glukozidaz ve dehidrogenaz) artırmış ve bitki beslenmesini optimize etmiştir. Benzer şekilde, Li vd. (2012) tarafından sera koşullarında sürekli hıyar ekimi yapılan bozulmuş toprakta yürütülen çalışmada, çoklu AMF türlerinin toprak mikrobiyal topluluklarını zenginleştirerek tuzluluk ve elektriksel iletkenlik gibi olumsuzlukları azalttığı ve toprak kalitesini yükselttiği gösterilmiştir.

Son olarak, AMF ve PGPR'nin toprak enzim aktivitesi üzerindeki etkileri, mikroorganizma çeşitliliğiyle de doğrudan ilişkilidir. Ma vd. (2022) çalışmalarında, mısır kök eksudatlarının allopatik etkilerinin AMF kolonizasyonu ile azaltıldığını ve bu durumun rizosferdeki sukraz, polifenol oksidaz ve dehidrogenaz gibi enzim aktivitelerini yükselttiğini belirtmiştir. Aynı şekilde, Zhang vd. (2024) tarafından *Bacillus subtilis* S1 uygulamasıyla yapılan çalışmada da rizosferdeki nitrit redüktaz ve dehidrogenaz enzim aktivitelerinde anlamlı artışlar gözlenmiştir. Bu bulgular, AMF ve PGPR'nin toprak mikrobiyal dinamiklerini ve enzim sistemlerini olumlu yönde dönüştürerek toprak kalitesini bütüncül biçimde iyileştirdiğini göstermektedir (Tirry vd. 2024; Ali vd. 2024).

Bu çalışmada, küresel iklim değişikliğinin etkisiyle artan su kısıtı koşullarında, AMF (*Funneliformis mosseae*) ve PGPR (*Pseudomonas putida*) uygulamalarının, sera koşullarında yetiştirilen hıyar (*Cucumis sativus* L.) bitkisi üzerindeki etkileri araştırılmış ve belirli hipotezler test edilmiştir. Çalışma kapsamında, farklı sulama düzeylerinde (tam sulama, orta ve şiddetli düzeyde su kısıtı) gerçekleştirilen AMF ve PGPR uygulamalarının, bitki gelişimi, fizyolojik fonksiyonları, biyokimyasal stres göstergeleri ve verim parametreleri üzerinde anlamlı iyileşmeler sağlayacağı öngörülmüştür. Özellikle AMF uygulamasının, su alım kapasitesini artırarak yaprak su içeriğini ve membran stabilitesini koruyacağı; PGPR uygulamasının ise antioksidan savunma sistemini (SOD, POD, CAT) aktive ederek oksidatif stresin etkilerini hafifleteceği varsayılmıştır. Ayrıca, bu iki mikrobiyal ajanın birlikte uygulanmasının, tekli uygulamalara kıyasla sinerjik bir etki oluşturacağı ve bitki performansında daha belirgin artışlar sağlayacağı düşünülmüştür. Bu bağlamda, mikrobiyal uygulamaların, su kısıtı altında verim kayıplarını azaltabileceği ve bazı durumlarda tam sulama koşullarındaki kimyasal gübre uygulamasına eşdeğer ya da daha yüksek performans ortaya koyabileceği hipotezi esas alınmıştır. Araştırmanın temel varsayımı, mikrobiyal gübrelerin hıyar bitkisinde kuraklık stresine karşı fizyolojik ve biyokimyasal dayanıklılığı artırarak, sürdürülebilir sebze üretimi açısından etkili bir strateji sunabileceği yönünde olmuştur.



3. MATERYAL VE METOT

3.1. Materyal

Deneme alanı ve özellikleri

Arazi çalışmaları iki farklı üretim sezonu (2023 sonbahar ve 2024 ilkbahar) olarak Antalya ili Muratpaşa ilçesi Güzeloluk mahallesi 36°52'50.26"K enleminde ve 30°45'32.63"D boylamındaki üretici serasında kurulmuştur. Deneme serasına ait uydu görüntüsü ilgili şekilde sunulmuştur (Şekil 3.1). Şekil 3.1’de kırmızı dikdörtgen ile işaretlenen ve okla gösterilen bölüm, denemenin gerçekleştirildiği serayı göstermektedir. Deneme alanına ait bozulmuş ve bozulmamış toprak örnekleri 0-30 cm ve 30-60 cm derinliklerden sonbahar ve ilkbahar dönemlerinde deneme kurulumu öncesi alınmıştır. Toprak fiziksel ve kimyasal analizleri Batı Akdeniz Tarımsal Araştırma Enstitüsü Toprak ve Su Kaynakları bölümü laboratuvarında yapılmıştır. Çalışma alanı toprağına ait fiziksel ve kimyasal özellikler Çizelge 3.1 ve Çizelge 3.2’de verilmiştir. Genel olarak, deneme toprağının kumlu killi tınlı bünyeye sahip, hafif alkali, hafif tuzlu, kireçli, fosfor ve organik maddece düşük ve diğer elementlerce yeterli seviyede olduğu belirlenmiştir.



Şekil 3.1. Deneme serasının uydu görüntüsü üzerinden lokasyonu

Çizelge 3.1. Deneme alanı toprağının bazı fiziksel ve kimyasal özellikleri

Dönem	Derinlik cm	pH	EC (dS m ⁻¹)	CaCO ₃ (%)	OM (%)	Kum (%)	Kil (%)	Silt (%)	Tekstür	γ (g cm ⁻³)	TK (%)	SN (%)
2023 Sonbahar	0-30	7.8	1.4	26.5	1.9	52	25	23	SCL	1.4	26.1	15.9
	30-60	7.9	1.2	29.7	2.0	53	21	26	SCL	1.4	25.4	13.7
2024 İlkbahar	0-30	8.0	1.5	30.2	2.2	55	21	24	SCL	1.4	25.9	15.6
	30-60	8.1	1.1	32.7	2.0	56	24	20	SCL	1.4	25.1	13.5

OM: Organik madde, γ: Hacim ağırlığı, TK: Tarla kapasitesi, SN: Solma noktası, SCL: Kumlu killi tın

Çizelge 3.2. Deneme alanı toprağının makro ve mikro besin element içerikleri

Dönem	Derinlik cm	P (ppm)	K (ppm)	Ca (ppm)	Mg (ppm)	Fe (ppm)	Zn (ppm)	Cu (ppm)	Mn (ppm)
2023 Sonbahar	0-30	21	251	3136	309	6.3	2.2	1.7	5.4
	30-60	16	198	3121	277	5.6	1.5	1.8	4.7
2024 İlkbahar	0-30	18	306	2413	252	4.1	3.2	0.9	2.2
	30-60	12	212	2678	186	2.6	2.7	0.6	1.4

Antalya, deniz seviyesine yakınlığı ve Akdeniz’e kıyısı olması nedeniyle tipik Akdeniz iklimi özellikleri sahiptir. Yazları sıcak ve kurak, kışları ise ılık ve yağışlı geçer. Yıllık sıcaklık ortalaması yaklaşık 18.9 °C olup, en soğuk ay olan Ocak ayında ortalama sıcaklık 10 °C’dir. Don olayları nadir gerçekleşmektedir. Nisan ayıyla birlikte sıcaklıklar hızla artar ve yaz aylarında 35 °C – 45 °C’ye kadar ulaşabilir. Yağışlar genellikle kış ve ilkbahar aylarında görülür ve çoğunlukla yağmur şeklindedir; kar yağışı ise oldukça nadirdir. Bahar yağmurları kısa süreli sağanaklar şeklinde olup güney ve batıdan gelen hava akımlarının etkisiyle gerçekleşir. Yıllık ortalama yağış miktarı yaklaşık 1040 mm’dir. Yazın Temmuz ve Ağustos aylarında kuraklık belirginleşirken, sonbaharın sonlarında yağışlar yeniden başlar ve ekim ile kasım aylarında etkili olur. Deneme alanı bölgesinin 2023-24 yıllarına ait sıcaklık ve yağış verileri ve çok yıllık ortalamalar Çizelge 3.3’de verilmiştir (MGM, 2025).

Çizelge 3.3. Deneme alanının 2023-24 yıllarına ait sıcaklık ve yağış verileri ve çok yıllık ortalamalar

Aylar	Toplam Yağış (mm)			Ortalama Sıcaklık (°C)		
	Uzun Yıllar Ortalaması	2023	2024	Uzun Yıllar Ortalaması	2023	2024
Ocak	234.6	190.0	179.0	10.0	11.2	14.3
Şubat	152.1	15.6	152.6	10.7	9.8	14.2
Mart	94.0	150.4	69.8	12.9	14.2	14.3
Nisan	49.4	28.4	6.8	16.4	15.3	21.3
Mayıs	32.1	96.0	5.2	20.6	20.2	22.5
Haziran	11.0	26.8	-	25.3	25.2	30.1
Temmuz	4.5	0.0	4.4	28.5	30.9	31.6
Ağustos	4.5	0.2	-	28.4	28.8	30.1
Eylül	16.6	0.2	14.6	25.2	26.9	26.9
Ekim	67.9	11.4	-	20.6	23.0	25.1
Kasım	132.1	172.2	178.6	15.5	19.0	-
Aralık	261.2	114.4	66.2	11.6	15.0	-

Bitki materyali

Bitki materyali olarak Batı Akdeniz Tarımsal Araştırma Enstitüsü Müdürlüğü tarafından geliştirilmiş olan hıyar gen havuzundaki Hızır F1 (*Cucumis sativus* L.) çeşidi kullanılmıştır. Bitki özellikleri Çizelge 3.4'teki gibidir.

Çizelge 3.4. Hıyar bitkisinin özellikleri

Çeşit İsmi	HIZIR F1
Tescil Yılı	2000
Tescil Sahibi	BATEM
İslah Edildiği yer ve	ANTALYA 1998
İslah yöntemi	Heterozis
Bitki Genel	Partenokarp, yarı multi
Yaprak Özellikleri	Yaprak ayası büyüklüğü orta, rengi yeşil
Çiçek yapısı	% Dişi çiçekli
Meyve Özellikleri	15-17 cm, yeşil, parlak, hafif oluklu, meyve sapı uzun
Yetiştirme Şekli	Serada ilkbahar ve sonbahar dönemlerinde yetiştirilebilir
Morfolojik	Orta güçlü, boğum araları kısa, kör koltuklu, meyve tutumu
Tarımsal Özellikleri	Tohum ekiminden ilk hasa ta gelme zamanı ortalama 50-60 gün
Verimi (kg)	10-12 ton da ⁻¹
Muhafaza durumu	Raf ömrü uzundur
Soğuktan	Soğuğa hassastır
Yetiştirilebilecek	AKDENİZ-EGE Bölgesi
1 kg'daki tohum	35.000-42.000

AMF ve PGPR izolatları

Denemede mikrobiyal gübreler olarak kullanılan mikroorganizmalar Ankara Toprak Gübre Su Kaynakları Merkez Araştırma Enstitüsü Mikrobiyal Gübre Araştırma, Teknoloji Geliştirme ve Kültür Koleksiyonu Merkezinin gen havuzundan alınmıştır. AMF olarak *Funneliformis mossea* türü ve bakteri olarak ACC deaminaz etkinliği belirlenen *Pseudomonas putida* C1/1 (NCBI Aksesyon numarası: MW228104) türü kullanılmıştır. Bakteri özellikleri Çizelge 3.5'de verilmiştir.

Çizelge 3.5. Denemede kullanılan bakterinin özellikleri

Fosfat çözücülüğü		Sidereför üretimi	IAA üretimi	ACC deaminaz üretimi
µg mL ⁻¹	İndeks	mm	µg mL ⁻¹	Var/yok
39.48±0.2	2.11±0.3	22±2.1	14.08±0.4	+

Sulama Suyu Özellikleri ve Sulama Sistemi

Çalışmada sulama kaynağı olarak Düden Çayı'nın koluna ait akarsu deresinin suyu kullanılmıştır. Kullanılan suya ait anyon, katyon, pH, elektriksel iletkenlik (EC), bor, karbonat, bikarbonat, klor ve sodyum adsorbsiyon oranı (SAO) gibi özelliklerin

analizi Batı Akdeniz Tarımsal Araştırma Enstitüsü Toprak ve Su Kaynakları bölümü laboratuvarında yapılmıştır. Sulama suyunun tuzluluk açısından 2. sınıf ve sodyumluluk açısından 1. sınıfta (T2A1) yer aldığı ve her türlü bitkisel üretimde sulama suyu olarak kullanılabilir özellikte olduğu sonucu ortaya çıkmıştır. (Çizelge 3.6).

Damla sulama sisteminde, lateraller 16 mm çapında polietilen (PE) borulardan oluşmakta olup, bu hatlara 2 L saat⁻¹ debiye sahip, basınç dengeleyici özellikte damlatıcılar monte edilmiştir. Damlatıcılar, her 0.2 metre aralıklarla yerleştirilmiştir. Su dağıtımını sağlayan manifold hattı, 63 mm çapında ve 8 atü basınca dayanıklı PE malzemeden üretilmiştir. Ana hat ile manifold hattı arasında kontrol vanası, manometre ve su sayacı yer almaktadır. Sulama sırasında hem verilen su miktarı hem de sistemdeki basınç düzenli olarak takip edilmiştir. Pompa ünitesinin ardından sistemde sırasıyla 2 inçlik bir hidrosiklon, 150 mesh elek filtre, küresel vana ve manometre bulunmaktadır. Ayrıca, her lateral hattın başına bir kelebek vana yerleştirilerek su akışının kontrolü sağlanmıştır.

Çizelge 3.6. Denemede kullanılan sulama suyunun özellikleri

pH	7.6	Hafif Alkali
EC $\mu\text{mhos/cm}$ (25 °C)	562	2. Sınıf (İyi)
Potasyum (K) meq/lt	0.12	-
Kalsiyum (Ca) meq/lt	0.81	Yeterli
Magnezyum (Mg) meq/lt	4.52	Yeterli
Sodyum (Na) meq/lt	0.39	Düşük
Karbonat (CO_3^{2-}) meq/lt	Yok	-
Bikarbonat (HCO_3^-) meq/lt	5.4	Orta
Klor (Cl^-) meq/lt	0.32	1. Sınıf (Çok İyi)
Sülfat (SO_4^{2-}) meq/lt	0.12	1. Sınıf (Çok İyi)
Bor (B) ppm	0.01	1. Sınıf (Çok İyi)
SAO	0.17	1. Sınıf (Çok iyi)

3.2. Yöntem

Toprak fiziksel ve kimyasal analizleri

Deneme öncesinde iki dönemde de çalışma serasından 0-30 cm ve 30-60 cm derinliklerinden bozulmuş ve bozulmamış toprak örnekleri alınmıştır. Bozulmuş örnekler üzerinde yapılan analizlerde toprağın pH'sı, tuz içeriği, kireç oranı, organik madde miktarı ile birlikte makro ve mikro besin elementleri belirlenmiştir. Bozulmamış toprak örneklerinde ise hacim ağırlığı, TK ve SN özellikleri belirlenmiştir.

Tekstür analizi, Bouyoucos (1951) tarafından önerilen hidrometre yöntemi kullanılmıştır. 40 saniyelik ve 2 saatlik ölçümler hidrometre yöntemiyle gerçekleştirilmiş, elde edilen sonuçlar doğrultusunda toprak sınıflandırma üçgeni kullanılarak bünye sınıfı belirlenmiştir (Uzunoğlu, 1992). Hacim ağırlığı, hacmi 100 cm³ olan çelik silindirlerle alınan bozulmamış toprak örneklerinin 105 °C sıcaklıkta 24 saat boyunca kurutulmasının ardından, elde edilen kuru ağırlığın silindir hacmine bölünmesiyle hesaplanmıştır (Black,

1965). Tarla kapasitesi, poroz levhalı basınç düzeneği kullanılarak 1/3 atmosferlik basınç altında bozulmuş toprak örneklerinden belirlenmiştir (U.S. Salinity Lab. Staff, 1954). Solma noktası ise, membranlı basınç düzeneğinde 15 atmosferlik basınç altında belirlenmiştir (U.S. Salinity Lab. Staff, 1954).

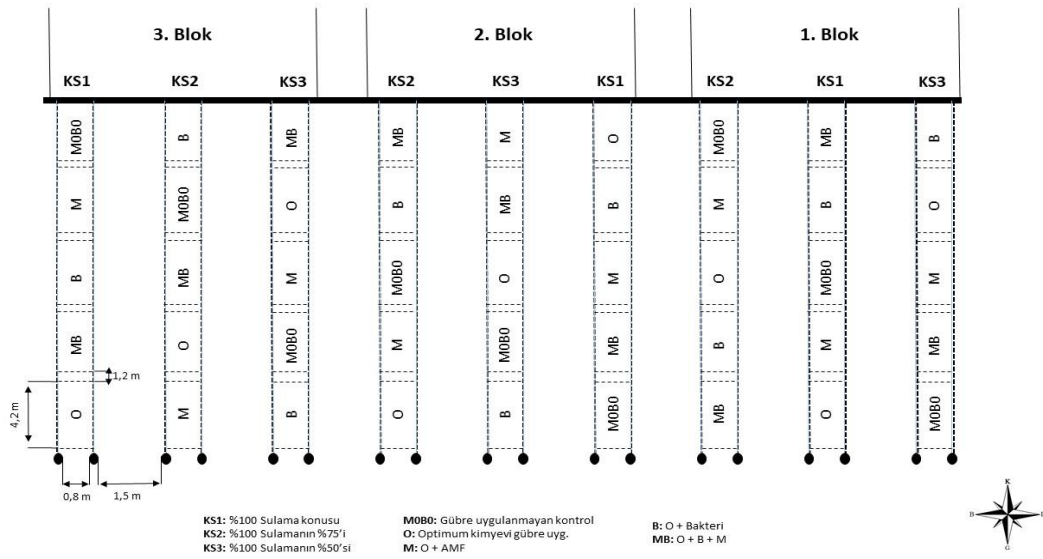
Toprak pH'sı, toprak örneklerinden hazırlanan satürasyon çamuru içerisinde cam elektrotlu bir pH metre ile ölçülmüştür (Kaçar, 1995). Toprağın elektriksel iletkenliği (EC, dS/m) ise, yine satürasyon çamurundan alınan örneklerde bir kondaktivitemetre aracılığıyla ölçülerek tuz içeriği hesaplanmıştır (Kaçar, 1995). Topraktaki kireç miktarı, Scheibler Kalsimetresi kullanılarak ve HCl ile muamele edilen örneklerde, Çağlar (1949) tarafından bildirilen yöntemle uygun şekilde belirlenmiştir. OM analizleri, modifiye edilmiş Walkley-Black yöntemiyle gerçekleştirilmiştir. Alınabilir P, Olsen (1954) yöntemine göre 0.5 N sodyum bikarbonat çözeltisi ile ekstrakte edilmiş ve spektrofotometrik yöntemle analiz edilmiştir. K, Ca, Mg 1 N amonyum asetat ile ekstrakte edilen örneklerde flame fotometre ile belirlenmiştir (Kaçar 1995). Cu, Fe, Mn ve Zn gibi alınabilir mikro elementler DTPA ekstraksiyon yöntemine göre ICP-OES cihazı ile belirlenmiştir (Lindsay ve Norvell 1978).

Deneme deseni ve araştırma konuları

Deneme tesadüf bloklarında bölünmüş parseller deneme desenine göre üç tekerrürlü olarak iki yetiştirme sezonu (sonbahar ve ilkbahar) boyunca yürütülmüştür. Her parselde iki sıra ve her uygulamada 15 bitki olacak şekilde planlanmıştır. Toplamda 45 parselde 675 bitki yetiştirilmiştir. Her bir sıraya bir lateral kullanılmıştır. Şekilde 3.2'de deneme deseni verilmiştir ve parsellerde iki lateral arası boşluk 0.8 m, sıra üzeri iki bitki arası boşluk 0.6 m, parsel üzerinde uygulamalar arası boşluk 1.2 m ve iki parsel arası boşluk 1.5 m olarak planlanmıştır. Sulama konuları ve gübreleme uygulamaları Çizelge 3.7'de verilmiştir. Araştırmada sulamalar damla sulama sistemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Sulama konuları, su stresi meydana gelen ve stres oluşturulmayan konular biçiminde planlanmıştır. Su stresi oluşturulmayan KS₁ konusunda, elverişli su tutma kapasitesinin (ESTK) %30±5'i tüketildiğinde her sulamada mevcut su tarla kapasitesine tamamlanmıştır. Gübre uygulamaları 5 farklı konudan oluşmuştur (Çizelge 3.7).

Çizelge 3.7. Denemeye ait ana ve alt konular

Alt Konu: Mikrobiyal Gübre Uygulamaları	Ana Konu: Sulama
M0B0: Gübre uygulaması yok (Kontrol)	KS₁: %100 ESTK su uygulanması
O: Optimum kimyasal gübre	KS₂: KS ₁ konusuna verilen suyun %75'i
B: O+Bakteri	KS₃: KS ₁ konusuna verilen suyun %50'si
M: O+Mikoriza	
MB: O+B+M	



Şekil 3.2. Deneme deseni

Fide yetiştiriciliği ve arazi hazırlığı

Sonbahar ve ilkbahar dönemleri için BATEM'e ait yerli hıyar çeşidi olan Hızır F1 tohumlarının ekimi viyollerdeki torf ortamına 6 Eylül 2023 ve 1 Mart 2024 tarihlerinde yapılmıştır. Fide yetiştirme ortamı olarak torf+perlit (1:1) kullanılmıştır. Fideler toprağa şaşırtılmadan yaklaşık 3 hafta öncesinde deneme arazisinin toprağını havalandırmak ve herhangi bir bitki atığının kalmaması için rotovator ile toprak işlemesi yapılmıştır. Toprak işlemesinden sonra sulama sistemi dikim için hazır hale getirilmiştir.

Mikrobiyal gübrelerin uygulanması ve fide dikimi

Denemede kullanılan bakteri izolatı deneme kurulumundan dört gün önce çizme yöntemiyle nutrient agar (NA) katı besi ortamında çoğaltılmıştır. Uygulamadan bir gün önce, NA'da gelişen koloniler nutrient broth sıvı besi ortamına aktarılmış ve oda sıcaklığında çalkalamalı inkubasyona (120 rpm, 24 saat) tabi tutulmuştur. Elde edilen aktif kültürün inokulasyon için uygun yoğunluğa ulaşması, spektrofotometrik olarak 600 nm dalga boyunda optik dansite (OD₆₀₀) ölçümü ile takip edilerek denemede kullanılmıştır. Ayrıca, nihai popülasyon yoğunluğu (NA) petri kaplarına seri dilüsyon yöntemiyle yapılan ekimler sonucunda, koloni sayımıyla (kob mL⁻¹) belirlenmiştir. 2023 sonbahar dönemi deneme kurulumu 26 Eylül ve 2024 ilkbahar dönemi de 28 Mart tarihinde gerçekleştirilmiştir. Her bir parselde 15 hıyar fidesinin dikimi yapılmıştır. Mikorizalı uygulamalarda, yonca bitkisinde tuzak kültürüyle çoğaltılmış kum ortamındaki mikoriza sporları (20 spor g⁻¹) hıyar bitkisinin kökleri ile temas edecek şekilde fide çukuruna uygulanmıştır (1000 spor bitki⁻¹). Bakteri uygulamalarında fideler toprağa dikimden hemen önce bakteri solüsyonuna (10⁹ kob mL⁻¹) daldırma işlemi yapılarak dikimi yapılmıştır.

Sulama uygulamaları ve Gübreleme

Bitkiler seraya şaşırtıldıktan sonra tüm konularda toprak su içeriği tarla kapasitesi seviyesine getirilecek miktarda su uygulanmıştır. Konulu sulamalara topraktaki

ESTK'nın 30 ± 5 'i tüketildiğinde başlanmıştır. Su stresi uygulanmayan kontrol (%100) konularında gravimetrik yöntem ile topraktaki mevcut su miktarı USDA NRCS, (2008)'e göre belirlenmiş, ESTK'nın 30 ± 5 'i tüketildiğinde mevcut nem tarla kapasitesi seviyesine getirilecek miktarda sulama yapılmıştır. Su kısıtı uygulanan konularda, uygulamaya bağlı olarak kontrol konusuna uygulanan suyun %50'si ve %75'i oranında su verilmiştir.

Araştırmada etkili kök derinliği 60 cm olarak kabul edilmiş ve toprak su içeriği gravimetrik yöntemle 0-30, 30-60 cm derinlikte iki katmandan alınan örneklerle gözlemlenmiştir. Her katmanın içerdiği ESTK değeri ayrı ayrı hesaplanmış ve iki katmanın ESTK değerleri toplanarak 0-60 cm derinlik için ESTK belirlenmiştir. Her sulamada %100 konusuna uygulanacak sulama suyu miktarı aşağıdaki verilen Eşitlik 1 kullanılarak hesaplanmıştır.

$$d = ((TK(0 - 60) - MN(0 - 60)) \div 100)D \times P \quad \text{Eşitlik (1)}$$

Eşitlik 1'de,

d: Uygulanacak sulama suyu miktarı (mm),

TK0-60: 0-60 cm toprak katmanındaki tarla kapasitesi (hacim yüzdesi cinsinden, %),

MN0-60: Sulama başlangıcında 0-60 cm toprak katmanında ölçülen mevcut su (hacim yüzdesi cinsinden, %),

D: Toprak katmanının derinliği, mm (600 mm) ve P = Islatılan alan oranı (%) değerlerini göstermektedir.

Islatılan alan oranı (P), manifold hattının başlangıcı, ortası ve sonuna yakın konumlarda yer alan lateraller boyunca; her lateral üzerinde başlangıç, orta ve uç noktalar dikkate alınarak, 30 cm toprak derinliğine kadar oluşan ıslak şerit genişlikleri ölçülmüş, elde edilen ortalama değer lateral aralığına oranlanarak hesaplanmıştır. Yapılan ölçümler sonucunda tüm alanın homojen şekilde ıslatıldığı belirlenmiş ve P değeri 1 olarak bulunmuştur. Sulama süresi aşağıda verilen Eşitlik 2 kullanılarak hesaplanmıştır.

$$Ta = (1000 \times d) \div (q \times N) \quad \text{Eşitlik (2)}$$

Eşitlik 2'de;

Ta = Sulama süresi (saat),

d = Uygulanan sulama suyu miktarı (mm),

q = Damlatıcı debisi ($L \text{ saat}^{-1}$) ve

N = Birim alan damlatıcı sayısıdır (adet da^{-1}).

İki dönem boyunca yapılan sulama miktarları ve tarihleri Çizelge 3.8 ve Çizelge 3.9'de verilmiştir. Yetiştiricilik dönemleri boyunca kontrol dışındaki konulara kimyasal gübreleme yapılmıştır. Optimum kimyasal gübreleme uygulamalarında kullanılan

miktarlar deneme kurulumu öncesi yapılan toprak analizi sonuçlarına göre belirlenmiş ve miktarları Çizelge 3.10’da verilmiştir.

Çizelge 3.8. Sonbahar dönemi sulama miktarları ve tarihleri

Tarih	Sulama miktarı (mm)		
	%100 ESTK	%75 ESTK	%50 ESTK
26.09.2023	37.2	37.2	37.2
30.09.2023	34.0	25.5	17.0
04.10.2023	23.0	17.3	11.5
08.10.2023	25.0	18.8	12.5
13.10.2023	27.0	20.3	13.5
18.10.2023	26.0	19.5	13.0
23.10.2023	25.0	18.8	12.5
28.10.2023	27.0	20.3	13.5
04.11.2023	28.0	21.0	14.0
10.11.2023	30.0	22.5	15.0
17.11.2023	33.0	24.8	16.5
24.11.2023	28.0	21.0	14.0

Çizelge 3.9. İlkbahar dönemi sulama miktarları ve tarihleri

Tarih	Sulama miktarı (mm)		
	%100 ESTK	%75 ESTK	%50 ESTK
28.03.2024	42.0	42.0	42.0
03.04.2024	30.0	22.5	15.0
09.04.2024	32.0	24.0	16.0
14.04.2024	25.0	18.8	12.5
19.04.2024	29.0	21.8	14.5
24.04.2024	33.0	24.8	16.5
29.04.2024	31.0	23.3	15.5
03.05.2024	26.0	19.5	13.0
07.05.2024	29.0	21.8	14.5
11.05.2024	27.0	20.3	13.5
15.05.2024	32.0	24.0	16.0
19.05.2024	27.0	20.3	13.5
24.05.2024	30.0	22.5	15.0

Çizelge 3.10. Kimyasal gübrelemede kullanılan gübreler ve miktarları

Kimyasal gübreler	Bitki gelişim dönemi		
	Fide (g gün ⁻¹ da ⁻¹)	Meyve tutumu (g gün ⁻¹ da ⁻¹)	Hasat (g gün ⁻¹ da ⁻¹)
Üre	175	220	250
MAP	100	125	75
Potasyum nitrat	100	200	400

3.2.1. Morfolojik gözlemler

Bitki boyu ve gövde çapı

Hasat sonu rastgele seçilen 5 bitki boyu kök boğazından büyüme ucuna kadar olan bölge cm (± 0.5) cinsinden metre ile ölçülerek belirlenmiştir. Gövde çapı sayısal dijital kumpas yardımı ile mm (± 0.1) olarak ölçülmüştür.

Bitki yaş ve kuru sürgün ağırlığı

Hasat sonu rastgele seçilen 5 bitkide yeşil aksam hassas terazide tartılarak yaş ağırlıkları belirlenmiştir. Daha sonra aynı örnekler etüvde 70° C sıcaklıkta sabit ağırlığa ulaşınca kadar kurutulduktan sonra kuru ağırlıkları belirlenmiştir.

Kök yaş ve kuru ağırlıkların belirlenmesi

Hasat sonu rastgele seçilen 5 bitki kökü hassas terazide tartılarak yaş ağırlıkları belirlenmiştir. Aynı örnekler 70° C sıcaklıkta ağırlıkları sabitleşinceye kadar kurutulduktan sonra kuru ağırlıkları ölçülmüştür.

Yaprak sayısı ve yaprak alanının belirlenmesi

Denemede hasat sonu rastgele seçilen 5 hıyar bitkisinde yaprak sayısı bitkinin üzerindeki tüm yaprakların sayılması ile adet bitki⁻¹ olarak verilmiştir. Yaprak alanı ise her bitkide seçilen 3 adet yaprağın cetvel ile en ve boy ölçümü yapıldıktan sonra Bozkurt ve Keskin (2018) tarafından belirtilen modele göre hesaplanmıştır.

3.2.2. Fizyolojik

Örnekleme zamanı

Hıyar bitkisinin yaprak örnekleri, kısıtlı sulamadan dolayı bitki strese girmeye başladığında (yapraklarda solma, yaklaşık 9-13. boğum) alınmıştır. Elektrolit geçirgenlik, klorofil, YOSİ, toplam fenol ve besin elementi için örnekler rastgele seçilen 5 bitkiden gelişimini tamamlamış en genç yapraklardan alınarak soğuk zincirle laboratuvar götürülmüştür. MDA, proline, SOD ve POD analizleri içinde gelişimini tamamlamış en genç yapraklardan direk olarak folyoya alınıp sıvı azot içine atılarak laboratuvara götürülmüş ve analiz yapılmaya kadar -80 °C'de saklanmıştır. Kök ve toprak örnekleme hasat sonunda yapılarak soğuk zincirle laboratuvara taşınmıştır.

Elektrolit geçirgenlik

Bitki strese girdiği dönemde (9-13 boğum aralığı) hücreden dışarıya verilen elektriksel iletkenliğin ölçülmesi ile hesaplanmıştır (Fan ve Blake, 1994). Stres ve kontrol bitkilerinin yapraklarından 17 mm çapında alınan diskler de-iyonize su içerisinde 5 saat bekletildikten sonra ilk EC ölçümü gerçekleştirilmiştir, aynı diskler 121°C'de 15 psi otoklavda 10 dakika bekletildikten sonra çözeltinin EC değeri tekrar ölçülmüştür. Elde edilen değerlerden aşağıdaki formül yardımıyla yaprak hücrelerinde elektrolit sızıntı (%) belirlenmiştir.

Elektrolit geçirgenlik= $(EC1/EC2) \times 100$

Yaprak oransal su içeriği

Bitki strese girdiği dönemde (9-13 boğum aralığı) yaprak oransal su içeriği (YOSİ) (%) Sanchez vd. (2004)'e göre belirlenmiştir. Rastgele seçilen 5 bitkinin orta seviye yükseklikteki yaprakları alınarak taze ağırlıkları tartılmış, daha sonra 4 saat süre ile saf su içerisinde bekletilerek bu süre sonunda turgor ağırlıkları saptanmıştır. Ağırlıkları belirlenen yaprak örnekleri 65 °C sıcaklıkta 48 saat kurutulduktan sonra kuru ağırlıkları tartılmıştır. Elde edilen taze, turgor ve kuru ağırlıklar aşağıdaki formül yardımıyla oranlanarak yaprak oransal su içerikleri (%) hesaplanmıştır.

$$YOSİ = (TA - KA) / (TuA - KA) \times 100$$

TA: Taze Ağırlık, KA: Kuru Ağırlık, TuA: Turgor Ağırlığı

Klorofil

Bitki strese girdiği dönemde (9-13 boğum aralığı) rastgele seçilen 5 bitkiden alınan 0.5 g yaprak örneği 5 ml aseton: su (% 80 v/v) karışımında homojenize edilmiş daha sonra kaba filtre kağıdından geçirilerek tüplere konulmuştur, klorofil a için 663.5 nm, klorofil b için 645 nm de Shimadzu™ UV 1800 model (Shimadzu, Kyoto, Japonya) spektrofotometre ile % 80 aseton kontrolüne karşı okuma yapılmıştır. Sonuçlar aşağıdaki formüle göre $mg\ l^{-1}$ taze ağırlık olarak hesaplanmış ve daha sonra $mg\ klorofil\ g^{-1}$ taze ağırlık olarak ifade edilmiştir (Arnon, 1949)

Aseton ekstraktlarında klorofil konsantrasyonunun hesaplanması;

$$\text{Toplam klorofil (mg ml}^{-1}\text{)} = 20.2A_{645} + 8.02A_{663.5}$$

$$\text{Klorofil a (mg ml}^{-1}\text{)} = 12.7A_{663.5} - 2.69A_{645}$$

$$\text{Klorofil b (mg ml}^{-1}\text{)} = 22.9A_{645} - 4.68A_{663.5}$$

Yaprak Besin elementi

Rastgele seçilen 5 bitkiden alınan yaprak örneklerinde P, K, Ca, Mg, Fe, Zn, Mn ve Cu değerleri Kacar ve İnal (2008)'ın bildirdiği şekilde mikrodalga fırında nitrik-perklorik asit karışımı (3:1, V/V) ile yaş yakma metodu yoluyla elde edilen süzüklerde Inductively Coupled Plasma (ICP-OES) yardımıyla belirlenmiştir. N içeriği de modifiye Kjeldahl yöntemi ile belirlenmiştir.

3.2.3. Biyokimyasal

MDA

MDA miktarı, tiobarbitürik asit (TBA) testi kullanılarak Heath ve Packer (1968) yöntemine göre belirlenmiştir. Yaklaşık 0.5 g taze yaprak örneği, 5 ml %0.1 trikloroasetik asit (TCA) (0.1 g TCA, saf suda çözülüp hacim 100 mL'ye tamamlanarak hazırlanır) içinde homojenize edilmiştir. Elde edilen homojenat 10.000 rpm'de 10 dakika santrifüj

edilmiştir. Süpernatanttan 1 mL alınarak, 4 mL %0.5 TBA içeren %20 TCA çözeltisiyle (0.5 g TBA, 100 mL %20 TCA içerisinde çözülerek hazırlanır; %20 TCA: 20 g TCA, yaklaşık 80 ml saf suda çözülüp hacim 100 ml'ye tamamlanır) karıştırılmıştır. Karışım 95 °C'de 30 dakika süreyle inkübe edildikten sonra buz banyosunda hızlıca soğutulmuş ve ardından yeniden 10.000 rpm'de 10 dakika santrifüj edilmiştir. Üst fazın absorbansı 532 ve 600 nm'de spektrofotometrik olarak ölçülmüştür. %20 TCA solüsyonu içinde %0,5 TBA kör olarak kullanılmıştır. MDA içeriği, $\epsilon = 155 \text{ mM}^{-1} \text{ cm}^{-1}$ absorpsiyon katsayısı kullanılarak taze ağırlık cinsinden hesaplanmıştır.

SOD

Bitki 9-13 boğum aralığına ulaştığında SOD enzimi aktivitesi, Beauchamp ve Fridovich (1971) tarafından tanımlanan yöntem esas alınarak spektrofotometrik olarak belirlenmiştir. Taze yapraklardan 0,2 g örnek alınarak, 5 mL ekstraksiyon tamponu ile homojenize edilmiştir. Ekstraksiyon tamponu; 100 mM potasyum fosfat tamponu (pH 7.8; 13.62 g KH_2PO_4 ve 6.96 g K_2HPO_4 , 1 L saf suda çözülerek hazırlanır), 0.1 mM EDTA (0.0372 g L^{-1}) ve %1 (w/v) polivinilpolipirrolidon (PVPP; 10 g L^{-1}) içermektedir. Homojenizasyon sonrasında örnekler 4 °C'de 12.000 rpm'de 15 dakika santrifüj edilmiş ve elde edilen süpernatant enzim kaynağı olarak kullanılmıştır. SOD aktivitesinin belirlenmesinde kullanılan 2,0 mL hacmindeki reaksiyon karışımı; 100 mM potasyum fosfat tamponu (pH 7.8), 13 mM L-metiyonin (1.95 g L^{-1}), 75 μM nitroblue tetrazolium (NBT; 24.4 mg L^{-1}), 0.1 mM EDTA (37.2 mg L^{-1}) ve 2 μM riboflavin (0.75 mg L^{-1}) içerecek şekilde hazırlanmıştır. Hazırlanan reaksiyon karışımına 100 μL bitki enzim ekstratı ilave edilmiştir. Karışım, floresan ışık kaynağı altında yaklaşık 4000 lux şiddetinde 10 dakika süreyle inkübasyona alınmıştır. Aynı bileşenleri içeren ve enzim özütü eklenmeyen karanlık kontrol tüpü de paralel olarak hazırlanmıştır. İnkübasyon süresinin sonunda tüplerin absorbans değerleri 560 nm dalga boyunda spektrofotometrede ölçülmüştür. Bir enzim birimi (U), reaksiyon ortamında NBT indirgenmesini %50 oranında inhibe eden enzim miktarı olarak kabul edilmiştir. Sonuçlar gram taze ağırlık başına enzim birimi ($\text{U g}^{-1} \text{ TA}$) cinsinden ifade edilmiştir.

POD

Bitki 9-13 boğum aralığına ulaştığında POD enzimi aktivitesi, Chance ve Maehly (1955) tarafından tanımlanan spektrofotometrik yöntemle göre belirlenmiştir. Taze yapraklardan 0,2 g örnek alınarak, 5 mL ekstraksiyon tampon çözeltisi (100 mM potasyum fosfat tamponu pH 7.0; 6.8 g KH_2PO_4 ve 0.9 g K_2HPO_4 , 1 L saf suda çözülerek hazırlanır) ile homojenize edilmiştir. Homojenat, 4 °C'de 12.000 rpm'de 15 dakika santrifüj edilmiş ve elde edilen süpernatant enzim kaynağı olarak kullanılmıştır.

POD aktivitesinin belirlenmesinde kullanılan 3,0 mL hacmindeki reaksiyon karışımı; 100 mM potasyum fosfat tamponu (pH 7.0), 20 mM guaiacol (2.46 g L^{-1} ; suda çözülürken hafifçe ısıtılarak hazırlanır), 20 mM hidrojen peroksit (H_2O_2 ; ticari %30'luk çözeltiden seyreltilerek hazırlanır) ve 100 μL enzim özütü içerecek şekilde hazırlanmıştır. Reaksiyon karışımında guaiacol oksidasyonu sonucu oluşan tetraguaiakolon ürününün absorbansı, 470 nm dalga boyunda spektrofotometrede ölçülmüştür. Enzim aktivitesi, absorbans artışının (ΔA_{470}) zamana göre değişimi temel alınarak hesaplanmış ve sonuçlar gram taze ağırlık başına enzim birimi ($\text{U g}^{-1} \text{ TA}$) cinsinden ifade edilmiştir.

Toplam Fenol

1 g bitki örnekleri Škerget vd. (2005)'in bildirdiği yönteme göre ekstrakte edilmiştir. Bu amaçla 1 g örnek 10 mL methanol:su (8:2; v/v) ile homojenize edilmiştir. 1 saat çalkalandıktan sonra 7000 rpm hızda 15 dakika santrifüj edilmiştir. Üst faz filtre kağıdından geçirilerek biriktirilip, işlem 3 kez yinelenmiştir. Daha sonra 100 mL hacime %80'lik methanol ile tamamlanmıştır.

0.1 mL bitki ekstraktına, 0.9 mL saf su, üzerine 5 mL Folin-Ciocalteu çözeltisi ve 4 mL %7.5'lik Na₂CO₃ çözeltisi eklenerek vortekslenmiştir. Oda sıcaklığında ve karanlıkta 90 dakika bekletilen örnekler spektrofotometrede 760 nm dalga boyunda okunmuştur. Elde edilen absorbans değerleri gallik asit çözeltisiyle oluşturulan standart eğri yardımıyla mg gallik asit eşdeğeri (GAE) g⁻¹ örnek dönüştürülerek ifade edilmiştir (Škerget vd. 2005).

Prolin

Prolin miktarı için 0.5 g yaprak örneklerinin üzerine 5 mL %3'lük sülfosalisilik asit (SSA) (3 gr SSA 80 mL saf suda çözündürülüp son hacim 100 mL'ye tamamlanır) eklenerek homojenize edilmiştir. Elde edilen homojenat 10000 g'de 15 dk süresiyle 4 °C'de santrifüjlenmiştir. Sonrasında supernatant kısmı 2 mL'lik tüplere aktarılmıştır. Elde edilen ekstraktan 1.5 mL'lik tüplere 0.1 mL alınıp üzerine 0.25 mL %3'lük SSA, 0,25 mL glasiyal asetik asit ve 0.5 mL asit ninhidrin (1.25g ninhidrin, 30 mL glasiyal asetik asit ve 20 mL 6M fosforik asit karıştırılarak 4 °C de 24 saat bekletilerek hazırlanmıştır) eklenerek su banyosunda 100 °C'de 1 saat bekletilmiştir. Daha sonra örnekler buz üzerine alınarak reaksiyon sonlandırılmıştır. Üst tarafta oluşan kırmızı renk 520 nm'de 96 kuyulu Multiskan™ GO model mikro plaka okuyucu spektrofotometre (Thermo Fisher Scientific Oy, Vantaa, Finlandiya) ile okunmuştur. Sonuçlar standart eğriden faydalanılarak g yaprak µmol prolin cinsinden hesaplanmıştır (Bates vd. 1973).

Standart eğriyi oluşturmak amacıyla, farklı ağırlıklarda (0, 5, 10, 15, 20, 25 ve 30 µg) L-Prolin 1.5 mL'lik deney tüplerine tartılmış ve 0.5 mL saf su ile çözündürülmüştür. 1 mL reaksiyon çözeltisi (0.25 mL %3'lük SSA, 0.25 mL glasiyal asetik asit ve 0.5 mL asit ninhidrin) eklenmiştir. Örneklerdeki gibi su banyosunda 100 °C'de 1 saat bekletilmiş ve daha sonra standartlar buz üzerine alınarak reaksiyon sonlandırılmıştır. Elde edilen renk gelişiminin yoğunluğu, 520 nm dalga boyunda 96 kuyucuklu mikropilaka okuyucu spektrofotometre ile ölçülerek standart eğri oluşturulmuştur.

3.2.4.Meyve özellikleri

Meyve besin elementi

Deneme sonunda rastgele seçilen 5 bitkiden alınan meyve örneklerinde P, K, Ca, Mg, Fe, Zn, Mn ve Cu değerleri Kacar ve İnal (2008)'in bildirdiği şekilde mikrodalga fırında nitrik-perklorik asit karışımı (3:1, V/V) ile yaş yakma metodu yoluyla elde edilen süzüklerde Inductively Coupled Plasma (ICP-OES) yardımıyla belirlenmiştir. Yaprak ve meyvedeki N içeriği modifiye Kjeldahl yöntemi ile belirlenmiştir.

Meyve suda çözünür kuru madde, tat, görünüş ve tekstür

Elgar vd. (1997)'nin yöntemine göre, hıyar meyvelerinin suda çözünür kuru madde (SÇKM) miktarının belirlenmesi amacıyla her üç bitkinin meyveleri laboratuvar mikserinde 1 dakika boyunca homojenize edilmiştir. Elde edilen hıyar meyve suları, filtre kağıdı kullanılarak süzölmüş ve ardından GmbHTM-DR6000-t model digital refraktometre cihazının (A.Krüss Optronic, Hamburg, Almanya) haznesine damlatılarak SÇKM içeriği yüzde (%) cinsinden ölçölmüştür. Hıyar meyveleri beş eğitimli panelist tarafından dış görünüşüne (renk, buruşma, fizyolojik ve patolojik bozukluk), tadına göre genel beğeni 1-5 skalasına (1, çok kötü; 5, çok iyi) göre değerlendirilmiştir (Alipour Kafi vd. 2021).

Meyve renk ve sertlik

Hıyar meyvesi kabuğunun L (parlaklık), a (+a:kırmızılık, -a: yeşillik) ve b (+b: sarılık, -b: mavilik), h (Hue değeri: açıklık ve koyuluk) değeri CR-400 renk ölçer cihazı (Konica Minolta Sensing, Osaka, Japonya) ile belirlenmiştir. Her uygulamadan rastgele seçilen 10 meyvede, meyve kabuğunun üst yüzey rengi meyvenin tamamını temsil edecek şekilde ölçölmüştür.

Hıyar meyve eti sertliği, her bir uygulama için 10 farklı meyvede, meyvenin üç farklı bölgesinde ölçölmüştür. Meyvelerinin sertliği, düz uçlu silindirik bir prob (TA39; 2 mm çap, 20 mm uzunluk) ile donatılmış Brookfield CT3 Gıda Tekstür Analizörü (Middleboro, MA, ABD) kullanılarak değerlendirilmiştir. Cihaz, sabit 0.5 mm s⁻¹ penetrasyon hızında çalıştırılmış ve meyveye belirli bir derinliğe kadar nüfuz etmek için gereken maksimum kuvvet (kg cm⁻²) sertlik değeri olarak kaydedilmiştir.

Meyve sayısı ve verim

Vejetasyon süresi boyunca hasat olgunluğuna gelen meyveler 9 defa hasat yapılmıştır ve toplam dekara verim 9 hasat üzerinden hesaplanmıştır. Her hasatta farklı deneme konularındaki bitkilerdeki meyve sayısı, meyve ağırlığı not edilmiş ve tekerrür başına ortalama meyve ağırlıkları belirlenmiştir.

3.2.5. AMF kök kolonizasyonu

Hıyar bitkileri, 2023 sonbaharında ve 2024 ilkbaharında çalışmanın sona ermesinin ardından AMF kök kolonizasyonu için örneklenmiştir. Örnekleme, her parselden rastgele seçilen 5 bitkinin sökölmesiyle yapılmıştır. Bitki kökleri plastik torbalara yerleştirilmiş ve buz üzerinde laboratuvara taşınmıştır. Hıyar kökleri, 0.5 mm'lik bir elek üzerinde su akışı altında toprağı nazıkçe uzaklaştırmak için yıkanmıştır. Kökler daha sonra AMF kolonizasyon oranları değerlendirilene kadar sıkıca kapatılmış cam şişelerde %70 etanol içinde muhafaza edilmiştir.

Hıyar bitkisinde AMF kolonizasyonunu belirlemek amacıyla kökler temizlenmiş ve Brundrett vd. (1996) tarafından tanımlanan yöntemle göre boyanarak mikroskopik değerlendirmeye uygun hâle getirilmiştir. Temizlemeden önce kökler 2-4 cm uzunluğunda parçalar halinde kesilmiş ve plastik biyopsi kasetlerine yerleştirilmiştir. Kökleri içeren kasetler %10 KOH içeren büyük bir cam behere konmuş ve kökler 121 °C ve 15 psi'de 10 dakika boyunca otoklavlanmıştır. Kökler berrak değilse; NH₄OH+H₂O₂ (3 mL %30 NH₄OH, 10 mL %30 H₂O₂ ve 587 mL saf su) içinde birkaç dakika

bekletilmiştir. Ardından kökler dörder kez su ve 0,25 N HCl ile durulanmıştır. Temizlenen kökler, 121 °C ve 15 psi'de 15 dakika boyunca otoklavlanarak %0,05 Tripan mavisi ile boyanmıştır. Boyamadan sonra, kökler kolonizasyon oranlarının ölçülmesinden önce birkaç gün (en az 2 gün) %50 laktik asit ve gliserol karışımı (1:1) içinde bekletilmiştir. Köklerin mikorizal kolonizasyonu 30X büyütmede bir stereo mikroskobu (Stemi 508, Carl-Zeiss, Almanya) altında gözlemlenmiştir. Kolonizasyon oranlarını belirlemek için, ızgara çizgilerinin kesişmesi yöntemi (Giovannetti ve Mosse, 1980) kullanılmış ve kökler 9 cm çapında, alt kısmında ızgara çizgileri bulunan bir petri kabına rastgele dağıtılmıştır. Izgara çizgileri ve kökler arasındaki kesişmeler hem yatay hem de dikey olarak ızgara çizgileri boyunca taranarak ölçülmüştür. Toplamda en az 100 kesişme noktası kullanılmıştır. Örnekler yeniden randomize edilmiş ve doğruluğu artırmak için üç kez sayılmıştır.

3.2.6. AMF spor ve bakteri sayısı

AMF spor sayısı, Gerdemann ve Nicolson (1963)'e dayanan ve laboratuvar koşullarına göre modifiye edilmiş ıslak eleme yöntemiyle tespit edilmiştir. Bu yöntemde, toprak örnekleri sudan geçirilerek farklı gözenek çapına sahip eleklerden süzölmüş ve elde edilen süspansiyon mikroskobik analiz için hazırlanmıştır. Her bir toprak örneğinden 1 gram alınarak üç tekerrürlü sayımlar gerçekleştirilmiş ve sporlar, Stemi 508 model Carl-Zeiss (Almanya) marka stereo mikroskop kullanılarak sayılmıştır.

Topraktaki toplam mezofilik heterotrofik aerobik bakteri sayısı, Parkinson vd (1971)' göre modifiye edilmiş "Plant Count" yöntemine göre belirlenmiştir. Bu yöntemde, her bir uygulama toprağı örneğinden 1 g alınarak steril saf su içerisinde seri dilüsyonlar hâlinde seyreltilmiştir. Ardından, uygun dilüsyonlardan alınan örnekler besiyerine (Nutrient agar) ekilmiş ve 28–30 °C'de 48–72 saat boyunca inkübasyona bırakılmıştır. İnkübasyon süresi sonunda, gelişen koloniler koloni oluşturan birim (KOB) cinsinden sayılmış ve sonuçlar 1 gram kuru toprak başına KOB (kob g⁻¹ toprak) olarak ifade edilmiştir.

3.2.7. Toprak enzimleri

Glomalin

Kolay ekstrakte edilebilen glomalin ile ilişkili toprak proteini, Wright ve Upadhyaya (1998) ve Reyna ve Wall (2014)' e göre modifiye yöntem ile analiz edilmiştir. Kısaca, 3 g hava kuru toprak, 24 mL 20 mM sodyum sitrat (pH 7) içeren 50 mL'lik plastik santrifüj tüplerine yerleştirilmiştir. Tüpler beş dakika boyunca 180 rpm'de çalkalanmıştır. Toprak-sodyum sitrat karışımı içeren tüpler 121 °C ve 15 psi'de 30 dakika boyunca otoklavlanmıştır. Soğutulduktan sonra, tüpler bir dakika boyunca çalkalanarak katılar yeniden süspanse edilmiştir. Ardından, her bir tüpten yaklaşık 1,7 mL karışım 2 mL'lik bir mikrosantrifüj tüpüne 2 tekrarlı olarak aktarılmış ve toprak partiküllerinin çökmesi için üç dakika boyunca 10.000 g'de santrifüjlenmiştir. Ardından, 1 mL süpernatant protein miktarının belirlenmesi için 1,5 mL'lik bir tüpe aktarılmıştır. Her bir tüpten alınan iki tekrarlı ekstraktlar (0.01 mL) 96 kuyulu bir hücre plakasına aktarılmıştır. Ardından, berraklaştırılmış ekstrakttaki çözünmüş proteinlerin konsantrasyonu, standart olarak bovine serum albümini (BSA) ve reaksiyon çözeltisi olarak Bradford çözeltisi (0.2 mL) kullanılarak belirlenmiştir. Örnekleri ve standartları içeren plaka 37 °C'de bir saat inkübe

edilmiştir. Örnekler, 595 nm'de 96 kuyulu mikro plaka okuyucu spektrofotometre kullanılarak kolorimetri ile BSA standardına karşı ölçülmüştür.

Standart eğri, 2 mg mL⁻¹ konsantrasyonundaki BSA ana stok çözeltisinden saf su ile seyreltilerek Çizelge 3.11'da verilen standart seri kullanılarak hazırlanmıştır.

Çizelge 3.11. BSA standartlarının hazırlanışı

Tüp	Seyreltici Hacmi (µL)	BSA Kaynağı ve Hacmi	Nihai BSA Konsantrasyonu (µg mL ⁻¹)
A	0	300 µL Stok çözeltiden	2000
B	125	375 µL Stok çözeltiden	1500
C	325	325 µL Stok çözeltiden	1000
D	175	175 µL B tüpü seyreltmesinden	750
E	325	325 µL C tüpü seyreltmesinden	500
F	325	325 µL E tüpü seyreltmesinden	250
G	325	325 µL F tüpü seyreltmesinden	125
H	400	100 µL G tüpü seyreltmesinden	25
I	400	0 µL	0

β-glukosidaz

Toprak örneklerinde β-Glukosidaz enzim aktivitesinin ölçümü Hayano (1973) tarafından geliştirilen yöntem esas alınarak gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla, 2 mm çapındaki elekten geçirilerek homojenize edilen topraklardan her bir uygulama için üç tekerrürlü olarak 1 g örnek alınmış ve polipropilen tüplere yerleştirilmiştir. Oksijen alışverişine izin vermeyen kapaklara ve yaklaşık 1.5 cm yarıçapa, 10 cm yüksekliğe sahip bombeli bir taban yapısına sahip olan tüpler kullanılmıştır. Her tüpe 4 mL tampon çözeltisi ve 1 mL substrat çözeltisi (50 mL MUB içerisinde 0.377 g p-nitrofenil-β-D-glukozit çözündürülür) ilave edilmiştir. Elde edilen karışım, elle hafifçe çalkalanarak homojenize edilmiş ve ardından 37 °C sıcaklıkta 1 saat inkübasyona bırakılmıştır. İnkübasyon süresi tamamlandıktan sonra tüpler 3500 rpm hızında 15 dakika santrifüjlenmiştir. Santrifüj sonrası her tüpe 1 mL 0.5 M CaCl₂ (Son hacim 1 L olacak şekilde 73.48 g kalsiyum klorür saf suda çözülür) ve 4 mL THAM-NaOH (1 L saf suda 12.2 gr Tris çözündürülür, pH'sı 12) çözeltisi eklenerek içerik karıştırılmıştır. Sonuç olarak oluşan sarı rengin şiddeti, 410 nm dalga boyunda spektrofotometre aracılığıyla ölçülmüş ve standart eğri kullanılarak enzim aktivitesi belirlenmiştir.

Standart eğriyi oluşturmak amacıyla, farklı hacimlerde (0, 1, 2, 3, 4 ve 5 mL) p-nitrofenol standart çözeltisi (1 g p-nitrofenol 1 L saf suda çözündürülür) deney tüplerine aktarılmıştır. Her bir tüpte toplam hacim 5 mL olacak şekilde saf su ile tamamlanmıştır. Ardından, her tüpe 1 mL kalsiyum klorür (CaCl₂) ve 4 mL THAM-NaOH tampon

çözeltisi ilave edilmiştir. Elde edilen renk gelişiminin şiddeti, 410 nm dalga boyunda spektrofotometrik olarak ölçülerek standart eğri oluşturulmuştur.

Alkalin fosfotaz

Toprak örneklerinde alkali fosfataz enzim aktivitesi, Tabatabai (1982) tarafından tanımlanan yöntemle göre belirlenmiştir. Bu yöntemde, 2 mm elekten geçirilmiş topraklardan her biri üç tekerrür halinde 1 g alınarak, oksijen giriş-çıkışını engelleyen kapaklı, alt kısmı bombeli (R=1.5 cm, h=10 cm) polipropilen tüplere konulmuştur. Tüplere ilk olarak, pH değeri 11 olarak ayarlanmış 4 mL MUB (12.1 g Tris, 11.6 g maleik asit, 14.0 g sitrik asit ve 6.3 g borik asit son hacim 1 L olacak şekilde saf su ile çözündürülür, 0.1 M HCl ile pH 11 ayarlanır) tampon çözeltisi ilave edilmiştir. Ardından, yine aynı tampon çözeltisiyle hazırlanmış olan 1 mL p-nitrofenil (0.835 g p-nitrofenil fosfat 50 mL MUB çözeltisinde çözündürülür) substrat karışıma eklenmiştir. Hazırlanan karışım elle hafifçe çalkalandıktan sonra, 37 °C'de 1 saat süreyle inkübasyona bırakılmıştır. Süre bitiminde tüpler inkübasyondan çıkarılarak 3500 rpm'de 15 dakika santrifüj edilmiştir. Santrifüj işleminden sonra tüplere sırasıyla 1 mL 0.5 M CaCl₂ ve 4 mL 0.5 M NaOH eklenmiştir. Elde edilen karışım, filtre kağıdından süzülerek temiz tüplere aktarılmıştır.

Son aşamada, ortaya çıkan sarı rengin yoğunluğu 410 nm dalga boyunda UV spektrofotometre ile ölçülmüştür. p-nitrofenol (pNP) miktarı, saf p-nitrofenil ile hazırlanmış kalibrasyon eğrisi yardımıyla karşılaştırılarak belirlenmiş ve sonuçlar µg pNP g⁻¹ kuru toprak h⁻¹ cinsinden ifade edilmiştir (Tabatabai, 1982).

Standart eğrinin oluşturulması amacıyla, p-nitrofenol (1 g p-nitrofenol 1 L suda çözündürülür) çözeltisinden deney tüplerine sırasıyla 0 (reagent blank), 1, 2, 3, 4 ve 5 ml eklenmiştir. Ardından, her tüpün toplam hacmi 5 mL olacak şekilde saf su ile tamamlanmıştır. Daha sonra her karışıma 1 mL CaCl₂ ve 4 mL THAM-NaOH çözeltisi ilave edilmiştir. Oluşan sarı renkli çözeltinin absorpsansı, 410 nm dalga boyunda spektrofotometre ile ölçülerek standart eğri elde edilmiştir. Hazırlanan bu standart seride sırasıyla 0, 20, 40, 60, 80 ve 100 µg p-nitrofenol içeren çözeltiler kullanılmıştır.

Dehidrogenaz

Dehidrogenaz enzim aktivitesinin belirlenmesi amacıyla, oksijen giriş-çıkışını engelleyen kapaklı, alt kısmı bombeli (R=1.5 cm, h=10 cm) polipropilen tüplere 5 g nemli toprak tartılmış ve üzerine 5 mL TTC çözeltisi (100 ml içinde 0.8 g 2,3,5-Trifeniltetrazolyum klorür) ilave edilmiştir. Tüpler kapatılarak 30 °C sıcaklıkta 24 saat süreyle inkübasyona bırakılmıştır. İnkübasyon süresi sonunda karışıma 40 ml aseton eklenmiş ve 2 saat boyunca karanlık ortamda bekletilmiştir. Elde edilen süspansiyon, mavi bantlı filtre kağıdından süzülür ve oluşan kırmızı renkli çözeltinin absorpsansı 546 nm dalga boyunda spektrofotometrik olarak ölçülmüştür. Süzüntüdeki TPF (Trifenilformazan) miktarı, 50 mg TPF/100 mL aseton içeren standart çözeltiden oluşturulan kalibrasyon eğrisi yardımıyla hesaplanmıştır. ve sonuçlar “µg TPF g⁻¹ kuru toprak” birimiyle ifade edilmiştir (Thalmann, 1968).

Standart eğrinin oluşturulması için, standart TPF çözeltisinden sırasıyla 0, 2.5, 5.0, 7.5, 10, 12.5 ve 15 mL olacak şekilde 50 mL'lik ölçü balonlarına aktarılmıştır. (Bu işlem sonucunda her bir balonda sırasıyla 0, 250, 500, 750, 1000, 1250 ve 1500 µg TPF

bulunacak şekilde standart seri elde edilmiştir.) Daha sonra, her balona toplam hacim 50 mL olacak biçimde metanol eklenmiştir. Elde edilen çözeltilerde oluşan renk yoğunluğu, 485 nm dalga boyunda spektrofotometrik olarak ölçülerek standart eğri oluşturulmuştur.

3.2.8. İstatiksel analiz

Deneme, tesadüf bloklarında bölünmüş parseller deneme desenine göre üç tekerrürlü olarak kurulmuştur. Çalışmada ana faktör olarak sulama düzeyleri, alt faktör olarak ise farklı gübreleme uygulamaları ele alınmıştır. Elde edilen verilerin istatistiksel analizi JMP 13.2 istatistik yazılımı (SAS Institute Inc., Cary, NC, USA) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. İki yönlü varyans analizi (ANOVA) ile faktörlerin ve interaksiyonlarının etkileri test edilmiştir. Varyans analizine geçilmeden önce, verilerin normal dağılım gösterip göstermediği Shapiro-Wilk testi ile kontrol edilmiştir. ANOVA sonucunda faktörler arasında anlamlı fark belirlenmesi durumunda, ortalamalar arasındaki farklılıklar Tukey'nin HSD (Honestly Significant Difference) testine göre karşılaştırılmıştır ($\alpha = 0.05$).

Grafiksel veri görselleştirmeleri, açık kaynak kodlu R Studio yazılımı (RStudio Team, 2023) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Görselleştirme sürecinde veri düzenleme, özetleme ve grafik oluşturma işlemleri için sırasıyla “dplyr” (Wickham vd., 2023), “tidyr” (Wickham ve Girlich, 2023) ve “ggplot2” (Wickham, 2016) paketlerinden yararlanılmıştır.



4. BULGULAR ve TARTIŞMA

4.1. Bitki su tüketimi

Hıyar bitkisi (*Cucumis sativus* L.) için uygulanan farklı sulama düzeylerinde, bitki su tüketimi (ET) değerleri hem sulama oranına hem de mevsime bağlı olarak değişiklik göstermiştir (Çizelge 4.1). Sonbahar döneminde, %100 ESTK uygulamasında toplam ET 326,2 mm olarak belirlenirken, bu değer %75 ve %50 ESTK seviyelerinde sırasıyla 282,4 mm ve 211,6 mm'ye düşmüştür. İlkbahar döneminde ise ET değerleri artış göstermiş; %100, %75 ve %50 ESTK uygulamalarında sırasıyla 389,0 mm, 312,8 mm ve 237,5 mm olarak ölçülmüştür. Bu sonuçlar, sulama düzeyindeki azalmaya paralel olarak bitkisel su tüketiminin düştüğünü ve mevsimsel koşulların (örneğin ilkbaharda artan sıcaklık ve güneşlenme süresi) bitki su tüketimi üzerinde belirleyici rol oynadığını ortaya koymaktadır.

Çizelge 4.1. Sonbahar ve ilkbahar dönemlerinde sulama uygulamalarına göre bitki su tüketimi

Sulama Uygulaması	ET (mm)	
	Sonbahar	İlkbahar
%100 ESTK	326.2	389.0
%75 ESTK	282.4	312.8
%50 ESTK	211.6	237.5

4.2. Morfolojik özellikler

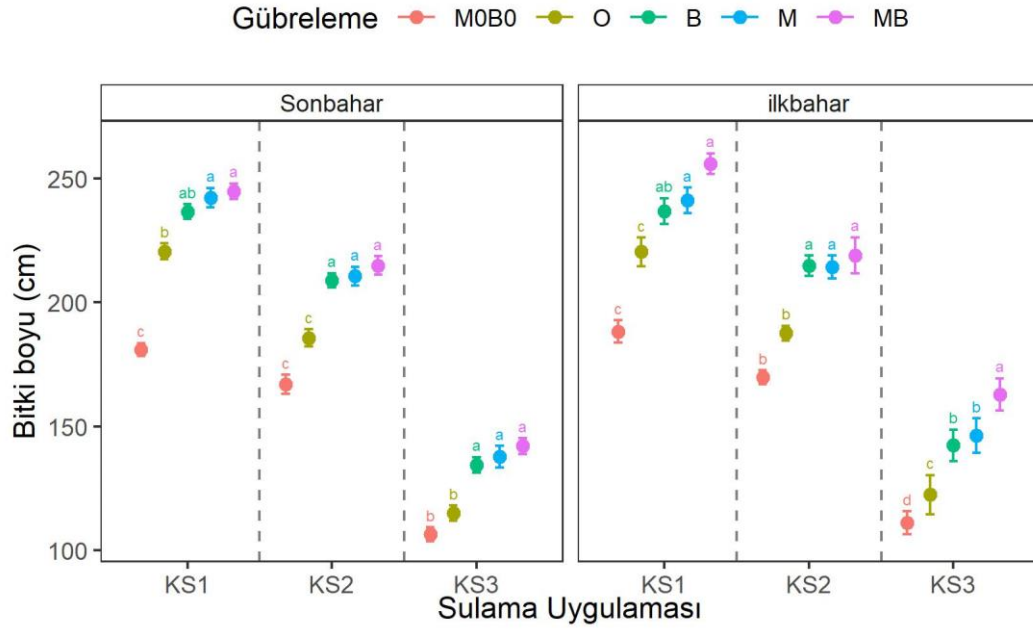
Bitki boyu

Sera koşullarında yapılan çalışmada varyans analizine göre hem sonbahar hem de ilkbahar döneminde farklı sulama düzeylerinde gübreleme uygulamaları bitki boyunu istatistiksel olarak önemli derecede etkilemiştir ($p<0.05$) (Ek1-2). Genel olarak iki dönemde de sulama seviyeleri azaldıkça bitki boyunun da azaldığı saptanmıştır. Mikrobiyal gübre uygulamalarının kontrol ve optimum kimyasal gübre uygulamalarına kıyasla bitki boyunu artırdığı gözlemlenmiştir. KS1 koşullarında, MB uygulaması sonbaharda 245.0 cm, ilkbaharda ise 256.1 cm ile en yüksek değerleri verirken M ve B uygulamaları ile aynı istatistiksel sınıfta yer almıştır. En düşük değerler her iki dönemde de kontrol grubunda saptanmıştır (sonbaharda 181.0 cm, ilkbaharda 188.3 cm). B, M ve MB uygulamaları, kontrole göre %25.8 ila %36.0 arasında önemli derecede bitki boyunda artış sağlamıştır. Sonbahar döneminde M ve MB uygulamaları kimyasal gübrelemeye göre %9.5 ila %15.6 arasında daha yüksek bitki boyu sağlarken, ilkbaharda ise sadece MB, O uygulamasından %16.4 daha fazla bitki boy uzunluğu sağlamıştır ($p<0.05$) (Şekil 4.1). KS2'de iki dönemde de mikrobiyal gübre uygulamaları en uzun bitki boylarına sahip olarak kontrol ve O uygulamasına göre anlamlı derecede farklılıklar göstermiştir ($p<0.05$) (Şekil 4.1). B, M ve MB konularında O uygulamasına kıyasla sırasıyla sonbaharda %13.4, %12.4 ve %15.6 ve ilkbaharda benzer şekilde %13.8, %14.4 ve %16.5 oranlarında daha yüksek

bitki boyu değerleri elde edilmiştir. KS3 koşullarında, su stresinin artmasıyla beraber genel olarak bitki boyları önemli ölçüde düşmüştür. Mikrobiyal gübre uygulamaları iki dönemde kontrol ve O uygulamalarına göre daha uzun bitki boyları sağlamışlardır. Sonbahar döneminde mikrobiyal uygulamalar arasında istatistiksel farklılık yok iken ilkbahar döneminde MB hem B hem de M uygulamasına kıyasla bitki boyunu anlamlı şekilde artırmıştır ($p<0.05$) (Şekil 4.1). Bu sonuçlara göre, MB uygulaması kimyasal gübrelemeye göre iki dönemde de sırasıyla %23.5–%33.6, kontrole göre ise %34.0–%46.8 oranında daha fazla bitki boyu gelişimi sağlamıştır ($p<0.05$) (Şekil 4.1).

Her iki yetiştirme döneminde de sulama düzeylerinin düşürülmesi bitki boyunda anlamlı düşüşlere yol açmıştır. Bu durum, su kısıtının hücre bölünmesi, genişlemesi ve fotosentetik etkinlik gibi fizyolojik süreçleri sınırlandırmasından kaynaklanmakta olduğu rapor edilmiştir (Das vd. 2024). Söylemez vd. (2020) yürüttükleri araştırmada, kuraklık koşullarında bitki boyunun ciddi şekilde azaldığını rapor etmiş, benzer biçimde Arshad (2017) de sulama miktarındaki azalmaların bitki gelişimini olumsuz etkileyerek bitki boyunu sınırladığını vurgulamıştır. Khan vd. (2024) tarafından yapılan denemede %100 ET sulamada 172.39 cm'ye ulaşan bitki boyunun %40 sulama düzeyinde 115.73 cm'ye kadar düştüğü belirtilmiş olup bu bulgu, çalışmamızda KS1 ve KS3 düzeylerinde elde edilen boy değerleriyle paralellik göstermektedir. AMF uygulamalarının, su ve besin alımını iyileştirerek fotosentetik yüzeylere su taşınımını kolaylaştırdığı, böylece boy gelişimini teşvik ettiği bildirilmiştir (Xiuxiu vd. 2019; Ali vd. 2019). Örneğin, Yavaş ve Emek (2021) buğday bitkisinde yürüttükleri çalışmada, *Glomus* spp. ve *Gigaspora margarita*'nın sürgün gelişimini artırdığını, Yıldız (2010) ise hıyar ve domates bitkilerinde benzer gelişmeler sağladığını ifade etmiştir. Wang vd. (2008) tarafından yapılan çalışmada da *G. mosseae* uygulamasının köklerdeki N ve P birikimini artırarak bitki boyunda anlamlı bir yükseliş sağladığı rapor edilmiştir. Benzer şekilde, PGPR uygulamalarının da bitki boyu üzerinde dikkat çekici etkileri olduğu görülmüştür. Li vd. (2020) çalışmalarında, PGPR suşlarının IAA, sitokinin ve giberellin üretimi yoluyla kök gelişimini ve mineral alımını teşvik ederek fide boyunu artırdığını belirtmiştir. Zapata-Sifuentes vd. (2022, 2024) tarafından yapılan denemede, *Pseudomonas paralactis*, *S. meliloti* ve *A. radioresistens* gibi PGPR suşlarının %100 sulama koşulunda hıyar bitkisinde %145'e varan boy artışı sağladığını bildirilmiştir. Bu bulgular, bizim çalışmamızda B, M ve özellikle MB uygulamalarıyla elde edilen yüksek bitki boyu değerlerini destekler niteliktedir. Biçer vd. (2020) tarafından yürütülen bir çalışmada %66 sulama düzeyinde AMF ve kombinasyon uygulamaları, kontrol grubuna göre %15–25 daha uzun bitki boyu sağlamıştır. Bu bulgular, bizim KS2 koşullarındaki MB, M ve B uygulamalarıyla ulaşılan %13.4–%16.5 oranındaki artışlarla yüksek düzeyde örtüşmekte ve mikrobiyal gübrelerin stres altındaki etkinliğini güçlü biçimde desteklemektedir. Ancak mikoriza uygulamalarının her zaman boy artışına neden olmadığı da göz önünde bulundurulmalıdır. Tüfenkçi vd. (2012), bazı AMF türlerinin sürgün uzunluğunu azalttığını, çünkü enerjinin kök sistemine yönlendirildiğini bildirmiştir. Bizim çalışmamıza benzer olarak, Gasemi vd. (2023), çok yıllık bir süs bitkisinde yürüttükleri araştırmada AMF ve PGPR uygulamalarının, özellikle şiddetli kuraklık altında bitki boyunu %61'e varan oranda artırdığını rapor etmiştir. Aynı şekilde, Yooyongwech vd. (2016) çalışmalarında, tatlı patates bitkisinde sürgün uzunluğundaki %23'lük kaybın AMF ile %11–15 düzeyine indirildiğini göstermiştir. Benzer şekilde, El Mazouni vd. (2025) tarafından yapılan bir çalışmada, AMF uygulamasının buğday bitkisinde özellikle su kısıtı altında sürgün gelişimini anlamlı biçimde desteklediği bildirilmiştir.

Streptomyces HM3, *Bacillus cereus* ve *Pseudomonas fluorescens* gibi PGPR türlerinin hormonal dengeyi düzenleyerek su stresine karşı koruyucu etki sunduğu belirtilmiştir (Abd El-Azeem vd. 2022; Wang vd. 2012). Çalışmamızda da MB uygulaması, KS3 koşullarında kontrol grubuna göre %34.0–%46.8 oranında daha uzun bitkiler üretmiştir. Bu sonuç, Biçer vd. (2020) tarafından yapılan çalışmadaki %33 sulama koşulunda gözlenen 23 cm'ye varan artışlarla örtüşmektedir.



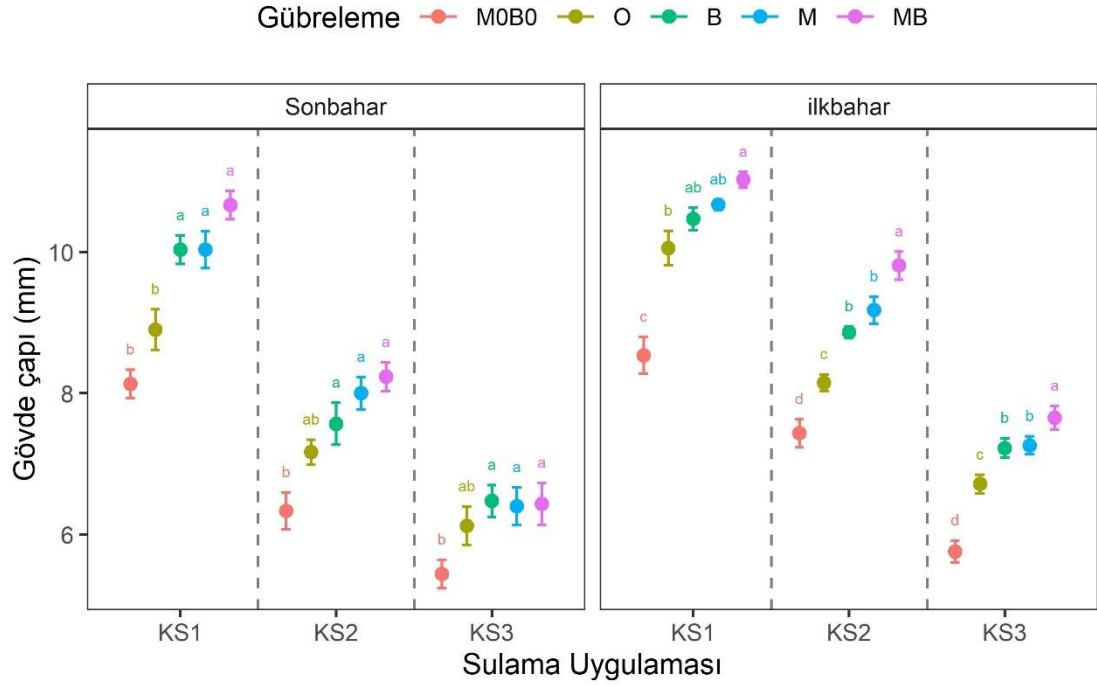
Şekil 4.1. Farklı sulama düzeylerinde gübre uygulamalarının bitki boyu üzerine etkisi. Aynı sulama ve dönem içinde farklı harflerle gösterilen ortalamalar (n=3), Tukey's HSD testine göre istatistiksel olarak farklılık göstermektedir (p<0.05).

Gövde çapı

Gübreleme uygulamaları bitki gövde çapını iki dönemde de sulama uygulamaları altında önemli derecede etkilemiştir (p<0.05) (Ek 1-2). KS1 sulama düzeyinde, sonbahar ve ilkbahar dönemlerinde MB uygulaması sırasıyla 10.7 mm ve 11.0 mm ile en yüksek gövde çapı değerlerine sahip oluren B ve M ile aynı istatistiksel grupta yer almıştır (p<0.05). Sonbaharda kontrol ve O grubundaki bitkiler sırasıyla (8.1, 8.9 mm), ilkbaharda ise 8.5 mm ile kontrol uygulaması en düşük gövde çapına sahip olmuştur (Şekil 4.2). MB uygulaması, sonbahar döneminde kontrol grubuna göre %32.1, O grubuna göre ise %20.2 oranında daha yüksek gövde çapı sağlamıştır. İlkbahar döneminde bu fark, kontrol grubuna göre %22.7 ve kimyasal gübreye göre %8.9 olarak hesaplanmıştır. KS2 düzeyinde sonbahar döneminde MB 8.2 mm ile O, B ve M konuları ile istatistiksel olarak aynı gövde kalınlığı, ilkbahar döneminde 9.8 mm gövde çapıyla diğer uygulamalara kıyasla en yüksek değeri sağlamıştır (p<0.05) (Şekil 4.2). KS3 düzeyinde ise gövde çapında genel olarak bir azalma gözlenmiştir (Şekil 4.2). Sonbahar döneminde mikrobiyal gübreler ve O konusu arasında önemli derecede farklılık saptanmazken kontrole kıyasla anlamlı artışlar sağlamıştır (p<0.05). İlkbahar döneminde ise MB (7.7 mm), M (7.3 mm) ve B (7.2 mm) uygulamaları kontrol uygulamasına (5.8) kıyasla sırasıyla %38, %26 ve

%24 oranlarında gövde çapını artırmıştır. MB uygulaması O uygulamasına göre %15 artış sağlamıştır. ($p<0.05$) (Şekil 4.2).

Her iki dönemde de en yüksek gövde çapları tam sulama koşullarında elde edilirken, azalan su miktarına paralel olarak gövde çapı değerlerinde belirgin düşüşler yaşanmıştır. Literatürde de benzer bulgulara rastlanmaktadır. Örneğin, Kaman vd. (2023) tarafından yürütülen çalışmada, tam sulamada gövde çapının su kısıtı altındaki hıyar bitkilerinden daha yüksek olduğunu bildirilmiştir. Özellikle KS3’de, gövde çapındaki daralma dikkat çekici düzeyde olmuştur. Su eksikliği, hücre turgorunun düşmesine ve genişlemenin sınırlanmasına neden olarak gövde dokularının gelişimini sınırlandırmaktadır. Bu durum, Ohashi vd. (2009) tarafından su kısıtı uygulanan tarla bitkilerinde de rapor edilmiştir. Mikrobiyal gübrelerin gövde gelişimi üzerindeki etkisi, çok boyutlu fizyolojik ve yapısal mekanizmalarla açıklanabilir. PGPR’ler fosfat çözme, N fiksasyonu ve IAA üretimi yoluyla sürgün büyümesini teşvik etmektedir (Ahmad vd. 2022; Chieb ve Gachomo, 2023; Zboralski ve Fillion, 2023). PGPR kaynaklı oksinler ksilem gelişimini ve kambiyal aktiviteyi uyarırken; AMF’ler lignin sentezini teşvik ederek gövde dokularının dayanıklılığını artırır (Goicoechea, 2020). KS1 koşullarında, kontrol grubuna kıyasla kimyasal gübre uygulanan bitkilerde gövde çapı belirgin şekilde artarken, mikrobiyal takviyelerle birlikte bu artış daha da güçlenmiştir. Çığır vd. (2000) tarafından yapılan çalışmada ise AMF uygulamasıyla kontrol grubuna göre %35.7 oranında artış sağlandığı belirtilmiştir. PGPR etkisini değerlendiren Zapata-Sifuentes vd. (2022) ve Aydın ve Dönmez (2024) çalışmalarında, PGPR uygulamasıyla gövde çapının önemli oranda arttığı ifade edilmiştir. Bu veriler, çalışmamızda tam sulama koşullarında gözlemlenen artışlarla uyum göstermektedir. Su kısıtı koşullarında, kimyasal gübre uygulaması da gövde gelişimini desteklemiş; ancak mikrobiyal uygulamalar daha üstün bulunmuştur. Azizi vd. (2022) de benzer şekilde, mikrobiyal uygulamaların özellikle su kısıtı koşullarında büyümeyi desteklediğini bildirmiştir. Igbojionu vd. (2024) çalışmalarında, %25 ET sulama koşullarında gövde çapı artış hızının düştüğünü; buna karşın mikrobiyal uygulamaların bu düşüşü dengelediğini ifade etmiştir. AMF’nin gövde gelişimine katkısı Ahmad vd. (2018) ve Wang vd. (2008) tarafından; PGPR’nin katkısı ise Xiuxiu vd. (2019) ve Zapata-Sifuentes vd. (2022) tarafından benzer şekilde rapor edilmiştir. MB uygulaması, kimyasal gübre uygulamasına göre de %15 oranında artış sağlamıştır. Bu sonuçlar, Biçer vd. (2020) tarafından yapılan çalışmadaki %33 sulama düzeyinde PGPR ve AMF+PGPR ile elde edilen yüksek gövde çapı artışlarıyla örtüşmektedir.



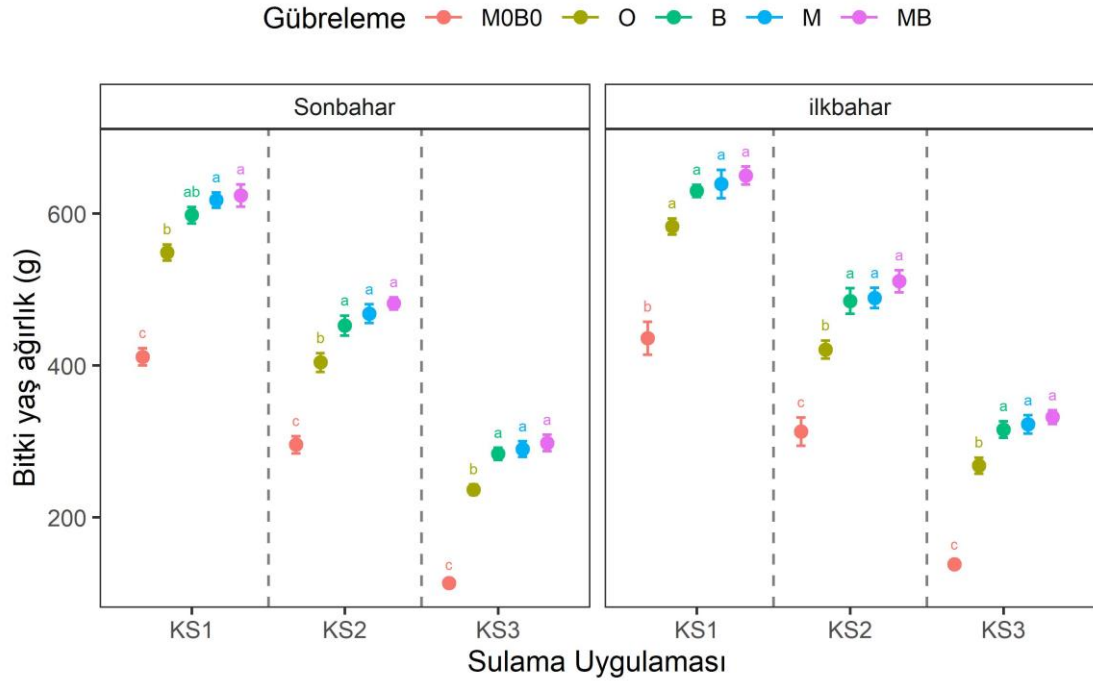
Şekil 4.2. Farklı sulama düzeylerinde gübre uygulamalarının gövde çapı üzerine etkisi. Aynı sulama ve dönem içinde farklı harflerle gösterilen ortalamalar (n=3), Tukey's HSD testine göre istatistiksel olarak farklılık göstermektedir ($p < 0.05$).

Bitki yaşı ve kuru ağırlığı

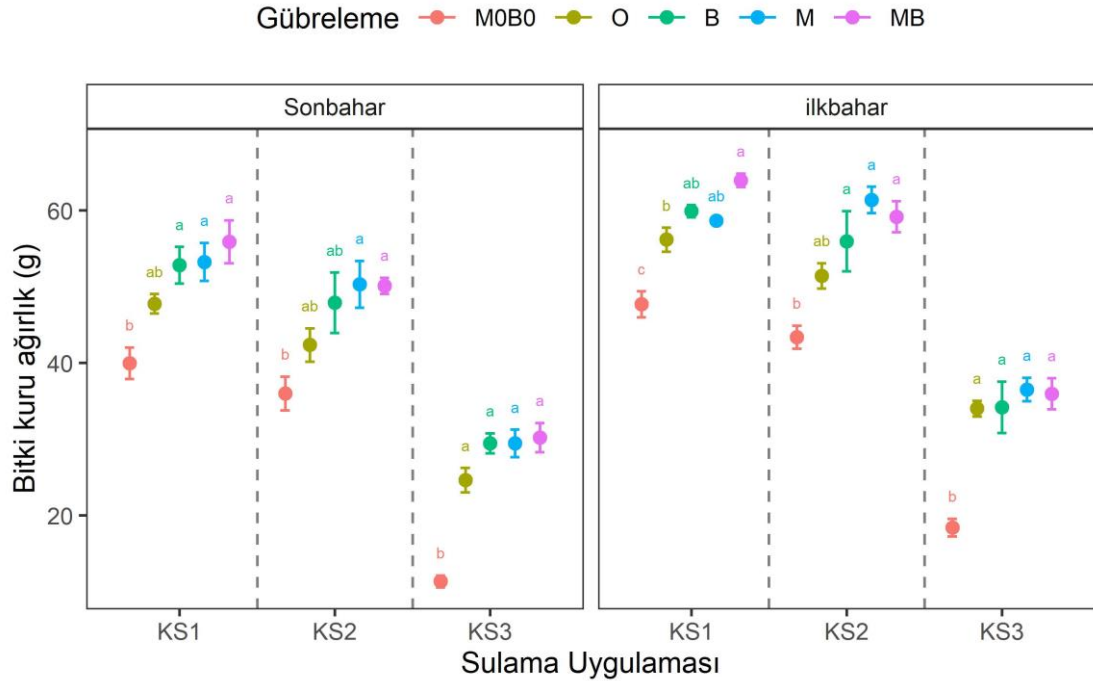
İstatistiksel analiz sonuçlarına göre sonbahar ve ilkbahar dönemlerinde bitki yaşı ve kuru ağırlıkları uygulamalar arasında farklı sulama seviyelerinde önemli derecede farklılıklar göstermiştir ($p < 0.05$) (Ek 1-2). KS1 düzeyinde yapılan gübre uygulamalarında, sonbaharda bitki yaşı ağırlığı 114 g ile 624 g, kuru ağırlık ise 11 g ile 56 g arasında, ilkbahar döneminde de benzer bir eğilim gözlenmiş, bitki yaşı ağırlığı 138 g ile 650 g, kuru ağırlık ise 18 g ile 64 g arasında değişiklik göstermiştir. Sonbaharda MB (624 g yaş, 56 g kuru) uygulaması en yüksek biyokütleyi sağlamış ve M ve B konusundaki bitkilerinde benzer yaş ve kuru biyokütlelere sahip olduğu belirlenmiştir. O uygulaması (549 g, 48 g) daha düşük değerler üretirken, kontrol grubu ise en düşük yaş (412 g) ve kuru (40 g) ağırlıklara sahip olmuştur. İlkbaharda mikrobiyal uygulamalar ile O arasında önemli bir fark bulunmamıştır ($p < 0.05$). KS2 sulama düzeyinde, su kısıtı koşulları altında yaş ve kuru ağırlık değerlerinde azalmalar meydana gelmiş; özellikle kontrol uygulamalarında bu düşüşler dikkat çekici olmuştur. Sonbahar döneminde MB (482 g yaş, 50 g kuru), M (468 g yaş, 50 g kuru) ve B (453 g yaş, 48 g kuru) uygulamaları en yüksek değerleri üretmiştir. İlkbahar döneminde ise MB uygulaması 511 g yaş ve 59 g kuru ağırlık; M (489 g yaş, 61 g kuru) ve B (485 g yaş, 56 g kuru) uygulamaları ile yine en yüksek performansı göstermiştir (Şekil 4.3, Şekil 4.4). Kontrol grubu ile karşılaştırıldığında, sonbaharda MB uygulaması yaş ağırlıkta %62.8, M uygulaması %58.1 ve B uygulaması %53.0 oranlarında artış sağlamış; kuru ağırlıkta ise MB ve M uygulamaları %38.9, B uygulaması %33.3 oranında daha yüksek değerler üretmiştir. İlkbahar döneminde de benzer bir eğilim gözlenmiş; MB uygulaması kontrol grubuna göre yaş ağırlıkta %63.3, M %56.2 ve B %55.0; kuru ağırlıkta ise sırasıyla %37.2, %41.9

ve %30.2 oranlarında artış sağlamıştır. O uygulamaları ile yapılan karşılaştırmalarda ise, her iki dönemde de MB, M ve B uygulamalarının daha yüksek yaş ve kuru ağırlıklar ürettiği görülmüştür (Şekil 4.3, Şekil 4.4). KS3 sulama düzeyinde, sonbahar döneminde MB uygulaması 298 g yaş ve 30 g kuru ağırlık, M(290 g, 29 g) ve B (284 g, 29 g) ile en yüksek değeri sağlarken kontrol uygulaması 114 g yaş ve 11 g kuru ağırlık ile en düşük değerlere sahip olmuştur ($p<0.05$). İlkbahar döneminde MB uygulaması 332 g yaş ve 36 g kuru ağırlık ile en yüksek değeri sağlamış; M (322 g, 37 g) ve B (316 g, 34 g) ile istatistiksel olarak benzer düzeyde yer almıştır ($p<0.05$). KS3 düzeyindeki kontrol (138 g, 18 g) ve O uygulamaları (268 g yaş, 34 g kuru) ile karşılaştırıldığında gübre uygulamaları bitki yaş ve kuru ağırlığını önemli derecede etkilemiştir ($p<0.05$) (Şekil 4.3, Şekil 4.4).

En yüksek biyokütle değerleri, her iki yetiştirme döneminde de tam sulama koşullarında mikrobiyal gübre uygulanan parsellerde elde edilmiştir. Bu sonuçlar, Li vd. (2011) ve Hossain vd. (2018) tarafından bildirilen, tam sulama altında daha yüksek yaş ve kuru madde birikimi gözlenen çalışmalarla örtüşmektedir. Ayrıca, Li vd. (2012) ve Johansen (1999) çalışmalarında AMF uygulaması ile kontrol grubuna göre %124 oranında kuru madde artışı sağlandığını belirtmiş; Gamalero vd. (2008) ise araştırmalarında PGPR ve AMF birlikte uygulandığında %105.6'lık artış bildirmiştir. Su kısıtı altında, yaş ve kuru ağırlık değerlerinde düşüş gözlenmiş; ancak mikrobiyal uygulamalar bu kaybı belirgin şekilde sınırlandırmıştır. O uygulaması ile karşılaştırıldığında, MB ve M uygulamaları daha yüksek yaş ve kuru biyokütle üretmiştir. Bu bulgular, Kaman vd. (2023) tarafından bildirilen su kısıtına bağlı biyokütle kayıplarıyla uyumludur. Al-Silmawy vd. (2025) çalışmalarında, AMF+Azotobacter kombinasyonunun tekli uygulamalara göre daha yüksek kuru ağırlık sağladığını belirtmiş; Li vd. (2012) ve Liu vd. (2023) tarafından yürütülen çalışmalarında, AMF'nin C asimilasyonu, fotosentez ve büyüme düzenleyici sinyaller üzerindeki etkilerini vurgulamıştır. PGPR'nin ise hormonal düzenlemeler ve N fiksasyonu yoluyla büyümeyi desteklediği Pérez-García vd. (2023) ve Botlagunta ve Babu (2024) tarafından rapor edilmiştir. Tian vd. (2023) çalışmalarında, AMF uygulamasıyla kuru ağırlığın %692.7 oranında arttığını; Silva vd. (2023) tarafından yapılan araştırmada ise %30 sulama koşullarında dahi AMF'nin yüksek biyokütle üretimini koruduğunu belirtmiştir. Nadeem vd. (2017) ve Biçer vd. (2020) tarafından, benzer şekilde PGPR ve AMF kombinasyonlarının yaş ağırlığı %55–77 oranında artırabildiği raporlanmıştır. Bu literatür bulguları, bizim çalışmamızda KS2 ve KS3 seviyesinde MB, M ve B uygulamalarının sağladığı yüksek biyokütle değerleriyle yüksek düzeyde örtüşmektedir. AMF ve PGPR'nin birlikte uygulandığı koşullarda, her üç sulama düzeyinde de en yüksek yaş ve kuru biyokütle değerleri elde edilmiştir. Bu sinerjik etki, AMF'nin hif ağı ile su ve fosfor alımını artırması, PGPR'nin ise hormon üretimi ve kök gelişimini teşvik etmesiyle ilişkilendirilmiştir (Biçer vd. 2020; Gamalero vd. 2008). PGPR'nin ACC deaminaz enzimi sayesinde etilen sentezini baskılaması, AMF'nin ise stomal dengeyi sağlayarak fotosentezi artırması gibi mekanizmalar bu etkide rol oynamaktadır. Laranjeira vd. (2021) raporlarında, bu kombine uygulamanın soya bitkisinde kuru ağırlığı iki katına çıkardığını bildirmiştir. Benzer şekilde, bizim çalışmamızda da MB uygulaması tekli uygulamalardan daha yüksek biyokütle üretimi sağlamış ve sinerjistik etkisi açıkça gözlemlenmiştir.



Şekil 4.3. Farklı sulama düzeylerinde gübre uygulamalarının bitki yaş ağırlığı üzerine etkisi. Aynı sulama ve dönem içinde farklı harflerle gösterilen ortalamalar (n=3), Tukey's HSD testine göre istatistiksel olarak farklılık göstermektedir (p<0.05).



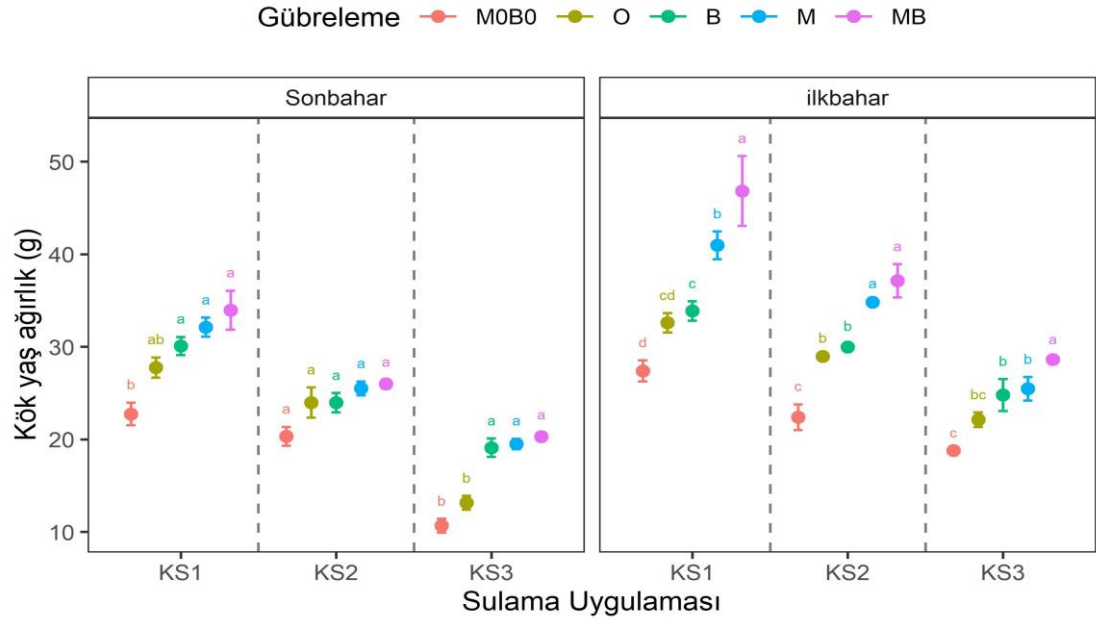
Şekil 4.4. Farklı sulama düzeylerinde gübre uygulamalarının bitki kuru ağırlığı üzerine etkisi. Aynı sulama ve dönem içinde farklı harflerle gösterilen ortalamalar (n=3), Tukey's HSD testine göre istatistiksel olarak farklılık göstermektedir (p<0.05).

Kök yaş ve kuru ağırlık

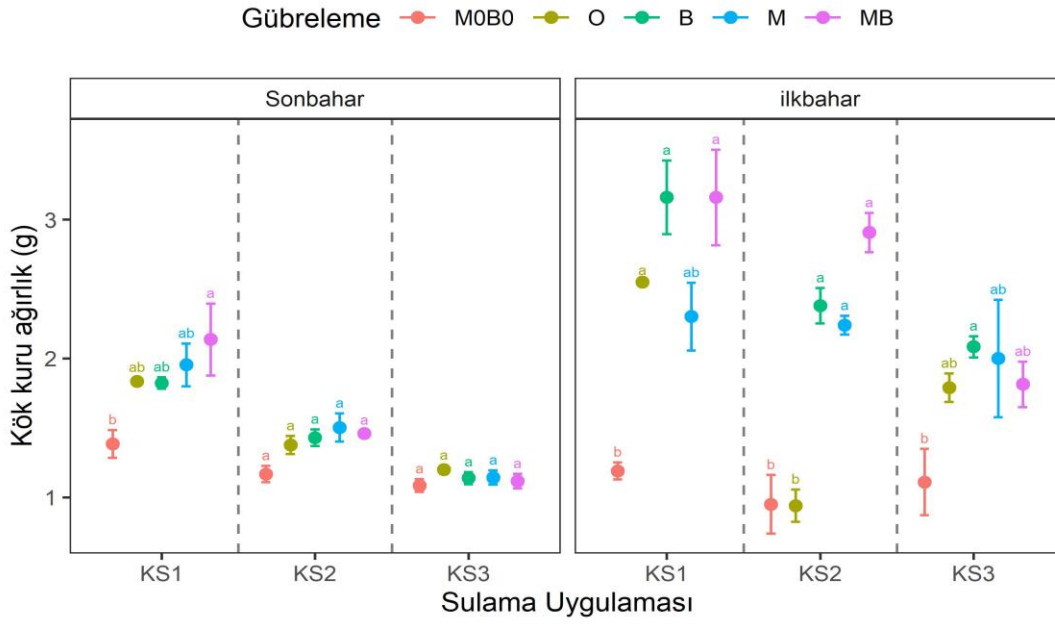
Sonbahar ve ilkbahar yetiştirme dönemlerinde farklı sulama seviyeleri altında gübreleme uygulamaları hıyar bitkisinin kök yaş ve kuru ağırlıkları üzerinde anlamlı farklılıklar oluşturmuştur ($p<0.05$) (Ek 1-2). Sulama düzeyi azaldıkça kök ağırlıklarında genel bir azalma gözlenmiş, ancak mikrobiyal gübre uygulamaları bu olumsuz etkinin azaltılmasında önemli rol oynamıştır (Şekil 4.5, Şekil 4.6). KS1 düzeyinde, sonbaharda yaş ağırlık 22.74 ile 33.95 g kuru ağırlık 1.38 ile 2.14 g, ilkbaharda ise sırasıyla 22.39 –46.83 g ve 0.87-3.03 g arasında değişiklik göstermiştir. ile kök yaş ve kuru ağırlıkta en yüksek değerleri sağlamıştır Mikrobiyal gübreler yaş ağırlıkta sonbaharda O uygulaması ile aynı istatistiksel grupta yer alırken kontrole kıyasla daha fazla artış sağlarken ilkbaharda MB uygulaması en yüksek kök ağırlığına ulaşmıştır ($p<0.05$) (Şekil 4.5). Kök kuru ağırlığında da iki dönemde de yaş ağırlığına benzer etkiler gözlemlenmiştir (Şekil 4.6). MB uygulaması, kontrol grubuna kıyasla yaş kök ağırlığında sonbaharda %49.3, ilkbaharda %70.9; kuru kök ağırlığında ise sırasıyla %55.1 ve %159.0 oranlarında artış sağlamıştır ($p<0.05$) (Şekil 4.5, Şekil 4.6). KS2 sulama düzeyinde sonbahar dönemine ait kök yaş ağırlığı 20.3 g ile 26.0 g, kök kuru ağırlığı ise 1.2 g ile 1.5 g aralığında değişmiştir. Bu düzeyde mikrobiyal gübre uygulamaları kontrol ve O grubuna kıyasla kök yaş ve kuru biyokütlesinde istatistiksel olarak farklılık göstermemiştir. Aynı sulama düzeyinde ilkbahar döneminde kök yaş ağırlığı 22.4 g ile 37.1 g, kök kuru ağırlığı ise 0.9 g ile 2.9 g arasında değişmiştir. Bu dönemde de mikrobiyal gübre uygulamaları kök biyokütlesini artırmış; özellikle AMF (M) ve PGPR+AMF (MB) uygulamalarıyla yüksek değerlere ulaşmıştır. Şiddetli su kısıtının uygulandığı KS3 sulama düzeyinde, sonbahar dönemine ait kök yaş ağırlığı 10.7 g ile 20.3 g arasında, kök kuru ağırlığı ise 1.1 g ile 1.2 g arasında sınırlı düzeyde değişmiştir. Su stresi koşullarında, kök yaş ağırlığında mikrobiyal gübre uygulamaları önemli artışlar sağlamış olmakla birlikte, kök kuru ağırlığı değerleri tüm uygulamalarda benzer düzeyde kalmıştır. İlkbahar döneminde ise aynı sulama düzeyinde kök yaş ağırlığı 18.8 g ile 28.6 g arasında, kök kuru ağırlığı ise 1.2 g ile 2.2 g arasında değişmiştir. Bu dönemde de mikrobiyal gübre uygulamaları kök yaş ağırlığında artış sağlamış; ancak kök kuru ağırlığı bakımından uygulamalar arasında daha sınırlı düzeyde farklılık gözlenmiştir. (Şekil 4.5, Şekil 4.6).

Tam sulama koşullarında, MB uygulaması hem sonbahar hem de ilkbahar döneminde en yüksek kök yaş ve kuru ağırlıkları sağlamıştır. Miceli vd. (2023) araştırmalarında AMF uygulamasının tam sulama altında kök uzunluğunu artırdığını, bunun lateral kök gelişimi ve köklerin emici yüzey alanının artması ile bağlantılı olduğunu bildirmiştir. PGPR'nin ise kök yüzeyini genişletici, toprak yapısını iyileştirici ve su kullanımını artırıcı etkileriyle benzer destek sağladığı gösterilmiştir (Zarei, 2022; Nadeem vd. 2017). Çalışmamızda, O uygulaması kontrol grubuna göre sınırlı bir artış sağlarken; mikrobiyal uygulamalar, O uygulamasından da istatistiksel olarak daha yüksek kök biyokütlesi üretmiştir. Bu durum, yalnızca makro besinlerin değil, mikrobiyal etkileşimin kök gelişimi üzerindeki önemini ortaya koymaktadır. Su kısıtının uygulandığı koşullarda, kök biyokütlesi genel olarak azalsa da MB uygulaması yine en yüksek yaş ve kuru ağırlık değerlerine ulaşmıştır. Bu oranlar, AMF ve PGPR'nin birlikte kullanımının su stresine karşı kök sistemini koruyabildiğini göstermektedir. Ghani vd. (2022) çalışmalarında kuraklık altında kök yaş ağırlığının %59.35, kuru ağırlığın ise %41.65 oranında azaldığı bildirilmiştir. Buna karşın, bizim bulgularımızda MB uygulaması, bu azalmanın büyük ölçüde önüne geçmiştir. Benzer şekilde, Das vd. (2024) tarafından yürütülen çalışmada da kuraklık altında kök mimarisinde ciddi küçülmeler gözlenmiştir. MB uygulamasının bu tür yapısal küçülmeyi engelleyebilmesi, sinerjistik etkileşimin C

metabolizmasını koruyarak kök biyokütlesini desteklemesiyle açıklanabilir. İlkbahar döneminde B ve M uygulamaları da kontrol grubuna kıyasla sırasıyla %144.8 ve %142.5 oranlarında kuru kök ağırlığı artışı sağlamıştır. Bu bulgu, PGPR'nin etilen düzeyini düşürerek kök büyümesini teşvik ettiğini bildiren Zarei (2022) ve Gamalero vd. (2008) gibi araştırmacılara ait çalışmalarla uyumludur. KS3 koşullarında, su stresinin kök gelişimi üzerindeki baskısı daha belirgin hale gelmiş; ancak mikrobiyal gübre uygulamaları bu etkinin şiddetini azaltmıştır. Bu bulgular, özellikle şiddetli stres koşullarında mikrobiyal uygulamaların kök sisteminin fizyolojik bütünlüğünü koruyabildiğini göstermektedir. Kavas vd. (2013), benzer su kısıtı koşullarında kök yaş ağırlığında %80, kuru ağırlıkta ise %70'in üzerinde azalma bildirmiştir. Çalışmamızda MB uygulaması, bu düşüşleri anlamlı şekilde sınırlandırmıştır. Ayrıca Gamalero vd. (2008) yürüttükleri çalışmada, AMF+PGPR kombinasyonunun kök yaş ağırlığını artırarak diğer tekli uygulamalara göre daha güçlü destek sağladığını bildirmiştir. Bu sinerjik etki, çalışmamızda MB uygulamasının M ve B uygulamalarına göre daha yüksek değerler sağlamasıyla da doğrulanmaktadır.



Şekil 4.5. Farklı sulama düzeylerinde gübre uygulamalarının kök yaş ağırlığı üzerine etkisi. Aynı sulama ve dönem içinde farklı harflerle gösterilen ortalamalar (n=3), Tukey's HSD testine göre istatistiksel olarak farklılık göstermektedir (p<0.05).

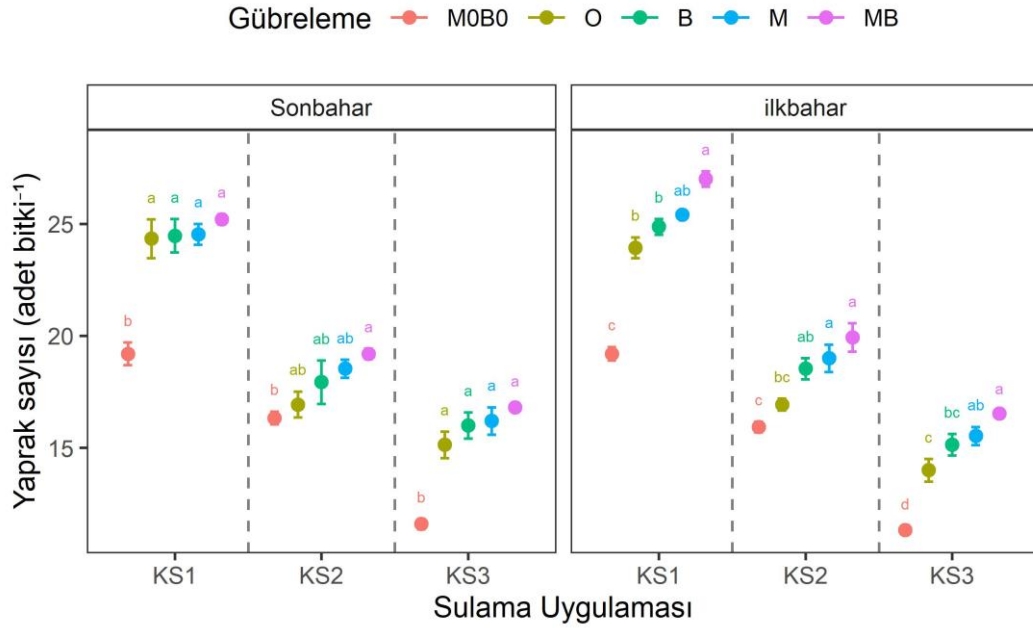


Şekil 4.6. Farklı sulama düzeylerinde gübre uygulamalarının kök kuru ağırlığı üzerine etkisi. Aynı sulama ve dönem içinde farklı harflerle gösterilen ortalamalar (n=3), Tukey's HSD testine göre istatistiksel olarak farklılık göstermektedir ($p < 0.05$).

Yaprak Sayısı

Sonbahar ve ilkbahar yetiştirme dönemlerinde uygulanan farklı sulama seviyelerinde ve gübre uygulamaları hıyar bitkisinin yaprak sayısı üzerine istatistiksel olarak anlamlı etkiler oluşturmuştur ($p < 0.05$). (Ek 1-2). Sonbahar döneminde tam sulama koşullarını temsil eden KS1 düzeyinde, yaprak sayısı 19 ile 25 adet arasında değişmiştir. En düşük yaprak sayısı M0B0 uygulamasında gözlenmiş; gübre uygulamaları ile bu değer anlamlı şekilde artış göstermiştir. Aynı sulama düzeyinde ilkbahar dönemine ait yaprak sayısı değerleri 19 ile 27 adet arasında değişim göstermiştir. Bu dönemde de en düşük yaprak sayısı M0B0 uygulamasında belirlenmiş; MB uygulamasıyla yaprak sayısı en yüksek seviyeye ulaşmıştır (Şekil 4.7). KS2 sulama düzeyinde sonbahar döneminde, yaprak sayısı 16 ile 19 adet arasında sınırlı bir değişim göstermiştir. M0B0 uygulaması en düşük değeri verirken, MB uygulaması kontrole göre %18.8 oranında artış göstermiştir. Aynı sulama düzeyinde ilkbahar döneminde yaprak sayısı 16 ile 20 adet arasında değişmiş; en düşük değer M0B0 uygulamasında, en yüksek değer ise MB uygulamasında gözlenmiştir. Mikrobiyal gübre uygulamalarından M ve MB yaprak sayısını kontrol ve O konusuna göre önemli derecede artırmıştır ($p < 0.05$) (Şekil 4.7). Şiddetli su kısıtının uygulandığı KS3 sulama düzeyinde, sonbahar döneminde yaprak sayısı 12 ile 17 adet arasında değişmiştir. Gübreleme uygulamalarının bu koşullarda kontrole kıyasla yaprak sayısını anlamlı düzeyde artırdığı belirlenmiştir. İlkbahar döneminde aynı sulama düzeyinde yaprak sayısı 11 ile 17 adet arasında değişmiş; en düşük değer yine M0B0 uygulamasında, en yüksek değer MB uygulamasında gözlenmiştir. MB uygulaması, kontrol grubuna göre %46.0 daha fazla yaprak oluşturmuş; kimyasal gübreye göre ise %17.9 daha fazla yaprak sayısı sağlamıştır (Şekil 4.7).

Hıyar bitkisi üzerinde yürütülen bu çalışmada, sulama düzeyleri ve mikrobiyal gübre uygulamalarının yaprak sayısına etkisi her iki dönemde de istatistiksel olarak anlamlı bulunmuştur ($p < 0.05$). Tam sulama koşullarında (KS1), en yüksek yaprak sayısı MB uygulamasında elde edilmiş, AMF ve PGPR'nin birlikte kullanımı en fazla yapraklanmayı sağlamıştır. Mikrobiyal gübrelemeler kimyasal gübreye göre sınırlı düzeyde artış sağlarken, kontrol grubu en düşük değeri vermiştir. Bu sonuçlar, Bouremani vd. (2023) tarafından bildirilen, tam sulama altında mikrobiyal uygulamaların sınırlı fayda sağladığı ancak kombine kullanımda sinerjik etkilerle yaprak gelişiminin arttığı yönündeki bulgularla örtüşmektedir. Kısıtlı sulama koşullarında (KS2 ve KS3), genel olarak yaprak sayısı azalmış ancak mikrobiyal gübre uygulamaları bu olumsuzluğu önemli ölçüde dengelemiştir. MB uygulaması her iki dönemde de en yüksek yapraklanmayı sağlamış, kontrol grubuna göre KS2'de %25–40, KS3'te ise sonbaharda %41.7, ilkbaharda %46.0 oranında artış sağlamıştır. PGPR ve AMF'nin ayrı kullanımı da kimyasal gübreye göre üstün performans göstermiştir. Bu bulgular, PGPR'nin prolin birikimini artırarak ozmotik dengeyi sağladığını ve yaprak solmasını önlediğini (Wang vd., 2012), AMF'nin ise su ve besin alımını iyileştirerek yaprak canlılığını koruduğunu (Rasouli vd., 2023) ve simbiyozu güçlendiren PGPR-AMF etkileşiminin bitki performansını artırdığını (Savastano ve Bais, 2024) ortaya koyan literatürle uyumludur. Ayrıca, Nadeem vd. (2014) nohut bitkisiyle yürüttükleri çalışmada, AMF ve PGPR birlikteliğinin kuraklık toleransını artırdığını bildirmiştir.



Şekil 4.7. Farklı sulama düzeylerinde gübre uygulamalarının yaprak sayısı üzerine etkisi. Aynı sulama ve dönem içinde farklı harflerle gösterilen ortalamalar ($n=3$), Tukey's HSD testine göre istatistiksel olarak farklılık göstermektedir ($p < 0.05$).

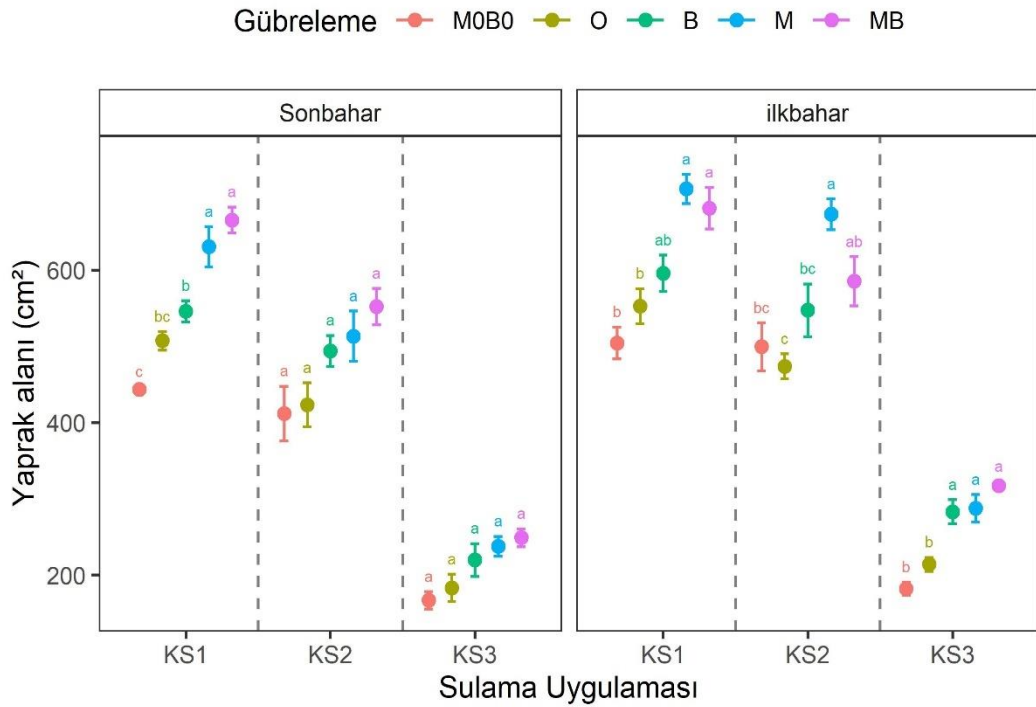
Yaprak alanı

Sulama düzeyleri altında gübre uygulamaları yaprak alanı üzerinde istatistiksel olarak önemli düzeyde etkili olmuştur ($p < 0.05$) (Ek 1-2). Sonbahar döneminde KS1

sulama düzeyinde yaprak alanı değerleri 443 cm² ile 666 cm² arasında değişmiştir. En düşük yaprak alanı M0B0 uygulamasında ölçülmüş olup, bu değer istatistiksel olarak mikrobiyal uygulamalardan anlamlı şekilde düşük bulunmuştur. En yüksek yaprak alanı ise MB ve M uygulamasında kaydedilmiş ve bu değerler istatistiksel olarak tüm diğer uygulamalardan anlamlı şekilde yüksek bulunmuştur ($p<0.05$). İlkbahar döneminde aynı sulama düzeyinde yaprak alanı 504 cm² ile 707 cm² arasında değişmiştir. En düşük yaprak alanı M0B0 uygulamasında gözlenmiş olup, bu değer B ve O uygulamalarıyla istatistiksel olarak benzer grupta yer almıştır. En yüksek yaprak alanı M ve MB uygulamasında belirlenmiş ve istatistiksel olarak en üst grubu oluşturmuştur ($p<0.05$) (Şekil 4.8). KS2 sulama düzeyinde sonbahar döneminde yaprak alanı değerleri 412 cm² ile 552 cm² arasında değişmiştir. Uygulamalar arasında istatistiksel fark bulunmamış; tüm uygulamalar aynı harf grubunda yer almıştır. İlkbahar döneminde yaprak alanı 474 cm² ile 673 cm² arasında değişmiş; en düşük değer O uygulamasında, en yüksek değer ise M uygulamasında elde edilmiştir. M uygulaması MB ile birlikte aynı istatistiksel grupta yer alırken; O ve M0B0 uygulamaları daha düşük gruplarda bulunmuştur ($p<0.05$). (Şekil 4.8). Şiddetli su kısıtı altında uygulanan KS3 düzeyinde, sonbahar döneminde yaprak alanı 167 cm² ile 249 cm² arasında değişmiştir. Şiddetli su kısıtı altında uygulanan KS3 düzeyinde, sonbahar döneminde yaprak alanı 167 cm² ile 249 cm² arasında değişmiştir. En düşük değer M0B0 uygulamasında gözlenmiş olmakla birlikte, uygulamalar arasında istatistiksel fark bulunmamış; tüm uygulamalar aynı harf grubunda yer almıştır ($p>0.05$). İlkbahar döneminde ise yaprak alanı 182 cm² ile 317 cm² arasında değişmiştir. En düşük değer M0B0 uygulamasında kaydedilirken, en yüksek yaprak alanı MB uygulamasında elde edilmiştir. MB, M ve B uygulamaları istatistiksel olarak aynı harf grubunda yer almış ve M0B0 ile O uygulamalarına göre anlamlı düzeyde daha yüksek yaprak alanı sağlamıştır ($p<0.05$) (Şekil 4.8).

Kuraklık stresinin yaprak alanı üzerindeki etkisi, bitkilerde fotosentez kapasitesini doğrudan sınırlayan temel bir morfolojik değişim olarak değerlendirilirken, bu çalışmada MB, M ve B uygulamaları her üç sulama düzeyinde de kontrol grubuna kıyasla anlamlı artışlar sağlamıştır (Abd El-Mageed vd. 2018; Kirnak ve Demirtaş, 2006; Parkash vd. 2021). Tam sulama koşulu olan KS1 düzeyinde, MB uygulaması her iki yetiştirme döneminde de en yüksek yaprak alanını sağlamıştır. Gamalero vd. (2008) de benzer şekilde PGPR (*P. putida* UW4 AcdS⁺) ve AMF'yi birlikte uygulayarak yaprak alanında %131.5 oranında artış elde ettiklerini bildirmiştir. Aynı koşullarda M uygulaması, sonbaharda 630.5 cm² ve ilkbaharda 706.5 cm² ile, kontrol grubuna göre sırasıyla %42.2 ve %40.1 artış sağlamıştır; bu bulgular Li vd. (2012), Wang vd. (2008) ve Çığır vd. (2000) çalışmalarındaki %31–55 aralığındaki artışlarla paralellik göstermektedir. B uygulaması da benzer şekilde, yaprak alanında sonbaharda %23.2, ilkbaharda ise %18.1 oranlarında artış sağlamıştır. Omar vd. (2022), *Streptomyces griseorubens* suşlarıyla yaprak alanını 188.17 cm²'den 323.20 cm²'ye yükseltmiş, Gamalero vd. (2008) ise PGPR uygulamasıyla %107'lik bir artış elde ettiklerini belirtmiştir. Bu sonuçlar, El-Sawah vd. (2021) tarafından PGPR'nin IAA ve sitokinin üretimiyle yaprak gelişimini teşvik ettiğine dair bulgularla desteklenmektedir. KS2 koşullarında da tüm mikrobiyal uygulamalar yaprak alanını artırmış; MB uygulaması, kontrol grubuna göre sonbaharda %33.9 ve ilkbaharda %17.2 artış sağlamıştır. Bu oranlar, Parkash vd. (2021) tarafından bildirilen ve %33–42 düzeyindeki yaprak alanı kayıplarının mikrobiyal uygulamalarla telafi edilebildiğini ortaya koyan sonuçlarla örtüşmektedir. Aynı sulama düzeyinde M uygulaması, özellikle ilkbaharda %34.8 artış sağlayarak en yüksek yaprak alanı değerine

ulaşmış; bu bulgu Zhang vd. (2014) ve Miceli vd. (2023) çalışmalarındaki mikorizal destekle yaprak büyümesinin sürdürülebilirliğini gösteren verilerle uyumludur. B uygulaması ise ilkbaharda %9.6 artışla katkı sağlamıştır. Şiddetli su kısıtı koşullarını temsil eden KS3 düzeyinde ise yaprak alanı genel olarak azalmış olmasına karşın, MB uygulaması sonbaharda %49.3 ve ilkbaharda %74.0 oranında artış sağlayarak tüm uygulamalar arasında en yüksek değerleri vermiştir. Aynı koşullarda M uygulaması %42.6–57.8 ve B uygulaması %31.9–55.4 aralığında artış sağlamış; bu bulgular, Ghorchiani vd. (2018), El-Sawah vd. (2021) ve Omar vd. (2022) tarafından bildirilen, PGPR ve AMF'nin sinerjik etkileriyle yaprak gelişiminin kuraklık koşullarında da sürdürülebileceğini ortaya koyan sonuçlarla büyük ölçüde örtüşmektedir.



Şekil 4.8. Farklı sulama düzeylerinde gübre uygulamalarının yaprak alanı üzerine etkisi. Aynı sulama ve dönem içinde farklı harflerle gösterilen ortalamalar (n=3), Tukey's HSD testine göre istatistiksel olarak farklılık göstermektedir ($p < 0.05$).

4.3. Fizyolojik özellikler

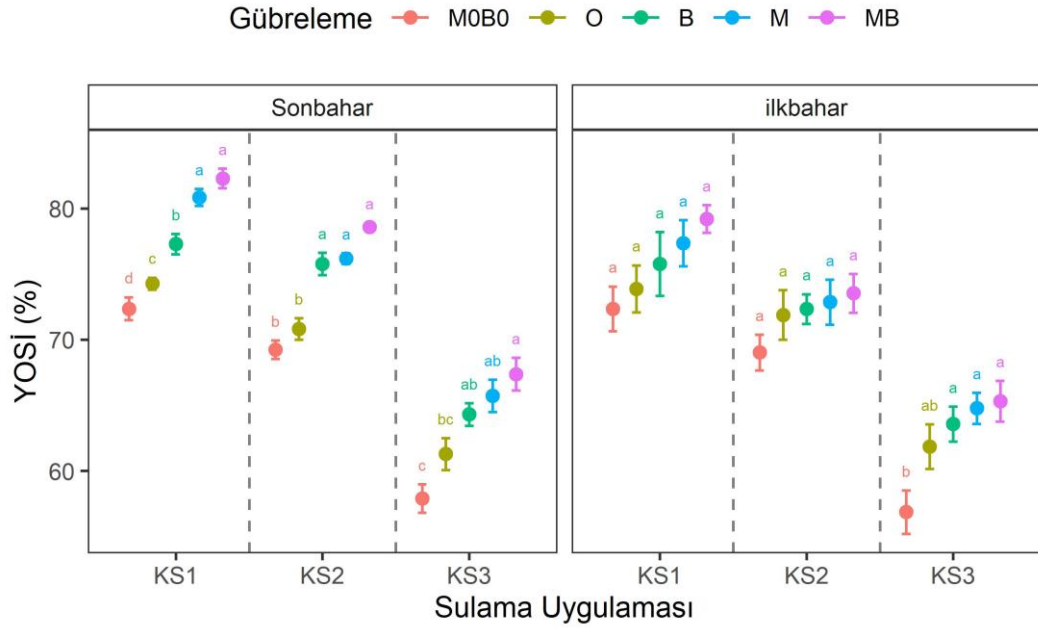
Yaprak oransal su içeriği

Yaprak oransal su içeriği (YOSİ), bitkinin su tutma kapasitesini gösteren önemli bir fizyolojik gösterge olup, her iki dönemde de farklı sulama düzeylerinde gübre uygulamalarından istatistiksel olarak anlamlı şekilde etkilenmiştir ($p < 0.05$) (Ek 3-4). Sonbahar döneminde KS1 sulama düzeyinde, yaprak oransal su içeriği (YOSİ) değerleri 72.4 ile 82.3 arasında değişmiştir. En düşük YOSİ değeri M0B0 uygulamasında ölçülmüş ve bu değer istatistiksel olarak tüm diğer uygulamalardan anlamlı düzeyde düşük bulunmuştur ($p < 0.05$). En yüksek YOSİ değeri ise MB uygulamasında belirlenmiş olup, bu uygulama M ile birlikte en üst istatistiksel grupta yer almıştır.

Aynı sulama düzeyinde ilkbahar dönemine ait YOSİ değerleri 72.3 ile 79.2 arasında değişmiştir. Uygulamalar arasında istatistiksel fark bulunmamış, tüm uygulamalar aynı harf grubunda yer almıştır ($p>0.05$). Bu durum, bu dönemde mikrobiyal gübre uygulamalarının YOSİ üzerindeki etkisinin istatistiksel olarak anlamlı olmadığını göstermektedir ($p < 0.05$) (Şekil 4.9). KS2 sulama düzeyinde sonbahar döneminde YOSİ değerleri 69.2 ile 78.6 arasında değişmiştir. En düşük değer M0B0 uygulamasında kaydedilmiş ve istatistiksel olarak O uygulamasıyla birlikte en alt grubu oluşturmuştur. En yüksek YOSİ değerleri B, M ve MB uygulamalarında ölçülmüş; bu üç uygulama istatistiksel olarak aynı harf grubunda yer almıştır. İlkbahar döneminde YOSİ değerleri 69.0 ile 73.5 arasında değişmiştir. En düşük değer M0B0 uygulamasında ölçülmüş olup, bu uygulama diğerleriyle birlikte aynı harf grubunda yer almıştır. Uygulamalar arasında istatistiksel fark gözlenmemiştir ($p>0.05$) (Şekil 4.9). Şiddetli su kısıtının uygulandığı KS3 sulama düzeyinde, sonbahar döneminde YOSİ değerleri 57.9 ile 67.4 arasında değişmiştir. En düşük değer M0B0 uygulamasında gözlenmiş ve bu değer mikrobiyal gübre uygulamalarına göre anlamlı düzeyde daha düşük bulunmuştur ($p<0.05$). İlkbahar döneminde YOSİ değerleri 56.8 ile 65.3 arasında değişmiştir. M0B0 uygulaması en düşük değeri vermiş olup, bu uygulama B, M ve MB uygulamalarıyla karşılaştırıldığında istatistiksel olarak daha düşük grupta yer almıştır. O konusuyla mikrobiyal uygulamalar arasında önemli derecede farklılık gözlenmemiştir ($p<0.05$) (Şekil 4.9)

KS1 koşulunda tüm gübre uygulamaları yüksek YOSİ değerleri sağlamış, en yüksek değerler MB uygulamasında gözlenmiştir. Bu durum, mikrobiyal gübrelerin tam sulama altında dahi hücre içi su dengesini desteklediğini göstermekte olup, Miceli vd. (2023) tarafından kavun bitkilerinde %100 ET sulamada AMF uygulamasıyla artan YOSİ değerleri ve bunun stomatal regülasyonla ilişkisi ortaya konmuştur. Benzer şekilde, PGPR uygulamalarının da iyi sulama koşullarında osmotik dengeyi koruyarak yaprak su içeriğini artırabildiği bildirilmiştir (Qin vd., 2025). Çalışmamızda MB uygulaması, M ve B'ye kıyasla %1.5–5.0 oranında, M uygulaması ise O ve B'ye göre daha yüksek YOSİ sağlamıştır; bu bulgular, AMF ve PGPR'nin birlikte kullanımının sinerjik etkiler oluşturduğunu belirten Gamalero vd. (2008) ve Ghorchiani vd. (2018) ile uyumludur. KS2 koşullarında yaprak su içeriği düşmüş olsa da tüm mikrobiyal uygulamalar bu düşüşü sınırlamış; MB uygulaması kontrol grubuna göre %13.6, kimyasal gübreye göre %11.0 oranında daha yüksek YOSİ sağlamıştır. Bu durum, AMF ve PGPR'nin birlikte kullanımının tekli uygulamalara göre daha etkili olduğunu gösteren Gamalero vd. (2008), Ghorchiani vd. (2018) ve Cakmakci vd. (2017) çalışmalarını desteklemektedir. Asghari vd. (2020), PGPR ile YOSİ'nin %64.6'dan %72.1'e yükseldiğini rapor etmiş; benzer şekilde, bizim çalışmamızda MB uygulaması, M ve B uygulamalarından daha yüksek değerler sağlamıştır. KS3 koşulunda YOSİ tüm uygulamalarda azalmış ancak mikrobiyal gübrelemeler bu düşüşü belirgin biçimde sınırlamıştır. MB uygulaması, sonbaharda %16.4, ilkbaharda %14.9 oranında kontrol grubuna göre daha yüksek YOSİ sağlamış; bu etki, AMF'nin hif ağları aracılığıyla su alımını artırması ve PGPR'nin osmotik denge sağlayıcı hormon üretimi ile açıklanabilir (Miceli vd., 2023; Ghorchiani vd., 2018). M uygulaması %65.7–64.8, B uygulaması ise %64.3–63.6 ile kontrol grubuna kıyasla yaklaşık %11–12 artış sağlamış; bu değerler Silva vd. (2023), Idris vd. (2022) ve Nadeem vd. (2017) tarafından bildirilen sonuçlarla örtüşmektedir. Özellikle MB uygulamasının, M ve B'ye kıyasla her zaman daha yüksek YOSİ sağlaması, ko-inokulasyonun fizyolojik tamponlama kapasitesini artırdığını ve stres koşullarında su

kaybını azaltarak daha etkili koruma sağladığını ortaya koymaktadır (Kumar vd., 2022; Zarei, 2022).



Şekil 4.9. Farklı sulama düzeylerinde gübre uygulamalarının YOSİ üzerine etkisi. Aynı sulama ve dönem içinde farklı harflerle gösterilen ortalamalar (n=3), Tukey's HSD testine göre istatistiksel olarak farklılık göstermektedir ($p<0.05$).

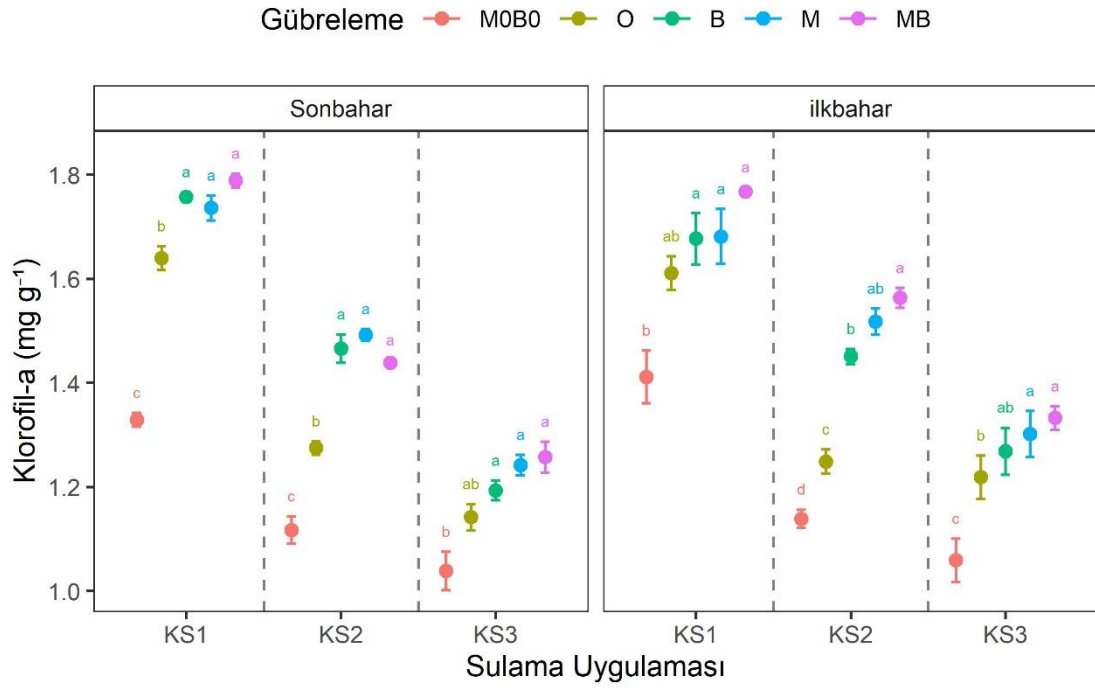
Klorofil

Klorofil içeriği, bitkinin fotosentetik kapasitesini doğrudan yansıtan önemli bir fizyolojik parametre olup, bu çalışmada klorofil a, klorofil b ve toplam klorofil farklı sulama koşullarında gübre uygulamalarından istatistiksel olarak anlamlı düzeyde etkilenmiştir ($p<0.05$) (Ek 3-4). KS1 konusunda sonbahar döneminde klorofil a, klorofil b ve toplam klorofil değerleri sırasıyla 1.33–1.79, 1.09–1.18 ve 2.40–2.94 aralığında değişmiştir. Klorofil a ve toplam klorofil açısından M0B0 uygulaması en düşük değerleri vermiş ve diğer uygulamalardan istatistiksel olarak anlamlı şekilde düşük bulunmuştur ($p<0.05$). En yüksek değerler mikrobiyal gübre uygulamalarında kaydedilmiş olup, bu uygulamalar üst gruba oluşturmuştur. Buna karşılık, klorofil b parametresinde uygulamalar arasında istatistiksel fark bulunmamıştır. İlkbahar döneminde ise klorofil a, klorofil b ve toplam klorofil değerleri sırasıyla 1.30–1.72, 1.11–1.18 ve 2.41–2.90 arasında değişmiştir. Klorofil a, klorofil b ve toplam klorofil bakımından mikrobiyal gübre uygulamaları M0B0 uygulamasına göre istatistiksel olarak üst grupta yer almıştır ($p>0.05$). (Şekil 4.10, Şekil 4.11, Şekil 4.12). Sonbaharda KS2 sulama düzeyinde klorofil a, klorofil b ve toplam klorofil değerleri sırasıyla 1.12–1.49, 0.45–0.66 ve 1.61–2.11 arasında değişmiştir. M0B0 uygulaması tüm parametrelerde en düşük değerleri vermiş; özellikle klorofil a ve toplam klorofil için bu fark istatistiksel olarak anlamlı bulunmuştur ($p<0.05$). En yüksek değerler mikrobiyal gübre konularında ölçülmüş olup, bu uygulamalar üst grupta yer almıştır. İlkbaharda ise klorofil a, klorofil b ve toplam klorofil değerleri sırasıyla 1.10–1.37, 0.43–0.62 ve 1.56–2.00 arasında değişmiştir. M0B0

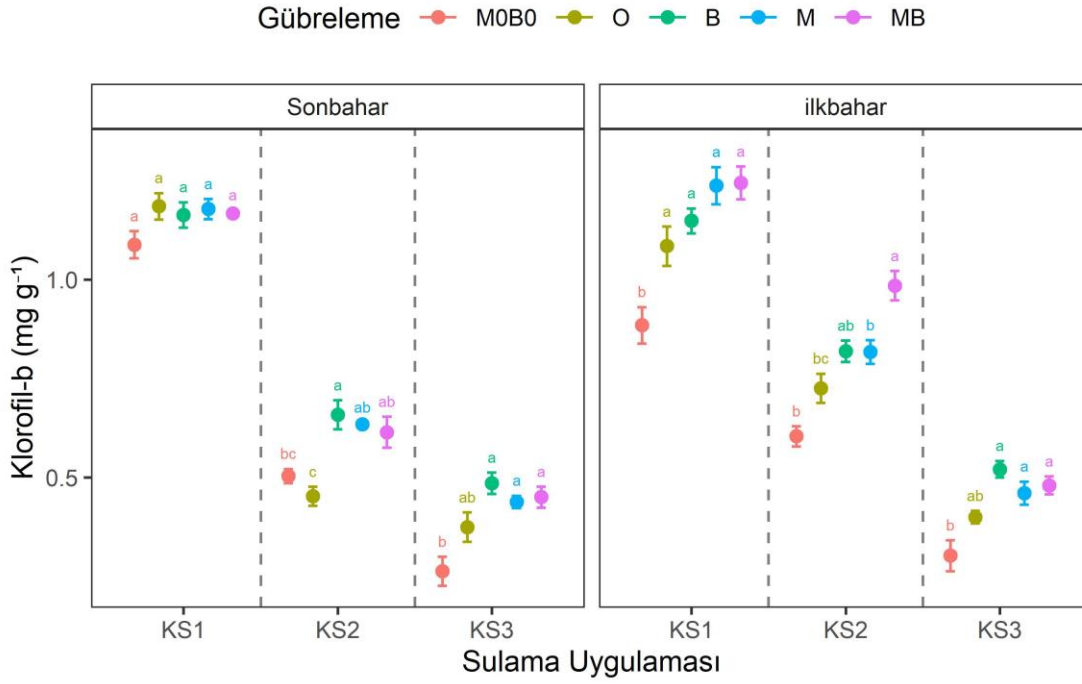
uygulaması her üç parametrede de en düşük grubu oluşturmuştur. En yüksek değerler genellikle mikrobiyal gübre uygulamalarında gözlenmiş; bu uygulamalar üst istatistiksel grubu oluşturmuştur ($p<0.05$) (Şekil 4.10, Şekil 4.11, Şekil 4.12). KS3 sulama seviyesinde sonbahar döneminde klorofil a, klorofil b ve toplam klorofil değerleri sırasıyla 1.04–1.26, 0.26–0.48 ve 1.29–1.70 arasında değişmiştir. M0B0 uygulaması tüm parametrelerde en düşük değerlere sahip olmuştur. En yüksek değerler mikrobiyal uygulamalarda ölçülmüş olup, bu uygulamalar istatistiksel olarak üst grupta yer almıştır. İlkbahar döneminde ise sırasıyla klorofil a 1.03–1.21, klorofil b 0.24–0.43 ve toplam klorofil 1.27–1.73 aralığında değişmiştir. M0B0 uygulaması tüm parametrelerde istatistiksel olarak en düşük grupta yer alırken, mikrobiyal uygulamalar en yüksek değerleri sağlamış ve istatistiksel olarak anlamlı şekilde üst grupta bulunmuştur ($p<0.05$). (Şekil 4.10, Şekil 4.11, Şekil 4.12)

Sulama düzeylerinin pigment içerikleri üzerindeki etkisi çalışmamızda açıkça ortaya konmuş; özellikle düşük su düzeylerinde klorofil içerikleri azalmış, ancak bu azalma mikrobiyal uygulamalarla sınırlanmıştır. Kuraklığın pigment yıkımını artırdığı (Shehata vd., 2022), PGPR'nin koruyucu moleküllerle klorofil kaybını önlediği (Savastano ve Bais, 2024), AMF'nin ise su ve besin alımını artırarak pigment biyosentezini desteklediği bilinmektedir (Chen vd., 2017; Tang vd., 2022). Bu bağlamda, çalışmamızda elde edilen bulgular, Chieb ve Gachomo (2023) ile birlikte literatürle güçlü bir uyum göstermektedir. KS1 koşullarında MB uygulaması her iki dönemde de en yüksek toplam klorofil içeriğini sağlamış ($2.94\text{--}2.99\text{ mg g}^{-1}$) ve kontrol grubuna göre %22.5–31.1, kimyasal gübreye göre %4.6–11.6 daha yüksek değerler vermiştir. Bu bulgular, Amer vd. (2009) ve Kirnak ve Demirtaş (2006) tarafından bildirilen tam sulamada yüksek pigment düzeylerinin mikrobiyal gübrelerle daha da artırılabilmesine ilişkin bulgularla tutarlıdır. KS2 koşullarında klorofil içeriğinde azalma gözlenmiş, ancak MB uygulaması bu düşüşü sınırlandırarak sonbaharda 2.04 , ilkbaharda 2.53 mg g^{-1} düzeylerine ulaşmıştır. İlkbahar döneminde MB uygulaması kontrol grubuna göre %46.2, kimyasal gübreye göre %29.1 oranında daha yüksek pigment içeriği sağlamıştır. Bu sonuç, Dhanusri vd. (2023) ve Farag vd. (2019) tarafından bildirilen su kısıtı altında pigment kayıplarının mikrobiyal uygulamalarla telafi edilebileceğine dair bulgularla örtüşmektedir. KS3 düzeyinde pigment kaybı daha belirgin hale gelmiş; ancak MB uygulaması sonbaharda 1.70 , ilkbaharda 1.80 mg g^{-1} toplam klorofil düzeyleriyle kontrol grubuna göre sırasıyla %31.8 ve %33.3 daha yüksek değerler sağlamıştır. Bu düzeyde klorofil b'nin daha fazla etkilendiği ve klorofil a/b oranının 2.8 üzerinde seyrettiği gözlenmiş; bu durum Amer vd. (2009) ve Dhanusri vd. (2023) tarafından raporlanan pigment bileşenleri üzerindeki seçici stres etkisiyle paralellik göstermektedir. AMF uygulamaları, özellikle M uygulaması, hem orta hem de ileri düzey su kısıtlarında pigment düzeylerinin korunmasına katkı sağlamıştır. Bu bulgu, Abd El-Mageed vd. (2018), Li vd. (2012), Chen vd. (2017), Liu vd. (2023), Mo vd. (2016), Silva vd. (2023), Yooyongwech vd. (2016), Zhang vd. (2014) ve Cakmakci vd. (2017) gibi araştırmacıların AMF'nin klorofil koruyucu etkilerine dair raporlarıyla uyumludur. Benzer şekilde PGPR uygulamaları da pigment içeriklerini artırmış; B uygulaması hem KS2 hem de KS3'te kontrol ve kimyasal gübreye göre daha yüksek pigment değerleri sağlamıştır. Bu sonuçlar, Nadeem vd. (2017), Zarei (2022), Wang vd. (2012), Kumar vd. (2022), Lucas vd. (2023), Nikhil vd. (2023) ve Savastano ve Bais (2024) tarafından bildirilen pigment düzeylerinde PGPR kaynaklı artışlarla büyük ölçüde örtüşmektedir. AMF ve PGPR'nin birlikte uygulandığı MB kombinasyonu ise çalışmamızda en etkili uygulama olarak öne

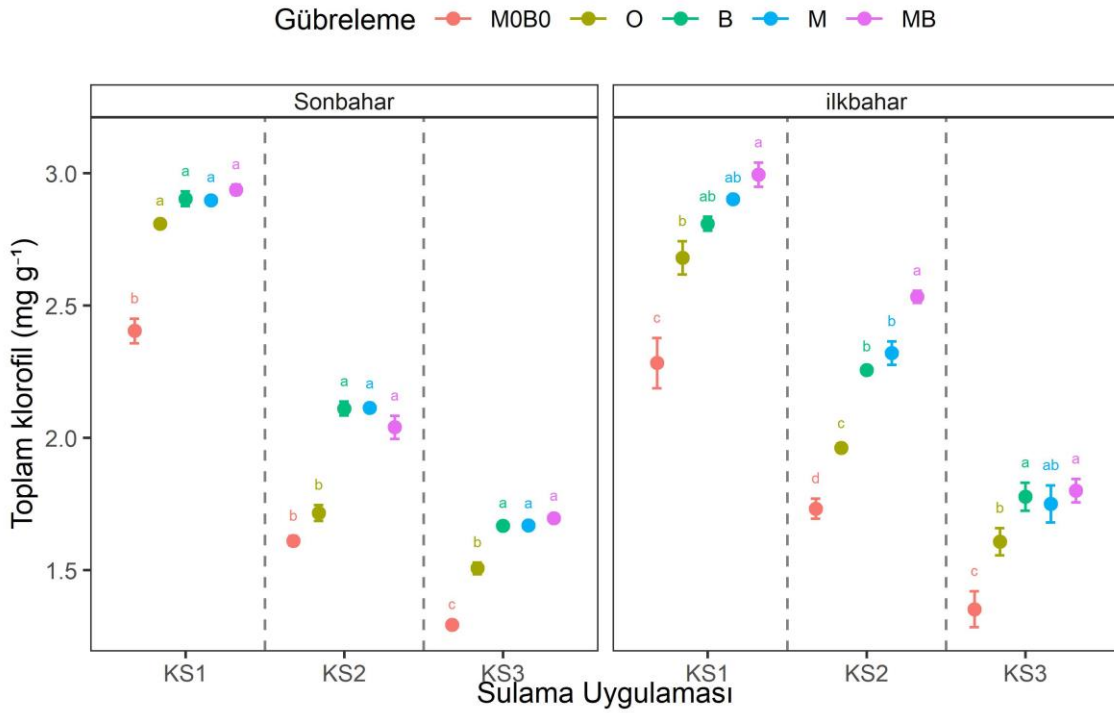
çıkması; özellikle KS3 koşullarında dahi KS2 düzeyindeki kimyasal gübre uygulamasıyla benzer pigment seviyeleri sağlayarak fotosentezin devamlılığını desteklemiştir. Bu bulgu, Raturi vd. (2023) tarafından çilekte ve Nader vd. (2024) tarafından soya bitkisinde AMF+PGPR kombinasyonlarının klorofil düzeyini artırıcı sinerjik etkilerini gösteren çalışmalara paralellik göstermektedir. Literatürde yaygın biçimde bildirilen bu tamamlayıcı etkiler, çalışmamızda da doğrulanmıştır.



Şekil 4.10. Farklı sulama düzeylerinde gübre uygulamalarının klorofil-a üzerine etkisi. Aynı sulama ve dönem içinde farklı harflerle gösterilen ortalamalar (n=3), Tukey's HSD testine göre istatistiksel olarak farklılık göstermektedir ($p < 0.05$).



Şekil 4.11. Farklı sulama düzeylerinde gübre uygulamalarının klorofil-b üzerine etkisi. Aynı sulama ve dönem içinde farklı harflerle gösterilen ortalamalar (n=3), Tukey's HSD testine göre istatistiksel olarak farklılık göstermektedir (p<0.05).



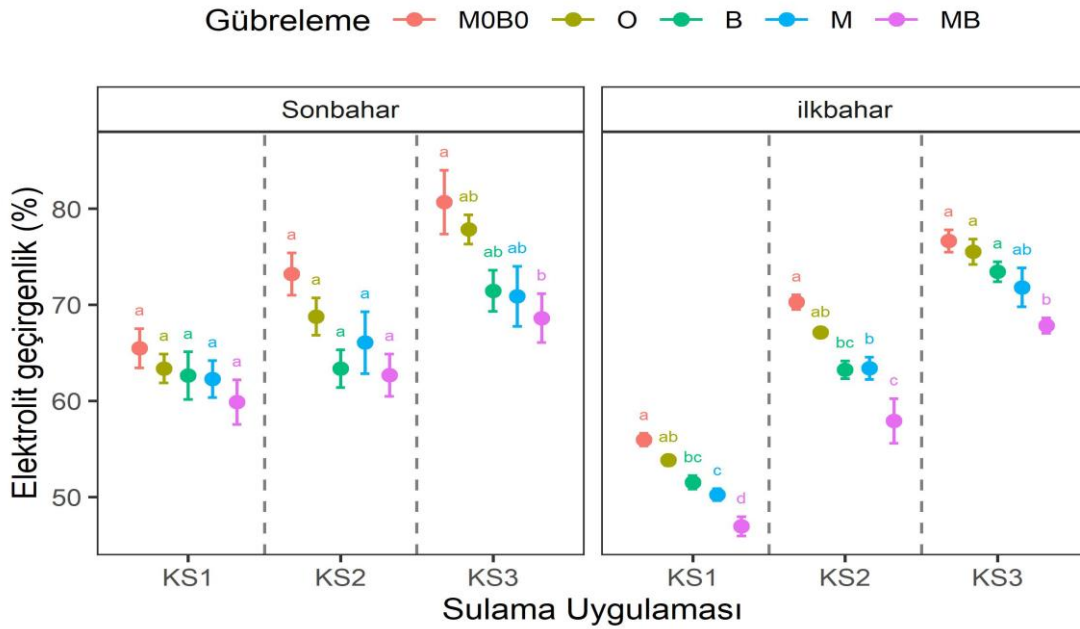
Şekil 4.12. Farklı sulama düzeylerinde gübre uygulamalarının toplam klorofil üzerine etkisi. Aynı sulama ve dönem içinde farklı harflerle gösterilen ortalamalar (n=3), Tukey's HSD testine göre istatistiksel olarak farklılık göstermektedir (p<0.05).

Elektrolit geçirgenlik

Elektrolit geçirgenlik (EG), yaprak hücre zarlarındaki bozulmayı yansıtan önemli bir fizyolojik stres göstergesi olup, çalışmada farklı sulama düzeylerinde gübre uygulamaları tarafından istatistiksel olarak anlamlı düzeyde etkilenmiştir ($p < 0.05$) (Ek 3-4). Sonbahar döneminde elektrolit geçirgenliği değerleri 59.9 ile 65.5 arasında değişmiştir. En yüksek değer M0B0 uygulamasında ölçülmüş, en düşük değer ise MB uygulamasında kaydedilmiştir. Ancak uygulamalar arasında istatistiksel fark bulunmamış; tüm uygulamalar aynı harf grubunda yer almıştır ($p > 0.05$). İlkbahar döneminde elektrolit geçirgenliği 46.9 ile 56.0 arasında değişmiştir. M0B0 uygulaması en yüksek değeri vermiş ve bu değer istatistiksel olarak diğer uygulamalardan anlamlı düzeyde yüksek bulunmuştur ($p < 0.05$). MB uygulaması en düşük değeri sağlamış olup, M ve B uygulamaları ile birlikte istatistiksel olarak alt grupta yer almıştır ($p > 0.05$) (Şekil 4.13). Sonbahar döneminde elektrolit geçirgenliği değerleri 62.7 ile 73.2 arasında değişmiş; en yüksek değer M0B0 uygulamasında kaydedilmiştir. Uygulamalar arasında istatistiksel fark gözlenmemiş, tüm uygulamalar aynı harf grubunda yer almıştır ($p > 0.05$). İlkbahar döneminde değerler 57.9 ile 70.3 arasında değişmiş olup, en yüksek değer M0B0 uygulamasında, en düşük değer ise MB uygulamasında ölçülmüştür. M0B0 uygulaması istatistiksel olarak en yüksek grupta, MB uygulaması ise en düşük grupta yer almıştır ($p < 0.05$) (Şekil 4.13). Şiddetli su stresi koşullarında (KS3) EG değerleri en yüksek düzeylerine ulaşmıştır. Sonbahar döneminde elektrolit geçirgenliği değerleri 68.6 ile 80.7 arasında değişmiştir. M0B0 uygulaması en yüksek değeri vermiş olup, bu değer MB uygulamasına göre istatistiksel olarak anlamlı düzeyde yüksek bulunmuştur ($p < 0.05$). İlkbahar döneminde değerler 67.8 ile 76.7 arasında değişmiştir. M0B0 uygulaması en yüksek, MB uygulaması ise en düşük elektrolit geçirgenliği değerini vermiştir. Aradaki fark istatistiksel olarak anlamlı bulunmuş; MB uygulaması zar bütünlüğünün korunmasına en fazla katkıyı sağlamıştır ($p < 0.05$).

Bu çalışmada artan su kısıtı koşullarının hıyar yaprak membran bütünlüğünü olumsuz etkilediği ve özellikle KS3 koşullarında en yüksek elektrolit geçirgenliği (EG) değerinin, KS1 koşullarında ise en düşük EG değerinin ölçüldüğü belirlenmiştir. Bu bulgu, azalan sulama ile hücre zarlarında yapısal hasarın arttığını ve geçirgenliğin yükseldiğini göstermekte olup, literatürde kuraklık altında membran stabilitesite indeksinin (MSİ) bozulduğu yönündeki verilerle örtüşmektedir (Ahmad vd., 2022; Nour vd., 2024). Brito vd. (2019), zeytin bitkisinde kuraklık koşullarında ROS birikiminin lipid, protein ve DNA'ya zarar vererek EG'yi artırdığını; Tang vd. (2022) ise kuraklığın hücre zarını tahrip ettiğini raporlamıştır. Abd El-Mageed vd. (2018), MSİ'nin %53.2'den %46.9'a düştüğünü, Das vd. (2024) ise MDA artışıyla birlikte MSİ'de %45.19 azalma olduğunu bildirmiştir. Kirnak ve Demirtaş (2006), EG'nin %100 sulamada %9.5 iken su stresi altında %31.2'ye yükseldiğini belirtmiş; Amini vd. (2017) ise %25 TK koşullarında en yüksek iyon sızıntısının meydana geldiğini vurgulamıştır. Cakmakci vd. (2017) kavunda %60 su kısıtında EG'nin %24.09'a çıktığını, *Glomus spp.* uygulamalarıyla bu değer %18.06–19.66'ya düştüğünü; Abdelaal vd. (2024) ve Karimi vd. (2022) ise buğday bitkisinde PGPR ve AMF uygulamalarıyla MSİ'nin %25'ten %37'ye yükseldiğini bildirmiştir. Zarei (2022) ve Sandhya vd. (2010), mısır bitkisinde *P. fluorescens* GAP-P45 suşu ile EG'nin %68'e kadar azaldığını; Kumar vd. (2022) ve Lucas vd. (2023) domates bitkisinde PGPR ile EG'nin %12.5–23 oranında düştüğünü raporlamıştır. Asghari vd. (2020), *Mentha pulegium* L. bitkisinde %89.63 olan EG'nin,

Azospirillum brasilense ve *Azotobacter chroococcum* ile %58.43–80.27’ye, kombinasyonla %53.73’e indiğini; Qin vd. (2025) ise hıyarda EG’nin PGPR ile %61.4’ten %35.2’ye düştüğünü belirtmiştir. Nadeem vd. (2017), %50 su kısıtında PGPR+biyochar uygulamasıyla EG’yi %76’dan %60.3’e düşürmüş; Wang vd. (2012), PGPR konsorsiyumuyla %66.97 olan EG’yi %57.00’ye indirerek zar bütünlüğünü %14.9 oranında koruduğunu bildirmiştir. Çalışmamızda da mikrobiyal gübre uygulamaları EG üzerinde anlamlı etki oluşturmuş; özellikle MB uygulaması her iki sezonda da kontrol grubuna göre en düşük EG düzeylerini sağlayarak zar bütünlüğünü en iyi koruyan uygulama olmuştur. Bu durum, Hidri vd. (2024) tarafından tuz stresindeki bitkilerde PGPR (*Bacillus subtilis*) ve AMF (*Rhizophagus intraradices*) ile EG’nin düşürüldüğü, Ali vd. (2025) tarafından ise *Serratia* ve *Pseudomonas* kökenli PGPR’lerin tuz stresinde EG’yi %18–28 azalttığı ve antioksidan enzim aktivitelerini artırdığı yönündeki bulgularla yüksek düzeyde uyumluluk göstermektedir.



Şekil 4.13. Farklı sulama düzeylerinde gübre uygulamalarının elektrolit geçirgenlik üzerine etkisi. Aynı sulama ve dönem içinde farklı harflerle gösterilen ortalamalar (n=3), Tukey’s HSD testine göre istatistiksel olarak farklılık göstermektedir ($p<0.05$).

4.4. Yaprak besin elementleri

Makro elementler

Yaprak N, P, K, Ca ve Mg içerikleri uygulanan gübrelerden farklı sulama seviyeleri altında anlamlı düzeyde etkilenmiştir ($p<0.05$) (Çizelge 4.2). KS1 sulama düzeyinde yaprak dokusundaki N, P, K, Ca ve Mg içerikleri sonbahar döneminde sırasıyla %3.47–%5.54, %0.19–%0.54, %1.98–%2.83, %3.20–%5.80 ve %0.79–%1.20 aralıklarında değişmiştir. İlkbahar döneminde ise bu elementler için gözlenen değişim aralıkları %3.68–%5.27 (N), %0.21–%0.69 (P), %2.92–%4.46 (K), %3.40–%4.50 (Ca) ve %0.50–%0.95 (Mg) şeklinde olmuştur. Her iki dönemde de en düşük değerler tüm elementler açısından M0B0 uygulamasında belirlenmiş olup, bu uygulama genel olarak

istatistiksel olarak en alt grupta yer almıştır. En yüksek N ve K içerikleri gübreleme uygulamalarında belirlenirken, P, Ca ve Mg oranları ise her iki dönemde de mikrobiyal uygulamalarda ölçülmüş ve çoğu parametre açısından bu uygulama istatistiksel olarak en üst grubu oluşturmuştur ($p<0.05$) (Çizelge 4.2). KS2 koşullarında yapraklardaki N, P, K, Ca ve Mg içerikleri sonbaharda sırasıyla %3.32–%5.32, %0.15–%0.41, %1.92–%2.64, %2.90–%4.20 ve %0.65–%0.95; ilkbaharda ise %3.56–%4.53, %0.18–%0.55, %2.42–%3.92, %3.00–%4.07 ve %0.33–%0.71 aralığında değişmiştir. Her iki dönemde de en düşük değerler M0B0 uygulamasında ölçülmüş ve tüm elementler açısından bu uygulama istatistiksel olarak en alt grupta yer almıştır ($p<0.05$). MB uygulaması sonbaharda N, P ve K ilkbaharda ise P içerikleri bakımından en yüksek düzeyleri sağlamış ve istatistiksel olarak üst grubu oluşturmuştur. (Çizelge 4.2). KS3 düzeyinde yapraklardaki N, P, K, Ca ve Mg içerikleri sonbaharda sırasıyla %2.83–%4.19, %0.12–%0.33, %1.77–%2.32, %2.30–%3.60 ve %0.25–%0.69; ilkbaharda ise %2.17–%3.87, %0.10–%0.37, %2.04–%3.39, %1.90–%3.30 ve %0.20–%0.31 aralığında değişmiştir. Her iki dönemde de M0B0 uygulaması tüm elementlerde en düşük değerleri vermiş ve çoğu parametrede istatistiksel olarak alt gruplarda yer almıştır ($p<0.05$). Sonbaharda N, P ve K içerikleri O, B, M ve MB uygulamalarında benzer düzeyde ölçülmüş; yalnızca M uygulaması Ca ve Mg bakımından istatistiksel olarak en yüksek grubu oluşturmuştur. İlkbahar döneminde ise O uygulamasına kıyasla MB uygulaması altında N, P, K ve Ca içerikleri istatistiksel olarak üst grupta yer almıştır; Mg açısından ise uygulamalar arasında anlamlı fark saptanmamıştır. (Çizelge 4.4).

Mikro elementler

Farklı sulamalar altında gübreleme uygulamaları yapraktaki mikro elementlerin konsantrasyonlarını iki dönemde de istatistiksel olarak önemli derecede etkilemiştir ($p<0.05$). Genel olarak sulama seviyesinin azaldığı uygulamalarda mikro elementlerin değerleri düşmüş mikrobiyal gübrelerin uygulandığı gruplarda artış göstermiştir (Çizelge 4.3). KS1 sulama düzeyinde yapraklardaki Fe, Mn, Zn ve Cu içerikleri sonbaharda sırasıyla 78.0–168.4 ppm, 33.0–75.5 ppm, 65.8–151.7 ppm ve 6.2–8.6 ppm; ilkbaharda ise 76.9–164.9 ppm, 54.0–84.7 ppm, 68.6–141.9 ppm ve 10.5–13.7 ppm arasında değişmiştir. Her iki dönemde de Fe, Mn ve Zn içerikleri bakımından en düşük düzeyler M0B0 uygulamasında kaydedilmiş olup, bu uygulama istatistiksel olarak anlamlı şekilde alt grupta yer almıştır ($p<0.05$). Fe ve Mn açısından MB uygulaması yüksek değerler sağlamış olmakla birlikte, bu uygulama çoğu durumda B ve M uygulamalarıyla aynı istatistiksel grupta yer almıştır. Zn içeriğinde mikrobiyal uygulamalar benzer sonuçlar vermiş; tüm uygulamalar istatistiksel olarak aynı grupta bulunmuştur. Cu bakımından sonbaharda B, ilkbaharda ise MB uygulaması en yüksek ortalamalara ulaşsa da, her iki dönemde de bu farklar sınırlı düzeyde olmuş ve MB, B ve M uygulamaları istatistiksel olarak benzer gruplarda değerlendirilmiştir (Çizelge 4.3). KS2 koşullarında hıyar yapraklarında belirlenen Fe, Mn, Zn ve Cu içerikleri, sonbahar döneminde sırasıyla 56.6–135.5 ppm, 28.9–68.4 ppm, 57.3–137.6 ppm ve 5.9–8.1 ppm; ilkbahar döneminde ise 52.8–143.0 ppm, 41.0–69.2 ppm, 55.3–130.4 ppm ve 8.8–11.3 ppm aralığında değişmiştir. Her iki dönemde de M0B0 uygulaması, tüm mikro elementlerde en düşük değerleri sağlamış ve istatistiksel olarak en alt grupta yer almıştır ($p<0.05$). MB ve B uygulamaları, genellikle Fe, Mn ve Zn içerikleri bakımından istatistiksel olarak en yüksek grupta yer alırken; M uygulaması bu gruba yakın düzeyde sonuçlar vermiştir. Cu içeriği açısından ise MB, B ve M uygulamaları benzer değerler göstermiş ve aralarında anlamlı

bir farklılık gözlenmemiştir ($p>0.05$) (Çizelge 4.3). KS3 sulama düzeyinde, Fe, Mn, Zn ve Cu içerikleri sonbaharda sırasıyla 26.8–81.7 ppm, 20.9–59.3 ppm, 24.2–65.0 ppm ve 5.8–7.5 ppm; ilkbaharda ise 30.5–78.8 ppm, 26.9–47.6 ppm, 22.2–58.0 ppm ve 5.2–7.0 ppm arasında değişmiştir.. Mn içerikleri her iki dönemde de MB, M ve B uygulamalarında %60–180 arasında artış sağlamış ve bu uygulamalar kimyasal gübreyle aynı grupta kalmıştır ($p<0.05$). Zn içeriği açısından da MB uygulamaları özellikle kontrol grubuna göre yüksek değerler sunmuştur (örneğin sonbaharda %168.6 artış) ($p<0.05$) (Çizelge 4.3).

Tam sulama koşullarında, MB uygulaması tüm makro elementlerde en yüksek seviyeleri sağlamıştır. Bu bulgular, Uçar vd. (2025) tarafından marul bitkisinde yürütülen çalışmada PGPR ve AMF'nin beraber kullanımının yapraktaki makro element düzeylerini artırdığını bildiren sonuçlarla örtüşmektedir. Bununla birlikte hem M hem de B uygulamaları da kontrol grubuna kıyasla anlamlı artışlar sergilemiştir. Örneğin, N içeriği B uygulamasında %4.89, M uygulamasında %4.95 ile MB'nin ardından en yüksek seviyelere ulaşmış; kontrol grubuna göre sırasıyla %38.2 ve %40.8 oranlarında artış sağlamıştır. Benzer şekilde, Çekic ve Yücel (2021) raporlarında, marul bitkisinde AMF uygulamasıyla yaprak N içeriğinin anlamlı düzeyde arttığını bildirmiştir. Bu sonuçlar, PGPR'nin N fiksasyonu (Zarei, 2022) ve AMF'nin kök ATPaz aktivitesini artırarak taşıyıcı protein ekspresyonunu desteklemesi (Sun vd. 2024) ile açıklanabilir. Fosfor içeriği açısından da benzer bir eğilim izlenmiştir. M uygulaması %0.48, B uygulaması %0.50 düzeyine ulaşarak kontrol grubuna göre %140'ın üzerinde artış sağlamıştır. Bu bulgular, AMF'nin çözünmeyen fosfatı mobilize eden hif ağı (Ortaş, 2010; Silva vd. 2023) ve PGPR'nin fosfat çözünürlüğünü artıran organik asit üretimiyle ilişkilendirilen etkilerini desteklemektedir (Ghorchiani vd. 2018). K, Ca ve Mg içeriklerinde de MB uygulaması en yüksek değerleri vermiş olsa da M ve B uygulamaları da kontrol grubuna göre anlamlı artışlar sağlamıştır.

Mikro elementler açısından da mikrobiyal uygulamaların olumlu etkileri dikkat çekicidir. Örneğin, Fe içeriği M uygulamasında %110, B uygulamasında %106 oranında artmış; Zn içeriği ise B'de %125, M'de %117 oranında yükselmiştir. Bu bulgular, PGPR'nin siderofor üretimi yoluyla Fe ve Zn taşınımını artırması (Shao vd. 2014) ve AMF'nin hif taşıma sistemleriyle mikro elementlerin biyoyararlanabilirliğini geliştirmesi (Kaya vd. 2003) ile tutarlıdır. KS2 koşullarında da MB uygulaması tüm elementlerde en yüksek değerleri sağlamış; ancak M ve B uygulamaları yine kontrol grubuna göre anlamlı düzeyde artış göstermiştir. Örneğin N içeriği M uygulamasında %4.4, B uygulamasında %4.28 düzeyine ulaşmıştır. Benzer şekilde, P içeriği M'de %0.38, B'de %0.36 olarak ölçülmüştür. Bu artışlar, PGPR'nin fosfor çözünmesini ve kök gelişimini teşvik etmesi (Ghorchiani vd. 2018; Omar vd. 2022) ve AMF'nin taşıyıcı gen ekspresyonunu artırmasıyla (Sun vd. 2024) uyumludur. Zn, Fe, Mn ve Cu içerikleri açısından da M ve B uygulamaları MB'ye yakın değerlere ulaşarak, kontrole kıyasla istatistiksel olarak farklı grupta yer almıştır. Özellikle Zn içeriği M uygulamasında %120, B uygulamasında ise %115 oranında artış göstermiştir (Ghani vd. 2022). KS3 koşullarında besin elementlerinde genel bir düşüş gözlenmiş, ancak tüm mikrobiyal uygulamalar bu olumsuzluğu önemli ölçüde sınırlandırmıştır. N içeriği M uygulamasında %3.7, B uygulamasında %3.6; P içeriği ise sırasıyla %0.30 ve %0.28 olarak kaydedilmiştir. Bu değerler, AMF'nin hifleri vasıtasıyla geniş toprak hacmine erişmesi (Sun vd. 2024) ve PGPR'nin kök gelişimini uyarak alımı kolaylaştırmasıyla açıklanabilir (Yang vd.

2024). Mikro elementlerde de benzer şekilde M ve B uygulamaları, kontrol grubuna göre %100'ün üzerinde artış sağlamıştır. Özellikle Zn içeriği B uygulamasında %108, M uygulamasında %115 oranında artış göstermiş; Fe içerikleri de %140'ın üzerinde seyretmiştir. Bu sonuçlar, PGPR'nin siderofor üretimi ve AMF'nin mineral taşıyıcı proteinleri uyarma kapasitesiyle açıklanabilir (Shao vd. 2014).

Çizelge 4.2. Farklı sulama düzeylerinde gübre uygulamalarının yaprak makro besin elementleri üzerine etkisi. Aynı sulama ve dönem içinde farklı harflerle gösterilen ortalama (n=3) değerler, Tukey's HSD testine göre istatistiksel olarak farklılık göstermektedir (p< 0.05).

		Sonbahar					İlkbahar				
Sulama	Gübreleme	N %	K %	P %	Ca %	Mg %	N %	K %	P %	Ca %	Mg %
KS1	M0B0	3.47 b	1.98 b	0.19 d	3.20 d	0.79 b0	3.68 b	2.92 b	0.21 c	3.40 b	0.50 c
	O	5.27 a	2.67 a	0.34 c	4.10 c	1.10 a	4.57 ab	3.75 a	0.41 b	3.80 ab	0.62 bc
	B	5.41 a	2.72 a	0.49 ab	5.80 a	1.20 a	4.64 a	3.99 a	0.56 ab	4.20 ab	0.83 a
	M	5.49 a	2.83 a	0.44 b	5.30 b	1.10 a	4.77 a	4.12 a	0.49 b	4.30 ab	0.78 ab
	MB	5.54 a	2.79 a	0.54 a	5.80 a	1.10 a	5.27 a	4.46 a	0.69 a	4.50 a	0.95 a
KS2	M0B0	3.32 c	1.92 c	0.15 c	2.90 b	0.65 b	3.56 a	2.42 b	0.18 c	3.00 b	0.33 c
	O	4.91 b	2.41 b	0.3 b	3.90 a	0.91 a	3.90 a	3.48 a	0.32 bc	3.30 ab	0.48 bc
	B	5.12 ab	2.47 ab	0.39 a	4.20 a	0.92 a	4.10 a	3.74 a	0.48 ab	3.90 a	0.63 ab
	M	5.19 ab	2.64 ab	0.38 a	4.10 a	0.95 a	4.23 a	3.61 a	0.48 ab	4.00 a	0.69 a
	MB	5.32 a	2.45 a	0.41 a	4.10 a	0.92 a	4.53 a	3.92 a	0.55 a	4.07 a	0.71 a
KS3	M0B0	2.83 b	1.77 b	0.12 b	2.3 e	0.25 d	2.17 b	2.04 b	0.10 c	1.90 c	0.20 a
	O	3.88 a	2.11 a	0.25 a	2.9 d	0.44 c	3.10 ab	2.29 b	0.18 bc	2.40 bc	0.25 a
	B	3.97 a	2.27 a	0.30 a	3.4 b	0.57 b	3.57 a	3.16 a	0.27 ab	3.20 ab	0.27 a
	M	4.19 a	2.32 a	0.31 a	3.6 a	0.69 a	3.77 a	3.25 a	0.30 a	3.10 ab	0.29 a
	MB	4.13 a	2.32 a	0.33 a	3.2 c	0.61 ab	3.87 a	3.39 a	0.37 a	3.30 a	0.31 a
KS1		<.0001	0.0011	<.0001	<.0001	0.0004	0.0043	0.0007	0.0001	0.0213	0.0002
KS2		<.0001	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001	0.2017	0.0076	0.0005	0.0086	0.0004
KS3		0.0002	0.0005	0.0005	<.0001	0.0077	0.0069	0.001	0.0004	0.0021	0.3363

Çizelge 4.3. Farklı sulama düzeylerinde gübre uygulamalarının yaprak mikro besin elementleri üzerine etkisi. Aynı sulama ve dönem içinde farklı harflerle gösterilen ortalama (n=3) değerler, Tukey's HSD testine göre istatistiksel olarak farklılık göstermektedir ($p < 0.05$).

Sulama	Gübreleme	Sonbahar				İlkbahar			
		Fe ppm	Mn ppm	Zn ppm	Cu ppm	Fe ppm	Mn ppm	Zn ppm	Cu ppm
KS1	M0B0	78.0 d	33.0 c	65.8 b	6.2 b	76.9 b	54.0 b	68.6 b	10.5 b
	O	105.0 c	64.6 b	141.4 a	7.5 ab	93.3 b	72.7 ab	136.4 a	13.2 ab
	B	166.0 a	69.9 ab	149.9 a	8.6 a	154.9 a	73.7 ab	141.9 a	13.4 a
	M	139.1 b	69.4 ab	149.5 a	8.1 ab	138.7 a	77.0 a	138.5 a	13.5 a
	MB	168.4 a	75.5 a	151.7 a	8.4 a	164.9 a	84.7 a	137.7 a	13.7 a
KS2	M0B0	56.6 d	28.9 c	57.3 b	5.9 b	52.8 e	41.0 c	55.3 b	8.8 a
	O	89.7 c	61.8 b	135.4 a	7.5 ab	69.6 d	50.0 bc	130.4 a	10.3 a
	B	135.5 a	63.9 ab	133.1 a	8.1 a	128.7 b	59.8 ab	125.1 a	11.3 a
	M	104.2 b	64.3 ab	136.2 a	7.9 a	112.4 c	64.7 ab	125.2 a	10.7 a
	MB	126.5 a	68.4 a	137.6 a	8.0 a	143.0 a	69.2 a	123.6 a	11.0 a
KS3	M0B0	26.8 d	20.9 c	24.2 c	5.8 a	30.5 c	26.9 b	22.2 c	5.2 b
	O	43.4 c	53.9 b	39.9 b	6.7 a	43.8 bc	41.9 a	34.9 bc	5.4 ab
	B	77.5 a	58.6 a	42.0 b	7.2 a	74.5 a	47.6 a	38.7 b	6.3 ab
	M	55.3 b	58.1 a	58.0 a	7.5 a	59.9 ab	43.3 a	54.0 a	6.3 ab
	MB	81.7 a	59.3 a	65.0 a	7.4 a	78.8 a	45.7 a	58.0 a	7.0 a
KS1		<.0001	<.0001	<.0001	0.0163	<.0001	0.0113	<.0001	0.0205
KS2		<.0001	<.0001	<.0001	0.0244	<.0001	0.0021	<.0001	0.1119
KS3		<.0001	0.5658	<.0001	0.0592	0.0003	0.0004	0.0001	0.0378

4.5. Biyokimyasal özellikler

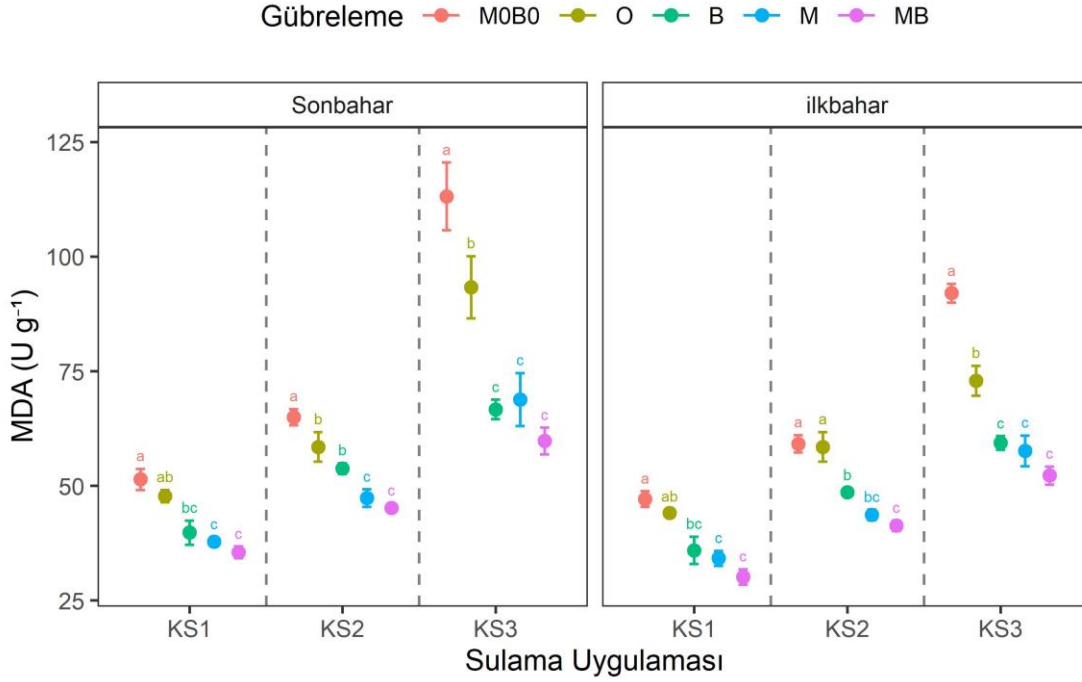
MDA

Her iki dönemde de farklı sulama düzeylerinde gübre uygulamaları yaprak dokularında oluşan MDA birikimini istatistiksel olarak anlamlı düzeyde etkilemiştir ($p < 0.05$) (Ek 5-6). KS1 düzeyinde, sonbahar döneminde MB uygulaması 35 U g^{-1} değeri

ile en düşük MDA birikimini sağlamış; M uygulaması da 38 U g^{-1} ile benzer etkinlik göstermiştir. B uygulaması 40 U g^{-1} ile bu iki uygulamanın ardından gelirken, kontrol (51 U g^{-1}) ve O (48 U g^{-1}) uygulamaları daha yüksek değerlere sahip olmuştur. İlkbaharda da benzer bir tablo oluşmuş, MB uygulaması 30 U g^{-1} ile en düşük değeri sağlamış; M (34 U g^{-1}) ve B (36 U g^{-1}) uygulamaları bu değeri yakından takip etmiştir. Kontrol (47 U g^{-1}) ve O (44 U g^{-1}) bu dönemde de daha yüksek MDA seviyelerine neden olmuştur. Sonbahar döneminde uygulamalar arasında istatistiksel olarak önemli fark bulunmazken ilkbaharda MB uygulaması kontrol uygulamasına göre %36.2 O uygulamasına göre ise %31.8 oranlarında daha düşük MDA birikimine neden olmuştur (Şekil 4.14). KS2 düzeyinde, MB uygulaması sonbahar döneminde 45 U g^{-1} , ilkbahar döneminde ise 41 U g^{-1} MDA değeri sağlamıştır. Her iki durumda da M uygulamasıyla ($47 - 44 \text{ U g}^{-1}$) birlikte en düşük değerlere ulaşılmış ve bu iki uygulama istatistiksel olarak benzer grupta yer almıştır. B uygulamaları da ($54 - 49 \text{ U g}^{-1}$) bu uygulamaların ardından gelmiştir. MB ve M uygulamaları, her iki sezonda da kontrolden anlamlı derecede daha düşük MDA birikimi sağlamıştır ($p < 0.05$) (Şekil 4.14). KS3 düzeyinde, su kısıtı nedeniyle MDA seviyeleri genel olarak yükselmiş olmakla birlikte, mikrobiyal gübre uygulamaları bu artışı sınırlandırmada etkili olmuştur. MB uygulaması sonbaharda 60, ilkbaharda ise 52 U g^{-1} değerine ulaşmış; M ve B uygulamalarıyla aynı grupta yer almıştır. Mikrobiyal gübre uygulamaları iki sezonda da kontrol ve O konularından anlamlı derecede daha düşük MDA üretimine neden olmuşlardır ($p < 0.05$). Özellikle MB uygulaması kontrol ve O konularından sırasıyla sonbaharda %47 ve %36 ilkbaharda ise %44 ve %29 oranlarında daha az MDA üretimi sağlamıştır (Şekil 4.14).

S1 koşullarında, MB uygulaması her iki dönemde de en düşük MDA seviyelerini sağlamış, bunu sırasıyla M ve B uygulamaları takip etmiştir. MB uygulaması, ilkbahar döneminde kontrol grubuna göre %36.2, kimyasal gübreye göre %31.8 oranında daha düşük MDA birikimi göstermiştir. Bu bulgular, PGPR'nin ROS birikimini azaltarak zar bütünlüğünü koruduğunu bildiren Wang vd. (2012) ve Kumar vd. (2022) ile, AMF'nin optimum koşullarda dahi oksidatif baskıyı sınırladığını ortaya koyan Mo vd. (2016) çalışmalarıyla uyumludur. KS2 koşullarında, MB ve M uygulamaları sonbaharda sırasıyla 45 ve 47 U g^{-1} , ilkbaharda 41 ve 44 U g^{-1} MDA düzeyleri ile en düşük değerleri vermiş, aynı istatistiksel grupta yer almıştır. B uygulamaları da bu iki uygulamayı takip etmiş; bu sonuçlar, AMF'nin lipid peroksidasyonunu sınırlandırıcı etkisini vurgulayan Li vd. (2025), Alam vd. (2023) ve Abdelaal vd. (2024) ile uyum göstermiştir. Ayrıca, PGPR uygulamalarının MDA düzeylerini %38.5'e kadar azaltabildiği daha önce hıyar (Wang vd., 2012) ve mentha (Asghari vd., 2020) bitkilerinde gösterilmiştir. KS3 koşullarında ise genel olarak MDA birikimi artmakla birlikte, MB, M ve B uygulamaları bu artışı sınırlamış; MB uygulaması kontrol grubuna göre sonbaharda %47, ilkbaharda %44 oranında daha düşük MDA düzeyi sağlamıştır. Bu bulgular, kuraklıkla indüklenen ROS üretiminin hücre zarlarında peroksidasyona neden olduğunu belirten Amini vd. (2017), Dhanusri vd. (2023) ve Das vd. (2024) ile örtüşmekte; aynı zamanda, AMF'nin su alımını artırıcı ve PGPR'nin SOD ve CAT gibi antioksidan sistemleri aktive edici etkilerine atfedilmektedir (Mo vd., 2016; Asghari vd., 2020). PGPR uygulamalarıyla MDA'nın %30–40 oranında azaltılabildiği Zarei (2022) ve Lucas vd. (2023) tarafından bildirilmiş; AMF ve PGPR birlikte uygulandığında ise bu etkinin sinerjik biçimde güçlendiği Al-Silmawy vd. (2025) ve Sun vd. (2024) tarafından ortaya konmuştur. MB uygulamasının tekli ve geleneksel uygulamalara kıyasla daha düşük MDA birikimi sağlaması bu sinerjiyi desteklemektedir. Öte yandan, bazı çalışmalarda mikrobiyal uygulamaların MDA

üzerindeki etkilerinin sınırlı olduğu rapor edilmiştir (Calvo-Polanco vd., 2016; Al-Hinai vd., 2024); ancak bu durumların mikrobiyal suşların stres toleransı, bitki türü ve çevresel koşullara bağlı olarak değişebileceği belirtilmiştir. Çalışmamızda elde edilen anlamlı azalmalar, PGPR ve AMF'den oluşan mikrobiyal konsorsiyumun hıyar bitkisinde su stresi kaynaklı oksidatif hasarı azaltmada etkili olduğunu göstermektedir.



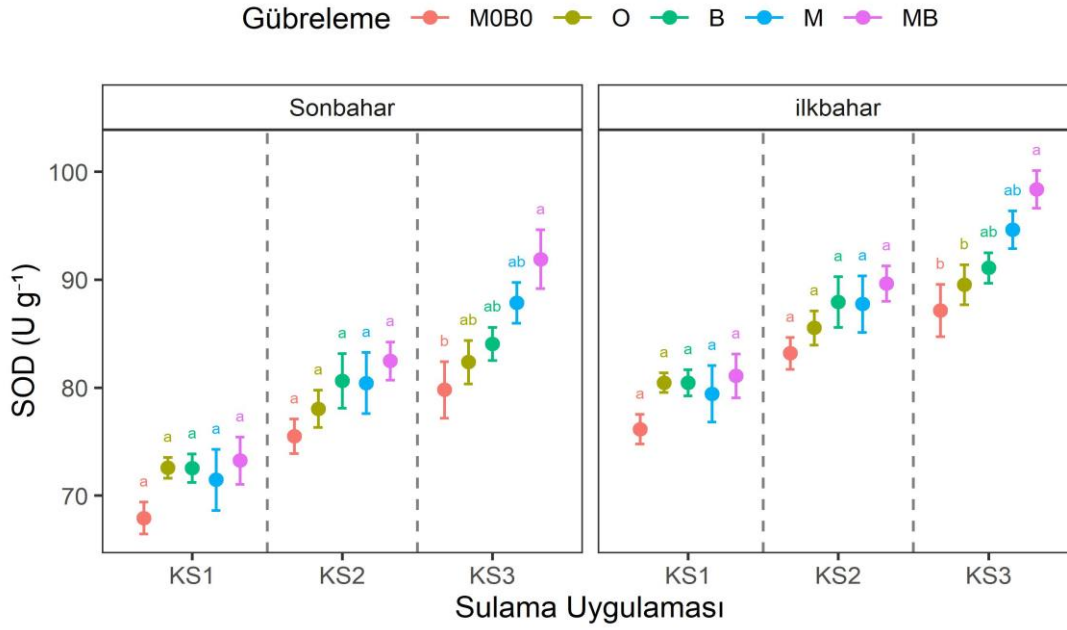
Şekil 4.14. Farklı sulama düzeylerinde gübre uygulamalarının MDA üzerine etkisi. Aynı sulama ve dönem içinde farklı harflerle gösterilen ortalamalar (n=3), Tukey's HSD testine göre istatistiksel olarak farklılık göstermektedir ($p<0.05$).

SOD

Her iki dönemde farklı sulama rejimlerinde, gübre uygulamaları yaprak dokularında süperoksit dismutaz (SOD) aktivitesini istatistiksel olarak anlamlı düzeyde etkilemiştir ($p<0.05$) (Ek 5-6). KS1 düzeyinde, her iki dönemde de mikrobiyal gübre uygulamaları geleneksel uygulamalardan daha yüksek veya eşdeğer SOD aktivitesi sağlamıştır fakat uygulamalar arasındaki bu farklılıklar istatistiksel olarak anlamlı bulunmamıştır ($p<0.05$). Sonbahar ve ilkbahar döneminde MB uygulaması sırasıyla 73 ve 81 $U\ g^{-1}$ ile en yüksek değeri üretmiş, B, M ve O uygulamaları da benzer değerler göstermiştir. Kontrol (sonbahar 68 $U\ g^{-1}$ ve ilkbahar 76 $U\ g^{-1}$) uygulaması ise daha düşük düzeylerde kalmıştır (Şekil 4.15). KS2 seviyesinde, sonbahar ve ilkbaharda sırasıyla MB (82 – 90 $U\ g^{-1}$), B (81 – 88 $U\ g^{-1}$) ve M (80 – 88 $U\ g^{-1}$) uygulamaları kendi içlerinde yüksek SOD değerleri üretmiş fakat kontrol ve O konularıyla aynı istatistiksel gruplarda yer almıştır ($p<0.05$) (Şekil 4.15). KS3 düzeyinde genel olarak en yüksek SOD aktivitesi gözlenmiştir. Sonbahar ve ilkbahar döneminde MB uygulaması sırasıyla 92 ve 98 $U\ g^{-1}$ ile tüm uygulamalar arasında en yüksek değeri sağlamış; bu değer hem kontrol (80-87 $U\ g^{-1}$) hem de O (81-90 $U\ g^{-1}$) uygulamalarından istatistiksel olarak anlamlı şekilde daha

yüksek grupta yer almıştır. MB, B ve M uygulamaları arasında istatistiksel olarak farklılık bulunmamıştır ($p<0.05$) (Şekil 4.15).

SOD enzimi, bitki hücrelerinde kuraklık gibi çevresel stres koşullarında biriken süperoksit radikalini (O_2^-) daha az toksik olan hidrojen peroksit (H_2O_2) dönüştürerek oksidatif hasarı önleyen birincil savunma sistemidir (Das vd., 2024; Hasanuzzaman vd., 2013). Bu çalışmada, hıyar bitkisinde SOD aktivitesinin hem sulama düzeyinden hem de mikrobiyal gübre uygulamalarından anlamlı şekilde etkilendiği, özellikle su kısıtı altında mikrobiyal uygulamaların bu savunma mekanizmasını güçlendirdiği gözlenmiştir. KS1 koşullarında SOD aktivitesi genel olarak düşük seviyelerde kalmış, MB uygulaması $73-81 U g^{-1}$ ile en yüksek değeri sağlasa da uygulamalar arasında istatistiksel farklılık oluşmamıştır; bu bulgu, tam sulama altında oksidatif stresin düşük olması nedeniyle savunma sisteminin baskılanmış olduğunu bildiren Silva vd. (2023) ve Li vd. (2025) tarafından bildirilen verilerle uyumludur. KS2 koşullarında MB, M ve B uygulamaları ile SOD aktivitesi sonbaharda $80-82$, ilkbaharda $88-90 U g^{-1}$ aralığında ölçülmüş ve bu uygulamalar kontrol ve O gruplarıyla aynı istatistiksel sınıfta yer almıştır. Bu sonuç, orta düzey kuraklıkta mikrobiyal uygulamaların savunma sistemini aktive ettiğini, ancak SOD düzeylerinde belirgin ayrışma yaratmadığını göstermekte olup, benzer şekilde Mo vd. (2016), Karimkhani vd. (2021), Ghani vd. (2022) ve Wang vd. (2024) çalışmalarında da $\%60-80$ TK seviyelerinde SOD artışları gözlenmiştir. Ayrıca, PGPR uygulamalarıyla $\%135$ 'e varan SOD aktivite artışlarının sağlanabildiği Zarei (2022) tarafından rapor edilmiştir. KS3 düzeyinde SOD aktivitesi maksimuma ulaşmış, MB uygulaması sonbaharda 92 , ilkbaharda $98 U g^{-1}$ değerleriyle tüm uygulamalar arasında en yüksek düzeyleri sağlamış ve bu değerler kontrol ($80-87$) ve O ($81-90$) gruplarına göre istatistiksel olarak anlamlı fark göstermiştir. MB, M ve B uygulamaları bu sulama düzeyinde benzer düzeyde SOD aktiviteleri sağlamış olup, bu sonuçlar Das vd. (2024), Silva vd. (2023), Li vd. (2025), Zarei (2022) ve Wang vd. (2012) tarafından bildirilen, mikrobiyal uygulamaların kuraklık altında oksidatif savunmayı güçlendirdiği yönündeki bulgularla örtüşmektedir. SOD seviyesindeki bu artışın, zar stabilitesinin korunmasında ve oksidatif stresin sınırlandırılmasında kritik rol oynadığı, Sun vd. (2024) tarafından da vurgulanmıştır. Öte yandan, bazı çalışmalarda SOD aktivitesinin stres koşullarında artış göstermediği de rapor edilmiştir; örneğin Sun vd. (2012), PEG ile uygulanan kuraklık koşullarında hıyar bitkisinde SOD düzeyinin düştüğünü ve ROS detoksifikasyonunun yetersiz kaldığını bildirmiştir. Buna karşın, mevcut çalışmada MB uygulaması başta olmak üzere mikrobiyal gübreler SOD aktivitesini belirgin şekilde artırarak bu riski sınırlandırmış ve oksidatif hasarın azaltılmasında etkin rol oynamıştır.



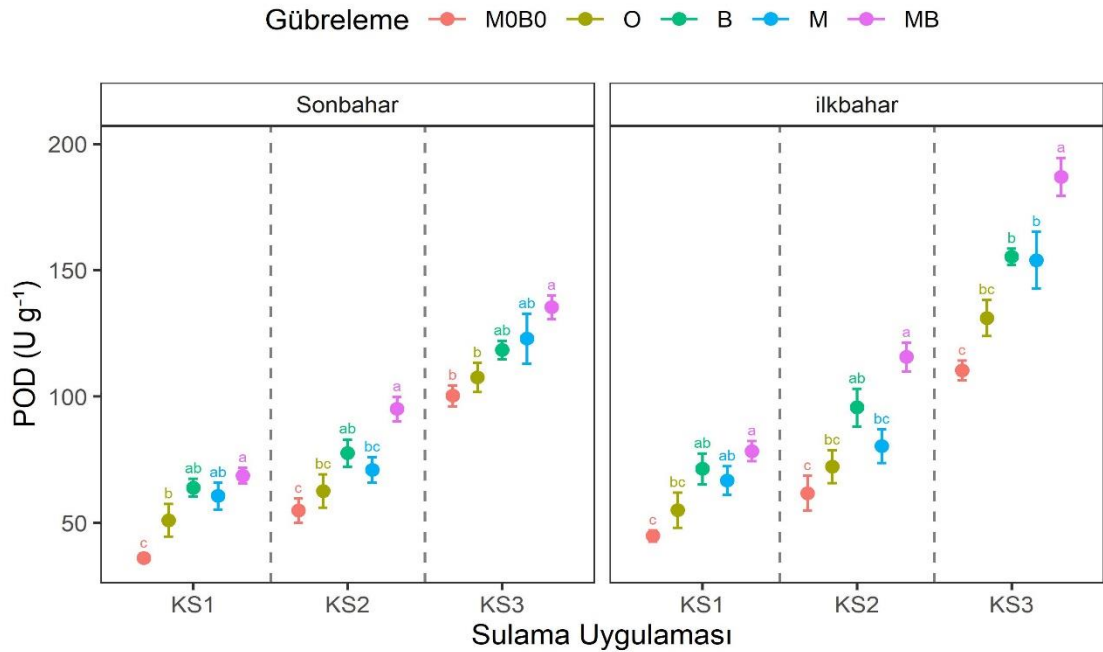
Şekil 4.15. Farklı sulama düzeylerinde gübre uygulamalarının SOD üzerine etkisi. Aynı sulama ve dönem içinde farklı harflerle gösterilen ortalamalar ($n=3$), Tukey's HSD testine göre istatistiksel olarak farklılık göstermektedir ($p<0.05$).

POD

Peroksidaz (POD) enzimi aktivitesi, her iki dönemde farklı sulama rejimlerinde gübrelemelerden istatistiksel olarak anlamlı biçimde etkilenmiştir ($p<0.05$) (Ek 5-6). Mikrobiyal gübre uygulamaları, özellikle su stresinin yoğun olduğu koşullarda POD aktivitesini artırarak oksidatif hasarın sınırlandırılmasına katkı sağlamıştır (Şekil 4.16). KS1 sulama düzeyinde POD aktivitesi sonbaharda 36–69 $U\ g^{-1}$, ilkbaharda ise 45–78 $U\ g^{-1}$ aralığında değişmiştir. MB, B, M ve O uygulamaları arasında iki dönemde de istatistiksel olarak farklılık görülmemiştir ($p<0.05$) (Şekil 4.16). KS2 düzeyinde POD değerleri sonbaharda 55–95 $U\ g^{-1}$ TA, ilkbaharda ise 62–116 $U\ g^{-1}$ TA aralığında yer almıştır. MB uygulaması, her iki dönemde de kontrol uygulamasına göre sırasıyla %73 ve %87, O uygulamasına göre ise %51 ve %61 oranında daha yüksek değerler sağlamış olup iki geleneksel uygulamadan istatistiksel olarak daha yüksek grupta yer almıştır ($p<0.05$) (Şekil 4.16). KS3 sulama düzeyinde ise POD seviyeleri sonbaharda 100–135 $U\ g^{-1}$ TA, ilkbaharda 110–187 $U\ g^{-1}$ TA arasında değişmiş ve bu düzeyde en yüksek değerler MB uygulamasında ölçülmüştür ($p<0.05$). MB uygulaması her iki dönemde de kontrol ve O uygulamalarından istatistiksel olarak anlamlı farklılıklar göstermiştir ($p<0.05$) (Şekil 4.16).

POD enzimi, bitkilerde reaktif oksijen türlerinin (ROS) detoksifikasyonunda görev alarak oksidatif stresin sınırlandırılmasında önemli bir rol oynamaktadır. Tam sulama koşullarında bu enzimin düşük düzeyde kalması beklenmekle birlikte, çalışmamızda mikrobiyal uygulamalar POD aktivitesini anlamlı düzeyde artırmış; bu durum, AMF'nin stres olmadan da enzimatik savunma sistemini aktive edebildiğini bildiren Miceli vd. (2023) ve Li vd. (2025) ile, PGPR suşlarının savunma hazırlığına katkı

sunduğunu belirten Alipour Kafi vd. (2021) ile uyum göstermiştir. KS2 koşullarında, MB uygulaması sonbahar ve ilkbaharda sırasıyla 95 ve 116 $U\ g^{-1}$ POD aktivitesi sağlamış; bu değerler kontrol grubuna göre %73 ve %87, kimyasal gübreye göre ise %51 ve %61 oranında daha yüksek bulunmuştur. Bu sonuçlar, artan kuraklıkla birlikte mikrobiyal inokulantların ROS detoksifikasyonunu destekleme kapasitesinin arttığını göstermekte olup, benzer şekilde Wang vd. (2024) ve Amini vd. (2017) tarafından da kuraklık şiddetine bağlı olarak POD aktivitesinde yükseliş rapor edilmiştir. Ayrıca, AMF'nin H_2O_2 detoksifikasyonu yoluyla zar bütünlüğünü koruduğu (Ahmad vd., 2018) ve PGPR'nin etilen düzeylerini düşürerek stres toleransını artırdığı da (Zarei, 2022; Ghosh vd., 2018) literatürde bildirilmektedir. KS3 koşullarında ise tüm mikrobiyal uygulamalar POD aktivitesini maksimum düzeylere çıkarmış; MB uygulaması sonbahar ve ilkbaharda sırasıyla 135 ve 187 $U\ g^{-1}$ değerlerine ulaşmış, kontrol grubuna göre %35 ve %70; kimyasal gübre uygulamasına göre ise %25 ve %42 oranlarında daha yüksek değerler elde etmiştir. M (123–154 $U\ g^{-1}$) ve B (118–155 $U\ g^{-1}$) uygulamaları da yüksek düzeyde aktivite sağlamış ve kontrol grubundan anlamlı biçimde ayrılmıştır. Bu bulgular, AMF ve PGPR'nin kombinasyonunun şiddetli kuraklık koşullarında sinerjik etki yarattığını gösteren Ouhammadou vd. (2023) ile Khan vd. (2024) çalışmalarının verileriyle örtüşmektedir. Khan vd. (2024), %55 ve %35 TK seviyelerinde AMF+PGPR uygulamasıyla POD aktivitesinde sırasıyla %35.10 ve %46.10 oranlarında artış bildirmiştir. Çalışmamızda da MB uygulaması, her iki dönemde M ve B uygulamalarından daha yüksek aktivite sağlamış ve istatistiksel olarak üst grupta yer almıştır; bu sonuç, mikrobiyal etkileşimin ROS birikimini dengeleyerek bitkilerin redoks durumunu stabilize etme kapasitesine işaret etmektedir.



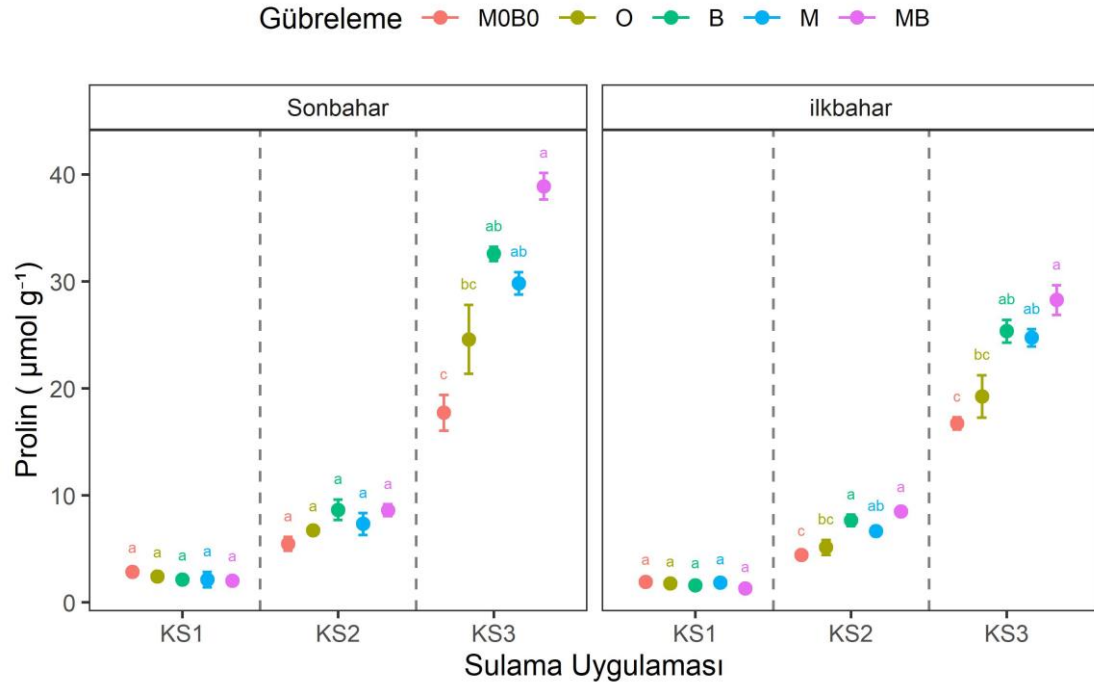
Şekil 4.16. Farklı sulama düzeylerinde gübre uygulamalarının POD üzerine etkisi. Aynı sulama ve dönem içinde farklı harflerle gösterilen ortalamalar ($n=3$), Tukey's HSD testine göre istatistiksel olarak farklılık göstermektedir ($p<0.05$).

Prolin

Yaprak dokularındaki serbest prolin birikimi, her iki dönemde farklı sulama rejimleri altında gübre uygulamalarından istatistiksel olarak anlamlı düzeyde etkilenmiştir ($p<0.05$) (Ek 5-6). KS1 sulama düzeyinde prolin miktarları sonbaharda $2.03\text{--}2.87\ \mu\text{mol g}^{-1}$, ilkbaharda ise $1.32\text{--}1.93\ \mu\text{mol g}^{-1}$ aralığında değişmiştir. Prolin miktarı, her iki dönemde de KS1 sulama düzeyinde yapılan uygulamalar arasında istatistiksel olarak anlamlı bir farklılık göstermemiştir ($p<0.05$) (Şekil 4.17). KS2 koşullarında prolin birikimi sonbaharda $5.49\text{--}8.66\ \mu\text{mol g}^{-1}$, ilkbaharda ise $4.44\text{--}8.49\ \mu\text{mol g}^{-1}$ arasında değişmiştir. KS2 sulama düzeyinde yapılan sonbaharda uygulamalar arasında istatistiksel olarak anlamlı bir farklılık yok iken ilkbaharda MB uygulaması en fazla prolin birikimini sağlamıştır ($p<0.05$) (Şekil 4.17). KS3 sulama düzeyinde prolin miktarı sonbaharda $17.73\text{--}38.89\ \mu\text{mol g}^{-1}$, ilkbaharda ise $16.75\text{--}28.26\ \mu\text{mol g}^{-1}$ aralığında değişmiştir. Her iki dönemde de MB uygulaması, kontrol grubuna göre yaklaşık 2 kat daha fazla prolin birikimi sağlamıştır ($p<0.05$) (Şekil 4.17).

Prolin, bitkilerde kuraklık gibi çevresel stres koşullarında osmotik dengeyi sağlamak, hücre turgorunu korumak ve oksidatif stresi sınırlamak amacıyla biriken önemli bir osmolittir (Das vd., 2024; Kaur ve Asthir, 2015). Bu çalışmada hıyar bitkisinde prolin birikimi hem sulama düzeylerinden hem de mikrobiyal gübre uygulamalarından anlamlı biçimde etkilenmiş, özellikle şiddetli su kısıtı koşullarında bu amino asidin birikimi belirgin düzeyde artmıştır. KS1 koşullarında, prolin düzeyleri tüm uygulamalarda düşük kalmış ve aralarında istatistiksel fark gözlenmemiştir; bu durum, tam sulama altında stres yanıtı osmotik birikiminin uyarılmadığını gösteren Farag vd. (2019) ve Amini vd. (2017) çalışmalarıyla uyumludur. KS2 koşullarında, tüm uygulamalarda prolin düzeyleri artmış, en yüksek değerler MB ve B uygulamalarında ölçülmüştür (sonbahar: $8.66\text{--}8.61$; ilkbahar: $8.49\text{--}7.66\ \mu\text{mol g}^{-1}$); bu bulgular, orta düzey kuraklıkta mikrobiyal uygulamaların hem savunmayı aktive ettiğini hem de prolin aracılığıyla osmotik adaptasyonu desteklediğini ortaya koymaktadır. Kavas vd. (2013), Farag vd. (2019), Alam vd. (2024) ve Zarei (2022) gibi araştırmalarda da benzer şekilde prolin birikiminin kuraklıkla birlikte arttığı ve çok yönlü savunma süreçleriyle ilişkili olduğu bildirilmiştir. KS3 koşullarında prolin birikimi maksimum düzeylere ulaşmış, MB uygulaması kontrol grubuna kıyasla sonbaharda %119, ilkbaharda %69 oranlarında daha yüksek değerler sağlamıştır. Amini vd. (2017), Alam vd. (2024), Kavas vd. (2013) ve Wang vd. (2024) tarafından yürütülen çalışmalarda da şiddetli su stresi koşullarında prolin düzeylerinin hızla arttığı, bunun su kaybını sınırlayan bir savunma tepkisi olduğu belirtilmiştir. Zarei (2022) ve Sandhya vd. (2010), PGPR'nin prolin biyosentezini uyararak osmotik toleransı artırdığını rapor etmiş; AMF uygulamalarının da benzer etkiyle prolin seviyelerini yükselttiği Al-Hinai vd. (2024), Mo vd. (2016), Yooyongwech vd. (2016) tarafından bildirilmiştir. Çalışmamızda M ve B uygulamaları da ilkbaharda kontrol ve O uygulamalarına göre daha yüksek prolin birikimi sağlamış; bu sonuç, PGPR'nin gamma-glutamil kinaz aktivasyonu, IAA üretimi ve ROS baskılayıcı etkileriyle ilişkili bulunmuştur (Ghosh vd., 2018; Lucas vd., 2023). Bununla birlikte, bazı çalışmalarda mikrobiyal uygulamaların prolin düzeylerini düşürdüğü de belirtilmiştir (Li vd., 2025; Nader vd., 2024; Calvo-Polanco vd., 2016); bu durum, stres algısının azalması veya alternatif savunma yollarının devreye girmesiyle açıklanmaktadır. Ancak bu çalışmada, özellikle KS3 koşullarında MB uygulamasının prolin birikimini artırması,

mikrobiyal etkileşimin su stresi koşullarında prolin temelli savunma yanıtını güçlendirdiğini ortaya koymaktadır.

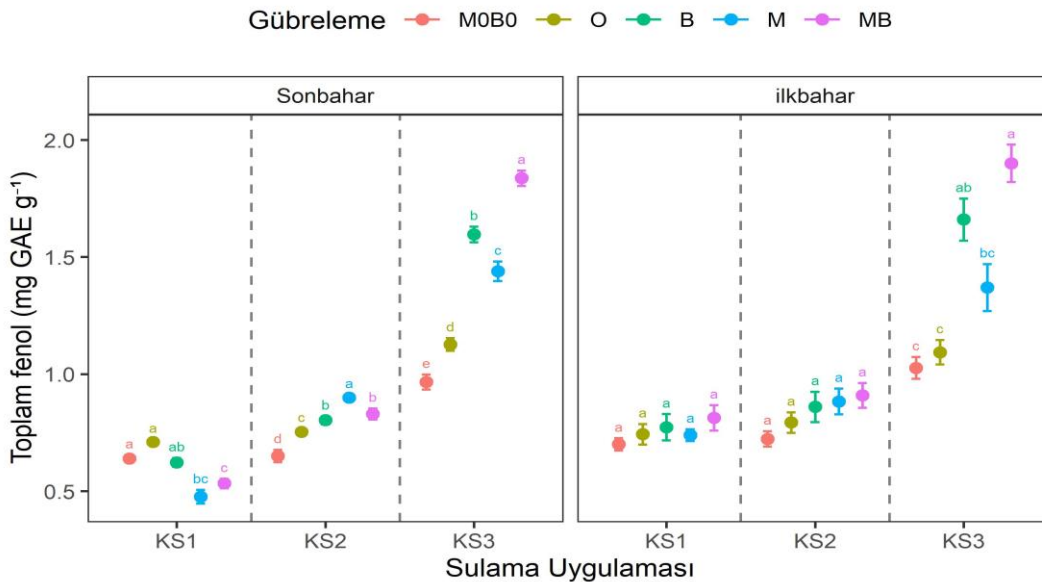


Şekil 4.17. Farklı sulama düzeylerinde gübre uygulamalarının prolin üzerine etkisi. Aynı sulama ve dönem içinde farklı harflerle gösterilen ortalamalar (n=3), Tukey's HSD testine göre istatistiksel olarak farklılık göstermektedir ($p < 0.05$).

Toplam fenol içeriği

Toplam fenol içeriği, bitkinin oksidatif stresle mücadelesinde önemli bir rol oynayan fenolik bileşenlerin miktarını yansıtmaktadır. Bitki yapraklarındaki toplam fenol iki dönemde de farklı sulama düzeylerinde gübre uygulamalarından istatistiksel olarak anlamlı şekilde etkilenmiştir ($p < 0.05$) (Ek5-6). KS1 sulama düzeyinde toplam fenol değerleri sonbaharda $0.48\text{--}0.71\text{ mg GAE g}^{-1}$, ilkbaharda ise $0.70\text{--}0.81\text{ mg GAE g}^{-1}$ arasında değişmiştir. Sonbaharda M uygulaması istatistiksel olarak kontrol O ve B uygulamalarından anlamlı düzeyde daha az toplam fenol değeri üretirken MB ile aynı grupta yer almıştır ($p < 0.05$). İlkbahar döneminde uygulamalar arasında istatistiksel farklılık bulunmamıştır ($p > 0.05$) (Şekil 4.18). KS2 koşullarında toplam fenol düzeyi sonbaharda $0.65\text{--}0.90\text{ mg GAE g}^{-1}$, ilkbaharda ise $0.72\text{--}0.91\text{ mg GAE g}^{-1}$ aralığında ölçülmüştür. Sonbaharda M uygulaması, kontrol grubuna göre %38.5; O'ya göre %20.0 oranında daha yüksek fenol birikimi sağlamıştır ve istatistiksel olarak en üst grupta yer almıştır ($p < 0.05$). İlkbaharda uygulamalar arasında istatistiksel farklılıklar bulunmamıştır. ($p > 0.05$) (Şekil 4.18). KS3 sulama düzeyinde ise toplam fenol içeriği sonbaharda $0.97\text{--}1.84\text{ mg GAE g}^{-1}$, ilkbaharda ise $1.03\text{--}1.90\text{ mg GAE g}^{-1}$ arasında değişmiştir. Sonbaharda MB uygulaması, kontrol ve O uygulamalarına göre sırasıyla %89.7 ve %62.8 oranlarında daha fazla toplam fenol içeriği sağlamış ve istatistiksel olarak en üst grupta yer almıştır. İlkbaharda da benzer bir dağılım gözlenmiş; MB uygulaması kontrol grubuna göre %84.5, kimyasal gübreye göre %74.3 oranında daha yüksek toplam fenol üretmiştir. (Şekil 4.18).

Hıyar bitkisi üzerinde yürütülen bu çalışmada, %100, %75 ve %50 ESTK düzeylerinde toplam fenol içeriği karşılaştırıldığında, artan su kısıtının fenol birikimini genel olarak artırdığı belirlenmiş; özellikle %50 sulama düzeyinde (KS3) en yüksek toplam fenol içerikleri elde edilmiştir. Bu durum, bitkinin kuraklık stresine karşı fenolik bileşik sentezini artırarak oksidatif zarara karşı biyokimyasal savunma geliştirdiğini ortaya koymakta olup, Valdebenito vd. (2022), Kumar vd. (2023), Farag vd. (2019) ve Wang vd. (2024) tarafından bildirilen benzer bulgularla uyumludur. Çalışmamızda özellikle KS3 koşulunda MB uygulamasıyla sağlanan %89.7'lik fenol artışı, bu literatürle birebir örtüşmektedir. Mikrobiyal gübre uygulamaları her iki sezonda da toplam fenol içeriğini anlamlı düzeyde artırmış; bu bulgular, PGPR'nin fenolik sentezi destekleyici etkilerini ortaya koyan Zapata-Sifuentes vd. (2022) ve Yilmaz (2025) çalışmalarını desteklemektedir. PGPR uygulaması, çalışmamızda kimyasal gübreyle kıyasla daha yüksek fenol düzeyi sağlamış ve bu durum PGPR suşlarının oksidatif kapasiteyi artırma potansiyelini göstermiştir. AMF inokulasyonunun da benzer şekilde fenol düzeylerini artırdığı gözlenmiştir; Valdebenito vd. (2022), Avio vd. (2017), Nahuelcura vd. (2023) ve Abdelaal vd. (2024) çalışmalarında AMF türlerinin fenol birikimi üzerindeki artırıcı etkileri raporlanmıştır. Çalışmamızda uygulanan *Funneliformis mosseae* suşu, O uygulamasına göre daha yüksek fenol içerikleri sağlamış; bu da bireysel AMF türlerinin özellikle kuraklık koşullarında fenol üzerinden etkili bir savunma yanıtı geliştirebildiğini düşündürmektedir. Ayrıca PGPR uygulamaları da çalışmamızda tek başına fenol birikimini desteklemiş; bu durum, ISR (uyarılmış sistemik direnç) mekanizmasıyla açıklanmakta olup, Asghari vd. (2020), Pérez-García vd. (2023) ve Zapata-Sifuentes vd. (2022) gibi araştırmalarda PGPR suşları ile yapılan uygulamalarda fenol düzeylerinde %10–%73 arasında artış sağlandığı bildirilmiştir. Bu bulgular, çalışmamızda özellikle MB kombinasyonu ile elde edilen yüksek fenol düzeyleriyle örtüşmekte; PGPR ve AMF birlikteliğinin sinerjik etki oluşturarak fenol sentezini daha da artırabildiğini göstermektedir.



Şekil 4.18. Farklı sulama düzeylerinde gübre uygulamalarının toplam fenol üzerine etkisi. Aynı sulama ve dönem içinde farklı harflerle gösterilen ortalamalar (n=3), Tukey's HSD testine göre istatistiksel olarak farklılık göstermektedir ($p < 0.05$).

4.6. Verim ve meyve özellikleri

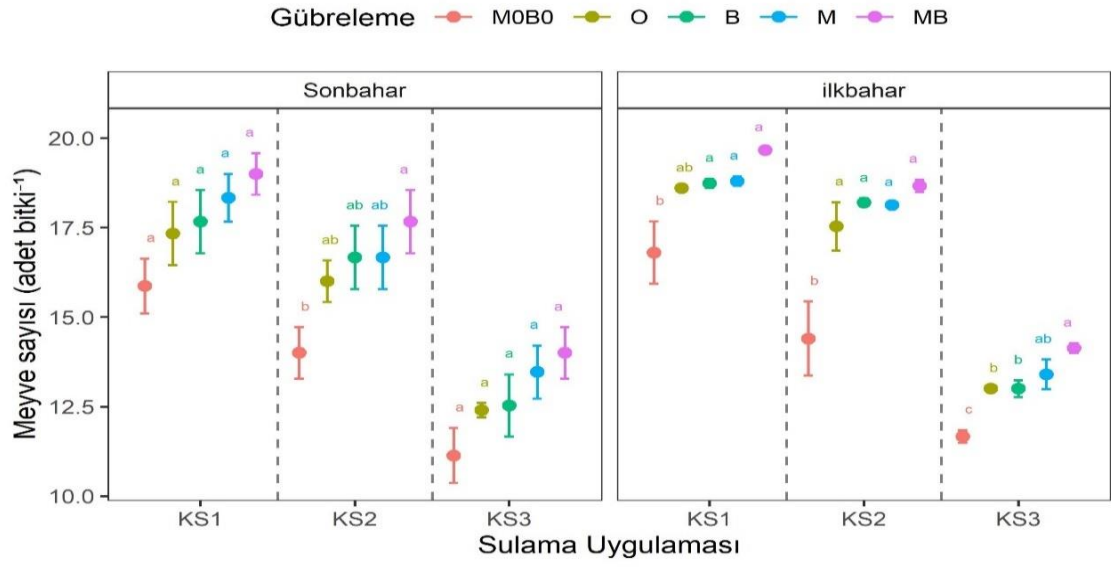
Meyve sayısı ve verim

Her iki yetiştirme döneminde de mikrobiyal gübre uygulamaları farklı sulama düzeylerinde hıyar bitkisinde meyve sayısı ve verimi üzerine istatistiksel olarak anlamlı farklılıklar oluşturmuştur ($p<0.05$) (Ek 7-8). KS1 koşullarında, meyve sayısı sonbaharda 15.9–19.0 adet bitki⁻¹, ilkbaharda ise 16.8–19.7 adet bitki⁻¹ arasında değişmiştir. Her iki dönemde de MB uygulaması en yüksek meyve sayısını sağlarken, sonbaharda tüm uygulamalar aynı istatistiksel grupta yer almıştır ($p>0.05$). İlkbaharda ise mikrobiyal uygulamalar (B, M, MB), kontrol uygulamasından anlamlı derecede daha yüksek meyve sayısı vermiştir ($p<0.05$) (Şekil 4.19). KS2 düzeyinde, meyve sayısı sonbaharda bitki başına 14 ila 17.7 adet bitki⁻¹ arasında ilkbaharda 14.4 ila 18.7 arasında değişim gösterirken sonbahar döneminde MB kontrole göre istatistiksel olarak en yüksek meyve sayısına sahip uygulama olmuştur. İlkbahar döneminde tüm gübreleme konuları kontrol uygulamasına göre daha yüksek meyve sayısı sağlamıştır ($p<0.05$) (Şekil 4.19). KS3 düzeyinde, meyve sayıları sonbaharda 11.1–14.0 adet bitki⁻¹, ilkbaharda 11.7–14.1 adet bitki⁻¹ aralığında ölçülmüş; sonbaharda gruplar arasında fark görülmezken, ilkbaharda MB uygulaması 14.1 adet bitki değeri ile en yüksek değeri sağlamış ve kontrol grubundan istatistiksel olarak farklılık göstermiştir ($p<0.05$). (Şekil 4.19).

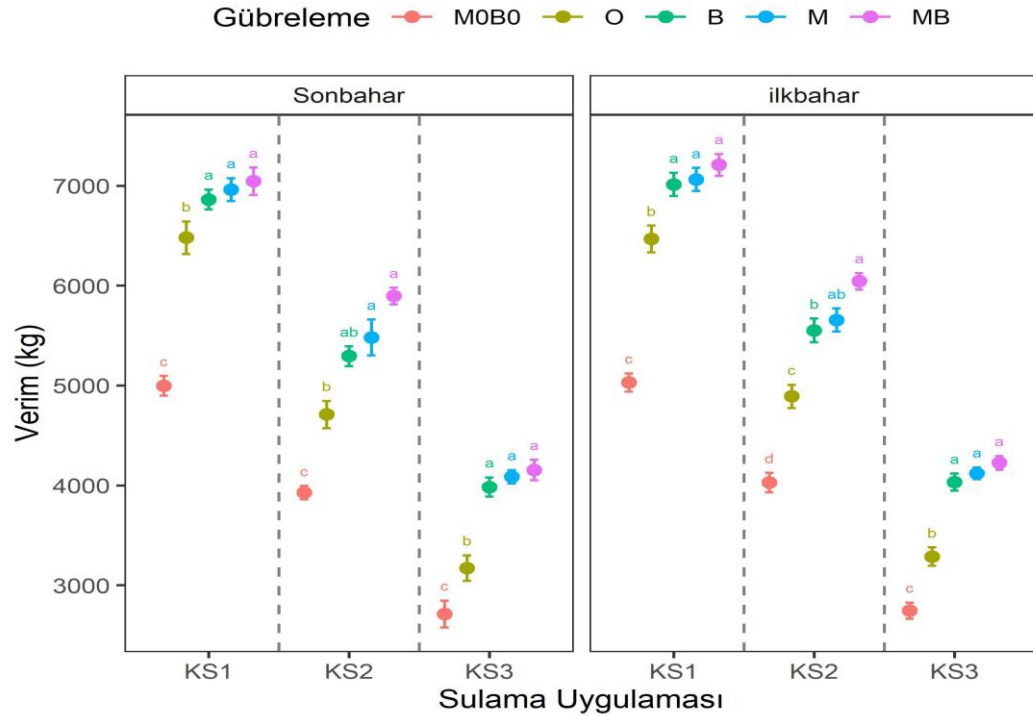
KS1 düzeyinde, sonbahar döneminde meyve verimi uygulamalara göre 4998–7046 kg da⁻¹ arasında değişmiştir. En düşük verim kontrol grubunda (4998 kg da⁻¹), en yüksek verim ise MB uygulamasında (7046 kg da⁻¹) elde edilmiştir. İlkbaharda verim aralığı 5031–7210 kg da⁻¹ olup, yine en düşük değer kontrol (5031 kg da⁻¹), en yüksek değer MB (7210 kg da⁻¹) uygulamasına aittir. Sonbaharda ve ilkbahar döneminde mikrobiyal gübre uygulamaları hem kontrol hem de O uygulamalarına göre istatistiksel olarak daha yüksek bulunmuştur ($p<0.05$) (Şekil 4.20). KS2 sulama düzeyi olan orta su kısıtı koşullarında sonbahar döneminde verim değerleri 3928–5897 kg da⁻¹ arasında değişmiştir. Kontrol grubu 3928 da⁻¹ kg ile en düşük verimi verirken, MB uygulaması 5897 kg da⁻¹ ile en yüksek verimi sağlamıştır. İlkbahar döneminde ise verim aralığı 4028–6043 kg da⁻¹ arasında değişmiş; en düşük verim yine kontrol uygulamasında (4028 kg da⁻¹), en yüksek verim MB uygulamasında (6043 kg da⁻¹) ölçülmüştür. Sonbaharda ve ilkbahar döneminde mikrobiyal gübre uygulamaları hem kontrol hem de O uygulamalarına göre istatistiksel olarak daha yüksek bulunmuştur ($p<0.05$) (Şekil 4.20). KS3 seviyesinde, sonbahar dönemindeki verim değerleri 2711–4153 kg da⁻¹ aralığında kalmıştır. Kontrol uygulaması 2711 kg da⁻¹ ile en düşük verimi verirken, MB uygulaması 4153 kg da⁻¹ ile en yüksek değere ulaşmıştır. İlkbahar döneminde bu aralık 2746–4226 kg da⁻¹ olup, kontrol 2746 kg da⁻¹ ile en düşük, MB uygulaması ise 4226 kg da⁻¹ ile en yüksek verimi sağlamıştır. Sonbahar ve ilkbahar dönemlerinde mikrobiyal gübre uygulamaları, hem kontrol grubuna hem de kimyasal gübre uygulamasına kıyasla istatistiksel olarak anlamlı düzeyde daha yüksek değerler ortaya koymuştur. ($p<0.05$) (Şekil 4.20).

Bu çalışmada, mikrobiyal gübre uygulamalarının hıyar bitkisinde meyve sayısı ve toplam verim üzerinde belirgin pozitif etkiler oluşturduğu belirlenmiş; bu etkiler literatürde PGPR uygulamalarının meyve sayısını artırabildiğini bildiren Omar vd. (2022) gibi araştırmalarla desteklenmiştir. KS3 koşullarında genel olarak meyve sayısı azalırken, MB uygulaması sonbaharda 14.1 adet bitki⁻¹ ile kontrol grubuna göre %20.5 daha yüksek

meyve sayısı sağlamış; bu bulgu, AMF'nin kuraklık altında generatif organ gelişimini desteklediğini ortaya koyan Wang vd. (2008) ve Reva vd. (2021) ile uyumludur. Igbojionu vd. (2024), meyve sayısının %100 ET koşullarında 3.5, %50 ET'de ise 1.9 olduğunu bildirirken, mevcut çalışmada MB uygulaması bu düşüşü sınırlayarak verim bileşenlerinin korunmasına katkı sağlamıştır. Verim açısından değerlendirildiğinde, MB uygulaması her iki dönemde de en yüksek verimi sağlamış; KS1 koşullarında sonbaharda 7046 kg, ilkbaharda 7210 kg verim ile kontrol grubuna göre sırasıyla %41.0 ve %43.2 artış kaydedilmiştir. M ve B uygulamaları da benzer düzeyde performans göstermiştir. Bu sonuçlar, AMF ve PGPR'nin ayrı ayrı ve birlikte kullanımının verimi artırabileceğini ortaya koymakta; Ortaş (2010) ve Kaya vd. (2003) tarafından bildirilen %20–54 ve %48.4 oranındaki verim artışlarıyla uyumluluk göstermektedir. Sulama azaldıkça verimde genel bir düşüş görülse de mikrobiyal uygulamalar bu kaybı önemli ölçüde dengelemiş; KS2 koşullarında MB uygulaması kontrol grubuna göre sonbaharda %50.1, ilkbaharda %50.0 daha yüksek verim sağlamıştır. Alomran vd. (2013) ve Hossain vd. (2018) gibi çalışmalarda sulama düşüşü ile verim azalışı arasındaki pozitif korelasyon vurgulanmışken, bu çalışmada MB uygulaması, KS1 kontrol grubuna göre dahi %17.9–%20.1 daha yüksek verimle dikkat çekmiştir. KS3 düzeyinde verim genel olarak düşmüş olsa da, MB uygulaması bu koşullarda kontrol grubuna göre %53.2–%54.0 daha yüksek verim sağlamış ve 4226 kg da⁻¹ ürün elde edilmiştir; bu sonuçlar Biçer vd. (2022)'nin düşük sulama düzeylerinde AMF ve AMF+PGPR uygulamaları ile sağlanan verim artışlarıyla örtüşmektedir. Genel olarak değerlendirildiğinde, MB uygulaması yalnızca toplam verimi değil, meyve sayısını da tüm sulama düzeylerinde üst düzeyde tutmuş; özellikle kuraklık altında MB, B ve M uygulamaları KS2 kontrol grubuyla aynı istatistiksel grupta yer alarak düşük su koşullarında dahi eşdeğer ya da daha yüksek verim elde edilmesini sağlamıştır. Bu bulgu, AMF ve PGPR'nin birlikte kullanımının sinerjik etkilerle kuraklık stresini hafifletebileceğini ve üretkenliği koruyabileceğini ortaya koymuş; Laranjeira vd. (2021) tarafından da benzer biçimde rapor edilen sonuçlarla yüksek düzeyde örtüşmüştür.



Şekil 4.19. Farklı sulama düzeylerinde gübre uygulamalarının meyve sayısı üzerine etkisi. Aynı sulama ve dönem içinde farklı harflerle gösterilen ortalamalar (n=3), Tukey's HSD testine göre istatistiksel olarak farklılık göstermektedir ($p<0.05$).



Şekil 4.20. Farklı sulama düzeylerinde gübre uygulamalarının verim üzerine etkisi. Aynı sulama ve dönem içinde farklı harflerle gösterilen ortalamalar (n=3), Tukey's HSD testine göre istatistiksel olarak farklılık göstermektedir ($p<0.05$).

Meyve mineral madde

Her iki yetiştirme döneminde farklı sulama düzeylerinde uygulanan farklı gübre stratejileri hıyar meyvesinde N, P, K, Ca, Mg, Fe, Mn, Zn ve Cu içeriklerini anlamlı düzeyde etkilemiştir. ($p<0.05$) (Çizelge 4.4, Çizelge 4.5). KS1 sulama düzeyinde, meyvede tespit edilen makro besin elementleri (N, P, K, Ca, Mg) içerikleri her iki dönemde de mikrobiyal gübre uygulamalarıyla artış göstermiştir. Sonbaharda N içeriği %2.96–4.21, P %2.07–2.81, K %2.89–3.58, Ca %0.94–1.11 ve Mg %0.49–0.60 arasında değişirken; ilkbaharda bu değerler sırasıyla %2.66–3.66, %1.65–2.95, %3.39–4.08, %0.97–1.23 ve %0.61–0.68 aralığında bulunmuştur. Her iki dönemde de mikrobiyal gübre uygulamaları, tüm elementlerde en yüksek değerleri sağlamış çoğu zaman kontrol ve O grubuna kıyasla anlamlı artışlar oluşturmıştır ($p<0.05$) (Çizelge 4.4). KS2 düzeyinde, sonbahar döneminde N içeriği %2.85–4.00, P %1.68–2.13, K %2.46–2.95, Ca %0.79–0.96 ve Mg %0.43–0.51 arasında değişirken; ilkbaharda bu değerler sırasıyla %2.18–3.17, %1.71–2.27, %2.61–3.45, %0.81–1.07 ve %0.52–0.57 aralığında ölçülmüştür. (Çizelge 4.4). Her iki dönemde de mikrobiyal uygulamalar, beş elementin tamamında en yüksek değerleri sağlamış ve çoğu durumda istatistiksel olarak anlamlı farklar yaratmıştır ($p<0.05$). KS3 sulama düzeyinde sonbahar döneminde N içeriği %2.78–3.36, P %1.32–1.64, K %1.86–2.43, Ca %0.63–0.76 ve Mg %0.34–0.42 arasında değişirken; ilkbaharda bu değerler sırasıyla %1.73–2.46, %1.46–1.82, %2.66–2.96, %0.74–0.90 ve %0.42–0.50 aralığında ölçülmüştür. Her iki dönemde de mikrobiyal uygulamalar en yüksek değerleri sağlamış ve kontrol ve O grubuna kıyasla istatistiksel olarak anlamlı farklar yaratmıştır ($p<0.05$) (Çizelge 4.4).

KS1 sulama düzeyinde sonbahar döneminde Fe içeriği 52.8–75.9 ppm, Mn 17.7–27.7 ppm, Zn 67.3–83.1 ppm ve Cu 15.4–18.1 ppm arasında değişmiştir. İlkbahar döneminde ise Fe 51.6–80.9 ppm, Mn 19.9–30.9 ppm, Zn 68.7–92.1 ppm ve Cu 17.1–19.8 ppm aralıklarında ölçülmüştür. (Çizelge 4.5). KS2 sulama düzeyinde sonbahar döneminde Fe içeriği 42.8–54.0 ppm, Mn 16.0–19.4 ppm, Zn 62.1–71.4 ppm ve Cu 14.3–16.1 ppm arasında değişmiştir. İlkbahar döneminde ise Fe 40.3–59.1 ppm, Mn 15.2–22.6 ppm, Zn 66.5–80.4 ppm ve Cu 14.6–17.7 ppm aralıklarında yer almıştır (Çizelge 4.5). KS3 sulama düzeyinde sonbahar döneminde Fe içeriği 25.4–41.5 ppm, Mn 10.6–15.0 ppm, Zn 56.0–60.6 ppm ve Cu 12.2–13.9 ppm arasında ölçülmüştür. İlkbaharda ise Fe 35.2–47.9 ppm, Mn 13.7–19.2 ppm, Zn 65.1–75.1 ppm ve Cu 13.9–15.9 ppm aralığında değerler kaydedilmiştir. Tüm sulama düzeylerinde mikrobiyal uygulamalar istatistiksel olarak üst grupta değerlendirilmiştir, ancak MB uygulaması bu grupların çoğunda farklılaşmıştır ($p<0.05$) (Çizelge 4.5).

Bu çalışmada, hıyar meyvelerinde toplam N, P, K, Ca ve Mg içerikleri farklı sulama ve gübreleme uygulamalarına bağlı olarak anlamlı düzeyde değişmiş ($p<0.05$) ve özellikle AMF ile PGPR'nin birlikte uygulandığı MB stratejisi, tüm sulama düzeylerinde bu makro besin elementlerinin meyvedeki konsantrasyonlarını en fazla artıran uygulama olmuştur; MB uygulaması altında N, P, K, Ca ve Mg seviyeleri diğer uygulamalara (Kontrol, O, B, M) kıyasla istatistiksel olarak anlamlı derecede daha yüksek bulunmuş ve bu durum mikrobiyal konsorsiyumların sinerjik etkisiyle besin alımının optimize edilebileceğini ortaya koymuştur. Chen vd. (2017), mikorizal aşılamanın hıyar bitkisi kök ve sürgünlerinde bu elementlerin %30–90 oranında arttığını bildirmiş; PGPR'lerin hormonal düzeyde kök gelişimini destekleyerek mineral alımını kolaylaştırdığı, AMF'nin ise misel ağı yoluyla özellikle P ve Mg gibi düşük hareketli elementlerin taşınımını

artırdığı Savastano ve Bais (2024) tarafından belirtilmiştir. Bu mikrobiyal katkılarla artan mineral alımı, sadece vejetatif dokularla sınırlı kalmayıp floem yoluyla meyveye taşınmakta ve meyve besin içeriğinde anlamlı zenginleşmeler oluşturmaktadır. Benzer bir şekilde, Alam vd. (2023) tarafından yapılan çalışmada, kuraklık koşullarında yetiştirilen domates bitkisinde *Funneliformis mosseae*, *Rhizophagus clarus* ve *Rhizophagus intraradices* türlerinin uygulandığı gruplarda meyve içeriğinde K %2, Ca %13, Mg %24 ve Fe %37 oranında artışlar kaydedilmiş ve bu sonuçlar, AMF'nin meyve mineral içeriği üzerindeki etkisinin farklı bitki türlerinde de sistematik bir etki yarattığını göstermiştir. Öte yandan, çalışmamızda sulama düzeyinin azalmasıyla birlikte (KS2 ve KS3) meyvede N, P, K, Ca ve Mg konsantrasyonlarında genel bir düşüş eğilimi gözlenmiş; bu azalmaların, su stresinin kök zar geçirgenliğini ve ksilem taşınım etkinliğini sınırlandırmasıyla ilişkili olduğu düşünülmektedir. Ancak MB uygulaması bu olumsuz etkileri önemli ölçüde hafifletmiş ve düşük sulama koşullarında dahi meyve mineral düzeylerinin korunmasına katkı sağlamış; Bicer vd. (2023) ile Savastano ve Bais (2024) de bizim bulgularımızı destekler niteklilikte mikrobiyal inokulasyonların stres altındaki bitkilerde hem besin alımını hem de taşınım verimliliğini desteklediğini rapor etmiştir.

Hıyar meyvesinde mikro elementler açısından da benzer bir eğilim gözlenmiş, özellikle MB uygulaması Fe, Mn, Zn ve Cu içeriklerini kontrol ve tekli mikrobiyal uygulamalara göre anlamlı düzeyde artırmıştır; bu artışın, AMF'nin toprakta derin katmanlardan mikro element mobilizasyonunu sağlaması ve PGPR'lerin siderofor üretimi yoluyla özellikle Fe gibi elementlerin bitki tarafından alımını kolaylaştırmasıyla ilişkili olduğu ifade edilmektedir (Chen vd. 2017; Savastano ve Bais, 2024). Bu elementlerin rizosfer düzeyinde alınmasının ardından floem taşınımı ile meyveye yönelmesi, gelişim dönemlerinde hız kazandığı için mikrobiyal uygulamalarla sağlanan biyolojik avantajların doğrudan meyve dokusuna yansıdığı ve bu sayede meyve besin bileşiminin olumlu yönde şekillendiği görülmektedir. Benzer şekilde, Han vd. (2012) tarafından bildirilen bir çalışmada, ozmotik stres koşullarında uygulanan AMF'nin hıyar meyvesinde N, P, K, Zn ve Cu düzeylerinde anlamlı artışlar sağladığı ve bu etkilerin bitkinin besin alım kapasitesini ve iyon dengesini artırarak stresin olumsuz etkilerini hafiflettiği belirtilmiştir. Öte yandan, tüm PGPR suşlarının aynı etkiyi göstermediği dikkate alınmalıdır; örneğin, Alipour Kafi vd. (2021), *Pseudomonas putida* P3-57 suşunun hıyar meyvesinde Zn, Mn, Mg, Na, K, Ca, Mo ve Co gibi elementlerin birikimini sınırladığını ve meyvedeki NO₃⁻ düzeyini anlamlı şekilde düşürdüğünü rapor etmiştir. Bu durum, ilgili suşun fosfat çözümleyici ve siderofor üretici özelliklerinin bazı mikro elementlerin taşınımında dolaylı kısıtlamalara yol açabileceğini göstermekte olup, PGPR uygulamalarında tür ve suş düzeyinde seçici bir yaklaşımın önemini ortaya koymakta, aksi takdirde meyve besin profili istenmeyen şekilde etkilenebilmektedir.

Çizelge 4.4. Farklı sulama düzeylerinde gübre uygulamalarının meyve mineral maddesi (makro elementler) üzerine etkisi. Aynı sulama ve dönem içinde farklı harflerle gösterilen ortalamalar (n=3), Tukey's HSD testine göre istatistiksel olarak farklılık göstermektedir ($p<0.05$).

		Sonbahar					İlkbahar				
Sulama	Gübreleme	N %	K %	P %	Ca %	Mg %	N %	K %	P %	Ca %	Mg %
KS1	M0B0	2.96 b	2.89 e	2.07 d	0.94 d	0.49 e	2.66 a	3.39 c	1.65 d	0.97 b	0.64 ab
	O	3.38 b	3.04 d	2.30 c	1.00 c	0.53 d	3.17 a	3.54 b	2.44 c	1.11 ab	0.65 ab
	B	4.13 a	3.39 b	2.58 b	1.05 b	0.57 b	3.33 a	3.89 a	2.72 ab	1.18 a	0.63 ab
	M	4.14 a	3.25 c	2.40 c	1.07 b	0.55 c	3.52 a	3.75 ab	2.54 bc	1.16 a	0.61 b
	MB	4.21 a	3.58 a	2.81 a	1.11 a	0.60 a	3.66 a	4.08 a	2.95 a	1.23 a	0.68 a
KS2	M0B0	2.85 b	2.46 c	1.68 c	0.79 d	0.43 e	2.18 b	2.61 b	1.71 b	0.81 d	0.52 e
	O	3.03 b	2.54 c	1.74 c	0.82 c	0.45 d	2.92 a	3.20 a	2.00 a	0.93 c	0.53 d
	B	3.76 a	2.85 a	2.02 b	0.90 b	0.48 b	3.06 a	3.39 a	2.21 a	1.01 b	0.57 b
	M	3.79 a	2.70 b	1.96 b	0.88 b	0.47 c	2.88 a	3.35 a	2.16 a	0.99 b	0.56 c
	MB	4.00 a	2.95 a	2.13 a	0.96 a	0.51 a	3.17 a	3.45 a	2.27 a	1.07 a	0.57 a
KS3	M0B0	2.78 c	1.86 c	1.32 d	0.63 e	0.34 d	1.73 b	2.66 b	1.46 c	0.74 c	0.42 d
	O	2.84 bc	2.16 b	1.41 c	0.66 d	0.38 c	2.09 ab	2.86 ab	1.58 bc	0.77 c	0.48 b
	B	3.05abc	2.40 a	1.59 ab	0.74 b	0.41 ab	2.46 a	2.90 ab	1.72 ab	0.85 b	0.46 c
	M	3.22 ab	2.36 ab	1.52 b	0.70 c	0.40 b	2.22 ab	2.66 b	1.78 a	0.87 b	0.49 ab
	MB	3.36 a	2.43 a	1.64 a	0.76 a	0.42 a	2.42 a	2.96 a	1.82 a	0.90 a	0.50 a
KS1		0.0003	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001	0.0709	<.0001	<.0001	0.0045	0.0459
KS2		<.0001	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001	0.0015	0.0005	0.0008	<.0001	<.0001
KS3		0.0065	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001	0.0231	0.0081	0.0005	<.0001	<.0001

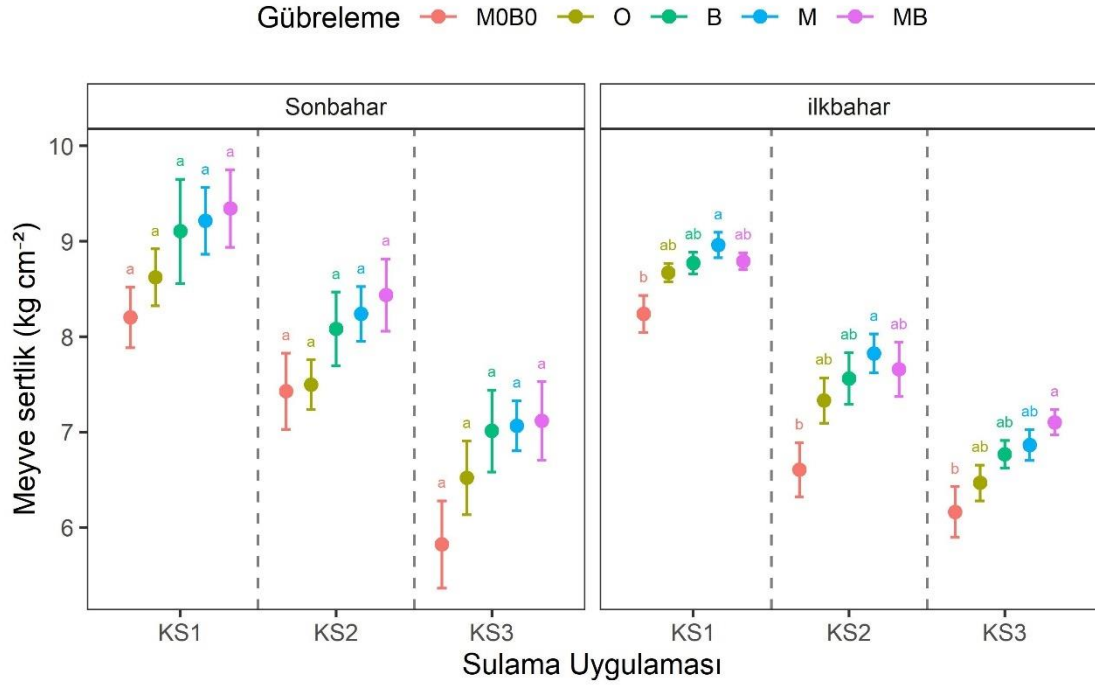
Çizelge 4.5. Farklı sulama düzeylerinde gübre uygulamalarının meyve mineral maddesi (mikro elementler) üzerine etkisi. Aynı sulama ve dönem içinde farklı harflerle gösterilen ortalamalar (n=3), Tukey's HSD testine göre istatistiksel olarak farklılık göstermektedir (p <0.05).

Sulama	Gübreleme	Sonbahar				İlkbahar			
		Fe ppm	Mn ppm	Zn ppm	Cu ppm	Fe ppm	Mn ppm	Zn ppm	Cu ppm
KS1	M0B0	52.8 c	17.7 e	67.3 d	15.4 b	51.6 d	19.9 d	68.7 c	17.1 b
	O	56.5 c	20.9 d	73.4 c	16.6 ab	61.6 c	24.0 c	82.5 b	18.2 ab
	B	65.4 b	25.6 b	77.4 b	17.0 ab	70.4 b	26.8 b	84.3 b	18.4 ab
	M	58.8 bc	23.6 c	75.2 bc	16.8 ab	63.9 bc	24.1 c	86.4 b	18.4 ab
	MB	75.9 a	27.7 a	83.1 a	18.1 a	80.9 a	30.9 a	92.1 a	19.8 a
KS2	M0B0	42.8 d	16.0 b	62.1 d	14.3 c	40.3 c	15.2 c	66.5 d	14.6 d
	O	46.5 c	16.7 b	63.5 c	14.5 c	52.7 b	20.3 b	69.7 c	16.1 c
	B	49.8 b	17.4 b	66.6 b	15.1 b	57.9 a	22.6 a	75.6 b	16.7 b
	M	47.6 c	17.1 b	66.0 b	14.7 bc	54.8 b	20.9 b	76.3 b	16.4 bc
	MB	54.0 a	19.4 a	71.4 a	16.1 a	59.1 a	20.6 b	80.4 a	17.7 a
KS3	M0B0	25.4 b	10.6 d	56.0 d	12.2 d	35.2 b	13.7 e	65.1 e	13.9 d
	O	35.2 ab	12.0 c	57.4 c	12.9 c	45.1 a	16.6 d	68.0 d	15.0 c
	B	41.1 a	14.5 a	59.7 b	13.7 ab	46.6 a	17.7 c	71.1 c	15.4 bc
	M	40.0 a	13.4 b	59.0 b	13.3 bc	46.2 a	19.2 a	72.6 b	15.5 ab
	MB	41.5 a	15.0 a	60.6 a	13.9 a	47.9 a	18.2 b	75.1 a	15.9 a
Gübreleme		<.0001	<.0001	<.0001	0.0052	<.0001	<.0001	<.0001	0.0061
Sulama		<.0001	0.0006	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001
GXS		0.0131	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001

Meyve sertliği

Her iki dönemde de meyve sertliği, farklı sulama rejimlerinde gübrelemeye bağlı olarak istatistiksel olarak anlamlı şekilde farklılık göstermiştir ($p<0.05$) (Ek 7-8). KS1 sulama düzeyinde, meyve sertliği (MST) değerleri sonbahar döneminde $8.2-9.3 \text{ kg cm}^{-2}$, ilkbahar döneminde ise $8.2-8.9 \text{ kg cm}^{-2}$ aralığında değişmiştir. Sonbahar döneminde uygulamalar arasında istatistiksel fark bulunmazken ($p>0.05$) ilkbahar döneminde gübreleme uygulamaları kontrole göre meyve sertliğini önemli derecede artırmıştır ($p<0.05$) (Şekil 4.21). KS2 sulama düzeyinde, sonbahar döneminde meyve sertliğinde uygulamalar arasında istatistiksel olarak fark gözlenmemiştir. Sonbaharda meyve sertliği 7.43 ila 8.44 kg cm^{-2} arasında değişim göstermiştir. İlkbaharda MB 7.66 kg cm^{-2} ile en yüksek değeri göstermiş ve kontrol uygulamasına (6.60 kg cm^{-2}) kıyasla %16.1 daha yüksek sertlik sağlamıştır. MB uygulaması M, B ve O uygulamalarıyla istatistiksel olarak aynı grupta yer almıştır ($p<0.05$) (Şekil 4.21). KS3 koşullarında meyve sertliği sonbaharda $5.82-7.12 \text{ kg cm}^{-2}$ ilkbahar döneminde benzer olarak $6.16-7.10 \text{ kg cm}^{-2}$ arasında değişmiştir. Su stresinin artmasına bağlı olarak meyve sertliği önemli ölçüde azalmıştır. Ancak her iki dönemde de meyve sertliği uygulamalar arasında istatistiksel olarak anlamlı değişiklikler göstermemiştir ($p<0.05$). (Şekil 4.21).

Hıyar bitkisinde artan su kısıtı, meyve yapısının su tutma kapasitesini azaltarak hücre duvarı ve turgor kayıplarına neden olmakta, bu da meyve sertliğinde azalmaya yol açmaktadır; Farquh ve Moore (2020), elma ve şeftali gibi meyvelerde su stresine bağlı olarak dokusal sertliğin azaldığını bildirmiştir. Bu çalışmada da her iki sezonda gözlemlenen meyve sertliğindeki azalmalar artan su kısıtı ile açıklanabilirken, PGPR uygulamalarının bu durumu sınırlayıcı etkileri öne çıkmıştır; örneğin, Savastano ve Bais (2024), PGPR konsorsiyumunun yapraklarda prolin birikimini artırarak stres toleransını güçlendirdiğini ve bunun meyve sertliğini destekleyebileceğini belirtmiştir. PGPR ile yapılan inokulasyonların meyve dokusunun dayanıklılığını artırabileceği Zapata-Sifuentes vd. (2022) tarafından da desteklenmiş, Omar vd. (2022) ise *Streptomyces* suşlarının sertliği 4.92 'den 5.00 lbs/in^2 seviyesine çıkardığını, bu artışın istatistiksel olarak anlamlı olmasa da dokusal iyileşme potansiyeline işaret ettiğini bildirmiştir. AMF uygulamalarının ise su ve mineral alımını artırarak meyve kalitesini iyileştirdiği çeşitli çalışmalarda vurgulanmıştır; Ali vd. (2019) tarafından AMF'nin organik substratla birlikte uygulandığında meyvede besin içeriğini ve sezonluk verimi artırdığı, Miceli vd. (2023) tarafından ise %60 ve %80 sulama düzeylerinde meyve sertliğini anlamlı şekilde yükselttiği rapor edilmiştir. Bu olumlu etkiler, AMF'nin su alımını ve Ca taşınımını destekleyerek hücre turgorunu ve duvar stabilitesini korumasıyla ilişkilendirilmiştir. Bu bağlamda, çalışmada B ve M gibi tekli uygulamalarda sınırlı sertlik artışları gözlemlenirken, MB uygulamasının daha belirgin katkılar sağladığı görülmüş; Savastano ve Bais (2024) ile Biçer vd. (2022) çalışmaları da, ikili mikrobiyal inokulasyonların hücre duvar bütünlüğünü koruyarak meyve dokusunun yapısal sertliğini desteklediğini ortaya koymuştur.



Şekil 4.21. Farklı sulama düzeylerinde gübre uygulamalarının meyve sertliği üzerine etkisi. Aynı sulama ve dönem içinde farklı harflerle gösterilen ortalamalar (n=3), Tukey's HSD testine göre istatistiksel olarak farklılık göstermektedir (p<0.05).

Meyve rengi

Meyve renk tonu bileşenleri L (parlaklık), a (kırmızı-yeşil), b (mavi-sarı) ve h° (Hue, renk tonu açısı) iki dönemde de gübreleme uygulamalarından farklı sulama düzeylerinde önemli derecede etkilenmiştir (p<0.05) (Ek 7-8). KS1 sulama düzeyinde L değeri sonbaharda 30.50 ile 34.10 arasında, ilkbaharda ise 31.83 ile 39.44 arasında değişmiştir. a parametresi her iki dönemde de MB uygulamasında en düşük (daha yeşil tonlu) değeri sağlamış, kontrol uygulaması ise en yüksek a değerleriyle diğerlerinden anlamlı şekilde ayrılmıştır. B değerleri sonbaharda 15.38–17.63 aralığında, ilkbaharda ise 11.50–14.15 aralığında saptanmıştır. h° değeri sonbaharda 126.45–128.78, ilkbaharda 127.76–128.80 aralığında yer almıştır. KS2 sulama düzeyinde L değeri sonbaharda 28.68–32.17, ilkbaharda ise 30.13–36.15 arasında değişmiş; MB uygulaması her iki dönemde de kontrol grubundan anlamlı şekilde farklılaşmıştır. a değeri sonbaharda -11.33 ile -12.84, ilkbaharda ise -10.09 ile -12.56 arasında değişmiştir. b parametresi sonbaharda 16.91–18.24, ilkbaharda 13.40–14.92 aralığında değişmiştir. h° değeri ise sonbaharda 122.63–126.77, ilkbaharda 126.56–128.37 arasında değişmiştir renk doygunluğunu artırmıştır. KS3 sulama düzeyinde meyve parlaklığını (L) ifade eden değerler sonbaharda 27.09–30.96, ilkbaharda ise 28.87–34.04 aralığında değişmiştir. a değerleri bakımından, sonbaharda -11.01 ile -12.17, ilkbaharda ise -9.28 ile -12.57 arasında değişim gözlenmiştir. L değeri sonbaharda gübreleme uygulamaları tarafından ilkbaharda da mikrobiyal uygulamalar tarafından önemli derecede etkilenmiştir. b değeri, sonbaharda 18.41–20.65, ilkbaharda ise 15.85–23.23 aralığında değişmiştir. İlkbahar döneminde kontrol uygulamasında en yüksek b^* değeri kaydedilmiştir. h° (hue açısı) değeri sonbaharda 121.75–126.26, ilkbaharda ise 122.33–128.44 aralığında değişmiştir. b ve h

değerleri her iki dönemde de mikrobiyal uygulamalar diğer gruplardan istatistiksel olarak farklılık göstermiştir ($p<0.05$) (Çizelge 4.6).

Literatürdeki bulgular, çalışmamızın sonuçları ile örtüşmektedir; sonbahar ve ilkbahar dönemlerine ait L, a, b ve Hue değerleri incelendiğinde, tam sulama koşullarında hıyar meyvelerinin en doymuş yeşil renge sahip olduğu, su kısıtının artmasıyla ise meyve renginde solma ve sararmaya doğru bir kayma yaşandığı belirlenmiştir; bu durum, Johnson (2022) tarafından klorofil kaybı ve karotenoid birikiminin artmasıyla açıklanmakta, Miceli vd. (2023) ise AMF uygulamasının pigment sentezi ve stabilizasyonunu destekleyerek kavun meyvesinde daha parlak ve doymuş renk oluşumunu sağladığını belirtmektedir. Mikrobiyal gübre uygulamaları da meyve rengi üzerinde anlamlı etkiler oluşturmuş; KS1 koşullarında PGPR ve AMF uygulamaları kontrol ve kimyasal gübreye göre renk iyileşmesi sağlamış, Zapata-Sifuentes vd. (2022), Wang vd. (2024) ve Begum vd. (2022) tarafından PGPR'ların fenolik, flavonoid ve antioksidan bileşiklerini artırarak pigment kaybını yavaşlattığı bildirilmiştir; ayrıca, Bicer vd. (2022) %100 sulama koşullarında AMF uygulamasının meyve parlaklığını artırarak L değerini 30.77'ye yükselttiğini, AMF+PGPR kombinasyonunun ise Hue değerini 114.97°'ye çıkararak renk kalitesinde üstünlük sağladığını bildirmiştir. KS2 koşullarında ise, özellikle PGPR ve AMF'nin tekli ya da kombine uygulamalarının renk korunmasında etkili olduğu, PGPR'ların klorofil sentezini desteklemesi (Batoool vd. 2020; Zarei, 2022) ve AMF'nin pigment sentezine katkı sağlamasıyla ilişkilendirilmiştir (Li vd. 2012; Nader vd. 2024); bu bulgular, Bicer vd. (2022), Rasouli vd. (2023) ve Raturi vd. (2023) tarafından da doğrulanmış, bizim çalışmamızda da %75 sulamada PGPR+AMF kombinasyonunun en etkili sonucu verdiği görülmüştür. KS3 koşullarında ise meyve renginde belirgin bozulmalar gözlenmiş ancak mikrobiyal uygulamalar bu etkiyi sınırlamış; PGPR uygulamasının ROS birikimini baskılayarak klorofil yıkımını sınırladığı (Alipour Kafi vd. 2021; Batoool vd. 2020), AMF'nin ise ozmoproteksiyon sağlayarak fotosentetik aktiviteyi koruduğu ve stomaların düzenli çalışmasını sağladığı bildirilmiştir (Al-Hinai vd. 2024; Begum vd. 2022); Bicer vd. (2022), %33 sulama düzeyinde AMF+PGPR kombinasyonunun 113.17° Hue değeriyle en kaliteli renk tonlarını oluşturduğunu belirtmiş, bu bulgular çalışmamızla da örtüşmüştür.

Çizelge 4.6. Farklı sulama düzeylerinde gübre uygulamalarının meyve mineral maddesi (mikro elementler) üzerine etkisi. Aynı sulama ve dönem içinde farklı harflerle gösterilen ortalamalar (n=3), Tukey's HSD testine göre istatistiksel olarak farklılık göstermektedir (p <0.05).

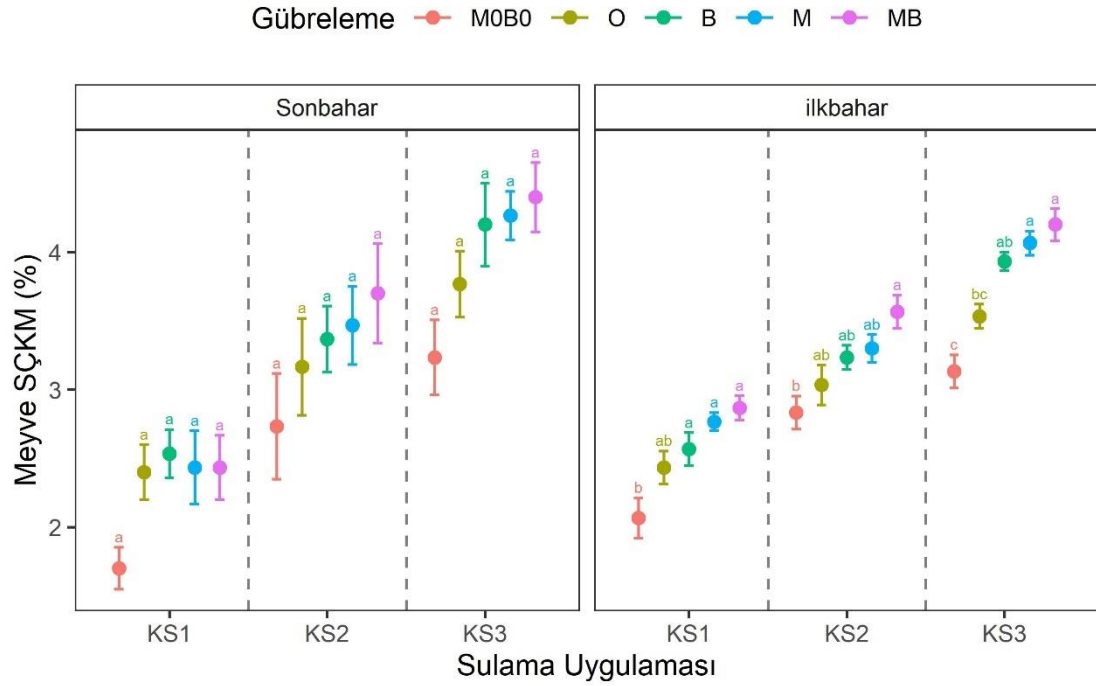
Sulama	Gübreleme	Sonbahar				İlkbahar			
		L	a	b	h	L	a	b	h
KS1	M0B0	30.50 c	-12.00 a	17.63 a	126.45 a	31.83 d	-11.12 a	14.15 a	128.75 a
	O	31.29 bc	-12.48 ab	16.73 a	127.16 a	35.13 c	-12.99 b	12.15 b	128.80 a
	B	32.52 ab	-14.18 bc	16.46 a	127.59 a	37.62 b	-13.01 b	11.78 b	128.03 a
	M	33.26 a	-13.73 abc	16.24 a	127.65 a	37.06 b	-13.34 b	11.50 b	127.76 a
	MB	34.10 a	-15.11 c	15.38 a	128.78 a	39.44 a	-14.10 c	11.70 b	128.30 a
KS2	M0B0	28.68 c	-11.33 a	18.24 a	122.63 a	30.13 c	-10.09 a	14.92 a	126.64 c
	O	30.17 bc	-11.81 ab	18.16 a	124.85 a	34.63 b	-11.34 b	14.88 a	126.56 c
	B	32.18 ab	-12.34 ab	17.54 a	126.01 a	34.67 b	-12.15 c	14.59 a	126.97 bc
	M	30.99 ab	-12.42 ab	17.32 a	126.00 a	34.89 b	-12.34 c	14.87 a	128.12 ab
	MB	32.17 a	-12.84 b	16.91 a	126.77 a	36.15 a	-12.56 c	13.40 a	128.37 a
KS3	M0B0	27.09 b	-11.01 a	20.65 a	121.75 b	28.87 d	-9.28 a	23.23 a	122.33 c
	O	29.87 a	-11.50 a	20.11 ab	123.26 ab	30.39 c	-9.91 b	18.98 b	124.70 b
	B	30.96 a	-11.58 a	19.27 ab	126.09 a	31.92 b	-12.04 c	17.50 bc	128.44 a
	M	30.29 a	-11.81 a	18.66 ab	125.71 a	34.04 b	-12.25 c	17.29 c	127.77 a
	MB	30.49 a	-12.17 a	18.41 b	126.26 a	31.85 a	-12.57 c	15.85 c	127.53 a
KS1		0.0003	0.0017	0.3344	0.6714	<.0001	<.0001	0.0002	0.0576
KS2		0.0015	0.0325	0.0962	0.1871	<.0001	<.0001	0.0424	0.0046
KS3		0.0039	0.0728	0.0203	0.0079	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001

Suda Çözünebilir Kuru Madde

Suda çözünebilir kuru madde (SÇKM) oranı farklı sulama seviyelerinde gübre uygulamalarından anlamlı şekilde etkilenmiştir ($p<0.05$) (Ek 7-8). KS1 seviyesinde SÇKM değerleri sonbaharda 1.7–2.5%, ilkbaharda ise 2.1–2.9% arasında değişmiştir. Sonbahar döneminde uygulamalar SÇKM içeriğini istatistiksel olarak önemli derecede etkilemezken, ilkbaharda uygulamalar arasında farklılıklar bulunmuştur ($p<0.05$). MB uygulaması kontrol grubuna kıyasla %38.6 kıyasla daha yüksek SÇKM sağlamıştır. O, B ve M uygulamaları MB ile benzer sonuçlar göstermiştir (Şekil 4.22). KS2 düzeyinde SÇKM sonbaharda 2.7–3.7%, ilkbaharda ise 2.8–3.6% aralığında ölçülmüş olup, sonbahar döneminde KS1 sulama konusuna benzer şekilde uygulamalar arasında anlamlı farklılıklar oluşmamıştır ($p>0.05$). İlkbaharda ise MB uygulaması kontrol grubundan %26.1 daha fazla SÇKM sağlamıştır ($p<0.05$) (Şekil 4.22). KS3 koşullarında SÇKM değerleri sonbaharda 3.2–4.4%, ilkbaharda ise 3.1–4.2% arasında değişmiştir. Sonbaharda uygulamalar SÇKM içeriğini istatistiksel olarak önemli derecede etkilemezken, ilkbaharda uygulamalar arasında farklılıklar bulunmuştur ($p<0.05$). İlkbahar MB konusundaki SÇKM miktarı kontrol ve O uygulamalarına kıyasla sırasıyla %34.2 ve %18.9 oranında artırmıştır. Ayrıca B ve M uygulamaları da kontrole göre istatistiksel olarak önemli derecede daha fazla SÇKM sağlamıştır (Şekil 4.22).

SÇKM oranı, hıyar meyvesinde şeker birikimi ve tat yoğunluğunu belirleyen önemli bir kalite göstergesi olup, bu çalışmada hem sulama düzeyleri hem de mikrobiyal uygulamalardan anlamlı biçimde etkilenmiştir. Tam sulama koşullarında SÇKM değerleri nispeten düşük kalmış, ancak MB uygulaması sonbaharda %2.43, ilkbaharda %2.87 ile en yüksek değerleri sağlamış ve ilkbahar döneminde kontrol grubuna kıyasla %38.6 oranında daha yüksek SÇKM elde edilmiştir; bu durum, AMF'nin tam sulama koşullarında dahi şeker birikimini artırabildiğini bildiren Biçer vd. (2022) ve Miceli vd. (2023) çalışmalarıyla uyumludur. Su stresi koşullarında (KS2 ve KS3), SÇKM oranlarında belirgin artışlar gözlenmiş; KS2'de MB uygulaması sonbaharda %3.70, ilkbaharda %3.57 ile kontrol grubuna göre %26.1, KS3'te ise sonbaharda %4.40, ilkbaharda %4.20 ile kontrol grubuna kıyasla %34.2 oranında artış sağlamıştır. Bu bulgular, kuraklıkla birlikte meyvede su kaybının artmasına bağlı olarak şeker konsantrasyonunun yükseldiğini ve bu artışın kaliteyi desteklediğini göstermekte olup, Kirnak ve Demirtaş (2006), Alam vd. (2024) ve Söylemez vd. (2020) tarafından bildirilen verilerle örtüşmektedir. AMF'nin şeker sentezini osmotik adaptasyonla artırabildiği, karpuz ve tatlı patates gibi türlerde de gösterilmiş (Kaya vd., 2003; Yooyongwech vd., 2016) ve çalışmamızda özellikle M ve MB uygulamalarının düşük sulama düzeylerinde öne çıkmasıyla benzerlik göstermiştir. PGPR uygulamalarının SÇKM üzerindeki etkisi her zaman artış yönünde olmamış; Alipour Kafi vd. (2021), *Pseudomonas putida* P3-57 suşunun tat algısını artırmasına rağmen SÇKM oranını düşürdüğünü belirtmiş ve bu durumun PGPR'nin su tutulumunu artırarak şeker konsantrasyonunu seyretebileceğini göstermiştir. Buna karşın, çalışmamızda B ve M uygulamaları da kontrol grubuna göre anlamlı düzeyde daha yüksek SÇKM sağlamış ve bu farklılıklar istatistiksel olarak anlamlı bulunmuştur. AMF ve PGPR'nin birlikte uygulanmasıyla elde edilen MB uygulaması her üç sulama düzeyinde de en yüksek SÇKM değerlerini sağlamış; bu sonuç, mikrobiyal etkileşimin karbon asimilasyonunu ve meyveye taşınan şeker birikimini maksimize ettiğini göstermekte olup, Biçer vd. (2022) tarafından %33 sulama koşulunda

bildirilen AMF+PGPR kombinasyonunun en yüksek SÇKM artışına yol açtığı yönündeki bulgularla örtüşmektedir.



Şekil 4.22. Farklı sulama düzeylerinde gübre uygulamalarının SÇKM üzerine etkisi. Aynı sulama ve dönem içinde farklı harflerle gösterilen ortalamalar (n=3), Tukey's HSD testine göre istatistiksel olarak farklılık göstermektedir ($p<0.05$).

Meyve tat ve dış görünüşü

Meyve tat ve dış görünüşü farklı sulama seviyelerinde gübre uygulamalarından anlamlı şekilde etkilenmiştir ($p<0.05$) (Çizelge 4.7). KS1 koşullarında kontrol grubunda tat skoru sonbaharda 2.3, ilkbaharda 3.0 olarak ölçülmüş, dış görünüş puanı ise sırasıyla 1.3 ve 2.0 olmuştur. O uygulamasında tat değeri 3.7 ve 4.0'a, dış görünüş ise her iki dönemde de 4.0'a yükselmiştir. B ve M uygulamaları tat açısından sırasıyla 4.0–4.0 ve 4.0–4.3 değerleri verirken, dış görünüşte her ikisi de sonbaharda 4.0, ilkbaharda ise 4.0 ve 4.3 değerlerine ulaşmıştır. MB uygulaması, tat parametresinde 4.7 ve 5.0; dış görünüşte ise 4.7 ve 5.0 puanlarıyla her iki dönemde de en yüksek skorları sağlamıştır (Çizelge 4.7). KS2 düzeyinde kontrol konusunda tat değerleri 2.0 ve 2.3; dış görünüş ise 1.3 ve 1.7 olarak ölçülmüştür. O uygulaması tat açısından 3.0 ve 3.0, dış görünüş açısından ise 3.0 ve 3.0 değerlerini almıştır. B uygulamasında tat skoru 3.7 ve 3.3; M uygulamasında ise 3.7 ve 3.0 olarak belirlenmiştir. Her iki uygulamada da dış görünüş 4.0 puanla istikrarlı bir düzeyde kalmıştır. MB uygulamasında ise tat değeri sonbaharda 4.0, ilkbaharda 3.0; dış görünüş ise sırasıyla 4.3 ve 4.0 olarak kaydedilmiştir (Çizelge 4.7). KS3 koşullarında, kontrol grubu en düşük tat ve dış görünüş skorlarını vermiş; bu değerler tat için 2.0 ve 1.3, dış görünüş içinse 1.0 ve 1.0 olarak ölçülmüştür. O uygulamasında tat puanı 1.7 ve 2.0; dış görünüş ise 2.0 ve 1.3 olmuştur. B uygulamasında tat skoru 2.7 ve 3.7; dış görünüş ise 2.0 ve 2.7 olarak belirlenmiştir. M uygulamasıyla

birlikte tat değeri 2.7 ve 4.0'a yükselmiş; dış görünüş puanı ise 2.7 ve 2.3 olarak gerçekleşmiştir. MB uygulaması bu sulama düzeyinde tat açısından 3.3 ve 4.0; dış görünüş açısından ise 3.0 ve 3.0 değerleriyle dikkat çekmiştir (Çizelge 4.17).

Tam sulama koşullarında, mikrobiyal gübre uygulamaları hıyar meyvelerinin tat ve dış görünüş kalitesini anlamlı düzeyde artırmış; sonbahar ve ilkbahar dönemlerinde kontrol grubunda yalnızca 2–3 puanlık duyuşal kalite değerlendirme skorları elde edilirken, MB uygulaması her iki dönemde de 5 puanla en yüksek kalite düzeyine ulaşmıştır; bu durum, AMF ve PGPR uygulamalarının birlikte kullanılmasının meyve kalite parametreleri üzerinde sinerjik etki oluşturduğunu ve duyuşal özellikleri iyileştirdiğini göstermektedir. Literatürde de mikrobiyal gübrelemenin meyve lezzeti, aromatik profili ve tekstürel özellikleri olumlu etkilediği (Prisa, 2023; López-Morales vd., 2022), AMF'nin karbon-nitrojen dengesini düzenleyerek şeker sentezini artırabileceği bildirilmiştir (Baslam vd., 2013). KS2 koşullarında, kontrol grubunun kalite skorları her iki dönemde de 2 puanda kalırken, B, M ve MB uygulamaları 4 puana kadar yükselmiş; bu da mikrobiyal inokulantların su stresine rağmen meyve kalitesini koruyabildiğini ve doku bütünlüğü ile tat profilini iyileştirdiğini göstermektedir; bu etkinin, stres koşullarında meyve fizyolojisinin dengelenmesine ve epidermal hücre duvarlarının güçlendirilmesine bağlı olabileceği belirtilmiştir (Porcel vd., 2012; Rouphael vd., 2015; Nadeem vd., 2017). KS3 düzeyinde genel olarak kalite skorlarında düşüş görülmüş; O ve kontrol uygulamaları her iki dönemde de yalnızca 2 puan alırken, mikrobiyal gübre uygulamaları bu düşüşü kısmen dengeleyerek M (3–4 puan) ve MB (3 puan) ile kalite kayıplarını azaltmıştır; bu bulgular, mikrobiyal gübrelemenin düşük su temininde meyve metabolizmasını stabilize edici etkisini desteklemekte, AMF ve PGPR'nin fitohormon üretimi yoluyla kaliteyi artırdığı (Kohler vd., 2008; Hashem vd., 2019) ve PGPR'nin ACC deaminaz enzimi üretimiyle stres kaynaklı etilen sentezini baskılayarak meyve gelişimini desteklediği yönündeki literatürle örtüşmektedir (Glick, 2014). Genel olarak değerlendirildiğinde, meyve tat, tekstür ve dış görünüş gibi duyuşal kalite parametreleri açısından en yüksek skorlar tam sulama koşullarında MB uygulamasıyla, en düşük skorlar ise su stresine maruz kalan kontrol ve kimyasal gübre uygulamalarında elde edilmiş; bu durum, mikrobiyal gübrelerin özellikle kuraklık koşullarında kaliteyi koruyucu etkisinin, metabolizma düzenleme, antioksidan savunmayı güçlendirme ve hücre yapısını koruma gibi mekanizmalarla ilişkili olduğunu göstermektedir (Ortiz vd., 2015; Sun vd., 2024).

Çizelge 4.7. Farklı sulama düzeylerinde gübre uygulamalarının meyve tat ve dış görünüşü üzerine etkisi. Aynı sulamave dönem içinde farklı harflerle gösterilen ortalama (n=3) değerler, Tukey's HSD testine göre istatistiksel olarak farklılık göstermektedir ($p < 0.05$).

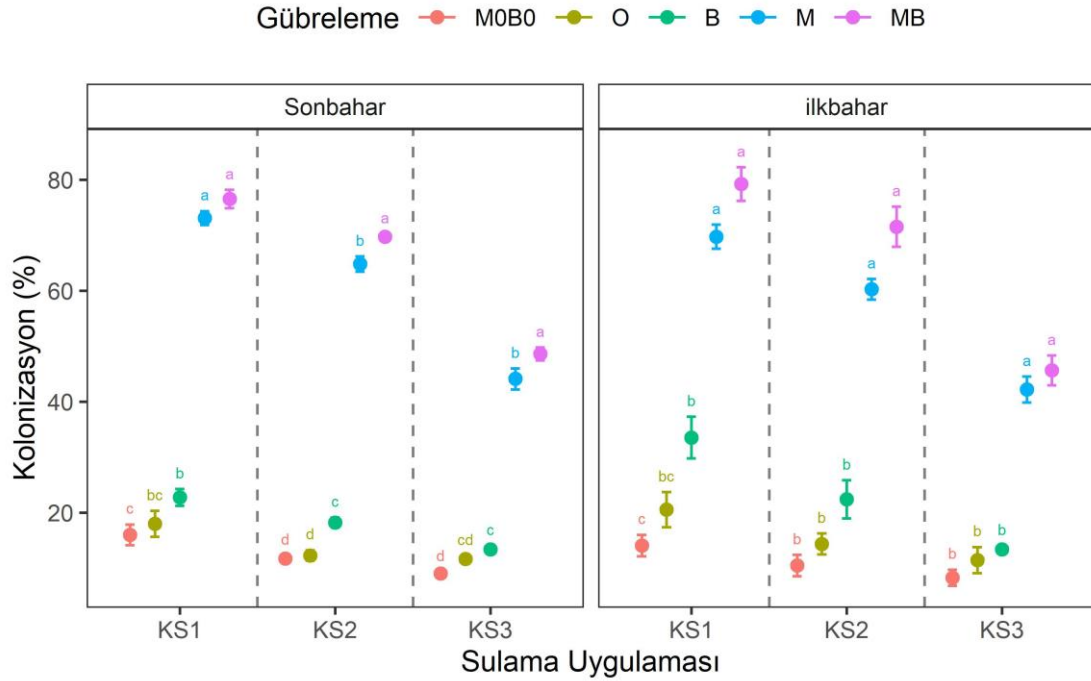
Sulama	Gübre	Sonbahar		İlkbahar	
		Tat	Dış görünüşü	Tat	Dış görünüşü
KS1	M0B0	2.3 b	1.3 b	3.0 c	2.0 c
	O	3.7 ab	4.0 a	4.0 b	4.0 b
	B	4.0 a	4.0 a	4.0 b	4.0 b
	M	4.0 a	4.0 a	4.3 ab	4.3 ab
	MB	4.7 a	4.7 a	5.0 a	5.0 a
KS2	M0B0	2.0 b	1.3 c	2.3 b	1.7 c
	O	3.0 ab	3.0 b	3.0 ab	3.0 b
	B	3.7 ab	4.0 a	3.3 a	4.0 a
	M	3.7 ab	4.0 a	3.0 ab	4.0 a
	MB	4.0 a	4.3 a	3.0 ab	4.0 a
KS3	M0B0	2.0 b	1.0 c	1.3 b	1.0 b
	O	1.7 b	2.0 b	2.0 b	1.3 ab
	B	2.7 ab	2.0 b	3.7 a	2.7 ab
	M	2.7 ab	2.7 ab	4.0 a	2.3 ab
	MB	3.3 a	3.0 a	4.0 a	3.0 a
KS1		0.0038	<0.0001	0.0002	<0.0001
KS2		0.0206	<0.0001	0.0453	<0.0001
KS3		0.0078	0.0001	<0.0001	0.0237

4.7. Kök kolonizasyonu

Bitki köklerindeki AMF kolonizasyonu farklı sulama düzeylerinde, gübreleme uygulamalarından sonbahar ve ilkbahar dönemlerinde önemli derecede etkilenmiştir ($p<0.05$) (Ek 9-10). KS1 koşullarında kök kolonizasyon oranı sonbahar döneminde %16.00 ile %76.53, ilkbahar döneminde ise %14.07 ile %79.23 arasında değişmiştir. M ve MB uygulamaları en yüksek kolonizasyon değerlerini sağlamıştır ($p<0.05$) (Şekil 4.23). KS2 sulama düzeyinde de MB ve M uygulamaları her iki dönemde yüksek kolonizasyon sağlamıştır. Sonbaharda MB %69.70, M %64.80, B %18.23 oranında kolonizasyon sağlamıştır. Kontrol (%11.73) ve O (%12.30) ise oldukça düşük değerlerde kalmıştır. İlkbaharda MB ve M sırasıyla %71.53 ve %60.27 ile yine üst düzeyde kolonizasyon sağlamıştır. (Şekil 4.23). KS3 sulama seviyesinde ise kolonizasyon oranları sonbaharda %9.03–48.60, ilkbaharda %8.27–45.63 arasında gerçekleşmiştir. MB ve M

uygulamalarının kurak koşullarda dahi etkili olduğunu ortaya koyarak her iki dönemde de anlamlı bir fark yaratmıştır ($p<0.05$) (Şekil 4.23).

AMF'nin bitki köklerinde gerçekleştirdiği kolonizasyon, simbiyotik ilişkinin kurulma derecesi ve mikrobiyal gübre uygulamalarının etkinliğini yansıtan temel bir gösterge olarak kabul edilmekte; bu bağlamda çalışmamızda elde edilen veriler, MB ve M uygulamalarının her üç sulama düzeyinde de kolonizasyonu anlamlı düzeyde artırdığını göstermektedir. KS1 koşullarında MB uygulamasıyla ulaşılan %79.23'lük oran, M uygulamasının %69.73'lük değeriyle birlikte, *Glomus sp.* uygulamasıyla %71 kolonizasyon elde eden Yıldız (2010), %74.5 oranı bildiren Çığışar vd. (2000) ve %66.5 oranındaki Li vd. (2012) bulgularıyla uyum göstermekte; ayrıca Nader vd. (2024) tarafından AMF+PGPR ile bildirilen %95.67 oranına yaklaşmaktadır. Bu durum, PGPR'nin AMF sporlarının çimlenmesini ve hif uzamasını destekleyerek kolonizasyonu artırabileceğini belirten Gamalero vd. (2008) ve Garbaye (1994) ile de örtüşmekte olup, MB ve M uygulamalarının aynı istatistiksel grupta yer alması, PGPR'nin simbiyotik etkileşimi engellemediğini, aksine desteklediğini göstermektedir (Yu vd., 2022). KS2 düzeyinde, kolonizasyon oranlarında hafif düşüşler olmasına rağmen MB ve M uygulamaları yüksek etkinliğini sürdürmüş; bu sonuç, düşük toprak neminde bile AMF konsorsiyumlarının kolonizasyon yeteneğini koruduğunu gösteren Silva vd. (2023) ve Ghorchiani vd. (2018) bulgularıyla paralellik göstermiştir. Bu düzeyde MB uygulaması, PGPR'nin mikorizaya yardımcı bakteri (MHB) olarak işlev görmesi sayesinde spor çimlenmesini destekleyerek simbiyozun sürdürülebilirliğine katkı sunmuştur. KS3 koşullarında genel bir azalma görülse de, sonbaharda MB %48.60, M %44.10 ve ilkbaharda sırasıyla %45.63 ve %42.20 düzeyinde kolonizasyon sağlamış; bu bulgular, kuraklık koşullarında *Glomus spp.* ile %68.07, *G. intraradices* ile %41.10 oranında kolonizasyon elde eden Cakmakci vd. (2017) ve *Bromus tometolus* bitkisinde benzer oranları bildiren Karimkhani vd. (2021) ile uyumludur. Ayrıca, Silva vd. (2023) tarafından kurak bölgelerden izole edilen AMF suşlarının %30 su tutma kapasitesinde bile kolonizasyon kabiliyeti gösterdiği; Biçer vd. (2022) tarafından ise %33 sulama koşullarında AMF ile %59.87, AMF+PGPR ile %48.29 oranında kolonizasyon sağlandığı bildirilmiş; bu çalışmalar, MB ve M uygulamalarının KS3 koşullarında elde ettiği oranlarla örtüşmektedir. Tüm bu veriler, PGPR'nin sinerjik ilişkiyi destekleme kapasitesi sayesinde MB uygulamasının birçok durumda M uygulamasından daha yüksek kolonizasyon oranlarına ulaştığını ve farklı sulama düzeylerinde mikrobiyal etkileşimin başarıyla sürdürülebildiğini göstermektedir..



Şekil 4.23. Farklı sulama düzeylerinde gübre uygulamalarının kök kolonizasyonu üzerine etkisi. Aynı sulama ve dönem içinde farklı harflerle gösterilen ortalamalar (n=3), Tukey's HSD testine göre istatistiksel olarak farklılık göstermektedir ($p < 0.05$).

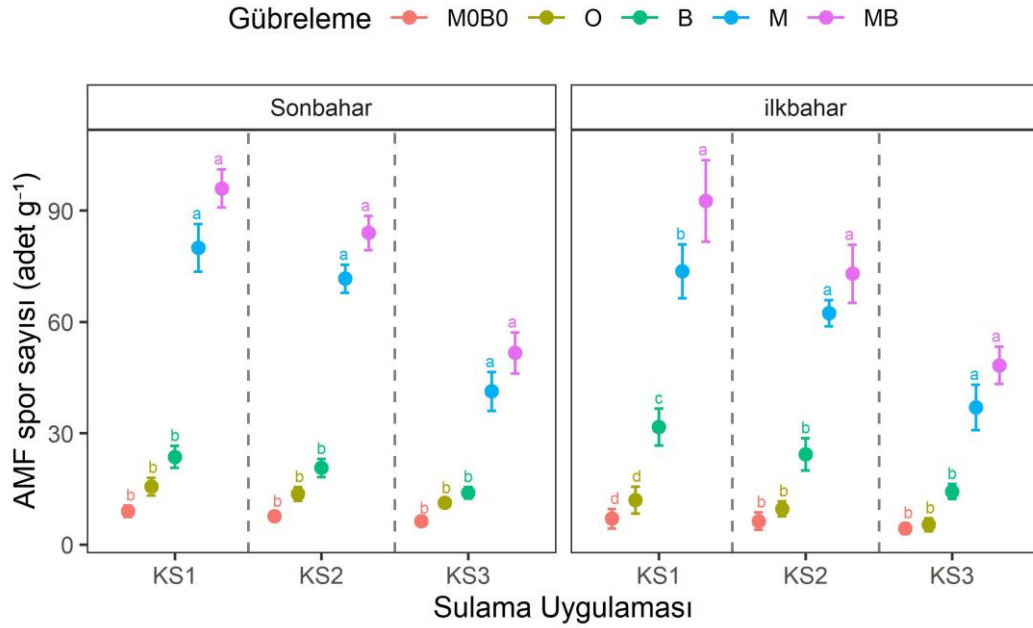
4.8. AMF Spor ve Bakteri Sayısı

AMF spor sayısı

Her iki dönemde uygulanan mikrobiyal gübreler farklı sulama rejimlerinde topraktaki AMF sporlarının yoğunluğu üzerinde istatistiksel olarak anlamlı farklılıklar oluşturmuştur ($p < 0.05$) (Ek 9-10). KS1 koşullarında AMF spor sayısı sonbaharda 9.00–96.00 adet g^{-1} , ilkbaharda ise 7.00–92.67 adet g^{-1} arasında bulunmuştur. M uygulaması da benzer şekilde yüksek bir spor üretimi (80 adet g^{-1}) ile dikkat çekmiştir. Bu iki uygulama istatistiksel olarak üst grupta yer almıştır ($p < 0.05$) (Şekil 4.24). KS2 düzeyinde değerler sonbaharda 7.67–84.00, ilkbaharda 6.33–73.00 adet g^{-1} toprak aralığında değişmiştir. MB uygulaması her iki dönemde de yüksek spor üretimini korumuş ve sırasıyla 84 ve 73 adet g^{-1} değerlerine ulaşmıştır. Bu uygulama, her iki sezonda da M uygulaması (72 ve 62 adet g^{-1}) ile birlikte aynı istatistiksel grupta yer almıştır ($p < 0.05$). (Şekil 4.24). KS3'te ise spor sayısı sonbaharda 6.33–51.67, ilkbaharda 4.33–48.33 adet g^{-1} arasında ölçülmüştür. Sonbahar döneminde MB uygulaması 52 adet g^{-1} , M uygulaması ise 41 adet g^{-1} spor üretmiştir. İlkbahar döneminde bu değerler sırasıyla 48 ve 37 adet g^{-1} olarak gerçekleşmiştir. Bu iki uygulama her iki sezonda da kendi aralarında istatistiksel olarak aynı grupta yer almıştır ($p < 0.05$). Kontrol, O ve B uygulamaları en az spor sayısı değerleri sağlamıştır (Şekil 4.24).

AMF spor yoğunluğu, mikorizal simbiyozun başarısını ve toprağın mikrobiyal canlılığını yansıtan önemli bir gösterge olup, çalışmamızda tam sulama koşullarında özellikle sonbahar döneminde MB uygulamasıyla en yüksek, M uygulamasıyla da ikinci

en yüksek spor üretimi elde edilmiştir; bu sıralama ilkbahar döneminde de korunarak her iki uygulama istatistiksel olarak üst grupta yer almıştır. Bu sonuçlar, AMF'nin optimum nem koşullarında sporlaşma potansiyelini en üst düzeye çıkardığını, PGPR katkısının ise bu etkiyi pekiştirdiğini ortaya koymakta; Pivato vd. (2009) tarafından *Glomus mosseae* sporlarının çimlenme oranının *Pseudomonas fluorescens* C7R12 suşu ile %1.41'den %44.12'ye çıkarıldığı ve hif uzunluğunun üç kat arttığı yönündeki bulgularla da desteklenmektedir. Aynı şekilde Roesti vd. (2005) ve Garbaye (1994) tarafından bildirilen PGPR'nin spor çimlenmesini, hif gelişimini ve simbiyoz başlangıcını hızlandırıcı etkileri, MB uygulamasının kontrol grubuna kıyasla %967–1229, sadece kimyasal gübre uygulamasına göre ise %512–675 oranında sağladığı spor artışlarını açıklamaktadır. Garcia vd. (2025) tarafından *Mimosa caesalpiniaefolia* bitkisiyle yapılan çalışmada bildirilen %1000'i aşan spor sayısı artışları da, mikrobiyal simbiyozun yüksek nem koşullarında maksimum etkinlik gösterebileceğini ortaya koymaktadır. Su kısıtı uygulanan KS2 ve KS3 düzeylerinde ise spor üretiminde genel bir azalma eğilimi görülmüş; ancak AMF içeren uygulamalar, özellikle MB ve M, bu düşüşü sınırlamayı başarmış ve yine istatistiksel olarak en yüksek grupta yer almıştır. AMF'nin kuraklık stresine karşı belirli bir toleransa sahip olduğu ve PGPR ile birlikte kullanımının bu dayanıklılığı artırabildiği yönündeki bulgular, Le Pioufle ve Declerck (2018) ile Boutasknit vd. (2021) tarafından su potansiyelindeki azalmaların AMF hif gelişimini ve sporlaşmayı baskıladığına, kurak topraklarda ise spor canlılığı ve çimlenme oranlarının düştüğüne dair bildirilerle birlikte değerlendirilmelidir. Ancak, çalışmamızda MB uygulaması su stresi altındaki koşullarda dahi kontrol grubuna göre %500'ün üzerinde daha fazla spor üretimi sağlamış; bu durum, AMF'nin pre-simbiyotik gelişimini destekleyen PGPR varlığı sayesinde bu baskılayıcı etkilerin kırılabilirdiğini göstermektedir. Jabborova vd. (2022), AMF'nin su kısıtı altında dahi spor üretimini sürdürdürebildiğini; Bernados vd. (2024) ise AMF uygulanan domates rizosferinde kontrol gruplarına kıyasla çok daha fazla spor oluştuğunu bildirmiştir. Sonuç olarak, çalışmamızda elde edilen spor verileri, Yu vd. (2022) ve Sagat vd. (2021) tarafından vurgulanan AMF ve PGPR'nin birlikte kullanımının hem bitki gelişimini hem de mikorizal propagul yoğunluğunu artırdığı yönündeki bulgularla tam uyum göstermekte olup, PGPR destekli AMF inokulasyonunun kuraklık koşullarında dahi toprak mikrobiyal canlılığını korumada stratejik öneme sahip olduğunu ortaya koymaktadır..



Şekil 4.24. Farklı sulama düzeylerinde gübre uygulamalarının AMF spor sayısı üzerine etkisi. Aynı sulama ve dönem içinde farklı harflerle gösterilen ortalamalar (n=3), Tukey's HSD testine göre istatistiksel olarak farklılık göstermektedir (p<0.05).

Bakteri sayısı

Her iki dönemde de uygulanan mikrobiyal gübreler farklı sulama düzeylerinde, topraktaki bakteri sayısını istatistiksel olarak önemli düzeyde etkilemiştir (p<0.05) (Çizelge 4.12). (Çizelge 4.8). KS1 düzeyinde, sonbahar döneminde MB uygulaması 1.47×10^9 kob ile en yüksek bakteri sayısını sağlamış; bu uygulamayı 6.43×10^8 kob ile M ve 1.20×10^9 kob ile B uygulamaları takip etmiştir. Kimyasal gübre uygulaması 2.30×10^8 kob, kontrol uygulaması ise 1.53×10^7 kob ile daha düşük değerler göstermiştir. İlkbaharda B uygulaması 1.60×10^9 kob ile en yüksek değeri sağlamış, MB uygulaması 1.27×10^9 kob değeri vererek B ile aynı düzeyde başarı göstermiştir. M uygulaması ise 4.93×10^8 kob ile bu iki uygulamanın ardından gelmiştir. Geleneksel uygulamalar olan O (1.40×10^8 kob) ve kontrol (1.47×10^7 kob) bu dönemde de en düşük bakteriyel yoğunluğu göstermiştir. (p<0.05) (Çizelge 4.8). KS2 düzeyinde, MB uygulaması her iki dönemde de 1.07×10^9 ve 1.03×10^9 kob değerleri ile yüksek performans göstermiştir. Bu uygulama, her iki dönemde de B uygulaması ($1.00 \times 10^9 - 1.01 \times 10^9$ kob) ile aynı istatistiksel grupta yer almıştır (p<0.05). M uygulaması ise $4.33 \times 10^8 - 3.30 \times 10^8$ kob değerleri ile bu iki uygulamadan sonra gelmiştir. (p<0.05) (Çizelge 4.8). KS3 düzeyinde bakteri sayıları genel olarak azalmış olmakla birlikte, MB ve B uygulamaları bu düşüşü sınırlandırmıştır. Sonbaharda MB uygulaması 8.23×10^7 kob, B uygulaması 6.80×10^7 kob ve M uygulaması 3.27×10^7 kob değerlerine ulaşmıştır. İlkbahar döneminde ise MB uygulaması 8.00×10^7 , B uygulaması 7.33×10^7 , M uygulaması ise 2.67×10^7 kob değerine sahip olmuştur (Çizelge 4.8).

Bu çalışmada, farklı sulama düzeylerinde uygulanan mikrobiyal gübreler, hıyar yetiştirilen toprakta bakteri yoğunluğunu hem sonbahar hem de ilkbahar dönemlerinde istatistiksel olarak anlamlı düzeyde etkilemiş; özellikle MB uygulaması tüm sulama

koşullarında en yüksek bakteri popülasyonunu sağlamıştır. KS1 koşullarında sonbaharda MB uygulaması en yüksek değere ulaşırken, onu B ve M uygulamaları izlemiştir; ilkbaharda ise B uygulaması öne çıkmış ve MB ile benzer düzeyde sonuç vermiştir. Bu durum, PGPR'nin kolonizasyon yeteneği ve AMF'nin rizosferde oluşturduğu karbon zenginliği ile ilişkilendirilmiştir; Sun vd. (2024), Jabborova vd. (2022) ve Nader vd. (2024) gibi araştırmalarda da PGPR ve AMF'nin toprak mikrobiyal topluluğunu doğrudan inokulasyon ve rizosfer çevresinin iyileştirilmesi yoluyla artırabildiği belirtilmiştir. KS2 koşullarında MB uygulaması her iki dönemde de en yüksek bakteri yoğunluğunu üretmiş, B ile aynı grupta yer almış, M uygulaması ise daha düşük ancak kontrol grubuna kıyasla oldukça yüksek seviyeler göstermiştir. Kumar vd. (2022) tarafından PGPR'nin orta düzey kuraklık altında bile bakteriyel popülasyonu anlamlı düzeyde artırabildiği gösterilmiş; aynı çalışmada %25 su kısıtı altında PGPR konsorsiyumu 4.33×10^{10} KOB/g düzeyine ulaşmıştır. Benzer şekilde, bu çalışmada MB ve B uygulamaları, kontrol ve kimyasal gübre gruplarına kıyasla %368–463 oranında artış sağlamış; M uygulaması ise KS2'de kontrol grubuna göre %3000'lik artışla dikkat çekmiştir. Li vd. (2012) çalışmasında da AMF ile rizosferde %186 oranında bakteri artışı bildirilmiş olup, bu artışın kök eksudat profili ve hif uzaması ile ilişkili olduğu belirtilmiştir. KS3 koşullarında genel bir düşüş gözlenmiş olsa da MB ve B uygulamaları bu azalmayı sınırlandırarak ileri düzey kuraklık koşullarında bile mikrobiyal yoğunluğun sürdürülebilirliğini ortaya koymuştur. Nikhil vd. (2023) tarafından bildirilen *P. putida* AKMP7 suşunun kuraklık toleransı ve Al-Silmawy vd. (2025)'in AMF + *Azotobacter* + biochar kombinasyonunun sinerjik etkileri, bu bulgularla örtüşmektedir. Çalışmamızda MB uygulaması kontrol grubuna göre 16 kata varan artış sağlamış; bu, PGPR ve AMF'nin kuraklık koşullarında bile kolonizasyonu sürdürebildiğini göstermiştir. Nadeem vd. (2017), *P. fluorescens*'in kuraklık altında hücre dışı yapılar ve hareketliliğin baskılanması nedeniyle azaldığını rapor etse de, bu çalışmada MB ve B uygulamalarının söz konusu sınırlamaları telafi edebildiği ve rizosferde bakteriyel varlığın korunduğu ortaya konmuştur. Sun vd. (2024) ve Fan vd. (2024) tarafından AMF uygulamalarının beta çeşitliliği artırarak hifosfer ortamında bakteriyel zenginleşmeyi teşvik ettiği de bildirilmiş olup, bu bulgular çalışmamızla yüksek düzeyde uyumludur.

Çizelge 4.8. Farklı sulama düzeylerinde gübre uygulamalarının bakteri sayısı üzerine etkisi. Aynı sulama ve dönem içinde farklı harflerle gösterilen ortalama ($n=3$) değerler, Tukey's HSD testine göre istatistiksel olarak farklılık göstermektedir ($p<0.05$).

Sulama	Gübreleme	Bakteri sayısı (KOB 10^8 g $^{-1}$)	
		Sonbahar	İlkbahar
KS1	M0B0	0.153 c	0.147 b
	O	2.300 c	1.400 b
	B	12.000 a	16.000 a
	M	6.430 b	4.930 b
	MB	14.700 a	12.700 a
KS2	M0B0	0.103 c	0.101 c
	O	1.900 c	0.930 c
	B	10.000 a	10.100 a
	M	4.330 b	3.300 b
	MB	10.700 a	10.300 a
KS3	M0B0	0.063 d	0.051 b
	O	0.073 d	0.069 b
	B	0.680 b	0.733 a
	M	0.327 c	0.267 b
	MB	0.823 a	0.800 a
KS1		<,0001	<,0001
KS2		<,0001	<,0001
KS3		<,0001	<,0001

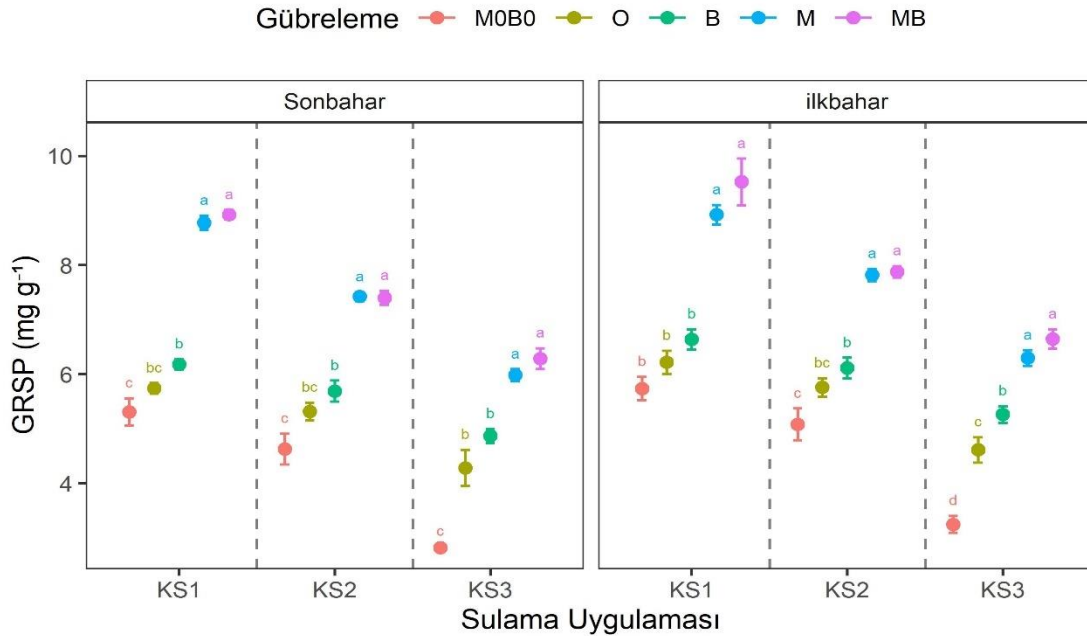
4.9. Toprak Enzimleri

GRSP

GRSP (Glomalin) düzeyleri farklı sulama seviyelerinde gübreleme uygulamalarından istatistiksel olarak anlamlı şekilde etkilenmiştir ($p<0.05$) (Ek 9-10). KS1 sulama düzeyinde GRSP içeriği sonbaharda 5.30–8.93 mg g $^{-1}$, ilkbaharda 5.74–9.53 mg g $^{-1}$ arasında belirlenmiştir. KS2'de bu değerler sonbahar döneminde 4.63–7.42 mg g $^{-1}$, ilkbaharda ise 5.08–7.88 mg g $^{-1}$ arasında değişmiştir. KS3'te GRSP düzeyi sonbaharda 2.82–6.28 mg g $^{-1}$, ilkbaharda ise 3.24–6.65 mg g $^{-1}$ aralığında gerçekleşmiştir. İki dönemde de tüm sulama düzeylerinde MB ve M uygulamaları kontrol, B ve O uygulamalarına kıyasla önemli derecede daha fazla GRSP değerleri sağlamıştır ($p<0.05$) (Şekil 4.25).

Bu çalışmada, farklı sulama düzeylerinde hıyar yetiştirilen topraklarda uygulanan mikrobiyal gübrelerin GRSP birikimini anlamlı düzeyde artırdığı belirlenmiş; özellikle MB uygulaması her üç sulama düzeyinde ve her iki dönemde de en yüksek GRSP düzeylerini sağlamıştır. KS1 koşullarında MB uygulaması, kontrol grubuna kıyasla daha yüksek glomalin birikimi sağlamış; bu bulgu, AMF'nin optimal sulama koşullarında yüksek glomalin üretimi gerçekleştirdiğini bildiren Kohler vd. (2009) ve Wu vd. (2014) ile

uyumludur. AMF'nin yalnızca kök yüzeyinde değil, toprak matrisinde de hifsel yapılar aracılığıyla glomalin sentezini artırdığı bildirilmiş; Walley vd. (2014) ise PGPR ve AMF birlikte uygulandığında GRSP düzeyinin tekli uygulamalara kıyasla daha yüksek olduğunu ve bunun mikrobiyal karbon akışı ile kolonizasyon sinerjisine bağlı geliştiğini ortaya koymuştur. KS2 koşullarında, MB ve M uygulamaları sırasıyla yaklaşık %59,8 ve %55,1 daha fazla GRSP birikimi sağlayarak, AMF'nin su stresine rağmen glomalin üretimini sürdürebildiğini gösteren Silva vd. (2023) ve Ji vd. (2019)'un bulgularını desteklemiştir. El Mazouni vd. (2025), kurak koşullarda GRSP artışının %88'e kadar çıkabildiğini rapor etmiş ve bunun AMF'nin toprak-su-bitki etkileşimlerini stabilize eden bir adaptasyon mekanizması olduğunu belirtmiştir; ayrıca Walley vd. (2014), PGPR'nin kök morfolojisini iyileştirerek AMF kolonizasyonunu kolaylaştırdığını ve GRSP düzeyini artırabildiğini göstermiştir. KS3 koşullarında da su stresine rağmen MB uygulaması sonbaharda %122,7 ve ilkbaharda %105,2 oranında artış sağlamış, M uygulaması da benzer düzeylerde GRSP birikimi üretmiştir; bu sonuçlar, glomalinin kurak koşullarda da sentezlenebildiğini gösteren Ji vd. (2019) ve Cho vd. (2009) gibi araştırmalarla örtüşmektedir. Selvakumar vd. (2018), farklı AMF türlerinin kuraklık altında GRSP seviyelerini anlamlı şekilde artırabildiğini, özellikle *Gigaspora margarita* ve *Rhizophagus sp.* gibi türlerin bu etkinliği belirginleştirdiğini bildirmiştir. MB ve M uygulamalarının bu koşullarda yüksek GRSP düzeyleri üretmesi, söz konusu adaptasyon mekanizmalarının çalışmamızda da geçerli olduğunu ortaya koyarken, Kohler vd. (2009)'un AMF-PGPR sinerjisine ilişkin bulguları da, MB uygulamasının kuraklık koşullarında dahi en yüksek GRSP düzeyine ulaşmasıyla tam uyum göstermektedir.



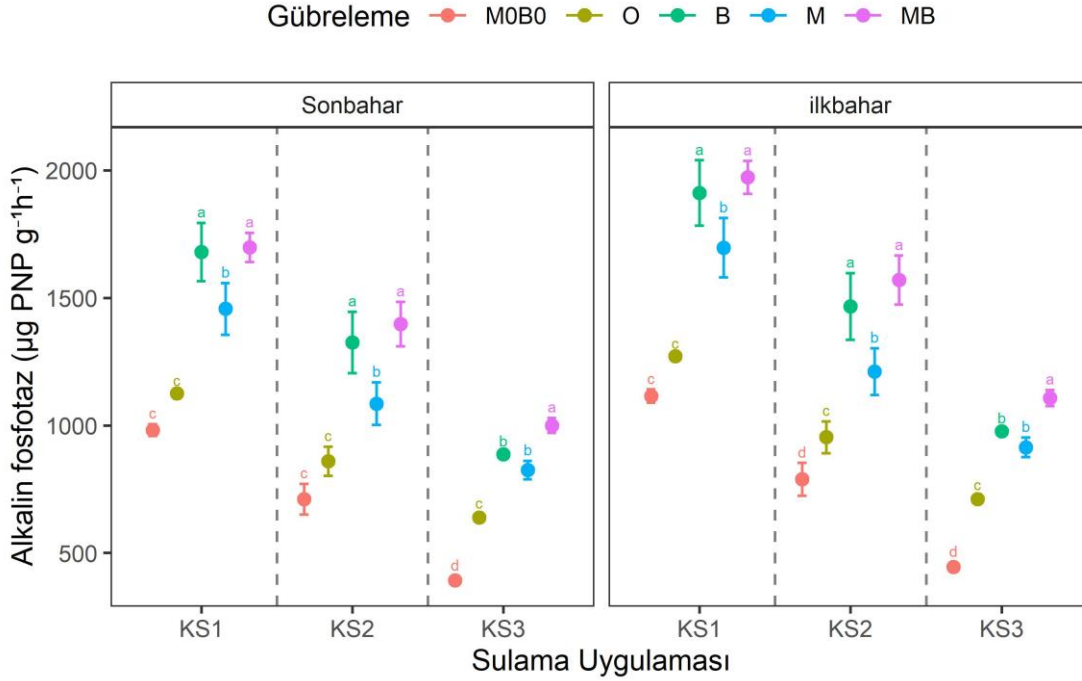
Şekil 4. 25. Farklı sulama düzeylerinde gübre uygulamalarının GRSP üzerine etkisi. Aynı sulama ve dönem içinde farklı harflerle gösterilen ortalamalar (n=3), Tukey's HSD testine göre istatistiksel olarak farklılık göstermektedir (p < 0.05).

Alkalin Fosfataz

Alkalin fosfataz enzimi (ALP), organik fosforun mineralizasyonuna aracılık eden biyokimyasal bir belirteç olup mikrobiyal gübre uygulamalarından farklı sulama konuları altında istatistiksel olarak anlamlı biçimde etkilenmiştir ($p<0.05$) (Ek 9-10). KS1 koşullarında alkalin fosfataz enzim aktivitesi sonbaharda $982\text{--}1698 \mu\text{g PNP g}^{-1} \text{h}^{-1}$, ilkbaharda ise $1116\text{--}1972 \mu\text{g PNP g}^{-1} \text{h}^{-1}$ arasında ölçülmüştür. KS2 düzeyinde değerler sonbaharda $712\text{--}1398$, ilkbaharda ise $789\text{--}1570 \mu\text{g PNP g}^{-1} \text{h}^{-1}$ aralığında değişmiştir. KS3'te ise bu parametre sonbaharda $393\text{--}1000$, ilkbaharda ise $445\text{--}1108 \mu\text{g PNP g}^{-1} \text{saat}^{-1}$ aralığında gerçekleşmiştir. Tüm sulama düzeylerinde mikrobiyal uygulamalar kontrol ve O konularına göre ALP aktivitesini önemli derecede artırmıştır. Her iki dönemde de KS1 ve KS2 sulama düzeylerinde M ve MB en yüksek değerleri sağlarken, KS3 sulama seviyesinde MB uygulamalarında en yüksek aktivite belirlenmiştir ($p<0.05$) (Şekil 4.26).

Bu çalışmada, hıyar yetiştirilen topraklarda uygulanan mikrobiyal gübrelerin, tüm sulama düzeylerinde toprakta ALP enzim aktivitesini anlamlı düzeyde artırdığı belirlenmiştir; özellikle MB uygulaması, KS1, KS2 ve KS3 koşullarında sırasıyla %73–77, %96–99 ve %149–155 oranında kontrol grubuna göre daha yüksek ALP düzeyleri sağlamıştır. Bu artış, AMF'nin rizosferde P döngüsünü aktive eden mikorizal fosfataz enzimlerini salgılaması (El-Sawah vd. 2021), PGPR'nin ise organik P bileşiklerini mineralize etme kapasitesi (Yu vd. 2022) ile ilişkilendirilmiştir. Pan vd. (2020) ve Ali vd. (2021) çalışmalarında AMF uygulamasının ALP aktivitesini artırabildiği, ancak PGPR ile birlikte uygulandığında bu etkinin daha belirgin hâle geldiğini bildiren bulgular, çalışmamızda M ve B uygulamalarının da O uygulamasına göre daha yüksek enzim düzeyleri üretmesiyle uyumludur. KS2 koşullarındaki yüksek artışlar, AMF'nin su kısıtı altında dahi fosfat mobilizasyonunu sürdürebildiğini bildiren Silva vd. (2023) ve Navarro-Ródenas vd. (2011) tarafından desteklenmekte; aynı zamanda PGPR'nin fosfataz enzimlerini %193'e kadar aktive edebildiğini gösteren Namlı vd. (2017) ve Tirry vd. (2024) gibi çalışmalarla da örtüşmektedir. PGPR'nin mikorizal kolonizasyonu uyarak AMF kaynaklı fosfataz üretimini destekleyebilmesi, Zhang vd. (2024) tarafından sinerjik bir mekanizma olarak tanımlanmıştır. KS3 koşullarında, su stresine rağmen MB uygulamasının sağladığı yüksek ALP düzeyleri, AMF'nin çözünür ve hücre duvarına bağlı fosfataz sistemlerini aktive ederek P metabolizmasını sürdürebildiğini ortaya koyan Navarro-Ródenas vd. (2011) ve Zhang vd. (2024)'ün bulgularıyla doğrudan örtüşmekte; Nader vd. (2024) ise PGPR ve AMF'nin birlikte kullanımının fosfataz üretimini %65'in üzerinde artırabildiğini bildirmiştir. Ayrıca, Hidri vd. (2019), kurak koşullarda PGPR'nin fosfat çözünürlüğünü teşvik eden etkisinin daha belirgin olduğunu vurgularken, Prasad vd. (2012), AMF ve PGPR birlikte uygulandığında kontrol grubuna göre üç kata kadar ALP aktivitesi artışı sağlandığını ifade etmiştir. Bu literatür desteği, çalışmamızda gözlenen MB uygulamasının her üç sulama koşulunda da en yüksek ALP

düzeylerini üretmesini işlevsel ve mekanistik olarak doğrulamaktadır.



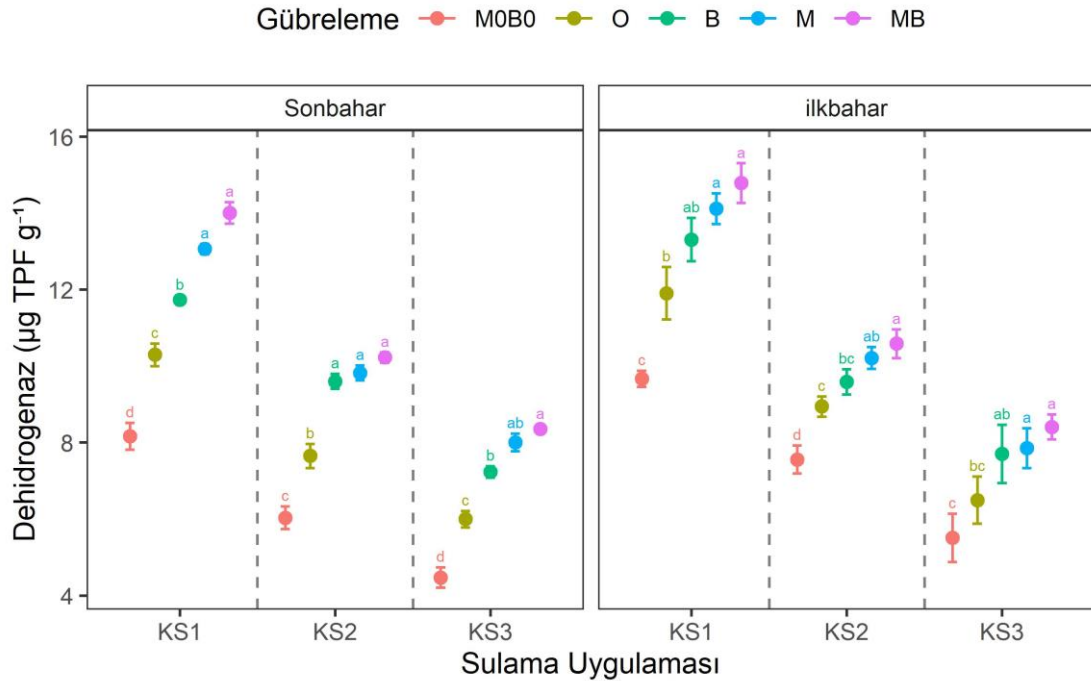
Şekil 4.26. Farklı sulama düzeylerinde gübre uygulamalarının ALP üzerine etkisi. Aynı sulama ve dönem içinde farklı harflerle gösterilen ortalamalar (n=3), Tukey's HSD testine göre istatistiksel olarak farklılık göstermektedir (p<0.05).

Dehidrogenaz

Dehidrogenaz enzimi, toprak mikrobiyal solunumunun biyokimyasal bir göstergesi olarak değerlendirilmiş ve her iki dönemde de farklı sulama düzeylerinde mikrobiyal gübre uygulamalarından anlamlı düzeyde etkilenmiştir (p<0.05). (Ek 9-10). KS1 sulama düzeyinde dehidrogenaz aktivitesi sonbaharda 8.17–14.01, ilkbaharda ise 9.67–14.78 $\mu\text{g TPF g}^{-1}$ arasında tespit edilmiştir. KS2 koşullarında değerler sonbaharda 6.03–10.23, ilkbaharda ise 7.56–10.59 $\mu\text{g TPF g}^{-1}$ aralığında ölçülmüştür. KS3'te bu parametre sonbaharda 4.47–8.36, ilkbaharda ise 5.51–8.41 $\mu\text{g TPF g}^{-1}$ arasında değişmiştir. Tüm sulama düzeylerinde mikrobiyal gübre uygulamaları her iki dönemde de kontrol konusuna kıyasla daha fazla dehidrogenaz enzim aktivitesi sağlarken, aynı zamanda M ve MB konuları O konusundan önemli derecede daha fazla enzim aktivitesi göstermiştir (p<0.05) (Şekil 4.27).

Bulgular, en yüksek enzim aktivitesinin her iki dönemde de tam sulama koşullarında MB uygulaması ile elde edildiğini ortaya koymuştur. Bu durum, AMF'nin rizosferde C akışını artırarak mikrobiyal solunumu uyardığı ve PGPR'nin kök çevresinde mikrobiyal canlılığı destekleyerek dehidrogenaz aktivitesini yükselttiği yönündeki literatürle uyumludur (Jabborova vd. 2022; Ali vd. 2021). Benzer şekilde, Nader vd. (2024), soya bitkisiyle yürüttükleri çalışmada AMF+PGPR+kimyasal gübre kombinasyonunun dehidrogenaz aktivitesinde artış sağladığını belirtmişlerdir. Bu artışın mikrobiyal konsorsiyumların toprak mikrobiyotasını yeniden yapılandırması ve solunumsal süreçleri hızlandırması ile ilişkili olduğu bildirilmiştir. Bu sonuçlar, özellikle

MB uygulamasının kontrol grubuna göre %50'yi aşan artış sağlamasıyla benzerlik göstermektedir. M uygulaması, O uygulamasına kıyasla her iki dönemde de anlamlı düzeyde daha yüksek dehidrogenaz aktivitesi üretmiş, bu da AMF'nin özellikle P mobilizasyonu ve kök mikrobiyal çevrenin zenginleştirilmesi yoluyla toprak biyolojik aktivitesini artırma potansiyelini ortaya koymuştur (El-Sawah vd. 2021; Jabborova vd. 2022). Literatürde, AMF'nin kök eksudatlarını zenginleştirerek mikrobiyal çeşitliliği artırdığı ve bu durumun enzimatik aktiviteyi desteklediği bildirilmektedir (Ali vd. 2021). PGPR'nin dehidrogenaz üzerindeki etkisi ise daha çok kısa vadeli ve rizosfer odaklı artışlarla ilişkilidir. Zhang vd. (2024) tarafından hıyar bitkisiyle yapılan çalışmada, *Bacillus subtilis* S1 suşu uygulamasıyla kontrol grubuna göre anlamlı düzeyde dehidrogenaz artışı gözlenmiştir. Bu durum, PGPR'nin toprakta mikrobiyal solunumu doğrudan uyarabildiğini ve özellikle hızlı etkili enzimatik tepkimeleri artırabileceğini göstermektedir. Çalışmamızda B uygulaması da benzer şekilde, her iki dönemde de O ve kontrol uygulamalarına göre yüksek aktivite sağlamıştır. KS2 ve KS3 koşullarında dehidrogenaz düzeylerinde azalma gözlenmiş olsa da mikrobiyal gübreler bu düşüşü önemli ölçüde sınırlandırmıştır. Özellikle MB uygulaması, kontrol uygulamasına kıyasla her iki sezonda da %40–69 aralığında daha yüksek enzim aktivitesi sağlamıştır. Bu sonuç, Nader vd. (2024) ve Hidri vd. (2019) tarafından bildirilen, mikrobiyal konsorsiyumların kuraklık altında enzimatik faaliyetleri koruma potansiyeli ile uyumludur. AMF ve PGPR'nin sinerjik etkisiyle, kurak koşullarda bile mikrobiyal solunum ve C döngüsünün sürdürülebildiği anlaşılmaktadır. KS3 koşullarında enzim aktiviteleri genel olarak en düşük seviyelerde gerçekleşmiş ancak mikrobiyal gübre uygulamaları bu düşüşü sınırlamıştır.

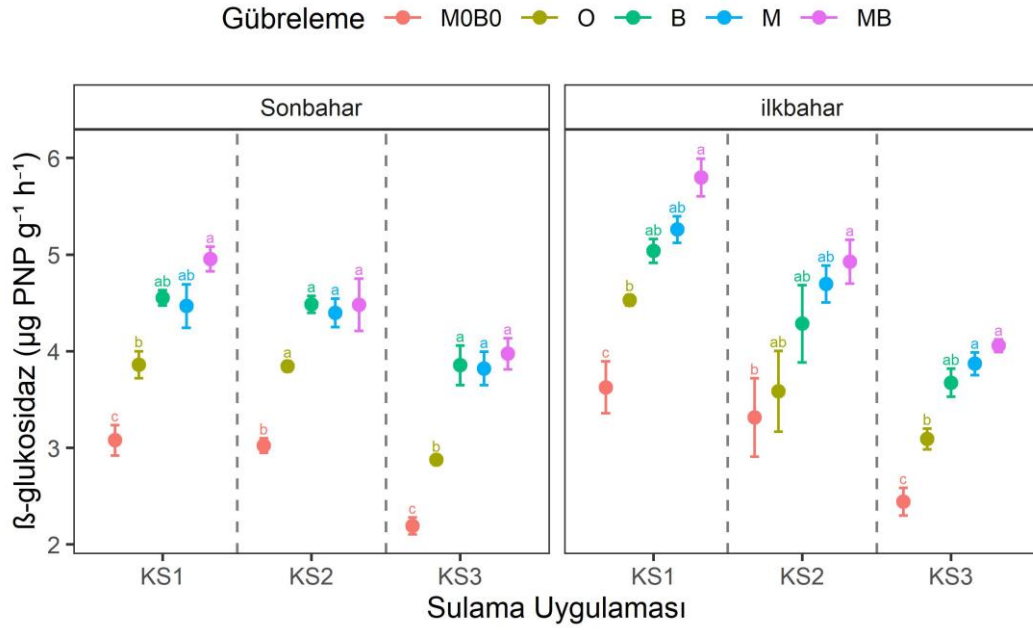


Şekil 4.27. Farklı sulama düzeylerinde gübre uygulamalarının dehidrogenaz üzerine etkisi. Aynı sulama ve dönem içinde farklı harflerle gösterilen ortalamalar (n=3), Tukey's HSD testine göre istatistiksel olarak farklılık göstermektedir (p<0.05).

β-glukosidaz

β-glukosidaz enzim aktivitesi, sonbahar ve ilkbahar dönemlerinde farklı sulama düzeylerinde gübre uygulamalarından istatistiksel olarak anlamlı düzeyde etkilenmiştir ($p<0.05$) (Ek 9-10). KS1 düzeyinde β-glukosidaz aktivitesi sonbaharda 3.08–4.96, ilkbaharda ise 3.63–5.80 $\mu\text{g PNP g}^{-1} \text{ h}^{-1}$ aralığında gerçekleşmiştir. KS1 düzeyinde, en yüksek enzim aktivitesi her iki dönemde de MB (4.96–5.80 $\mu\text{g PNP g}^{-1} \text{ h}^{-1}$) uygulamasında ölçülmüş ve bu uygulama, kontrol ve O uygulamasına göre sonbaharda sırasıyla %61 ve %29, ilkbaharda ise %60 ve %28 daha yüksek değer sağlamıştır ($p<0.05$) (Şekil 4.28). KS2’de bu değerler sonbaharda 3.02–4.48, ilkbaharda ise 3.31–4.93 $\mu\text{g PNP g}^{-1} \text{ saat}^{-1}$ arasında ölçülmüştür. Sonbahar döneminde gübreleme uygulamaları kontrol grubundan önemli derecede daha fazla enzim aktivitesi sağlarken ilkbahar döneminde sadece MB konusu kontrole kıyasla daha anlamlı sonuçlar göstermiştir ($p<0.05$) (Şekil 4.28). KS3 sulama düzeyinde ise sonbaharda 2.19–3.97, ilkbaharda ise 2.44–4.06 $\mu\text{g PNP g}^{-1} \text{ saat}^{-1}$ aralığında değişim göstermiştir. Bu sulama düzeyinde sonbahar döneminde mikrobiyal uygulamalar kontrol ve O konularına kıyasla daha yüksek enzim aktivitesi sağlarken ilkbahar döneminde M ve MB uygulamaları en yüksek değerleri göstermiştir ($p<0.05$) (Şekil 4.28).

KS1 düzeyinde, hıyar bitkisi yetiştirilen topraklara uygulanan mikrobiyal gübrelerin β-glukosidaz enzim aktivitesini anlamlı şekilde artırdığı belirlenmiştir. Bu bulgular, AMF ve PGPR uygulamalarının C döngüsünde görev alan β-glukosidaz enzimini nemli koşullarda aktive edebildiğini gösteren Feizi vd. (2024), Chen vd. (2024) ve Wang vd. (2022) tarafından yürütülen çalışmalar ile uyumludur. Ayrıca, Garcia vd. (2025) çalışmasında AMF türlerinin karışım halinde uygulanmasının β-glukosidaz aktivitesini %62.5 oranında artırdığı bildirmiştir ve Ji vd. (2024) tarafından bildirilen AMF ve halotolerant bakterilerin birlikte uygulandığı koşullarda β-glukosidaz aktivitesinde sağlanan anlamlı artışlar da bu artışlar çalışmamızdaki MB uygulamasının etkileriyle paralellik göstermektedir. Su kısıtı koşullarında (KS2 ve KS3), hıyar bitkisi yetiştirilen topraklarda uygulanan mikrobiyal gübreler, β-glukosidaz (BG) enzim aktivitesini önemli ölçüde artırmıştır. KS2 düzeyinde MB uygulaması her iki dönemde de kontrol grubuna göre yaklaşık %48 daha yüksek aktivite sağlamış, M ve B uygulamaları da en az %30 oranında artış göstermiştir. Benzer şekilde, KS3 koşullarında MB uygulaması sonbaharda %81.3, ilkbaharda ise %66.4 daha yüksek BG aktivitesi ile en yüksek düzeyleri sağlamıştır. M ve B uygulamaları da kontrol grubuna kıyasla %74–76 oranında artış göstermiştir. Bu bulgular, su stresi altında dahi AMF ve PGPR’nin karbon bazlı mikrobiyal süreçleri destekleyebildiğini ortaya koyan Calvo vd. (2025) ve Ansari vd. (2023) ile örtüşmektedir. Moradi Tarnabi vd. (2020), mikorizal simbiyozun kuraklık altında β-glukosidaz gen ekspresyonunu artırabildiğini; Sardans ve Peñuelas (2005) ise bu enzimin kuraklık koşullarında %80’e varan düşüş gösterebildiğini bildirmiştir. Bu doğrultuda, çalışmamızda MB ve M uygulamalarının bu olumsuz etkiyi dengeleyerek enzim aktivitesini sürdürmesi önemli bir bulgudur. Ayrıca, PGPR’nin karbonhidrat çözünürlüğünü artırıcı etkileri (Hidri vd. 2019) ve AMF’nin mikrobiyal süreçleri destekleyici rolü (Ji vd. 2024) dikkate alındığında, mikrobiyal ko-inokülasyonun kuraklık stresi altında dahi rizosferin biyolojik işlevselliğini koruyabildiği sonucuna varılmaktadır.



Şekil 4. 28. Farklı sulama düzeylerinde gübre uygulamalarının beta-glukosidaz üzerine etkisi. Aynı sulama ve dönem içinde farklı harflerle gösterilen ortalamalar (n=3), Tukey's HSD testine göre istatistiksel olarak farklılık göstermektedir (p<0.05).

4.10. Korelasyon

Yaprak besin elementi ve meyve özellikleri

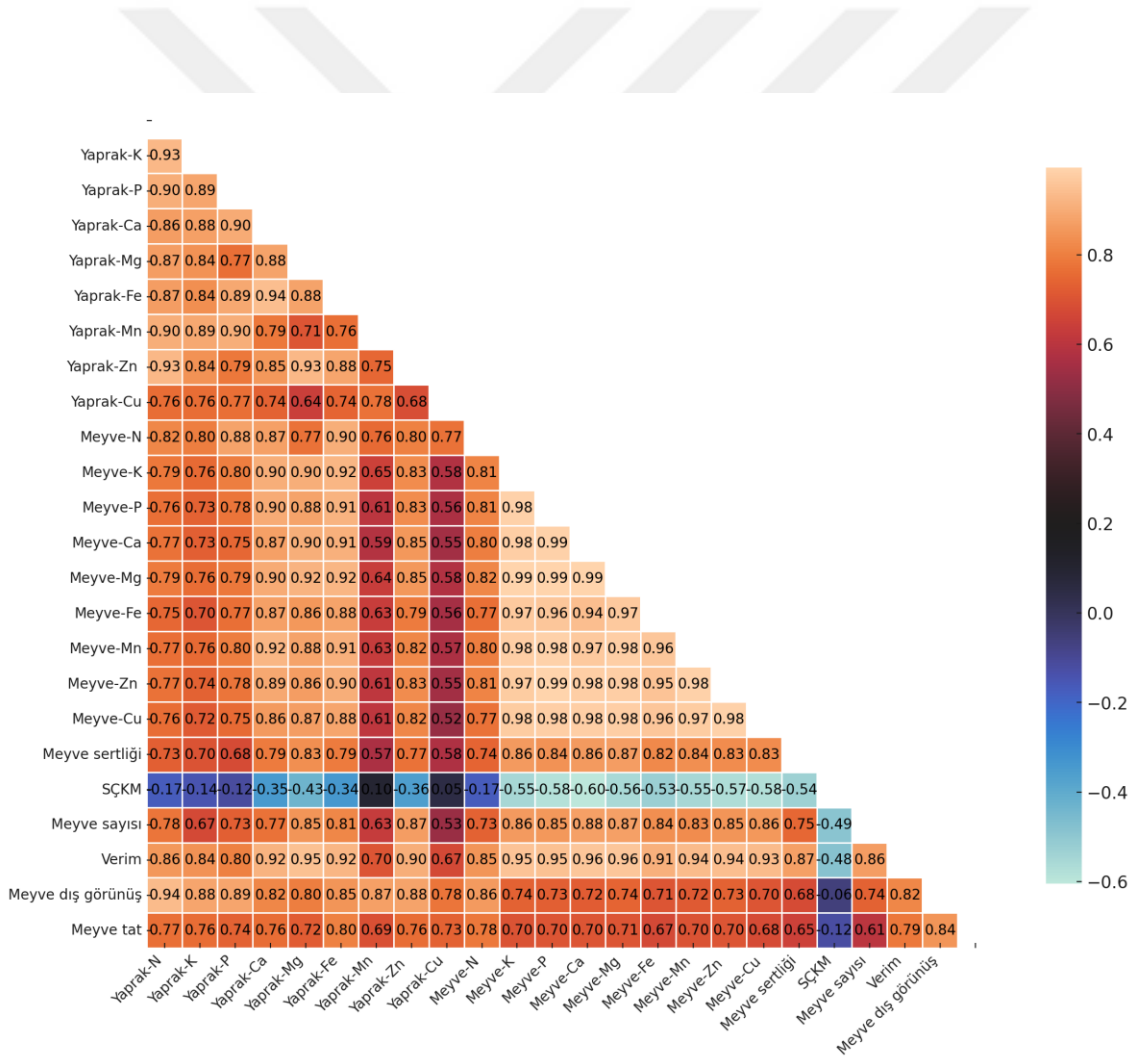
Yaprak ve meyve besin elementleri ile verim ve kalite parametreleri arasındaki ilişkiler, her iki dönemde birlikte değerlendirilen Pearson korelasyon analizine göre ortaya konmuştur. Korelasyon matrisleri, bitkisel makro ve mikro besin elementleri ile agronomik performans göstergeleri arasında çok sayıda güçlü ve anlamlı ilişki bulunduğunu göstermektedir (Şekil 4.29 ve Şekil 4.30).

Her iki dönemde de en yüksek korelasyonlardan biri, yaprak Mg düzeyi ile meyve sayısı arasında gözlenmiştir. Sonbahar döneminde bu iki parametre arasındaki Pearson korelasyon katsayısı $r = 0.85$, İlkbahar döneminde ise $r = 0.91$ olarak belirlenmiştir. Bu durum, Mg elementinin hücre bölünmesi ve fotosentez etkinliği üzerindeki etkilerinin generatif gelişim üzerinde doğrudan yansıma bulunduğunu göstermektedir. Benzer şekilde, yaprak Ca düzeyi ile meyve sayısı arasındaki ilişki sonbaharda $r = 0.77$, İlkbahar'da $r = 0.84$ olarak bulunmuş ve Ca elementinin özellikle meyve oluşumu ve yapısal bütünlük üzerindeki işlevini destekler nitelikte sonuçlar elde edilmiştir.

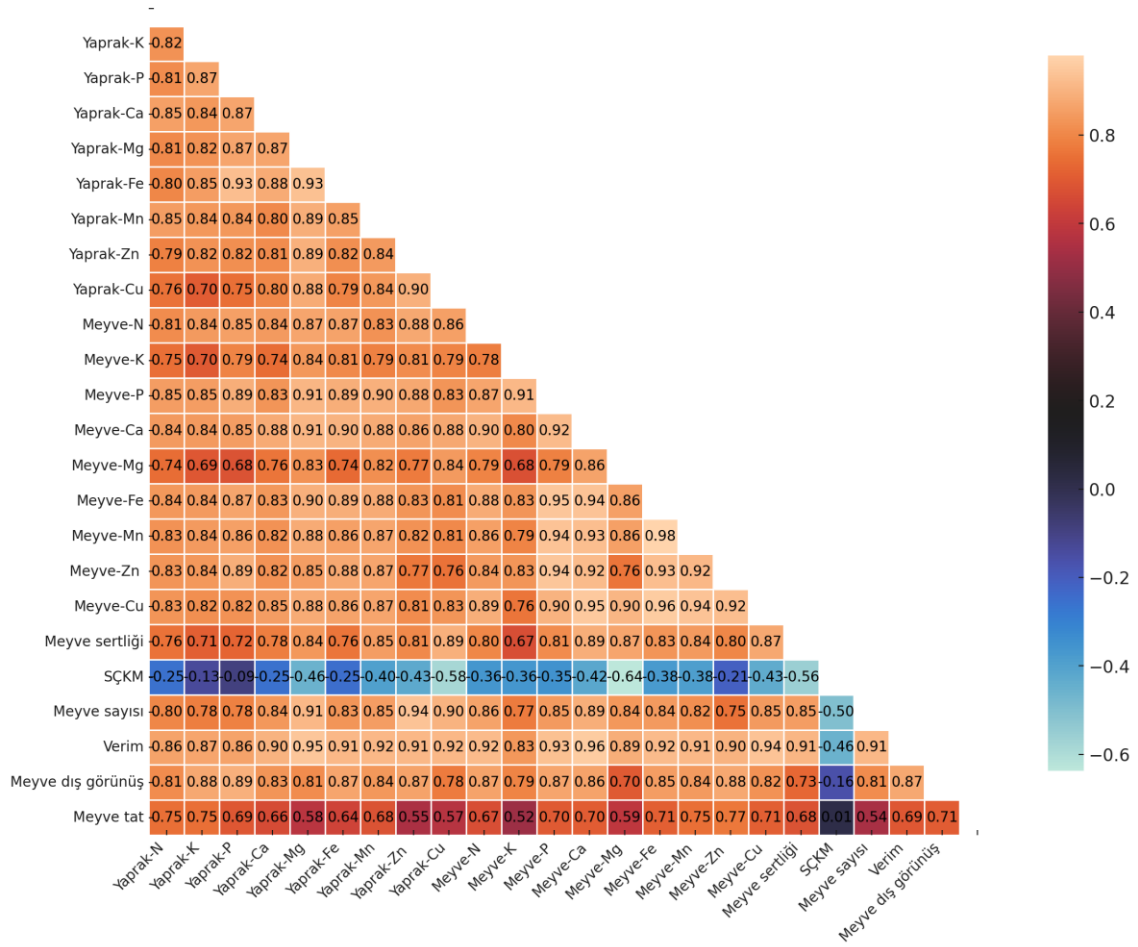
Yaprakta biriken N, P ve K düzeyleri, meyve besin içerikleriyle de güçlü pozitif korelasyonlar göstermiştir. Yaprak N ile meyve N korelasyonu sonbaharda $r = 0.82$, İlkbahar'da ise $r = 0.81$ olarak kaydedilmiştir. Yaprak P ile meyve P arasındaki ilişki İlkbahar döneminde özellikle dikkat çekici olup $r = 0.89$ düzeyindedir. Bu bulgular, yaprakta biriken mobil besin elementlerinin, büyüme döneminde meyveye efektif taşındığını ve dokular arasında besin transportunun etkin olduğunu göstermektedir.

Mikro besin elementleri açısından da anlamlı ilişkiler ortaya konmuştur. Yaprak Fe içeriği ile meyve Fe arasında sonbaharda $r = 0.88$, ilkbaharda $r = 0.89$ düzeyinde yüksek korelasyonlar tespit edilmiştir. Yaprak Zn ve Cu düzeyleriyle meyve Zn ve Cu içerikleri arasında da anlamlı korelasyonlar belirlenmiştir; örneğin yaprak Cu ile meyve Cu arasında ilkbaharda $r = 0.83$ düzeyinde ilişki saptanmıştır. Bu durum, mikro elementlerin yapraktan meyveye taşınım etkinliğinin yüksek olduğunu ve özellikle meyve mineral kalitesinin yapraktaki içerikle öngörülebileceğini göstermektedir.

Tat, dış görünüş ve SÇKM gibi duyu kalite parametreleri ile yaprak besin içerikleri arasındaki korelasyonlar ise daha zayıf düzeyde bulunmuştur. Özellikle yaprak Mg ile SÇKM arasında negatif yönlü korelasyonlar saptanmıştır (sonbahar: $r = -0.43$; ilkbahar: $r = -0.46$). Özellikle yaprak Ca, meyve sertliği ile her iki dönemde de anlamlı düzeyde pozitif korelasyon göstermiştir. Sonbahar döneminde $r = 0.79$, ilkbahar döneminde ise $r = 0.78$ olarak kaydedilen bu korelasyonlar, Ca'nın hücre duvarlarının stabilizasyonundaki rolünü destekler niteliktedir.



Şekil 4.29. Sonbahar dönemi yaprak besin elementleri ve meyve özellikleri arasındaki pearson korelasyonları



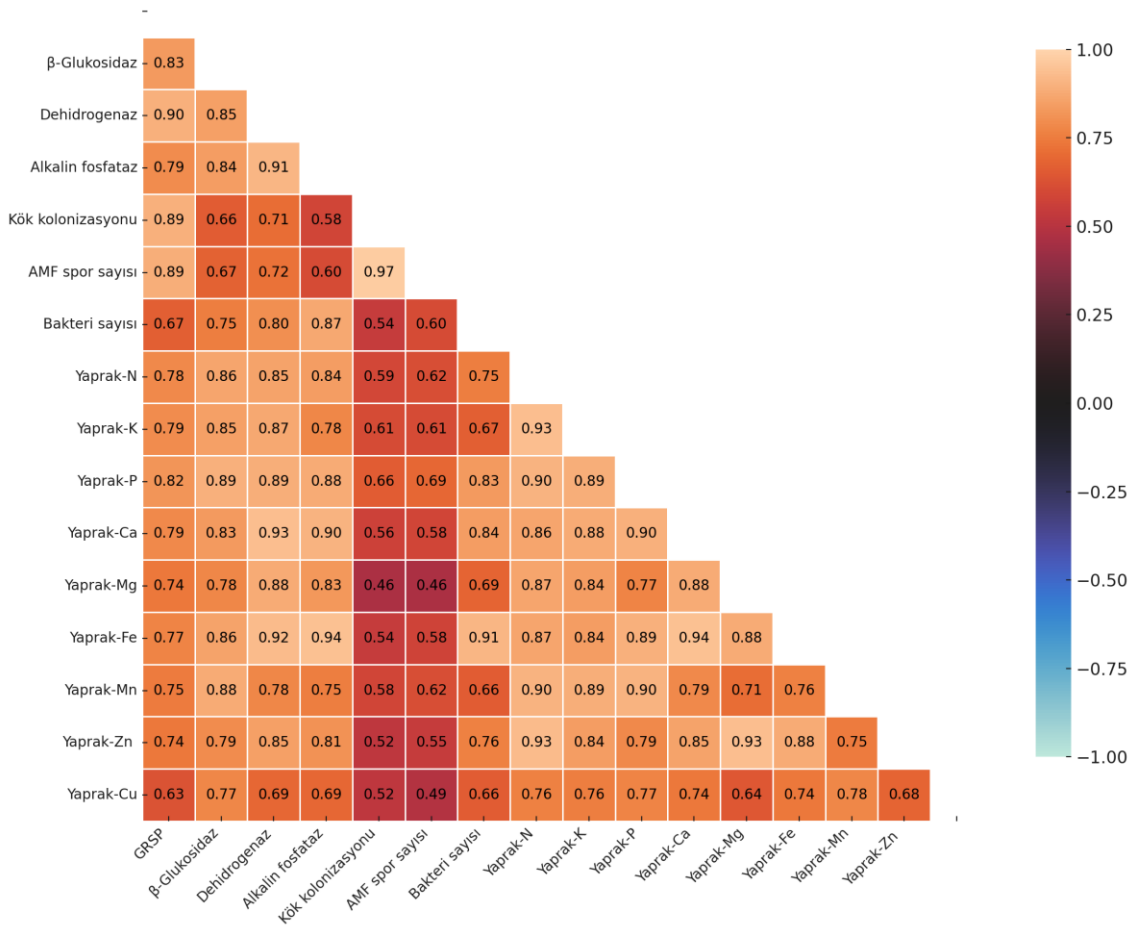
Şekil 4.30. İlkbahar dönemi yaprak besin elementleri ve meyve özellikleri arasındaki pearson korelasyonları

Toprak enzimleri ve yaprak besin elementi

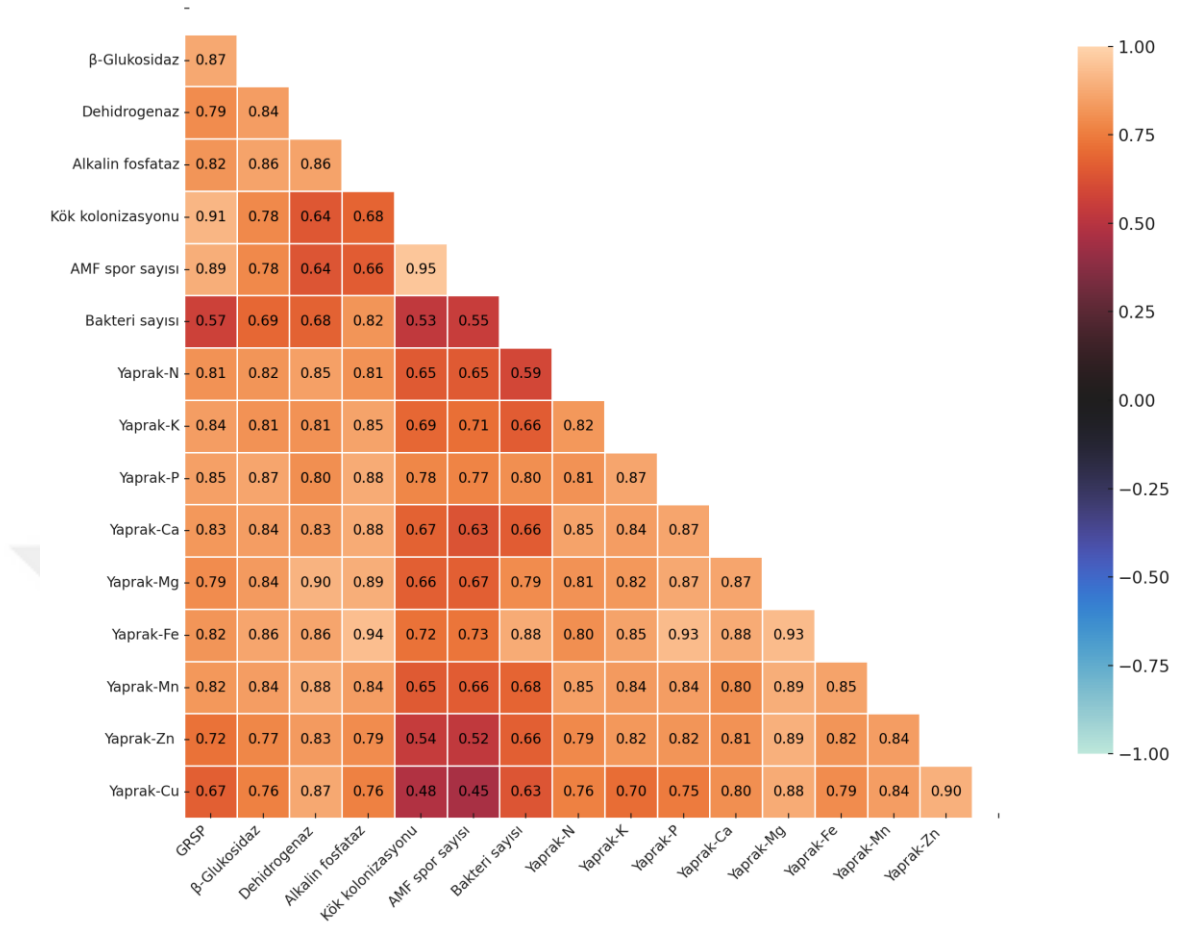
Sonbahar ve ilkbahar dönemlerine ait veriler birlikte değerlendirilerek yapılan korelasyon analizleri, toprak biyolojik aktivite göstergeleri ile yaprak besin içerikleri arasında güçlü ve anlamlı ilişkilerin bulunduğunu ortaya koymuştur (Şekil 4.31 ve Şekil 4.32). Özellikle GRSP düzeyi ile yaprak makro besin elementleri arasında anlamlı pozitif korelasyonlar tespit edilmiştir. Sonbahar döneminde GRSP ile yaprak P ($r = 0.82$) ve yaprak K ($r = 0.79$) içerikleri arasında yüksek korelasyonlar belirlenmiş; ilkbahar döneminde bu korelasyon değerleri sırasıyla $r = 0.85$ ve $r = 0.84$ olarak saptanmıştır. Bu bulgu, glomalin birikiminin bitkisel besin taşınımına katkı sağladığını göstermektedir. Toprak dehidrogenaz aktivitesi ile yaprak besin düzeyleri arasında daha yüksek korelasyonlar göze çarpmaktadır. Yaprak Ca içeriği ile dehidrogenaz arasında sonbaharda $r = 0.93$, ilkbaharda $r = 0.83$ düzeyinde pozitif korelasyonlar bulunmuştur. Aynı şekilde yaprak Mg ile dehidrogenaz korelasyonu her iki dönemde de oldukça yüksektir ($r = 0.88$ ve 0.90). Yaprak Fe içeriği ile olan korelasyonlar da dikkat çekicidir ($r = 0.92$ sonbahar, 0.87 ilkbahar). Bu durum, dehidrogenaz aktivitesinin toprakta mikrobiyal solunum ve mineralizasyon süreçlerini yansıtarak, bitkinin mikro besin alımını desteklediğini göstermektedir. Alkalın fosfataz aktivitesi de benzer şekilde yaprak P ($r = 0.88$ sonbahar

ve ilkbahar), Ca ($r = 0.90, 0.89$) ve Fe ($r = 0.94$ sonbahar ve ilkbahar) içerikleri ile güçlü pozitif korelasyon göstermiştir. Bu korelasyonlar, fosfor mineralizasyonunun ve fosfataz etkisinin bitki beslenmesi açısından belirleyici bir rol oynadığını ortaya koymaktadır.

Mikorizal parametrelerden kök kolonizasyonu ve AMF spor sayısı tüm yaprak besin elementleriyle pozitif korelasyonlar göstermiştir. Örneğin, AMF spor sayısı ile yaprak P içeriği arasındaki korelasyon sonbaharda $r = 0.69$, ilkbaharda $r = 0.77$ olarak ölçülmüştür. Kök kolonizasyonu ile yaprak Fe korelasyonu ise sonbaharda $r = 0.54$, ilkbaharda $r = 0.72$ düzeyindedir. Bu veriler, mikorizal varlığın mikro besin elementlerinin taşınımında etkili olduğunu göstermektedir. Toprak bakteri sayısı da yaprak P ($r = 0.83, 0.80$) ve Fe ($r = 0.91, 0.88$) içerikleri ile güçlü korelasyonlar göstermiştir.



Şekil 4.31. Sonbahar dönemi toprak biyolojik özellikleri ve yaprak besin elementleri arasındaki pearson korelasyonları



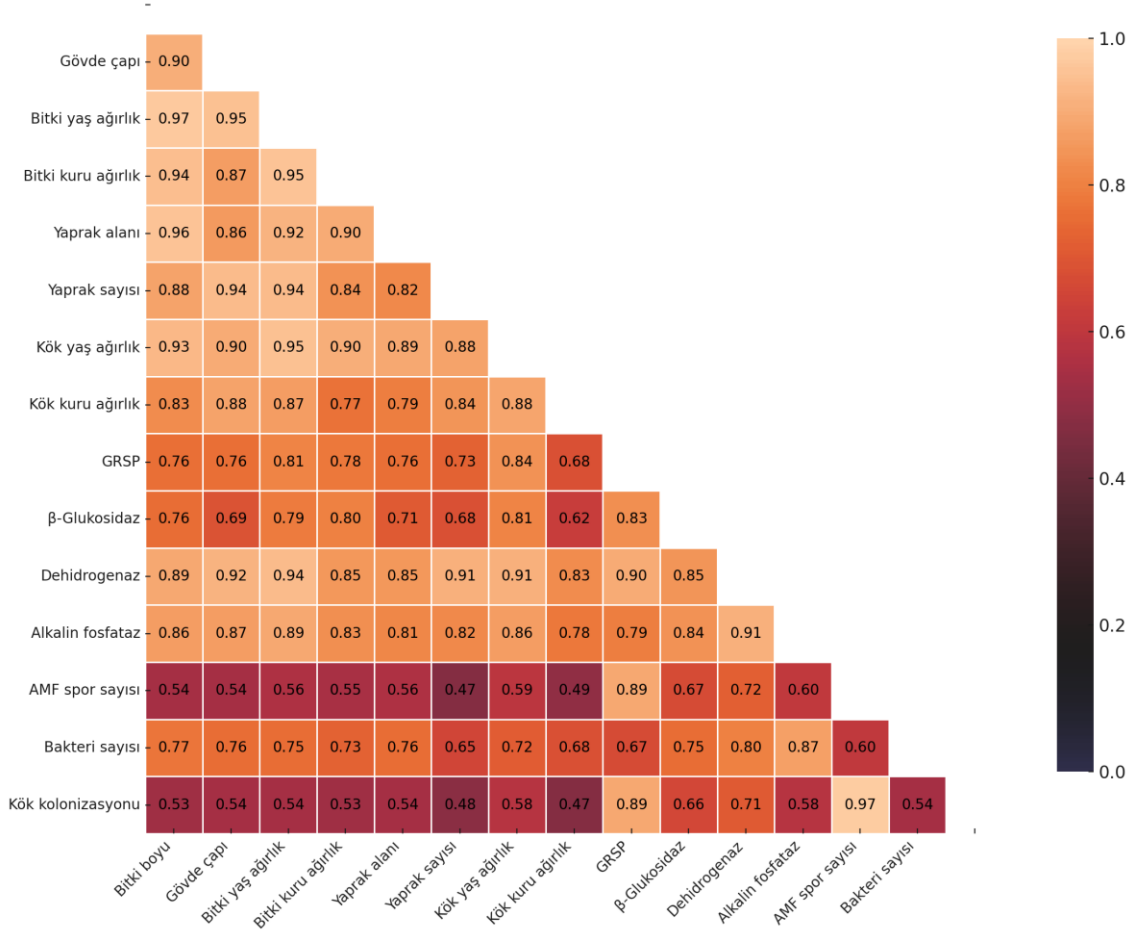
Şekil 4.32. İlkbahar dönemi toprak biyolojik özellikleri ve yaprak besin elementleri arasındaki pearson korelasyonları

Bitki gelişimi ve toprak özellikleri

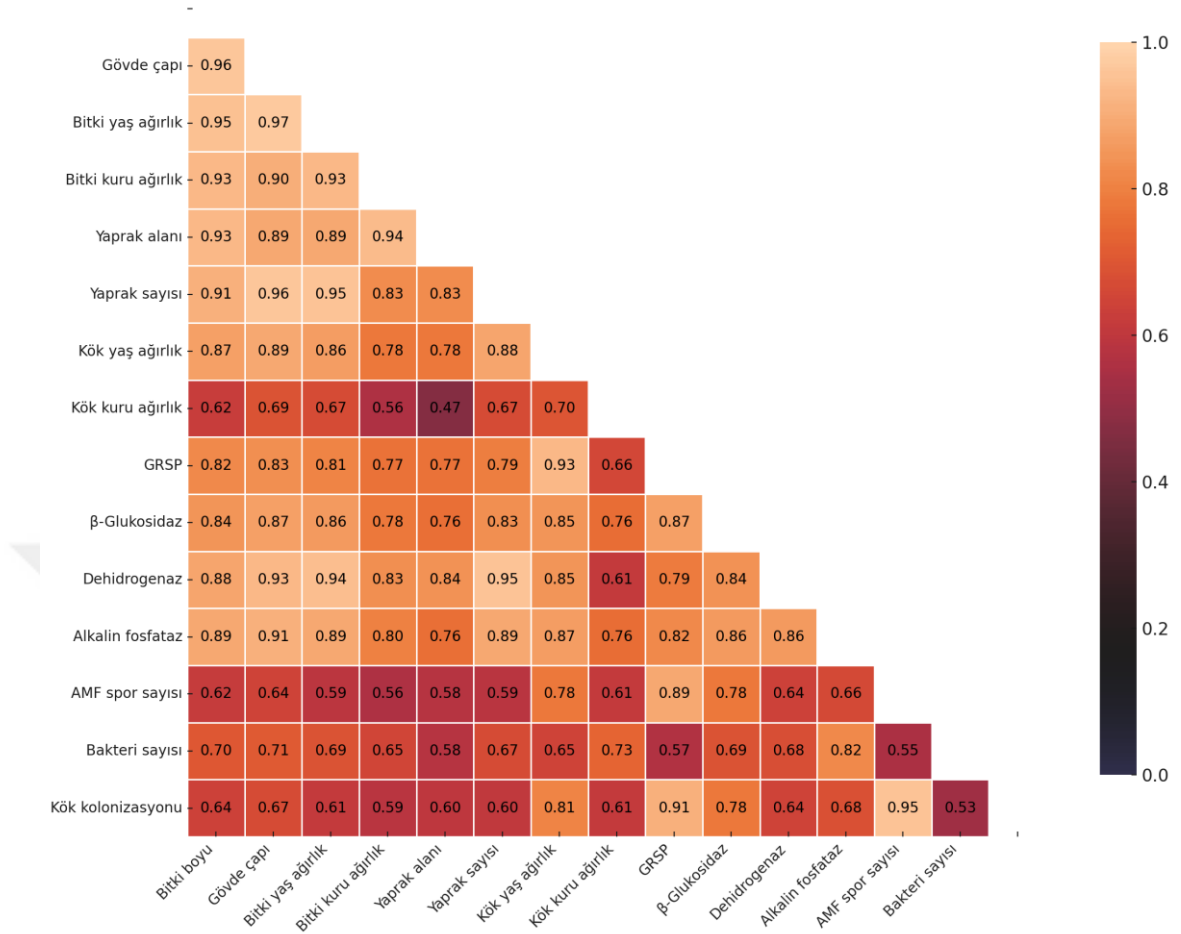
Sonbahar ve ilkbahar dönemlerine ait veriler bir arada ele alındığında, toprak biyolojik aktivite parametreleri ile bitki büyüme göstergeleri arasında güçlü ve tutarlı pozitif korelasyonlar gözlenmiştir. Bu bulgular, mikrobiyal aktivitelerin bitkisel morfolojik gelişimi doğrudan etkilediğini ortaya koymaktadır (Şekil 4.33 ve Şekil 4. 34).

Topraktaki GRSP ile bitki boyu ($r = 0.76$ sonbahar, 0.82 ilkbahar), gövde çapı ($r = 0.76, 0.83$) ve kök yaş ağırlığı ($r = 0.84, 0.93$) gibi parametreler arasında belirgin pozitif korelasyonlar saptanmıştır. Bu, GRSP'nin kök morfolojisini destekleyerek bitkinin genel gelişimini olumlu yönde etkilediğini göstermektedir. Dehidrogenaz enzimi ise tüm morfolojik göstergelerle çok yüksek düzeyde korelasyon göstermiştir. Bitki yaş ağırlığı ile korelasyon katsayısı sonbaharda $r = 0.94$, ilkbaharda $r = 0.94$ olarak hesaplanmıştır. Yaprak sayısı ile dehidrogenaz arasındaki korelasyonlar da dikkat çekici olup, sırasıyla $r = 0.91$ ve 0.95 düzeyindedir. Alkalın fosfataz aktivitesi de gövde çapı ($r = 0.87, 0.91$) ve kök yaş ağırlığı ($r = 0.86, 0.87$) gibi yapısal göstergelerle yüksek korelasyonlar sergilemiştir. Kök kolonizasyonu ve AMF spor sayısı gibi mikorizal göstergeler, özellikle kök yaş ağırlığı ile anlamlı korelasyonlar göstermiştir (kök kolonizasyonu: $r = 0.58, 0.81$;

AMF spor sayısı: $r = 0.59, 0.78$). Bu sonuçlar, AMF'nin özellikle kök biyokütlesi üzerine etkili olduğunu ve kök gelişiminin mikorizal başarıyla doğrudan ilişkili olabileceğini ortaya koymaktadır. Toprak bakteri sayısı ise gövde çapı ($r = 0.76, 0.71$) ve kök kuru ağırlığı ($r = 0.68, 0.73$) ile istikrarlı şekilde pozitif korelasyon göstermiştir. Bu bulgular, rizosfer bakterilerinin salgıladığı fitohormonlar ve enzimlerin, bitki gelişimini doğrudan desteklediğini göstermektedir.



Şekil 4.33. Sonbahar dönemi bitki gelişimi ve toprak biyolojik özellikleri arasındaki pearson korelasyonları



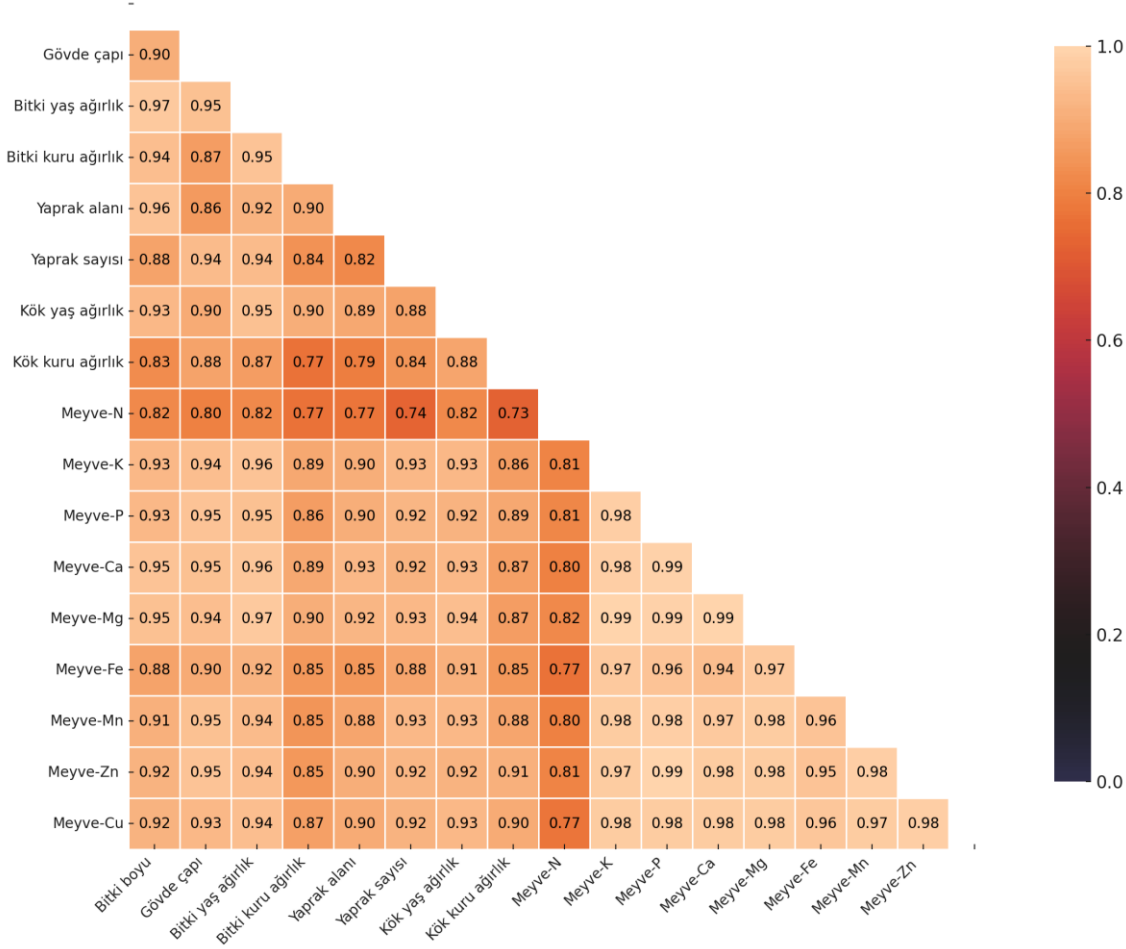
Şekil 4.34. İlkbahar dönemi bitki gelişimi ve toprak biyolojik özellikleri arasındaki pearson korelasyonları

Bitki gelişimi ve meyve mineral maddesi

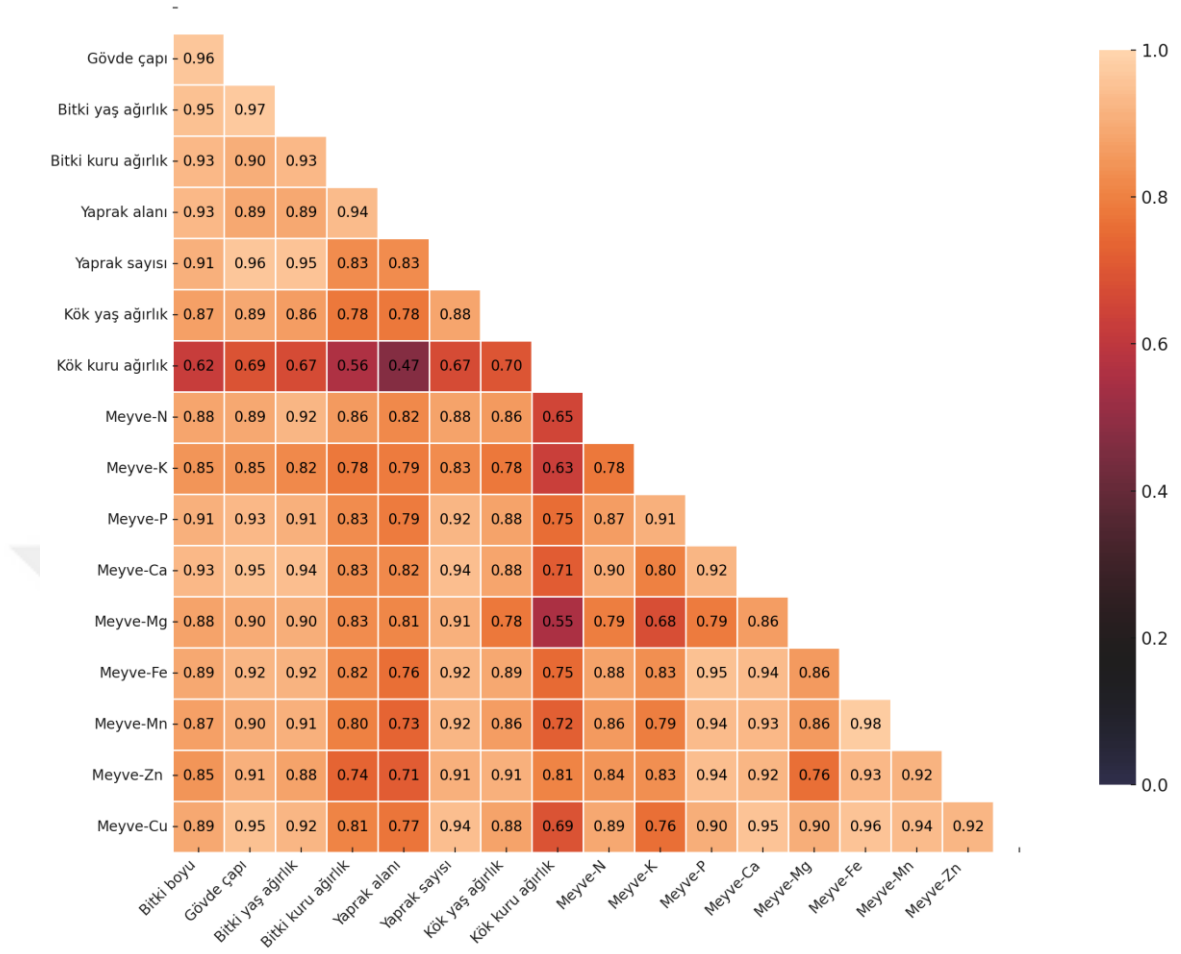
İlkbahar ve sonbahar dönemlerine ait veriler birlikte değerlendirildiğinde, bitki gelişim düzeyiyle meyve besin element birikimi arasında genel olarak güçlü ve pozitif korelasyonlar saptanmıştır. Bu bulgular, morfolojik büyümenin meyve kalitesi üzerinde belirleyici bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir (Şekil 4. 35 ve Şekil 4. 36).

Özellikle bitki yaş ağırlığı ile meyve Ca ($r = 0.96$ sonbahar, 0.94 ilkbahar), Mg ($r = 0.97$, 0.90) ve Fe ($r = 0.92$, 0.92) içerikleri arasında çok yüksek düzeyde pozitif korelasyonlar tespit edilmiştir. Bu durum, yaş biyokütlesi artan bitkilerde su ve besin taşınımının etkinleştiğini ve bu sayede meyvede daha fazla element birikimi sağlandığını göstermektedir. Benzer şekilde, gövde çapı ile meyve P ($r = 0.95$, 0.93) ve Cu ($r = 0.93$, 0.95) düzeyleri arasında da çok güçlü korelasyonlar bulunmuştur. Bitki boyu parametresi de neredeyse tüm meyve besin elementleriyle güçlü ilişkilere sahiptir. Özellikle meyve P ($r = 0.93$ sonbahar, 0.91 ilkbahar), Ca ($r = 0.95$, 0.93) ve Mn ($r = 0.91$, 0.87) gibi elementlerle pozitif korelasyonlar dikkat çekicidir. Yaprak sayısı ve yaprak alanı gibi vejetatif yüzey göstergeleri de meyve besin içerikleriyle yüksek korelasyonlar göstermiştir. Yaprak sayısı ile meyve Mn ($r = 0.93$, 0.92) ve Cu ($r = 0.92$,

0.94) korelasyonları, fotosentetik kapasitenin meyve besin kalitesi üzerindeki rolünü desteklemektedir. Yaprak alanı ise Mg ve Ca gibi hareketli elementlerin meyvedeki birikimiyle oldukça yüksek ilişkilere sahiptir (örneğin Mg: $r = 0.92, 0.81$). Kök yaş ağırlığı, özellikle meyve K ($r = 0.93, 0.78$) ve Fe ($0.92, 0.89$) içerikleriyle güçlü korelasyonlar göstermiştir. Diğer yandan kök kuru ağırlığı ile de pozitif ve anlamlı ilişkiler gözlenmiştir (örneğin, Cu: $r = 0.90, 0.69$).



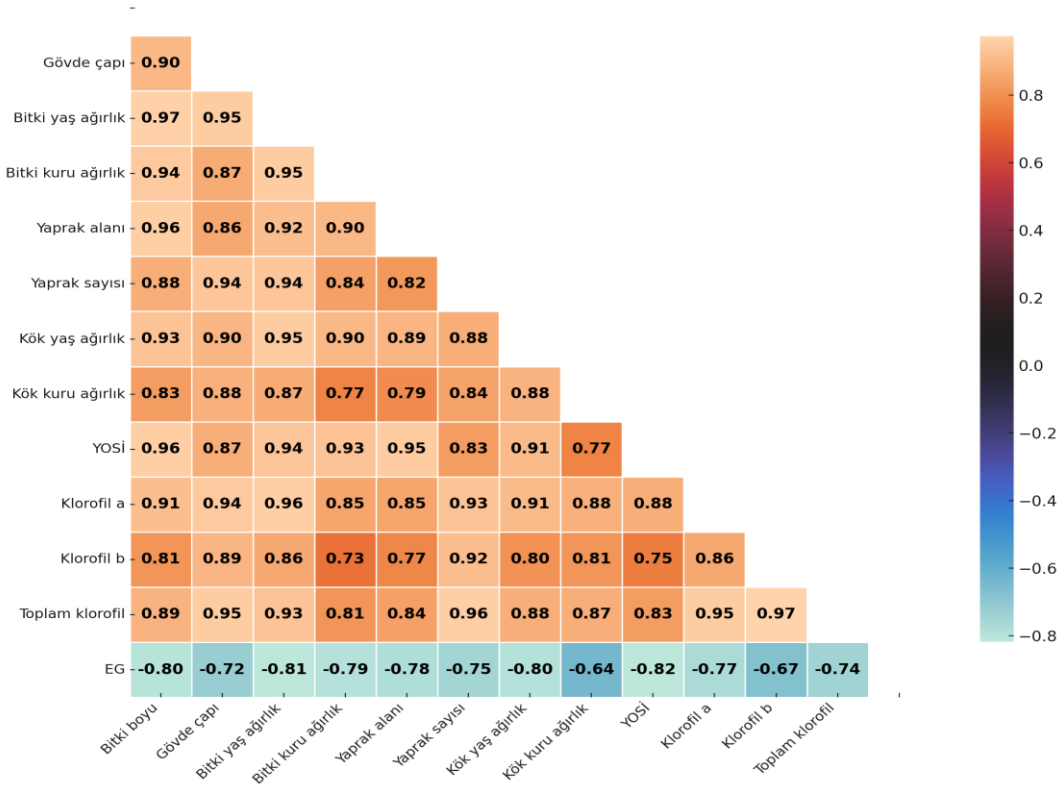
Şekil 4.35. Sonbahar döneminde bitki gelişimi ve meyve mineral madde arasındaki pearson korelasyonları



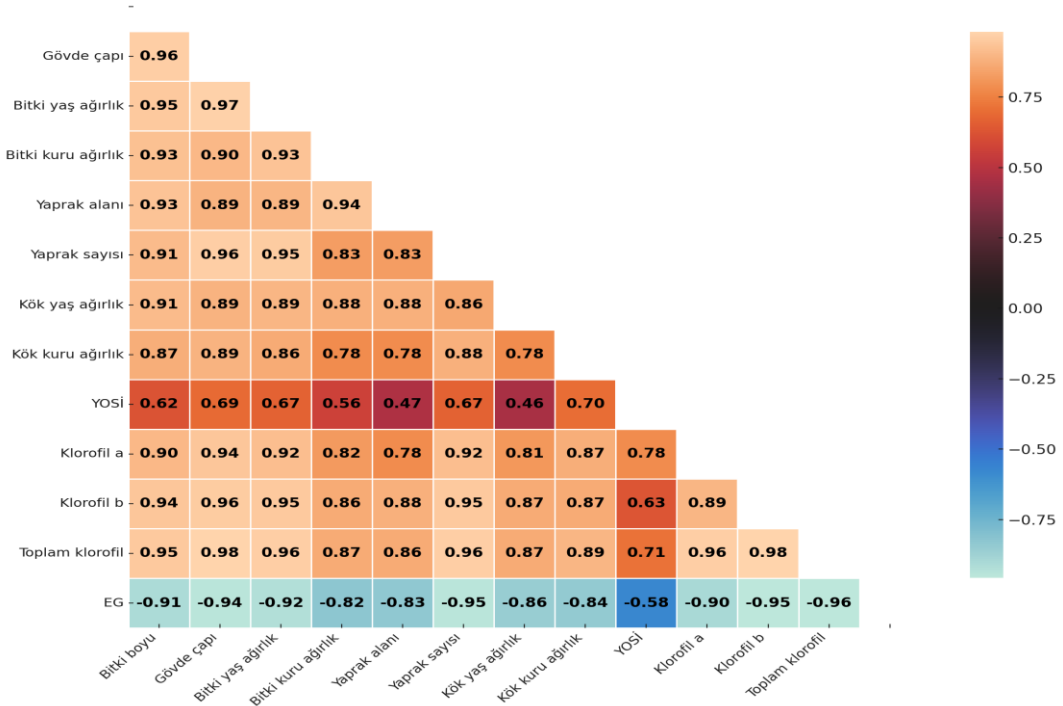
Şekil 4.36. İlkbahar döneminde bitki gelişimi ve meyve mineral madde arasındaki pearson korelasyonları

Bitki gelişimi ve fizyolojik özellikler

Bitki yaş ağırlığı ile toplam klorofil düzeyi arasında oldukça yüksek pozitif korelasyon katsayıları gözlenmiştir ($r = 0.93$ sonbahar, $r = 0.96$ ilkbahar). Benzer şekilde, yaprak alanı ile klorofil a düzeyi arasında $r = 0.85$ (sonbahar) ve $r = 0.78$ (ilkbahar); yaprak alanı ile klorofil b arasında ise $r = 0.77$ (sonbahar) ve $r = 0.88$ (ilkbahar) düzeyinde anlamlı pozitif ilişkiler saptanmıştır. Bu bulgular, fotosentetik kapasitenin bitki gelişimi üzerindeki belirleyici etkisini açıkça ortaya koymaktadır (Şekil 4.37 ve Şekil 4.38). YOSİ ile gövde çapı arasında sonbaharda $r = 0.87$, ilkbaharda ise $r = 0.69$ düzeyinde korelasyonlar tespit edilmiş; kök yaş ağırlığı ile YOSİ arasındaki korelasyon ise sırasıyla $r = 0.91$ ve $r = 0.46$ olarak bulunmuştur. Bu veriler, su tutma kapasitesinin hem yapısal büyüme hem de doku kalitesi ile ilişkili olduğunu göstermektedir. Öte yandan, EG ile birçok morfolojik parametre arasında negatif korelasyonlar tespit edilmiştir. Örneğin, bitki boyu ile EG arasında $r = -0.80$ (sonbahar) ve $r = -0.91$ (ilkbahar); bitki kuru ağırlığı ile EG arasında ise $r = -0.79$ (sonbahar) ve $r = -0.82$ (ilkbahar) düzeyinde güçlü ters yönlü ilişkiler saptanmıştır.



Şekil 4.37. Sonbahar döneminde bitki gelişimi ve fizyolojik özellikler arasındaki pearson korelasyonları



Şekil 4.38. İlkbahar döneminde bitki gelişimi ve fizyolojik özellikler arasındaki pearson korelasyonları

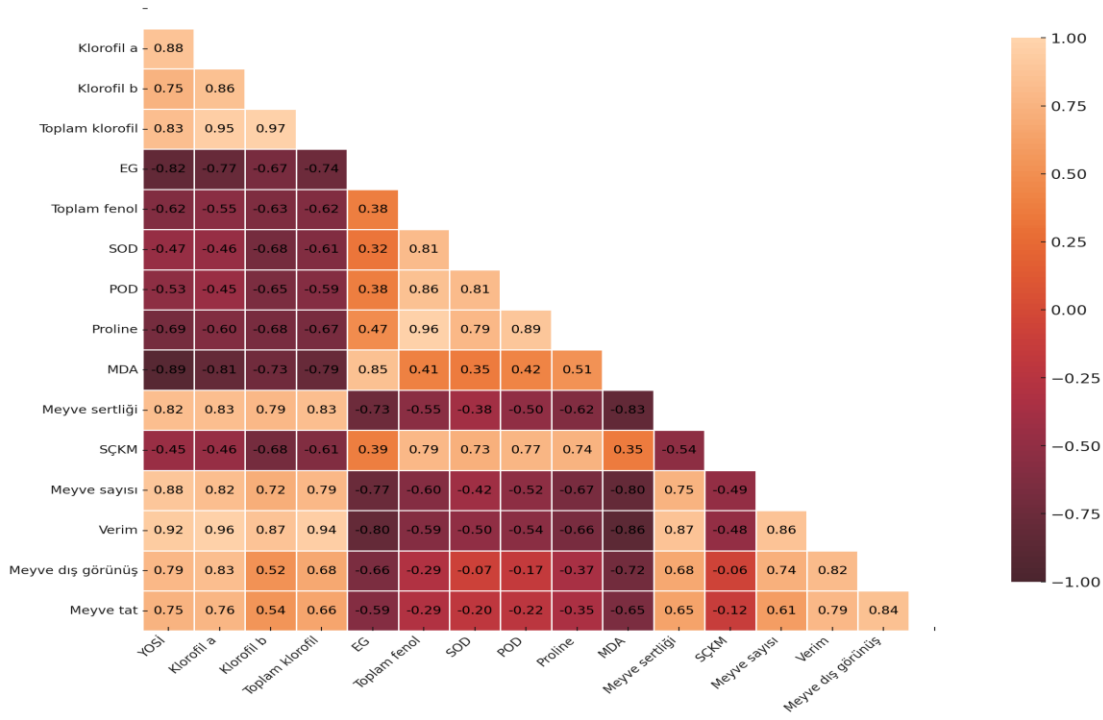
Bitki fizyolojik ve biyokimyasal özellikler ve meyve özellikleri

Her iki dönemde elde edilen verilerin Pearson korelasyon analizine göre, fizyolojik ve biyokimyasal özellikler ile meyve kalite parametreleri arasında çeşitli düzeylerde anlamlı ilişkiler belirlenmiştir. Genel olarak hem sonbahar hem de ilkbahar dönemlerinde, toplam klorofil, SOD, prolin, EG ve MDA gibi stres göstergeleri ile verim, meyve sertliği, meyve tat ve dış görünüş gibi kalite parametreleri arasında güçlü korelasyonlar tespit edilmiştir (Şekil 4.39 ve Şekil 4.40).

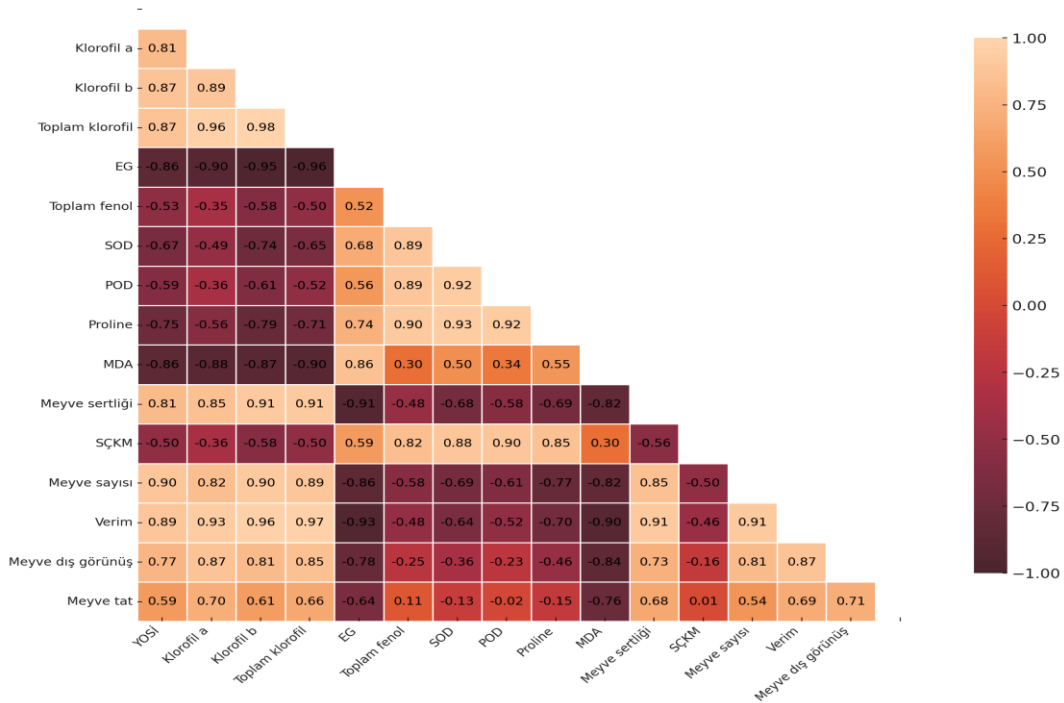
Her iki dönemde de YOSİ, klorofil içeriği ile pozitif ve anlamlı düzeyde korelasyon göstermiştir. Özellikle toplam klorofil ile YOSİ arasında sonbaharda $r=0.83$, ilkbaharda ise $r=0.87$ düzeyinde yüksek pozitif korelasyon tespit edilmiştir. Bu durum, yapraktaki su içeriği yüksek olan bitkilerin klorofil sentez kapasitesinin de yüksek olduğunu göstermektedir. Ayrıca klorofil a ve klorofil b arasında hem sonbahar ($r=0.86$) hem de ilkbahar ($r=0.89$) dönemlerinde güçlü pozitif ilişkiler saptanmış, bu da bu pigmentlerin fotosentetik kapasiteyi birlikte etkilediğini ortaya koymaktadır. Diğer yandan, YOSİ ile EG arasında her iki dönemde negatif korelasyon gözlenmiştir (sonbahar $r=-0.82$; ilkbahar $r=-0.86$). Bu sonuç, yapraklardaki su kaybının membran stabilitesini azalttığını ve hücre zarlarının geçirgenliğini artırdığını desteklemektedir. Benzer şekilde EG ile SOD, POD ve prolin gibi stresle ilişkili biyokimyasal parametreler arasında da pozitif korelasyonlar bulunmuştur; bu da membran hasarıyla birlikte oksidatif stres tepkilerinin arttığını göstermektedir.

SOD aktivitesi, her iki dönemde de MDA birikimiyle pozitif yönde korele bulunmuştur (sonbahar $r=0.35$; ilkbahar $r=0.50$). Bu bulgu, lipid peroksidasyonunun arttığı koşullarda bitkilerin savunma mekanizmaları olarak SOD enzim aktivitesini artırdığını göstermektedir. Ayrıca prolin birikimi ile SOD arasında da anlamlı pozitif korelasyonlar gözlenmiştir. İlkbaharda prolin-SOD korelasyonu $r=0.79$ iken, sonbaharda bu ilişki daha da kuvvetlenerek $r=0.93$ olmuştur. Bu, prolinin osmotik düzenleme ve antioksidan savunmada birlikte rol oynadığını göstermektedir.

Toplam klorofil içeriği ile meyve verimi arasında her iki dönemde de çok yüksek pozitif korelasyonlar tespit edilmiştir (sonbahar $r=0.94$; ilkbahar $r=0.97$). Benzer şekilde, klorofil a-b ve meyve sertliği arasında da anlamlı korelasyonlar saptanmıştır. Bu bulgular, klorofil düzeyinin yalnızca verim değil, aynı zamanda kalite kriterlerini de etkilediğini göstermektedir. Buna karşın EG ile meyve verimi arasında negatif korelasyon gözlenmiştir (sonbahar $r=-0.80$; ilkbahar $r=-0.93$). Bu, stres altındaki bitkilerde zar hasarının artmasıyla birlikte verimin de azaldığını göstermektedir. Özellikle YOSİ ve verim arasında da her iki dönemde anlamlı pozitif ilişkiler bulunmuştur (sonbahar $r=0.92$; ilkbahar $r=0.89$), bu da yaprak su dengesinin korunmasının verim açısından belirleyici olduğunu vurgulamaktadır.



Şekil 4.39. Sonbahar döneminde bitki fizyolojik, biyokimyasal ve meyve parametreleri arasındaki pearson korelasyonları



Şekil 4.40. İlkbahar döneminde bitki fizyolojik, biyokimyasal ve meyve parametreleri arasındaki pearson korelasyonları

5. SONUÇLAR

Bu çalışmada, üç farklı sulama düzeyi (%100, %75 ve %50 ESTK) ve beş gübreleme uygulaması (kontrol, kimyasal gübre, PGPR, AMF ve PGPR+AMF kombinasyonu) hıyar bitkisinde morfolojik, fizyolojik, biyokimyasal, meyve kalite özellikleri ile toprak biyolojik aktiviteleri üzerindeki etkileri 2023 sonbahar ve 2024 ilkbahar dönemlerinde kapsamlı biçimde değerlendirilmiştir. Elde edilen bulgular, özellikle mikrobiyal gübre uygulamalarının bitki gelişimi, stres toleransı ve toprak sağlığı üzerinde çok yönlü katkılar sağladığını ortaya koymuştur.

Morfolojik özellikler açısından, tüm uygulamalar içinde mikrobiyal gübreleme stratejilerinin bitki boyu, gövde çapı, yaprak sayısı, yaprak alanı ve yaş/kuru bitki ağırlıkları gibi büyüme parametrelerini anlamlı şekilde iyileştirdiği gözlenmiştir. Su kısıtının şiddeti arttıkça ölçülen parametrelerde genel bir azalma eğilimi görülmüş; ancak özellikle AMF ve PGPR uygulamaları, bu düşüşü büyük ölçüde sınırlandırmıştır. Tekli mikrobiyal uygulamalar olan AMF ve PGPR, hem tam sulama hem de orta düzey su kısıtı koşullarında kimyasal gübreleme ile benzer ya da daha yüksek performans sağlamış, birleşik uygulama ise çoğu durumda en yüksek değerleri üretmiştir. Bu durum, mikroorganizmaların bitki büyümesini hem destekleyici hem de koruyucu bir mekanizmaya sahip olduğunu göstermektedir.

Fizyolojik göstergeler olan yaprak oransal su içeriği (YOSİ), klorofil a, b ve toplam klorofil içeriği ile membran zar stabilitesi indeksi (MSİ), su kısıtı ile birlikte olumsuz etkilenmiş, ancak mikrobiyal gübre uygulamaları koşullarında olumsuz etkiler önemli ölçüde hafifletilmiştir. Özellikle AMF uygulamasının pigment düzeylerini ve yaprak su içeriğini koruma konusunda dikkat çekici bir etkisi gözlenmiş; PGPR uygulamaları da membran stabilitesi üzerinde olumlu bir etki yaratmıştır. Kombinasyon uygulaması (AMF ve PGPR ikilinin birlikte uygulamaları) sinerjisi bitkinin fizyolojik direnç mekanizmalarını daha güçlü biçimde aktive ettiği görülmektedir.

Biyokimyasal parametreler olarak değerlendirilen MDA, SOD, POD, prolin ve toplam fenol içerikleri, su stresine karşı bitkinin savunma kapasitesini aktive ettiği gözlenmiş; mikrobiyal gübre uygulamaları bu savunma yanıtlarını anlamlı biçimde güçlendirmiştir. AMF ve PGPR uygulamaları, oksidatif stres göstergesi olan MDA birikimini azaltırken; antioksidan enzim aktivitelerini (SOD, POD) ve osmoregülasyonla ilişkili prolin düzeylerini artırmıştır. Ayrıca, fenolik savunma yanıtı da özellikle orta ve düşük sulama koşullarında tüm mikrobiyal uygulamalarda belirgin şekilde aktive olmuştur.

Meyve verimi ve kalite parametreleri, mikrobiyal gübre uygulamalarıyla anlamlı düzeyde yükselmiştir. Hem tekli hem de kombine mikrobiyal uygulamalar meyve sayısını ve toplam verimi artırırken, kimyasal gübre ile benzer veya daha iyi sonuçlar sağlamıştır. Ayrıca meyve rengi, sertlik, tat ve dış görünüş gibi kalite göstergelerinde mikrobiyal gübreleme uygulamaları olumlu sonuçlar vermiştir. Bu uygulamalar aynı zamanda meyvede hem makro (N, P, K, Ca, Mg) hem de mikro (Fe, Mn, Zn, Cu) element içeriklerini artırarak besin kalitesini iyileştirmiştir. Özellikle P ve Zn içerikleri, AMF içeren uygulamalarda belirgin şekilde yüksek ölçülmüştür.

Toprak mikrobiyal göstergeleri olan kök kolonizasyon oranı, AMF spor sayısı ve bakteri sayılarının rizosferdeki fonksiyonları ile mikrobiyal gübre uygulamalarının başarılı bir şekilde bitki gelişimine geliştirici etki yaptığını göstermiştir. Kombinasyon uygulamaları bu parametrelerde en yüksek düzeyleri sağlarken, mikrobiyal gübrelerin tekli uygulamaları da kontrol ve kimyasal gübreleme gruplarına kıyasla toprak biyolojik canlılığını önemli ölçüde artırmıştır. Bu sonuçlar, mikrobiyal inokulantların toprak mikrobiyel popülasyonlarını teşvik edici etkisini doğrulamaktadır.

Toprak enzim aktiviteleri olarak GRSP, dehidrogenaz, alkalın fosfataz ve β -glukosidaz düzeyleri, hem AMF hem de PGPR uygulamalarıyla birlikte anlamlı şekilde yükselmiştir. GRSP artışı toprak yapısının iyileştirilmesine katkı sunarken; diğer enzimler toprakta mikrobiyal aktivitenin ve besin madde dönüşüm potansiyelinin arttığını göstermektedir. Bu enzimatik yükselmeler, toprak biyolojik kalitesinin mikrobiyal gübrelemeden doğrudan olumlu etkilendiğini ortaya koymasla sürdürülebilir tarım ve gıda güvencesi açısından etkili bir biyoteknolojik araç olduğunu ortaya koymaktadır.

Genel olarak değerlendirildiğinde, mikrobiyal gübre uygulamaları özellikle AMF ve PGPR'nin tekli ya da birlikte kullanımı hıyar bitkisinde su kısıtı koşullarında büyüme parametrelerinin korunmasında, fizyolojik ve biyokimyasal stres tepkilerinin dengelenmesinde, meyve kalitesinin artırılmasında ve toprak biyolojik aktivitesinin iyileştirilmesinde güçlü ve tutarlı etkiler sergilemiştir. Özellikle kombine uygulama, çoklu fayda sağlayarak hem bitki hem de toprak sistemlerinde daha kararlı bir yanıt oluşturmuştur. Bununla birlikte, tekli uygulamalar da çoğu parametrede yüksek performans sağlamış; bu da mikrobiyal gübrelemenin yalnızca tamamlayıcı değil, yer yer ikame edici potansiyele de sahip olduğunu göstermektedir.

Araştırma bulguları, mikrobiyal gübre uygulamalarının hıyar bitkisinde morfolojik, fizyolojik, biyokimyasal ve mikrobiyolojik parametreler üzerindeki olumlu etkileri görülmesine karşın, farklı mikrobiyal suşların karşılaştırmalı etkileri, mikrobiyom dinamikleri ve toprak-mikrop-bitki etkileşimlerinin moleküler düzeyde incelenmesi, mikrobiyal gübrelemenin işleyiş mekanizmalarının daha iyi anlaşılmasına katkı sağlayacaktır. İleriye yönelik olarak gübre uygulama stratejisinin yalnızca sera koşullarında değil farklı toprak tiplerinde, açık tarla koşullarında ve farklı bitki çeşitlerinde test edilmesi; uygulamaların genellenebilirliği ve bölgesel adaptasyonu açısından önem arz etmektedir. Gelecek çalışmalarda, mikrobiyal gübrelerin düşük doz kimyasal gübrelerle birlikte kullanıldığı entegre stratejilerin verimlilik, ekonomik geri dönüş ve çevresel sürdürülebilirlik açısından değerlendirilmesi de faydalı olacaktır.

6. KAYNAKLAR

- Abbaspour, H., Saeidi-Sar, S., Afshari, H., Abdel-Wahhab, M. A. 2012. Tolerance of Mycorrhiza infected Pistachio (*Pistacia vera* L.) seedling to drought stress under glasshouse conditions. *Plant Physiology*, 169, 704-709.
- AbdElgawad, H., Zinta, G., Hegab, M.M., Pandey, R., Asard, H., Abuelsoud, W. 2016. High salinity induces different oxidative stress and antioxidant responses in maize seedlings organs. *Frontiers in Plant Science* 7, 276. doi:10.3389/fpls.2016.00276
- Abdelmoneim, T.S., Tarek, A., Moussa, A., Almaghrabi, O., Hassan, A., Alzahrani, S., Abdelbagi, I. 2014. Increasing plant tolerance to drought stress by inoculation with arbuscular mycorrhizal fungi. *Life Sci J.*, 1(1): 10-17.
- Adesemoye, A. O. and J. W. Kloepper 2009. "Plant–microbes interactions in enhanced fertilizer-use efficiency." *Applied Microbiology and Biotechnology* 85(1): 1-12.
- Adesemoye, A., Torbert, H., & Kloepper, J. 2010. Increased plant uptake of nitrogen from 15N-depleted fertilizer using plant growth-promoting rhizobacteria. *Applied Soil Ecology*, 46(1), 54- 58.
- Agarwal, P., Singh, P. C., Chaudhry, V., Shirke, P. A., Chakrabarty, D., Farooqui, A., Nautiyal, C. S., Sane, A. P., & Sane, V. A. 2019. PGPR-induced OsASR6 improves plant growth and yield by altering root auxin sensitivity and the xylem structure in transgenic *Arabidopsis thaliana*. *Journal of plant physiology*, 240, 153010. <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2019.153010>
- Ahluwalia, J., Singh, P. C. ve Bhatia, R. 2021. A review on drought stress in plants: Implications, mitigation and the role of plant growth promoting rhizobacteria. *Resources, Environment and Sustainability*, 5, 100032.
- Ahmad, H. M., Fiaz, S., Hafeez, S., Zahra, S., Shah, A. N., Gul, B., Aziz, O., Mahmood-Ur-Rahman, Fakhar, A., Rafique, M., Chen, Y., Yang, S. H. ve Wang, X. 2022. Plant growth-promoting rhizobacteria eliminate the effect of drought stress in plants: A review. *Frontiers in Plant Science*, 13, 875774. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.875774>
- Ahmad, H., Hayat, S., Ali, M., Liu, T. ve Cheng, Z. 2018. The combination of arbuscular mycorrhizal fungi inoculation (*Glomus versiforme*) and 28-homobrassinolide spraying intervals improves growth by enhancing photosynthesis, nutrient absorption, and antioxidant system in cucumber (*Cucumis sativus* L.) under salinity. *Ecology and Evolution*, 8(11), 5724–5740.
- Ahmed, N., Zhang, L., Zhang, X., Luo, S., Shen, X., & Zhang, F. 2019. Role of arbuscular mycorrhizal fungi in plant growth regulation: implications in abiotic stress tolerance. *Frontiers in Plant Science*, 10, 1068. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.01068>
- Akiyama K, Matsuzaki KI, Hayashi H. 2005 Plant sesquiterpenes induce hyphal branching in arbuscular mycorrhizal fungi. *Nature* 435:824–827.
- Alguacil MM, Lumini E, Roldán A, Salinas-García JR, Bonfante P & Bianciotto V. 2008. The impact of tillage practices on arbuscular mycorrhizal fungal diversity in subtropical crops. *Ecological Applications* 18: 527–536.

- Ali, A., Ghani, M. I., Ding, H., Fan, Y., Cheng, Z., & Iqbal, M. 2019. Co-amended synergistic interactions between arbuscular mycorrhizal fungi and the organic substrate-induced cucumber yield and fruit quality associated with the regulation of the AM-fungal community structure under anthropogenic cultivated soil. *International Journal of Molecular Sciences*, 20(7), 1539.
- Ali, S., Khan, M., & Moon, Y.-S. 2025. Synergistic effect of *Serratia fonticola* and *Pseudomonas koreensis* on mitigating salt stress in *Cucumis sativus* L. *Current Issues in Molecular Biology*, 47(3), 194. <https://doi.org/10.3390/cimb47030194>
- Ali, A., Liu, X., Yang, W., Li, W., Chen, J., Qiao, Y., Gao, Z., & Yang, Z. 2024. Impact of bio-organic fertilizer incorporation on soil nutrients, enzymatic activity, and microbial community in wheat–maize rotation system. *Agronomy*, 14(1942).
- Aliasgharzad, N., Neyshabouri, M. R., & Salimi, G. 2006. Effects of arbuscular mycorrhizal fungi and *Bradyrhizobium japonicum* on drought stress of soybean. *Biologia*, 61(Suppl. 19), S324–S328. <https://doi.org/10.2478/s11756-006-0182-x>
- Alipour Kafi, S., Arabhosseini, S., Karimi, E., Koobaz, P., Mohammadi, A., & Sadeghi, A. (2021). *Pseudomonas putida* P3-57 induces cucumber (*Cucumis sativus* L.) defense responses and improves fruit quality characteristics under commercial greenhouse conditions. *Scientia Horticulturae*, 280, 109942.
- Allen MF. 2007. Mycorrhizal fungi: highways for water and nutrients in arid soils. *Vadose Zone Journal* 6: 291–297.
- Allen MF 1982 Influence of vesicular-arbuscular mycorrhizae on water movement through *Bouteloua gracilis* Lag ex steud. *New Phytol* 91:191–196
- Alomran, A. M., Louki, I. I., Aly, A. A., & Nadeem, M. E. 2013. Impact of deficit irrigation on soil salinity and cucumber yield under greenhouse condition in an arid environment. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 15, 1247–1259.
- Alori, E. T., Glick, B. R., & Babalola, O. O. 2017. Microbial phosphorus solubilization and its potential for use in sustainable agriculture. *Frontiers in Microbiology*, 8, 971.
- Al-Arjani, A. B. F., Hashem, A., & Abd_Allah, E. F. 2020. Arbuscular mycorrhizal fungi modulates dynamics tolerance expression to mitigate drought stress in *Ephedra foliata* Boiss. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 27(1), 380-394.
- Amaya-Gomez, C. V., Porcel, M., Mesa-Garrig, L., and Gomez-Alvarez, M. I. 2020. A framework for the selection of plant growth-promoting rhizobacteria based on bacterial competence mechanisms. *Appl. Environ. Microbiol.* 86, 1–13. doi:10.1128/AEM.00760-20.
- Amer, K. H., Midan, S. A., & Hatfield, J. L. 2009. Effect of deficit irrigation and fertilization on cucumber. *Agronomy Journal*, 101(6), 1556–1564.
- Amtmann, A., & Leigh, R. 2010. Ion homeostasis. In A. Pareek, S. K. Sopory, H. J. Bohnert, & Govindjee (Eds.), *Abiotic stress adaptation in plants: Physiological, molecular and genomic foundation* (pp. 245–259). Springer.
- Anandham, R., Janahiraman, V., Gandhi, P. I., Kwon, S. W., Chung, K. Y., Han, G. H., vd. 2014. Early plant growth promotion of maize by various sulfur oxidizing

- bacteria that uses different thiosulfate oxidation pathway. *African J. Microbiol. Res.* 8, 19–27. doi:10.5897/ajmr2013.5661.
- Anandham, R., Sridar, R., Nalayini, P., Poonguzhali, S., Madhaiyan, M., and sa, T. 2007. Potential for plant growth promotion in groundnut (*Arachis hypogaea* L.) cv. ALR-2 by co-inoculation of sulfur-oxidizing bacteria and *Rhizobium*. *Microbiol. Res.* 162, 139–153. doi:10.1016/j.micres.2006.02.005.
- Anbuganesan, V., Vishnupradeep, R., Bruno, L. B., Sharmila, K., Freitas, H., & Rajkumar, M. 2024. Combined application of biochar and plant growth-promoting rhizobacteria improves heavy metal and drought stress tolerance in *Zea mays*. *Plants*, 13(8), 1143.
- Andrino A, Guggenberger G, Kernchen S, Mikutta R, Sauheitl L & Boy J. 2021. Production of organic acids by arbuscular mycorrhizal fungi and their contribution in the mobilization of phosphorus bound to iron oxides. *Frontiers in Plant Science* 12: 661842.
- Anli, M., Baslam, M., Tahiri, A., Raklami, A., Symanczik, S., Boutasknit, A., Meddich, A. 2020. Biofertilizers as strategies to improve photosynthetic apparatus, growth, and drought stress tolerance in the date palm. *Frontiers in plant science*, 11, 516818.
- Ansari, F. A., Ahmad, I., & Pichtel, J. 2023. Synergistic effects of biofilm-producing PGPR strains on wheat plant colonization, growth and soil resilience under drought stress. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 30, 103664.
- Anzuay, M. S., Luduena, L. M., Angelini, J. G., Fabra, A., and Taurian, T. 2015. Beneficial effects of native phosphate solubilizing bacteria on peanut (*Arachis hypogaea* L) growth and phosphorus acquisition. *Symbiosis* 66, 89–97. doi:10.1007/s13199-015-0337-z.
- Apel K, Hirt H 2004 Reactive oxygen species: metabolism, oxidative stress, and signal transduction. *Annu Rev Plant Biol* 55:373–399
- Arnon, D. I. (1949). Copper enzymes in isolated chloroplasts. Polyphenoloxidase in *Beta vulgaris*. *Plant Physiology*, 24(1), 1–15. <https://doi.org/10.1104/pp.24.1.1>
- Aroca R, Bago A, Sutka M, Paz A, Cano C, Amodeo G, Ruiz-Lozano JM. 2009. Expression analysis of the first arbuscular mycorrhizal fungi aquaporin described reveals concerted gene expression between salt-stressed and nonstressed mycelium. *Molecular Plant-Microbe Interactions* 22: 1169–1178.
- Aroca R, Porcel R, Ruiz-Lozano JM. 2007. How does arbuscular mycorrhizal symbiosis regulate root hydraulic properties and plasma membrane aquaporins in *Phaseolus vulgaris* under drought, cold or salinity stresses?. *New Phytologist* 173: 808–816.
- Auge RM. 2001. Water relations, drought and vesicular-arbuscular mycorrhizal symbiosis. *Mycorrhiza* 11: 3–42.
- Aroca R, Vernieri P, Ruiz-Lozano JM 2008 Mycorrhizal and nonmycorrhizal *Lactuca sativa* plants exhibit contrasting responses to exogenous ABA during drought stress and recovery. *J Exp Bot* 59:2029–2041
- Arshad, I. 2017. Effect of water stress on the growth and yield of greenhouse cucumber (*Cucumis sativus* L.). *PSM Biological Research*, 2(2), 63–67.

- Artursson, V., Finlay, R. D., & Jansson, J. K. 2006. Interactions between arbuscular mycorrhizal fungi and bacteria and their potential for stimulating plant growth. *Environmental Microbiology*, 8(1), 1–10.
- Asrar AA, Abdel-Fattah GM, Elhindi KM 2012 Improving growth, flower yield, and water relations of snapdragon (*Antirrhinum majus* L.) plants grown under well-watered and waterstress conditions using arbuscular mycorrhizal fungi. *Photosynthetica* 50:305–316
- Augé, R. M. 2001. Water relations, drought and vesicular-arbuscular mycorrhizal symbiosis. *Mycorrhiza*, 11(1), 3–42. <https://doi.org/10.1007/s005720100097>
- Auge RM, Toler HD, Saxton AM. 2015. Arbuscular mycorrhizal symbiosis alters stomatal conductance of host plants more under drought than under amply watered conditions: a metaanalysis. *Mycorrhiza* 25: 13–24.
- Avio, L., Sbrana, C., Giovannetti, M., & Frassinetti, S. 2017. Arbuscular mycorrhizal fungi affect total phenolics content and antioxidant activity in leaves of oak leaf lettuce varieties. *Scientia Horticulturae*, 224, 265–271.
- Ayaş, S., Demirtaş, Ç., 2009. Deficit Irrigation Effects on Cucumber (*Cucumis sativus* L. Maraton) Yield in Unheated Greenhouse Condition. *Journal of Food, Agriculture & Environment*, 7 (3,4) : 6 4 5 - 6 4 9
- Azcón, R., 1989. Selective interaction between free-living rhizosphere bacteria and vesicular arbuscular mycorrhizal fungi. *Soil Biology and Biochemistry* 21, 639–644.
- Aydın, M., & Dönmez, M. F. (2024). The effect of plant growth promoting bacteria strains on yield and some quality parameters of eggplant (*Solanum melongena* L.). *Journal of Agricultural Production*, 5(3), 153–162. <https://doi.org/10.56430/japro.1477206>
- Azizi, S., Tabari, M., Abad, A. R. F. N., Ammer, C., Guidi, L., & Bader, M. K. 2022. Soil Inoculation With Beneficial Microbes Buffers Negative Drought Effects on Biomass, Nutrients, and Water Relations of Common Myrtle. *Frontiers in plant science*, 13, 892826. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.892826>
- Bacon, M.A., 2004. *Water Use Efficiency in Plant Biology*. Wiley-Blackwell publishing Ltd, Oxford, UK.
- Badal, E., El-Mageed, T.A.A., Buesa, I., Guerra, D., Bonet, L., Intrigliolo, D.S., 2013. Moderate plant water stress reduces fruit drop of “*Rojo Brillante*” persimmon (*Diospyros kaki*) in a Mediterranean climate. *Agric. Water Manage.* 119, 154–160.
- Bahadur, A., Batool, A., Nasir, F., Jiang, S., Mingsen, Q., Zhang, Q., Pan, J., Liu, Y. and Feng, H., 2019. Mechanistic insights into arbuscular mycorrhizal fungi-mediated drought stress tolerance in plants. *International journal of molecular sciences*, 20 (17): 4199.
- Bahadur, A., Chatterjee, A., Kumar, R., Singh, M., Naik, P., 2011. Physiological and biochemical basis of drought tolerance in vegetables. *Vegetable Sci.* 38, 1–16.
- Bakhshandeh, S., Corneo, P.E., Mariotte, P., Kertesz, M.A., Dijkstra, F.A., 2017. Effect of crop rotation on mycorrhizal colonization and wheat yield under different fertilizer treatments. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 247, 130–136. [doi:10.1016/j.agee.2017.06.027](https://doi.org/10.1016/j.agee.2017.06.027)

- Bakker, M.G., Manter, D.K., Sheflin, A.M., Weir, T.L., Vivanco, J.M., 2012. Harnessing the rhizosphere microbiome through plant breeding and agricultural management. *Plant Soil* 360, 1-13.
- Bakr, J., Pék, Z., Helyes, L., & Posta, K. 2018. Mycorrhizal inoculation alleviates water deficit impact on field-grown processing tomato. *Polish Journal of Environmental Studies*, 27, 1949–1958.
- Baldrian P, Větrovsky T, Lepinay C, Kohout P. 2021. High-throughput sequencing view on the magnitude of global fungal diversity. *Fungal Diversity* 1–9.
- Bardgett, R. D. and Van der Rutten, W. H. 2014. Belowground biodiversity and ecosystem functioning. *Nature*, 515, 505-551.
- Barea, J. M., Pozo, M. J., Azcón, R., & Azcón-Aguilar, C. 2018. Microbial co-operation in the rhizosphere. *Journal of Experimental Botany*, 59(2), 279–294. <https://doi.org/10.1093/jxb/erm383>
- Barzana G, Aroca R, Paz JA, Chaumont F, Martinez-Ballesta MC, Carvajal M, Ruiz-Lozano JM. 2012. Arbuscular mycorrhizal symbiosis increases relative apoplastic water flow in roots of the host plant under both well-watered and drought stress conditions. *Annals of Botany* 109: 1009–1017.
- Baslam, M., Garmendia, I., & Goicoechea, N. 2011. Arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) improved growth and nutritional quality of greenhouse-grown lettuce. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 59(10), 5504–5515. <https://doi.org/10.1021/jf200501c>
- Baslam, M., & Goicoechea, N. 2012. Water deficit improved the capacity of arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) for inducing the accumulation of antioxidant compounds in lettuce leaves. *Mycorrhiza*, 22, 347–359
- Bates, L. S., Waldren, R. P., & Teare, I. D. (1973). Rapid determination of free proline for water-stress studies. *Plant and Soil*, 39(1), 205–207. <https://doi.org/10.1007/BF00018060>
- Batool, T., Ali, S., Seleiman, M. F., Naveed, N. H., Ali, A., Ahmed, K., Mubushar, M. 2020. Plant growth promoting rhizobacteria alleviates drought stress in potato in response to suppressive oxidative stress and antioxidant enzymes activities. *Scientific Reports*, 10, 16975. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-73489-z>
- Beauchamp, C., & Fridovich, I. 1971. Superoxide dismutase: Improved assays and an assay applicable to acrylamide gels. *Analytical Biochemistry*, 44(1), 276–287. [https://doi.org/10.1016/0003-2697\(71\)90370-8](https://doi.org/10.1016/0003-2697(71)90370-8)
- Begum, N., Wang, L., Ahmad, H., Akhtar, K., Roy, R., Khan, M. I., Zhao, T. 2022. Co-inoculation of arbuscular mycorrhizal fungi and plant growth-promoting rhizobacteria improves growth and photosynthesis in tobacco under drought stress by up-regulating antioxidant and mineral metabolism. *Microbial Ecology*, 83(4), 971-988. <https://doi.org/10.1007/s00248-021-01815-7>
- Begum, N., Qin, C., Ahanger, M. A., vd. 2019. Role of Arbuscular Mycorrhizal Fungi in Plant Growth Regulation: Implications in Abiotic Stress Tolerance. *Frontiers in Plant Science*, 10, 1068.

- Behrooz, A., Vahdati, K., Rejali, F., Lotfi, M., Sarikhani, S., & Leslie, C. 2019. Arbuscular Mycorrhiza and Plant Growth-promoting Bacteria Alleviate Drought Stress in Walnut. *HortScience horts*, 54(6), 1087-1092. Retrieved May 12, 2025, from
- Bender, S. F., Wagg, C., and van der Heijden, M. G. 2016. An underground revolution: biodiversity and soil ecological engineering for agricultural sustainability. *Trends in ecology and evolution*, 31 (6), 440-452.
- Berendsen, R. L., C. M. Pieterse and P. A. Bakker 2012. "The rhizosphere microbiome and plant health." *Trends in Plant Science* 17(8): 478-486.
- Berg, G. 2009. Plant-microbe interactions promoting plant growth and health: Perspectives for controlled use of microorganisms in agriculture. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 84(1), 11–18.
- Bernados, L. C., Espineli, J. P., Anarna, J. A., & Aggangan, N. S. 2024. Increasing tomato productivity through integrated nutrient sources and inoculation with arbuscular mycorrhizal fungi and *Azospirillum spp.* *Horticulturae*, 10(1056).
- Bertin, C., Yang, X., and Weston, L. a 2003. The role of root exudates and allelochemicals in the rhizosphere. *Plant Soil* 256, 67–83. doi:10.1023/A:1026290508166
- Besserer, A., Puech-Pagès, V., Kiefer, P., Gomez-Roldan, V., Jauneau, A., Roy, S., Portais, J. C., Roux, C., Bécard, G., & Séjalon-Delmas, N. 2006. Strigolactones stimulate arbuscular mycorrhizal fungi by activating mitochondria. *PLoS Biology*, 4(7), 1239–1247.
- Bhantana, P., Rana, M. S., Moussa, M. G., et. al. 2021. Arbuscular mycorrhizal fungi and its major role in plant growth, zinc nutrition, phosphorous regulation and phytoremediation. *Symbiosis*.
- Bharath, P., Gahir, S. ve Raghavendra, A. S. 2021. Absciscic acid-induced stomatal closure: An important component of plant defense against abiotic and biotic stress. *Frontiers in Plant Science*, 12, 1–18.
- Bicer, S., Erdinc, C., & Comlekcioglu, N. 2022. A comparative analysis of co-inoculation of microbial biostimulants at different irrigation levels under field conditions on the cucumber growth. *Gesunde Pflanzen*, <https://doi.org/10.1007/s10343-022-00804-1>
- Biçer, Ş., Erdinç, Ç., & Çömlekçioğlu, N. 2020. Hıyarda kök bakterisi (PGPR) ve arbusküler mikorizal fungus (AMF) aşılamalarının farklı sulama seviyelerinde bitki gelişimi ve verim özelliklerine etkileri. *Uluslararası Tarım ve Yaban Hayatı Bilimleri Dergisi*, 6(1), 8–20. <https://doi.org/10.24180/ijaws.631048>
- Bogati, K., & Walczak, M. 2022. The impact of drought stress on soil microbial community, enzyme activities and plants. *Agronomy*, 12(1), 189.
- Bohnert, H. J., Gong, Q., Li, P., & Ma, S. 2006. Unraveling abiotic stress tolerance mechanisms--getting genomics going. *Current opinion in plant biology*, 9(2), 180–188. <https://doi.org/10.1016/j.pbi.2006.01.003>
- Bolan, N.S. 1991 A critical review on the role of mycorrhizal fungi in the uptake of phosphorus by plants. *Plant Soil* 134:189-207

- Borgi, M. A., Saidi, I., Moula, A., Rhimi, S., and Rhimi, M. 2020. The attractive *Serratia plymuthica* BMA1 strain with high rock phosphate-solubilizing activity and its effect on the growth and phosphorus uptake by *Vicia faba* L. plants. *Geomicrobiol. J.* 37, 437–445. doi:10.1080/01490451.2020.1716892.
- Bortolot, M., Buffoni, B., Mazzarino, S., Hoff, G., Martino, E., Fiorilli, V., & Salvioli Di Fossalunga, A. 2024. The importance of mycorrhizal fungi and their associated bacteria in promoting crops' performance: An applicative perspective. *Horticulturae*, 10(12), 1326.
- Bouremani, N., Cherif-Silini, H., Silini, A., Bouket, A. C., Luptakova, L., & Alenezi, F. N. 2023. Plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR): A rampart against the adverse effects of drought stress. *Water*, 15(3), 418. <https://doi.org/10.3390/w15030418>
- Boutasknit, A., Baslam, M., Ait-El-Mokhtar, M., Anli, M., Dghoughi, L., Toubali, S., Mitsui, T., & Wahbi, S. 2021. Assemblage of indigenous arbuscular mycorrhizal fungi and green waste compost enhance drought stress tolerance in carob (*Ceratonia siliqua* L.) trees. *Scientific Reports*, 11, 22835.
- Bouyoucos, G. J. (1951). A Recalibration of the Hydrometer Method for Making Mechanical Analysis of Soils¹. *Agronomy Journal*, 43(9), 434-438. <https://doi.org/https://doi.org/10.2134/agronj1951.00021962004300090005x>
- Bozkurt, S., & Keskin, M. 2018. Effect of deficit irrigation on the estimation of cucumber leaf area under greenhouse conditions. *International Journal of Agriculture & Biology*, 20:877–882.
- Brosché, M., Kangasjärvi, S., Overmyer, K., Wrzaczek, M., & Kangasjärvi, J. 2010. Stress signaling III: Reactive oxygen species (ROS). In A. Pareek, S. K. Sopory, H. J. Bohnert, & Govindjee (Eds.), *Abiotic stress adaptation in plants* (pp. 91–99). Springer.
- Bruijn FJ. 2020. Signalling and infection events in the arbuscular mycorrhiza– *Medicago truncatula* symbiosis: introduction. In *The Model Legume Medicago Truncatula* (Wiley-Blackwell, New Jersey, USA): 467–470.
- Brundrett M. 1991. Mycorrhizas in natural ecosystems. *Advances in Ecological Research* 21: 171–313.
- Brundrett, M., Bougher, N., Dell, B., Grove, T., & Malajczuk, N. 1996. Working with mycorrhizas in forestry and agriculture. Canberra, Australia: Australian Centre for International Agricultural Research (ACIAR), Monograph No. 32
- Brundrett, M. C. 2004. Diversity and classification of mycorrhizal associations. *Biological Reviews*, 79(3), 473–495.
- Bulgarelli, D., K. Schlaeppi, S. Spaepen, E. V. L. Van Themaat and P. Schulze-Lefert . 2013. "Structure and functions of the bacterial microbiota of plants." *Annual review of plant biology* 64: 807-838.
- Bulgari, R., Franzoni, G., & Ferrante, A. 2019. Biostimulants application in horticultural crops under abiotic stress conditions. *Agronomy*, 9(6), 306.

- Bulluck, L.R., Brosius, M., Evanylo, G.K., Ristaino, J.B., 2002. Organic and synthetic fertility amendments influence soil microbial, physical and chemical properties on organic and conventional farms. *Appl Soil Ecol* 19, 147-160.
- Calvo, A., Reitz, T., Sillo, F., Montesano, V., Cañizares, E., Zampieri, E., Mahmoudi, R., Gohari, G., Chitarra, W., Giovannini, L., Conte, A., vd. 2025. Interactions between an arbuscular mycorrhizal inoculum and the root-associated microbiome in shaping the response of *Capsicum annuum* "Locale di Senise" to different irrigation levels. *Plant and Soil*, 508, 361–383.
- Calvo-Polanco, M., Sánchez-Romera, B., Aroca, R., Asins, M. J., Declerck, S., Dodd, I. C., Martínez-Andújar, C., Albacete, A., & Ruiz-Lozano, J. M. 2016. Exploring the use of recombinant inbred lines in combination with beneficial microbial inoculants (AM fungus and PGPR) to improve drought stress tolerance in tomato. *Environmental and Experimental Botany*, 131, 47–57.
- Chance, B., & Maehly, A. C. (1955). Assay of catalases and peroxidases. *Methods in Enzymology*, 2, 764–775. [https://doi.org/10.1016/S0076-6879\(55\)02300-8](https://doi.org/10.1016/S0076-6879(55)02300-8)
- Chandrasekaran, M. 2022. Arbuscular Mycorrhizal Fungi Mediated Enhanced Biomass, Root Morphological Traits and Nutrient Uptake under Drought Stress: A Meta-Analysis. *Journal of Fungi* 8 (7): 660.
- Chang, W. S., van de Mortel, M., Nielsen, L., Nino de Guzman, G., Li, X. ve Halverson, L. J. 2007. Alginate production by *Pseudomonas putida* creates a hydrated microenvironment and contributes to biofilm architecture and stress tolerance under water-limiting conditions. *Journal of Bacteriology*, 189(22), 8290–8299. <https://doi.org/10.1128/JB.00727-07>
- Chaparro, J. M., A. M. Sheflin, D. K. Manter and J. M. Vivanco 2012. "Manipulating the soil microbiome to increase soil health and plant fertility." *Biology and Fertility of Soils* 48(5): 489-499.
- Chareesri, A., De Deyn, G. B., Sergeeva, L., Polthanee, A. ve Kuyper, T. W. 2020. Increased arbuscular mycorrhizal fungal colonization reduces yield loss of rice (*Oryza sativa* L.) under drought. *Mycorrhiza*, 30, 315–328.
- Chen, J., Lin, K., Huang, T., Geng, X., Li, Z., Wang, B., Xiao, Q., & Li, X. 2024. The active effect of *Rhizophagus irregularis* inoculants on maize endophytic bacteria community. *iMetaOmics*, 1, e23.
- Chen, X., Su, M., Wu, S., He, L., Zhang, B., Zhang, Y., Huang, X., Liu, J., Yan, C., Liu, W., & Lu, H. 2023. Change in glomalin-related soil protein along latitudinal gradient encompassing subtropical and temperate blue carbon zones. *Science of The Total Environment*, 895, 165035.
- Chen, S., Zhao, H., Zou, C., Li, Y., Chen, Y., Wang, Z., Jiang, Y., Liu, A., Zhao, P., Wang, M., & Ahammed, G. J. 2017. Combined inoculation with multiple arbuscular mycorrhizal fungi improves growth, nutrient uptake and photosynthesis in cucumber seedlings. *Frontiers in Microbiology*, 8, 2516. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2017.02516>
- Chiappero, J., Cappellari, L. del R., Sosa Alderete, L. G., Palermo, T. B., and Banchio, E. 2019. Plant growth promoting rhizobacteria improve the antioxidant status in

- Mentha piperita* grown under drought stress leading to an enhancement of plant growth and total phenolic content. *Ind. Crops Prod.* 139. doi:10.1016/j.indcrop.2019.111553.
- Chieb, M., & Gachomo, E. W. 2023. The role of plant growth-promoting rhizobacteria in plant drought stress responses. *BMC Plant Biology*, 23, 407.
- Clark RB & Zeto SK. 2000. Mineral acquisition by arbuscular mycorrhizal plants. *Journal of Plant Nutrition* 23: 867–902.
- Conner AC, Bill RM, Conner MT. 2013. An emerging consensus on aquaporin translocation as a regulatory mechanism. *Mol Membr Biol* 30:1–12
- Cope, K. R., Bascaules, A., Irving, T. B., Venkateshwaran, M., Maeda, J., Garcia, K., Rush, T. A., Ma, C., Labbé, J., Jawdy, S., vd. 2019. The Ectomycorrhizal Fungus *Laccaria bicolor* Produces Lipochitooligosaccharides and Uses the Common Symbiosis Pathway to Colonize *Populus* Roots. *The Plant cell*, 31(10), 2386–2410. <https://doi.org/10.1105/tpc.18.00676>
- Corradi N, Bonfante P .2012. The Arbuscular mycorrhizal symbiosis: Origin and evolution of a beneficial plant infection. *PLoS Pathog* 8:8–10.
- Coskun, D., Britto, D.T., Shi, W., Kronzucker, H.J., 2017. How Plant Root Exudates Shape the Nitrogen Cycle. *Trends in Plant Science* 22, 661–673. doi:10.1016/j.tplants.2017.05.004
- Costa, J. M., Ortuño, M. F., & Chaves, M. M. 2007. Deficit irrigation as a strategy to save water: Physiology and potential application to horticulture. *Journal of Integrative Plant Biology*, 49(10), 1421–1434. <https://doi.org/10.1111/j.1672-9072.2007.00556.x>
- Coşgun, A. Y. 2023. İklim değişikliğinin Türkiye su kaynaklarına etkileri ve uyum. Türkiye Bilimler Akademisi (TÜBA) Yayını. <https://doi.org/10.53478/TUBA.978-625-8352-566.ch07>
- Cutler, S. R., Rodriguez, P. L., Finkelstein, R. R., and Abrams, S. R. 2010. Absciscic acid: Emergence of a core signaling network. doi:10.1146/annurev-arplant-042809-112122.
- Çağlar, K. Ö. 1949. Toprak bilgisi [Non-fiction]. Ankara Üniversitesi Ziraat Fakültesi. <https://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=cat00818a&AN=auk.210936&lang=tr&site=eds-live&authtype=ip,uid>
- Çakmakçı, Ö., Çakmakçı, T., Durak, D, E., Demir, S., Şensoy, S., 2017. Effects of arbuscular mycorrhizal fungi in melon (*Cucumis melo* L.) seedling under deficit irrigation. *Fresenius Environmental Bulletin*, 26 (12): 7513-7520.
- Çığışar S, Sarı N, Ortaş İ. 2000. The effects of vesicular-arbuscular mycorrhizae on the plant growth and nutrient uptake of cucumber. *Turk J Agric For* 24: 571-578.
- Çiftçi, V., Turkmen, O., Erdinç, Ç., & Şensoy, S., (2010). Effects of different arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) species on some bean (*Phaseolus vulgaris* L.) cultivars grown in salty conditions. *African Journal Of Agricultural Research* , vol.5, no.24, 3408-3416.

- Daniel AI, Fadaka AO, Gokul A, Bakare OO, Aina O, Fisher S, Burt AF, Mavumengwana V, Keyster M & Klein, A. 2022. Biofertilizer: The future of food security and food safety. *Microorganisms* 10: 1220.
- Das, A., Kumari, K., Munshi, A. D., Raju, D., Talukdar, A., Singh, D., Hongal, D., Iquebal, M. A., Bhatia, R., Bhattacharya, R. C., Behera, T. K., & Dey, S. S. 2024. Physio-chemical and molecular modulation reveals underlying drought resilience mechanisms in cucumber (*Cucumis sativus* L.). *Scientia Horticulturae*, 328, 112855.
- Das, K., & Roychoudhury, A. 2014. Reactive oxygen species (ROS) and response of antioxidants as ROS-scavengers during environmental stress in plants. *Frontiers in environmental science*, 2, 53.
- Dawson, T.P., Perryman, A.H. and Osborne, T.M. 2016. Modelling impacts of climate change on global food security. *Climatic Change*, 134: 429-440.
- De Bary A. 1879. "Die erscheinung der symbiose (Vol. 121)," in Strassburg: Verlag von Karl J (Strasbourg, France: Trübner;). doi: 10.1515/9783111471839
- Dennis, P.G., Miller, A.J., Hirsch, P.R., 2010. Are root exudates more important than other sources of rhizodeposits in structuring rhizosphere bacterial communities? *FEMS Microbiology Ecology* 72, 313–327. doi:10.1111/j.1574-6941.2010.00860.x
- Dhiman, S., Dubey, R. C., Maheshwari, D. K., and Kumar, S. 2019. Sulfur-oxidizing buffalo dung bacteria enhance growth and yield of *Foeniculum vulgare* Mill. *Can. J. Microbiol.* 65, 377–386. doi:10.1139/cjm-2018-0476.
- Díaz-Pereira, E., Marín Sanleandro, P., & Asencio, A. D. 2019. Effects of drought and water pulses on microbial functionality and the role of Cyanoprokaryota in the rhizospheres of gypsophytes. *Science of the Total Environment*, 691, 919–932.
- Deja-Sikora E, Werner K & Hryniewicz K. 2023. AMF species do matter: *Rhizophagus irregularis* and *Funnelformis mosseae* affect healthy and PVY-infected *Solanum tuberosum* L. in a different way. *Frontiers in Microbiology* 14: 1127278.
- Doubková P, Vlasáková E, Sudová R 2013 Arbuscular mycorrhizal symbiosis alleviates drought stress imposed on *Knautia arvensis* plants in serpentine soil. *Plant Soil*. DOI 10.1007/s11104-013-1610-7.
- Douds DD, Pfeffer PE, Shachar-Hill Y. 2000. Application of in vitro methods to study carbon uptake and transport by AM fungi. *Plant Soil* 226: 255–261.
- Douds, DD, Millner, PD .1999. Biodiversity of arbuscular mycorrhizal fungi in agroecosystems. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 74, 77-93.
- Egamberdieva, D., Wirth, S.J., Alqarawi, A.A., AbdAllah, E.F. and Hashem, A., 2017. Phytohormones and beneficial microbes: essential components for plants to balance stress and fitness. *Frontiers in microbiology*, 8: 2104
- Elgar, H. J., Watkins, C. B., Murray, S. H., Gunson, F. A., 1997. Quality of Buerre Bosc and Doyennedu Comice pears in relation to harvest date and storage period. *Postharvest Biology and Technology*, 10(1): 29-37.

- El Mazouni, N., Mesnaoui, M., Labbilita, T., Ait-El-Mokhtar, M., Khouloud, M., & Meddich, A. 2025. Formulating a fertilizer based on vitreous fertilizers and arbuscular mycorrhizal fungi to improve wheat growth and yield under water stress. *Journal of Crop Health*, 77, 13.
- El-Sawah, A. M., El-Keblawy, A., Ali, D. F. I., Ibrahim, H. M., El-Sheikh, M. A., Sharma, A., Alhaj Hamoud, Y., Shaghaleh, H., Brestic, M., Skalicky, M., Xiong, Y. C., & Sheteiwy, M. S. 2021. Arbuscular mycorrhizal fungi and plant growth-promoting rhizobacteria enhance soil key enzymes, plant growth, seed yield, and qualitative attributes of guar. *Agriculture*, 11(194).
- Emami, S., Alikhani, H. A., Pourbabae, A. A., Etesami, H., Motasharezadeh, B., and Sarmadian, F. 2020) Consortium of endophyte and rhizosphere phosphate solubilizing bacteria improves phosphorous use efficiency in wheat cultivars in phosphorus deficient soils. *Rhizosphere* 14. doi:10.1016/j.rhisph.2020.100196.
- Faber BA, Zasoski RJ, Munns DN, Shackel K. 1991. A method for measuring hyphal nutrients and water uptake in mycorrhizal plants. *Canadian Journal of Botany* 69: 87–94.
- Fahad, S., Bajwa, A. A., Nazir, U., Anjum, S. A., Farooq, A., Zohaib, A., Sadia, S., Nasim, W., Adkins, S., Saud, S., Ihsan, M. Z., Alharby, H., Wu, C., Wang, D. ve Huang, J. 2017. Crop production under drought and heat stress: Plant responses and management options. *Frontiers in Plant Science*, 8, 1147.
- Fan QJ, Liu JH .2011. Colonization with arbuscular mycorrhizal fungus affects growth, drought tolerance and expression of stress-responsive genes in *Poncirus trifoliata*. *Acta Physiol Plant* 33:1533–1542
- Fan, S., Blake, T., 1994. Absciscic Acid Induced Electrolyte Leakage in Woody Species With Contrasting Ecological Requirements. *Physiologia Plantarum*, 90: 414-419
- Farquh, M. & Moore, K. 2020. Fruit Texture and the Science Behind It (FS-1189). University of Maryland Extension. FAOSTAT. 2023. Crops and livestock products. [Son erişim: 10.04.2025]
- Feizi, A., Luu, A. T., Mai, V. D., Tuyet, T. T. T., Wang, S., & Hoang, D. T. T. 2024. Divergent response of maize and soybean rhizosphere to arbuscular mycorrhiza. *Rhizosphere*, 29, 100834.
- Flemming H. C., Wuertz S. 2019. Bacteria and archaea on Earth and their abundance in biofilms. *Nat. Rev. Microbiol.* 17 247–260. 10.1038/s41579-019-0158-9
- Floss, D. S., Levy, J. G., Lévesque-Tremblay, V., Pumplin, N., & Harrison, M. J. 2013. DELLA proteins regulate arbuscule formation in arbuscular mycorrhizal symbiosis. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 110(51).
- Founoune-Mboup, H., Diallo, B., Adigoun, R. F. R., vd. 2024. Contribution of arbuscular mycorrhizal fungi to the bioavailability of micronutrients (iron and zinc) in millet accessions. *Frontiers in Plant Science*, 15, 1364469.
- Gałaszka, A., Grządziel, J., & Gawryjolek, K. 2020. The microbial community structure and diversity in the rhizosphere of wheat under the application of microbial inoculants and different tillage practices. *Agronomy*, 10(9), 1279.

- Gamalero E, Berta G, Massa N, Glick BR, Lingua G. 2010. Interactions between *Pseudomonas putida* UW4 and *Gigaspora rosea* BEG9 and their consequences for the growth of cucumber under salt-stress conditions. *J Appl Microbiol* 108(1):236–245
- Garbaye, J., 1994. Tansley Review No. 76 Helper bacteria: a new dimension to the mycorrhizal symbiosis. *New Phytologist* 128, 197–210. doi:10.1111/j.1469-8137.1994.tb04003.x
- Gargallo -Garriga, A., Preece, C., Sardans, J., Oravec, M., Urban, O. and Peñuelas, J., 2018. Root exudate metabolomes change under drought and show limited capacity for recovery. *Scientific reports*, 8(1): 1-15.
- Garcia, K. G. V., Almeida, M. d. S., Barbosa, F. L. A., & Pereira, A. P. d. A. 2025. The contribution of arbuscular mycorrhizal fungi to soil enzyme activity and the performance of *Mimosa caesalpiniaefolia* in soil degraded by scheelite mining: Implications for restoration. *Resources*, 14(3), 50.
- Garcia De Salamone, I. E., Dobereiner, J., Urquiaga, S., and Boddey, R. M. 1996. Biological nitrogen fixation in *Azospirillum* strain-maize genotype associations as evaluated by the ¹⁵N isotope dilution technique. *Biol. Fertil. Soils* 23, 249–256. doi:10.1007/BF00335952.
- Gasemi, S., Mahdavia, H., Rezaei-Chiyaneh, E., Banaei-Asl, F., Dolatabadian, A., & Sadeghpour, A. 2023. Co-inoculation of mycorrhizal fungi and plant growth-promoting rhizobacteria improve growth, biochemical and physiological attributes in *Dracocephalum kotschy* Boiss. under water deficit stress. *PeerJ*, 11, e16474.
- Genre, A., Chabaud, M., Timmers, T., Bonfante, P., & Barker, D. G. 2005. Arbuscular mycorrhizal fungi elicit a novel intracellular apparatus in *Medicago truncatula* root epidermal cells before infection. *The Plant Cell*, 17(12), 3489–3499.
- Genre A, Chabaud M, Faccio A, Barker DG & Bonfante P. 2008. Prepenetration apparatus assembly precedes and predicts the colonization patterns of arbuscular mycorrhizal fungi within the root cortex of both *Medicago truncatula* and *Daucus carota*. *The Plant Cell* 20: 1407–1420.
- Gerdemann, J., & Nicolson, T. H. 1963. Spores of mycorrhizal *Endogone* species extracted from soil by wet sieving and decanting. *Transactions of the British Mycological society*, 46(2), 235-244.
- Gianinazzi S, Gollotte A, Binet M-N, van Tuinen D, Redecker D, Wipf D. 2010. Agroecology: the key role of arbuscular mycorrhizas in ecosystem services. *Mycorrhiza* 20:519–530
- Giovanetti, M., Mosse, B., 1980. An evaluation of techniques for measuring vesicular arbuscular mycorrhizal infection in roots. *New phytology*, 84(3): 489-500.
- Glick, B. R. 2014. Bacteria with ACC deaminase can promote plant growth and help to feed the world. *Microbiological Research*, 169(1), 30–39. <https://doi.org/10.1016/j.micres.2013.09.009>
- Glick, B. R. 2005. Modulation of plant ethylene levels by the bacterial enzyme ACC deaminase. *FEMS Microbiol. Lett.* 251, 1–7. doi:10.1016/j.femsle.2005.07.030.

- Goicoechea, N. 2020. Mycorrhizal Fungi as Bioprotectors of Crops Against Verticillium Wilt—A Hypothetical Scenario Under Changing Environmental Conditions. *Plants*, 9(11), 1468.
- Goicoechea N, Szalai G, Antolín MC, Sánchez-Díaz M, Paldi E. 1998. Influence of arbuscular mycorrhizae and Rhizobium on free polyamines and proline levels in water-stressed alfalfa. *J Plant Physiol* 153:706–711
- Gong, M, Tang, M, Chen, H, Zhang, Q, Feng, X. 2013. Effects of two *Glomus* species on the growth and physiological performance of *Sophora davidii* seedlings under water stress. *New Forests* 44, 399-408.
- Goodger, J. Q. D., & Schachtman, D. P. 2010. Nitrogen source influences root to shoot signaling under drought. In A. Pareek, S. K. Sopory, H. J. Bohnert, & Govindjee (Eds.), *Abiotic stress adaptation in plants* (pp. 165–172). Springer.
- Goswami, D., Thakker, J. N., and Dhandhukia, P. C. 2016. Portraying mechanics of plant growth promoting rhizobacteria (PGPR): A review. *Cogent Food and Agriculture*, 2(1), 1127500.
- Goteti, P. K., L. D. A. Emmanuel, S. Desai and M. H. A. Shaik. 2013. "Prospective zinc solubilising bacteria for enhanced nutrient uptake and growth promotion in maize (*Zea mays* L.)." *International Journal of Microbiology* 2013: 869697.
- Govindarajulu, M., Pfeffer, P. E., Jin, H., Abubaker, J., Douds, D. D., Allen, J. W., ... & Shachar-Hill, Y. 2005. Nitrogen transfer in arbuscular mycorrhizal symbiosis. *Nature*, 435(7043), 819–823. <https://doi.org/10.1038/nature03610>
- Granada, C. E., Passaglia, L. M. P., de Souza, E. M., and Sperotto, R. A. 2018. Is phosphate solubilization the forgotten child of plant growth-promoting rhizobacteria? *Front. Microbiol.* 9, 2016–2019. doi:10.3389/fmicb.2018.02054.
- Grover, M., Ali, S. Z., Sandhya, V., Rasul, A., & Venkateswarlu, B. 2011. Role of microorganisms in adaptation of agriculture crops to abiotic stresses. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 27, 1231–1240. <https://doi.org/10.1007/s11274-010-0572-7>
- Guether, M., Neuhäuser, B., Balestrini, R., Dynowski, M., Ludewig, U., & Bonfante, P. 2009. A mycorrhizal-specific ammonium transporter from *Lotus japonicus* acquires nitrogen released by arbuscular mycorrhizal fungi. *Plant Physiology*, 150(1), 73–83. <https://doi.org/10.1104/pp.108.134353>
- Güneş, A., Ataoğlu, N., Turan, M., Eşitken, A., and Ketterings, Q. M. 2009. Effects of phosphate-solubilizing microorganisms on strawberry yield and nutrient concentrations. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 172, 385–392. doi:10.1002/jpln.200800121.
- Gururani, M. A., C. P. Upadhyaya, V. Baskar, J. Venkatesh, A. Nookaraju and S. W. Park. 2013. "Plant growth-promoting rhizobacteria enhance abiotic stress tolerance in *Solanum tuberosum* through inducing changes in the expression of ROS-scavenging enzymes and improved photosynthetic performance." *Journal of Plant Growth Regulation* 32(2): 245-258.
- Gusain, Y. S., Singh, U. S., and Sharma, A. K. 2015. Bacterial mediated amelioration of drought stress in drought tolerant and susceptible cultivars of rice (*Oryza sativa* L.). *African Journal of Biotechnology*, 14(9), 764-773.

- Gutjahr C & Paszkowski U. 2013. Multiple control levels of root system remodeling in arbuscular mycorrhizal symbiosis. *Frontiers in Plant Science* 4: 204.
- Halo, B. A., Khan, A. L., Waqas, M., Al-Harrasi, A., Hussain, J., Ali, L., vd. 2015. Endophytic bacteria (*Sphingomonas* sp. LK11) and gibberellin can improve *Solanum lycopersicum* growth and oxidative stress under salinity. *J. Plant Interact.* 10, 117–125. doi:10.1080/17429145.2015.1033659.
- Han, H. S., and Lee, K. D. 2005. Phosphate and potassium solubilizing bacteria effect on mineral uptake , soil availability and growth of eggplant. *Res. J. Agriulture Biol. Sci.* 1, 176–180.
- Hartmann, M., Frey, B., Mayer, J., Mader, P., Widmer, F., 2015. Distinct soil microbial diversity under long-term organic and conventional farming. *ISME J* 9, 1177-1194.
- Hashem, A., Tabassum, B., & Abd-Allah, E. F. 2019. *Bacillus subtilis*: A plant-growth promoting rhizobacterium that also impacts biotic stress. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 26(6), 1291–1297. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2019.05.004>
- Hayano, K. 1973. A method for the determination of β -glucosidase activity in soil. *Soil science and plant nutrition*, 19(2), 103-108.
- He, Z., Chen, Z., Wang, J., Zhang, X., Xu, J., & Huang, B. 2023. Interactive effects of drought and chilling on chlorophyll content and chloroplast ultrastructure in *Poa annua*. *Scientific Reports*, 13(1), 49531. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-49531-1>
- Heath, R. L., & Packer, L. 1968. Photoperoxidation in isolated chloroplasts. I. Kinetics and stoichiometry of fatty acid peroxidation. *Archives of Biochemistry and Biophysics*, 125(1), 189–198. [https://doi.org/10.1016/0003-9861\(68\)90654-1](https://doi.org/10.1016/0003-9861(68)90654-1)
- Hidri, R., Metoui-Ben Mahmoud, O., Debez, A., Abdelly, C., Barea, J. M., & Azcon, R. 2019. Modulation of C:N:P stoichiometry is involved in the effectiveness of a PGPR and AM fungus in increasing salt stress tolerance of *Sulla carnosa* Tunisian provenances. *Applied Soil Ecology*, 143, 161–172.
- Hidri, R., Metoui-Ben Mahmoud, O., Debez, A., Zorrig, W., Abdelly, C., Zamarreño, Á. M., García-Mina, J. M., Azcon, R., & Aroca, R. 2024. Dual PGPR-AMF inoculation offsets salinity stress impact on the fodder halophyte *Sulla carnosa* by concomitantly modulating plant ABA content and leaf antioxidant response. *Journal of Plant Growth Regulation*. <https://doi.org/10.1007/s00344-024-11438-0>
- Hodge, A., & Storer, K. 2015. Arbuscular mycorrhiza and nitrogen: implications for individual plants through to ecosystems. *Plant and Soil*, 386, 1–19. <https://doi.org/10.1007/s11104-014-2162-1>
- Hoekstra F, Golovina E, Buitink J. 2001. Mechanisms of plant desiccation tolerance. *Trends in Plant Sci* 8:431–438
- Howell, T.A. 2001. Enhancing water use efficiency in irrigated agriculture. *Agron. J.* 93, 281.
- Huang, Z., Zou, Z., He, C., He, Z., Zhang, Z., & Li, J. 2011. Physiological and photosynthetic responses of melon (*Cucumis melo* L.) seedlings to three *Glomus* species under water deficit. *Plant and Soil*, 339(1), 391–399.

- Huang, Y. M., Zou, Y. N., & Wu, Q. S. 2017. Alleviation of drought stress by mycorrhizas is related to increased root H₂O₂ efflux in trifoliate orange. *Scientific reports*, 7(1), 1-9.
- Hussain, A., Arshad, M., Zahir, Z. A., and Asghar, M. 2015. Prospects of zinc solubilizing bacteria for enhancing growth of maize. *Pakistan J. Agric. Sci.* 52, 915– 922.
- Islam, S., Akanda, A. M., Prova, A., Islam, M. T., & Hossain, M. M. 2016. Isolation and identification of plant growth promoting rhizobacteria from cucumber rhizosphere and their effect on plant growth promotion and disease suppression. *Frontiers in Microbiology*, 6, 1360.
- Jakobsen I, Abbott LK, Robson AD. 1992. External hyphae of vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi associated with *Trifolium subterraneum* L. 1. Spread of hyphae and phosphorus inflow into roots. *New Phytologist* 120: 371–380.
- Jansa, J., Finlay, R., & Wallander, H. 2011. Role of mycorrhizal symbioses in phosphorus cycling. *Phosphorus in Action*, 137–168. https://doi.org/10.1007/978-3-642-15271-9_6
- Jansa, J., A. Wiemken and E. Frossard. 2006. "The effects of agricultural practices on arbuscular mycorrhizal fungi." *Geological Society, London, Special Publications* 266(1): 89-115.
- Jha, C. K., and Saraf, M. 2015. Plant growth promoting rhizobacteria (PGPR): a review. *J. Agric. Res. Dev.* 5, 108–119. doi:10.13140/RG.2.1.5171.2164.
- Ji, C., Ge, Y., Zhang, H., Zhang, Y., Xin, Z., Li, J., Zheng, J., Liang, Z., Cao, H., & Li, K. 2024. Interactions between halotolerant nitrogen-fixing bacteria and arbuscular mycorrhizal fungi under saline stress. *Frontiers in Microbiology*, 15, 1288865.
- Ji, L., Tan, W., & Chen, X. (2019). Arbuscular mycorrhizal mycelial networks and glomalin-related soil protein increase soil aggregation in Calcaric Regosol under well-watered and drought stress conditions. *Soil & Tillage Research*, 185, 1–8.
- Jiang Y, Wang W, Xie Q, Liu N, Liu L, Wang D, Zhang X, Yang C, Chen X, Tang D vd. 2017. Plants transfer lipids to sustain colonization by mutualistic mycorrhizal and parasitic fungi. *Science* 356: 1172-1175.
- Johansson, J.F., Paul, L.R., Finlay, R.D., 2004. Microbial interactions in the mycorrhizosphere and their significance for sustainable agriculture. *FEMS Microbiology Ecology*. doi:10.1016/j.femsec.2003.11.012
- Johnson, G.(2022. Yellowing cucumbers. In E. Ernest (Ed.), *Weekly Crop Update* (Vol. 30, Issue 22, pp. 3–4). University of Delaware Cooperative Extension.
- Kacar, B. 1995. Bitki ve Toprağın Kimyasal analizler: III. Toprak Analizleri. A. Ü. Ziraat Fakültesi Geliştirme Vakfı Yayınları No: 3
- Kacar, B. ve İnal, A. 2008. Bitki analizleri. Nobel Yayınları No: 1241, Ankara.
- Kaiser C, Kilburn MR, Clode PL, Fuchslueger L, Koranda M, Cliff JB, Solaiman ZM & Murphy DV. 2015. Exploring the transfer of recent plant photosynthates to soil microbes: mycorrhizal pathway vs direct root exudation. *New Phytologist* 205: 1537–1551.

- Kakouridis A, Hagen JA, Kan MP, Mambelli S, Feldma, LJ, Herman DJ, Weber PK, Pett-Ridge J & Firestone MK. 2022. Routes to roots: direct evidence of water transport by arbuscular mycorrhizal fungi to host plants. *The New Phytologist* 236: 210–221.
- Kaman, H., Özbek, Ö., & Polat, E. 2023. Determination of the Effect of Different Irrigation Regimes on Some Quality Properties of Cucumber. *Tekirdağ Ziraat Fakültesi Dergisi*, 20(2), 318-333. <https://doi.org/10.33462/jotaf.1093951>
- Kamran, S., Shahid, I., Baig, D., Rizwan, M., Malik, K., & Mehnaz, S. 2017. Contribution of zinc solubilizing bacteria in growth promotion and zinc content of wheat. *Frontiers in Microbiology*, 8.
- Kang, S.-M., Radhakrishnan, R., You, Y.-H., Khan, A. L., Park, J.-M., Lee, S.-M., & Lee, I.-J. 2015. Cucumber performance is improved by inoculation with plant growth-promoting microorganisms. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B — Soil & Plant Science*, 65(1), 36–44.
- Kang, S. M., Khan, A. L., Waqas, M., You, Y. H., Kim, J. H., Kim, J. G., Hamayun, M., & Lee, I. J. 2014. Plant growth-promoting rhizobacteria reduce adverse effects of salinity and osmotic stress by regulating phytohormones and antioxidants in *Cucumis sativus*. *Journal of Plant Interactions*, 9(1), 673–682. doi:10.1080/17429145.2014.894587.
- Kang, S. M., Khan, A. L., Waqas, M., Asaf, S., Lee, K. E., Park, Y. G., vd. 2019. Integrated phytohormone production by the plant growth-promoting rhizobacterium *Bacillus tequilensis* SSB07 induced thermotolerance in soybean. *J. Plant Interact.* 14, 416–423. doi:10.1080/17429145.2019.1640294.
- Karlidag, H., Yildirim, E., Turan, M., Pehlivan, M., and Donmez, F. 2013. Plant growth-promoting rhizobacteria mitigate deleterious effects of salt stress on strawberry plants (*Fragaria × ananassa*). *HortScience* 48, 563–567.
- Kaschuk G, Kuyper TW, Leffelaar PA, Hungria M, Giller KE. 2009. Are the rates of photosynthesis stimulated by the carbon sink strength of rhizobial and arbuscular mycorrhizal symbioses?. *Soil Biology and Biochemistry* 41: 1233–1244.
- Kaur, G., & Asthir, B. 2015. Proline: a key player in plant abiotic stress tolerance. *Biologia Plantarum*, 59(4), 609–619. <https://doi.org/10.1007/s10535-015-0549-3>
- Kaur, G., and Reddy, M. S. 2015. Effects of phosphate-solubilizing bacteria, rock phosphate and chemical fertilizers on maize-wheat cropping cycle and economics. *Pedosphere* 25, 428–437. doi:10.1016/S1002-0160(15)30010-2.
- Kaur, S., Suseela, V. 2020. Unraveling Arbuscular Mycorrhiza- Induced Changes in Plant Primary and Secondary Metabolome. *Metabolites* 10, 335.
- Kavas, M., İlhan, D., Küfrevioğlu, Ö. İ., & Ellialtıoğlu, Ş. Ş. 2013. Effect of drought stress on oxidative damage and antioxidant enzyme activities in melon seedlings. *Acta Physiologiae Plantarum*, 35(3), 541–551
- Kaya, C., Higgs, D., Kirnak, H., & Taş, I. 2003. Mycorrhizal colonisation improves fruit yield and water use efficiency in watermelon (*Citrullus lanatus* Thunb.) grown under well-watered and water-stressed conditions. *Plant and Soil*, 253(2), 287–292.

- Keymer A, Pimprikar P, Wewer V, Huber C, Brands M, Bucerius SL, Delaux P-M, Klingl V, Röpenack-Lahaye von E, Wang TL vd. 2017. Lipid transfer from plants to arbuscular mycorrhiza fungi. *eLife* 6: e29107.
- Khalvati MA, Hu Y, Mozafar A, Schmidhalter U. 2005. Quantification of water uptake by arbuscular mycorrhizal hyphae and its significance for leaf growth, water relations, and gas exchange of barley subjected to drought stress. *Plant Biology* 7: 706–712.
- Khan, W., Zhu, Y., Khan, A., Zhao, L., Yang, Y.-M., Wang, N., Hao, M., Ma, Y., Nepal, J., Ullah, F., Rehman, M. M. U., Abrar, M., & Xiong, Y.-C. 2024. Above- and below-ground feedback loop of maize is jointly enhanced by plant growth-promoting rhizobacteria and arbuscular mycorrhizal fungi in drier soil. *Science of the Total Environment*, 917, 170417.
- Khan, M. M., Al-Subhi, S. J., Akram, M. T., Al-Busaidi, W., Siddiqi, S. A., & Farooque, A. A. 2024. Effect of regulated deficit irrigation on cucumber growth and fruit yield in greenhouse conditions. *AGRIVITA Journal of Agricultural Science*, 46(3), 572–581.
- Khan, N., & Bano, A. (2019). The role of exopolysaccharides in plant growth promoting rhizobacteria. In A. B. Radhakrishnan (Ed.), *Plant-Microbe Interactions in Agro-Ecological Perspectives* (Vol. 1, pp. 175–187). Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-13-7751-8_8
- Khan, N., Zandi, P., Ali, S., Mehmood, A., Adnan Shahid, M., 2018. Impact of Salicylic Acid and PGPR on the Drought Tolerance and Phytoremediation Potential of *Helianthus annuus*. *Front Microbiol* 9, 2507.
- Khande, R., Sharma, S. K., Ramesh, A., and Sharma, M. P. 2017. Zinc solubilizing *Bacillus* strains that modulate growth, yield and zinc biofortification of soybean and wheat. *Rhizosphere* 4, 126–138. doi:10.1016/j.rhisph.2017.09.002.
- Kim SJ, Eo J-K, Lee E-H, Park H & Eom A-H. 2017. Effects of arbuscular mycorrhizal fungi and soil conditions on crop plant growth. *Mycobiology* 45: 20–24.
- Kishor PKB, Sangam S, Amrutha RN, Laxmi PS, Naidu KR, Rao KRSS vd. 2005 Regulation of proline biosynthesis, degradation, uptake and transport in higher plants: its implications in plant growth and abiotic stress tolerance. *Curr Sci* 88:424–438
- Kivlin SN, Hawkes CV, Treseder KK. 2011. Global diversity and distribution of arbuscular mycorrhizal fungi. *Soil Biology and Biochemistry* 43: 2294–2303.
- Kobayashi Y, Maeda T, Yamaguchi K, Kameoka H, Tanaka S, Ezawa T, Shigenobu S, Kawaguchi, M. 2018. The genome of *Rhizophagus clarus* HR1 reveals a common genetic basis for auxotrophy among arbuscular mycorrhizal fungi. *BMC Genomics* 19: 465–476.
- Kohler, J., Caravaca, F., & Roldán, A. 2009. Effect of drought on the stability of rhizosphere soil aggregates of *Lactuca sativa* grown in a degraded soil inoculated with PGPR and AM fungi. *Applied Soil Ecology*, 42(2), 160–165.

- Kohler, J., Hernández, J. A., Caravaca, F., & Roldán, A. 2008. Plant-growth-promoting rhizobacteria and arbuscular mycorrhizal fungi modify alleviation biochemical mechanisms in water-stressed plants. *Functional Plant Biology*, 35(2), 141–151.
- Kosuta S, Chabaud M, Loughon G, Gough C, Dénarié J, Barker DG & Bécard G. 2003. A diffusible factor from arbuscular mycorrhizal fungi induces symbiosis-specific MtENOD11 expression in roots of *Medicago truncatula*. *Plant Physiology* 131: 952–962.
- Krajinski F, Biela A, Schubert D, Gianinazzi-Pearson V, Kaldenhoff R & Franken P. 2000. Arbuscular mycorrhiza development regulates the mRNA abundance of Mtaqp1 encoding a mercury-insensitive aquaporin of *Medicago truncatula*. *Planta* 211: 85–90.
- Kuan, K. B., Othman, R., Rahim, K. A., and Shamsuddin, Z. H. 2016. Plant growthpromoting rhizobacteria inoculation to enhance vegetative growth, nitrogen fixation and nitrogen remobilisation of maize under greenhouse conditions. *PLoS One* 11, 1– 19. doi:10.1371/journal.pone.0152478.
- Kumar, K., Debnath, P., Singh, S., & Kumar, N. 2023. An Overview of Plant Phenolics and Their Involvement in Abiotic Stress Tolerance. *Stresses*, 3(3), 570-585
- Kumar, A., Maurya, B. R., and Raghuwanshi, R. 2014. Isolation and characterization of PGPR and their effect on growth, yield and nutrient content in wheat (*Triticum aestivum* L.). *Biocatal. Agric. Biotechnol.* 3, 121–128. doi:10.1016/j.bcab.2014.08.003.
- Kusvuran, S., Kiran, S., Ellialtioglu, S.S., 2016. Antioxidant enzyme activities and abiotic stress tolerance relationship in vegetable crops. In: *Abiotic and Biotic Stress in Plants – Recent Advances and Future Perspectives*, InTech.
- Küçükyumuk, Z., Gültekin, M. ve Erdal, İ. (2014). Vermikompost ve mikorizanın biber bitkisinin gelişimi ile mineral beslenmesi üzerine etkisi. *Ziraat Fakültesi Dergisi*, 9(1), 51-58, <https://dergipark.org.tr/tr/download/article-file/308668>
- Kwak JM, Nguyen V, Shroeder JI. 2006. The role of active oxygen species in hormonal responses. *Plant Physiol* 141:323–329
- Lakshmanan, V., Selvaraj, G., Bais, H.P., 2014. Functional soil microbiome: belowground solutions to an aboveground problem. *Plant Physiol* 166, 689-700.
- Laranjeira, S., Fernandes-Silva, A., Reis, S., Torcato, C., Raimundo, F., Ferreira, L., Carnide, V., & Marques, G. 2021. Inoculation of plant growth promoting bacteria and arbuscular mycorrhizal fungi improve chickpea performance under water deficit conditions. *Applied Soil Ecology*, 164, 103927.
- Lau, J.A., Lennon, J.T., 2012. Rapid responses of soil microorganisms improve plant fitness in novel environments. *Proc Natl Acad Sci U S A* 109, 14058-14062.
- Lavakush, Yadav, J., Verma, J. P., Jaiswal, D. K., and Kumar, A. 2014. Evaluation of PGPR and different concentration of phosphorus level on plant growth, yield and nutrient content of rice (*Oryza sativa*). *Ecol. Eng.* 62, 123–128. doi:10.1016/j.ecoleng.2013.10.013.
- Le Pioufle, O., & Declerck, S. 2018. Reducing Water Availability Impacts the Development of the Arbuscular Mycorrhizal Fungus *Rhizophagus irregularis*

- MUCL 41833 and Its Ability to Take Up and Transport Phosphorus Under in Vitro Conditions. *Frontiers in microbiology*, 9, 1254
- Lee B-R, Muneer S, Avice J-C, Jin Jung W, Kim T-H 2012 Mycorrhizal colonisation and Psupplement effects on N uptake and N assimilation in perennial ryegrass under well-watered and drought-stressed conditions. *Mycorrhiza* 22:525–534
- Li, Y., Chen, Y.-L., Li, M., Lin, X.-G., & Liu, R.-J. 2012. Effects of arbuscular mycorrhizal fungi communities on soil quality and the growth of cucumber seedlings in a greenhouse soil of continuously planting cucumber. *Pedosphere*, 22(1), 79–87.
- Li, J., Zhao, G., Jiang, Y., He, Y., Wang, Q., Wei, Y., & Gao, Y. 2020. *Providencia rettgeri*, *Advenella incenata*, *Acinetobacter calcoaceticus*, and *Serratia plymuthica* enhance cucumber seedling development and antioxidative capacity. *Rhizosphere*, 15, 100231.
- Li, Y., Shi, H., Zhang, H., & Chen, S. 2019. Amelioration of drought effects in wheat and cucumber by the combined application of super absorbent polymer and potential biofertilizer. *PeerJ*, 7, e6073.
- Li T, Hu Y-J, Hao Z-P, Li H, Wang Y-S, Chen B-D. 2013. First cloning and characterization of two functional aquaporin genes from an arbuscular mycorrhizal fungus *Glomus intraradices*. *New Phytologist* 197: 617–630.
- Lindsay, W.L. and Norvell, W.A. 1978. Development of a DTPA Soil Test for Zinc, Iron, Manganese and Copper. *Soil Sci. Amer. J.*, 42(3), 421-428. Madison, Wisconsin, USA, 1372-1376.
- Lindstrom, K., and Mousavi, S. A. 2020. Effectiveness of nitrogen fixation in rhizobia. *Microb. Biotechnol.* 13, 1314–1335. doi:10.1111/1751-7915.13517.
- Liu, X.-R., Rong, Z.-Y., Tian, X., Hashem, A., Abd Allah, E. F., Zou, Y.-N., & Wu, Q.-S. 2023. Mycorrhizal fungal effects on plant growth, osmolytes, and CsHsp70s and CsPIPs expression in leaves of cucumber under a short-term heat stress. *Plants*, 12(16), 2917. <https://doi.org/10.3390/plants12162917>
- Liu, Y., He, Z., Appiah-Kubi, D., & Dong, C. 2020. Arbuscular mycorrhizal fungi enhance drought tolerance of maize seedlings by regulating the accumulation of osmolytes and antioxidant enzymes. *Agronomy*, 10(9), 1331.
- Liu, L., Wang, N., Liu, M., Guo, Z. and Shi, S., 2023. Assembly processes underlying bacterial community differentiation among geographically close mangrove forests. *Mlife*, 2(1): 73-88.
- Liu, S., Guo, X., Feng, G., Maimaitiali, B., Fan, J., He, X., 2016. Indigenous arbuscular mycorrhizal fungi can alleviate salt stress and promote growth of cotton and maize in saline fields. *Plant and Soil* 398, 195–206. doi:10.1007/s11104-015-2656-5
- Lopez-Bucio, J., Campos-Cuevas, J. C., Hernandez-Calderon, E., Velasquez-Becerra, C., Farias-Rodriguez, R., Macias-Rodriguez, L. I., vd. 2007. *Bacillus megaterium* rhizobacteria promote growth and alter root-system architecture through an auxinand ethylene-independent signaling mechanism in *Arabidopsis thaliana*. *Mol. Plant- Microbe Interact.* 20, 207–217. doi:10.1094/MPMI-20-2-0207.

- López-Morales, M., León-Martínez, L., Escalona-Buendía, H. B., & Sánchez-Hernández, C. V. 2022. Impact of organic fertilizers associated with mycorrhizae on yield and nutraceutical quality of cucumber. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 13(5), 785–798. <https://doi.org/10.29312/remexca.v13i5.2868>
- Luginbuehl, L.H., Oldroyd, G.E.D., 2017. Understanding the arbuscule at the heart of endomycorrhizal symbioses in plants. *Current Biology* 27, R952–R963. doi:10.1016/J.CUB.2017.06.042
- Lugtenberg, B., and Kamilova, F. 2009. Plant-growth-promoting rhizobacteria. *Annual Review of Microbiology*, 63, 541-556.
- Lurthy, T., Cantat, C., Jeudy, C., Declerck, P., Gallardo, K., Barraud, C., vd. 2020. Impact of bacterial siderophores on iron status and ionome in pea. *Front. Plant Sci.* 11, 1–12. doi:10.3389/fpls.2020.00730.
- Luthfiana N, Inamura N, Tantriani, Sato T, Oikawa A, Chen W, Tawaraya K. 2021. Metabolite profiling of the hyphal exudates of *Rhizophagus clarus* and *Rhizophagus irregularis* under phosphorus deficiency. *Mycorrhiza* 181: 1–10.
- Ma, J., Xie, Y., Yang, Y., Jing, C., You, X., Yang, J., Sun, C., Qin, S., Chen, J., Cao, K., Huang, J., & Li, Y. 2022. AMF colonization affects allelopathic effects of *Zea mays* L. root exudates and community structure of rhizosphere bacteria. *Frontiers in Plant Science*, 13, 1050104.
- Magnan, A.K., Portner, H.O., Duvat, V.K., Garschagen, M., Guinder, V.A., Zommers, Z., Hoegh-Guldberg, O. and Gattuso, J.P., 2021. Estimating the global risk of anthropogenic climate change. *Nature Climate Change*, 11(10): 879-885.
- Mahmud, K., Makaju, S., Ibrahim, R., and Missaoui, A. 2020. Current progress in nitrogen fixing plants and microbiome research. *Plants* 9, 1–17. doi:10.3390/plants9010097.
- Malbreil, M., Tisseront, E., Martin, F., and Roux, C. 2014. Genomics of arbuscular mycorrhizal fungi: out of the shadows. *Advances in Botanical Research*, 70, 259-290.
- Małek, W., Wojcik, M., Swiecicka, I., Thijs, S., and Vangronsveld, J. 2020. Beneficial features of plant growth-promoting rhizobacteria for improving plant growth and health in challenging conditions: A methodical review. *Sci. Total Environ.* 743, 1–21. doi:10.1016/j.scitotenv.2020.140682.
- Malhi, G. S., Kaur, M., Kaushik, P., Alyemeni, M. N., Alsahli, A. A., & Ahmad, P. 2021. Arbuscular mycorrhiza in combating abiotic stresses in vegetables: An eco-friendly approach. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 28(2), 1465–1476.
- Mangmang, J. S., Deaker, R., & Rogers, G. 2015. Effects of Plant Growth Promoting Rhizobacteria on Seed Germination Characteristics of Tomato and Lettuce. *Journal of Tropical Crop Science*, 1(2), 35–40. <https://doi.org/10.29244/JTCS.1.2.35-40>
- Mao, X., Liu, M., Wang, X., Liu, C., Hou, Z., & Shi, J. 2003. Effects of deficit irrigation on yield and water use of greenhouse grown cucumber in the North China Plain. *Agricultural Water Management*, 61(3), 219–228.
- Marschner, H. 1995. Functions of Mineral Nutrients: Micronutrients. In: *Mineral Nutrition of Higher Plants*, 2nd Edition, Academic Press, London, 313-404.

- Martinez, O. A., Encina, C., Tomckowiack, C., Droppelmann, F., Jara, R., Maldonado, C., vd. 2018. Serratia strains isolated from the rhizosphere of rauli (*Nothofagus alpina*) in volcanic soils harbour PGPR mechanisms and promote rauli plantlet growth. J. Soil Sci. Plant Nutr. 18, 804–819. doi:10.4067/S0718-95162018005002302.
- Marulanda, A., Barea, J. M., and Azcon, R. 2009. Stimulation of plant growth and drought tolerance by native microorganisms (AM fungi and bacteria) from dry environments: Mechanisms related to bacterial effectiveness. J. Plant Growth Regul. 28, 115–124. doi:10.1007/s00344-009-9079-6.
- Marulanda, A., R. Porcel, J. Barea and R. Azcón. 2007. Drought tolerance and antioxidant activities in lavender plants colonized by native drought-tolerant or drought sensitive glomus species. Microb. Ecol. 54:543.
- Marulanda, A., Barea, J. M., & Azcón, R. 2006. An indigenous drought-tolerant strain of *Glomus intraradices* associated with a native bacterium improves water transport and root development in *Retama sphaerocarpa*. Microbial Ecology, 52(4), 670-678.
- Mathur, S., Tomar, R. S., and Jajoo, A. 2018. Arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) protects photosynthetic apparatus of wheat under drought stress. Photosynth. Res. 139, 227–238. doi: 10.1007/s11120-018-0538-4
- Maurel C, Verdoucq L, Luu DT, Santoni V. 2008. Plant aquaporins: membrane channels with multiple integrated functions. Annual Review of Plant Biology 59: 595–624.
- Mayak, S., T. Tirosh and B.R. Glick. 2004. Plant growth-promoting bacteria confer resistance in tomato plants to salt stress. Plant Physiol Bioch. 42:565-572.
- Miransari M, Bahrami HA, Rejali F, Malakouti MJ, Torabi H. 2007. Using arbuscular mycorrhiza to reduce the stressful effects of soil compaction on corn (*Zea mays* L.) growth. Soil Biol Biochem 39:2014–2026
- Mittler R. 2002. Oxidative stress, antioxidants and stress tolerance. Trends Plant Sci 7:405–410
- Mo Y, Wang Y, Yang R, Zheng J, Liu C, Li H, Ma J, Zhang Y, Wei C, Zhang X. 2016. Regulation of plant growth, photosynthesis, antioxidation and osmosis by an arbuscular mycorrhizal fungus in watermelon seedlings under well-watered and drought conditions. Frontiers in Plant Science 7: 1 15.
- Mohamed, H. I., El-Beltagi, H. S. D. ve Abd-Elsalam, K. A. (Ed.). 2021. Plant growth-promoting microbes for sustainable biotic and abiotic stress management. Springer.
- Moradi Tarnabi, Z., Iranbakhsh, A., Mehregan, I., & Ahmadvand, R. (2020). Impact of arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) on gene expression of some cell wall and membrane elements of wheat (*Triticum aestivum* L.) under water deficit using transcriptome analysis. Physiology and Molecular Biology of Plants, 26(1), 143–162.
- Mueller, U.G., Sachs, J.L., 2015. Engineering Microbiomes to Improve Plant and Animal Health. Trends Microbiol 23, 606-617.
- Munns R. 1988. Why measure osmotic adjustment. Aust J Plant Physiol 15:717–726

- Nadeem, S. M., Imran, M., Naveed, M., Khan, M. Y., Ahmad, M., Zahir, Z. A., & Crowley, D. E. 2017. Synergistic use of biochar, compost and plant growth-promoting rhizobacteria for enhancing cucumber growth under water deficit conditions. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 97(15), 5139–5145. <https://doi.org/10.1002/jsfa.8393>
- Nadeem, S. M., Ahmad, M., Zahir, Z. A., Javaid, A., & Ashraf, M. 2014. The role of mycorrhizae and plant growth promoting rhizobacteria (PGPR) in improving crop productivity under stressful environments. *Biotechnology Advances*, 32(2), 429–448. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2013.12.005>
- Nagarajan, S., & Nagarajan, S. 2010. Abiotic tolerance and crop improvement. In A. Pareek, S. K. Sopory, H. J. Bohnert, & Govindjee (Eds.), *Abiotic stress adaptation in plants: Physiological, molecular and genomic foundation* (pp. 1–11). Springer.
- Najarian, M., Mohammadi-Ghehsareh, A., & Fallahzadeh, J. 2015. Interactive effects of drought stress and ozonated water on growth and yield of cucumber (*Cucumis sativus* L.). *Journal of Environmental Science and Technology*, 8, 330–337.
- Namlı, A., Mahmood, A., Sevilir, B., & Özkır, E. 2017. Effect of phosphorus solubilizing bacteria on some soil properties, wheat yield and nutrient contents. *Eurasian Journal of Soil Science*, 6(3), 249–258.
- Navarro-Ródenas, A., Lozano-Carrillo, M. C., Pérez-Gilabert, M., & Morte, A. 2011. Effect of water stress on in vitro mycelium cultures of two mycorrhizal desert truffles. *Mycorrhiza*, 21(4), 247–253..
- Nanjundappa, A., Bagyaraj, D.J., Saxena, A.K., Kumar, M., Chakdar, H., 2019. Interaction between arbuscular mycorrhizal fungi and *Bacillus spp.* in soil enhancing growth of crop plants. *Fungal Biology and Biotechnology* 6, 23. doi:10.1186/s40694-019-0086-5
- Narayanasamy, S., Thangappan, S., & Uthandi, S. 2020. Plant growth-promoting *Bacillus sp.* cahoots moisture stress alleviation in rice genotypes by triggering antioxidant defense system. *Microbiological Research*, 239, 126518.
- Naumann, G., L. Alfieri, K. Wyser, L. Mentaschi, R. A. Betts, H. Carrao, J. Spinoni, J. Vogt, and L. Feyen. 2018. Global Changes in Drought Conditions Under Different Levels of Warming. *Geophysical Research Letters* 45 (7): 3285–96.
- Naylor, D., DeGraaf, S., Purdom, E., and Coleman-Derr, D. 2017. Drought and host selection influence bacterial community dynamics in the grass root microbiome. *ISME J* 11: 2691–2704. Oleńska, E.,
- Nie, W., He, Q., Guo, H., Zhang, W., Ma, L., Li, J., & Wen, D. 2024. Arbuscular mycorrhizal fungi: boosting crop resilience to environmental stresses. *Microorganisms*, 12(12), 2448. <https://doi.org/10.3390/microorganisms12122448>
- Ojuederie, O. B., Olanrewaju, O. S. ve Babalola, O. O. 2019. Plant growth promoting rhizobacterial mitigation of drought stress in crop plants: Implications for sustainable agriculture. *Agronomy*, 9(11), 712.
- Olsen , S. R., Cole, C. V., Vatanabe, F. S., Dean L. A. 1954. Estimation of available phosphorus in soil by extraction with sodium bicarbonate. U. S. Dep. Ofagr. Cir.,

- <https://ia903207.us.archive.org/21/items/estimationofavai939olse/estimationofavai939olse.pdf>
- Omar, A. F., Abdelmageed, A. H. A., Al-Turki, A., Abdelhameid, N. M., Sayyed, R. Z., & Rehan, M. 2022. Exploring the plant growth-promotion of four *Streptomyces* strains from rhizosphere soil to enhance cucumber growth and yield. *Plants*, 11(23), 3316.
- Opik M, Davison J, Moora M, Zobel M. 2014. DNA-based detection and identification of Glomeromycota: the virtual taxonomy of environmental sequences. *Botany* 92: 135–147.
- Orhan, E., Esitken, A., Ercisli, S., Turan, M., and Sahin, F. 2006. Effects of plant growth promoting rhizobacteria (PGPR) on yield, growth and nutrient contents in organically growing raspberry. *Sci. Hortic.* 111, 38–43. doi:10.1016/j.scienta.2006.09.002.
- Orsák, M., Kotíková, Z., Hnilička, F., & Lachman, J. 2023. Effect of long-term drought and waterlogging stress on photosynthetic pigments in potato. *Plant, Soil and Environment*, 69(4), 152–160.
- Ortas, I. 2010. Effect of mycorrhiza application on plant growth and nutrient uptake in cucumber production under field conditions. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 8(S1), 116-122. <https://doi.org/10.5424/sjar/201008S1-1230>
- Ortiz, N., Armada, E., Duque, E., Roldán, A., & Azcón, R. 2015. Contribution of arbuscular mycorrhizal fungi and/or bacteria to enhancing plant drought tolerance under natural conditions: Effectiveness of autochthonous versus allochthonous strains. *Journal of Plant Physiology*, 174, 87–96. <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2014.08.019>
- Ouhaddou, R., Ech-chatir, L., Anli, M., Ben-Laouane, R., Boutasknit, A., & Meddich, A. 2023. Secondary metabolites, osmolytes and antioxidant activity as the main attributes enhanced by biostimulants for growth and resilience of lettuce to drought stress. *Gesunde Pflanzen*, 75, 1737–1753.
- Oğuz, K., Pekin, M. A., Gürkan, H., Oğuz, E., vd. 2017. Doğu Akdeniz havzasında kuraklığın era-interim verileri ile belirlenmesi. *Anadolu Tarım Bilimleri Dergisi*, 32(2), 229-236. <https://doi.org/10.7161/omuanajas.321080>
- Pagano, M. C. 2014. Drought stress and mycorrhizal plant. In *Use of Microbes for the Alleviation of Soil Stresses*, Volume 1 (pp. 97-110). Springer, New York, NY.
- Pareek, A., Sopory, S. K., Bohnert, H. J., & Govindjee (Eds.). 2010. Abiotic stress adaptation in plants: Physiological, molecular and genomic foundation. Springer.
- Park, Y. G., Mun, B. G., Kang, S. M., Hussain, A., Shahzad, R., Seo, C. W., vd. 2017. *Bacillus aryabhattai* SRB02 tolerates oxidative and nitrosative stress and promotes the growth of soybean by modulating the production of phytohormones. *PLoS One* 12, 1–28. doi:10.1371/journal.pone.0173203.
- Parkinson, D., Gray, T. R. G., & Williams, S. T. (1971). *Methods for studying the ecology of soil microorganisms* (IBP Handbook No. 19). Oxford: Blackwell Scientific Publications.

- Parkash, V., Singh, A., Jha, P. K., & Minhas, P. S. 2021. Effect of deficit irrigation on physiology, plant growth, and fruit yield of greenhouse cucumber. *Agricultural Water Management*, 248, 106776.
- Partigöç, N. S., & Soğancı, S. 2019. Küresel iklim değişikliğinin kaçınılmaz sonucu: Kuraklık. *Resilience*, Aralık 2019. <https://doi.org/10.32569/resilience.619219>
- Patel, V. K., Naik, H. J., & Amaresan, N. 2021. Inoculation of cucumber (*Cucumis sativus* L.) seedlings with salt-tolerant plant growth promoting bacteria improves nutrient uptake, plant attributes and physiological profiles. *Journal of Plant Growth Regulation*, 40(4), 1728–1740.
- Patten, C. L. ve Glick, B. R. 2002. Role of *Pseudomonas putida* indoleacetic acid in development of the host plant root system. *Applied and Environmental Microbiology*, 68(8), 3795–3801. <https://doi.org/10.1128/AEM.68.8.3795-3801.2002>
- Pauwels R, Graefe J & Bitterlich M. 2023. An arbuscular mycorrhizal fungus alters soil water retention and hydraulic conductivity in a soil texture specific way. *Mycorrhiza* 33: 165–179.
- Pedranzani, H., Rodríguez-Rivera, M., Gutiérrez, M., Porcel, R., Hause, B., Ruiz-Lozano, J.M. 2016. Arbuscular mycorrhizal symbiosis regulates physiology and performance of *Digitaria eriantha* plants subjected to abiotic stresses by modulating antioxidant and jasmonate levels. *Mycorrhiza*, 26:141-152.
- Peña Venegas RA, Lee S-J, Thuita M, Mlay DP, Masso C, Vanlauwe B, Rodriguez A and Sanders IR. 2021. The Phosphate Inhibition Paradigm: Host and Fungal Genotypes Determine Arbuscular Mycorrhizal Fungal Colonization and Responsiveness to Inoculation in Cassava With Increasing Phosphorus Supply. *Front. Plant Sci.* 12:693037. doi: 10.3389/fpls.2021.693037
- Perez-Fernandez, M., and Alexander, V. 2017. Enhanced plant performance in *Cicer arietinum* L. due to the addition of a combination of plant growth-promoting bacteria. *Agriculture* 7. doi:10.3390/agriculture7050040
- Pérez-García, L.-A., Sáenz-Mata, J., Fortis-Hernández, M., Navarro-Muñoz, C. E., Palacio-Rodríguez, R., & Preciado-Rangel, P. 2023. Plant-Growth-Promoting Rhizobacteria Improve Germination and Bioactive Compounds in Cucumber Seedlings. *Agronomy*, 13(2), 315.
- Philippot, L., Raaijmakers, J.M., Lemanceau, P., Van Der Putten, W.H., 2013. Going back to the roots: the microbial ecology of the rhizosphere. *Nature Reviews Microbiology* 11, 789–799. doi:10.1038/nrmicro3109
- Piao, S. L., Ciais, P., Huan, G. Y., Shen, Z. H., Peng, S. S., Li, J. S., vd. 2010. The impacts of climate change on water resources and agriculture in China. *Nature* 467, 43–51. doi: 10.1038/nature09364
- Porcel, R., Aroca, R., & Ruiz-Lozano, J. M. 2012. Salinity stress alleviation using arbuscular mycorrhizal fungi. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 32(1), 181–200.

- Porcel R, Ruiz-Lozano JM. 2004. Arbuscular mycorrhizal influence on leaf water potential, solute accumulation, and oxidative stress in soybean plants subjected to drought stress. *Journal of Experimental Botany* 55: 1743–1750.
- Porcel, R., Zamarreño, Á. M., García-Mina, J. M., & Aroca, R. 2014. Involvement of plant endogenous aba in *Bacillus megaterium* PGPR activity in tomato plants. *BMC Plant Biology*, 14(1), 36. <https://doi.org/10.1186/1471-2229-14-36>
- Porcel R, Barea JM, Ruiz-Lozano JM. 2003. Antioxidant activities in mycorrhizal soybean plants under drought stress and their possible relationship to the process of nodule senescence. *New Phytol* 157:135–143
- Porcel R, Aroca R, Azcón R, Ruiz-Lozano JM. 2006. PIP aquaporin gene expression in arbuscular mycorrhizal *Glycine max* and *Lactuca sativa* in relation to drought stress tolerance. *Plant Mol Biol* 60:389–404
- Poupin, M. J., Greve, M., Carmona, V., and Pinedo, I. 2016. A complex molecular interplay of auxin and ethylene signaling pathways is involved in Arabidopsis growth promotion by *Burkholderia phytofirmans* PsJN. *Front. Plant Sci.* 7, 1–16. doi:10.3389/fpls.2016.00492.
- Pourbabaee, A. A., Koohbori Dinekaboodi, S., Seyed Hosseini, H. M., Alikhani, H. A., and Emami, S. 2020. Potential application of selected sulfur-oxidizing bacteria and different sources of sulfur in plant growth promotion under different moisture conditions. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 51, 735–745. doi:10.1080/00103624.2020.1729377.
- Powell JR, Rillig MC. 2018. Biodiversity of arbuscular mycorrhizal fungi and ecosystem function. *New Phytologist* 220: 1059-1075.
- Prasad, K., Aggarwal, A., Yadav, K., & Tanwar, A. 2012. Impact of different levels of superphosphate using arbuscular mycorrhizal fungi and *Pseudomonas fluorescens* on *Chrysanthemum indicum* L. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 12(3), 451–462.
- Primieri, S., Magnoli, S. M., Koffel, T., Stürmer, S. L., & Bever, J. D. 2022. Perennial, but not annual legumes synergistically benefit from infection with arbuscular mycorrhizal fungi and rhizobia: a meta-analysis. *New Phytologist*, 233(1), 505-514.
- Prisa, Domenico. 2023. Role of microorganisms in horticulture to improve plant quality. *Karbala International Journal of Modern Science*: Vol. 9 : Iss. 1 , Article 4.
- Qin, Y., Wang, X., Dong, H., Ye, T., Du, N., Zhang, T., Piao, F., Dong, X., Shen, S., & Guo, Z. 2025. Plant growth-promoting rhizobacteria *Paenibacillus polymyxa* HL14-3 inoculation enhances drought tolerance in cucumber by triggering abscisic acid-mediated stomatal closure. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 73, 260–272.
- Raheem, A., Shaposhnikov, A., Belimov, A. A., Dodd, I. C., & Ali, B. 2018. Auxin production by rhizobacteria was associated with improved yield of wheat (*Triticum aestivum* L.) under drought stress. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 64(4), 574-587.

- Rajper, A. M., Willing, B. P., Cahill, J. F., Bork, E. W., Chang, S. X., & Carlyle, C. N. 2024. Drought and defoliation affect soil extracellular enzyme activity in northern temperate grasslands. *Journal of Arid Environments*, 223, 105197.
- Ramesh, A., Sharma, S. K., Sharma, M. P., Yadav, N., and Joshi, O. P. 2014. Inoculation of zinc solubilizing *Bacillus aryabhatai* strains for improved growth, mobilization and biofortification of zinc in soybean and wheat cultivated in Vertisols of central India. *Appl. Soil Ecol.* 73, 87–96. doi:10.1016/j.apsoil.2013.08.009.
- Rapparini F, Llusia J, Penuelas J. 2008. Effect of arbuscular mycorrhizal (AM) colonization on Terpene emission and content of *Artemisia annua* L. *Plant Biol* 10:108-122
- Rasouli, F., Amini, T., Skrovankova, S., Asadi, M., Hassanpouraghdam, M. B., Ercisli, S., Buckova, M., Mrazkova, M., & Mlcek, J. 2023. Influence of drought stress and mycorrhizal (*Funneliformis mosseae*) symbiosis on growth parameters, chlorophyll fluorescence, antioxidant activity, and essential oil composition of summer savory (*Satureja hortensis* L.) plants. *Frontiers in Plant Science*, 14, 1151467. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1151467>
- Redecker D. 2000. Specific PCR primers to identify arbuscular mycorrhizal fungi within colonized roots. *Mycorrhiza* 10: 73–80.
- Remy, W., Taylor, T. N., Hass, H., & Kerp, H. 1994. Four Hundred-Million-Year-Old Vesicular Arbuscular Mycorrhizae. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 91(25), 11841–11843.
- Reyna, D.L., and L.G. Wall. 2014. Revision of two colorimetric methods to quantify glomalin-related compounds in soils subjected to different managements. *Biol. Fertil. Soils* 50: 395–400. doi: 10.1007/s00374-013-0834-2.
- Richardson, A. E., Barea, J. M., McNeill, A. M., & Prigent-Combaret, C. 2009. Acquisition of phosphorus and nitrogen in the rhizosphere and plant growth promotion by microorganisms. *Plant and Soil*, 321(1–2), 305–339. <https://doi.org/10.1007/s11104-009-9895-2>
- Rillig MC. 2004. Arbuscular mycorrhizae and terrestrial ecosystem processes. *Ecological Letters* 7: 740–754.
- Rillig MC, Mummey DL. 2006. Mycorrhizas and soil structure. *New Phytologist* 171: 41–53.
- Rock, C. D., Sakata, Y., & Quatrano, R. S. 2010. Stress signaling I: The role of abscisic acid (ABA). In A. Pareek, S. K. Sopory, H. J. Bohnert, & Govindjee (Eds.), *Abiotic stress adaptation in plants* (pp. 33–57). Springer.
- Rodríguez, H. and R. Fraga, 1999. “Phosphate solubilizing bacteria and their role in plant growth promotion,” *Biotechnology Advances*, 17(5), 319–339.
- Roesti, D., Ineichen, K., Braissant, O., Redecker, D., Wiemken, A., & Aragno, M. 2005. Bacteria associated with spores of the arbuscular mycorrhizal fungi *Glomus geosporum* and *Glomus constrictum*. *Applied and environmental microbiology*, 71(11), 6673–6679.
- Roldán A, Díaz-Vivancos P, Hernández JA, Carrasco L, Caravaca F. 2008. Superoxide dismutase and total peroxidase activities in relation to drought recovery

- performance of mycorrhizal shrub seedlings grown in an amended semiarid soil. *J Plant Physiol* 165:715–722
- Rolli, E., Marasco, R., Vigani, G., Ettoumi, B., Mapelli, F., Deangelis, M.L., Gandolfi, C., Casati, E., Previtali, F., Gerbino, R. and Pierotti Cei, F. 2015. Improved plant resistance to drought is promoted by the root-associated microbiome as a water stress-dependent trait. *Environmental microbiology*, 17(2): 316-331.
- Rouphael Y., Cardarelli M., Di Mattia E., Tullio M., Rea E., Colla G. 2010. Enhancement of alkalinity tolerance in two cucumber genotypes inoculated with an arbuscular mycorrhizal biofertilizer containing *Glomus intraradices*. *Biol. Fertil. Soils* 46 409–509. 10.1007/s00374-010-0457-9
- Rolli, E., Marasco, R., Vigani, G., Ettoumi, B., Mapelli, F., Deangelis, M.L., Gandolfi, C., Casati, E., Previtali, F., Gerbino, R. and Pierotti Cei, F., 2015. Improved plant resistance to drought is promoted by the root-associated microbiome as a water stress-dependent trait. *Environmental microbiology*, 17(2): 316-331.
- Ruiz-Lozano JM. 2003. Arbuscular mycorrhizal symbiosis and alleviation of osmotic stress. *New perspectives for molecular studies. Mycorrhiza* 13: 309–317.
- Ruiz-Lozano JM, Azcón R. 1995. Hyphal contribution to water uptake in mycorrhizal plants as affected by the fungal species and water status. *Physiologia Plantarum* 95: 472–478.
- Ruiz-Lozano JM, Azcón R. 1996. Mycorrhizal colonization and drought stress as factors affecting nitrate reductase activity in lettuce plants. *Agric Ecosy Environ* 60:175–181
- Ruiz-Lozano JM, Collados C, Barea JM, Azcón R. 2001. Cloning of cDNAs encoding SODs from lettuce plants which show differential regulation by arbuscular mycorrhizal symbiosis and by drought stress. *J Exp Bot* 52:2241–2242
- Ruiz-Lozano JM, Porcel R, Aroca R. 2006. Does the enhanced tolerance of arbuscular mycorrhizal plants to water deficit involve modulation of drought-induced plant genes? *New Phytol* 171:693–698
- Ruiz-Lozano J, Azcón R, Palma JM. 1996. Superoxide dismutase activity in arbuscularmycorrhizal *Lactuca sativa* L. plants subjected to drought stress. *New Phytol* 134:327–333
- Ruiz-Lozano JM, del Mar Alguacil M, Bárzana G, Vernieri P, Aroca R. 2009. Exogenous ABA accentuates the differences in root hydraulic properties between mycorrhizal and non mycorrhizal maize plants through regulation of PIP aquaporins. *Plant Mol Biol* 70:565–579
- Ruiz-Lozano JM, Azcón R. 1997. Effect of calcium application on the tolerance of mycorrhizal lettuce plants to polyethylene glycol-induced water stress. *Symbiosis* 23:9–21
- Ruiz-Sánchez M., Aroca R., Muñoz Y., Polón R., Ruiz-Lozano J.M. 2010. The arbuscular mycorrhizal symbiosis enhances the photosynthetic efficiency and the antioxidative response of rice plants subjected to drought stress. *Journal of Plant Physiology* 167: 862-869.

- Rouphael, Y., Franken, P., Schneider, C., Schwarz, D., Giovannetti, M., Agnolucci, M., ... & Colla, G. 2015. Arbuscular mycorrhizal fungi act as biostimulants in horticultural crops. *Scientia Horticulturae*, 196, 91–108. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2015.09.002>
- Rouphael, Y., Franken, P., Schneider, C., Schwarz, D., Giovannetti, M., & Agnolucci, M. 2015. Arbuscular mycorrhizal fungi act as bio-stimulants in horticultural crops. *Scientia Horticulturae*, 196, 91–108.
- Ruth B, Khalvati M, Schmidhalter U. 2011. Quantification of mycorrhizal water uptake via high-resolution on-line water content sensors. *Plant and Soil* 342: 459–468.
- Saberi-Riseh, R., Fathi, F., & Moradzadeh-Eskandari, M. 2020. Effect of some *Pseudomonas fluorescens* and *Bacillus subtilis* strains on osmolytes and antioxidants of cucumber under salinity stress. *Journal of Crop Protection*, 9(1), 1–16.
- Sabry, S. R. S., Saleh, S. A., Batchelor, C. A., Jones, J., Jotham, J., Webster, G., vd. 1997. Endophytic establishment of *Azorhizobium caulinodans* in wheat. *Proc. R. Soc.* 264, 341–346.
- Sagar, A., Rathore, P., Ramteke, P. W., Ramakrishna, W., Reddy, M. S., & Pecoraro, L. 2021. Plant Growth Promoting Rhizobacteria, Arbuscular Mycorrhizal Fungi and Their Synergistic Interactions to Counteract the Negative Effects of Saline Soil on Agriculture: Key Macromolecules and Mechanisms. *Microorganisms*, 9(7), 1491
- Sah, S. K., Reddy, K. R., and Li, J. 2016. Absciscic acid and abiotic stress tolerance in crop plants. *Front. Plant Sci.* 7, 1–26. doi:10.3389/fpls.2016.00571.
- Sahin, U., Ekin, M., Kiziloglu, F. M., Yildirim, E., Turan, M., Kotan, R., vd. 2015. Ameliorative effects of plant growth promoting bacteria on water-yield relationships, growth, and nutrient uptake of lettuce plants under different irrigation levels. *HortScience* 50, 1379–1386. doi:10.21273/HORTSCI.50.9.1379.
- Salmeron-Santiago IA, Martínez-Trujillo M, Valdez-Alarcón JJ, Pedraza-Santos ME, Santoyo G, López PA, Larsen J, Pozo MJ & Chávez-Bárcenas AT. 2023. Carbohydrate and lipid balances in the positive plant phenotypic response to arbuscular mycorrhiza: increase in sink strength. *Physiologia Plantarum* 175: e13857
- Sánchez-Blanco MJ, Ferrández T, Morales MA, Morte A, Alarcón JJ. 2004. Variations in water status, gas exchange, and growth in *Rosmarinus officinalis* plants infected with *Glomus deserticola* under drought conditions. *J Plant Physiol* 161:675–682
- Sanchez, F.J., Andres, E.F., Tenorio, J.L., Ayerbe, L., 2004. Growth of Epicotyls, Turgor Maintenance and Osmotic Adjustment in Pea Plants (*Pisum sativum* L.) Subjected to Water Stress. *Field Crops Research*, 86: 81-90.
- Sandhya, V., S. Z. Ali, M. Grover, G. Reddy and B. Venkateswarlu. 2010. "Effect of plant growth promoting *Pseudomonas* spp. on compatible solutes, antioxidant status and plant growth of maize under drought stress." *Journal of Plant Growth Regulation* 62(1): 21-30.

- Sangeeth, K. P., Bhai, R. S., and Srinivasan, V. 2012. *Paenibacillus glucanolyticus*, a promising potassium solubilizing bacterium isolated from black pepper (*Piper nigrum* L.) rhizosphere. J. Spices Aromat. Crop. 21, 118–124.
- Santoyo, G., Moreno-Hagelsieb, G., del Carmen Orozco-Mosqueda, M., and Glick, B. R. 2016. Plant growth-promoting bacterial endophytes. Microbiol. Res. 183, 92–99. doi:10.1016/j.micres.2015.11.008.
- Sardans, J., & Peñuelas, J. 2005. Drought decreases soil enzyme activity in a Mediterranean *Quercus ilex* L. forest. Soil Biology & Biochemistry, 37(3), 455–461.
- Sarma, R. K., and Saikia, R. 2014. Alleviation of drought stress in mung bean by strain *Pseudomonas aeruginosa* GGRJ21. Plant Soil 377, 111–126. doi:10.1007/s11104-013-1981-9.
- Sati, D., Pande, V., Pandey, S.C. vd. 2023. Recent Advances in PGPR and Molecular Mechanisms Involved in Drought Stress Resistance. J Soil Sci Plant Nutr 23, 106–124. <https://doi.org/10.1007/s42729-021-00724-5>
- Sattar, S., Ali, F., Iftikhar, M., Saleem, A., Maha, M., Wajid, M., & Nisar, M. F. 2024. Biological Components in Cucumbers (*Cucumis Sativus* L.): Implications for Pickle Manufacturing and Health Benefits in Fresh and Processed Varieties. Qeios. <https://doi.org/10.32388/0U4W8B>
- Savastano, N., & Bais, H. 2024. Synergism or antagonism: Do arbuscular mycorrhizal fungi and plant growth-promoting rhizobacteria work together to benefit plants? International Journal of Plant Biology, 15(4), 944–958. <https://doi.org/10.3390/ijpb15040067>
- Schreiner, R.P. & Bethlenfalvay, G.J. 1997. Mycorrhizae, biocides, and biocontrol 3. Effects of three different fungicides on developmental stages of three AM fungi. Biol Fert Soils, 24, 18–26.
- Selvakumar, G., Yi, P. H., Lee, S. E., Shagol, C. C., Han, S. G., Sa, T., & Chung, B. N. 2018. Effects of long-term subcultured arbuscular mycorrhizal fungi on red pepper plant growth and soil glomalin content. Mycobiology, 46(2), 122–128.
- Selvakumar, G., Krishnamoorthy, R., Kim, K., Sa, T.M., 2016. Genetic diversity and association characters of bacteria isolated from arbuscular mycorrhizal fungal spore walls. PLoS ONE 11, e0160356. doi:10.1371/journal.pone.0160356
- Serraj R, Sinclair TR. 2002. Osmolyte accumulation: can it really help increase crop yield under drought conditions? Plant Cell Environ 25:333–341
- Shao, S., Zhao, H., Guo, X., Guan, L., & Li, H. 2014. Effects of inoculants (*Chlorobium limicola* and *Rhodopseudomonas palustris*) on nutrient uptake and growth in cucumber. Journal of Nutritional Therapeutics, 3(1), 31–34.
- Sharma, A., D. Shankhdhar and S. Shankhdhar. 2013. "Enhancing grain iron content of rice by the application of plant growth promoting rhizobacteria." Plant Soil and Environment 59: 89.
- Sharma, A., Johri, B. N., Sharma, A. K., and Glick, B. R. 2003. Plant growth-promoting bacterium *Pseudomonas* sp. strain GRP3 influences iron acquisition in mung bean (*Vigna radiata* L. Wilzeck). Soil Biology and Biochemistry, 35(7), 887–894.

- Shehata, S. A., Omar, H. S., Elfaidy, A. G. S., El-Sayed, S. S. F., Abuarab, M. E., & Abdeldaym, E. A. 2022. Grafting enhances drought tolerance by regulating stress-responsive gene expression and antioxidant enzyme activities in cucumbers. *BMC Plant Biology*, 22, 408. <https://doi.org/10.1186/s12870-022-03791-7>
- Shen, K., He, Y., Xu, X., Umer, M., Liu, X., Xia, T., Guo, Y., Wu, B., Xu, H., Zang, L., Gao, L., Jiao, M., Yang, X., & Yan, J. 2022. Effects of AMF on plant nutrition and growth depend on substrate gravel content and patchiness in the karst species *Bidens pilosa* L. *Frontiers in Plant Science*, 13, 968719. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.968719>
- Sheng, X. F., and He, L. Y. 2006. Solubilization of potassium-bearing minerals by a wild-type strain of *Bacillus edaphicus* and its mutants and increased potassium uptake by wheat. *Can. J. Microbiol.* 52, 66–72. doi:10.1139/w05-117.
- Simon L, Bousquet J, Lévesque RC, Lalonde M. 1993. Origin and diversification of endomycorrhizal fungi and coincidence with vascular land plants. *Nature* 363:67–69
- Singh LP, Singh Gill S, Tuteja N. 2011. Unraveling the role of fungal symbionts in plant abiotic stress tolerance. *Plant Signal Behav* 2:175–191
- Škerget, M., Kotnik, P., Hadolin, M., Rižner Hraš, A., Simonič, M., Željko, K., 2005. Phenols, Proanthocyanidins, Flavones and Flavonols in Some Plant Materials and Their Antioxidant Activities. *Food Chemistry*, 89:191-198.
- Smirnoff N. 1993 The role of active oxygen in the response of plants to water deficit and desiccation. *New Phytol* 125:27–58
- Smith FA & Smith SE. 1997. Structural diversity in (vesicular)-arbuscular mycorrhizal symbioses. *The New Phytologist* 137: 373–388.
- Smith SE & Read DJ. 2010a. Arbuscular mycorrhizas. In *Mycorrhizal Symbiosis* (3rd ed.) (Academic Press, Massachusetts, USA): 11-13.
- Smith S.E., Read D.J. 1997. *Mycorrhizal Symbiosis*. 2nd ed. Academic Press: London.
- Smith S.E., Read D.J. 2008. *Mycorrhizal Symbiosis*. 3rd ed. Academic Press: San Diego.
- Smith, F. A., Grace, E. J., & Smith, S. E. 2011. More than a carbon economy: nutrient trade and ecological sustainability in facultative arbuscular mycorrhizal symbioses. *New Phytologist*, 190(4), 961–970.
- Smith SE, Facelli E, Pope S, Smith FA. 2010. Plant performance in stressful environments: interpreting new and established knowledge of the roles of arbuscular mycorrhizal. *Plant Soil* 326:3–20
- Solaiman Z, Saito M. 1997. Use of sugars by intraradical hyphae of arbuscular mycorrhizal fungi revealed by radiorespirometry. *New Phytologist* 136: 533–538.
- Song, H., Wu, G., Wang, H., Huang, R., Gong, X., & Wang, H. 2024. Rhizosphere inoculation of PGPR strain *Bacillus cereus* BC56 enhances salt tolerance of cucumber. *Plant Growth Regulation*, 103, 509–523.
- Spatafora JW, Chang Y, Benny GL, Lazarus K, Smith ME, Berbee ML, Bonito G, Corradi N, Grigoriev I, Gryganskyi A, James TY. 2016. A phylum-level phylogenetic

- classification of zygomycete fungi based on genome-scale data. *Mycologia* 108: 1028–1046.
- Srivastava, S., and Srivastava, S. 2020. Prescience of endogenous regulation in *Arabidopsis thaliana* by *Pseudomonas putida* MTCC 5279 under phosphate starved salinity stress condition. *Sci. Rep.* 10, 1–15. doi:10.1038/s41598-020-62725-1.
- Steudle E. 2000. Water uptake by roots: effects of water deficit. *Journal of Experimental Botany* 51: 1532–1542.
- Steudle E, Peterson CA. 1998. How does water get through roots?. *Journal of Experimental Botany* 49: 775–788.
- Subramanian KS, Charest C 1999 Acquisition of N by external hyphae of an arbuscular mycorrhizal fungus and its impact on physiological responses in maize under drought-stressed and well-watered conditions. *Mycorrhiza* 9:69–75
- Subramanian K, Santhanakrishnan P, Balasubramanian P 2006 Responses of field grown tomato plants to arbuscular mycorrhizal fungal colonization under varying intensities of drought stress. *Sci Hortic* 107:245–253
- Sun, Y., Liu, X., Li, T., Yang, R., & Zhang, J. 2024. Physio-biochemical mechanisms of arbuscular mycorrhizal fungi enhancing plant resistance to abiotic stress. *Agriculture*, 14(12), 2361.
- Sun J, Yang L, Wei J, Quan J, Yang X. 2020. The responses of soil bacterial communities and enzyme activities to the edaphic properties of coal mining areas in Central China. *PLoS one* 15: e0231198.
- Syamsiyah J, Herawati A & Mujiyo. 2018. The potential of arbuscular mycorrhizal fungi application on aggregate stability in alfisol soil. *IOP Conference Series. Earth and Environmental Science* 142: 012045.
- Söylemez, S., Esin, Ş., & Pakyürek, A. Y. 2020. Kısıtlı sulama koşullarında yetiştirilen hıyarın verim ve bazı kalite özelliklerine Waterpad polimer uygulamasının etkisi. *Türk Tarım ve Doğa Bilimleri Dergisi*, 7(4), 1031–1042.
- Tabatabai, MA. 1982. Soil Enzymes, methods of soil analysis, part 2. chemical and microbiological properties. *Agronomy Monograph No:9* (2nd ed.) ASA-SSSA. Madison, Wisconsin. USA, p. 903-943.
- Taktek, S., Tr epanier, M., Magallon Servin, P., St-Arnaud, M., Pich, Y., Fortin, J.-A., Antoun, H., 2015. Trapping of phosphate solubilizing bacteria on hyphae of the arbuscular mycorrhizal fungus *Rhizophagus irregularis* DAOM 197198. *Soil Biology and Biochemistry* 90, 1–9. doi:10.1016/j.soilbio.2015.07.016
- Talbi S, Romero-Puertas M, Hernandez A, Terron Camero L, Ferchichi A, Sandalio L. 2015. Drought tolerance in a Saharian plant *Oudneya africana*: role of antioxidant defenses. *Environmental and Experimental Botany* 111: 114–126.
- Tang, H., Hassan, M. U., Feng, L., Nawaz, M., Shah, A. N., Qari, S. H., Liu, Y., & Miao, J. 2022. The critical role of arbuscular mycorrhizal fungi to improve drought tolerance and nitrogen use efficiency in crops. *Frontiers in Plant Science*, 13, 919166. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.919166>

- Tarım ve Orman Bakanlığı. 2021. İklim değişikliği ve tarım. Tarım Reformu Genel Müdürlüğü, Tarımsal Çevre ve Doğal Kaynakları Koruma Daire Başkanlığı.
- Tatlioglu, T. 1997 Cucumber (*Cucumis sativus* L.). In: Kailov, G. and Bergn, B., Eds., Genetic Improvement of Vegetable Crops, Pergamon Press, Oxford, 197-227.
- Tawaraya K, Naito M & Wagatsuma T. 2006. Solubilization of insoluble inorganic phosphate by hyphal exudates of arbuscular mycorrhizal fungi. Journal of Plant Nutrition 29: 657–665.
- Teotia, P., Kumar, M., Prasad, R., vd. (2017). Mobilization of Micronutrients by Mycorrhizal Fungi. In A. Varma vd. (Eds.), Mycorrhiza - Function, Diversity, State of the Art (pp. 25–49). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-53064-2_2
- Thalmann, A., 1968. Zur Methodik der Bestimmung der Dehydrogenaseaktivität im Boden mittels Triphenyltetrazoliumchlorid (TTC). Landwirtsch Forsch, 21: 249–258
- Tirry, N., Ferioun, M., Kouchou, A., Laghmari, G., Asri, M., Zouitane, I., Bahafid, W., El Omari, B., & El Ghachtouli, N. 2024. Plant growth-promoting rhizobacteria's (PGPR) effects on *Medicago sativa* growth, arbuscular mycorrhizal colonisation, and soil enzyme activities. International Journal of Environmental Studies, 81(3), 1190–1208.
- Tisserant E, Malbreil M, Kuo A, Kohler A, Symeonidi A, Balestrini R, Charron P, Duensing N, dit Frey NF, Gianinazzi-Pearson V. 2013. Genome of an arbuscular mycorrhizal fungus provides insight into the oldest plant symbiosis. Proceedings of the National Academy of Sciences 110: 20117–20122.
- Toljander JF, Artursson V, Paul LR, Jansson JK, Finlay RD. 2006. Attachment of different soil bacteria to arbuscular mycorrhizal fungal extraradical hyphae is determined by hyphal vitality and fungal species. FEMS Microbiology Letters 254: 34–40..
- Toro, M., Azcón, R., & Barea, J.-M. 1997. Improvement of arbuscular mycorrhiza development by inoculation of soil with phosphate-solubilizing rhizobacteria to improve rock phosphate bioavailability and nutrient cycling. Applied and Environmental Microbiology, 63(11), 4408–4412.
- Turan, E. S. 2018. Türkiye'nin iklim değişikliğine bağlı kuraklık durumu. Doğal Afetler ve Çevre Dergisi, 4(1), 63–69. <https://doi.org/10.213247/dacd.357384>
- Tüfenkçi, Ş., Demir, S., Şensoy, S., Ünsal, H., Demirer, E., Erdinç, Ç., Biçer, Ş., & Ekinci alp, A. 2012. The effects of arbuscular mycorrhizal fungi on the seedling growth of four hybrid cucumber (*Cucumis sativus* L.) cultivars. Turkish Journal of Agriculture and Forestry, 36(3), 317–327.
- Türkeş, M. (2012). Türkiye’de gözlenen ve öngörülen iklim değişikliği, kuraklık ve çölleşme. Ankara Üniversitesi Çevre Bilimleri Dergisi, 4(2), 1–32.
- Türkeş M. (2012a) Küresel İklim Değişikliği ve Çölleşme. İçinde: Günümüz Dünya Sorunları – Disiplinlerarası Bir Yaklaşım (ed. N. Özgen), s.1-42. Eğiten Kitap: Ankara
- Uçar, G., Şimşek, M., Topçu, V., Öktüren Asri, F., Ertürk, M. E., & Çelik, İ. (2025). Synergistic effects of biofertilizers and chemical fertilizers on yield and nutritional

- quality of greenhouse-grown lettuce. *Hortis*, 42(2), 80–87. <https://doi.org/10.16882/Hortis.1716339>
- Uehlein N, Fileschi K, Eckert M, Bienert G, Bertl A, Kaldenhoff R 2007 Arbuscular mycorrhizal symbiosis and plant aquaporin expression. *Phytochemistry* 68:122–129
- Uzunoglu, S. (1992). *Toprak bünyesi ve analiz metodları*. Köy Hizmetleri Genel Müdürlüğü Toprak ve Gübre Araştırma Enstitüsü Müdürlüğü.
- Vaid, S. K., Kumar, B., Sharma, A., Shukla, A. K., and Srivastava, P. C. 2014. Effect of zinc solubilizing bacteria on growth promotion and zinc nutrition of rice. *J. Soil Sci. Plant Nutr.* 14, 889–910. doi:10.4067/s0718-95162014005000071.
- Valdebenito, A., Nahuelcura, J., Santander, C., Cornejo, P., Contreras, B., Gómez-Alonso, S., Ruiz, A. 2022. Physiological and Metabolic Effects of the Inoculation of Arbuscular Mycorrhizal Fungi in *Solanum tuberosum* Crops under Water Stress. *Plants* (Basel, Switzerland), 11(19), 2539.
- Van Der Heijden, M. G., Bardgett, R. D., and Van Straalen, N. M. 2008. The unseen majority: soil microbes as drivers of plant diversity and productivity in terrestrial ecosystems. *Ecology letters*, 11 (3), 296-310.
- Vardharajula, S., Ali, S. Z., Grover, M., Reddy, G., and Bandi, V. 2011. Droughttolerant plant growth promoting *Bacillus spp.*: Effect on growth, osmolytes, and antioxidant status of maize under drought stress. *J. Plant Interact.* 6, 1–14. doi:10.1080/17429145.2010.535178.
- Vejan, P., Abdullah, R., Khadiran, T., Ismail, S., and Boyce, A. N. 2016. Role of plant growth promoting rhizobacteria in agricultural sustainability - A review. *Molecules*, 21 (5), 573.
- Vessey, J. K. 2003. "Plant growth promoting rhizobacteria as biofertilizers." *Plant and Soil* 255(2): 571-586.
- Vishwakarma, K., Upadhyay, N., Kumar, N., Yadav, G., Singh, J., Mishra, R. K., vd. 2017. Absciscic acid signaling and abiotic stress tolerance in plants: A review on current knowledge and future prospects. *Front. Plant Sci.* 8, 1–12. doi:10.3389/fpls.2017.00161.
- Vivas, A., Marulanda, A., Ruiz-Lozano, J. M., Barea, J. M., and Azcón, R. 2003. Influence of a *Bacillus sp.* on physiological activities of two arbuscular mycorrhizal fungi and on plant responses to PEG-induced drought stress. *Mycorrhiza*, 13(5), 249-256.
- Vocciante, M., Grifoni, M., Fusini, D., Petruzzelli, G. ve Franchi, E. 2022. The role of plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR) in mitigating plant's environmental stresses. *Applied Sciences*, 12(3), 1231.
- Vyas, P., and Gulati, A. 2009. Organic acid production in vitro and plant growth promotion in maize under controlled environment by phosphate-solubilizing fluorescent *Pseudomonas*. *BMC Microbiol.* 9, 1–15. doi:10.1186/1471-2180-9-174.
- Walley, F. L., Gillespie, A. W., Adetona, A. B., Germida, J. J., & Farrell, R. E. 2014. Manipulation of rhizosphere organisms to enhance glomalin production and C

- sequestration: Pitfalls and promises. *Canadian Journal of Plant Science*, 94(6), 1025–1032. <https://doi.org/10.4141/CJPS2013-146>
- Wang, C. J., Yang, W., Wang, C., Gu, C., Niu, D. D., Liu, H. X., Wang, Y. P., & Guo, J. H. 2012. Induction of drought tolerance in cucumber plants by a consortium of three plant growth-promoting rhizobacterium strains. *PLoS ONE*, 7(12), e52565. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0052565>
- Wang, C., Li, X., Zhou, J., Wang, G., & Dong, Y. 2008. Effects of arbuscular mycorrhizal fungi on growth and yield of cucumber plants. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 39(3–4), 499–509.
- Wang, H.-W., Zhu, Y.-X., Xu, M., Cai, X.-Y., & Tian, F. 2022. Co-application of spent mushroom substrate and PGPR alleviates tomato continuous cropping obstacle by regulating soil microbial properties. *Rhizosphere*, 23, 100563.
- Wang B, Qiu YL. 2006. Phylogenetic distribution and evolution of mycorrhizas in land plants. *Mycorrhiza* 16: 299–363.
- Wang, X.X., Li, H., Chu, Q., Feng, G., Kuyper, T.W. and Rengel, Z., 2020. Mycorrhizal impacts on root trait plasticity of six maize varieties along a phosphorus supply gradient. *Plant and Soil*, 448: 71-86.
- Wewer V, Brands M, Dormann P. 2014. Fatty acid synthesis and lipid metabolism in the obligate biotrophic fungus *Rhizophagus irregularis* during mycorrhization of *Lotus japonicus*. *The Plant Journal* 79: 398–412.
- Wheeler, T., and von Braun, J. 2013. Climate Change Impacts on Global Food Security. *Science* 341 (6145): 508–13.
- Wilkes, T.I., Warner, D.J., Edmonds-Brown, V., Davies, K.G., 2020. Species-specific interactions of bacillus innocula and arbuscular mycorrhizal fungi symbiosis with winter wheat. *Microorganisms* 8, 1–19. doi:10.3390/microorganisms8111795
- Wickham, H. 2016) ggplot2: Elegant graphics for data analysis. Springer. <https://ggplot2.tidyverse.org>
- Wickham, H., François, R., Henry, L., Müller, K., & Vaughan, D. 2023. dplyr: A grammar of data manipulation (R package version 1.1.3) [Computer software]. <https://CRAN.R-project.org/package=dplyr>
- Wickham, H., & Girlich, M. 2023. *tidyr: Tidy Messy Data* (R package version 1.3.0) [Computer software]. <https://CRAN.R-project.org/package=tidyr>
- Wright, S.F., and A. Upadhyaya. 1998. A survey of soils for aggregate stability and glomalin, a glycoprotein produced by hyphae of arbuscular mycorrhizal fungi. *Plant Soil* 198: 97–107. doi: 10.1023/A:1004347701584.
- Wu, Q. S., Zou, Y. N. ve Huang, Y. M. 2013. The arbuscular mycorrhizal fungus *Diversispora spurca* ameliorates effects of waterlogging on growth, root system architecture and antioxidant enzyme activities of citrus seedlings. *Fungal Ecology*, 6, 37–43.
- Wu, Q., Xia, R., & Hu, Z. 2006. Effect of arbuscular mycorrhiza on the drought tolerance of *Poncirus trifoliata* seedlings. *Frontiers of Forestry in China*, 1(1), 100–104.

- Wu, Q.-S., Cao, M.-Q., Zou, Y.-N., & He, X.-H. 2014. Direct and indirect effects of glomalin, mycorrhizal hyphae, and roots on aggregate stability in rhizosphere of trifoliate orange. *Scientific Reports*, 4, 5823.
- Wu, Q. S., Zou, Y. N., & He, X. H. 2017. Mycorrhizal fungi increase the root hydraulic conductance of citrus by enhancing aquaporin expression. *Frontiers in Plant Science*, 8, 1226.
- Wu, Q.-S., Zou, Y.-N., 2017. Arbuscular Mycorrhizal Fungi and Tolerance of Drought Stress in Plants, in: Wu, Q.-S. (Ed.), *Arbuscular Mycorrhizas and Stress Tolerance of Plants*. Springer Singapore, Singapore, pp. 25–41.
- Wu, Q., Zhang, Y., & Li, H. 2011. "The Role of Arbuscular Mycorrhizal Fungi in Improving the Water Status of Plants." *Plant and Soil*, 345(1), 1-12.
- Wu QS, Xia RX. 2006. Arbuscular mycorrhizal fungi influence growth, osmotic adjustment and photosynthesis of citrus under well-watered and water stress conditions. *Journal of Plant Physiology* 163: 417–425.
- Wu QS, Xia RX, Zou YN. 2006a Reactive oxygen metabolism in mycorrhizal and nonmycorrhizal citrus (*Poncirus trifoliata*) seedlings subjected to water stress. *J Plant Physiol* 163:1101–1110
- Wu QS, Zou YN, Xia RX. 2006b. Effects of water stress and arbuscular mycorrhizal fungi on reactive oxygen metabolism and antioxidant production by citrus (*Citrus tangerine*) roots. *European J Soil Biol* 42:166–172
- Xavier, L.J.C., Germida, J.J., 2003. Bacteria associated with *Glomus clarum* spores influence mycorrhizal activity. *Soil Biology and Biochemistry* 35, 471–478. doi:10.1016/S0038- 0717(03)00003-8
- Xiao, Y., Wang, X., Chen, W., and Huang, Q. 2017. Isolation and identification of three potassium-solubilizing bacteria from rape rhizospheric soil and their effects on ryegrass. *Geomicrobiol. J.* 34, 873–880. doi:10.1080/01490451.2017.1286416.
- Xiong, L., and Zhu, J. K. 2002. Molecular and genetic aspects of plant responses to osmotic stress. *Plant, Cell Environ.* 25, 131–139. doi:10.1046/j.1365-3040.2002.00782.x.
- Xiuxiu, S., Yansu, L., Xianchang, Y., & Chaoxing, H. 2019. Effects of arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) inoculums on cucumber seedlings. *Advances in Plants & Agriculture Research*, 9(1), 127–130.
- Yadav, B. K., Akhtar, M. S., and Panwar, J. 2015. Rhizospheric plant-microbe interactions: Key factors to soil fertility and plant nutrition. In N. K. Arora (Ed.) *Plant Microbes Symbiosis: Applied Facets* (pp. 127-145). New Delhi: Springer.
- Yan, Z., Reddy, M. S., Ryu, C. M., McInroy, J. A., Wilson, M., and Kloepper, J. W. 2002. Induced systemic protection against tomato late blight elicited by plant growth-promoting rhizobacteria. *Phytopathology* 92, 1329–1333. doi:10.1094/PHYTO.2002.92.12.1329.
- Yandigeri, M.S., Meena, K.K., Singh, D., Malviya, N., Singh, D.P., Solanki, M.K., Yadav, A.K. and Arora, D.K., 2012. Drought-tolerant endophytic

- actinobacteria promote growth of wheat (*Triticum aestivum*) under water stress conditions. *Plant Growth Regulation*, 68: 411-420.
- Yang, P., Condric, A., Scranton, S., Hebner, C., Lu, L., & Ali, M. A. 2024. Utilizing plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR) to advance sustainable agriculture. *Bacteria*, 3(4), 434–451.
- Yavas, I. & Emek, Y. 2021. The Positive Influence of Arbuscular Mycorrhizal Fungi on Wheat Growth and Physiology under Drought Conditions. *European Journal of Science and Technology*, (31), 409-419
- Yilmaz, H. 2025. Enhancements in morphology, biochemicals, nutrients, and L-Dopa in Faba bean through plant growth promoting rhizobacteria and arbuscular mycorrhizal fungi. *Scientific Reports*, 15, 7390.
- Yooyongwech, S., Samphumphuang, T., Tisarum, R., Theerawitaya, C. Cha-um, S. 2016. Arbuscular mycorrhizal fungi improved water deficit tolerance in two different sweet potato genotypes involves osmotic adjustments via soluble sugar and free proline. *Scientia Horticulturae*, 198, 107–117.
- Youssif, B. D., Hosna, M. A. F., and Mervat, A. A. T. (2015). Effect of sulphur and sulphur oxidizing bacteria on growth and production of garlic (*Allium sativum*, L.) under saline conditions. *Middle East J. Agric. Res.* 4, 446–459.
- Yu, L., Zhang, H., Zhang, W., Liu, K., Liu, M., & Shao, X. 2022. Cooperation between arbuscular mycorrhizal fungi and plant growth-promoting bacteria and their effects on plant growth and soil quality. *PeerJ*, 10, e13080.
- Yu, L., Zhang, H., Zhang, W., Liu, K., Liu, M., & Shao, X. 2022. Cooperation between arbuscular mycorrhizal fungi and plant growth-promoting bacteria and their effects on plant growth and soil quality. *PeerJ*, 10, e13080.
- Yuan MM, Kakouridis A, Starr E, Nguyen N, Shi S, Pett-Ridge J, Nuccio E, Zhou J, Firestone M. 2021. Fungal-bacterial cooccurrence patterns differ between arbuscular mycorrhizal fungi and nonmycorrhizal fungi across soil niches. *mBio* 12: e03509-20.
- Yıldız, A. 2010. A native *Glomus* sp. from fields in Aydın province and effects of native and commercial mycorrhizal fungi inoculants on the growth of some vegetables. *Turkish Journal of Biology*, 34(4), 447–452.
- Zaheer, A., B. S. Mirza, J. E. Mclean, S. Yasmin, T. M. Shah, K. A. Malik and M. S. Mirza 2016. "Association of plant growth-promoting *Serratia* spp. with the root nodules of chickpea." *Research in Microbiology* 167(6): 510-520.
- Zaller, J. G., T. Frank and T. Drapela. 2011. "Soil sand content can alter effects of different taxa of mycorrhizal fungi on plant biomass production of grassland species." *European Journal of Soil Biology* 47(3): 175-181.
- Zapata-Sifuentes, G., Hernández-Montiel, L. G., Sáenz-Mata, J., Fortis-Hernández, M., Blanco-Contreras, E., Chiquito-Contreras, R. G., & Preciado-Rangel, P. 2022. Plant growth-promoting rhizobacteria improve growth and fruit quality of cucumber under greenhouse conditions. *Plants*, 11(12), 1612. <https://doi.org/10.3390/plants11121612>

- Zapata-Sifuentes, G., Fortis-Hernández, M., Sáenz-Mata, J., Silva-Martínez, C., Lara-Capistran, L., Preciado-Rangel, P., & Hernández-Montiel, L. G. 2024. Effect of Plant Growth Promoting Rhizobacteria on the Development and Biochemical Composition of Cucumber under Different Substrate Moisture Levels. *Microbiology Research*, 15(3), 1505-1515.
- Zboralski, A. ve Fillion, M. 2023. *Pseudomonas spp.* can help plants face climate change. *Frontiers in Microbiology*, 14, 1198131.
- Zhang, M.-T., Bao, Y.-Q., Feng, B.-Y., Xu, L.-R., Zhang, Y.-T., Wang, E.-X., & Chen, Y.-P. 2024. Impact of a potent strain of plant growth-promoting bacteria (PGPB), *Bacillus subtilis* S1 on bacterial community composition, enzymatic activity, and nitrogen content in cucumber rhizosphere soils. *Current Microbiology*, 81, 358.
- Zhang, J. L., Zhao, R. T., Li, X., & Zhang, J. Z. 2024. Potential of arbuscular mycorrhizal fungi for soil health: A review. *Pedosphere*, 34(2), 279–288. <https://doi.org/10.1016/j.pedsph.2024.02.002>
- Zhang, L., Li, M., & Chen, H. 2023. Effects of drought stress on photosynthetic physiological characteristics and chlorophyll fluorescence parameters in blue honeysuckle. *Plants*, 13(15), 2115.
- Zhang, Z., Zhou, Z., Feng, S., Guo, P., Wang, Y., Hao, B., Guo, W., & Li, F. Y. 2024. Synergistic effects of AMF and PGPR on improving saline-alkaline tolerance of *Leymus chinensis* by strengthening the link between rhizosphere metabolites and microbiomes. *Environmental Technology & Innovation*, 36, 103900
- Zhang, B., Lyu, Y. F., Li, L., Feng, M. C., Wang, C., Song, X. Y., Yang, W. D., & Zhang, M. J. 2024. Effects of AMF and phosphorus application on microbial biomass and enzyme activities in oat soil under drought stress. *Chinese Journal of Ecology*, 43(3), 644–655.
- Zhang, C., and Kong, F. 2014. Isolation and identification of potassium-solubilizing bacteria from tobacco rhizospheric soil and their effect on tobacco plants. *Appl. Soil Ecol.* 82, 18–25. doi:10.1016/j.apsoil.2014.05.002.
- Zhang, F., Wang, P., Zou, Y.N., Wu, Q.S. and Kuča, K., 2019. Effects of mycorrhizal fungi on root-hair growth and hormone levels of taproot and lateral roots in trifoliate orange under drought stress. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 65(9): 1316-1330.
- Zhang, L., Shi, N., Fan, J., Wang, F., George, T.S. and Feng, G., 2018. Arbuscular mycorrhizal fungi stimulate organic phosphate mobilization associated with changing bacterial community structure under field conditions. *Environmental Microbiology*, 20(7): 2639-2651.
- Zhang F, Zou Y-N, Wu Q-S & Kuča K. 2020b. Arbuscular mycorrhizas modulate root polyamine metabolism to enhance drought tolerance of trifoliate orange. *Environmental and Experimental Botany* 171: 103926.
- Zhao,R., Guo, W., Bi, N., Guo, J., Wang, L., Zhao,J., Zhang,J. 2015. Arbuscular mycorrhizal fungi affect the growth, nutrient uptake and water status of maize (*Zea mays*, L.) grown in two types of coal mine spoils under drought stress. *Appl Soil Ecol.*,88:41-49.

- Zhou, Y., Wang, Y., Zhu, X., Liu, R., Xiang, P., Chen, J., Liu, X., Duan Y., and Chen, L. 2018. Management of the soybean cyst nematode *Heterodera glycines* with combinations of different rhizobacterial strains on soybean. PLoS One, 13(3), eO 194287.
- Zhu B, Gao T, Zhang D, Ding K, Li C, Ma F. 2022. Functions of arbuscular mycorrhizal fungi in horticultural crops. Sci Hortic 303:111219.
- Zou, Y.-N., Wang, P., Liu, C.-Y., Ni, Q.-D., Zhang, D.-J., Wu, Q.-S., 2017. Mycorrhizal trifoliate orange has greater root adaptation of morphology and phytohormones in response to drought stress. Sci. Rep. 7, 41134.
- Zou, Y. N., Huang, Y. M., Wu, Q. S., & He, X. H. 2015. Mycorrhiza-induced lower oxidative burst is related with higher antioxidant enzyme activities, net H₂O₂ effluxes, and Ca²⁺ influxes in trifoliate orange roots under drought stress. Mycorrhiza, 25(2), 143-152.

7. EKLER

Ek 1. Sonbahar döneminde farklı sulama düzeylerinde gübre uygulamalarının bitki morfolojik özellikleri üzerine etkisi. Aynı sulama konusunda farklı harflerle gösterilen ortalama (n=3) değerler, Tukey's HSD testine göre istatistiksel olarak farklılık göstermektedir ($p < 0.05$).

Sulama	Gübreleme	BB (cm)	GÇ (mm)	BYA (g)	BKA (g)	YS (adet)	YA (cm ²)	KYA (g)	KKA (g)
KS1	M0B0	181 c	8.1 b	412 c	40 b	19 b	443 c	22.7 b	1.4 b
	O	221 b	8.9 b	549 b	48 ab	24 a	507 bc	27.8 ab	1.8 ab
	B	237 ab	10.0 a	598 ab	53 a	24 a	546 b	30.1 a	1.8 ab
	M	242 a	10.0 a	618 a	53 a	25 a	631 a	32.1 a	1.9 ab
	MB	245 a	10.7 a	624 a	56 a	25 a	666 a	34.0 a	2.1 a
KS2	M0B0	167 c	6.3 b	296 c	36 b	16 b	412 a	20.3 a	1.2 a
	O	186 c	7.2 ab	404 b	42 ab	17 ab	424 a	24.0 a	1.4 a
	B	209 a	7.6 a	453 a	48 ab	18 ab	494 a	23.9 a	1.4 a
	M	211 a	8.0 a	468 a	50 a	19 ab	513 a	26.0 a	1.5 a
	MB	215 a	8.2 a	482 a	50 a	19 a	552 a	25.9 a	1.4 a
KS3	M0B0	106 b	5.4 b	114 c	11 b	12 b	167 a	10.7 b	1.1 a
	O	115 b	6.1 ab	237 b	25 a	15 a	183 a	13.2 b	1.2 a
	B	134 a	6.5 a	284 a	29 a	16 a	220 a	19.1 a	1.1 a
	M	138 a	6.4 a	290 a	29 a	16 a	238 a	19.5 a	1.1 a
	MB	142 a	6.4 a	298 a	30 a	17 a	249a	20.3 a	1.1 a
KS1		<0.0001	0.0002	<0.0001	0.0092	0.0003	0.0001	0.0020	0.0244
KS2		<0.0001	0.0031	<0.0001	0/0268	0.0255	0.0553	0.0605	0.0687
KS3		0.0003	0.0261	<0.0001	0.0001	0.0006	0.0419	<0.0001	0.5574

BB: Bitki boyu, GÇ: Bitki gövde çapı, BYA: Bitki yaş ağırlığı, BKA: Bitki kuru ağırlığı, YS: Yaprak sayısı, YA: Yaprak alanı, KYA: Kök yaş ağırlığı, KKA: Kök kuru ağırlığı

Ek 2. İlkbahar döneminde farklı sulama düzeylerinde gübre uygulamalarının bitki morfolojik özellikleri üzerine etkisi. Aynı sulama konusunda farklı harflerle gösterilen ortalama (n=3) değerler, Tukey's HSD testine göre istatistiksel olarak farklılık göstermektedir ($p < 0.05$).

Sulama	Gübreleme	BB (cm)	GÇ (mm)	BYA (g)	BKA (g)	YS (adet)	YA (cm ²)	KYA (g)	KKA (g)
KS1	M0B0	188 c	8.5 c	436 b	48 c	19 c	504 b	27.4 d	1.2 b
	O	220 b	10.1 b	583 a	56 b	24 b	553 b	32.6 cd	2.6 a
	B	237 ab	10.5 ab	630 a	60 ab	25 b	596 ab	33.9 c	3.1 a
	M	241 a	10.7 ab	639 a	59 ab	25 ab	707 a	41.0 b	2.4 ab
	MB	256 a	11.0 a	650 a	64 a	27 a	681 a	46.8 a	3.0 a
KS2	M0B0	170 c	7.4 d	313 c	43 b	16 c	499 bc	22.4 c	0.9 b
	O	188 c	8.1 c	421 b	51 ab	17 bc	474 c	28.9 b	1.2 b
	B	215 a	8.9 b	485 a	56 a	19 ab	547 bc	30.0 b	2.1 a
	M	214 a	9.2 b	489 a	61 a	19 a	673 a	34.8 a	2.1 a
	MB	219 a	9.8 a	511 a	59 a	20 a	585 ab	37.1 a	2.9 a
KS3	M0B0	111 b	5.8 d	138 c	18 b	11 d	182 b	18.8 c	1.2 b
	O	122 b	6.7 c	268 b	34 a	14 c	214 b	22.1 bc	1.8 ab
	B	142 a	7.2 b	316 a	34 a	15 bc	283 a	24.8 b	2.1 a
	M	146 a	7.3 b	322 a	37 a	16 ab	288 a	25.5 b	2.2 ab
	MB	163 a	7.7 a	332 a	36 a	17 a	317 a	28.6 a	1.8 ab
KS1		<0.0001	<0.0001	<0.0001	0.0002	<0.0001	0.0012	<0.0001	0.0018
KS2		0.0002	<0.0001	<0.0001	0.0032	<0.0001	0.0018	<0.0001	<0.0001
KS3		<0.0001	<0.0001	<0.0001	0.0001	<0.0001	0.0004	<0.0001	0.0493

BB: Bitki boyu, GÇ: Bitki gövde çapı, BYA: Bitki yaş ağırlığı, BKA: Bitki kuru ağırlığı, YS: Yaprak sayısı, YA: Yaprak alanı, KYA: Kök yaş ağırlığı, KKA: Kök kuru ağırlığı

Ek 3. Sonbahar döneminde farklı sulama düzeylerinde gübre uygulamalarının bitki fizyolojik özellikleri üzerine etkisi. Aynı sulama konusunda farklı harflerle gösterilen ortalama (n=3) değerler, Tukey's HSD testine göre istatistiksel olarak farklılık göstermektedir ($p < 0.05$).

Sulama	Gübreleme	YOSİ	Ka	Kb	TK	EG
KS1	M0B0	72.4 d	1.33 c	1.09 a	2.40 b	65.5 a
	O	74.3 c	1.64 b	1.18 a	2.81 a	63.4 a
	B	77.3 b	1.76 a	1.16 a	2.90 a	62.6 a
	M	80.8 a	1.74 a	1.18 a	2.90 a	62.3 a
	MB	82.3 a	1.79 a	1.17 a	2.94 a	59.9 a
KS2	M0B0	69.2 b	1.12 c	0.50 bc	1.61 b	73.2 a
	O	70.8 b	1.27 b	0.45 c	1.72 b	68.8 a
	B	75.8 a	1.47 a	0.66 a	2.11 a	63.4 a
	M	76.2 a	1.49 a	0.63 ab	2.11 a	66.1 a
	MB	78.6 a	1.44 a	0.61 ab	2.04 a	62.7 a
KS3	M0B0	57.9 c	1.04 b	0.26 b	1.29 c	80.7 a
	O	61.3 bc	1.14 ab	0.37 ab	1.51 b	77.9 ab
	B	64.3 ab	1.19 a	0.48 a	1.67 a	71.5 ab
	M	65.7 ab	1.24 a	0.44 a	1.67 a	70.9 ab
	MB	67.4 a	1.26 a	0.45 a	1.70 a	68.6 b
KS1		<0.0001	<0.0001	0.2194	<0.0001	0.5720
KS2		<0.0001	<0.0001	0.0046	<0.0001	0.0821
KS3		0.0023	0.0041	0.0142	<0.0001	0.0255

YOSİ: Yaprak oransal su içeriği, Ka: Klorofil-a, Kb: Klorofil-b, TK: Toplam klorofil, EG: Elektrolit geçirgenlik

Ek 4. İlkbahar döneminde farklı sulama düzeylerinde gübre uygulamalarının bitki fizyolojik özellikleri üzerine etkisi. Aynı sulama konusunda farklı harflerle gösterilen ortalama (n=3) değerler, Tukey's HSD testine göre istatistiksel olarak farklılık göstermektedir ($p < 0.05$)

Sulama	Gübreleme	YOSİ	Ka	Kb	TK	EG
KS1	M0B0	72.3 a	1.41 b	0.88 b	2.28 c	56.0 a
	O	73.9 a	1.61 ab	1.08 a	2.68 b	53.8 ab
	B	75.8 a	1.68 a	1.15 a	2.81 ab	51.5 bc
	M	77.4 a	1.68 a	1.24 a	2.90 ab	50.2 c
	MB	79.2 a	1.77 a	1.24 a	2.99 a	46.9 d
KS2	M0B0	69.0 a	1.14 d	0.60 b	1.73 d	70.3 a
	O	71.9 a	1.25 c	0.73 bc	1.96 c	67.1 ab
	B	72.3 a	1.45 b	0.82 ab	2.26 b	63.2 bc
	M	72.9 a	1.52 ab	0.81 b	2.32 b	63.4 b
	MB	73.5 a	1.56 a	0.98 a	2.53 a	57.9 c
KS3	M0B0	56.8 b	1.06 c	0.30 b	1.35 c	76.7 a
	O	61.9 ab	1.22 b	0.40 ab	1.61 b	75.5 a
	B	63.6 a	1.27 ab	0.52 a	1.78 a	73.5 a
	M	64.8 a	1.30 a	0.46 a	1.75 ab	71.8 ab
	MB	65.3 a	1.33 a	0.48 a	1.80 a	67.8 b
KS1		0.1012	0.0033	0.0013	0.0003	<0.0001
KS2		0.3141	<0.0001	0.0006	<0.0001	0.0005
KS3		0.0122	<0.0001	0.0023	<0.0001	0.0040

YOSİ: Yaprak oransal su içeriği, Ka: Klorofil-a, Kb: Klorofil-b, TK: Toplam klorofil, EG: Elektrolit geçirgenlik

Ek 5. Sonbahar döneminde farklı sulama düzeylerinde gübre uygulamalarının bitki biyokimyasal özellikleri üzerine etkisi. Aynı sulama konusunda farklı harflerle gösterilen ortalama (n=3) değerler, Tukey's HSD testine göre istatistiksel olarak farklılık göstermektedir ($p < 0.05$).

Sulama	Gübreleme	TF	PRL	MDA	SOD	POD
KS1	M0B0	0.64 a	2.87 a	51 a	68 a	36 c
	O	0.71 a	2.41 a	48 ab	73 a	51 b
	B	0.62 ab	2.12 a	40 bc	73 a	64 ab
	M	0.48 bc	2.14 a	38 c	71 a	61 ab
	MB	0.53 c	2.03 a	35 c	73 a	69 a
KS2	M0B0	0.65 d	5.49 a	65 a	75 a	55 c
	O	0.75 c	6.74 a	58 b	78 a	63 bc
	B	0.80 b	8.66 a	54 b	81 a	78 ab
	M	0.90 a	7.33 a	47 c	80 a	71 bc
	MB	0.83 b	8.61 a	45 c	82 a	95 a
KS3	M0B0	0.97 e	17.73c	113 a	80 b	100 b
	O	1.13 d	24.59 bc	93 b	81 ab	108 b
	B	1.60 b	32.57 ab	67 c	84 ab	118 ab
	M	1.44 c	29.83 ab	69 c	88 ab	123 ab
	MB	1.84 a	38.89 a	60 c	92 a	135 a
KS1		0.0002	0.7581	0.0021	0.4333	0.0003
KS2		<0.0001	0.0960	<0.0001	0.0787	0.0005
KS3		<0.0001	0.0005	<0.0001	0.0479	0.0081

TF: Toplam fenol, PRL: Prolin, MDA: Malondialdehit, SOD: Süperoksit dismutaz, POD: Peroksidaz

Ek 6. İlkbahar döneminde farklı sulama düzeylerinde gübre uygulamalarının bitki biyokimyasal özellikleri üzerine etkisi. Aynı sulama konusunda farklı harflerle gösterilen ortalama (n=3) değerler, Tukey's HSD testine göre istatistiksel olarak farklılık göstermektedir ($p < 0.05$).

Sulama	Gübreleme	TF	PRL	MDA	SOD	POD
KS1	M0B0	0.70 a	1.93 a	47 a	76 a	45 c
	O	0.74 a	1.76 a	44 ab	80 a	55 bc
	B	0.77 a	1.59 a	36 bc	80 a	71 ab
	M	0.74 a	1.86 a	34 c	79 a	67 ab
	MB	0.81 a	1.32 a	30 c	81 a	78 a
KS2	M0B0	0.72 a	4.44 c	59 a	83 a	62 c
	O	0.79 a	5.15 bc	58 a	86 a	72 bc
	B	0.86 a	7.66 a	49 b	88 a	96 ab
	M	0.88 a	6.67 ab	44 b	88 a	80 bc
	MB	0.91 a	8.49 a	41 c	90 a	116 a
KS3	M0B0	1.03 c	16.75 c	92 a	87 b	110 c
	O	1.09 c	19.26 bc	73 b	90 b	131 bc
	B	1.66 ab	25.35 ab	59 c	91 ab	155 b
	M	1.37 bc	24.73 ab	58 c	95 ab	154 b
	MB	1.90 a	28.26 a	52 c	98 a	187 a
KS1		0.5715	0.1731	0.0015	0.4333	0.0008
KS2		0.1827	0.0011	<0.0001	0.0787	0.0004
KS3		0.0002	0.0022	<0.0001	0.0070	<0.0001

TF: Toplam fenol, PRL: Prolin, MDA: Malondialdehit, SOD: Süperoksit dismutaz, POD: Peroksidaz

Ek 7. Sonbahar döneminde farklı sulama düzeylerinde gübre uygulamalarının meyve verimi ve kalite özellikleri üzerine etkisi. Aynı sulama konusunda farklı harflerle gösterilen ortalama (n=3) değerler, Tukey's HSD testine göre istatistiksel olarak farklılık göstermektedir ($p < 0.05$).

Sulama	Gübreleme	SÇKM	MST	MS	VR
KS1	M0B0	1.7 a	8.2 a	15.9 a	4998 c
	O	2.4 a	8.6 a	17.3 a	6480 b
	B	2.5 a	9.1 a	17.7 a	6863 a
	M	2.4 a	9.2 a	18.3 a	6963 a
	MB	2.4 a	9.3 a	19.0 a	7046 a
KS2	M0B0	2.7 a	7.4 a	14.0 b	3928 c
	O	3.2 a	7.5 a	16.0 ab	4710 b
	B	3.4 a	8.1 a	16.7 ab	5294 ab
	M	3.5 a	8.2 a	16.7 ab	5482 a
	MB	3.7 a	8.4 a	17.7 a	5897 a
KS3	M0B0	3.2 a	5.8 a	11.1 a	2711 c
	O	3.8 a	6.5 a	12.4 a	3173 b
	B	4.2 a	7.0 a	12.5 a	3983 a
	M	4.3 a	7.1 a	13.5 a	4086 a
	MB	4.4 a	7.1 a	14.0 a	4153 a
KS1		0.1043	0.2380	0.0778	<0.0001
KS2		0.1289	0.1950	0.0357	<0.0001
KS3		0.0751	0.2744	0.1739	<0.0001

SÇKM: Suda çözünür kuru madde, MST: Meyve sertlik, MS: Meyve sayısı, VR: Verim

Ek 8. İlkbahar döneminde farklı sulama düzeylerinde gübre uygulamalarının meyve verimi ve kalite özellikleri üzerine etkisi. Aynı sulama konusunda farklı harflerle gösterilen ortalama (n=3) değerler, Tukey's HSD testine göre istatistiksel olarak farklılık göstermektedir ($p < 0.05$).

Sulama	Gübreleme	SÇKM	MST	MS	VR
KS1	M0B0	2.1 b	8.2 b	16.8 b	5031 c
	O	2.4 ab	8.7 ab	18.6 ab	6468 b
	B	2.6 a	8.8 ab	18.7 a	7014 a
	M	2.8 a	8.9 a	18.8 a	7064 a
	MB	2.9 a	8.8 ab	19.7 a	7210 a
KS2	M0B0	2.8 b	6.6 b	14.4 b	4028 d
	O	3.0 ab	7.3 ab	17.5 a	4892 c
	B	3.2 ab	7.6 ab	18.2 a	5552 b
	M	3.3 ab	7.8 a	18.1 a	5657 ab
	MB	3.6 a	7.7 ab	18.7 a	6043 a
KS3	M0B0	3.1 c	6.2 b	11.7 c	2746 c
	O	3.5 bc	6.5 ab	13.0 b	3287 b
	B	3.9 ab	6.8 ab	13.0 b	4033 a
	M	4.1 a	6.9 ab	13.4 ab	4121 a
	MB	4.2 a	7.1 a	14.1 a	4226 a
KS1		0.0030	0.0223	0.0070	<0.0001
KS2		0.0222	0.0408	0.0030	<0.0001
KS3		0.0006	0.0141	0.0004	<0.0001

SÇKM: Suda çözünür kuru madde, MST: Meyve sertlik, MS: Meyve sayısı, VR: Verim

Ek 9. Sonbahar döneminde farklı sulama düzeylerinde gübre uygulamalarının toprak biyolojik özellikleri üzerine etkisi. Aynı sulama konusunda farklı harflerle gösterilen ortalama (n=3) değerler, Tukey's HSD testine göre istatistiksel olarak farklılık göstermektedir ($p < 0.05$).

Sulama	Gübreleme	KK	AS	GRSP	ALP	DG	BG
KS1	M0B0	16.00 c	9.00 b	5.30 c	982 c	8.17 d	3.08 c
	O	18.00 bc	15.67 b	5.74 bc	1126 c	10.30 c	3.86 b
	B	22.73 b	23.67 b	6.18 b	1679 a	11.73 b	4.55 ab
	M	73.10 a	80.00 a	8.77 a	1457 b	13.06 a	4.47 ab
	MB	76.53 a	96.00 a	8.93 a	1698 a	14.01 a	4.96 a
KS2	M0B0	11.73 d	7.67 b	4.63 c	712 c	6.03 c	3.02 b
	O	12.30 d	13.67 b	5.31 bc	860 c	7.65 b	3.84 a
	B	18.23 c	20.67 b	5.69 b	1326 a	9.60 a	4.48 a
	M	64.80 b	71.67 a	7.42 a	1086 b	9.82 a	4.40 a
	MB	69.70 a	84.00 a	7.40 a	1398 a	10.23 a	4.48 a
KS3	M0B0	9.03 d	6.33 b	2.82 c	393 d	4.47 d	2.19 c
	O	11.63 cd	11.33 b	4.28 b	638 c	5.99 c	2.88 b
	B	13.37 c	14.00 b	4.86 b	887 b	7.23 b	3.85 a
	M	44.10 b	41.33 a	5.98 a	825 b	8.00 ab	3.82 a
	MB	48.60 a	51.67 a	6.28 a	1000 a	8.36 a	3.97 a
KS1		<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001	0.0002
KS2		<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001	0.0005
KS3		<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001

KK: Kök kolonizasyonu, AS: AMF spor sayısı, GRSP: Glomalin, ALP: Alkalın fosfotaz, DG: Dehidrogenaz, BG: Beta glukosidaz

Ek 10. İlkbahar döneminde farklı sulama düzeylerinde gübre uygulamalarının toprak biyolojik özellikleri üzerine etkisi. Aynı sulama konusunda farklı harflerle gösterilen ortalama (n=3) değerler, Tukey's HSD testine göre istatistiksel olarak farklılık göstermektedir ($p < 0.05$).

Sulama	Gübreleme	KK	AS	GRSP	ALP	DG	BG
KS1	M0B0	14.07 c	7.00 d	5.74 b	1116 c	9.67 c	3.63 c
	O	20.53 bc	12.00 d	6.21 b	1271 c	11.90 b	4.53 b
	B	33.53 b	31.67 c	6.64 b	1912 a	13.31 ab	5.04 ab
	M	69.73 a	73.67 b	8.92 a	1697 b	14.11a	5.26 ab
	MB	79.23 a	92.67 a	9.53 a	1972 a	14.78 a	5.80 a
KS2	M0B0	10.46 b	6.33 b	5.08 c	789 d	7.56 d	3.31 b
	O	14.37 b	9.67 b	5.76 bc	954 c	8.94 c	3.59 ab
	B	22.40 b	24.33 b	6.11 b	1467 a	9.59 bc	4.28 ab
	M	60.27 a	62.33 a	7.82 a	1211 b	10.21 ab	4.69 ab
	MB	71.53 a	73.00 a	7.88 a	1570 a	10.59 a	4.93 a
KS3	M0B0	8.27 b	4.33 b	3.24 d	445 d	5.51 c	2.44 c
	O	11.43 b	5.33 b	4.61 c	711 c	6.49 bc	3.09 b
	B	13.37 b	14.33 b	5.26 b	977 b	7.70 ab	3.67 ab
	M	42.20 a	37.00 a	6.29 a	914 b	7.85 a	3.87 a
	MB	45.63 a	48.33 a	6.65 a	1108 a	8.41 a	4.06 a
KS1		<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001	0.0002
KS2		<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001	0.0215
KS3		<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001	0.0002	<0.0001

KK: Kök kolonizasyonu, AS: AMF spor sayısı, GRSP: Glomalin, ALP: Alkalın fosfat, DG: Dehidrogenaz, BG: Beta glukosidaz

ÖZGEÇMİŞ

Gökhan UÇAR

ÖĞRENİM BİLGİLERİ

Doktora	Akdeniz Üniversitesi
2019-2025	Fen Bilimleri Enstitüsü, Toprak Bilimi ve Bitki Besleme Anabilim Dalı, Antalya
Yüksek Lisans	Auburn Üniversitesi
2016-2019	Ziraat Fakültesi, Bitki, Toprak ve Çevre Bilimleri Bölümü, Auburn, USA
Lisans	Akdeniz Üniversitesi
2007-2012	Ziraat Fakültesi, Toprak Bilimi ve Bitki Besleme Bölümü, Antalya

MESLEKİ VE İDARİ GÖREVLER

Araştırmacı	Batı Akdeniz Tarımsal Araştırma Enstitüsü Müdürlüğü
2019-Devam Ediyor	Toprak ve Su Kaynakları Bölümü, Antalya

ESERLER

Uluslararası hakemli dergilerde yayımlanan makaleler

1- Uçar, G., Şimşek, M., Topçu, V., Öktüren Asri, F., et al. (2025.). Synergistic Effects of Biofertilizers and Chemical Fertilizers on Yield and Nutritional Quality of Greenhouse-Grown Lettuce. Horticultural Studies, 42(2), 80-87. <https://doi.org/10.16882/hortis.1716339>.

Uluslararası Kitaplar

1.Cercioglu M, Ozlu E., Gozukara G., Acar M., **Ucar G.**, Demirel B.C., Houida S., and Bilen S. 2024. The Application of Organic Manure for Better Soil Health and Higher Crop Production in Regenerative Agriculture: Translating Science to Action (1st ed.), Rakshit, A., Parihar, M., Singh Meena, V., Abhilash, P., Jha, P.K., Sarkar, D., Editör, CRC Press, Florida, ss.175-190. <https://doi.org/10.1201/9781003309581-9>

Uluslararası Bildiriler, Seminerler

1. **Uçar G.**, Feng, Y., Balkcom, K.S. 2017. Effects of cover crop mixtures on biological indicators of soil health. ASA-CSSA-SSSA Annual Meeting, FL,USA.

2. **Uçar G.**, Feng, Y., Balkcom, K.S. Effects of Cover Crop Mixtures on Arbuscular Mycorrhizal Colonization of Cotton. 2018 Auburn University COA Graduate Student Poster Showcase, September 25, AL,USA.

3. Yang, A., **Uçar G.**, Feng, Y., Balkcom, K.S. Response of arbuscular mycorrhizal fungi to cover crop mixtures in a cotton-soybean rotation. Southern Cover Crop Conference July 16-17, AL,USA.

4. **Uçar G.**, Feng, Y., Balkcom, K.S. 2019. Effects of Cover Crop Mixtures on Arbuscular Mycorrhizal Colonization of Cotton. 6th Congress on Soil & Water Resources with International Participation, İzmir, s:32.

5. **Uçar G.**, Feng, Y., Balkcom, K.S. 2019 Responses of Biological Soil Health Indicators to Cover Crop Mixtures in a Conservation Agricultural System. ASA-CSSA-SSSA International Annual Meeting, TX, USA.

Ulusal Bildiriler, Seminerler vb.

1. Sönmez İ., **Uçar G.**, "Seralarda CO2 Gübrelemesi", Ulusal Tarım Kongresi 2015, AFYON, TÜRKİYE, 29-31 Ekim 2015, ss.207-207