



T.C.
NİĞDE ÖMER HALİSDEMİR ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
BİYOTEKNOLOJİ ANA BİLİM DALI

MİKORİZAL BİRLİKTELİKLERİN BİBER (*Capsicum annuum* L.) BİTKİSİNDE
BÜYÜME, GELİŞME VE KAPSAİSİN ÜRETİMİ ÜZERİNE ETKİLERİNİN
ARAŞTIRILMASI

ŞÜKRÜ CANPOLAT

KASIM 2023

T.C.
NİĞDE ÖMER HALİSDEMİR ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
BİYOTEKNOLOJİ ANA BİLİM DALI

MİKORİZAL BİRLİKTELİKLERİN BİBER (*Capsicum annuum* L.) BİTKİSİNDE
BÜYÜME, GELİŞME VE KAPSAİSİN ÜRETİMİ ÜZERİNE ETKİLERİNİN
ARAŞTIRILMASI

ŞÜKRÜ CANPOLAT

Doktora Tezi

Danışman

Prof. Dr. Cemil İŞLEK

Kasım 2023

Şükrü CANPOLAT tarafından **Prof. Dr. Cemil İŞLEK** danışmanlığında hazırlanan **“Mikorizal Birlikteliklerin Biber (*Capsicum annuum* L.) Bitkisinde Büyüme, Gelişme Ve Kapsaisin Üretimi Üzerine Etkilerinin Araştırılması”** isimli bu çalışma jürimiz tarafından Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **Biyoteknoloji** Ana Bilim Dalı’nda Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan : Prof. Dr. Talip ÇETER, Kastamonu Üniversitesi

Üye : Prof. Dr. Ayten ÖZTÜRK, Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi

Üye : Prof. Dr. Murat KAYA, İstanbul Teknik Üniversitesi

Üye : Prof. Dr. Teoman KANKILIÇ, Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi

Üye : Prof. Dr. Cemil İŞLEK, Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi

ONAY:

Bu tez, Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulunca belirlenmiş olan yukarıdaki jüri üyeleri tarafından/....../20.... tarihinde uygun görülmüş ve Enstitü Yönetim Kurulu’nun/....../20.... tarih ve sayılı kararıyla kabul edilmiştir.

...../...../20...

Prof. Dr. Mustafa KARATEPE
MÜDÜR

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin bilimsel ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

Şükrü CANPOLAT

ÖZET

MİKORİZAL BİRLİKTELİKLERİN BİBER (*Capsicum annuum* L.) BİTKİSİNDE BÜYÜME, GELİŞME VE KAPSAİSİN ÜRETİMİ ÜZERİNE ETKİLERİNİN ARAŞTIRILMASI

CANPOLAT, Şükrü

Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Biyoteknoloji Anabilim Dalı

Danışman : Prof. Dr. Cemil İŞLEK

Kasım 2023, 118 sayfa

Bu çalışmada biber bitkisi (*C. annuum*) ile mikorizal mantar türleri *Funneliformis mosseae* ve *Rhizophagus intraradices*'in simbiyotik ilişki kurması sağlanarak mikorizanın dört farklı sulama oranı (%25, 50, 75 ve 100) uygulanan biber bitkilerinin fenolojik özelliklerine, biyokimyasal değişimlere, antioksidan aktivitelerine ve kapsaisin üretimine etkisinin araştırılması amaçlanmıştır. Mikorizal mantarların biberde morfolojik özellikler ve meyve özelliklerine etkisi, bitkinin besin elementlerine etkisi; biyokimyasal özelliklere etkisi ve GC-MS ile kapsaisin ve dihidrokapsaisin üretimine etkisi incelenmiştir. Mikorizal mantar ile inoküle edilerek farklı sulama oranları uygulanan biber bitkilerinin kontrol bitkilerine kıyasla araştırılan parametreler açısından daha iyi değerlere sahip oldukları tespit edilmiştir. En fazla kapsaisin üretimi *F. mosseae* ile inoküle edilerek %50 sulama uygulanan bitki grubunda $6,45 \pm 0,22$ mg/g KA olarak tespit edilmiştir. Çalışmanın sonucunda acı biber bitkisinin *F. mosseae* ve *R. intraradices* mikorizal mantarlar ile kurmuş olduğu simbiyotik ilişkinin bitkinin büyüme, gelişme ve kapsaisin üretimi üzerine olumlu etkilerinin olduğu ortaya konmuştur.

Anahtar kelimeler: *Capsicum annuum*, *Funneliformis mosseae*, *Rhizophagus intraradices*, mikoriza, kapsaisin, GC-MS

SUMMARY

INVESTIGATION OF THE EFFECTS OF MYCORRHIZAL RELATIONSHIPS ON GROWTH, DEVELOPMENT AND CAPSAICIN PRODUCTION IN PEPPER PLANT (*Capsicum annuum* L.)

CANPOLAT, Şükrü
Niğde Ömer Halisdemir University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Biotechnology

Supervisor : Prof. Dr. Cemil İŞLEK

November 2023, 118 pages

In this study, it was aimed to investigate the effect of mycorrhizal fungi *Funneliformis mosseae* and *Rhizophagus intraradices* on phenological characteristics, biochemical changes, antioxidant activities and capsaicin production of pepper plants treated with four different irrigation rates (25, 50, 75 and 100%) by establishing a symbiotic relationship with pepper plant (*C. annuum*). The effect of mycorrhizal fungi on morphological characteristics and fruit characteristics of pepper, plant nutrient content, biochemical properties, capsaicin, and dihydrocapsaicin production by GC-MS were investigated. It was determined that pepper plants inoculated with mycorrhizal fungi and treated with different irrigation rates had better values regarding the investigated parameters than control plants. The highest capsaicin production was determined as 6.45 ± 0.22 mg/g DW in the plant group inoculated with *F. mosseae* and irrigated at 50%. This study revealed that the symbiotic relationship of the pepper plant with the mycorrhizal fungi has positive effects on the growth, development and production of capsaicin.

Keywords: *Capsicum annuum*, *Funneliformis mosseae*, *Rhizophagus intraradices*, mycorrhiza, capsaicin, GC-MS

ÖN SÖZ

Doktora eğitimim süresince çalışmalarına yön veren, bilgi ve deneyimini esirgemeyen, akademik katkılarının yanında hayati anlamda da yol gösteren kıymetli danışman hocam, Sayın Prof. Dr. Cemil İŞLEK'e en içten saygı ve şükranlarımı sunarım. Doktora tezim süresince katkı, destek ve yol göstericilikleri için jüri üyesi kıymetli hocalarım Prof. Dr. Murat KAYA, Prof. Dr. Teoman KANKILIÇ, Prof. Dr. Talip ÇETER ve Prof. Dr. Ayten ÖZTÜRK'e teşekkür ederim.

Destekleri ve tavsiyeleriyle çalışmamda bana yol gösteren Çukurova Üniversitesi öğretim üyesi Sayın Prof. Dr. İbrahim ORTAŞ hocama ve kıymetli Arş. Gör. Mehmet IŞIK'a en içten şükranlarımı sunarım.

Sadece bu tez çalışmasında değil hayatımın her alanında benden sevgisini, ilgisini, desteğini esirgemeyen sevgili eşim ve meslektaşım Dr. Elif YÜRÜMEZ CANPOLAT'a ve bana verdiği en büyük hediyeler olan oğullarımız Selim ve Emre'ye; bugünlere gelmemdeki emekleri, özverileri ve duaları için haklarını ne yapsam ödeyemeyeceğim annem ve babam Hatun CANPOLAT ve İsmail CANPOLAT'a; desteklerini her zaman hissettiğim ve benim için hep bir motivasyon kaynağı olan kardeşlerime; tez çalışmam boyunca desteklerini esirgemeyen kayınvalidem ve kayınbabam Nurdane YÜRÜMEZ ve Sebahattin YÜRÜMEZ'e ve kızları İrem YÜRÜMEZ'e; çalışmalarım sırasında göstermiş oldukları anlayış, destek ve fedakârlıklarından dolayı çalışma arkadaşlarım Dr. Nebi YELEGEN, Dr. Esra KILAVUZ, Zeynep BOSTANCI ve Gülşah GERMEN TUTAŞ'a teşekkür ederim.

Bu tez çalışmasını tamamlamamda emeği geçen herkese en içten teşekkürlerimi sunarım.

Bu çalışmaya FMT2022/4-LÜTEP numaralı proje ile finansal destek sağlayan Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi ve çalışanlarına katkılarından dolayı teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
SUMMARY	v
ÖN SÖZ	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ	x
ŞEKİLLER DİZİNİ	xi
FOTOĞRAFLAR DİZİNİ	xi
SİMGE VE KISALTMALAR	xiv
BÖLÜM I.....	1
GİRİŞ	1
BÖLÜM II	3
GENEL BİLGİLER	3
2.1 Biber Bitkisi (<i>Capsicum annuum</i> L.)	3
2.2 Kapsaisinoidler	5
2.3 Kapsaisin Biyosentezi	7
2.4 Kapsaisinoidlerin <i>in vitro</i> Kültür Üretimi.....	9
2.5 Çevresel Faktörlerin Kapsaisin Biyosentezi ve Birikimi Üzerine Etkisi.....	10
2.6 Kapsaisinin Kullanım Alanları	13
2.6.1 Gıda uygulamaları	13
2.6.2 Farmakolojik uygulamaları.....	15
2.6.3 Diğer uygulamaları	19
2.7 Mikorizal Mantarlar	20
BÖLÜM III.....	28
MATERYAL VE YÖNTEM.....	28
3.1 Bitki ve Mantar Materyallerinin Temin Edilmesi.....	28
3.2 Biber Tohumlarının Yüzeysel Sterilizasyonu	29
3.3 Biber Fidelerinin Saksılara Aktarılması	29
3.4 Bitki Büyütme Odası Koşulları ve Biber Bitkilerinin Bakımı.....	30
3.5 Biber Bitkilerinden Analiz Numunelerinin Alınması ve Bitkilerin Hasat Edilmesi	31
3.6 Biber Bitkisi Kökünde Mikorizal Enfeksiyonun Belirlenmesi	32

3.6.1 Bitki kök numunelerinin ‘trypan blue’ ile boyanması ve ışık mikroskopunda görüntülenmesi	32
3.6.2 Bitki kök numunelerinde mikorizal enfeksiyon oranlarının belirlenmesi	33
3.6.3 Bitki kök numunelerinin taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile görüntülenmesi	34
3.7 Mikorizal Mantarların Biber Bitkisinde Fenolojik Özellikler Üzerine Etkilerinin Belirlenmesi.....	35
3.7.1 Mikorizal mantarların bitki sürgün boyuna etkilerinin belirlenmesi	35
3.7.2 Mikorizal mantarların bitki sürgününde yaş ve kuru ağırlık üzerine etkilerinin belirlenmesi	36
3.7.3 Mikorizal mantarların bitki kökünde kuru madde üzerine etkilerinin belirlenmesi	37
3.7.4 Mikorizal mantarların meyve sayısı, meyve boyu, meyve çapı ve meyve ağırlığına etkilerinin belirlenmesi	38
3.7.5 Mikorizal mantarların biber bitkisinde verim üzerine etkilerinin belirlenmesi	39
3.8 Biber Bitkilerinin Toprak Üstü Aksamlarından Element Tayini	39
3.9 Mikorizal Mantarların Biber Bitkisinde Biyokimyasal Özellikler Üzerine Etkilerinin Belirlenmesi.....	40
3.9.1 Biber bitkilerinin fotosentetik pigment içeriğinin belirlenmesi.....	40
3.9.2 Biber yapraklarından malondialdehit (MDA) tayini	41
3.9.3 Fenilalanin amonyum liyaz (PAL, EC. 4.3.1.24) enzim aktivitesinin belirlenmesi	42
3.9.4 Biber meyvelerinin toplam fenolik bileşik miktarlarının belirlenmesi.....	43
3.9.5 Biber meyvelerinin antioksidan özelliklerinin belirlenmesi	44
3.10 Biber Meyvelerinin Kapsaisin İçeriklerinin Belirlenmesi	44
3.10.1 Biber meyvelerinden kapsaisin ekstraksiyonu.....	44
3.10.2 Gaz kromatografi-kütle spektrometri (GC-MS) yöntemi ile kapsaisin analizi	45
3.10.3 Kapsaisin standardının hazırlanması	46
3.11 Analiz Verilerinin İstatistiksel Değerlendirilmesi	47
BÖLÜM IV	48
BULGULAR VE TARTIŞMA	48
4.1 Biber Bitkisi Kökünde Mikorizal Enfeksiyonun Belirlenmesi	48

4.1.1 Bitki kök numunelerinin trypan blue ile boyanması ve ışık mikroskopunda görüntülenmesi sonucu elde edilen bulgular	48
4.1.2 Bitki kök numunelerinin taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüleri ...	49
4.1.3 Bitki kök numunelerinde mikorizal enfeksiyon oranları	49
4.2 Mikorizal Mantarların Biber Bitkisinde Fenolojik Özellikler Üzerine Etkileri.....	51
4.2.1 Mikorizal mantarların bitki sürgün boyuna etkileri	51
4.2.2 Mikorizal mantarların bitki sürgününde yaş ağırlık, kuru ağırlık ve kuru madde miktarı üzerine etkileri.....	53
4.2.3 Mikorizal mantarların bitki kökünde kuru madde miktarı üzerine etkileri	56
4.2.4 Mikorizal mantarların meyve sayısı, meyve ağırlığı, meyve boyu, meyve çapı ve verim üzerine etkileri.....	57
4.3 Biber Bitkilerinin Toprak Üstü Aksamalarının Element İçerikleri	62
4.4 Mikorizal Mantarların Biber Bitkisinde Biyokimyasal Özellikler Üzerine Etkileri. 74	
4.4.1 Biber bitkilerinin fotosentetik pigment içeriği	74
4.4.2 Biber bitkilerinin malondialdehit (MDA) içeriği	77
4.4.3 Biber bitkilerinin fenialalanin amonyum liyaz (PAL; E.C. 4.3.1.24) aktivitesi	79
4.4.4 Biber meyvelerinin toplam fenolik bileşik içerikleri.....	80
4.4.5 Biber meyvelerinin antioksidan özellikleri.....	81
4.5 Biber Meyvelerinin Kapsaisin İçerikleri.....	83
BÖLÜM V	88
SONUÇ	88
KAYNAKLAR	90
ÖZ GEÇMİŞ	117
TEZ ÇALIŞMASINDAN ÜRETİLEN ESERLER	118

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 4.1. <i>F. mosseae</i> ve <i>R. intraradices</i> mikorizal mantarları ile inokule edilen <i>C. annuum</i> bitkilerinde gerçekleşen enfeksiyon oranları ve bitkinin fenolojik özellikleri üzerine etkileri	54
Çizelge 4.2. <i>F. mosseae</i> ve <i>R. intraradices</i> mikorizal mantarlarının <i>C. annuum</i> bitkilerinde meyve özellikleri ve verim üzerine etkileri.....	59
Çizelge 4.3. <i>F. mosseae</i> ve <i>R. intraradices</i> mikorizal mantarları ile inokule edilen biber bitkilerinin toprak üstü aksamalarının makro element içerikleri.....	69
Çizelge 4.4. <i>F. mosseae</i> ve <i>R. intraradices</i> mikorizal mantarları ile inokule edilen biber bitkilerinin toprak üstü aksamalarının mikro element içerikleri	70
Çizelge 4.5. <i>F. mosseae</i> ve <i>R. intraradices</i> mantarları ile inoküle edilen ve farklı oranlarda sulama uygulanan <i>C. annuum</i> bitkilerinden alınan meyve örneklerinin kapsaisin ve dihidrokapsaisin içerikleri	84

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. Kapsaisin (a), dihidrokapsaisin (b), nordihidro-kapsaisin (c), homokapsaisin (d), homodihidro-kapsaisin (e) (Li vd., 2019)	6
Şekil 2.2. Kapsaisin biyosentezi (Arce-Rodríguez ve Ochoa-Alejo, 2017)	8
Şekil 2.3. Mikoriza çeşitleri (Selosse ve Le Tacon, 1998)	24
Şekil 3.1. Kapsaisin ve Dihidro-kapsaisin bileşiklerinin GC kolonunda alıkonma sürelerini gösteren kromatogram.....	46
Şekil 3.2. Kantitatif GC-MS analizleri için oluşturulan kapsaisin (A) ve dihidrokapsaisin (B) kalibrasyon eğrileri	46
Şekil 4.1. <i>C. annuum</i> köklerinde <i>F. mosseae</i> ve <i>R. intraradices</i> mikorizal mantarları tarafından gerçekleştirilen enfeksiyon oranları ($p<0.05$)	50
Şekil 4.2. <i>F. mosseae</i> ve <i>R. intraradices</i> mantarları ile inoküle edilen ve farklı oranlarda sulama uygulanan <i>C. annuum</i> bitkilerinin fotosentetik pigment içerikleri	75
Şekil 4.3. <i>F. mosseae</i> ve <i>R. intraradices</i> mantarları ile inoküle edilen ve farklı oranlarda sulama uygulanan <i>C. annuum</i> bitkilerinin MDA içerikleri.....	78
Şekil 4.4. <i>F. mosseae</i> ve <i>R. intraradices</i> mantarları ile inoküle edilen ve farklı oranlarda sulama uygulanan <i>C. annuum</i> bitkilerinde PAL (E.C. 4.3.1.24) enzimi aktivitesi	80
Şekil 4.5. <i>F. mosseae</i> ve <i>R. intraradices</i> mantarları ile inoküle edilen ve farklı oranlarda sulama uygulanan <i>C. annuum</i> bitkilerinden alınan meyve örneklerinin toplam fenolik bileşik içerikleri.....	81
Şekil 4.6. <i>F. mosseae</i> ve <i>R. intraradices</i> mantarları ile inoküle edilen ve farklı oranlarda sulama uygulanan <i>C. annuum</i> bitkilerinden alınan meyve örneklerinin DPPH radikalini süpürme etkileri.....	82
Şekil 4.7. <i>F. mosseae</i> ve <i>R. intraradices</i> mantarları ile inoküle edilen ve farklı oranlarda sulama uygulanan <i>C. annuum</i> bitkilerinden alınan meyve örneklerinin kapsaisin içerikleri	85
Şekil 4.8. <i>F. mosseae</i> ve <i>R. intraradices</i> mantarları ile inoküle edilen ve farklı oranlarda sulama uygulanan <i>C. annuum</i> bitkilerinden alınan meyve örneklerinin kapsaisin içerikleri	86

FOTOĞRAFLAR DİZİNİ

Fotoğraf 2.1. Biber bitkisi.....	4
Fotoğraf 3.1. Işık mikroskopunda görüntülenen pasif (A) ve çimlenmekte olan (B) mikorizal mantar sporları	28
Fotoğraf 3.2. Mikorizal mantar inokule edilerek çimlendirilen biber tohumlarından elde edilen fidelerin saksılara aktarımı (A) ve bitki büyütme odasına yerleştirilmesi (B).....	30
Fotoğraf 3.3. Saksılara aktarılan biber bitkilerinin bitki büyütme odasına yerleştirilmesi ve bakımı	31
Fotoğraf 3.4. Mikorizal enfeksiyonun belirlenmesi için boyama işlemine tabi tutulan kök numuneleri.....	33
Fotoğraf 3.5. Mikorizal kök enfeksiyonunun belirlenmesi için Grid Line Intersection yöntemi ile hazırlanan petri kabı içerisindeki boyanmış kök numuneleri	34
Fotoğraf 3.6. Mikorizal kök enfeksiyonunun SEM cihazında görüntülenmesi için hazırlanan kök numuneleri, Au-Pd kaplama cihazı ve Zeiss EVO-40 SEM cihazı	35
Fotoğraf 3.7. Biber bitkisinin toprak üstü aksamının taç bölgesinden kesilerek ayrılması.....	36
Fotoğraf 3.8. Bitki sürgün ve kök numunelerinin kese kağıtları içerisinde kurutulması	37
Fotoğraf 3.9. Meyve çapı ve meyve boyunun dijital kumpas ile ölçülmesi	38
Fotoğraf 3.10. Claiss Eagon füzyon fırını (A), camsılaştırılmış numuneler (B) ve PAnalytical Zetium XRF cihazı (C).....	40
Fotoğraf 3.11. Fotosentetik pigment analizi için bitki yapraklarının tartılması (A), havanda homojenize edilmesi (B) elde edilen homojenatların (C) hazırlanması ve spektrofotometre cihazına yüklenmesi (D)	41
Fotoğraf 3.12. Yaprak örneklerinin homojenize edilmesi (A), TBA reaksiyonu sonrası MDA miktarlarının belirlenmesi için spektrofotometreye yüklenmesi (B) ve analizin gerçekleştirildiği spektrofotometre cihazı (C).....	42
Fotoğraf 3.13. Kapsaisin analizlerinin gerçekleştirildiği Shimadzu QP2010 Ultra GC-MS sistemi.....	45

Fotoğraf 4.1. <i>C. annuum</i> bitki köklerinden alınan ve boyama işlemine tabi tutulan numunelerde mikoriza oluşumunu gösteren bulgular. (A) Kontrol grubu bitkisi, (B) <i>F. mosseae</i> ve (C) <i>R. intraradices</i> mikorizal mantarlarıyla inokule edilen bitkiler.....	48
Fotoğraf 4.2. Kontrol (A), <i>F. mosseae</i> (B) ve <i>R. intraradices</i> (C) deneme grubu bitkilerinden alınan kök örneklerinin SEM görüntüleri	49



SİMGE VE KISALTMALAR

Simgeler	Açıklama
°C	Santigrad derece
µm	Mikrometre
cm	Santimetre
dk	Dakika
g	Gram
mg	Miligram
mL	Mililitre
mM	Milimolar
mm	Milimetre
nm	Nanometre
pH	Asitlik ve alkalilik faktörü
UV	Ultraviyole
µL	Mikrolitre

Kısaltmalar	Açıklama
SEM	Taramalı Elektron Mikroskobu
XRF	X-Işını Floresans Spektroskopisi
MDA	Malon dialdehit
PAL	Fenilalanin amonyum liyaz
GC-MS	Gaz Kromatografi Kütle Spektrometrisi

BÖLÜM I

GİRİŞ

İkincil metabolitler, bitki büyüme ve gelişmesinde temel bir görevleri olmayan ancak bitkinin çevresini saran ortama adaptasyonunda, üreme olayına yardımcı olmada, bitki savunmasında ve çevre ile ilişkilerde önemli görevleri olan organik bileşiklerdir. İkincil metabolitler, eksiklikleri ya da yoklukları durumunda bitkinin uzun dönemde zarar görmesine hatta ölmesine sebep olacak kadar yaşamsaldırlar. İkincil metabolitler farklı kimyasal yapılara sahiptirler ve genellikle fenolikler, terpen-steroidler ve alkaloidler olmak üzere üç grupta sınıflandırılırlar. Çoğunun, bitkiler ile mikroorganizmalar, böcekler ve hayvanlar arasındaki ilişkileri düzenlemede ekolojik rolleri vardır. Çoğu zaman özelleşmiş hücrelerde, bitkinin belirli gelişim aşamasında ya da stres esnasında üretilen ikincil metabolitler bitkide çok küçük miktarlarda bulunur. Bitkinin farklı fizyolojik evrelerinde üretim miktarları değişse de genellikle bitki kuru ağırlığının %1'i kadar üretilmektedirler (Namdeo, 2007). Pekçok yüksek bitki, ekonomik açıdan önem taşıyan organik kimyasalları (alkaloid, terpen, fenolik bileşikler, nadir amino asitler, bitki aminleri ve glikozitler, vb.) bünyesinde biriktirerek çeşitli bilimsel, teknolojik ve ticari uygulamalara ham madde oluşturur.

İnsanlığın ilk günlerinden beri ikincil metabolit üreten bitkiler enfeksiyonların ve hastalıkların tedavisinde kullanılmıştır (Çalışkan vd., 2019). Dünya genelindeki insanların (yaklaşık %70-80) öncelikli olarak, birincil sağlık bakım ihtiyaçlarını karşılamak için büyük oranda geleneksel bitkisel ilaçlar kullandığı tahmin edilmektedir (Kumar vd., 2017). Kimya endüstrisinde gerçekleşen gelişmeler ışığında doğal ürünlerin yerini yarı sentetik ve sentetik ilaçlar almış olsa da, aspirin örneğinde olduğu gibi çoğunlukla etken madde yapıları için bitki ikincil metabolitleri yol gösterici olmuştur. Günümüzde ikincil metabolit ürünleri, özellikle eczacılık, kimya sanayisi ve gıda sanayisinde olmak üzere geniş bir kullanım alanına sahiptir. Dünya üzerinde yayılış gösteren yaklaşık 250 000-500 000 arasında olduğu tahmin edilen bitki türlerinin yalnızca %5-15'i biyoaktif madde içeriği bakımından araştırılmıştır (Spjut, 1985). Tıbbi bitkiler ve fitokimyasalları insan sağlığının korunmasında önemli bir rol oynamaktadır. Tıbbi bitkiler, tüm dünyada geleneksel ilaçların ayrılmaz bir parçası olmanın yanı sıra, modern ilaçların keşfi ve geliştirilmesi için de önemli bir kaynak görevi görmektedir. Çeşitli tıbbi

bitkiler, bilinen sağlık yararları nedeniyle gıda bileşeni ve baharat olarak da kullanılmaktadır. Bitkilerden elde edilen birçok bileşik, çeşitli hastalıkların önlenmesi ve tedavisindeki potansiyel rolleri nedeniyle son yıllarda büyük ilgi görmüştür.

Bitkiler, patojenlere karşı savaşmak veya olumsuz ortamlarda gelişmek için hayvanlar, bakteriler veya mantarlar da dahil olmak üzere diğer organizmalarla ilişki kurar. Mikoriza, bitkiler ve mantarlar arasındaki simbiyotik ilişkinin mükemmel bir örneğidir. Mikorizal mantarlar, çoğu tarım ve süs bitkisi ile simbiyotik bir ilişki oluşturan toprak mantarlarıdır. Mikorizal mantarlar ve bitkiler arasındaki simbiyotik ilişki, ikincil metabolitlerin artmasına yol açabilecek çeşitli metabolik yolları tetikleyerek fizyolojik ve biyokimyasal değişikliklere neden olur. Bu nedenle, mikorizal mantarların kullanımı, belirli hedef bileşiklerde iyileştirmeler elde etmek için uygun bir yaklaşımdır.

Artan dünya nüfusu, her geçen gün isimlerini yeni öğrendiğimiz hastalıklar, benzer etken maddeye ve geniş etki spektrumuna sahip antibiyotiklerin yoğun kullanımı neticesinde patojen mikroorganizmaların direnç geliştirmeleri göz önünde bulundurulduğunda yeni bitkisel biyoaktif maddelerin araştırılması ve var olanların üretimlerinin artırılmasına yönelik çalışmalar artan bir ilgiyle devam etmektedir ve gelecekte de devam edeceği düşünülmektedir. Biber bitkisi, yüzlerce yıldır geleneksel bir mutfak baharatı olarak kullanılan ve kapsaisin gibi birçok biyoaktif bileşiğin varlığı nedeniyle kapsamlı bir şekilde incelenen tıbbi bitkilerden biridir. Ülkemizde özellikle Doğu ve Güneydoğu Anadolu'da başlıca gıda ürünlerinden biri olup ihracat potansiyeli açısından oldukça güçlü bir besindir.

Bu çalışmada biber bitkisi (*Capsicum annuum* L.) ile mikorizal mantar türleri *Funneliformis mosseae* ve *Rhizophagus intraradices*'in simbiyotik ilişki kurması sağlanarak kontrollü koşullar (ışık, sıcaklık, nispi nem) altında mikorizanın dört farklı sulama oranı (%25, 50, 75 ve 100) uygulanan biber bitkilerinin fenolojik özelliklerine, bitkilerde oluşan biyokimyasal değişimlere, antioksidan aktivitelerine ve ticari açıdan önemli pek çok biyoteknolojik alanda kullanılan bir ikincil metabolit olan kapsaisin alkaloidinin üretimine etkisi araştırılmıştır.

BÖLÜM II

GENEL BİLGİLER

2.1 Biber Bitkisi (*Capsicum annuum* L.)

Biber cinsi (*Capsicum*) domates, patates ve tütün gibi diğer bitkileri de içeren Solanaceae familyasına aittir. Tropik Amerika menşeli, bahar sonu-yaz başı çiçeklenen, meyvesi yenebilen ticari öneme sahip türleri bünyesinde barındıran bir cinstir. Biber bitkisinin taksonomideki yeri;

Alem/Regnum	: Plantae
Şube/Divisio	: Tracheophyta
Sınıf/Classis	: Magnoliopsida
Takım/Ordo	: Solanales
Aile/Familia	: Solanaceae
Cins/Genus	: Capsicum
Tür/Species	: <i>Capsicum annuum</i> L.

Capsicum cinsi yaklaşık 22 türden oluşur ve 7000 yıl öncesine dayanan uzun bir yetiştiricilik geçmişine sahiptir (Hui, 2006). *Capsicum* cinsinin *C. annuum*, *C. frutescens*, *C. chinense*, *C. baccatum* ve *C. pubescens* olmak üzere beş türü, diğer çeşitlerle birlikte yaygın olarak yetiştirilmektedir. *C. annuum* ise ekonomik açıdan en önemli türler arasındadır (Jaiswal vd., 2021). *C. annuum* Güney Orta Amerika'ya özgü olup Afrika ve Asya'nın tropikal ve subtropikal ülkelerinde de yetiştirilmektedir, günümüzde ise dünyanın daha sıcak bölgelerinde yetiştirilmektedir. (Hernández- Pérez vd., 2020). Asya'da çoğunlukla Hindistan alt kıtası, Güneydoğu Asya ve Japonya'da; Kuzey Amerika'da Meksika, Kanada, Amerika Birleşik Devletleri'nde ve Avrupa'da İtalya, Türkiye, Portekiz vb. ülkelerde yetiştirilmektedir (Devi vd., 2021). Çin, 31,1 milyon ton olan yıllık toplam biber üretiminin %51'ni gerçekleştirmektedir. Çin'i %7,4 ile Meksika, %6,9 ile Türkiye ve %5,5 ile Endonezya takip etmektedir (Pereira vd., 2016). Dünya çapında bir dağılıma sahip olan *C. annuum*, dolmalık biber, bakla biberi, tatlı biber, acı biber ve kırmızı biber gibi çeşitli yerel isimlerle bilinir (Khoury vd., 2020).

Biber besin değeri açısından önemli bir bitkisel gıdadır. Yeşil veya kırmızı ya da çiğ veya pişmiş olarak tüketildiğinde vücuda alınan bu besin içeriklerinde farklılıklar görülebilmektedir. Ancak genellikle kırmızı meyvelerin besin içeriği biraz daha yüksektir. Biberler antosiyaninler, vitaminler, fenolik asitler, flavonoidler ve kapsaisinoidler gibi fitokimyasallar için harika bir kaynaktır. 100 g taze biberde yaklaşık olarak su % 91-93, kuru madde % 7-9, şeker % 3-4, karbonhidrat %4-6, protein % 0,8-1,2; yağ % 0,2-0,9; C vitamini 120-220 mg'dır (Şalk vd., 2008). Biber meyvesi bir yetişkinin günlük ihtiyacını karşılayacak miktarda C vitamini içermektedir. Suda çözünebilen bir vitamin olan C vitamini (askorbik asit) kemik, kırık, kas ve damarların yapısında bulunan bir protein olan kolajenin oluşmasında büyük önem arz etmektedir. Orta boy bir biber meyvesinden elde edilen C vitamini miktar bakımından bir portakaldan elde edilebilecek miktardan altı kat fazladır. Biber ayrıca vitamin A ve E, antioksidan bileşikler, ksantofil ve karotenoidler bakımından da zengin bir bitkidir (Geleta ve Labuschagne, 2006). Biberlerin yeşilden kırmızıya kadar değişen çekici renkleri, alkaloidler ve karotenoid metabolitlerinden kaynaklanmaktadır (Kumar ve Tata, 2009).



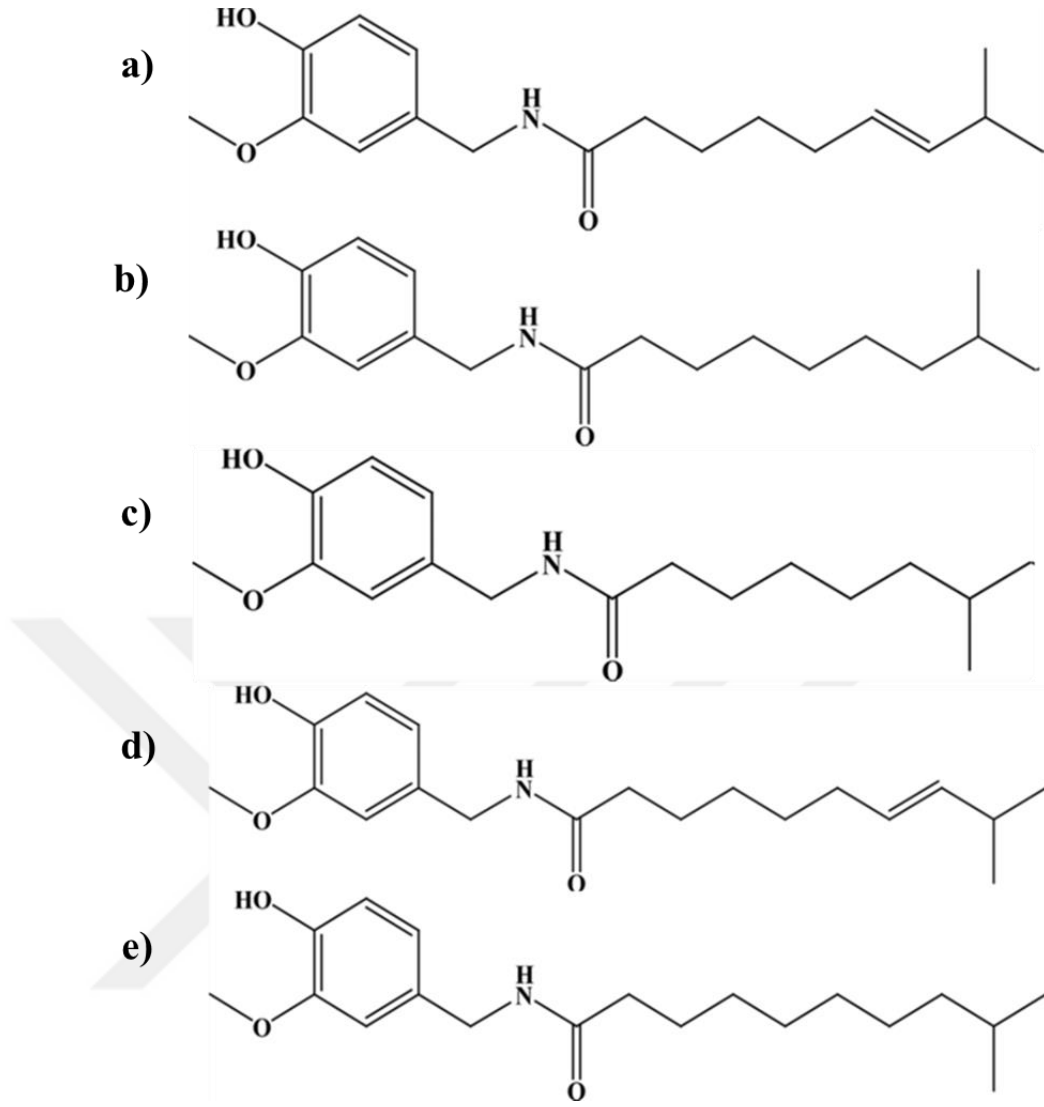
Fotoğraf 2.1. Biber bitkisi

Ülkemizde 2019 yılı itibariyle 2.625.669 ton (Anonim, 2023) ile yaş sebze üretiminde önemli bir yere sahiptir. Gıda sanayinde dondurulmuş gıda, turşu, biber salçası, baharat, sos ve gıda boyası olarak kullanılmakta, bununla birlikte farmakolojik özelliklerinden dolayı ilaç sanayinde farklı işleme yöntemleri ile ilaç etken maddesi olarak

değerlendirilmektedir (Aybak, 2002). Meyve ve bitkinin morfolojik-agronomik özellikleri bakımından büyük varyasyona sahip olan biber, meyve yapısı ve şekline göre değişik şekillerde tüketilmektedir (Bozokalfa ve Eşiyok, 2006). Öte yandan, yapılan çalışmalar *C. annuum*'un farklı mikroorganizmalara karşı antimikrobiyal aktiviteye sahip olduğunu göstermiştir. Koffi-Nevry vd. (2012) *C. annuum*'un *Staphylococcus aureus*, *Escherichia coli*, *Pseudomonas aeruginosa* ve *Vibrio cholerae*'ya karşı inhibitör aktivite sergilediğini göstermiştir. Ayrıca, Sandhya ve Vijayakumar (2016), *C. annuum* var. *glabriusculum*'un etanolik ekstraktının iki mikrobiyal suşu (*S. aureus* ve *Streptococcus mutans*) inhibe ettiğini bildirmiştir. Başka bir çalışmada, *C. annuum*'un sulu, etanolik ve etil asetat özütleri çeşitli patojenik mantar suşlarına (*Aspergillus flavus*, *Fusarium* sp., *Penicillium* sp., *Alternaria* sp. ve *Aspergillus niger*) karşı test edilmiştir. Bu ekstraktların, *A. niger* dışında kullanılan tüm suşları inhibe ettiği gösterilmiştir (Koffi vd., 2022).

2.2 Kapsaisinoidler

Biber, acı biber ve kırmızı biber, özellikle Çin, Meksika, Türkiye ve Endonezya gibi yerlerde çoğu insanın günlük beslenmesinde bulunabilen uyarlanabilir ürünlerdir (Mosqueda-Solís vd., 2021). Acı lezzetiyle öne çıkan pul biber, dünya çapında popüler ve yaygın olarak kullanılan baharatlardan biridir (Lu vd., 2020). Bu acı biberler, başta kapsaisin ve dihidrokapsaisin olmak üzere kapsaisinoidler adı verilen keskin acı hissi uyandıran bileşikler içerirler. İlk kez 1816 yılında Bucholtz bibere acılık veren maddenin organik çözücüler ile ayrıştırılabileceğini ifade etmiştir. 1876 yılında Thresh acı hissi uyandıran maddenin kristal yapısında bulunduğunu söyleyerek 'kapsaisin' olarak adlandırmıştır. Hogeney, 1878 yılında acı hissi veren bu maddeyi biberden ayırt etmeyi başarmış ve kapsaisinin ağız ve mide salgılarını artırdığını keşfetmiştir. 1930 yılında, Spath ve Darling, laboratuvarında kapsaisini sentezlemeyi başarmışlardır (Morrow, 1999). Kosuge vd. ince tabaka kromatografisinin (TLC) geliştirilmesi ile acılık uyarıcı özelliğe birbiriyle ilişkili iki komponent belirlemişler ve komponent karışımına "kapsaisinoid" adını vermişlerdir (Poyrazoğlu vd., 2005). Küresel günlük kapsaisin tüketimi tahminleri Amerika Birleşik Devletleri ve Avrupa'da 1,5 mg/kişi/gün, Hindistan'da 25 mg/kişi/gün ve Meksika'da 200 mg/kişi/gün arasında değişmektedir (Rollyson vd., 2014).



Şekil 2.1. Kapsaisin (a), dihidrokapsaisin (b), nordihidrokapsaisin (c), homokapsaisin (d), homodihidrokapsaisin (e) (Li vd., 2019)

Kapsaisin ve dihidrokapsaisin % 0,1 ila 1,0 konsantrasyonlarda ve 1:1-2:1 oranlarında biberde bulunan kapsaisinoidlerin %80-90'ını oluşturur ve minör kapsaisinoidlere kıyasla tat reseptörlerine ve sinirlere yaklaşık iki kat daha fazla acı hissi verir (Chapa-Oliver ve Mejía-Teniente, 2016). Kapsaisin konsantrasyonları bitki türüne bağlı olarak 0,1 mg/g (*C. annuum*) ile 60 mg/g (*C. chinense*) arasında değişmektedir. Kapsaisin, kurutulmuş meyvelerde taze meyvelere göre 7-10 kat daha fazladır (Shah vd., 2020). Kapsaisin ve dihidrokapsaisine ek olarak biberler, nordihidrokapsaisin ve homodihidrokapsaisin (Şekil 2.1) de dahil olmak üzere alındığında yanma hissi yaratabilen çeşitli doğal kapsaisinoidler de içermektedir (Srinivasan, 2016). Kapsaisin, biber bitkisinin meyvelerinde zararlılara ve mantarlara karşı bir savunma mekanizması olarak biyosentezlenen bir alkaloiddir (Lu vd., 2020). Kapsaisin, vanilloid (trans-8-metil-N-vanilil-6 nonenamid) kimyasal ailesinin

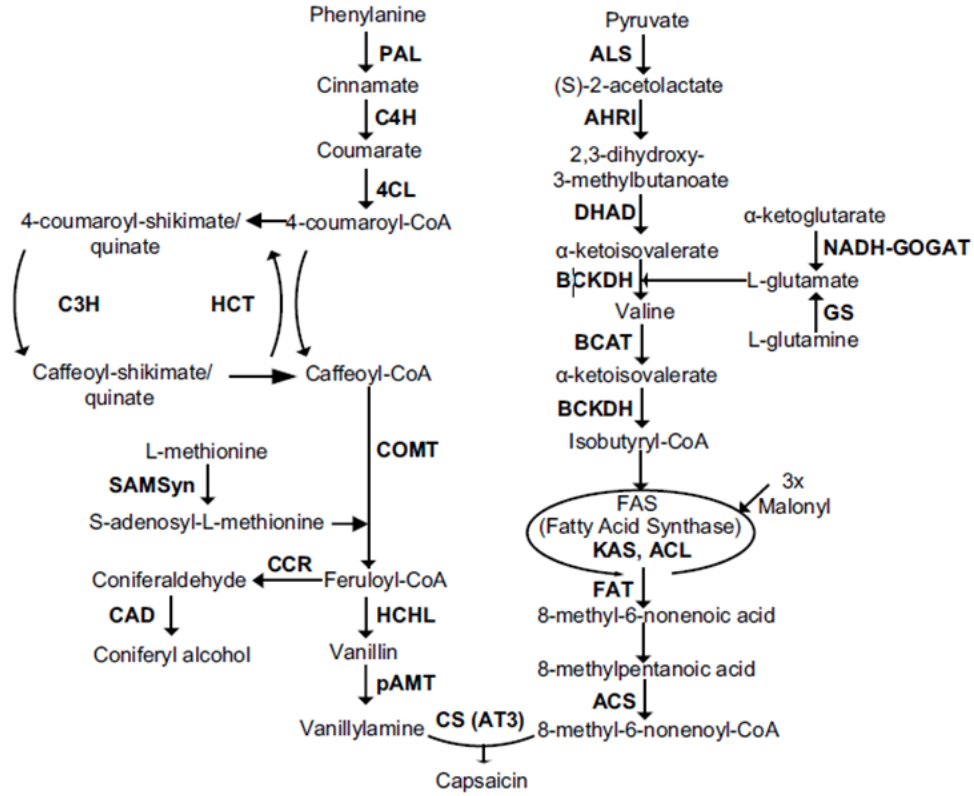
bir üyesidir. Vanilloidler, biyolojik aktivitelerini indükleyen bir vanilil (4 hidroksi-3-metoksibenzil) parçasına sahiptir. Diğer vanilloidlerde olduğu gibi, kapsaisin yapısal olarak bir benzen halkası ve bir amid grubu içeren hidrofobik bir karbon kuyruğundan oluşur (Al-Samydai vd., 2019). Saf halde izole edildiğinde, kapsaisin ($C_{18}H_{27}NO_3$) katı, renksiz, hidrofobik, oldukça uçucu ve oldukça keskin bir maddedir ve ayrışma seviyelerine kadar ısıtıldığında toksik gaz açığa çıkmaktadır (Gradinaru vd., 2022). Kokusuz, kristalimsi ve lipofilik bir madde olup suda çözünürlüğü çok düşüktür ($25^{\circ}C$ 'de 10,3 mg/L) ancak etanol, kloroform, metanol, aseton ve alkali sulu çözeltilerde çözünmektedir (Wang vd., 2014). Bu bileşik $25^{\circ}C$ 'de asitler ve alkaliler içinde oldukça karardır. Ayrıca, erime noktası $62-65^{\circ}C$ ve molekül ağırlığı 305,4 kDa'dır (Shah vd., 2020).

2.3 Kapsaisin Biyosentezi

Kapsaisin esas olarak biber meyvesinin plasenta epidermal hücrelerinde sentezlenir. Kapsaisinin biyosentetik yolu ilk olarak 1960'larda tanımlanmıştır. 1960'lardan bu yana, kapsaisinin biyosentez yolları enzim aktivitesi tespiti, izotop izleyici, diferansiyel gösterim ve transkriptom analizi ile kademeli olarak ortaya çıkarılmıştır (Zhang vd., 2016a). Fenilpropan metabolik yolu (PMP) ve Dallı Zincirli Yağ Asidi Yolu (BCFAP) kapsaisin sentezinin ana yollarıdır. Öncül fenilalanin, fenilalanin amonyum liyaz (PAL), sinamat hidrolaz (C_4H) ve 4-kumaril-CoA ligaz (4-CL) tarafından katalize edilerek, genel fenilpropan metabolik yolu (GPMP) olarak da bilinen ve bitkilerde yaygın olarak bulunan PMP'de 4-kumaril-CoA oluşturur. 4-kumaril-CoA flavonoidler, izoflavonlar, antosiyaninler ve diğer maddelerin sentezi için bir öncüdür ve ayrıca hidroksisinnamil transferaz geninin (HCT) katalizi altında fenilpropanik asidin CoA esterine ve son olarak lignin, kapsaisin ve diğer önemli ikincil metabolitlere dönüştürülebilir (Liu vd., 2015b).

Biberde 4-kumaril-CoA, hidroksisinnamoil transferaz (HCT), kafeoil-CoA O-metiltransferaz (CCoAOMT; COMT yerine), hidroksil sinnamil-CoA hidraz/liyaz (HCHL) ve aminotransferaz (pAMT) katalizörlüğünde vanililamine dönüştürülür. Öte yandan, valin gibi piruvat metabolitleri, dallı amino asit transferaz (BCAT), β -ketoaçıl-ACP sentaz (KAS), açıl taşıyıcı protein (ACL), açıl-ACP-tiesteraz (FatA) ve asetil-CoA sentaz katalizörlüğünde 8-metilnonenoil-CoA'ya dönüştürülür (Zhang vd., 2022).

Son olarak kapsaisin, kapsaisin sentaz (CS) katalizörlüğünde vanililamin ve 8 metilnonenoil-CoA'dan oluşur. Şimdiye kadar, GPMP'nin PAL, C4H ve 4-CL genleri, kapsaisin dal yolunun (CBP) COMT, pAMT ve AT (veya kapsaisin sentaz CS'yi kodlayan Pun1), BCFAP'ın BCAT, KAS, FatA ve ACS, lignin biyosentez yolunun (LBP) CCR ve CAD ve diğer metabolik yol genleri dahil olmak üzere kapsaisin metabolizmasında yer alabilecek yaklaşık 50 gen keşfedilmiştir.



Şekil 2.2. Kapsaisin biyosentezi (Arce-Rodríguez ve Ochoa-Alejo, 2017)

Kapsaisin biyosentez yolunda yer alan Pun1, COMT, pAMT, KAS ve CAKR1 genlerinin susturulmasının kapsaisin içeriğini azalttığı tespit edilmiştir (Koeda vd., 2019). Dizi analizi, Pun1 gen evrimindeki asimetrik replikasyon, promotör ve ekzon dizilerinin silinmesi ve çerçeve kayması mutasyonlarının sırasıyla *C. annuum*, *C. chinense* ve *C. frutescens*'te acılığın azalmasına veya kaybolmasına yol açtığını ve pAMT geninin 12 bp delesyon mutasyonu ve 7 bp insersiyonunun sırasıyla *C. frutescens* ve *C. chinense* No. 4034'ün düşük kapsaisinoid içermesinden sorumlu olduğunu göstermiştir (Kirii vd., 2017). Önceki çalışmalarda, lignin yolunda yer alan anahtar enzimlerden CCR1 ve CCR2'nin farklı substratlarla farklı bağlanma afinitesinin olduğu ve bunları kodlayan

genlerin susturulmasının kapsaisin içeriği üzerinde farklı etkilere sahip olduğu belirtilmiştir (Lei vd., 2020). Dahası, bu genlerin çoğunun bitkilerde farklı transkripsiyon faktörleri tarafından düzenlendiği bulunmuştur. Son yıllarda, genomik ilişkilendirme analizleri (GWAS) sayesinde, ankyrin (asetil transferazı kodladığı tahmin edilen çapa proteini) gibi kapsaisinoid sentezi ile ilgili daha fazla yol ve gen bulunmuştur. Aynı zamanda, farklı biber genomlarının başarılı bir şekilde dizilenmesiyle, genlerin ve gen ailelerinin tüm genom düzeyinde tanımlanması ve analizi önemlidir. Transkriptom verilerine dayalı olarak biberdeki biyosentetik maddelerle ilgili yapısal genlerin ve transkripsiyon faktörlerinin analizi üzerine giderek daha fazla çalışma yapılmaktadır (Arce-Rodríguez vd., 2021). Transkriptom analizi yoluyla, kapsaisin biyosentezi ile ilgili olabilecek genleri arayabilir ve bu genlerin özelliklerini anlayabiliriz, bu da biberde kapsaisinoid sentez mekanizmasını daha iyi anlamamıza yardımcı olabilir.

2.4 Kapsaisinoidlerin *in vitro* Kültür Üretimi

In vitro kültürler, hücre ve dokuların kapsaisinoid üretme kapasitesini araştırmak ve bu bileşikler içeren biyokimyasal ve moleküler çalışmalar için kullanılmıştır (Ochoa-Alejo ve Ramirez-Malagon, 2001). Bazı durumlarda, farklılaşmamış hücre süspansiyonları veya kallus kültürleri, kapsaisinoid üretimini araştırmak veya bu bileşiklerin birikimini etkileyebilecek faktörleri incelemek için çalışılmaktadır. Altúzar-Molina vd. (2011), *C. chinense*'nin hücre süspansiyon kültürlerinde salisilik asit (SA) ve metil jasmonatın (MJ) kapsaisinoid biyosentezinin bir ara maddesi olan vanilin birikimi üzerindeki etkisini araştırmıştır. Bazı spesifik SA ve MJ seviyelerinde vanilin birikiminin uyarıldığını ve bu etkinin fosfolipaz inhibitörü olan neomisin ile önceden yapılan inkübasyonla dengelendiğini gözlemlemişlerdir, bu da fosfolipidik ikinci habercilerin sürece katıldığını düşündürmektedir. Ayrıca, Rodas-Junco vd. (2013) SA uygulamasının, fosfolipaz C ve D yolunun aracılık ettiği PAL (fenilalanin amonyum liyaz) aktivitesini artırarak *C. chinense* hücre süspansiyonlarında vanilin birikimini artırdığını göstermiştir.

Naga King Chili'nin (*C. chinense* Jacq.) 1 mM SA veya kalsiyum iyonoforu A23187 ile muamele edilen hücre süspansiyon kültürleri, yüksek büyüme indeksi ile etkili kapsaisin birikimi ($567,4 \pm 8,1 \mu\text{g/g}$ taze ağırlık) göstermiştir (Kehie vd., 2016). Buna ek olarak, kapsaisin üretimi kalsiyum kanal blokleri verapamil hidroklorür (100 mM) ile engellenmiştir. Bu da hücre süspansiyonlarında kapsaisinin ortaya çıkarılması sırasında

kalsiyum kanal modölatörlerinin katılımını düşündürmektedir. Farklılaşmamış *in vitro* kültürler sıklıkla düşük seviyelerde kapsaisinoid üretimi gösterir (Ochoa-Alejo ve Ramirez-Malagon, 2001), bu da acı bileşiklerin biyosentezi için hücre farklılaşmasının veya doku özelleşmesinin gerekli olduğunu düşündürür. Aslında kapsaisinoidler özellikle plasental dokularda birikir, bu da *in vitro* koşullar altında birikimlerini etkileyebilecek farklı faktörleri araştırmak için bir sistemi temsil eder.

Baas-Espinola vd. (2016), *in vitro* koşullarda kesilip muhafaza edilen *C. chinense* meyvelerinden plasentalarda kapsaisin biyosentezi için *in situ* fenilalanin veya valinin gerekli olup olmadığını test etmiştir. Fenilalanin veya valin biyosentezi sırasıyla p-florofenilalanin veya klorsülfüron spesifik inhibitörleri kullanılarak bloke edildiğinde kapsaisin birikiminde önemli bir azalma olduğu gösterilmiştir. Başka bir çalışmada, *C. frutescens* fidelerinden alınan hipokotil eksplantları, *Vanilla planifolia*'dan kodonu optimize edilmiş bir vanilin sentaz geni (VpVAN) taşıyan bir vektör ile mikropartikül bombardımanı yoluyla dönüştürülmüştür (Chee vd., 2017). Kallus dokusu, seçici koşullar altında (0,2 mg/l blasticidin) 0,1 mg/l naftalenasetik asit (NAA) ve 5 mg/l benziladenin (BA) ile desteklenmiş MS ortamında (Murashige ve Skoog, 1962) kültürlenerek eksplantlardan elde edilmiştir. Kallus dokusunda raportör gen yeşil floresan proteinin (GFP) ekspresyonu floresan mikroskopu ile izlenmiştir. VpVAN entegrasyonu genomik DNA kullanılarak PCR analizi ile gösterilmiştir. Dönüştürülmüş kallusta HPLC ile vanilin birikiminde önemli bir artış (190 kat) kaydedilmiştir. Ancak, dönüştürülmüş kallusta kapsaisinoid analizi sunulmamıştır.

2.5 Çevresel Faktörlerin Kapsaisin Biyosentezi ve Birikimi Üzerine Etkisi

Acı biber meyveleri, acı biber türüne ve gelişme veya olgunlaşma aşamalarına bağlı olarak belirli oranlarda farklı kapsaisinoid analogları üretir. Bu gerçek, kapsaisinoid biyosentezinin son adımını katalize eden kapsaisinoid sentazın, substrat afinitesine ve/veya alternatif olarak substratların mevcudiyetine veya bolluğuna bağlı olarak vanililaminin dallı zincirli yağ asitleriyle kondensasyonunu katalize etmesi gerektiği gerçeğiyle açıklanabilir. Thiele vd. (2008), *C. chinense* var. *habanero orange* ve *C. annum* var. *jalapeño* meyvelerinin plasental dokusundaki tiyoester, açıl-ACP ve açıl CoA seviyelerini, ayırma için DEAE-Sepharose kromatografisi ve analiz için GC-MS kullanarak belirlemiştir. Yağ asidi profili ile meyvelerdeki kapsaisinoidlerin paterni

arasında pozitif bir korelasyon gözlemlenmiştir, bu da dallı zincirli yağ asidi bölümlerinin bolluğunun veya mevcudiyetinin kapsaisinoidlerin bileşimini ve oranlarını belirlediğini göstermektedir. Öte yandan, *in vitro* izotip yağ açıl-CoA substrat rekabet deneyleri ile analiz edilen yoğunlaştırıcı enzimin (kapsaisinoid sentaz) özgülüğünün, acı biber meyvelerindeki kapsaisinoid birikim modelindeki farklılıklardan sorumlu olmadığı görülmektedir.

Bitkilerde ikincil metabolitlerin biyosentezi ve birikimi genellikle çevresel faktörlerden etkilenir (Verma ve Shukla, 2015). Azot gübrelemesi, jalapeno (*C. annuum* L.) veya habanero (*C. chinense*) biber meyvelerinin acılığını (kapsaisin ve dihidrokapsaisin içeriği) artırırken (Medina-Lara vd., 2008), potasyum önemli bir etki göstermemiştir. Monforte- González vd. (2010), Hoagland çözeltisinde yetiştirilen bitkilerden elde edilen habanero (*C. chinense* Jacq) biber meyvelerinin izole plasental dokusunda nitrat ve potasyumun kapsaisin birikimi üzerindeki etkisini tanımlamıştır. NO₃ arttıkça kapsaisinoid birikimi üzerinde olumlu bir etki gözlemlenirken, potasyum ile muamelenin kapsaisinoid birikimi üzerinde net bir etkisi olmamıştır. Gurung vd. (2011), farklı acılık seviyelerine sahip 14 çeşit biber meyvesinde kapsaisinoid birikimi üzerinde rakımın etkisini rapor etmiştir. Çeşit ve yükseltiye bağlı olarak kapsaisin ve dihidrokapsaisinde önemli farklılıklar tespit edilmiştir. Meyvelerdeki kapsaisinoid seviyeleri yükseltiyle birlikte artmış ve en acı çeşitler farklı konum ve yükseltilerde daha yüksek kapsaisinoid içeriği göstermiştir. Bu çalışmalar sonucunda altı çevresel koşulda (farklı yükseklik ve konumlar) yetiştirilen altı acı biber çeşidini kullanarak daha ileri bir araştırma yapılmış ve meyvelerde kapsaisinoid birikiminde bu faktörlerin önemi gösterilmiştir (Gurung vd., 2012).

Haak vd. (2012), *C. chacoense*'nin doğal popülasyonlarının acı ve acı olmayan genotiplerinin mekansal dağılımında nem seviyelerine bağlı olarak farklılıklar gözlemlenmiştir. Bu durumda, acı bitkilerin oranı nem arttıkça artmıştır. Daha nemli ortamlarda acılığın artması, bu koşullar altında oldukça yaygın olan mantar enfeksiyonlarına karşı bir koruma stratejisi ile bağdaştırılabilir.

Genel olarak, bitkiler sıklıkla farklı türde stres faktörlerine maruz kalırlar, bunlar arasında kuraklık stresi bitkilerin sıklıkla karşılaştığı ve fizyolojik, biyokimyasal ve moleküler değişikliklere neden olan bir durumdur. Phimchan vd. (2012) göre, çiçeklenmeden sonra

10, 20 ve 30 gün boyunca su kaynağının %25, 50 ve 70'e düşürülmesiyle uygulanan kademeli kuraklık stresi ile muamele edilen, bazıları düşük, orta ve yüksek kapsaisinoid içeriğine sahip dokuz çeşitten biber meyveleri, en acı çeşitler hariç, kapsaisin seviyelerinde önemli bir artış sergilemiştir. Bir başka çalışmada, Phimchan vd. (2014), acılık bakımından farklılık gösteren ve kuraklık stresi koşulları altında yetiştirilen beş çeşitten elde edilen acı biber meyvelerinin, kontrol bitkilerinden elde edilen meyvelere kıyasla PAL, C4H, AT3 ve peroksidaz (POD) enzim aktivitelerinde artış gösterdiğini bildirmiştir. İlginç bir şekilde, PAL'ın su kıtlığı altında kapsaisin biyosentezinde kritik bir rol oynadığı görülmüştür. Hem PAL aktivitesi hem de kapsaisin birikimi kuraklık stresi altındaki acı biber çeşitlerinin acılığını artırmıştır. Tanımlanan enzimlerin artan aktivitelerine ilişkin bu sonuçlar, daha önce Sung vd. (2005) tarafından su kıtlığına maruz bırakılan üç acı biber çeşidinde bildirilenlerle uyumludur.

Jeeatid vd. (2018) göre, su stresi, günlük sulama altında, her 2, 3 veya 4 günde bir sulanan farklı acılığa sahip dört *C. chinense* çeşidinde kapsaisinoid birikimini etkilemiştir. 'Akanee Pirote' meyveleri, sulama rejimi 2 günde bir olduğunda en yüksek kapsaisinoid birikimini göstermiştir. 'Bhut jolokia', 'turuncu habanero' ve 'BGH1719' bitkilerinin su stresi altındaki meyvelerinde ise su rejimine bağlı olarak kontrolden daha yüksek seviyelerde kapsaisinoid birikimi gerçekleşmiş, bu da su stresi koşullarına verilen yanıtta farklılıklar olduğunu göstermiştir.

Başka bir çalışmada atmosferik CO₂ koşullarının habanero (*C. chinense*) biber bitkilerinde kapsaisinoid birikimini etkilediği belirtilmiştir. Bitkiler farklı CO₂ seviyeleri (380, 760 ve 1140 µmol/mol) altındaki odalara yerleştirilerek toplam kapsaisinoidleri ölçmek için olgunlaşmamış ve olgun meyveler toplanmıştır. Olgun meyveler atmosferdeki CO₂ arttıkça kapsaisinoid seviyelerinde artış göstermiştir; ancak olgunlaşmamış meyveler CO₂ seviyesinden etkilenmemiştir (Garraña- Hernández vd., 2013).

Acı biber bitkilerinin optimum büyüme sıcaklığı 25 ila 30°C arasında değişmektedir, ancak sıcaklıktaki değişimler kapsaisin biyosentezi ve birikimi gibi farklı biyolojik süreçleri etkilemektedir. *C. annuum*'un 24,1 veya 29,9°C'de yetiştirilen altı düşük acılıktaki çeşidi, sıcaklık arttıkça en yüksek kapsaisin içeriğini göstermiştir (Rahman ve

Inden, 2012). Öte yandan, González-Zamora vd. (2013) sekiz *C. annuum* çeşidinde yüksek sıcaklıkta kapsaisin içeriğine ilişkin heterojen bir davranış gözlemlemiştir.

Işığa maruz kalma çoğunlukla kapsaisin birikimini olumlu yönde etkiler. Gangadhar vd. (2012), mavi LED'in *C. annuum* L. cv. Cheonyang biber meyvelerinde floresan veya kırmızı ve kırmızı/mavi LED ışığa kıyasla kapsaisin içeriğini önemli ölçüde artırdığını bildirmiştir. Ayrıca, AT3 promotör aktivitesinin ışığa maruz kalan transgenik *Arabidopsis* bitkilerinde karanlık koşullar altındaki bitkilere kıyasla daha yüksek olduğu bildirilmiştir (Kim vd., 2009). Benzer şekilde, yapısal genler KAS, pAmt ve transkripsiyon faktörü geni CaMYB31'in ifadesinin Serrano cv. Tampiqueño 74 meyvelerinde ışık uyarani altında karanlıktakinden daha yüksek olduğu bildirilmiştir (Arce-Rodríguez ve Ochoa-Alejo, 2017).

2.6 Kapsaisinin Kullanım Alanları

2.6.1 Gıda uygulamaları

Kapsaisin, dünya çapında baharat ve gıda katkı maddesi olarak yaygın bir şekilde kullanılmaktadır (Liu vd., 2015a). Antimikrobiyal ve oksidasyon direnci özellikleri nedeniyle, gıda koruma amacıyla kullanılabilir (Si vd., 2021). Toz kırmızı biber, acı sos, kimchi, turşu, tuzlanmış deniz ürünleri, kırmızı biber salçası ve hazır erişte kapsaisin içeren gıdalardan bazılarıdır (Cho ve Kwon, 2020). Gıdalara baharatlı bir tat vermek için de eklenebilir. Ayrıca, yaygın olarak kullanılan iki örneği acı ketçap sosu ve acı biber sosu (örn. tabasco sosu) olan çeşitli sosların formülasyonunda bir bileşen olarak kullanılabilir (Barbero vd., 2016; de Farias vd., 2020). Acılı karides ezmesi Güneydoğu Asya'ya ait bir çeşnidir ve taze biber (kapsaisin içeren) ana bileşenlerinden biridir (Cheok vd., 2017). Kapsaisin ayrıca baharatlı risotto, baharatlı paneer peyniri, farklı kimchi türleri (örneğin turp kimchi ve lahana kimchi) ve hazır erişte formülasyonlarında da kullanılmaktadır (Kim vd., 2018; Kwon, 2021). Lipofilik yapısı ve düşük suda çözünürlüğü nedeniyle kapsaisin nemli gıdalarda sınırlı olarak kullanılmaktadır (Feng vd., 2018). Doğal acılık, ısı ve ışığa maruz kalma durumunda tat ve stabilite kaybı, kapsaisin kullanımı ile ilgili bazı problemlerdir (Sanatombi ve Rajkumari, 2020).

Kapsaisinın kapsüllenmiş formu, uzun süreli gıda muhafazasında antioksidan ve antimikrobiyal ajan olarak kullanılmaktadır (Xing vd., 2006). Kapsaisin, mikotoksinlerle kontaminasyona maruz kalan gıdalarda koruyucu olarak da kullanılmaktadır. Kapsaisinın *Aspergillus parasiticus* tarafından aflatoksin üretimini azaltabildiği bildirilmiştir (Buitimea-Cantúa vd., 2020). Lipit peroksidasyonunu engellemek için yağlarda doğal bir antioksidan olarak da kullanılmaktadır. Si vd. (2012), α linolenik asit ve linoleik asidin azalmasını ve oksijen tüketimini izleyerek 60, 90, 120 ve 180°C sıcaklıklarda kanola yağında kapsaisinoidlerin antioksidan aktivitesini araştırmak için bir çalışma yürütmüştür. Sonuçlara göre, kapsaisinoidler 60°C'de kanola yağının oksidasyonunu engellemede yüksek etkinlik sergilemiştir. Zeng vd. (2017), acı biber ve kapsaisinın inhibitör aktivitesinin yanı sıra bunların biftek köftesinde heterosiklik amin üretimi üzerindeki etkisini incelemiştir. Heterosiklik aminlerin oluşumunun farklı konsantrasyonlarda kapsaisin ve acı biber tarafından engellendiği gözlenirken, köftelerin dokusunda önemli bir değişiklik gözlenmemiştir. Si vd. (2021), yavaş salınım sürelerini değerlendirmek için 50, 100 ve 400 nm partikül boyutlarına sahip kapsaisin yüklü mezogözenekli silika nanopartiküller (MSN'ler) yapmışlardır. Kıymanın tazeliğini korumak için kapsaisinın partiküller üzerindeki antioksidan etkisini değerlendirmişlerdir. Sonuçlara göre, 50 nm partikül boyutuna sahip kapsaisin yüklü MSN'ler, 5 günlük depolamadan sonra saf kapsaisine göre daha yüksek oksidasyon direnci sergilemiş ve bu da yavaş salınım etkisine bağlanmıştır. Ayrıca, MSN'lerin yavaş salınım etkisinin bir sonucu olarak kıymadaki kapsaisinın acılığı azalmıştır.

Li vd. (2014), kapsaisin ile zenginleştirilmiş bir hamuru iki gastro-dirençli hamur katmanı içine koyarak, kapsaisini erişte matrisi içinde daha uzun süre tutabilen ve gastrointestinal sistemde kontrollü bir şekilde salabilen kapsaisin ile zenginleştirilmiş fonksiyonel, katmanlı eriştelere elde etmeyi amaçlamışlardır. Bu çalışmada kullanılan biber tozundaki kapsaisin miktarı 2.0 mg/g (acı olarak kabul edilen 31,384 Scoville Isı Değerine eşdeğer) ve eriştelerdeki kapsaisin miktarı 15-17 mg/100 g eriştedir. Askin vd. (2022), yeni bir tada sahip ve besin değerleri açısından zengin fonksiyonel bir yoğurt elde etmeyi amaçlayarak oleik ayçiçek yağı içeren kapsaisin özütü ile zenginleştirilmiş bir yoğurt yapmışlardır. Yoğurdun seçilmesinin nedeni kapsaisinın suda çözünmemesi ve polar olmayan kazein molekülleri tarafından çözülebilir hale gelebilmesidir. Hazırlanan yoğurtların, geleneksel yoğurda kıyasla daha sıcak bir tada, daha iyi kaliteye, daha sıkı bir dokuya ve daha iyi duyu kaliteye sahip olduğu belirtilmiştir.

Zhang vd. (2018), kapsaisin ile harmanlanmış bir dizi sodyum aljinat/pullulan kompozit yenilebilir film üretmiştir. Kompozit filmlere kapsaisin eklenmesinin filmlerin net katmanlı yapılarına yol açtığını gözlemlemişlerdir. Taze elma küplerini bir hafta boyunca sodyum aljinat/pullulan/kapsaisin kompozit filmleriyle kaplamışlar ve 3 gün sonra, kaplamasız ve %0 sodyum aljinat/pullulan/kapsaisin kompozit film kaplamalı elma küplerinin karardığını ve bozulduğunu, farklı kapsaisin içerikli film kaplı elmaların ise filmlerdeki kapsaisin miktarını artırarak daha uzun süre taze kalmalarının sağlandığını gözlemlemişlerdir. Akyuz vd. (2018) farklı miktarlarda kapsaisin (0,3, 0,6 ve 1,2 mg) içeren kitosan filmler üretmişlerdir. Elde edilen sonuçlar, kitosan filmlerin biyolojik, fizikokimyasal ve mekanik özelliklerindeki iyileşmenin filmlerin farklı miktarlarda kapsaisin ile karıştırılmasından kaynaklandığını göstermiştir. Ayrıca, kapsaisin konsantrasyonundaki artışla birlikte filmlerin anti quorum sensing, antimikrobiyal, şeffaflık, elastikiyet, hidrofobiklik ve antioksidan özellikleri kademeli olarak iyileşmiştir. Kitosan-kapsaisin filmlerinin gıda endüstrisinde ambalaj malzemesi olarak kullanılabileceği öne sürülmüştür. Başka bir çalışmada, Zhao vd. (2020) gıda ambalajı için antibakteriyel biyomalzemeler olarak kapsaisin yüklü içi boş metal organik çerçevelere sahip bir jelatin/kitosan kompozit film yapmışlardır. Ayrıca, FeIII katkılı içi boş metal-organik çerçeveler (Cap-FeIIHMOF-5), hidrofobikliğini düzenleyen ve faz ayrımı sorununu etkili bir şekilde çözen kapsaisin nanotaşıyıcıları kullanılmıştır. Su vd. (2020), çeşitli kapsaisin içeriklerinin filmlerin fizikokimyasal özellikleri üzerindeki etkilerini değerlendirmek için kapsaisin içeren etil selüloz kompozit filmler yapmışlardır. Şeffaf, yumuşak, su geçirmez ve çevre dostu etil selüloz-kapsaisin filmler elde etmişlerdir. Etil selüloz-kapsaisin kompozit filmler *S. aureus* ve *E. coli*'ye karşı etkin antimikrobiyal aktivite sergilemiştir. Ayrıca, etil selüloz-kapsaisin filmlerinin dolmalık biberlerin muhafazasında pratik uygulaması araştırılmış ve sonuçlar kapsaisin karışımı polimerik filmlerin dolmalık biberin olgunlaşma sürecini etkili bir şekilde geciktirdiğini ve meyvelerin nispeten taze kalmasına yardımcı olabileceğini göstermiştir. Buna göre, bu filmlerin gıdaların raf ömrünü uzatmak için ambalaj malzemesi olarak kullanılması önerilmiştir.

2.6.2 Farmakolojik uygulamaları

Çalışmalar kapsaisinin antiinflamatuvar aktivite, antikanser özelliği, kardiyovasküler koruma, solunum rahatsızlıkları, sindirim performansının iyileştirilmesi ve cilt

hastalıklarının tedavisini de içeren geniş terapötik uygulamaları nedeniyle yaygın olarak kullanıldığını göstermektedir (Basith vd., 2016; Lu vd., 2020; Yang ve Du, 2018). Bir dizi çalışma, postherpetik nevralji, ağrılı diyabetik nöropati, cerrahi sonrası nöropatik ağrı, fibromiyalji ve artrit gibi ağrılı kas-iskelet sistemi rahatsızlıkları, nöropatik ağrı, kompleks bölgesel ağrı sendromu, aşırı duyarlı mesane hastalığı, postmastektomi ağrı sendromu, küme baş ağrısı ve benzeri çeşitli ağrılı durumların tedavisinde kapsaisin üzerine odaklanmıştır. Mózsik vd. (2001) kapsaisine duyarlı primer afferentlerin kapsaisine karşı uyarılma, duyusal engelleme etkisi, uzun süreli seçici nörotoksik bozulma ve geri dönüşü olmayan hücre yıkımı olmak üzere dört tepki aşamasını ortaya koymuştur. Plasebo kontrollü, çapraz bir çalışma, tek bir kapsaisin %8 yama ön uygulamasının subkutan treprostinil kaynaklı ağrıyı azaltabileceğini göstermiştir (Light vd., 2017). Ayrıca, Morton nöroması olan hastalara 0,1 mg'lık tek bir doz kapsaisin enjeksiyonu yapıldığında, 4. haftada plaseboya kıyasla ağrıda önemli bir azalma görülmüştür. Bu durum ağrılı intermetatarsal nöromada kapsaisinin umut verici yeni bir tedavi olduğunu düşündürmüştür (Campbell vd., 2016). Kapsaisin, erken dönem etkilere neden olmasından dolayı kapsaisin enjeksiyonundan hemen sonra analjezik etkilere yol açmaktadır. Kapsaisin kaynaklı analjezinin altında yatan mekanizmalar hala iyi anlaşılmamıştır ve daha fazla araştırmaya ihtiyaç duyulmaktadır.

Alzheimer hastalığı (AH), hücre dışı amiloid b'nin plaklar şeklinde birikmesi ve hiperfosforile tau proteinlerinin nörofibriler yumaklar halinde hücre içinde birikmesi, ilerleyici nöron kaybı ve serebral atrofi ile karakterize yıkıcı bir nörodejeneratif bozukluktur (Cosacak vd., 2020). Demansın en yaygın nörodejeneratif formudur ve bu vakaların %50-70'ini oluşturur (Joe ve Ringman, 2019). Demansın 2010 yılında dünya çapında 35,6 milyon kişiyi etkilediği tahmin edilmektedir ve bu sayının her 20 yılda bir ikiye katlanması beklenmektedir (Prince vd., 2013). Beslenme alışkanlıkları, obezite hipertansiyon, yaş ve anksiyete dahil olmak üzere birçok risk faktörü demans ile ilişkili olabilir. (Carpenter vd., 2020; Johansson vd., 2020). Hayvanlarla yapılan çalışmalarda kapsaisinin bilişsel işlevdeki rolü tartışmalıdır. Bazı çalışmalar kapsaisinin nörotoksik olduğunu öne sürmektedir. Bununla birlikte, kapsaisinin bilişsel işlev veya Alzheimer hastalığında olumlu bir rolü olduğu da kanıtlanmıştır. Örneğin, kapsaisinin sıçanların beyinde stres kaynaklı AH benzeri değişiklikleri önleyici bir etkisi olduğu kanıtlanmıştır. Ayrıca kapsaisin, kapsaisin içeren yüksek yağlı diyetle beslenen Tip 2 diyabet (T2D) Sprague-Dowley (SD) sıçanlarında AH riskini azaltabilir (Xu vd., 2017).

Yapılan bir çalışma, intragastrik infüzyon yoluyla kapsaisin tedavisinin (10 mg/kg) streptozotosin kaynaklı Alzheimer hastalığının yetişkin albino erkek sıçan modelinde bilişsel işlevleri modüle edebileceğini ortaya koymuştur (Shalaby vd., 2019). Acı biber tüketimi ve bilişsel işlev arasındaki ilişkiye dair epidemiyolojik çalışmalar sınırlıdır. 40 yaş ve üzeri 338 katılımcının yer aldığı bir araştırma, daha yüksek düzeyde kapsaisin içeren diyetlerin orta yaşlı ve yaşlı yetişkinlerde bilişsel işlev ve AH'nin serum Ab düzeyleri üzerinde olumlu etkiler gösterebileceğini öne sürmüştür (Liu vd., 2016). Son zamanlarda, 4582 Çinli yetişkin arasında Çin Sağlık ve Beslenme Araştırması'ndan (CHNS) 15 yıllık bir süre boyunca toplanan veriler, biber alımı ile bilişsel işlev arasında pozitif bir ilişki olduğunu desteklemiştir (Shi vd., 2019). Yapılan çalışmaların sonucu olarak kapsaisin AH benzeri nöropatolojik değişiklikleri ve bilişsel bozukluğu azaltabilmekte ve AH'de terapötik müdahale için bir yaklaşım olarak umut verici olabileceği düşünülmektedir.

Diabetes mellitus, insülin salgılanmasındaki bozulmaya bağlı olarak hipergliseminin varlığı ile karakterize edilen ve genellikle poliüri, polidipsi, sürekli açlık ve kilo kaybı gibi diğer bazı semptomların eşlik ettiği bir grup metabolik bozukluktur (Punthakee vd., 2018). Tip 2 diabetes mellitus (T2DM), pankreas yeterli insülin üretmediğinde veya üretilen insülin etkili bir şekilde kullanılamadığında ortaya çıkar ve diyabetin çoğunluğunu (%90-95) oluşturur (Xiao vd., 2019). Yapılan *in vivo* ve *in vitro* çalışmalar, kapsaisinın glukoz metabolizmasının iyileştirilmesinde önemli bir rol oynadığını göstermiştir. Sistemik kapsaisin aktivasyonu, kapsaisine duyarlı hücrelerin dejenerasyonuna ve diyabetik sıçanlarda glukozla uyarılan insülin salgılanmasında uzun vadeli değişikliklere neden olabilir (Karlsson vd., 1994). Bunu takiben, kapsaisine duyarlı sinirlerin T2DM patogenezindeki rolü çok daha fazla dikkat çekmiştir. Kapsaisin (100 mg/kg) ile desteklenen erkek obez Zucker sıçanlarında plazma kalsitonin geniyle ilişkili peptidlerin (CGRP) seviyelerinde artış görülürken, glukoz toleransı kapsaisin kaynaklı duysal sinir duyarsızlaştırması ile iyileştirilmiştir (Gram vd., 2005). Ayrıca, neonatal kapsaisin uygulanan SD sıçanlarda (50 mg/kg) insülin aracılı glukoz metabolizması artmış, bu da kapsaisin kaynaklı nöropeptid içeren duysal sinirler tarafından *in vivo* insülin duyarlılığını artırmıştır (Koopmans vd., 1998). Buna ek olarak, diyabetli erkek Wistar sıçanlarına 8 hafta boyunca 1 mg/kg-gün kapsaisin uygulanmış ve kapsaisinın diüretik etkisi olduğu ve idrar epidermal büyüme faktörü seviyelerini arttırdığı gösterilmiştir (Ríos-Silva vd., 2018). Ayrıca, kapsaisin tip 1 diabetes mellituslu (T1DM)

sıçanlar üzerinde de hipoglisemik etkiler sergilemiştir (Zhang vd., 2017). Tüm bu bulgular, kapsaisine duyarlı yapıların insülin salgılanması ve kan glukozunun düzenlenmesinde rol oynaması gerektiğini göstermiştir. Rastgele seçilmiş hastalarla yapılan bir çalışmada, kapsaisin içeren biber takviyesinin (5 mg/gün kapsaisin) gestasyonel diabetes mellituslu kadınlarda yemek sonrası hiperglisemi ve hiperinsülineminin yanı sıra açlık lipid metabolik bozukluklarını düzenli olarak iyileştirdiği gösterilmiştir (Yuan vd., 2016).

Hipertansiyon, yüksek görülme sıklığı ve ona eşlik eden kardiyovasküler ve böbrek hastalığı riskleri nedeniyle dünya çapında önemli bir halk sağlığı sorunudur. Hipertansiyonu olan yetişkinlerin sayısının 2025 yılında yaklaşık % 60 artarak toplam 1,56 milyara ulaşacağı tahmin edilmektedir (Kearney vd., 2005). Çeşitli hayvan çalışmaları kapsaisin veya biber alımı ile hipertansiyon arasında yakın bir ilişki olduğunu göstermiştir. Erkek SD sıçanlarda renal iskemiden 3 saat önce düşük dozda (1 mg/kg) kapsaisin subkutan olarak uygulanmış, bu da yüksek tuz alımının neden olduğu renal disfonksiyonu, enflamasyonu ve oksidatif stresi iyileştirerek iskemi-reperfüzyon hasarından sonra tuzun neden olduğu hipertansiyonu önleyebilmiştir (Yu vd., 2018). Yüksek dozda (100 mg/kg) kapsaisinle beslenme sistolik kan basıncını yükseltmiş ve renal iskemiya-reperfüzyon hasarı olan sıçanların böbrek fonksiyonlarını bozmuştur (Yu vd., 2020). Buna ek olarak, başka bir çalışma dişi sıçanlara kapsaisinin (10 lg/kg) bolus enjeksiyonunun ani hipotansiyon, ara iyileşme ve gecikmiş hipotansiyon dahil olmak üzere trifazik basınç hipotansiyonu ürettiğini göstermiştir (Akella ve Deshpande, 2015). Sağlıklı 9273 yetişkinden oluşan kesitsel bir çalışmada, yüksek baharatlı gıda tüketim sıklığının kadın katılımcılarda daha düşük hipertansiyon riski ile önemli ölçüde ilişkili olduğu, ancak erkek yetişkinlerde olmadığını göstermiştir (He vd., 2019). 1991-2011 yılları arasında Çin Sağlık ve Beslenme Araştırması'nda 20-75 yaş arası 13670 yetişkinle yapılan bir çalışmada, biber tüketiminin hipertansiyon riski ile ters bir ilişki gösterdiğini ortaya koymuştur (Shi vd., 2018). Baharatlı yiyeceklerden keyif almak, beyinde tuzlu tadın sinirsel olarak işlenmesini değiştirerek bireysel tuz tercihini, günlük tuz alımını ve kan basıncını önemli ölçüde azaltabilir. Sonuç olarak diyetle alınan kapsaisin hipertansiyonda umut verici bir yaşam tarzı müdahalesini temsil edebilir.

In vitro ve *in vivo* çalışmalar, kapsaisinin mide kanseri, kolon kanseri, meme kanseri, prostat kanseri, mesane kanseri, pankreas kanseri ve akciğer kanseri gibi farklı kanser

türleri üzerinde antikanser etkilere sahip olduğunu göstermiştir (Amantini vd., 2016; Hurley vd., 2017; Zhu vd., 2020). Kapsaisinin, apoptozun indüklenmesi ve anjiyogenezin inhibisyonu yoluyla kötü huylu hücre hatlarının büyümesini baskıladığı bulunmuştur. Chen vd. (2018), statik manyetik alanla kombine edilen kapsaisinin HepG2 hücresinin büyümesini mitokondri bağımlı apoptoz yolu ile sinerjik olarak inhibe edebileceğini ve bunun da kapsaisinin anti-kanser etkisini artıracakını bildirmiştir. Ayrıca, kapsaisinin renal karsinom hücrelerinin proliferasyonunu azalttığı, insan nazofaringeal hücrelerinin büyümesini inhibe ettiği ve otofajiyi indüklediği gösterilmiştir (Lin vd., 2017; Wang vd., 2015). *In vivo* çalışmaların daha fazla kanıtı kapsaisinin anti-kanser özelliklerini desteklemiştir. Kapsaisinin 5 mg/kg vücut ağırlığı dozunda subkutan enjeksiyonu PC-3 tümör büyümesini baskılamış Sanchez vd. (2006) ve T24 mesane kanseri ksenograftlarının büyümesini önemli ölçüde yavaşlatmıştır (Yang vd., 2010). Kapsaisinin karaciğer kanseri üzerinde potansiyel bir etkisi olduğu da bulunmuştur (Zhang vd., 2012).

2.6.3 Diğer uygulamaları

Kapsaisin, kozmetik endüstrisi, böcek caydırıcılığı ve oral bitkisel takviyeler için aktif bir madde olarak farklı endüstrilerde çeşitli uygulamalara sahiptir. Özelliklerine bağlı olarak pestisitlerde ve veterinerlikte bir bileşen olarak bir dizi uygulamada kullanılmaktadır. Pestisitler, haşereleri uzaklaştırmak için kullanılan bir maddedir. Ancak, maruz kalınması insan sağlığı ve çevre için gerçek bir tehdit oluşturmaktadır. Kapsaisin içeren ürünlerin eski zamanlardan beri böcekleri uzaklaştırmak için kullanıldığı belirtilmektedir. Literatürde çeşitli omurgasızlar üzerinde öldürücü ve antifeedant etkileri olduğu ortaya koyulmuştur, bu da organik tarımın biyopestisit üretimine yönelmesinin nedenlerinden biridir (Sinha vd., 2011). Böcekler için de kapsaisinin toksik olduğuna dair yaygın bir varsayım bulunmaktadır. Birçok çalışma kapsaisinin yumurtlamayı engellediğini, larva gelişimini yavaşlattığını ve beslenmeyi engellediğini göstermiştir (Ahn vd., 2011). Yapılan çalışmalara göre kapsaisin, depolanmış ürün böcekleri (*Sitophilus zeamais* ve *Tribolium castaneum*), pirinç tanesi böcekleri (*Sitotroga cerealella*), yonca biti, *Myzus persicae*, *Bemisia tabaci* ve *Plutella xylostella* gibi birçok böcek türüne karşı geniş spektrumlu insektisidal aktiviteye sahiptir (Zhao vd., 2012).

Denizlerdeki biyolojik kirlenme sürtünme direncini artırır ve hızı yavaşlatarak yakıt tüketiminin, bakım maliyetlerinin ve sera gazı emisyonlarının artmasına neden olur

(Yang vd., 2014). Bakteriler de dahil olmak üzere kirlenme organizmalarının büyümesini önlemek veya azaltmak için antifouling kaplamaların kullanılması hala en etkili yöntemdir (Wu vd., 2015; Zhang vd., 2016b). Deniz antifouling kaplamasında reçine yaygın şekilde uygulanmaktadır (Shin vd., 2019). Reçinelerin zayıf su direnci, zayıf yapışma, düşük sıcaklık kırılabilirliği ve yüksek sıcaklık viskozitesi gibi bazı performansları çeşitli talepleri karşılayamamaktadır (Ecco vd., 2014; Mehravar vd., 2017). Bu nedenle, akrilik reçinelerin özelliklerini geliştirmek için modifikasyonuna daha fazla dikkat edilmiştir. Akrilik polimerlerin antifouling özelliğini geliştirmek için akrilatların polimerizasyonuna bazı katkı maddeleri eklenmiştir. Bakır, çinko ve bunların oksitleri genellikle bakterisidal ve antifouling performansını artırmak için eklenmiştir (Anyagou vd., 2008). Cu ve P için biyositlerin sürekli salınımı deniz organizmaları için toksik olduğundan deniz ekosistemi için zararlıdır (Yebra vd., 2005). Bu nedenle, çevre dostu alternatif bir katkı maddesi aramak büyük bir zorluk oluşturmıştır. Doğal antifungal ve antibakteriyel olduğu bildirilen kapsaisin antifoulant olarak kullanılabileceği düşünülmüştür. Diğer antifoulantlarla karşılaştırıldığında, kapsaisin sadece deniz mikroorganizmalarının tutunmasını azaltmakla kalmaz, aynı zamanda biyoçeşitlilik, çevre ve insan sağlığı için çevre dostu olabilir. Bazı çalışmalar, kapsaisin harmanlama veya polimerizasyon yoluyla kaplamalara uygulanmasının antibakteriyel ve antifouling alanında etkili olduğunu ve bunun da deniz antifoulinginde umut verici bir beklentiye işaret ettiğini ele almıştır. Bazı araştırmacılar N-(2-hidroksil3-metil akrilamid-4, 6-dimetil benzil) akrilamid (HMDA) gibi kapsaisin analogları içeren monomer ve polimerlerin sentezine odaklanmıştır (Jia vd., 2013; Wang vd., 2015; Zhang vd., 2016b). Bununla birlikte, kapsaisin akrilol klorür ile reaksiyona girdiği akrilat monomerinin sentezi ve karakterizasyonu hakkında çok az rapor bulunmaktadır. Doğrudan karıştırma ile karşılaştırıldığında, kapsaisin ile kimyasal modifikasyon uzun süreli ve yavaş salınımlı bir kontrol stratejisi sağlar (Zhou vd., 2019).

2.7 Mikorizal Mantarlar

Mikorizal mantarlar ve bitkiler arasındaki simbiyotik ilişkiler iyi bilinmektedir. Başlıca rolleri, köklerin tek başına yapabileceğinden daha geniş bir toprak hacminden yararlanarak konak bitki tarafından besin ve su alımını artırmaktır. Mikorizal mantarların miselleri bitki köklerini kılıf gibi saran bir dış yapı oluşturabilirler, buna Ektomikoriza denmektedir ya da konukçu bitkinin kök hücrelerine nüfuz edebilirler, buna da

Endomikoriza adı verilmektedir. Her iki durumda iki canlı da bu ilişkiden fayda görmekte ve bitki gelişimi hızlandırılmaktadır. Endomikorizal mantarların hifleri kökün dışından hücre çeperini delerek hücre çeperi ile hücre zarı arasına yerleşir. Bu hifler şekil olarak ağaç köküne benziyorsa arbiskular endomikoriza, veziküle benziyorsa veziküler endomikoriza adını alır. Bu yapılar bitki hücresinden fotosentez ürünlerini alıp su ve mineralleri verirler. Endomikoriza genellikle tek yıllık bitkilerde görülür. Özellikle sebzelerin veriminin arttırılması için kullanılır (Türkoğlu vd., 2015).

Mikorizalar, hem konukçu bitkiye hem de mantar taksonomisine bağlı olarak çeşitli şekillerde ortaya çıkar. Bu formların ekosistemlerdeki dağılımı, konukçu bitkilerin dağılımı, iklim ve toprak koşulları ile ilişkilidir. Mikorizaların konukçu bitkinin besin ve su alımını iyileştirme ve kök patojenlerine karşı savunmaya yardımcı olma yeteneği konukçu bitkinin performansını değiştirebilir. Mikorizalar, topluluk içindeki bireysel türlerin performansını farklı şekilde değiştirerek bitki topluluğu kompozisyonunu etkileyebilir, rekabeti artırabilir ve türler arasında kaynak paylaşımı yoluyla sinerjizm yaratabilir. Mikorizalar tarım, ormancılık ve restorasyon alanlarında verimi artırmak ve bozulmuş alanlardaki ekimlerle ilişkili bazı kirleticilerin üstesinden gelmek için kullanılmaktadır. Mikorizal mantarların ağır metalleri ve radyonüklidleri biriktirme yeteneği, onları kirlenmiş ortamların restorasyonu ve iyileştirilmesi için olası adaylar haline getirmektedir (Dighton, 2009).

Endomikorizal mantarlar Glomeromycota bölümü içinde yer alır. Mikorizal mantarların, bitkinin hastalıklara karşı direncini arttırması, bitki gelişimine destek olması, bitkiyi kuraklığa karşı koruması ve besin maddelerinin alımına yardımcı olması yararları arasında sayılabilir (Biçici, 2011). Mikorizal kolonizasyonun bitkilere sağladığı bitki besin elementlerinden dolayı birçok bitki türünün büyüme ve gelişmesinde etkili olduğu bilinmektedir (Cavagnaro vd., 2006). Ayrıca bitkileri abiyotik stres koşullarına karşı (kuraklık, tuz, ağır metal vb.) koruduğu, fotosentez oranında artışa neden olduğu, stres koşullarında bitkiyi korumak için enzim seviyelerinde artış meydana getirdiği ve toprak kökenli zararlılara karşı dayanıklılığı artırdığı çeşitli çalışmalarla belirlenmiştir (Pozo ve Azcón-Aguilar, 2007; Ruiz-Lozano, 2003).

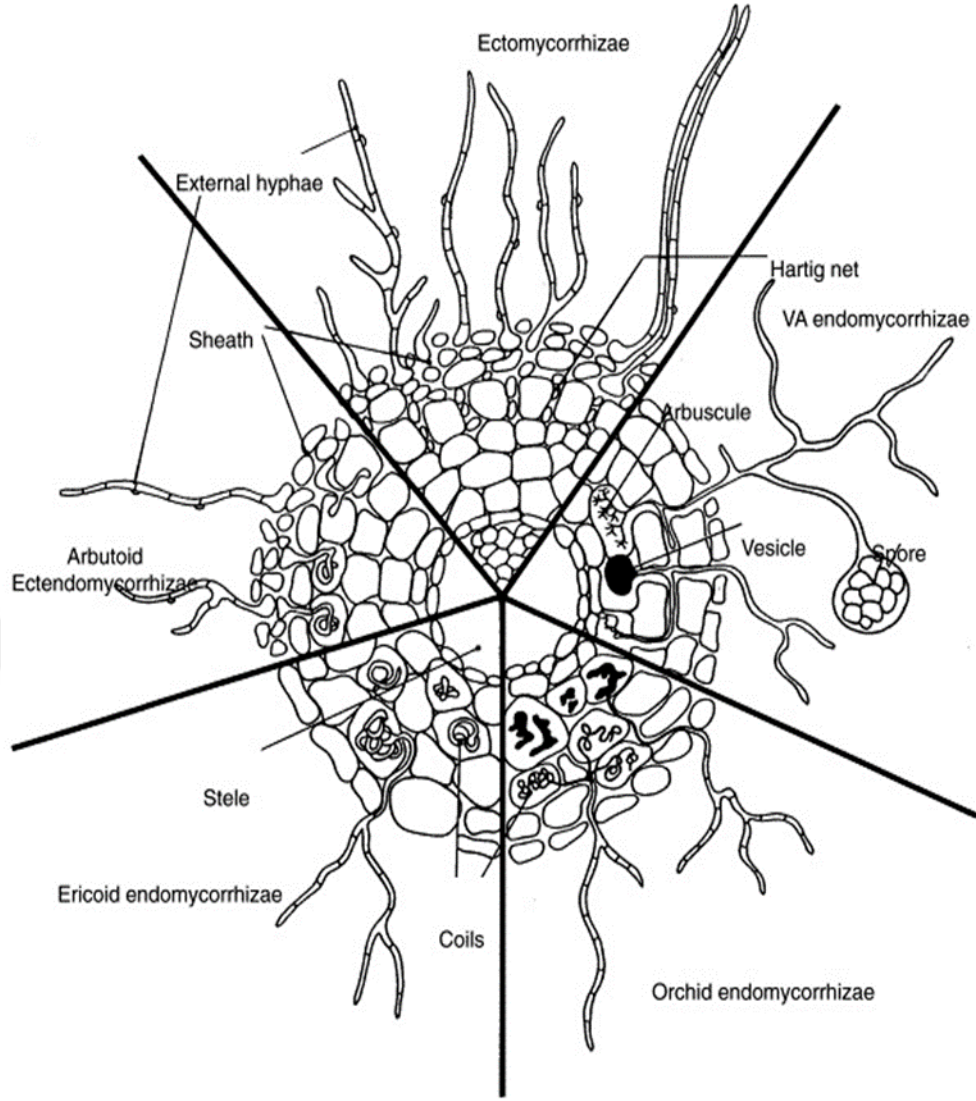
Çeşitli mikoriza türleri içinde, Glomeromycota filumundan arbusküler mikoriza en yaygın ve en eski olanlardan biridir ve tüm kara bitki türlerinin yaklaşık %80'i ile

ilişkilidir (Schüßler ve Walker, 2011). Bu mantar türü sıcak iklimlerde ve tropikal ormanlar gibi tür bakımından zengin ekosistemlerde daha baskındır. Doğada en yaygın ikinci mantar türü ise ektomikorizal mantarlardır. Arbusküler mikorizaya kıyasla daha az sayıda bitki türünün ektomikorizal mantarlar ile simbiyoz oluşturduğu tespit edilmiş olsa da, ektomikorizal mantarların konukçuları geniş bir alana yayılmış, bol miktarda bulunan ve gruplarının baskın üyeleri olma eğilimindedir (Teste vd., 2020). Arbusküler mikorizadan farklı olarak, ektomikorizal mantarlar çoğunlukla daha soğuk bölgelerde ve ekosistemlerde, örneğin ılıman ve boreal ormanlar gibi daha az konakçı türün bulunduğu yerlerde bulunur. Arbusküler mikoriza ve ektomikoriza ağlarının yapılarının farklı olduğu varsayılmakta olup her ikisinin de büyüme, fotosentez oranı, beslenme, hayatta kalma ve benzeri bitki tepkilerini etkilediği belirtilmektedir. Ayrıca, endo- ve ektomikorizal mantar türleri sıklıkla aynı ekosistemde birlikte bulunur. Hatta bazı istisnai bitkiler köklerinde her iki mantar türüne de ev sahipliği yapabilmektedir, ancak her biriyle olan ilişkinin oranı bitkinin yaşamı boyunca farklılık gösterebilmektedir (Gorzelak vd., 2015).

Mikorizal mantarların, köklerin erişemediği toprak boşluklarına ve besin kaynaklarına erişerek bitki beslenmesini iyileştirdiği yaygın olarak kabul edilmektedir (Andrino vd., 2021). Mikorizal mantarların büyük çoğunluğu konukçuya özgü değildir; tek bir mikorizal mantar türü çok çeşitli bitki türlerini kolonize edebilir. Bir mantar konakçı bitkiyi kolonize ettiğinde, miselyumu toprakta geniş mesafeler boyunca büyüyebilir ve aynı veya farklı türlerden birden fazla komşu bitkinin köklerine ulaşarak kolonize olabilir (Van Der Heijden ve Horton, 2009). Bu nedenle, aynı konakçı mantarları paylaşan bitkilerin, ortak mikoriza ağı (CMN) olarak adlandırılan şekilde birbirine bağlandığı bildirilmektedir. Çoğu ılıman ve tropikal otlakların yanı sıra boreal, ılıman ve tropikal ormanlar da dahil olmak üzere ekosistemlere genellikle mikorizal bitkiler hakim olduğundan bol miktarda ve geniş mikorizal mantar ağları oluşmaktadır (Wipf vd., 2019). Dolayısıyla bağlantıların aynı mantar türleriyle ilişki kurabilen bitkiler arasında gerçekleşmesi muhtemeldir. Ayrıca bu durum, bağlantılı bitkilerin hayatta kalma ve davranışlarının yanı sıra rekabetçi ve işbirlikçi modelleri etkileyebilir ve sonuç olarak yerel ve bölgesel ölçeklerde bitki çeşitliliğini etkileyebilir (Bücking vd., 2016). Bu tür bir bağlantının bildirilen etkileri arasında fide oluşumunun iyileştirilmesi, bitki ve mikroorganizma topluluk kompozisyonları üzerindeki etki, bitki savunma tepkilerinin uyarılması, jasmonik asit, metil jasmonat ve zeatin ribozid gibi çeşitli fitohormonlar

yoluyla bitki iletişimi ve bitkiler arası beslenmede önemli bir rol oynayabilecek besin alışverişi yer almaktadır (Fang vd., 2020; Kadowaki vd., 2018).

Arbüsküler mikorizal mantarların topraktan N, P, K, Ca, S, Cu ve Zn gibi besin maddelerini ilişkili bitkilere taşıdığı bilinmektedir. Bununla birlikte, mikorizal mantarların en belirgin ve tutarlı besinsel etkisi, özellikle P, Cu ve Zn olmak üzere hareketsiz besin maddelerinin alımının iyileştirilmesidir. Mantarlar, kökün emici yüzeylerini artırarak hareketsiz besin alımını artırır. Bu ilişki genellikle mantarlara karbon sağlayarak ve bitki için besin alımını (özellikle fosfor) artırarak her iki organizmaya da fayda sağlar. Bu yeraltı bağlantı ağının bitkiden bitkiye besin alışverişini kolaylaştırabildiği de gösterilmiştir (Cavagnaro ve Martin, 2010). Ek olarak, mikorizanın sadece yüksek performanslı mahsulün büyümesini iyileştirmekle kalmayıp aynı zamanda derin yeraltı su seviyesi gibi farklı çevresel koşullara adaptasyonunu da desteklediği belirtilmektedir. Mantar hiflerinin konukçu bitki kök sistemlerinin emici yüzey alanını artırmasının yanı sıra, diğer mikroorganizmalarla etkileşim için artan bir yüzey alanı sağladığı ve enerji açısından zengin bitki asimilatlarının (fotosentez ürünleri) toprağa taşınması için önemli bir yol sağladığı bildirilmiştir. Azot fikse etme potansiyeline sahip bakteriler, arbusküler mikorizal hifler içinde ve ektomikorizal bitkilerin tüberküllü kökleriyle birlikte endosimbiyotik olarak gelişirken keşfedilmiştir. Bu tür üçlü simbiyozların azot kısıtlı ortamlarda önemli olacağı açıktır (Finlay, 2004).



Şekil 2.3. Mikoriza çeşitleri (Selosse ve Le Tacon, 1998)

Funneliformis mosseae (T.H. Nicolson & Gerd.) C. Walker & A. Schüßler (syn. *Endogone mosseae* T.H. Nicolson & Gerd. veya syn. *Glomus mosseae* (T.H. Nicolson & Gerd.) Gerd. & Trappe) ve *Rhizophagus intraradices* (N.C. Schenck & G.S. Sm.) C. Walker & A. Schüßler (syn. *Glomus intraradices* N.C. Schenck & G.S. Sm) mantarları zorunlu simbiyotik olarak bilinen ve tarım arazilerinde doğal olarak bulunan mantar türlerindendir (Schüssler ve Walker, 2010). Sıklıkla ticari öneme sahip bitki türlerinin abiyotik stres koşullarına direnç geliştirmeleri, verim ve ürün kalitesinin geliştirilmesi, toprak kökenli bitki hastalıklarına karşı direnç geliştirilmesi gibi çalışmalarda kullanılmaktadırlar. Bu tez çalışmasına konu olan mikorizal mantar türlerinin taksonomideki yeri;

Alem/Regnum : Fungi
Şube/Divisio : Glomeromycota
Sınıf/Classis : Glomeromycetes
Takım/Ordo : Glomerales
Aile/Familia : Glomeraceae
Cins/Genus : Funneliformis
Tür/Species : *Funneliformis mosseae* (T.H. Nicolson & Gerd.) C. Walker & A. Schüßler

Alem/Regnum : Fungi
Şube/Divisio : Glomeromycota
Sınıf/Classis : Glomeromycetes
Takım/Ordo : Glomerales
Aile/Familia : Glomeraceae
Cins/Genus : Rhizophagus
Tür/Species : *Rhizophagus intraradices* (N.C. Schenck & G.S. Sm.) C. Walker & A. Schüßler

García- Garrido ve Ocampo (2002) tarafından gerçekleştirilen bir çalışmada arbüsküler mikorizal birliktelikte bitki savunma mekanizmasının regülasyonu incelenmiş, bitki hücrelerinin etkileşime girdikleri mikorizal mantarlara karşı birtakım biyokimyasal yanıt ürettikleri bildirilmiştir. Bu yanıtlar plazma zarındaki iyon geçirgenliğindeki değişimler, kinazların, fosfatazların, fosfolipazların aktif hale getirilmesi ve aktif oksijen türleri gibi sinyal moleküllerinin üretilmesi olarak sıralanmıştır. Bunun sonucunda bitki savunmasından sorumlu genlerin transkripsiyonel olarak aktif hale getirildiğine değinilen çalışmada benzer bir durumun bitkinin fungal patojenlere maruz kaldığı zamanlarda ortaya çıktığı vurgulanmıştır. *R. intraradices*'in ekstra-radikal miseli ekstraksiyonundan elde edilen elisitörün soya fasülyesi kotiledonlarından fitoaleksinin sentezini uyarması; bununla birlikte *R. intraradices*'in *Medicago truncatula*'da fitoaleksinin gibi flavonoid bileşiklerin biyosentezinde görevli ilk enzim olan kalkon sentaz enzimi ifadesini uyarması örnek olarak sunulmuştur.

G. intraradices (Schenck & Smith) mantarının *Capsicum annuum* L. cv. Çetinel bitkisi üzerinde bazı fizyolojik gelişim parametrelerine etkisinin araştırıldığı çalışmada mikoriza

aşıl原因an bitkilerin tamamında mikoriza aşıl原因anmamış bitkilere göre fosfor (P), kuru madde miktarı, klorofil konsantrasyonları, indirgen şeker ve sakkaroz bakımından %12-47 oranında artış gösterdiği bulunmuştur (Demir, 2004).

Castillo vd. (2009), *G. intraradices* ve *G. claroideum* mantarları ile inokule edilen biber bitkilerinde üretim ve kalite parametrelerini incelenmişler, mikoriza inokule edilen bitkilerin kontrol grubundaki mikorizasız bitkilere göre hasat olgunluğuna 49 gün daha erken ulaştıklarını ve meyve yaş ağırlığında %77 oranında bir artış gözlemlediklerini bildirmişlerdir.

Chen vd. (2013), *F. mosseae* (T.H. Nicolson & Gerd.) C. Walker & A. Schüssler mantarının hıyar (*Cucumis sativus* L. cv. Jincun 2) bitkisinin soğuk stresinde büyüme ve ikincil metabolitler üzerindeki etkisini araştırdıkları bir çalışmada mantar inokule edilen bitkilerin ve kontrol grubu bitkilerinin normal (25/15°C) ve düşük (15/10°C) sıcaklıklarda gelişimlerini incelemişlerdir. Araştırma sonucunda mantar inokule edilen bitkilerin soğuk stresi altında kontrol grubundaki bitkilere kıyasla yaş ve kuru ağırlıklarının daha fazla olduğunu, bununla birlikte fenoller, flavanoidler, lignin, fenolik bileşikler ve DPPH aktivitesi gibi ikincil metabolitlerin üretimi bakımından mantar inokule edilen bitkilerin daha aktif oldukları ve glukoz-6-fosfat dehidrogenaz, şikimat dehidrogenaz, fenilalanin amonyum liyaz, sinnamil alkol dehidrogenaz, polifenol oksidaz, kafeik asit peroksidaz ve klorojenik asit peroksidaz enzim aktivitelerinde artış gözlemlendiği bildirilmiştir.

Jamiołkowska ve Michalek (2019), ticari olarak temin edilen mikorizal mantar karışımının biberde (*Capsicum annuum* L.) kök çürüklüğü hastalığına neden olan *Fusarium oxysporum* mantarının farklı izolatlarına karşı bitkide oluşan direnci araştırdıkları bir çalışmada, *Rhizophagus aggregates* (syn. *Glomus aggregatum*), *R. intraradices* (syn. *G. intraradices*), *Claroideoglomus etunicatum* (syn. *G. etunicatum*), *Endogone mosseae* (syn. *Funneliformis mosseae*, syn. *G. mosseae*), *Funneliformis caledonium* (syn. *G. caledonium*), *Gigaspora margarita* mantarlarını içeren ticari ürünle inokule edilen biber tohumlarının büyüme hızı, kök gelişimi ve fotosentez aktivitesi parametreleri bakımından kontrol bitkileri ve sadece *Fusarium oxysporum* ile enfekte edilen bitkilere göre daha yüksek değerler verdiğini ifade etmişlerdir.

Toprak mantarları ile simbiyotik bir ilişki kurabilen diğer bitki türlerine benzer şekilde, *Capsicum* sp. kökleri topraktaki düşük besin mevcudiyetine yanıt olarak mikoriza oluşturma eğilimindedir. Hirrel ve Gerdemann (1980), mikorizal mantarlarının *Capsicum* cinsi bitkiler üzerindeki faydalarını gösteren ilk kişiler olmuş ve mikorizal mantarları ile aşılanmış dolmalık biber bitkilerinin aşılanmamış bitkilere göre tuza daha dayanıklı olabileceğini gözlemlemişlerdir. Mikorizal mantar ile ön aşılamamanın faydaları, iki yıl sonra tarlaya nakledilen acı biberlerin boyu, kuru ağırlığı ve verimi açısından doğrulanmıştır (Bagyaraj ve Sreeramulu, 1982).

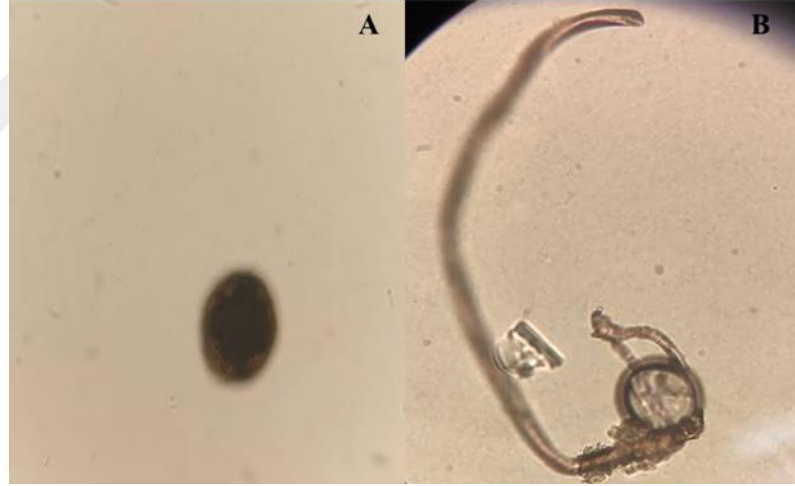


BÖLÜM III

MATERYAL VE YÖNTEM

3.1 Bitki ve Mantar Materyallerinin Temin Edilmesi

Tez çalışmasında kullanılan bitki materyalini Hatay ili Samandağı ilçesinde yetiştirilen lokal *C. annuum* L. varyetesi oluşturmaktadır. Bitki materyali tohum olarak yerel biber yetiştiricilerinden temin edilmiştir. Bir diğer araştırma materyali olan mikorizal mantar türleri *Funneliformis mosseae* (T.H. Nicolson & Gerd.) C. Walker & A. Schüßler ve *Rhizophagus intraradices* (N.C. Schenck & G.S. Sm.) C. Walker & A. Schüßler, Çukurova Üniversitesi Ziraat Fakültesi Toprak Bilimi Bölümü seralarından (mantar miselleri, enfekte olmuş bitki kökleri ve mantar sporları içeren toprak numuneleri olarak) temin edilmiştir.



Fotoğraf 3.1. Işık mikroskopunda görüntülenen pasif (A) ve çimlenmekte olan (B) mikorizal mantar sporları

Mikorizal mantar inokulumlarına spor yoğunluklarını belirlemek amacıyla yaş eleme yöntemi uygulanmıştır (Gerdemann ve Nicolson, 1963). Bu doğrultuda *F. mosseae* ve *R. intraradices* mikorizal mantarlarını içeren inokulumlardan 10 g numuneler alınarak 100 mL saf su içerisinde manyetik karıştırıcı yardımıyla dağılmaları sağlanmıştır. Bu işlemin ardından numuneler gözenek boyutları sırasıyla 750, 500, 250, 100 ve 45 µm olan elek setinden süzülerek iri taneler ile mantar sporlarının ayrılması sağlanmıştır. En alttaki eleğin üzerinde kalan sporlar bir pipet vasıtasıyla 50 mL'lik santrifüj tüplerine aktarılmış

ve 2000 rpm'de 3 dk santrifüjlenmiştir. Süpernatant uzaklaştırılmış ve pellet % 50'lik süktroz çözeltisiyle bir vorteks yardımıyla karıştırılmıştır. Daha sonra tekrar santrifüj edilen tüplerde bulunan süpernatanttan alınan örnekler bir ışık mikroskopunda incelenerek spor sayıları tespit edilmiştir. Buna göre *F. mosseae* ve *R. intraradices* inokulumlarındaki spor yoğunlukları sırasıyla 280 spor/10 g inokulum ve 260 spor/10 g inokulum olarak bulunmuştur.

3.2 Biber Tohumlarının Yüzeysel Sterilizasyonu

Biber tohumları mantar sporları içeren toprak numuneleriyle karıştırılarak toprağa ekilmeden önce 5 dakika %1'lik ticari çamaşır suyu (%5 sodyum hipoklorit içeren) çözeltisinde bekletilmiş (Özyılmaz, 2015) ve daha sonra üçer dakikalık iki tur saf su içerisinde bekletilerek yüzeysel sterilizasyonu gerçekleştirilmiştir. Tohumlar ekilmeden önce kurutma kağıdına alınarak kurumaları sağlanmıştır. Yüzeysel sterilizasyonu gerçekleştirilen biber tohumları viyollara ekilmeden önce her viyole mantar sporları içeren toprak numunesinden ortalama 10g düşecek şekilde saksı toprağı ile karıştırılmıştır (Özgenen, 2004). Her bir viyole 3 adet biber tohumu ekilmiştir. Tohumları içeren viyoller sıcaklığı $25\pm 2^{\circ}\text{C}$, bağıl nemi %40-45 ve 16 saat aydınlık, 8 saat karanlık fotoperiod uygulanan bitki büyütme odasına yerleştirilmiştir. Tohum çimlenmesi gerçekleşene kadar viyollerde bulunan toprak, nemini koruyacak şekilde gerekli miktarda saf su ile sulanmıştır.

3.3 Biber Fidelerinin Saksılara Aktarılması

F. mosseae ve *R. intraradices* mantarlarının sporlarını içeren toprak numuneleri ile inokule edilerek çimlenmeleri sağlanan *C. annuum* tohumlarından elde edilen fideler Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi Biyoteknoloji Bölümü'nde bulunan Bitki Doku Kültürü Laboratuvarında 5 litrelik saksılara aktarılmıştır. Tabanları delinen saksılara otoklavda 121°C 1 atm basınçta 20 dk steril edilmiş torf ve toprak (2:1) karışımı eklendikten sonra biber fidelerinin yerleştirilmesi için yataklar hazırlanmıştır. İlgili mikorizal mantar ile inokule edilmiş fideler saksılara yerleştirilmeden önce her bir tohum yatağının yaklaşık 3 cm altına ortalama 1000 spor içeren mikorizal mantar inokulumu serilmiştir.



Fotoğraf 3.2. Mikorizal mantar inokule edilerek çimlendirilen biber tohumlarından elde edilen fidelerin saksılara aktarımı (A) ve bitki büyütme odasına yerleştirilmesi (B)

3.4 Bitki Büyütme Odası Koşulları ve Biber Bitkilerinin Bakımı

Saksılara aktarılan bitkiler sıcaklığı $25\pm 2^{\circ}\text{C}$, bağıl nemi %40-45 olan ve 16 saat aydınlık 8 saat karanlık fotoperiod uygulanan bitki büyütme odasına yerleştirilmiştir. İlk çiçeklenme tarihine (44. gün) kadar bitki büyütme odası koşulları yukarıda belirtildiği gibiyken bu tarihten itibaren sıcaklık $27\pm 1^{\circ}\text{C}$ 'ye yükseltilmiştir.

Birleşmiş Milletler (UN) Gıda ve Tarım Organizasyonu (FAO) verilerine göre biber bitkisinin (*Capsicum annuum*) yıllık toplam su ihtiyacı 600-1250 mm olarak ifade edilmektedir. Arazi ve toprak yapısı, arazinin bulunduğu koordinatlar, rüzgar, bitkinin maruz kaldığı ışık şiddeti, sulama yöntemi, bitki varyetesi, bitki yetiştirme sezonunun uzunluğu ve yapılan hasat sayısı gibi faktörlere bağlı olarak bitkinin toplam su ihtiyacı değişebilmektedir (fao.org; Erişim tarihi: 10.01.2021) Bu bilgiler doğrultusunda mikorizal mantar türleri ile enfekte edilmiş biber bitkilerine verilecek toplam su miktarı hesaplanmış ve her iki mikorizal mantar türü ile enfekte edilen biber bitkileri için %25, 50, 75 ve 100 olmak üzere dört sulama grubu oluşturulmuştur. Her sulama grubu 3 tekerrür ve her tekerrür 3 bitki içermektedir. Her sulama grubu için 3 bitkiden oluşan kontrol grupları oluşturulmuştur.

Bununla birlikte bitkilerin bulunduğu saksılar düzenli aralıklarla rotasyona maruz bırakılarak büyütme odası koşullarında oluşabilecek olası değişikliklerden etkilenme seviyelerini en aza indirmek amaçlanmıştır. Biber bitkilerine viyollere ekildikleri günden hasat edildikleri güne kadar hiçbir doğal ve/veya sentetik katkı maddesi (gübre, bitki büyüme düzenleyicileri, bitki gelişimini destekleyici toprak supplementleri) verilmemiş, aynı şekilde hiçbir doğal ve/veya sentetik ilaç uygulaması (diğer tıbbi ve aromatik bitki ekstraktları, pH değişikliğine sebep olan doğal fermente sıvılar (sirke), Gıda Tarım ve Hayvancılık Bakanlığının onayladığı zirai ilaçlar) gerçekleştirilmemiştir.



Fotoğraf 3.3. Saksılara aktarılan biber bitkilerinin bitki büyütme odasına yerleştirilmesi ve bakımı

3.5 Biber Bitkilerinden Analiz Numunelerinin Alınması ve Bitkilerin Hasat Edilmesi

Gerçekleştirilecek analizler ve ölçümler için biber bitkilerinden kök, gövde, yaprak ve meyve numuneleri temin edilmiştir. Bitki köklerinde mikorizal mantar enfeksiyonunun belirlenmesi için kök boyama ve görüntüleme işlemlerinde, mikorizalı bitki köklerinin Taramalı Elektron Mikroskopisi (SEM) yöntemiyle görüntülenmesinde ve kök kuru madde ölçümlerinin gerçekleştirilmesinde kullanmak amacıyla biber köklerinden; sürgün boyu, sürgün yaş ve kuru ağırlıklarının ölçümlerinde kullanmak amacıyla biber sürgünlerinden; X-Işını Floresans (XRF) spektroskopi yöntemiyle element analizinde kullanmak amacıyla biber sürgün ve yapraklarından; malon dialdehit (MDA) miktarı tayini, fenilalanin amonyum liyaz (PAL) enzimi aktivitesi tayini, klorofil-a, klorofil-b ve toplam karotenoid miktarı tayini için biber yapraklarından; biber meyvesinin antioksidan

özelliklerinin belirlenmesi, toplam fenolik bileşik miktarının belirlenmesi ve kapsaisin miktarının belirlenmesi için biber meyvelerinden numuneler alınmıştır.

Alınan yaprak numuneleri alüminyum folyo ile sarılıp etiketlendikten sonra analizlerin gerçekleştirileceği tarihe kadar -20°C sıcaklıkta muhafaza edilmiştir. Kök numuneleri alındıktan hemen sonra boyama ve kök enfeksiyonunun belirlenmesi amacıyla ilgili yöntem doğrultusunda muamele edilmiştir. Sürgün ve diğer yaprak numuneleri yapılan fiziksel ölçümlerin ardından kesilerek kese kağıtlarına yerleştirilmiş, etiketlenip kurutulduktan sonra doğrudan güneş ışığı almayan kuru ve serin dolaplarda muhafaza edilmiştir. Alınan meyve numuneleri liyofilizatör (Scanvac Coolsafe 95-15, Labogene) ile 24 saat süreyle kurutma işlemine tabi tutulduktan sonra kilitli numune poşetlerine alınarak etiketlenmiş ve doğrudan güneş ışığı almayan kuru ve serin dolaplarda laboratuvar koşullarında muhafaza edilmişlerdir.

3.6 Biber Bitkisi Kökünde Mikorizal Enfeksiyonun Belirlenmesi

3.6.1 Bitki kök numunelerinin ‘trypan blue’ ile boyanması ve ışık mikroskopunda görüntülenmesi

Mikorizal mantar türlerinin biber bitkisinin köklerinde gerçekleştirdiği enfeksiyonun tespit edilmesi ve kök enfeksiyon oranlarının hesaplanabilmesi amacıyla biber bitki köklerinden numuneler alınarak Trypan Blue ile boyama işlemine tabi tutulmuşlardır. Boyama işlemi bazı değişikliklerle birlikte Phillips ve Hayman (1970)’in geliştirdiği yöntem temel alınarak gerçekleştirilmiştir.

Bu amaçla; alınan kök numuneleri tazyikli şebeke suyu ile bütün toprak kalıntılarından arındırıldıktan sonra %10’luk KOH çözeltisi içerisine alınmış ve oda sıcaklığında bir gece bekletilmiştir. Ardından KOH süzölmüş ve kök numunelerinin üzerini kapatacak şekilde oda sıcaklığındaki %1’lik HCl eklenmiştir. Oda sıcaklığında 5 dakikalık inkübasyonun ardından HCl süzölmüş ve kök numunelerine laktik asit:gliserol:saf su (1:1:1) ile hazırlanan %0,05’lik Trypan Blue boyası eklenerek bir gece oda sıcaklığında inkübasyona bırakılmıştır. Bu süre sonunda kökler saf su ile yıkanmış ve ışık mikroskopunda gözlemlenmiştir.

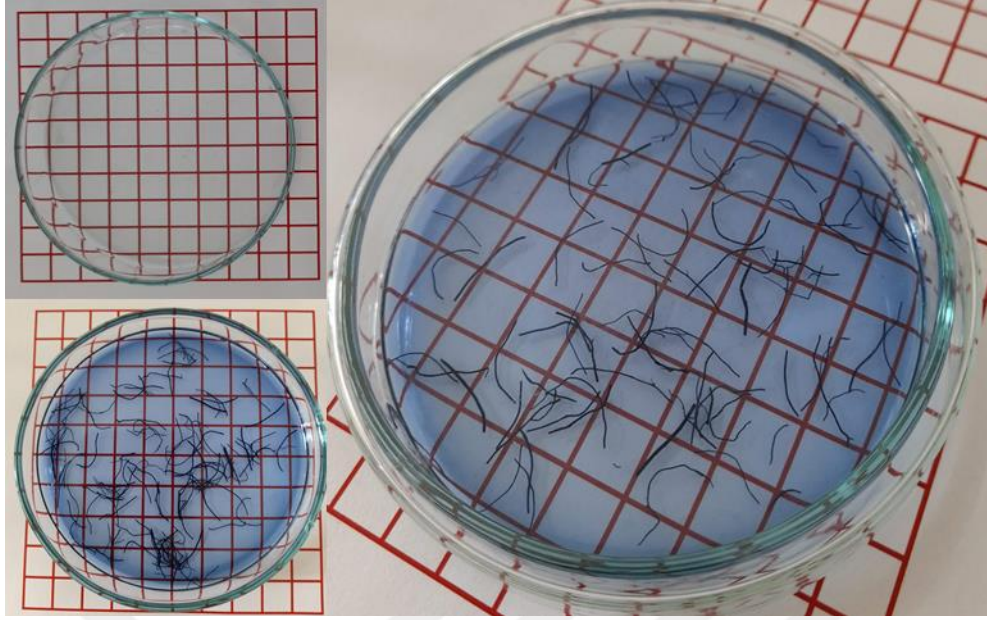


Fotoğraf 3.4. Mikorizal enfeksiyonun belirlenmesi için boyama işlemine tabi tutulan kök numuneleri

3.6.2 Bitki kök numunelerinde mikorizal enfeksiyon oranlarının belirlenmesi

Bitki kök numunelerindeki mikorizal enfeksiyon oranları “Grid Line Intersection” yöntemine göre belirlenmiştir (Giovannetti ve Mosse, 1980). Bu yöntemde 9 cm çapındaki petri kabının arkasına belirli ve sabit aralıklara sahip (çoğunlukla 1 cm) grid çizgileri çizilmiş ve boyanmış kök numuneleri bu petri kabı içerisine alınmıştır. Mikroskop aracılığıyla mikorizal enfeksiyon gerçekleşen kök sayısı ve toplam kök sayısı tespit edilmiş, mikorizal enfeksiyon oranı aşağıdaki formül ile hesaplanmıştır.

$$\% \text{ Mikorizal Enfeksiyon} = \frac{\text{Mikoriza ile Enfekte Edilen Kök Sayısı}}{\text{Toplam Kök Sayısı}} \times 100 \quad (3.1)$$



Fotoğraf 3.5. Mikorizal kök enfeksiyonunun belirlenmesi için Grid Line Intersection yöntemi ile hazırlanan petri kabı içerisindeki boyanmış kök numuneleri

3.6.3 Bitki kök numunelerinin taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile görüntülenmesi

Biyolojik numunelerin SEM’de görüntülenmesi uygun bir yöntemle preparat hazırlanmasını gerektirmektedir (Echlin, 1971). Bu doğrultuda bitki kök numuneleri birkaç farklı yöntemin modifiye edilmesi ile (McLean ve Lawrie, 1996; Moran ve Coats, 2012) elde edilen bir yöntemle SEM görüntülemesi için hazırlanmıştır.

Bitki kök numuneleri %2 formaldehit ve %2,5 gluteraldehit içeren bir karışım içerisinde 3 saat boyunca fiksede edilmiş daha sonra monobazik (NaH_2PO_4) ve dibazik (Na_2HPO_4) sodyum fosfat ile hazırlanan 0,1 M pH 6,8 tampon çözelti ile her biri 15 dakikadan az olmamak şartıyla 5-6 tam tur yıkanmıştır. Yıkama işleminin ardından 7 basamaklı etil alkol dilusyonunda (%20, 30, 40, 50, 70, 90, 100) her basamakta 10-15 dk bekletilmek suretiyle dehidre edilmiştir. Son basamakta saf alkolle gerçekleştirilen dehidrasyon 3 tekrar olacak şekilde uygulanmıştır. Fiksasyon ve dehidrasyon işlemlerinin ardından saf alkol içerisinde tutulan kök numuneleri liyofilizatörde -85°C ’de vakum altında 12 saat kurutma işlemine maruz bırakılmıştır.

Kurutma işleminden sonra yaklaşık 4mm uzunluğundaki kök parçaları alüminyum numune tutucu üzerine çift taraflı yapışkan karbon bantlar ile yerleştirilmiş ve Au-Pd ile 90 saniye yaklaşık 10 nm kalınlığında kaplanarak Zeiss EVO-40 SEM cihazında yüksek vakumda 15 kV geriliminde gösterilmiştir.



Fotoğraf 3.6. Mikorizal kök enfeksiyonunun SEM cihazında görüntülenmesi için hazırlanan kök numuneleri, Au-Pd kaplama cihazı ve Zeiss EVO-40 SEM cihazı

3.7 Mikorizal Mantarların Biber Bitkisinde Fenolojik Özellikler Üzerine Etkilerinin Belirlenmesi

3.7.1 Mikorizal mantarların bitki sürgün boyuna etkilerinin belirlenmesi

Mikorizal mantar türlerinin biber bitkisinde sürgün boyuna etkilerinin belirlenmesi için *F. mosseae* ve *R. intraradices* mantarları ile enfekte edilen biber bitkilerinin toprak üstü kısımları taç bölgelerinden kesilerek ayrılmış, bir metre yardımıyla her bitkinin sürgün boyu ayrı ayrı ölçülmüş ve kaydedilmiştir. Bitki sürgün boyları ortalama cm olarak ifade edilmiştir.



Fotoğraf 3.7. Biber bitkisinin toprak üstü aksamının taç bölgesinden kesilerek ayrılması

3.7.2 Mikorizal mantarların bitki sürgününde yaş ve kuru ağırlık üzerine etkilerinin belirlenmesi

Mikorizal mantar türlerinin biber bitkisi sürgününde yaş ve kuru ağırlığa etkilerinin belirlenmesi için *F. mosseae* ve *R. intraradices* mantarları ile enfekte edilen biber bitkilerinin sürgün ve yaprakları darası alınmış kese kağıtları içerisine yerleştirilerek ağırlıkları ölçülmüş ve kaydedilmiştir. Bitki sürgün ve yaprakları bulunan kese kağıtları ağzları açık bir şekilde 70°C sıcaklıktaki etüve yerleştirilerek 48 saat kurutma işlemine tabi tutulmuşlardır. Kese kağıtlarının kurutma işlemine bağlı olarak nem kaybının hesaplanabilmesi için ağırlıkları ölçülen üç (3) adet kese kağıdı boş olarak etüve yerleştirilmiştir.



Fotoğraf 3.8. Bitki sürgün ve kök numunelerinin kese kağıtları içerisinde kurutulması

Kurutma işleminin ardından bitki sürgünlerini içeren kese kağıtları ve boş kese kağıtları etüvden çıkarılmış, oda sıcaklığına ulaşana kadar bekletilmiş ve daha sonra tartılarak kuru ağırlıkları kaydedilmiştir. Biber sürgünlerinin kuru ağırlıkları %KM; % Kuru madde, YA; Yaş ağırlık, KA; Kuru ağırlık olmak üzere aşağıdaki formüle göre hesaplanmıştır:

$$\%KM = 100 - \left[\frac{YA-KA}{YA} \times 100 \right] \quad (3.2)$$

3.7.3 Mikorizal mantarların bitki kökünde kuru madde üzerine etkilerinin belirlenmesi

Mikorizal mantar türlerinin biber bitkisi kökünde yaş ve kuru ağırlığa etkilerinin belirlenmesi için *F. mosseae* ve *R. intraradices* mantarları ile enfekte edilen biber bitkilerinin köklerinden 0,5 g tartılarak darası alınmış kese kağıtları içerisine yerleştirilmiş, toplam ağırlıkları ölçülerek kaydedilmiştir. Bitki köklerini içeren kese kağıtları ağızları açık bir şekilde 70°C sıcaklıktaki etüve yerleştirilerek 48 saat kurutma işlemine tabi tutulmuşlardır. Kese kağıtlarının kurutma işlemine bağlı olarak nem

kaybının hesaplanabilmesi için ağırlıkları ölçülen üç (3) adet kese kağıdı boş olarak etüve yerleştirilmiştir. Kurutma işleminin ardından bitki köklerini içeren kese kağıtları ve boş kese kağıtları etüvden çıkarılmış, oda sıcaklığına ulaşana kadar bekletilmiş ve daha sonra tartılarak kuru ağırlıkları kaydedilmiştir.

Biber köklerinin kuru madde miktarları %KM; % Kuru madde, YA; Yaş ağırlık, KA; Kuru ağırlık olmak üzere aşağıdaki formüle göre hesaplanmıştır:

$$\%KM = 100 - \left[\frac{YA - KA}{YA} \times 100 \right] \quad (3.3)$$

3.7.4 Mikorizal mantarların meyve sayısı, meyve boyu, meyve çapı ve meyve ağırlığına etkilerinin belirlenmesi

Mikorizal mantar türlerinin bitkiden toplanan meyve sayısına etkilerinin belirlenmesi için her bitkiden toplanan meyveler ayrı ayrı sayılarak kaydedilmiş, bitki başına düşen meyve sayısı ortalama olarak ifade edilmiştir. Mikorizal mantar türlerinin meyve çapı ve meyve boyuna etkilerinin belirlenmesi için her bitkiden toplanan meyvelerin çapları ve boyları dijital kumpas aracılığıyla ölçülmüş ve kaydedilmiş, meyve çapı ve meyve boyu değerleri ortalama mm olarak ifade edilmiştir. Mikorizal mantar türlerinin meyve ağırlığına etkilerinin belirlenmesi için her bitkiden toplanan meyvelerin ağırlıkları ölçülmüş ve kaydedilmiş, meyve ağırlık değerleri ortalama g olarak ifade edilmiştir.



Fotoğraf 3.9. Meyve çapı ve meyve boyunun dijital kumpas ile ölçülmesi

3.7.5 Mikorizal mantarların biber bitkisinde verim üzerine etkilerinin belirlenmesi

Mikorizal mantar türlerinin biber bitkisinde verim üzerine etkilerinin belirlenmesi için her bir mikorizal mantar türü ile inokule edilmiş biber fideleri ile kurulan ve farklı sulama oranları ile sulanarak geliştirilen bitkilerden toplanan meyvelerin ağırlıkları ölçülmüş, toplam meyve ağırlığı deneme grubundaki toplam bitki sayısına bölünerek verim değeri elde edilmiştir. Verim değeri g.bitki^{-1} olarak ifade edilmiştir.

3.8 Biber Bitkilerinin Toprak Üstü Aksamlarından Element Tayini

F. mosseae ve *R. intraradices* mantarları ile inokule edilerek geliştirilen *C. annuum* bitkilerinin toprak üstü aksamaları (taç kısmından kesilerek saksıdan ayrılan bitki sürgün ve yaprakları) hasat edildikten sonra 70°C’de 48 saat süreyle kurutulmuş ve analiz edilinceye kadar Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi Biyoteknoloji Bölümü’nde bulunan Bitki Doku Kültürü Laboratuvarında doğrudan güneş ışığı almayan kuru ortamda saklanmıştır. Kurutulmuş bitki örnekleri daha sonra ev tipi ticari bir blender yardımıyla öğütülerek toz haline getirilmiştir. Her bir numune öğütüldükten sonra blender temizlenmiş ve kurutulmuştur.

Toz haline getirilen bitki örnekleri tartılarak kül fırınında 500°C’de 1,5 saat yakma işlemine maruz bırakılmış, bu işlemde geriye kalan küllerin tartılması sonucu elde edilen kütle Ateşte Kayıp (Loss On Ignition-L.O.I) oranının hesaplanması için kullanılmıştır. Bu işlemdeki amaç örnekleri organik bileşiklerden ari hale getirmektir (Niu vd., 2010). Örneklerin küllerinden alınan yaklaşık 0,8-0,9 g numuneler 9 g Claisse marka %67 lityum tetraborat ($\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$) %33 lityum metaborat (LiBO_2) içeren yardımcı kimyasal ile karıştırılarak Claisse Eagon füzyon fırınında 1200°C’de camsılaştırma işlemine tabi tutulmuş ve PAnalytical Zetium marka XRF cihazı ile element analizi gerçekleştirilmiştir. Örneklerin elemental içerikleri mg.kg^{-1} Kuru Ağırlık olarak ifade edilmiştir.



Fotoğraf 3.10. Claisse Eagon füzyon fırını (A), camsılaştırılmış numuneler (B) ve PANalytical Zetium XRF cihazı (C)

Bitkilerin toprak üstü aksamalarının azot içeriklerinin tayininde kantitatif Kjeldahl yöntemi kullanılmıştır. Kurutulup toz haline getirilen bitkilerden 1 g tartılarak 12 mL sülfürik asit ve 2 adet titanyum tablet ile 400°C’de 2 saat yakma işlemine tabi tutulmuştur. Yakma işleminin ardından örnekler Kjeldahl otomasyon sistemi (UDK 139, Velp Scientifica) ile analiz edilmiştir. Analizler üç tekerrürlü olacak şekilde Çukurova Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarı’nda (ÇÜMERLAB) hizmet alımı şeklinde gerçekleştirilmiştir. Bitkilerin toprak üstü aksamalarının azot içerikleri yüzde (%) olarak ifade edilmiştir.

3.9 Mikorizal Mantarların Biber Bitkisinde Biyokimyasal Özellikler Üzerine Etkilerinin Belirlenmesi

3.9.1 Biber bitkilerinin fotosentetik pigment içeriğinin belirlenmesi

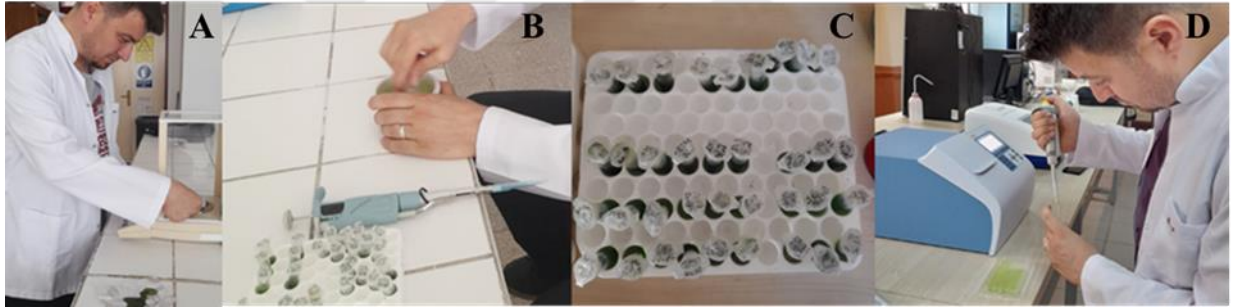
F. mosseae ve *R. intraradices* mantarları ile inokule edilerek geliştirilen biber (*C. annuum* L.) bitkilerinden alınan yaprak numunelerinin fotosentetik pigment içerikleri Lichtenthaler (1987)’in geliştirdiği yönteme göre tespit edilmiştir.

Bu amaçla 50 mg taze yaprak örneği porselen havan içerisinde 2 mL %95'lik etanol ile homojenize edilmiş, homojenat mikrofüt tüplerine aktararak gece boyunca oda sıcaklığında ve karanlık koşullarda inkübe edilmiştir. Ardından 10000 rpm 5dk boyunca 4°C'de santrifüt edilerek partiküllerin çökelmesi sağlanmıştır. Süpernatanttan alınan örnekler çözücü olarak kullanılan etanol ile 1:9 oranında seyreltildikten sonra Thermo marka Multiskan GO model spektrofotometrede 470, 649, 664 nm dalga boylarında ölçülerek klorofil-a, klorofil-b ve karotenoid miktarları aşağıdaki formüllere göre hesaplanmıştır (Sumanta vd., 2014). Her analiz üç tekerrürlü olacak şekilde gerçekleştirilmiş ve sonuçlar µg/mL olarak verilmiştir.

$$Ca = 13.36A_{664} - 5.19 A_{649} \quad (3.4)$$

$$Cb = 27.43A_{649} - 8.12 A_{664} \quad (3.5)$$

$$C x + c = (1000A_{470} - 2.13Ca - 97.63Cb)/209 \quad (3.6)$$



Fotoğraf 3.11. Fotosentetik pigment analizi için bitki yapraklarının tartılması (A), havanda homojenize edilmesi (B) elde edilen homojenatların (C) hazırlanması ve spektrofotometre cihazına yüklenmesi (D)

3.9.2 Biber yapraklarından malondialdehit (MDA) tayini

F. mosseae ve *R. intraradices* mantarları ile inokule edilerek geliştirilen *C. annuum* bitkilerinin yapraklarındaki lipid peroksidasyonu düzeyi malondialdehit miktarının ölçülmesi ile tayin edilmiştir. Yapraklardaki malondialdehit konsantrasyonu tiyobarbitirik asit reaksiyonuna göre tespit edilmiştir (Heath ve Packer, 1968).

Bu doğrultuda 0,5 g yaprak numuneleri 5 mL %0,1'lik trikloroasetik asit (TCA) çözeltisi ile Daihan HG-15D homojenizatör ile 9000 rpm'de 5 dk homojenize edilmiş, hemen ardından 10000 rpm 10dk boyunca 4°C'de santrifüt edilmiştir. Süpernatanttan alınan 1

mL'lik örneğin üzerine 4 mL %0,5 tiyobarbütirik asit içeren %20'lik TCA çözeltisi eklenmiş ve 95°C'de 30 dk su banyosunda tutulmuştur. Bu sürenin sonunda reaksiyonun sonlanabilmesi amacıyla örnekler derhal buza yatırılmış ve 10-15 dk beklenmiştir. Ardından 10000 rpm'de 5 dk santrifüjlenen örneklerin absorbans değerleri Thermo marka Multiskan GO model spektrofotometrede 532 ve 600 nm dalga boylarında ölçülmüş ve MDA miktarları aşağıdaki formül vasıtasıyla hesaplanmıştır. Her ölçüm üç tekerrürlü olacak şekilde gerçekleştirilmiş ve sonuçlar nmol/mg Taze Ağırlık olarak verilmiştir.

$$MDA = [(A532 - A600) \times \text{Ekstraksiyon hacmi}] / [155 \times \text{Örnek Miktarı}] \quad (3.7)$$



Fotoğraf 3.12. Yaprak örneklerinin homojenize edilmesi (A), TBA reaksiyonu sonrası MDA miktarlarının belirlenmesi için spektrofotometreye yüklenmesi (B) ve analizin gerçekleştirildiği spektrofotometre cihazı (C)

3.9.3 Fenilalanin amonyum liyaz (PAL, EC. 4.3.1.24) enzim aktivitesinin belirlenmesi

F. mosseae ve *R. intraradices* mantarları ile inokule edilerek geliştirilen *C. annuum* bitkilerinin yapraklarından alınan örneklerin fenilalanin amonyum liyaz (PAL, EC. 4.3.1.24) enzim aktivitelerinin belirlenmesinde Pascholati vd. (1986) tarafından geliştirilen yöntemden faydalanılmıştır. Bu amaçla 0,1 g taze yaprak numunesi 1 mL %1 polivinilpirolidon (PVP) ve 1 mM fenilmetilsülfonil (PMSF) içeren 50 mM sodyum fosfat tampon çözeltisi (pH 6,5) ile homojenize edilmiş ve ardından 4°C'de 25 dk 13000 rpm'de santrifüjlenmiştir. Elde edilen süpernatant PAL enzim aktivitesinin belirlenmesinde ekstrakt olarak kullanılmıştır. PAL enzimi aktivitesini L-fenilalanini trans-sinamik asite dönüştürerek göstermektedir. Bu doğrultuda yaprak numunelerinden

elde edilen ekstraktın PAL enzim aktivitesini tespit etmek için substrat olarak 10 mM L-fenilalanin çözeltisi 50 mM sodyum fosfat tampon çözeltisi (pH 6,5) ile hazırlanmıştır. Reaksiyon karışımı 400 µL ekstrakt, 500 µL 10 mM L-fenilalanin çözeltisi ve 500 µL sodyum fosfat tampon çözeltisi eklenerek elde edilmiştir. 30°C’de 60 dk boyunca inkübe edilen reaksiyon karışımının 290 nm dalga boyundaki absorbans değerleri Thermo marka Multiskan GO model spektrofotometrede ölçülerek elde edilmiştir. PAL enzim aktivitesi sinamik asit standardına göre hesaplanarak µmol/g sinamik asit.saat olarak ifade edilmiştir.

3.9.4 Biber meyvelerinin toplam fenolik bileşik miktarlarının belirlenmesi

Biber meyvelerinin toplam fenolik bileşik miktarı tayini için spektrofotometrik Folin-Ciocalteu yöntemi kullanılmıştır (Singleton, 1999; Singleton ve Rossi, 1965). Hasat edildikten sonra kurutulan biber meyvelerinden alınan 1,0 g örnekler porselen havan içerisinde toz haline getirilmiş ardından 40 mL metanol ile Daihan HG-15D homojenizatör ile 8000 rpm’de 5 dk homojenize edilmiştir. Homojenatlar daha sonra bir gece oda sıcaklığında ve 15 dk ultrasonik banyoda (Sonorex, Bandelin) inkübe edilmiştir. Ardından 4000 rpm’de santrifüjlenen homojenatlar filtre kağıtlarından (Macharey Nagel) süzölmüş ve ekstraktlar bir rotary evaporatör (Hei-Vap Value, Heidolph) ile tamamen kurutulmuştur. Kalan tortu 5 mL metanol ile süspanse edilerek toplam fenolik bileşik tayininde kullanılmıştır.

Bir (1,0) mL (saf su ile 10 kat seyreltilmiş) Folin-Ciocalteu ayıracının üzerine 100 µL ekstrakt eklenmiş ve çalkalandıktan sonra 5 dk oda sıcaklığında inkübe edilmiştir. Daha sonra üzerine %7,5’lik sodyum karbonat (Na_2CO_3) çözeltisi eklenerek 90 dk karanlıkta oda sıcaklığında inkübasyona bırakılmıştır. İnkübasyon sürecinin ardından tüplerde oluşan mavi rengin absorbansı 765 nm dalga boyunda ölçülmüştür. Ölçümler üç tekerrür olarak gerçekleştirilmiştir. Kör tüp olarak ekstrakt içermeyen Folin-Ciocalteu ayıracı ve Na_2CO_3 kışıımı kullanılmıştır. Toplam fenolik bileşik miktarları µg GAE/g KA olarak ifade edilmiştir.

3.9.5 Biber meyvelerinin antioksidan özelliklerinin belirlenmesi

Biber meyvelerinin antioksidan özelliklerinin belirlenmesi için yaygın olarak kullanılan DPPH radikalini süpürücü etki yöntemi kullanılmıştır. DPPH (2,2-difenil-1-pikril hidrazil) bünyesinde serbest radikalleri barındıran, maksimum ışık absorbansını 517nm’de gösteren, koyu renkli toz formunda bir maddedir (Shimada vd., 1992).

Biber meyvelerinin antioksidan aktivitelerinin belirlenmesinde hazırlanan metanolik ekstraktlardan faydalanılmıştır. Bunun için 0,004 g DPPH tartılarak 100 mL metanol içerisinde çözdürülmüş ve 0,1 mM DPPH çözeltisi hazırlanmıştır. Biber ekstraktları ile metanol kullanılarak son hacmi 500 µl olan 5 basamaklı bir seri dilüsyon hazırlanmıştır.

Her bir dilüsyondan sırasıyla 100 µL alınarak 2,9 mL DPPH çözeltisine eklenmiş ve karıştırıldıktan sonra 15 dk karanlıkta, oda sıcaklığında inkübe edilmiştir. İnkübasyon sonrasında örneklerin absorbans değerleri spektrofotometrede 517 nm dalga boyunda ölçülmüştür. Kör tüp olarak 0,1 mM DPPH çözeltisi kullanılmıştır. Örneklerin % DPPH süpürme etkisini hesaplamak için aşağıdaki formülden yararlanılmıştır:

$$\% SA = \frac{A_0 - A_{\text{örnek}}}{A_0} \times 100 \quad (3.8)$$

%SA: % DPPH Süpürücü Etki, A₀: Kör tüp absorbansı, A_{örnek}: Örnek absorbansı

3.10 Biber Meyvelerinin Kapsaisin İçeriklerinin Belirlenmesi

3.10.1 Biber meyvelerinden kapsaisin ekstraksiyonu

Biber meyvelerinden kapsaisin ekstraksiyonunu gerçekleştirmek için 500 mg kurutulup öğütülmüş biber numunesi 50 mL etanol ile Daihan HG-15D homojenizatörde 8000 rpm’de 5 dk homojenize edilmiştir. Homojenat bir gece oda sıcaklığında ve 30 dk ultrasonik banyoda (Sonorex, Bandelin) 50°C’de inkübe edilmiştir. Daha sonra Whatman No:1 filtre kağıdından geçirilen homojenattaki çözücü bir rotary evaporatör (Hei-Vap Value, Heidolph) ile uzaklaştırılmıştır. Tamamen kurutulan ekstrakt 5 mL diklorometan ile süspanse edilmiş ve susuz sodyum sülfattan geçirilmiştir. Ardından 0,45 µm por

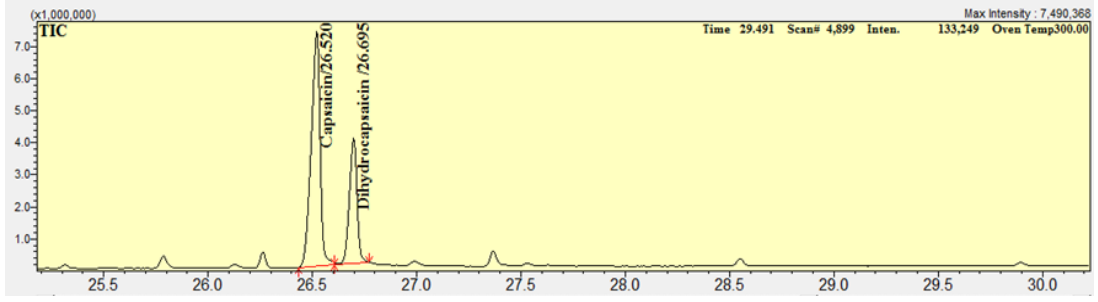
apına sahip naylon filtreden geçirilen ekstraktlar 1,5 mL'lik cam viyaller içerisinde kullanılıncaya kadar 4°C'de muhafaza edilmiştir.

3.10.2 Gaz kromatografi-ktle spektrometri (GC-MS) yöntemi ile kapsaisin analizi

Kapsaisin analizleri Restek Rxi-5MS (30 m * 0,25 mmID * 0,25 µm df; Restek) kolonu bulunduran Shimadzu marka QP2010 Ultra GC-MS sistemi ile gerçekleştirilmiştir. Enjeksiyon hacmi 1,0 µL olacak şekilde programlanmış AOC-20i autosampler kullanılmıştır. Enjeksiyon bloğu sıcaklığı 260°C, kolon sıcaklık programı; 40°C'de 1 dk, 40-300°C 10°C/dk ve 300°C'de 10dk şeklindedir. MS arayüz sıcaklığı 270°C ve iyon kaynağı sıcaklığı 230°C'dir. Taşıyıcı gaz olarak 1,1 mL/dk akış hızında He kullanılmıştır (Peña-Alvarez vd., 2009). Tüm ktle spektrumları Elektron Etkisi (EI) moduyla 50-550 m/z aralığında tam tarama yapılarak elde edilmiştir. Analiz numunelerinde bulunan kapsaisin ve dihidrokapsaisin, ktle spektrumlarının Wiley ktle spektrumları ktphanesindekilerle (W9N11) karşılaştırılması yoluyla karakterize edilmiştir. Standart zeltiler ve biber numunelerinden elde edilen ekstraktlar bu koşullarda analiz edilmiştir.



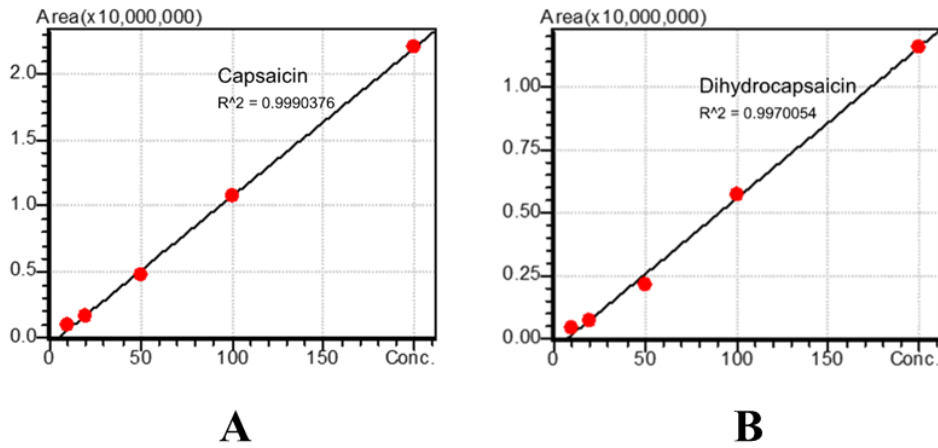
Fotoğraf 3.13. Kapsaisin analizlerinin gerçekleştirildiği Shimadzu QP2010 Ultra GC-MS sistemi



Şekil 3.1. Kapsaisin ve Dihidrocapsaisin bileşiklerinin GC kolonunda alıkonma sürelerini gösteren kromatogram

3.10.3 Kapsaisin standardının hazırlanması

Farklı sulama grupları ve farklı mikorizal mantar türleri inoküle edilerek yetiştirilen biber meyveleri arasında kapsaisin miktarları bakımından bir farklılığın olup oluşmadığını kantitatif olarak tayin edebilmek amacıyla doğal kapsaisin (Tokyo Chemical Industry) ile hazırlanan standart çözelti kullanılmıştır. 10 mg ticari kapsaisin tartılarak 10 mL diklorometan içerisinde çözdürülmüş ve 1,0 mg/mL yoğunluğunda bir stok çözelti elde edilmiştir. GC-MS ile gerçekleştirilecek analizler için bu stok çözeltiden 10, 25, 50, 100 ve 200 ppm yoğunluğunda çözeltiler diklorometan ile seyreltme yapılarak hazırlanmıştır. Farklı konsantrasyonlarda hazırlanan standart çözeltiler GC-MS ile yukarıda belirtilen koşullarda analiz edilmiştir. GC-MS LabSolutions (Shimadzu) yazılımı ile kapsaisin ve dihidrokapsaisin bileşikleri için oluşturulan kalibrasyon eğrilerinin regresyon katsayıları sırasıyla 0,9990376 ve 0,9970054 olarak hesaplanmıştır.



Şekil 3.2. Kantitatif GC-MS analizleri için oluşturulan kapsaisin (A) ve dihidrokapsaisin (B) kalibrasyon eğrileri

3.11 Analiz Verilerinin İstatistiksel Değerlendirilmesi

Kontrol ve deneme grubu bitkilerinden elde edilen verilerin değerlendirilmesinde IBM Sosyal Bilimler için İstatistik Paketi (SPSS) yazılımından faydalanılmıştır (Versiyon 24.0, SPSS Inc., ABD). Gruplar arasındaki ortalamaların karşılaştırılmasında $p < 0,05$ anlamlılık düzeyinde tek yönlü varyans analizi (ANOVA) ve Duncan's post-hoc testi kullanılmıştır.



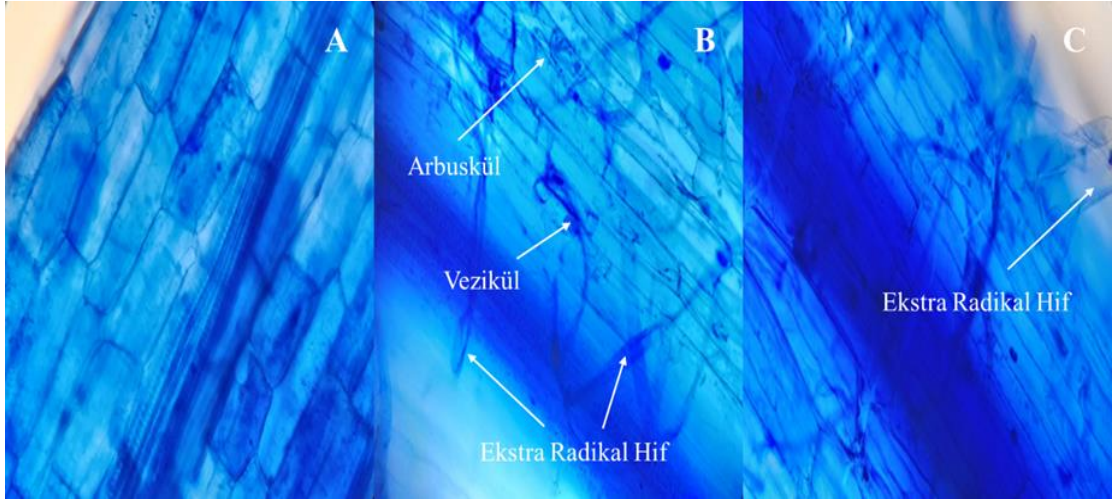
BÖLÜM IV

BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1 Biber Bitkisi Kökünde Mikorizal Enfeksiyonun Belirlenmesi

4.1.1 Bitki kök numunelerinin trypan blue ile boyanması ve ışık mikroskopunda görüntülenmesi sonucu elde edilen bulgular

Mikorizal mantar türlerinin biber bitkisinin köklerinde gerçekleştirdiği enfeksiyonun tespit edilmesi ve kök enfeksiyon oranlarının hesaplanabilmesi amacıyla trypan blue ile gerçekleştirilen boyama işleminin ardından yapılan mikroskopik inceleme sonucunda *F. mosseae* ve *R. intraradices* mantarları ile inokule edilen biber bitkilerinin köklerinde mikoriza oluşumunun farklı oranlarda başarıyla gerçekleştirildiği görülmüştür.

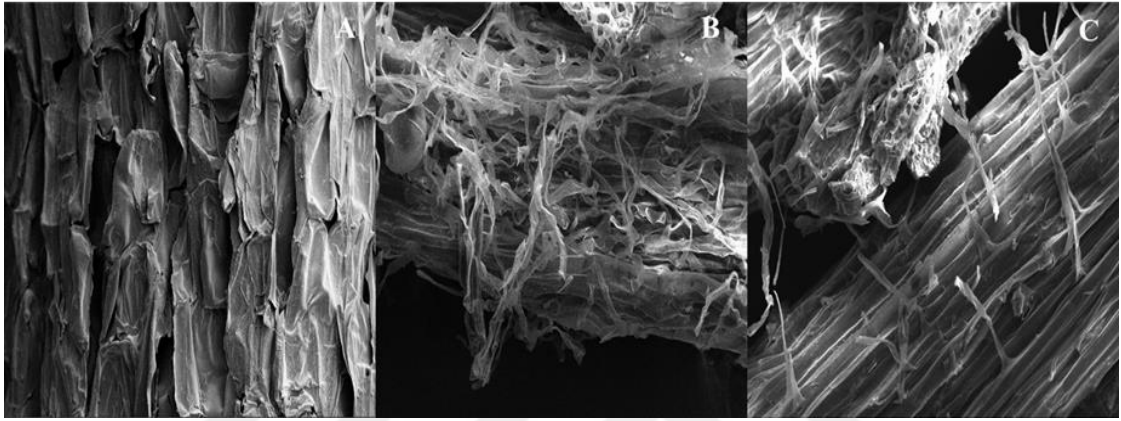


Fotoğraf 4.1. *C. annuum* bitki köklerinden alınan ve boyama işlemine tabi tutulan numunelerde mikoriza oluşumunu gösteren bulgular. (A) Kontrol grubu bitkisi, (B) *F. mosseae* ve (C) *R. intraradices* mikorizal mantarlarıyla inokule edilen bitkiler

Fotoğraf 4.1’de görülen ekstra radikal hifler ve hücre içi vezikül oluşumu bitki köklerinin mikorizal mantarlarla inokulasyonunun başarılı bir şekilde gerçekleştirildiğini göstermektedir.

4.1.2 Bitki kök numunelerinin taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüleri

Mikorizal mantar türlerinin biber bitkisinin köklerinde gerçekleştirdiği enfeksiyonun tespit edilmesi için gerçekleştirilen SEM görüntüleme işleminin ardından elde edilen görüntüler *F. mosseae* ve *R. intraradices* mantarlarının bitki köklerinde oluşturdukları ekstra radikal hifleri, kök hücrelerindeki vezikülleri ve kök bölgesinde oluşturdukları kolonizasyonu göstermiştir (Fotoğraf 4.2).



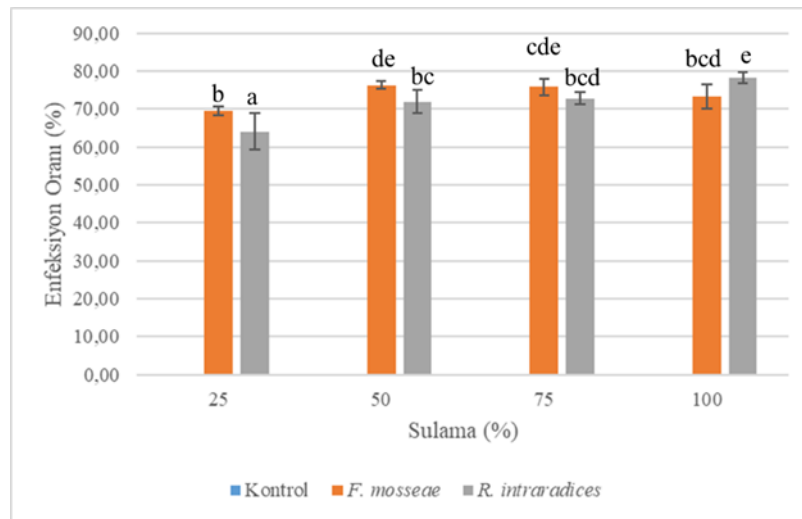
Fotoğraf 4.2. Kontrol (A), *F. mosseae* (B) ve *R. intraradices* (C) deneme grubu bitkilerinden alınan kök örneklerinin SEM görüntüleri

4.1.3 Bitki kök numunelerinde mikorizal enfeksiyon oranları

Biber bitkilerinin köklerinde meydana gelen mikorizal enfeksiyon oranlarını belirlemek için faydalanılan “Grid Line Intersection” yöntemine göre *F. mosseae* ve *R. intraradices* mikorizal mantarları ile inokule edilen ve farklı sulama oranları uygulanan deneme grubu bitkilerinin köklerinde farklı oranlarda mikorizal enfeksiyon tespit edilmiştir. Elde edilen bulgular Şekil 4.1’de gösterilmiştir. Buna göre en yüksek mikorizal enfeksiyon oranı %78,24±1,48 ile *R. intraradices* bitkilerinin tam sulama uygulanan grubunda gözlenirken en düşük mikorizal enfeksiyon oranı yine *R. intraradices* bitkilerinin %25 sulama uygulanan grubunda %64,05±4,78 olarak gözlenmiştir. %50 ve %75 sulama uygulanan *R. intraradices* bitkilerinde mikorizal enfeksiyon oranları sırasıyla %71,94±3,07 ve %72,86±1,61 olarak bulunmuştur. *F. mosseae* bitkileri göz önüne alındığında en yüksek enfeksiyon oranı %76,27±1,07 ile %50 sulama uygulanan deneme grubunda gözlenirken %25, %75 ve tam sulama uygulanan bitkilerde mikorizal enfeksiyon oranı sırasıyla 69,57±1,21; 75,81±2,17 ve 73,24±3,14 olarak tespit edilmiştir.

F. mosseae ve *R. intraradices* mikorizal mantarlarının da aralarında bulunduğu pek çok mikorizal mantar türünün *Capsicum* türlerinde biyotik ve abiyotik stres koşullarına karşı direncinin araştırıldığı çalışmalar mevcuttur. Bu çalışmalarda mikorizal mantarların bitkinin yetiştirme ortamından besin elementleri ve su alımına yönelik etkisi, fenolojik özelliklerindeki değişime, meyve verimine etkisi ve fotosentetik pigment ve biyokimyasal parametreler üzerine etkisi araştırılmıştır (Akande vd., 2018; Bernardo vd., 2021; Gashua vd., 2015; Selvakumar ve Thamizhiniyan, 2011). Yapılan bu çalışmalarda mikorizal enfeksiyon oranları biber bitkilerinin köklerinde oluşan %31 ile %66 arasında değişmektedir.

Mikorizal mantarların biber bitkisinin bakır (Cu) stresine karşı toleransına etkisinin araştırıldığı bir çalışmada 50 spor/g yoğunlukta *F. mosseae* ve *R. intraradices* mantar inokulumları *C. annuum* L. köklerine inoküle edilmiş ve mikorizal mantarların bitki kökünde sırasıyla %46,0 ve %73,3 oranında kolonize olduğu tespit edilmiştir (Ruscitti vd., 2017). *F. mosseae* ve *R. intraradices*'in de dahil olduğu 11 mikorizal mantar türünün biber bitkisinde solgunluğa sebep olan *Ralstonia solanacearum* (fitopatojen bakteri türü), *Phytophthora capsici* (fitopatojen fungus türü) ve *Meloidogyne incognita* (kök ur nematodu) patojen ve parazit organizmalarına karşı etkilerinin araştırıldığı bir başka çalışmada *F. mosseae* ve *R. intraradices* mantarlarının *C. annuum* köklerinde oluşturdukları enfeksiyon oranları sırasıyla %41 ve %48 olarak bildirilmiştir (Raghavendra Kumar vd., 2018).



Şekil 4.1. *C. annuum* köklerinde *F. mosseae* ve *R. intraradices* mikorizal mantarları tarafından gerçekleştirilen enfeksiyon oranları ($p < 0.05$)

Bu tez çalışmasında görülen en düşük ve en yüksek mikorizal enfeksiyon oranları literatürde kayıtlı diğer çalışmalarla kıyaslandığında oldukça etkin bir aralıkta mantar enfeksiyonunun gerçekleştiğini ortaya koymaktadır. Bu durumun ortaya çıkmasında inokulum türü, spor yoğunluğu, mikorizal mantar türleri ile biber bitkisi arasındaki sinerjizm, kullanılabilir su ve besin elementi miktarı gibi etkenlerin yanı sıra mikorizal inokulumların hem tohumdan fide elde etme aşamasında hem de fidelerin saksılara aktarılması aşamasında çift inokulasyon şeklinde uygulanmasının etkisi olduğu düşünülmektedir.

Kontrol bitkilerine herhangi bir mikorizal mantar uygulaması yapılmamış olup boyama işlemine maruz bırakılan numunelerde herhangi bir mikorizal enfeksiyon bulgusuyla karşılaşılmamıştır.

4.2 Mikorizal Mantarların Biber Bitkisinde Fenolojik Özellikler Üzerine Etkileri

4.2.1 Mikorizal mantarların bitki sürgün boyuna etkileri

Mikorizal mantarların biber bitkisinde sürgün boyuna etkilerinin belirlenmesi için yapılan ölçümlerin sonucunda *F. mosseae* ve *R. intraradices* mantarları ile enfekte edilen biber bitkilerinin, %25 sulama uygulanan deneme grubu bitkileri hariç olmak üzere, sürgün boylarının kontrol bitkilerine göre daha fazla oldukları gözlemlenmiştir (Çizelge 4.1). Buna göre, en yüksek sürgün boyu ortalaması $63,90 \pm 6,40$ cm ile *R. intraradices* bitkilerinin tam sulama uygulanan grubunda gözlemlenirken en düşük sürgün boyu ortalaması $35,03 \pm 3,72$ cm ile kontrol bitkilerinin %50 sulama uygulanan grubunda tespit edilmiştir. *R. intraradices* bitkilerinde %25, 50 ve 75 sulama uygulanan gruplarda elde edilen ortalama sürgün boyu değerleri sırasıyla $45,47 \pm 0,95$; $54,90 \pm 2,02$ ve $57,63 \pm 2,56$ cm'dir. *R. intraradices* bitkilerinde elde edilen veriler istatistiki açıdan $p < 0,05$ anlamlılık düzeyinde hem sulama grupları arasında hem de Kontrol ve *F. mosseae* deneme grupları arasında anlamlı bir fark olduğunu göstermektedir.

F. mosseae bitkilerinde ortalama sürgün boyu ölçümleri %25, 50, 75 ve tam sulama uygulanan gruplar için sırasıyla $46,93 \pm 1,01$; $57,33 \pm 1,79$; $55,93 \pm 6,81$ ve $54,17 \pm 1,62$ olarak bulunmuştur. *F. mosseae* bitkilerinde %50, 75 ve tam sulama uygulanan gruplarda sürgün boyu açısından $p < 0,05$ düzeyinde anlamlı bir fark oluşmazken %25 sulama

uygulanan grupla diğer sulama grupları arasında anlamlı bir fark olduğu gözlemlenmiştir. Kontrol bitkilerinde ortalama sürgün boyu ölçümleri % 75 ve tam sulama uygulanan gruplar için sırasıyla $44,47 \pm 4,35$ ve $49,17 \pm 0,58$ cm olarak bulunmuştur. Kontrol bitkilerinde %50, %75 ve tam sulama uygulanan gruplarda elde edilen veriler arasında $p < 0,05$ düzeyinde anlamlı bir fark olduğu gözlemlenmiştir.

Kök yüzey alanını genişleterek makro ve mikro besin elementlerini bitkiye taşıma, yüksek oranda su tutma kabiliyetleri sayesinde abiyotik stres koşullarına karşı bitkinin toleransını artırma, kök enfeksiyonu bakımından patojen mikroorganizmalarla yarışma girerek bitki hastalık etmenlerini azaltma gibi faydalarıyla mikorizal mantarların bitkide büyüme, gelişme ve morfolojik özellikler üzerine olumlu etkilere sahip olduğu pek çok çalışmada vurgulanmıştır (Bennett ve Groten, 2022; Diagne vd., 2020). *F. mosseae* ve *R. intraradices*'in de içinde bulunduğu ticari bir mikorizal mantar konsorsiyumu ürününün *F. oxysporum* patojenine karşı *C. annuum* bitkisinin vejetatif evrede büyüme ve hastalığa karşı direncine etkisinin araştırıldığı bir çalışmada yalnızca mikoriza uygulanan bitki grubunun hiçbir uygulama yapılmayan kontrol grubu bitkilerine kıyasla daha uzun sürgün boyuna sahip oldukları ve bu farkın istatistiksel açıdan anlamlı olduğu gösterilmiştir (Jamiołkowska ve Michalek, 2019).

Yapılan bir çalışma toprak mikroorganizmaları ile inoküle edilen ve kontrol biber bitkileri arasında bitki boyu, sürgün ve kök taze ve kuru ağırlığı ve kök uzunluğu bakımından önemli farklılıklar olduğunu göstermektedir. Dolmalık biber bitkilerinin *Glomus mosseae*, *Acaulospora laevis* ve *Pseudomonas fluorescens* ile ikili inokülasyonu ve çoklu inokülasyonu, bitki besin maddelerinin biyo yararlanımını ve hareketliliğini artırarak büyümeyi, fotosentetik oranı, meyve sayısını, meyve ağırlığını, toplam azot içeriğini ve fosfor içeriğini, gübrenlenmemiş ve fazla gübrenlenmiş bitkilere kıyasla artırdığı belirtilmiştir (Tanwar vd., 2013). Diğer çalışmalar da, tarımda yerel bir inokulumdan mikoriza kullanımının, değerlendirilen biber bitkilerinin artan yaprak alanı, kök ve meyve taze ağırlığına yansıyan bitkinin beslenme durumunu iyileştirmeye katkıda bulunduğunu göstermektedir.

Kontrol bitkilerinin %25 sulama grubuna dahil olan tüm bireyleri saksılara aktarıldıkları tarihi takip eden iki hafta içinde canlılıklarını yitirmiştir. Bu nedenle fenolojik özellikleri tespit edilemeyen bitkiler deney grubundan çıkarılmışlardır.

4.2.2 Mikorizal mantarların bitki sürgününde yaş ağırlık, kuru ağırlık ve kuru madde miktarı üzerine etkileri

Mikorizal mantarların biber bitkisinde sürgün yaş ve kuru ağırlıkları üzerine etkilerinin belirlenmesi için yapılan çalışmaların sonucunda elde edilen sonuçlar Çizelge 4.1’de gösterilmiştir. Buna göre sürgün yaş ağırlığı bakımından en yüksek değer *R. intraradices* bitkilerinde tam sulama uygulanan grupta $60,46 \pm 4,49$ g olarak tespit edilmiştir. En düşük sürgün yaş ağırlık değeri ise kontrol bitkilerinde %50 sulama uygulanan grupta $22,07 \pm 1,46$ g olarak bulunmuştur.

R. intraradices bitkilerinin %25, 50 ve 75 sulama uygulanan gruplarında sürgün yaş ağırlığı sırasıyla $47,17 \pm 1,59$; $55,11 \pm 4,03$ ve $50,96 \pm 2,29$ g olarak tespit edilmiştir. Sürgün yaş ağırlığı bakımından *R. intraradices* bitkilerinin %50 ve 75 sulama uygulanan grupları arasında $p < 0,05$ anlamlılık düzeyinde istatistiki açıdan anlamlı bir fark oluşmazken %25 ve tam sulama uygulanan gruplar ile arasında anlamlı bir fark olduğu gözlemlenmiştir.

F. mosseae bitkilerinin %25, 50, 75 ve tam sulama uygulanan gruplarında sürgün yaş ağırlığı sırasıyla $46,01 \pm 3,18$; $49,30 \pm 2,13$; $49,29 \pm 2,74$ ve $48,15 \pm 2,20$ g olarak tespit edilmiştir. *F. mosseae* bitkilerinde sürgün yaş ağırlığı bakımından $p < 0,05$ düzeyinde %25, 50, 75 ve tam sulama uygulanan gruplar arasında anlamlı bir fark oluşmamıştır. Kontrol bitkilerinin %75 ve tam sulama uygulanan gruplarında sürgün yaş ağırlığı sırasıyla $24,57 \pm 3,11$ ve $27,90 \pm 0,49$ g olarak tespit edilmiştir. Her üç sulama grubunda bulunan Kontrol bitkileri arasında $p < 0,05$ düzeyinde anlamlı bir fark olduğu istatistik analizler sonucu ortaya konmuştur.

Sürgün kuru ağırlığı bakımından en yüksek değer *R. intraradices* bitkilerinde tam sulama uygulanan grupta $11,08 \pm 1,40$ g olarak tespit edilirken en düşük kuru ağırlık değeri $2,91 \pm 0,59$ g ile Kontrol bitkilerinde %50 sulama uygulanan grupta bulunmuştur. *R. intraradices* bitkilerinin %25, 50 ve 75 sulama uygulanan gruplarında sürgün kuru ağırlığı sırasıyla $7,26 \pm 0,31$; $8,48 \pm 0,66$ ve $9,50 \pm 0,84$ g olarak tespit edilmiştir. Sürgün kuru ağırlığı bakımından *R. intraradices* bitkilerinin tüm sulama grupları arasında $p < 0,05$ düzeyinde anlamlı bir fark olduğu ortaya konmuştur. *F. mosseae* bitkilerinin %25, 50, 75 ve tam sulama uygulanan gruplarında sürgün kuru ağırlığı sırasıyla $7,55 \pm 0,46$; $8,14 \pm 0,45$; $8,22 \pm 0,86$ ve $8,77 \pm 0,87$ g olarak tespit edilmiştir. *F. mosseae* bitkilerinde

sürgün kuru ağırlık bakımından %25 ve 50 sulama uygulanan gruplarda $p<0.05$ düzeyinde anlamlı bir fark oluşmazken bu sulama grupları ve %75 ve tam sulama uygulanan gruplar arasında anlamlı bir fark olduğu gözlenmiştir. Kontrol bitkilerinin %75 ve tam sulama uygulanan gruplarında sürgün kuru ağırlık değerleri $3,63\pm0,33$ ve $4,58\pm0,19$ g olarak tespit edilmiştir. Her üç sulama grubunda bulunan Kontrol bitkileri arasında sürgün kuru ağırlığı bakımından $p<0,05$ düzeyinde anlamlı bir fark olduğu bulunmuştur.

Çizelge 4.1. *F. mosseae* ve *R. intraradices* mikorizal mantarları ile inokule edilen *C. annuum* bitkilerinde gerçekleşen enfeksiyon oranları ve bitkinin fenolojik özellikleri üzerine etkileri

Mikoriza	Sulama	EO	SB	SYA	SKA	SKM	KKM
Kontrol	25	-	-	-	-	-	-
	50	-	$35,03\pm3,72a$	$22,07\pm1,46a$	$2,91\pm0,59a$	$13,10\pm1,93a$	$8,47\pm0,43a$
	75	-	$44,47\pm4,35b$	$24,57\pm3,11ab$	$3,63\pm0,33ab$	$14,81\pm0,72b$	$10,67\pm1,11b$
	100	-	$49,17\pm0,58bc$	$27,90\pm0,49b$	$4,58\pm0,19b$	$16,43\pm0,70bc$	$12,85\pm0,12cd$
<i>F. mosseae</i>	25	$69,57\pm1,21b$	$46,93\pm1,01b$	$46,01\pm3,18c$	$7,55\pm0,46cd$	$16,42\pm0,26bc$	$12,50\pm0,58cd$
	50	$76,27\pm1,07de$	$57,33\pm1,79d$	$49,30\pm2,13c$	$8,14\pm0,45cd$	$16,51\pm0,24bc$	$13,28\pm0,49cd$
	75	$75,81\pm2,17cde$	$55,93\pm6,81d$	$49,29\pm2,74c$	$8,22\pm0,86cde$	$16,66\pm0,99cd$	$13,81\pm1,08d$
	100	$73,24\pm3,14bcd$	$54,17\pm1,62cd$	$48,15\pm2,20c$	$8,77\pm0,87de$	$18,19\pm1,21de$	$15,18\pm1,13e$
<i>R. intraradices</i>	25	$64,05\pm4,78a$	$45,47\pm0,95b$	$47,17\pm1,59c$	$7,26\pm0,31c$	$15,40\pm0,15bc$	$12,18\pm0,33c$
	50	$71,94\pm3,07bc$	$54,90\pm2,02cd$	$55,11\pm4,03d$	$8,48\pm0,66cde$	$15,38\pm0,09bc$	$12,92\pm0,71cd$
	75	$72,86\pm1,61bcd$	$57,63\pm2,56d$	$50,96\pm2,29cd$	$9,50\pm0,84e$	$18,61\pm0,81e$	$13,70\pm1,04d$
	100	$78,24\pm1,48e$	$63,90\pm6,40e$	$60,46\pm4,49e$	$11,08\pm1,40f$	$18,28\pm1,00e$	$16,75\pm0,70f$

*Sulama (%), EO: Bitki kökünde gerçekleşen mikorizal enfeksiyon oranı (%), SB: Sürgün boyu (cm), SYA: Sürgün yaş ağırlığı (g), SKA: Sürgün kuru ağırlığı (g), SKM: Sürgün kuru madde miktarı (%), KKM: Kök kuru madde miktarı (%) **Tüm değerler en az üç bağımsız ölçümün ortalaması ve standart sapması olarak sunulmuştur. ***Aynı sütun içerisinde farklı harflerle gösterilen değerler arasında $p<0.05$ anlamlılık düzeyinde bir fark mevcuttur.

Yapılan bir çalışmada mikorizal mantar inokülasyonunun kuraklık stresi altındaki şili ancho biber çeşidinde büyüme, gelişme ve meyve kalitesi üzerindeki olumlu etkileri inokülasyonun tek tür veya konsorsiyum şeklinde uygulanması ve kuraklık şiddeti parametrelerine bağlı olmak üzere açıkça gösterilmiştir. Mikoriza uygulamasının sürgün ve meyve kuru ağırlıklarını ve toplam kuru biyokütleyi artırdığı ve elde edilen sonuçların daha önce gerçekleştirilen çalışmalarla uyumlu olduğu vurgulanmıştır (Mena-Violante vd., 2006).

Sürgün kuru madde miktarı bakımından en yüksek değer $18,61 \pm 0,81$ ile *R. intraradices* bitkilerinin 75% sulama grubunda tespit edilirken en düşük değer Kontrol bitkilerinin 50% sulama grubunda $13,10 \pm 1,93$ olarak bulunmuştur.

R. intraradices bitkilerinin 25% , 50% ve tam sulama uygulanan gruplarında hesaplanan kuru madde miktarları sırasıyla $15,40 \pm 0,15$; $15,38 \pm 0,09$ ve $18,28 \pm 1,00$ olarak tespit edilmiştir. 25% ve 50% sulama gruplarında bulunan *R. intraradices* bitkileri arasında kuru madde miktarı bakımından $p < 0,05$ düzeyinde anlamlı bir fark oluşmamıştır. Aynı şekilde 75% ve tam sulama uygulanan *R. intraradices* bitkileri arasında kuru madde miktarı bakımından anlamlı bir fark gözlenmemiştir. Ancak *R. intraradices* bitkilerinin farklı sulama grupları arasında $p < 0,05$ düzeyinde anlamlı bir fark olduğu Çizelge 4.1’de gösterilmektedir.

F. mosseae bitkilerinin 25% , 50% , 75% ve tam sulama uygulanan gruplarında hesaplanan sürgün kuru madde miktarları sırasıyla $16,42 \pm 0,26$; $16,51 \pm 0,24$; $16,66 \pm 0,99$ ve $18,19 \pm 1,21$ olarak tespit edilmiştir. 25% ve 50% sulama uygulanan *F. mosseae* bitkileri arasında sürgün kuru madde miktarı bakımından $p < 0,05$ düzeyinde anlamlı bir fark oluşmazken diğer sulama grubu bitkileri arasında anlamlı bir fark olduğu gözlenmiştir. Kontrol bitkilerinin 75% ve tam sulama uygulanan gruplarında tespit edilen sürgün kuru madde miktarı sırasıyla $14,81 \pm 0,72$ ve $16,43 \pm 0,70$ ’tir. Her üç sulama grubunda bulunan Kontrol bitkileri arasında $p < 0,05$ düzeyinde anlamlı bir fark olduğu gözlenmiştir.

Arbusküler mikorizal mantarların (*Glomus intraradices*) toprak tuzluluğunun ve P mevcudiyetinin biber bitkisinde (*C. annuum* L.) büyüme (yaprak alanı ve kuru ağırlık), besin emilimi, klorofil, prolin içeriği ve alkalın fosfataz aktivitesi üzerindeki etkilerini araştırmak için yapılan bir çalışmada bitkiler dört tuzluluk seviyesinde (0 , 50 , 100 ve 200 mM NaCl) ve iki P seviyesinde (10 ve 40 mg kg⁻¹) yetiştirilmiştir. Kolonizasyon stres altında olmayan ve yüksek tuz stresi altındaki bitkilerde sırasıyla 80% ve 51% olmuştur. Mikorizal bağımlılık yüksek olup sadece yüksek tuzluluk seviyesinde azalma göstermiştir. Mikorizal bitkiler, P seviyesinden bağımsız olarak, mikorizal olmayan bitkilere kıyasla tüm tuzluluk seviyelerinde daha fazla kök ve sürgün biyokütlesini korumuştur. Tuzluluk, fosfor ve mikorizalar arasındaki etkileşimler yaprak alanı, kök ve sürgün kuru kütlesi için önemlidir. Mikorizal olmayan bitkiler mikorizal bitkilere kıyasla daha yüksek Na ve daha düşük K ve P biriktirmiştir. Sonuçlar, mikorizal inokülasyonun

biber bitkilerinde tuz stresi koşullarının neden olduğu zararı hafifletebildiğini, membran stabilitesini ve bitki büyümesini koruyabildiğini ve bunun P beslenmesiyle ilişkili olabileceğini göstermektedir (Beltrano vd., 2013).

Zhu vd. (2012), daha iyi kök büyümesi, mikroorganizmaların bitki büyümesinden sorumlu fitohormonların (örneğin IAA) sentezi üzerindeki etkisinden kaynaklanmaktadır. Bu, mikorizanın mevcut araştırmalarda ortaya konan biber kök sisteminin taze ve kuru ağırlığındaki artışın üzerindeki etkisini açıklayabilir. Mevcut bir araştırmada, biber kök sisteminin büyümenin erken aşamalarında mikorizasyonu, kontrol bitkilerine kıyasla gövde çapında %10,1; bitki boyunda %8,3; toprak üstü aksamın taze ağırlığında %13,82 ve kök sisteminde %83 oranında önemli bir artışla sonuçlanmıştır (Franczuk vd., 2023).

4.2.3 Mikorizal mantarların bitki kökünde kuru madde miktarı üzerine etkileri

Mikorizal mantarların biber bitkisinde kök kuru madde miktarı üzerine etkilerinin belirlenmesi için yapılan çalışmalarda bütün deneme grubu bitkilerinin kök kısımlarından 0,5 g ağırlığında alt örnekler alınmış ve kök kuru madde miktarı tayinleri bu alt örnekler üzerinden hesaplanmıştır (Giovannetti ve Mosse, 1980). Kök kuru madde miktarı bakımından en yüksek değer *R. intraradices* bitkilerinin tam sulama uygulanan grubunda $16,75 \pm 0,70$ olarak tespit edilirken en düşük değer Kontrol bitkilerinin %50 sulama uygulanan grubunda $8,47 \pm 0,43$ olarak bulunmuştur.

R. intraradices bitkilerinin %25, 50 ve 75 sulama uygulanan gruplarında hesaplanan kök kuru madde miktarı sırasıyla $12,18 \pm 0,33$; $12,92 \pm 0,71$ ve $13,70 \pm 1,04$ olarak tespit edilmiştir. Dört sulama grubu için *R. intraradices* bitkilerinde kök kuru madde bakımından $p < 0,05$ düzeyinde anlamlı bir fark olduğu gözlemlenmiştir. *F. mosseae* bitkilerinin %25, 50, 75 ve tam sulama uygulanan gruplarında kök kuru madde miktarları sırasıyla $12,50 \pm 0,58$; $13,28 \pm 0,49$; $13,81 \pm 1,08$ ve $15,18 \pm 1,13$ olarak hesaplanmıştır. %25 ve 50 sulama uygulanan *F. mosseae* bitkileri arasında kök kuru madde miktarı açısından $p < 0,05$ düzeyinde anlamlı bir fark oluşmazken %75 ve tam sulama uygulanan gruplarla aralarında anlamlı bir fark olduğu gözlemlenmiştir. Kontrol bitkilerinin %75 ve tam sulama uygulanan gruplarında kök kuru madde miktarları sırasıyla $10,67 \pm 1,11$ ve

12,85±0,12 olarak tespit edilmiştir. Her üç sulama grubu için Kontrol bitkilerinde kök kuru madde miktarı bakımından $p<0,05$ düzeyinde anlamlı bir fark olduğu gözlenmiştir.

Yapılan istatistiki analizler ve post-hoc testi sonucunda Kontrol bitkilerinin tam sulama uygulanan grubundan, *F. mosseae* bitkilerinin %25 ve 50 sulama uygulanan gruplarından ve *R. intraradices* bitkilerinin %50 sulama uygulanan grubundan elde edilen verilerin ortalamalarının aynı aralıkta bulunuyor olmaları; bununla birlikte *R. intraradices* bitkilerinin %25 sulama uygulanan grubundan, Kontrol bitkilerinin %75 ve 50 sulama uygulanan gruplarından elde edilen verilerin ortalamalarının sırasıyla azalan aralıkta bulunuyor olmaları mikorizal mantar eşi bulunan bitkilerde daha az sulama yapılarak benzer ve/veya daha yüksek kök kuru madde birikimi oluşturulabileceğini düşündürmektedir.

4.2.4 Mikorizal mantarların meyve sayısı, meyve ağırlığı, meyve boyu, meyve çapı ve verim üzerine etkileri

Mikorizal mantarların biber bitkisinde meyve sayısı, meyve ağırlığı, meyve boyu, meyve çapı ve verim üzerine etkileri araştırılmış ve elde edilen bulgular Çizelge 4.2’de sunulmuştur. Buna göre meyve sayısı bakımından en yüksek değer 6,33±0,58 ile *R. intraradices* bitkilerinin %50 sulama uygulanan grubunda tespit edilmiştir. En düşük meyve sayısı değeri Kontrol bitkilerinin %50 sulama uygulanan grubunda bulunmuştur. *R. intraradices* bitkilerinin %25, 75 ve tam sulama uygulanan gruplarında meyve sayısı değerleri sırasıyla 4,00±1; 5,00±1 ve 4,00±0 olarak bulunmuştur. *R. intraradices* bitkilerinin %25 ve tam sulama uygulanan gruplarında meyve sayısı bakımından $p<0,05$ düzeyinde anlamlı bir fark görülmezken diğer iki sulama grubuyla aralarında istatistiki açıdan anlamlı bir fark olduğu gözlenmiştir.

F. mosseae bitkilerinin %25, 50, 75 ve tam sulama uygulanan gruplarında meyve sayısı değerleri sırasıyla 4,67±0,58; 4,33±0,58; 3,67±0,58 ve 3,00±0 olarak tespit edilmiştir. *F. mosseae* bitkilerinin %25 ve 50 sulama uygulanan grupları arasında $p<0,05$ düzeyinde anlamlı bir fark görülmezken diğer iki sulama grubuyla aralarında istatistiki açıdan anlamlı bir fark olduğu gözlenmiştir. Kontrol bitkilerinin %75 ve tam sulama uygulanan gruplarında tespit edilen meyve sayısı değerleri sırasıyla 2,00±0 ve 2,33±0,58’dir. Kontrol bitkilerinin %75 ve tam sulama grupları arasında meyve sayısı bakımından

$p < 0,05$ düzeyinde anlamlı bir fark oluşmazken %50 sulama uygulanan grup ile aralarında istatistiki açıdan anlamlı bir fark olduğu gözlenmiştir.

Biberin kökleriyle mikoriza birlikteliği farklı mutualistik faydalara sahiptir ve biber üretimine katkıda bulunmaktadır. Biberin arbusküler mikorizal fungus ile inokülasyonu, meyve olgunluğu, ekonomik verim ve hastalık toleransı üzerinde kontrol grubu bitkilerine göre önemli bir fark oluşturmaktadır. Yapılan bir çalışmada yerli mikorizal mantar *Glomus claroideum*'un, ticari *Glomus intraradices*'e kıyasla, acı biber üretimini olumlu yönde etkilediği, daha yüksek yaprak alanı ve sürgün/kök oranına sahip daha güçlü bitkilerle sonuçlandığı, meyve vermeyi hızlandırdığı ve kaliteyi artırdığı ve toprakta daha fazla miktarda mantar propagülüne yol açtığı gösterilmektedir (Castillo vd., 2009).

Meyve ağırlığı bakımından en yüksek değer $18,75 \pm 0,53$ g ile *F. mosseae* bitkilerinin %50 sulama uygulanan grubunda görülürken en düşük değer Kontrol bitkilerinin %50 sulama uygulanan grubunda $10,19 \pm 0,90$ g olarak bulunmuştur. *F. mosseae* grubunun %25, 75 ve tam sulama uygulanan gruplarında ölçülen meyve ağırlığı değerleri sırasıyla $17,14 \pm 0,34$; $18,37 \pm 0,63$ ve $18,23 \pm 0,62$ g olarak ortaya çıkmaktadır. *F. mosseae* bitkilerinin %50, 75 ve tam sulama uygulanan gruplarında ölçülen meyve ağırlığı değerleri arasında $p < 0,05$ düzeyinde anlamlı bir fark oluşmazken %25 sulama uygulanan grup ile aralarında istatistiki açıdan anlamlı bir fark olduğu gözlenmiştir.

R. intraradices bitkilerinin %25, 50, 75 ve tam sulama uygulanan gruplarında meyve ağırlığı değerleri sırasıyla $18,18 \pm 0,48$; $18,73 \pm 0,36$; $18,56 \pm 0,58$ ve $17,94 \pm 0,40$ g olarak ölçülmüştür. %25 ve tam sulama uygulanan gruplar arasında ve %50 ve 75 sulama uygulanan gruplar arasında $p < 0,05$ düzeyinde anlamlı bir fark oluşmazken bu gruplar arasında istatistiki açıdan anlamlı bir fark olduğu gözlenmiştir. Kontrol bitkilerinin %75 ve tam sulama uygulanan gruplarında meyve ağırlığı değerleri sırasıyla $11,35 \pm 0,25$ ve $12,80 \pm 1,13$ g olarak ölçülmüştür. Her üç sulama grubu için Kontrol bitkilerinde meyve ağırlığı değerleri bakımından $p < 0.05$ düzeyinde anlamlı bir fark olduğu gözlenmiştir.

Meyve boyu bakımından en yüksek değer $160,40 \pm 0,95$ mm ile *R. intraradices* bitkilerinin %75 sulama uygulanan grubunda ölçülürken en düşük değer $102,16 \pm 2,04$ mm ile Kontrol bitkilerinin %50 sulama uygulanan grubunda tespit edilmiştir. *R. intraradices* bitkilerinin

%25, 50 ve tam sulama uygulanan gruplarında meyve boyu değerleri sırasıyla 139,03±4,79; 156,21±1,63 ve 151,14±3,53 mm olarak ölçülmüştür. Her dört sulama grubu için *R. intraradices* bitkilerinde meyve boyu bakımından $p<0,05$ düzeyinde anlamlı bir fark olduğu gözlenmiştir.

F. mosseae bitkilerinin %25, 50, 75 ve tam sulama uygulanan gruplarında ölçülen meyve boyu değerleri sırasıyla 140,15±4,10; 154,64±1,34; 150,76±3,23 ve 149,60±2,76 mm'dir. *F. mosseae* bitkilerinde %75 ve tam sulama uygulanan gruplar arasında $p<0,05$ düzeyinde anlamlı bir fark oluşmazken %25 ve 50 sulama uygulanan gruplar ile aralarında istatistiki açıdan anlamlı bir fark olduğu gözlenmiştir. Kontrol bitkilerinin %75 ve tam sulama uygulanan gruplarında ölçülen meyve boyu değerleri sırasıyla 129,71±4,63 ve 138,91±2,10 mm'dir. Her üç sulama grubu için Kontrol grubu bitkilerinde ölçülen meyve boyu değerleri arasında $p<0,05$ düzeyinde anlamlı bir fark olduğu gözlenmiştir.

Çizelge 4.2. *F. mosseae* ve *R. intraradices* mikorizal mantarlarının *C. annuum* bitkilerinde meyve özellikleri ve verim üzerine etkileri

Mikoriza	Sulama	MS	MA	MB	MÇ	Verim
Kontrol	25	-	-	-	-	-
	50	1,33±0,58a	10,19±0,90a	102,16±2,04a	15,28±0,86a	13,61±6,05a
	75	2,00±0ab	11,35±0,25b	129,71±4,63b	16,86±0,85a	22,69±0,50a
	100	2,33±0,58ab	12,80±1,13c	138,91±2,10c	20,07±0,12b	30,29±10,36a
<i>F. mosseae</i>	25	4,67±0,58de	17,14±0,34d	140,15±4,10c	23,30±0,95c	79,96±9,74cd
	50	4,33±0,58de	18,75±0,53e	154,64±1,34de	26,29±1,59e	81,29±11,67cd
	75	3,67±0,58cd	18,37±0,63e	150,76±3,23d	25,57±1,05de	67,38±11,00bc
	100	3,00±0bc	18,23±0,62e	149,60±2,76d	23,89±0,67cd	54,70±1,85b
<i>R. intraradices</i>	25	4,00±1cde	18,18±0,48de	139,03±4,79c	23,14±1,12c	72,79±18,48bc
	50	6,33±0,58f	18,73±0,36e	156,21±1,63ef	26,83±1,64ef	118,50±9,16e
	75	5,00±1e	18,56±0,58e	160,40±0,95f	28,22±0,83f	93,18±21,38d
	100	4,00±0cde	17,94±0,40de	151,14±3,53de	24,44±1,24de	71,77±1,58bc

*Sulama (%), MS: Meyve sayısı, MA: Meyve ağırlığı (g), MB: Meyve boyu (mm), MÇ: Meyve çapı (mm), Verim (g TA.bitki⁻¹) **Tüm değerler en az üç bağımsız ölçümün ortalaması ve standart sapması olarak sunulmuştur. ***Aynı sütun içerisinde farklı harflerle gösterilen değerler arasında $p<0,05$ anlamlılık düzeyinde bir fark mevcuttur.

Meyve çapı bakımından en yüksek değer *R. intraradices* bitkilerinin %75 sulama uygulanan grubunda 28,22±0,83 mm olarak tespit edilirken en düşük değer Kontrol grubu bitkilerinin %50 sulama grubunda 15,28±0,86 mm olarak bulunmuştur. *R. intraradices* bitkilerinin %25, 50 ve tam sulama uygulanan gruplarında meyve çapı değerleri sırasıyla 23,14±1,12; 26,83±1,64 ve 24,44±1,24 mm olarak tespit edilmiştir. Her dört sulama

grubu için *R. intraradices* bitkilerinde meyve çapı bakımından ölçülen değerler arasında $p<0,05$ düzeyinde anlamlı bir fark gözlenmiştir.

F. mosseae bitkilerinin %25, 50, 75 ve tam sulama uygulanan gruplarında ölçülen meyve çapı değerleri sırasıyla $23,30\pm0,95$; $26,29\pm1,59$; $25,57\pm1,05$ ve $23,89\pm0,67$ mm'dir. Her dört sulama grubu için *F. mosseae* bitkilerinde meyve çapı değerleri bakımından $p<0,05$ düzeyinde anlamlı bir fark olduğu gözlenmiştir. Kontrol bitkilerinin %75 ve tam sulama uygulanan gruplarında ölçülen meyve çapı değerleri sırasıyla $16,86\pm0,85$ ve $20,07\pm0,12$ mm'dir. Kontrol bitkilerinin %50 ve 75 sulama uygulanan gruplarında meyve çapı değerleri bakımından $p<0,05$ düzeyinde anlamlı bir fark olmadığı görülürken tam sulama uygulanan grup ile aralarında anlamlı bir fark olduğu gözlenmiştir.

Faisal vd. (2010) ve Román-García (2003), mikorizal fungusların iki biber çeşidinin (Ancho ve Mirasol), meyve sayısındaki artışında (sırasıyla %47 ve %46) önemli bir etkisi olduğunu bulmuşlardır. Ayrıca, kabakların (*Cucurbita pepo* L. cv. Grezini) *Glomus intraradices* ve *Trichoderma atroviride* mantarları ile inokülasyonu, kontrol bitkileriyle kıyaslandığında meyve sayısında önemli bir artışa, önemli ölçüde daha yüksek ortalama kütle ve sonuç olarak önemli ölçüde daha yüksek toplam verime neden olmuştur (Colla vd., 2015).

Meyve verimi bakımından en yüksek değer $118,50\pm9,16$ g TA.bitki⁻¹ ile *R. intraradices* bitkilerinin %50 sulama uygulanan grubunda görülürken en düşük değer $13,61\pm6,05$ g TA.bitki⁻¹ ile Kontrol bitkilerinin %50 sulama uygulanan grubunda tespit edilmiştir. *R. intraradices* bitkilerinin %25, 75 ve tam sulama uygulanan gruplarında tespit edilen verim değerleri sırasıyla $72,79\pm18,48$; $93,18\pm21,38$ ve $71,77\pm1,58$ g TA.bitki⁻¹ olarak bulunmuştur. *R. intraradices* bitkilerinin %25 ve tam sulama uygulanan grupları arasında verim bakımından $p<0,05$ düzeyinde anlamlı bir fark oluşmazken %50 ve 75 sulama uygulanan gruplar ile aralarında istatistiki açıdan anlamlı bir fark olduğu gözlenmiştir.

F. mosseae bitkilerinin %25, 50, 75 ve tam sulama uygulanan gruplarında tespit edilen verim değerleri sırasıyla $79,96\pm9,74$; $81,29\pm11,67$; $67,38\pm11,00$ ve $54,70\pm1,85$ g TA.bitki⁻¹ olarak bulunmuştur. *F. mosseae* bitkilerinin %25 ve 50 sulama grupları arasında verim bakımından $p<0,05$ düzeyinde anlamlı bir fark oluşmazken %75 ve tam sulama uygulanan gruplar ile aralarında istatistiki açıdan anlamlı bir fark olduğu

gözlenmiştir. Kontrol bitkilerinin %75 ve tam sulama uygulanan gruplarında tespit edilen verim değerleri sırasıyla $22,69 \pm 0,50$ ve $30,29 \pm 10,36$ g TA.bitki⁻¹ olarak bulunmuştur. Her üç sulama grubu için Kontrol bitkilerinde verim bakımından $p < 0,05$ düzeyinde anlamlı bir fark ortaya çıkmamıştır.

Capsicum cinsi bitkilerin su eksikliğine karşı hassasiyeti, tatlı ve acı biber yetiştiriciliğinde büyük bir sorundur. Kök sisteminin yüzey alanını artırarak bitkilere daha fazla su sağlanmasına katkıda bulunan arbusküler mikorizal mantarlar (AMF) bu konuda büyük bir rol oynamaktadır. AMF inokülasyonunun ve sulama rejiminin yerli bir tatlı biber çeşidi olan 'Roberta F1' bitkilerinde meyve verimi ve meyve verme dinamikleri üzerindeki etkilerinin organik tarım yöntemlerinin uygulandığı bir arazide araştırıldığı çalışmada Buczkowska ve Sałata (2020) üretim sezonu boyunca en yüksek pazarlanabilir meyve veriminin yanı sıra üretilen en fazla biber meyvesi sayısı parametrelerini incelemişlerdir. Biber meyvelerinin verimi ve sayısı sulama rejiminden ziyade AMF kolonizasyonundan daha büyük ölçüde etkilenmiştir. Bitkilerin nakil aşamasında AMF ile inokülasyonu meyvelerin erkenciliğini olumlu yönde etkilemiştir.

Tatlı biber bitkileriyle kurulan bir denemede mikorizal mantar uygulaması yapılan bitkilerin kontrol bitkilerine kıyasla toplam ve pazarlanabilir meyve verimi açısından daha yüksek değerlere sahip olduğu belirlenmiştir. Bitkilere mikoriza uygulaması fide üretimi ve saksıya aktarım aşaması olmak üzere iki ayrı dönemde gerçekleştirilmiştir. Kontrol bitkileriyle kıyaslandığında pazarlanabilir meyve verimi bakımından saksıya aktarım aşamasında mikoriza uygulanan bitki grubu % 6,9 artış gösterirken fide üretimi aşamasında mikoriza uygulanan bitki grubu % 11,9 artış sergilemiştir. Deneme grupları arasında gözlenen verim artışı ile bitki köklerinde mikorizal enfeksiyon oranları arasında pozitif bir korelasyon olduğu vurgulanmıştır (Franczuk vd., 2023).

Marihal vd. (2012) AMF ile inokülasyonun tarla koşullarında yetiştirilen biberin verimini artırdığını bildirmiştir. Benzer şekilde, Sharif ve Claassen (2011), bitkilerin AMF inokülasyonunun biberlerin meyve vermesini iyileştirdiğini bildirmiştir. Bu durum, toprak çözeltisindeki fosfor konsantrasyonundaki artış ve ekstraradikal hifler yoluyla kök sisteminin daha geniş bir emici yüzeye sahip olması ve bu elementin bitki bünyesine daha hızlı alınması ile açıklanmıştır. Buna ek olarak, erken mikorizasyonun kök sisteminin toprak patojenlerine karşı direncini artırdığı ve bitki sağlığını iyileştirerek bitkilerin

büyümesini ve verimini olumlu yönde etkilediği vurgulanmıştır (Jamiołkowska ve Michalek, 2019).

4.3 Biber Bitkilerinin Toprak Üstü Aksamlarının Element İçerikleri

Tüm bitkiler, hem vejetatif hem de üreme dokularının başarılı bir şekilde büyümesini ve gelişmesini sağlamak için çevrelerinden bir dizi inorganik element almalıdır. Bu mineraller makromoleküllerde yapısal bileşenler olarak, enzimatik reaksiyonlarda kofaktörler olarak, uygun su potansiyelini korumak için gerekli ozmotik çözeltiler olarak veya hücre sel yapılar da yük dengesini sağlamak için iyonize türler olarak çok sayıda işleve sahiptirler. Mineraller, bitki büyümesi için gereken göreceli miktarlara göre iki sınıfa ayrılabilir. Makro besinler arasında azot (N), potasyum (K), kalsiyum (Ca), magnezyum (Mg), fosfor (P) ve kükürt (S) bulunur. Demir (Fe), çinko (Zn), mangan ez (Mn), bakır (Cu), bor (B), klor (Cl), molibden (Mo), nikel (Ni), kobalt (Co), sodyum (Na), silikon (Si), selenyum (Se), iyot (I) ve vanadyum (V) dahil olmak üzere bilinen mikro besinlerin çoğu bitki türü için gerekli veya faydalı olduğu gösterilmiştir (Grusak, 2001).

F. mosseae ve *R. intraradices* mantarları ile inokule edilerek geliştirilen *C. annuum* bitkilerinin yetiştirildikleri ortamda bulunan makro ve mikro besin elementleri alımı bakımından deney grupları ve kontrol grubu arasında bir farklılığın oluşup oluşmadığını belirlemek amacıyla bitkilerin toprak üstü aksamları XRF ve Kjeldahl yöntemleri ile analiz edilmiştir. Bitki makro besin elementleri ile ilgili elde edilen bulgular Çizelge 4.3'te ve mikro besin elementleri ile ilgili elde edilen bulgular Çizelge 4.4'te verilmiştir.

Buna göre potasyum (K) içeriği bakımından enyüksek değer $11,629 \pm 0,518$ ile *F. mosseae* bitkilerinin %50 sulama uygulanan grubunda tespit edilirken en düşük değer $4,013 \pm 0,186$ ile Kontrol bitkilerinin %50 sulama uygulanan grubunda bulunmuştur. *F. mosseae* bitkilerinin %25, 75 ve tam sulama uygulanan gruplarında K miktarları sırasıyla $8,161 \pm 0,403$; $11,385 \pm 0,244$ ve $9,405 \pm 0,130$ olarak tespit edilmiştir. *F. mosseae* bitkilerinin %50 ve 75 sulama uygulanan grupları arasında K içeriği bakımından $p < 0,05$ düzeyinde anlamlı bir fark oluşmazken %25 ve tam sulama grupları ile aralarında istatistiki açıdan anlamlı bir fark oluştuğu gözlenmiştir. *R. intraradices* bitkilerinin %25, 50, 75 ve tam sulama uygulanan gruplarında K içerikleri sırasıyla $7,092 \pm 0,232$; $11,287 \pm 0,192$; $9,305 \pm 0,577$ ve $8,361 \pm 0,169$ olarak belirlenmiştir. Her dört sulama grubu

için *R. intraradices* bitkilerinin K içerikleri arasında $p<0,05$ düzeyinde anlamlı bir fark olduğu tespit edilmiştir. Kontrol bitkilerinin %75 ve tam sulama uygulanan gruplarında K içerikleri sırasıyla $4,797\pm0,149$ ve $7,854\pm0,768$ olarak bulunmuştur. Her üç sulama grubu için Kontrol bitkilerinin K içerikleri arasında $p<0,05$ düzeyinde anlamlı bir fark olduğu tespit edilmiştir.

Potasyum, toprak çözeltilerinde çözünebilen K^+ olarak emilir. Sitoplazmada en bol bulunan katyondur ve metabolize edilmediği için K^+ ve beraberindeki anyonlar hücrelerin ozmotik potansiyeline önemli ölçüde katkıda bulunur. Sitokinin uygulamalarının ayçiçeği yaprakları ve kotiledon hücrelerinde K^+ ve Na^+ seçiciliğini değiştirdiğini bildirmiştir. Bu nedenle potasyum, bitki su ilişkileri süreçlerinde işlev görür ve turgorun düzenlenmesi yoluyla hücre uzamasını ve büyümesini, stomaların açılıp kapanmasının kontrolü yoluyla yaprak gaz değişimini ve basınca dayalı floem translokasyonu yoluyla uzun mesafeli besin akışını etkiler. Potasyumu daha etkili bir şekilde alan ve/veya kullanan mahsullerin ıslah edilmesinin tarımda pahalı K gübrelerinin kullanımını azaltabileceği öne sürülmüştür. Potasyum iyonu ayrıca membranlar boyunca elektrokimyasal gradyanın oluşturulmasına yardımcı olur ve böylece çok sayıda kimyasal türün membran taşınmasına katkıda bulunur (Samota vd., 2017).

Kalsiyum (Ca) içeriği bakımından en yüksek eğer $5,245\pm0,306$ ile *R. intraradices* bitkilerinin %50 sulama uygulanan grubunda tespit edilirken en düşük Ca içeriği $1,964\pm0,058$ ile Kontrol bitkilerinin %50 sulama uygulanan grubunda bulunmuştur. *R. intraradices* bitkilerinin %25, 75 ve tam sulama uygulanan gruplarında Ca miktarları sırasıyla $4,220\pm0,204$; $4,876\pm0,240$ ve $4,444\pm0,357$ olarak tespit edilmiştir. Her dört sulama grubu için *R. intraradices* bitkilerinin Ca içerikleri arasında $p<0,05$ düzeyinde anlamlı bir fark olduğu tespit edilmiştir.

F. mosseae bitkilerinin %25, 50, 75 ve tam sulama uygulanan gruplarında Ca içerikleri sırasıyla $2,919\pm0,234$; $4,707\pm0,803$; $3,446\pm0,321$ ve $3,326\pm0,277$ olarak belirlenmiştir. *F. mosseae* bitkilerinin %75 ve tam sulama uygulanan grupları arasında Ca içeriği bakımından $p<0.05$ düzeyinde anlamlı bir fark oluşmazken %25 ve 50 sulama grupları ile aralarında istatistiki açıdan anlamlı bir fark olduğu gözlenmiştir. Kontrol bitkilerinin %75 ve tam sulama uygulanan gruplarında Ca içerikleri sırasıyla $2,480\pm0,163$ ve $2,483\pm0,344$ olarak bulunmuştur. Kontrol bitkilerinin %75 ve tam sulama uygulanan

grupları arasında Ca içeriği bakımından $p<0,05$ düzeyinde anlamlı bir fark oluşmazken %50 sulama uygulanan grup ile aralarında istatistiki açıdan anlamlı bir fark olduğu gözlenmiştir.

Kalsiyumun başlıca işlevleri, koordinat bağları oluşturma kapasitesi ve özellikle hücre duvarında ve membranların yüzeyinde kararlı ancak tersine çevrilebilir molekül içi ve moleküller arası bağlantılar kurma yeteneği ile ilgilidir. Kalsiyum topraktan bol miktarda bulunan Ca^{2+} katyonu olarak kolayca emilir, ancak sitoplazmadaki serbest iyon konsantrasyonu vakuollerde tutularak, kalsiyum bağlayıcı proteinlerle kompleks oluşturarak veya kalsiyum oksalat kristalleri olarak kimyasal çökeltme yoluyla düşük tutulur. Kalsiyum, hücre içi havuzlardan salınımı, hedef molekülleri daha sonra birçok hücresel işlevi düzenleyen çeşitli protein kinazları, fosfatazları veya fosfolipazları aktive ettiğinden, sinyal iletim yollarını içeren uyaran yanıt bağlantısında önemli bir rol oynar (Bush, 1995).

Fosfor (P) içeriği bakımından en yüksek eğer $2,562\pm0,275$ ile *R. intraradices* bitkilerinin %75 sulama uygulanan grubunda tespit edilirken en düşük P içeriği $1,325\pm0,079$ ile Kontrol bitkilerinin %50 sulama uygulanan grubunda bulunmuştur. *R. intraradices* bitkilerinin %25, 50 ve tam sulama uygulanan gruplarında P miktarları sırasıyla $1,412\pm0,142$; $2,396\pm0,031$ ve $1,660\pm0,017$ olarak tespit edilmiştir. Her dört sulama grubu için *R. intraradices* bitkilerinin P içerikleri arasında $p<0,05$ düzeyinde anlamlı bir fark olduğu tespit edilmiştir.

F. mosseae bitkilerinin %25, 50, 75 ve tam sulama uygulanan gruplarında P içerikleri sırasıyla $1,861\pm0,109$; $2,295\pm0,111$; $2,075\pm0,147$ ve $1,718\pm0,215$ olarak belirlenmiştir. Her dört sulama grubu için *F. mosseae* bitkilerinin P içerikleri arasında $p<0,05$ düzeyinde anlamlı bir fark olduğu tespit edilmiştir. Kontrol bitkilerinin %75 ve tam sulama uygulanan gruplarında P içerikleri sırasıyla $1,372\pm0,059$ ve $1,553\pm0,092$ olarak bulunmuştur. Kontrol bitkilerinin %50 ve 75 sulama uygulanan grupları arasında P içeriği bakımından $p<0,05$ düzeyinde anlamlı bir fark oluşmazken tam sulama uygulanan grup ile aralarında istatistiki açıdan anlamlı bir fark olduğu gözlenmiştir.

Fosfor, ATP'deki pirofosfat bağı yoluyla enerji transferinde önemli bir role sahiptir ve fosfat gruplarının birçok farklı şekere bağlanması fotosentez ve solunumda metabolik

enerji sağlar. Fosfor, bitkiler tarafından büyük ölçüde birincil veya ikincil ortofosfat anyonları, H_2PO_4 ve HPO_4 , olarak emilir. Bitki kökleri P'yi fosfat olarak alır. Fosfat toprak çözeltisinde son derece düşük konsantrasyonlarda bulunduğundan, bitki kökleri bu element için kaynak aramak zorundadır (White ve Hammond, 2008).

Mikorizal mantarlar ile inoküle edilen biber bitkilerinin sürgünlerinde artan fosfor ve çinko seviyeleri Ortas vd. (2011) tarafından da gözlemlenmiştir. Düşük fosfor seviyelerine sahip topraklarda, ekstraradikal hifler kök yüzeyine göre emilimde daha etkilidir. Pereira vd. (2016) ile Sharif ve Claassen (2011) düşük fosfor içeriğine sahip topraklarda, AMF ile bitki aşılmasının karbonhidrat üretimini artırdığını ve bunun da artan fosfor emilimiyle ilişkili olduğunu gözlemlemiştir. Fosforun yüksek konsantrasyonları (stresiz koşullarda) kök fungal kolonizasyonunu engelleyebilirken, düşük konsantrasyonları (stres koşulları) bunu teşvik eder. (Sensoy vd., 2007), AMF'nin biber fosfor içeriği üzerinde önemli bir etkisi olmadığını tespit etmiştir, ancak yazarlar bunun nedeninin substrattaki uygun fosfor seviyesi olduğunu düşünmektedir. Fosfor alımı doğrudan bitki büyümesiyle ilişkilidir ve toprakta yeterli konsantrasyon seviyesine ulaştığında, yani bitki beslenme stresi altında olmadığında, mikorizal mantar kolonizasyonu otoregülasyonlu simbiyoz mekanizmaları tarafından engellenir, bu da mikorizal mantarları gereksiz ve stres koşullarıyla uyumsuz hale getirir. Allen ve Shachar-Hill (2009), mikorizal mantar kullanımının sadece fosforun değil aynı zamanda potasyum, kükürt, magnezyum, bakır, çinko ve demirin de bitki tarafından alımını artırdığını bulmuştur. Mevcut araştırmalar, mikorizal mantarların bitkilerde mikro element birikimi üzerinde faydalı bir etkisi olduğunu ortaya koymaktadır. Caris vd. (1998) tarafından yapılan çalışmalar demir alımı üzerindeki fungal etkiyi doğrulamıştır. Manganez (%59), bakır (%98) ve çinko (%87) mikro besinlerinin emilimindeki artış, mikorizal mantarlar ile inoküle edilmiş *Capsicum* spp. üzerinde çalışmalar yapan Castillo vd. (2009) tarafından da gözlemlenmiştir.

Magnezyum (Mg) içeriği bakımından en yüksek değer $0,963 \pm 0,119$ ile *F. mosseae* bitkilerinin %50 sulama uygulanan grubunda tespit edilirken en düşük değer $0,503 \pm 0,051$ ile Kontrol bitkilerinin %50 sulama uygulanan grubunda bulunmuştur. *F. mosseae* bitkilerinin %25, 75 ve tam sulama uygulanan gruplarında Mg miktarları sırasıyla $0,769 \pm 0,023$; $0,771 \pm 0,038$ ve $0,815 \pm 0,008$ olarak tespit edilmiştir. *F. mosseae* bitkilerinin %25 ve 75 sulama uygulanan grupları arasında Mg içeriği bakımından $p < 0,05$

düzeyinde anlamlı bir fark oluşmazken %50 ve tam sulama grupları ile aralarında istatistiki açıdan anlamlı bir fark olduğu gözlenmiştir.

R. intraradices bitkilerinin %25, 50, 75 ve tam sulama uygulanan gruplarında Mg içerikleri sırasıyla $0,874 \pm 0,017$; $0,756 \pm 0,014$; $0,917 \pm 0,100$ ve $0,709 \pm 0,040$ olarak belirlenmiştir. Her dört sulama grubu için *R. intraradices* bitkilerinin Mg içerikleri arasında $p < 0,05$ düzeyinde anlamlı bir fark olduğu tespit edilmiştir. Kontrol bitkilerinin %75 ve tam sulama uygulanan gruplarında Mg içerikleri sırasıyla $0,574 \pm 0,043$ ve $0,551 \pm 0,046$ olarak bulunmuştur. Her üç sulama grubu için Kontrol bitkilerinin Mg içerikleri arasında $p < 0,05$ düzeyinde anlamlı bir fark oluşmadığı tespit edilmiştir.

Magnezyum, yüksek oranda çözünebilen iki değerlikli katyon Mg^{2+} olarak emilir ve bitkilerdeki işlevleri, iyonik bağlanma yoluyla çeşitli ligandlarla etkileşime girme kapasitesi ile ilgilidir. Fosfatazlar, adenzin trifosfatazlar (ATPazlar) ve karboksilazlar dahil olmak üzere çok sayıda enzim ve enzim reaksiyonu magnezyum gerektirir veya magnezyum tarafından güçlü bir şekilde desteklenir. Adenzin trifosfat (ATP) sentezi magnezyum için mutlak bir gereksinime sahiptir ve Mg^{2+} protein sentezinde önemli bir işlev görür, çünkü ribozom alt birimlerinin toplanması için bir köprü elemanı olarak hizmet eder. Ayrıca magnezyumun yeşil dokulardaki en önemli işlevi, klorofil molekülünün porfirin yapısındaki merkezi atom olarak oynadığı roldür.

Azot (N) içeriği bakımından en yüksek değer $1,860 \pm 0,055$ ile *R. intraradices* bitkilerinin %50 sulama uygulanan grubunda tespit edilirken en düşük N içeriği $0,587 \pm 0,021$ ile Kontrol bitkilerinin %50 sulama uygulanan grubunda bulunmuştur. *R. intraradices* bitkilerinin %25, 75 ve tam sulama uygulanan gruplarında N içerikleri sırasıyla $1,507 \pm 0,020$; $1,570 \pm 0,030$ ve $1,630 \pm 0,045$ olarak tespit edilmiştir. Her dört sulama grubu için *R. intraradices* bitkilerinin N içerikleri arasında $p < 0,05$ düzeyinde anlamlı bir fark olduğu tespit edilmiştir. *F. mosseae* bitkilerinin %25, 50, 75 ve tam sulama uygulanan gruplarında N içerikleri sırasıyla $1,410 \pm 0,010$; $1,780 \pm 0,040$; $1,580 \pm 0,015$ ve $1,470 \pm 0,035$ olarak belirlenmiştir. Her dört sulama grubu için *F. mosseae* bitkilerinin N içerikleri arasında $p < 0,05$ düzeyinde anlamlı bir fark olduğu tespit edilmiştir. Kontrol bitkilerinin %75 ve tam sulama uygulanan gruplarında P içerikleri sırasıyla $0,623 \pm 0,016$ ve $0,710 \pm 0,025$ olarak bulunmuştur. Kontrol bitkilerinin %50 ve 75 sulama uygulanan grupları arasında N içeriği bakımından $p < 0,05$ düzeyinde anlamlı

bir fark oluşmazken tam sulama uygulanan grup ile aralarında istatistiki açıdan anlamlı bir fark oluştuğu gözlenmiştir.

Tüm amino asitlerin ve proteinlerin bir bileşeni olarak azot, hücrel metabolizmada merkezi bir rol oynar. Ayrıca, nükleotidlerin ve nükleik asitlerin (deoksiribonükleik asit (DNA) ve ribonükleik asit (RNA)) bir bileşeni olarak azot, genetik bilginin transkripsiyonu, translasyonu ve replikasyonu için kritik öneme sahiptir. Azot toprak ortamından ya amonyum (NH_4^+) ya da nitrat (NO_3) iyonları olarak elde edilir. Nitrat organik moleküllere katılmadan önce bitki içinde kimyasal olarak amonyuma indirgenir. Diğer azotlu bileşikler arasında amino asitlerden türetilen çeşitli ikincil metabolitler bulunur; bunlar arasında osmoregülasyonda, stres tepkilerinde (örneğin bitki hormonları) veya metal şelasyonunda kullanılan düşük bağl moleküler kütleli bileşikler yer alır. Azot ayrıca klorofilin önemli bir yapısal bileşenidir.

Toplam P, Ca^{2+} , N, Mg^{2+} ve K^+ konsantrasyonları, AMF ile muamele edilen *Cucumis sativus* bitkilerinde, tuz stresi koşulları altında kontrol grubu bitkilerine kıyasla daha yüksek bulunmuştur (Hashem vd., 2018). *Capsicum annuum*'a mikoriza inokülasyonu, tuzlu koşullar altında daha düşük Na^+ taşınımı ile birlikte artan klorofil içeriği ve Mg^{2+} ve N alımına neden olmuştur (Çekiç vd., 2012). Buna ek olarak, Santander vd. (2019) marulda, mikorizal bitkilerin stres koşulları altında mikorizal olmayan bitkilere göre daha yüksek biyokütle üretimine, N alımında artışa ve iyonik ilişkilerde, özellikle Na^+ birikiminde azalma gibi belirgin değişikliklere sebep olduğunu göstermiştir.

Kükürt (S) içeriği bakımından en yüksek değer $8513,33 \pm 355,01$ ppm ile *R. intraradices* bitkilerinin %50 sulama uygulanan grubunda tespit edilirken en düşük S içeriği $1128,33 \pm 257,50$ ppm ile Kontrol bitkilerinin %75 sulama uygulanan grubunda bulunmuştur. *R. intraradices* bitkilerinin %25, 75 ve tam sulama uygulanan gruplarında S içerikleri sırasıyla $3960,00 \pm 432,09$; $5310,00 \pm 285,83$ ve $2813,33 \pm 245,83$ ppm olarak tespit edilmiştir. Her dört sulama grubu için *R. intraradices* bitkilerinin S içerikleri arasında $p < 0,05$ düzeyinde anlamlı bir fark oluştuğu tespit edilmiştir.

F. mosseae bitkilerinin %25, 50, 75 ve tam sulama uygulanan gruplarında S içerikleri sırasıyla $1156,67 \pm 160,42$; $4993,33 \pm 537,25$; $3963,33 \pm 593,66$ ve $2790,00 \pm 205,18$ ppm

olarak belirlenmiştir. Her dört sulama grubu için *F. mosseae* bitkilerinin S içerikleri arasında $p<0,05$ düzeyinde anlamlı bir fark olduğu tespit edilmiştir.

Kontrol bitkilerinin %50 ve tam sulama uygulanan gruplarında S içerikleri sırasıyla $1141,67\pm120,66$ ve $2996,67\pm315,33$ ppm olarak bulunmuştur. Kontrol bitkilerinin %50 ve 75 sulama uygulanan grupları arasında S içeriği bakımından $p<0,05$ düzeyinde anlamlı bir fark oluşmazken tam sulama uygulanan grup ile aralarında istatistiki açıdan anlamlı bir fark olduğu gözlenmiştir.

Her ne kadar atmosferik kükürt dioksit SO_2 , bitkilerin toprak üstü kısımları tarafından alınıp kullanılabilse de, kükürt çoğu bitki kökleri tarafından iki değerlikli sülfat anyonu $(SO_4)^{2-}$ olarak emilir. Kükürtün organik bileşiklere dahil edilebilmesi için sülfat indirgenmesi gerekir. Kükürt, sistein ve metionin amino asitlerinin bir bileşenidir ve dolayısıyla proteinlerin yanı sıra, kükürt içeren çeşitli koenzimlerin ve bu amino asitlerden türetilen ikincil bitki ürünlerinin de bir bileşenidir. Kükürt grupları geri dönüşümlü olarak oksitlenebildiğinden ve indirgenebildiğinden, -S-S- köprülerinin oluşumu yoluyla protein stabilitesi sağlarlar ve indirgeme-oksidasyon (redoks) veya asit-baz reaksiyonlarını düzenleyen enzimlerde merkezi rol oynarlar. Önemli kükürt bileşikleri, oksijen radikallerinin detoksifikasyonunda rol oynayan tripeptit glutatyon; ağır metal detoksifikasyonunda rol oynayan fitoşelatinler ve metalotiyoneinler; ve redoks kimyasında yer alan tioredoksin ve ferrodoksin proteinleridir.

Çizelge 4.3. *F. mosseae* ve *R. intraradices* mikorizal mantarları ile inokule edilen biber bitkilerinin toprak üstü aksamalarının makro element içerikleri

Mikoriza	Sulama	K	Ca	P	Mg	N	S	LOI
Kontrol	25	-	-	-	-	-	-	-
	50	4,013±0,186a	1,964±0,058a	1,325±0,079a	0,503±0,051a	0,587±0,021a	1141,67±120,66a	81,52±0,47ab
	75	4797±0,149b	2,480±0,163ab	1,372±0,059a	0,574±0,043a	0,623±0,016a	1128,33±257,50a	82,57±1,29bc
	100	7,854±0,768d	2,483±0,344ab	1,553±0,092ab	0,551±0,046a	0,710±0,025b	2996,67±315,33b	85,67±0,58d
<i>F. mosseae</i>	25	8,161±0,403d	2,919±0,234bc	1,861±0,109cd	0,769±0,023bc	1,410±0,010c	1156,67±160,42a	81,47±1,22ab
	50	11,629±0,518f	4,707±0,803def	2,295±0,111ef	0,963±0,119e	1,780±0,040g	4993,33±537,25d	85,49±1,93d
	75	11,385±0,244f	3,446±0,321c	2,075±0,147de	0,771±0,038bc	1,580±0,015ef	3963,33±593,66c	84,17±0,06cd
	100	9,405±0,130e	3,326±0,277c	1,718±0,215bc	0,815±0,008cd	1,470±0,035d	2790,00±205,18b	85,83±0,68d
<i>R. intraradices</i>	25	7,092±0,232c	4,220±0,204d	1,412±0,142a	0,874±0,017de	1,507±0,020d	3960,00±432,09c	83,17±0,90bc
	50	11,287±0,192f	5,245±0,306f	2,396±0,031fg	0,756±0,014bc	1,860±0,055h	8513,33±355,01e	80,53±1,22a
	75	9,305±0,577e	4,876±0,240ef	2,562±0,275g	0,917±0,100e	1,570±0,030e	5310,00±285,83d	81,75±0,01ab
	100	8,361±0,169d	4,444±0,357de	1,660±0,017bc	0,709±0,040b	1,630±0,045f	2813,33±245,83b	87,77±1,57e

*Sulama (%), K, Ca, P, Mg ve N (%); S (ppm); LOI: Ateşte kayıp (Loss On Ignition) (%)**Tüm değerler en az üç bağımsız ölçümün ortalaması ve standart sapması olarak sunulmuştur. ***Aynı sütun içerisinde farklı harflerle gösterilen değerler arasında p<0.05 anlamlılık düzeyinde bir fark mevcuttur.

Çizelge 4.4. *F. mosseae* ve *R. intraradices* mikorizal mantarları ile inokule edilen biber bitkilerinin toprak üstü aksamlarının mikro element içerikleri

Mikoriza	Sulama	Na	Fe	Mn	Zn
Kontrol	25	-	-	-	-
	50	93,33±20,82abc	42,67±7,51ab	66,67±10,41a	16,00±2,00a
	75	125,00±35,00cd	63,33±7,64ab	70,00±10,00a	33,00±5,00ab
	100	163,33±40,41d	96,67±25,17b	90,00±10,00a	50,00±10,00ab
<i>F. mosseae</i>	25	53,33±15,28a	90,00±10,00b	140,00±50,00cd	60,00±10,00ab
	50	73,33±15,28ab	230,00±121,24c	143,33±5,77cd	156,67±81,45c
	75	103,33±7,64bc	100,00±20,00b	96,67±15,28ab	50,00±0,00ab
	100	66,67±32,15ab	56,67±15,28ab	73,33±5,77a	43,33±5,77ab
<i>R. intraradices</i>	25	46,67±11,55a	180,00±60,00c	156,67±15,28d	66,67±15,28bc
	50	160,00±52,92d	326,67±20,82d	136,67±15,28cd	66,67±5,77bc
	75	60,00±5,00ab	93,33±15,28b	123,33±11,55bc	60,00±17,32ab
	100	87,00±19,52abc	60,00±10,00ab	70,00±10,00a	56,67±11,55ab

*Sulama (%), Na, Fe, Mn, Zn (ppm) **Tüm değerler en az üç bağımsız ölçümün ortalaması ve standart sapması olarak sunulmuştur. ***Aynı sütun içerisinde farklı harflerle gösterilen değerler arasında p<0.05 anlamlılık düzeyinde bir fark mevcuttur.

Sodyum (Na) içeriği bakımından en yüksek değer 163,33±40,41 ppm ile Kontrol bitkilerinin tam sulama uygulanan grubunda tespit edilirken en düşük Na içeriği 46,67±11,55 ppm ile *R. intraradices* bitkilerinin %25 sulama uygulanan grubunda bulunmuştur. Kontrol bitkilerinin %50 ve 75 sulama uygulanan gruplarında Na içerikleri sırasıyla 93,33±20,82 ve 125,00±35,00 ppm olarak tespit edilmiştir.

F. mosseae bitkilerinin %25, 50, 75 ve tam sulama uygulanan gruplarında Na içerikleri sırasıyla 53,33±15,28; 73,33±15,28; 103,33±7,64 ve 66,67±32,15 ppm olarak belirlenmiştir. *F. mosseae* bitkilerinin %50 ve tam sulama uygulanan grupları arasında Na içeriği bakımından $p<0,05$ düzeyinde anlamlı bir fark oluşmazken %25 ve 75 sulama uygulanan gruplar ile aralarında istatistiki açıdan anlamlı bir fark oluştuğu gözlenmiştir. *R. intraradices* bitkilerinin %50, 75 ve tam sulama uygulanan gruplarında Na içerikleri sırasıyla 160,00±52,92; 60,00±5,00 ve 87,00±19,52 ppm olarak belirlenmiştir. Her dört sulama grubu için *R. intraradices* bitkilerinin Na içerikleri arasında $p<0,05$ düzeyinde anlamlı bir fark oluştuğu tespit edilmiştir.

Demir (Fe) içeriği bakımından en yüksek değer 326,67±20,82 ppm ile *R. intraradices* bitkilerinin %50 sulama uygulanan grubunda tespit edilirken en düşük Fe içeriği 42,67±7,51 ppm ile Kontrol bitkilerinin %50 sulama uygulanan grubunda bulunmuştur. *R. intraradices* bitkilerinin %25, 75 ve tam sulama uygulanan gruplarında Fe içerikleri sırasıyla 180,00±60,00; 93,33±15,28 ve 60,00±10,00 ppm olarak tespit edilmiştir. *R. intraradices* bitkilerinin %75 ve tam sulama uygulanan grupları arasında Fe içeriği bakımından $p<0,05$ düzeyinde anlamlı bir fark oluşmazken %25 ve 50 sulama uygulanan gruplar ile aralarında istatistiki açıdan anlamlı bir fark oluştuğu gözlenmiştir.

F. mosseae bitkilerinin %25, 50, 75 ve tam sulama uygulanan gruplarında Fe içerikleri sırasıyla 90,00±10,00; 230,00±121,24; 100,00±20,00 ve 56,67±15,28 ppm olarak belirlenmiştir. *F. mosseae* bitkilerinin %25 ve 75 sulama uygulanan grupları arasında Fe içeriği bakımından $p<0,05$ düzeyinde anlamlı bir fark oluşmazken %50 ve tam sulama uygulanan gruplar ile aralarında istatistiki açıdan anlamlı bir fark oluştuğu gözlenmiştir.

Kontrol bitkilerinin %75 ve tam sulama uygulanan gruplarında Fe içerikleri sırasıyla 63,33±7,64 ve 96,67±25,17 ppm olarak bulunmuştur. Kontrol bitkilerinin %50 ve 75 sulama uygulanan grupları arasında Fe içeriği bakımından $p<0,05$ düzeyinde anlamlı bir

fark oluşmazken tam sulama uygulanan grup ile aralarında istatistiki açıdan anlamlı bir fark olduğu gözlenmiştir.

Demir, oksidasyon durumunu Fe^{3+} 'ten Fe^{2+} 'ye kolayca değiştirebilmesi ve çeşitli ligandlarla oktahedral kompleksler oluşturmadaki etkinliği ile karakterize edilen bir geçiş metalidir. Proteinlere dahil edildiğinde, bu özellikler kontrollü tersinir redoks reaksiyonlarına izin verir. Demir elementi, demir porfirin kompleksleri içeren sitokromlar, peroksidazlar ve katalazlar gibi hem proteinlerinde; ferrodoksin, akonitaz ve süperoksit dismutaz gibi demir-sülfür proteinlerinde ve lipoksijenaz gibi diğer demir içeren enzimlerde bulunur. Demir ayrıca klorofilin biyosentezindeki çeşitli reaksiyon adımları için de gereklidir. Demir toprakta ağırlıklı olarak ferrik iyon Fe^{3+} olarak bulunur, ancak demirin üç veya iki değerlikli formları için farklı türlerde emilim mekanizmaları mevcuttur.

Díaz Franco vd. (2013), biber sürgünlerinde azot, fosfor, demir ve çinko seviyelerinin arttığını ve meyve kalitesinin iyileştiğini bildirmiştir. Buna göre, mikorizal inokülasyonun meyve kalitesi üzerindeki etkisi, bitkilerin daha iyi beslenme durumuyla yakından ilişkili olabilir. Majkowska-Gadomska vd. (2016) göre, *Glomus* cinsi mantarlar, kontrol uygulamasına kıyasla domates meyvesinin demir ve manganez içeriğini artırmıştır.

Mangan (Mn) içeriği bakımından en yüksek değer $156,67 \pm 15,28$ ppm ile *R. intraradices* bitkilerinin %25 sulama uygulanan grubunda tespit edilirken en düşük Mn içeriği $66,67 \pm 10,41$ ppm ile Kontrol bitkilerinin %50 sulama uygulanan grubunda bulunmuştur. *R. intraradices* bitkilerinin %50, 75 ve tam sulama uygulanan gruplarında Mn içerikleri sırasıyla $136,67 \pm 15,28$; $123,33 \pm 11,55$ ve $70,00 \pm 10,00$ ppm olarak tespit edilmiştir. Her dört sulama grubu için *R. intraradices* bitkilerinin Mn içerikleri arasında $p < 0,05$ düzeyinde anlamlı bir fark olduğu tespit edilmiştir.

F. mosseae bitkilerinin %25, 50, 75 ve tam sulama uygulanan gruplarında Mn içerikleri sırasıyla $140,00 \pm 50,00$; $143,33 \pm 5,77$; $96,67 \pm 15,28$ ve $73,33 \pm 5,77$ ppm olarak belirlenmiştir. *F. mosseae* bitkilerinin %25 ve 50 sulama uygulanan grupları arasında Mn içeriği bakımından $p < 0,05$ düzeyinde anlamlı bir fark oluşmazken %75 ve tam sulama uygulanan gruplar ile aralarında istatistiki açıdan anlamlı bir fark olduğu gözlenmiştir.

Kontrol bitkilerinin %75 ve tam sulama uygulanan gruplarında Mn içerikleri sırasıyla $70,00 \pm 10,00$ ve $90,00 \pm 10,00$ ppm olarak bulunmuştur. Her üç sulama grubu için Kontrol bitkilerinin Mn içerikleri arasında $p < 0,05$ düzeyinde anlamlı bir fark oluşmadığı tespit edilmiştir.

Topraktaki baskın mangan kaynağı Mn^{2+} 'dir, ancak mangan biyolojik sistemlerde ii, iii ve iv oksidasyon durumlarında bulunabilir. $Mn(ii)$ kolayca $Mn(iv)$ 'ye oksitlenebildiğinden, mangan redoks reaksiyonlarında önemli bir rol oynar. Süperoksit dismutaz ve fotosistem II ile ilişkili su ayrıştırıcı protein kompleksinin yapısına dahil olması, manganın öne çıkan özelliklerindendir. Mangan, oksidasyon-redüksiyon, dekarboksilasyon ve hidrolitik reaksiyonların katalizinde yer alan çok sayıda enzimi aktive eden bir kofaktör olarak da hizmet eder.

Çinko (Zn) içeriği bakımından en yüksek değer $156,67 \pm 81,45$ ppm ile *F. mosseae* bitkilerinin %50 sulama uygulanan grubunda tespit edilirken en düşük değer $16,00 \pm 2,00$ ile Kontrol bitkilerinin %50 sulama uygulanan grubunda bulunmuştur. *F. mosseae* bitkilerinin %25, 75 ve tam sulama uygulanan gruplarında Zn miktarları sırasıyla $60,00 \pm 10,00$; $50,00 \pm 0,00$ ve $43,33 \pm 5,77$ ppm olarak tespit edilmiştir. *F. mosseae* bitkilerinin %25, 75 ve tam sulama uygulanan grupları arasında Zn içeriği bakımından $p < 0,05$ düzeyinde anlamlı bir fark oluşmazken %50 sulama grubu ile aralarında istatistiki açıdan anlamlı bir fark olduğu gözlenmiştir.

R. intraradices bitkilerinin %25, 50, 75 ve tam sulama uygulanan gruplarında Zn içerikleri sırasıyla $66,67 \pm 15,28$; $66,67 \pm 5,77$; $60,00 \pm 17,32$ ve $56,67 \pm 11,55$ ppm olarak belirlenmiştir. *F. mosseae* bitkilerinin %25 ve 50 sulama uygulanan grupları arasında ve %75 ve tam sulama uygulanan gruplar arasında Zn içeriği bakımından $p < 0,05$ düzeyinde anlamlı bir fark oluşmazken %25 ve 50 ile %75 ve tam sulama uygulanan grupların aralarında istatistiki açıdan anlamlı bir fark olduğu gözlenmiştir.

Çinko ağırlıklı olarak iki değerlikli katyon Zn^{2+} olarak alınır ve makromoleküllerle kompleks oluşturduğunda yalnızca $Zn(ii)$ oksidasyon durumunda bulunur. Çinkonun metabolik işlevleri, N-, O- ve S-ligandları ile tetrahedral kompleksler oluşturma yeteneğine dayanır (Vallee ve Auld, 1990) ve böylece hem proteinlerin üçüncül yapısını

hem de enzim katalitik aktivitesini etkiler. Çinko içeren önemli enzimler alkol dehidrojenaz, karbonik anhidraz, süperoksit dismutaz ve RNA polimerazdır.

4.4 Mikorizal Mantarların Biber Bitkisinde Biyokimyasal Özellikler Üzerine Etkileri

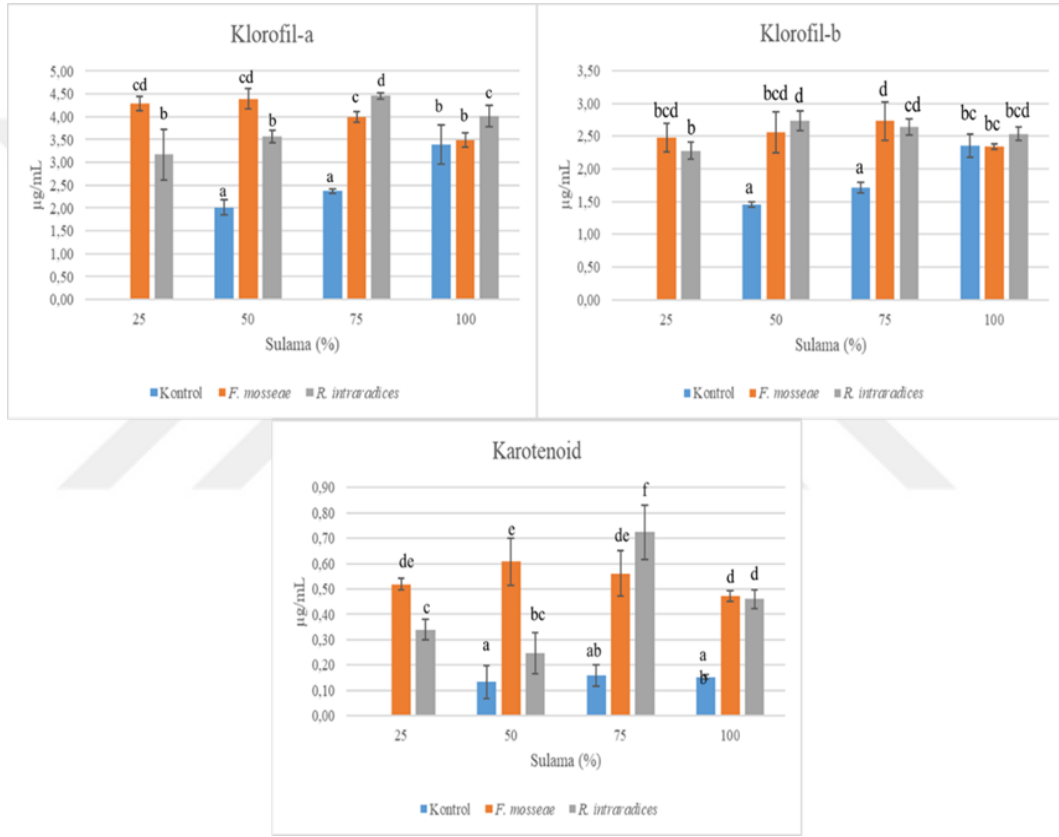
4.4.1 Biber bitkilerinin fotosentetik pigment içeriği

F. mosseae ve *R. intraradices* mantarları ile inokule edilerek geliştirilen *C. annuum* bitkilerinden alınan yaprak numunelerinin fotosentetik pigment içeriklerinin belirlenmesi sonucu elde edilen veriler Şekil 4.2’de sunulmuştur.

Buna göre en yüksek klorofil-a pigment içeriği *R. intraradices* bitkilerinin %75 sulama uygulanan grubunda $4,46 \pm 0,07$ $\mu\text{g/mL}$ olarak tespit edilirken en düşük klorofil-a içeriği Kontrol bitkilerinin %50 sulama uygulanan grubunda $2,02 \pm 0,17$ $\mu\text{g/mL}$ olarak bulunmuştur. *R. intraradices* bitkilerinin %25, 50 ve tam sulama uygulanan gruplarında klorofil-a içeriği sırasıyla $3,17 \pm 0,55$; $3,56 \pm 0,14$ ve $4,01 \pm 0,24$ $\mu\text{g/mL}$ olarak bulunmuştur. *R. intraradices* bitkilerinin %25 ve 50 sulama uygulanan grupları arasında klorofil-a pigmenti içeriği bakımından $p < 0,05$ düzeyinde anlamlı bir fark oluşmazken %75 ve tam sulama uygulanan gruplar ile aralarında istatistiki açıdan anlamlı bir fark olduğu gözlenmiştir.

F. mosseae bitkilerinin %25, 50, 75 ve tam sulama uygulanan gruplarında klorofil-a pigmenti içeriği sırasıyla $4,29 \pm 0,15$; $4,39 \pm 0,22$; $3,99 \pm 0,12$ ve $3,49 \pm 0,15$ $\mu\text{g/mL}$ olarak tespit edilmiştir. *F. mosseae* bitkilerinin %25 ve 50 sulama uygulanan grupları arasında klorofil-a pigmenti içeriği bakımından $p < 0,05$ düzeyinde anlamlı bir fark oluşmazken %75 ve tam sulama uygulanan gruplar ile aralarında istatistiki açıdan anlamlı bir fark olduğu gözlenmiştir. Kontrol bitkilerinin %75 ve tam sulama uygulanan gruplarında klorofil-a pigment içeriği sırasıyla $2,37 \pm 0,04$ ve $3,39 \pm 0,42$ $\mu\text{g/mL}$ olarak bulunmuştur. Kontrol bitkilerinin %50 ve 75 sulama uygulanan grupları arasında klorofil-a pigmenti içeriği bakımından $p < 0,05$ düzeyinde anlamlı bir fark oluşmazken tam sulama uygulanan grup ile aralarında istatistiki açıdan anlamlı bir fark olduğu gözlenmiştir.

Klorofil-b pigmenti açısından en yüksek değer *R. intraradices* bitkilerinin %50 sulama uygulanan grubunda $2,73 \pm 0,15$ ve *F. mosseae* bitkilerinin %75 sulama uygulanan grubunda $2,73 \pm 0,30$ $\mu\text{g/mL}$ olarak tespit edilirken en düşük klorofil-b pigment içeriği $1,45 \pm 0,04$ $\mu\text{g/mL}$ ile Kontrol bitkilerinin %50 sulama uygulanan grubunda belirlenmiştir. *R. intraradices* bitkilerinin %25, 75 ve tam sulama uygulanan gruplarında klorofil-b pigment içeriği sırasıyla $2,28 \pm 0,13$; $2,64 \pm 0,13$ ve $2,53 \pm 0,11$ $\mu\text{g/mL}$ olarak bulunmuştur. Dört sulama grubu için *R. intraradices* bitkilerinde belirlenen klorofil-b pigment içeriği değerleri arasında $p < 0,05$ düzeyinde anlamlı bir fark olduğu gözlenmiştir.



Şekil 4.2. *F. mosseae* ve *R. intraradices* mantarları ile inoküle edilen ve farklı oranlarda sulama uygulanan *C. annuum* bitkilerinin fotosentetik pigment içerikleri

F. mosseae bitkilerinin %25, 50 ve tam sulama uygulanan gruplarında klorofil-b pigmenti içerikleri sırasıyla $2,47 \pm 0,21$; $2,56 \pm 0,31$ ve $2,34 \pm 0,04$ $\mu\text{g/mL}$ olarak bulunmuştur. *F. mosseae* bitkileri için %25 ve 50 sulama uygulanan gruplarda klorofil-b pigmenti bakımından $p < 0,05$ düzeyinde anlamlı bir fark oluşmazken %75 ve tam sulama uygulanan gruplar ile aralarında istatistiki olarak anlamlı bir fark olduğu gözlenmiştir. Kontrol bitkilerinin %75 ve tam sulama uygulanan gruplarında klorofil-b içerikleri

sırasıyla $1,71\pm0,08$ ve $2,36\pm0,18$ $\mu\text{g/mL}$ olarak belirlenmiştir. Klorofil-b içeriği bakımından Kontrol bitkileri için %50 ve 75 sulama uygulanan gruplarda $p<0,05$ düzeyinde anlamlı bir fark oluşmazken tam sulama uygulanan grup ile aralarında istatistiki olarak anlamlı bir fark olduğu gözlenmiştir.

Toplam karotenoid içeriği açısından en yüksek değer $0,72\pm0,11$ $\mu\text{g/mL}$ ile *R. intraradices* bitkilerinin %75 sulama uygulanan grubunda görülürken en düşük değer $0,13\pm0,07$ $\mu\text{g/mL}$ ile Kontrol bitkilerinin %50 sulama uygulanan grubunda tespit edilmiştir. *R. intraradices* bitkileri için %25, 50 ve tam sulama uygulanan gruplarında toplam karotenoid içerikleri sırasıyla $0,34\pm0,04$; $0,25\pm0,08$ ve $0,46\pm0,04$ $\mu\text{g/mL}$ olarak bulunmuştur. Dört sulama grubu için *R. intraradices* bitkilerinde tespit edilen toplam karotenoid içerikleri arasında $p<0,05$ düzeyinde anlamlı bir fark olduğu gözlenmiştir.

F. mosseae bitkilerinde %25, 50, 75 ve tam sulama uygulanan gruplar için toplam karotenoid içerikleri sırasıyla $0,52\pm0,02$; $0,61\pm0,09$; $0,56\pm0,09$ ve $0,47\pm0,02$ $\mu\text{g/mL}$ olarak bulunmuştur. *F. mosseae* bitkileri için %25 ve 75 sulama uygulanan gruplarda toplam karotenoid içerikleri bakımından $p<0,05$ düzeyinde anlamlı bir fark oluşmazken %50 ve tam sulama uygulanan gruplar ile aralarında istatistiki açıdan anlamlı bir fark olduğu gözlenmiştir. Kontrol bitkilerinde %75 ve tam sulama uygulanan gruplarda toplam karotenoid içerikleri sırasıyla $0,16\pm0,04$ ve $0,15\pm0,01$ $\mu\text{g/mL}$ olarak bulunmuştur. Kontrol bitkileri için %75 ve tam sulama uygulanan gruplarda toplam karotenoid içeriği bakımından $p<0,05$ düzeyinde anlamlı bir fark oluşmazken %50 sulama uygulanan grup ile aralarında istatistiki olarak anlamlı bir fark olduğu gözlenmiştir.

Uzun dönem tuz stresine maruz bırakılan *C. annuum* bitkilerinde *F. mosseae* ve *R. intraradices* mikorizal mantarlarının bitkinin büyüme ve gelişme döneminde bazı biyokimyasal parametreleri üzerine etkilerinin araştırıldığı bir çalışmada (Çekiç vd., 2012) mikorizal bir eşi olan deneme grubu bitkilerinin fotosentetik pigment içeriği bakımından kontrol bitkilerine kıyasla daha yüksek klorofil ve karotenoid değerlerine sahip oldukları gösterilmiştir.

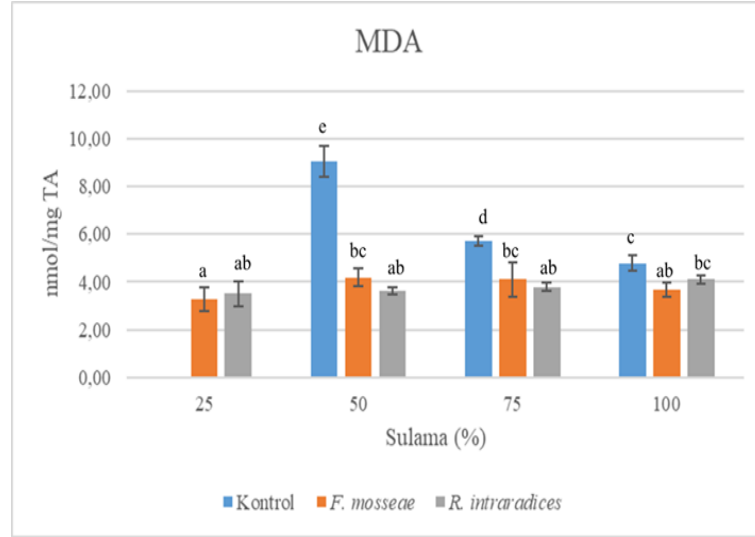
Rhizophagus intraradices ve *Rhizophagus fasciculatum* mikorizal mantarlarının ve bu iki süşun ikili inokülasyonunun *Burkholderia seminalis* ve kuraklık stresi koşullarında *Lycopersicon esculentum* ve *Capsicum annuum* bitkilerinin büyümesi üzerindeki olumlu

etkilerinin bildirildiği çalışmada mikorizal mantarlar ile inoküle edilen bitkilerde biyokütle, kök uzunluğu, sürgün uzunluğu ve klorofil içeriği açısından önemli bir artış gözlenmiştir. Mikorizal mantarların kuraklık toleransındaki önemini gösteren % kolonizasyon ile klorofil içeriği, kök uzunluğu, katalaz aktivitesi ve guaiacol peroksidaz arasında pozitif bir korelasyon gözlenmiştir (Tallapragada vd., 2016).

4.4.2 Biber bitkilerinin malondialdehit (MDA) içeriği

Çevresel stresler (yüksek ışık yoğunluğu, pestisitler, patojen mikroorganizmalar, kuraklık, tuzluluk, hava kirliliği, ağır metal vb.) sonucunda serbest radikaller ile antioksidan sistem arasındaki denge bozulmakta ve lipid peroksidasyonu, protein denatürasyonu DNA hasarını da içerisine alan bir takım oksidatif hasarlar oluşmaktadır (Koç ve İşlek, 2015). Stres etmenlerine maruz kalan bitkilerde oluşan en önemli hasarlardan biri lipid peroksidasyonu yoluyla hücre membranlarında gerçekleşmektedir.

F. mosseae ve *R. intraradices* mantarları ile inokule edilerek ve farklı sulama miktarları uygulanarak geliştirilen *C. annuum* bitkilerinden alınan yaprak numunelerinin MDA içerikleri Şekil 4.3'te gösterilmiştir. Buna göre en yüksek MDA içeriği $9,05 \pm 0,63$ nmol/mg TA ile Kontrol bitkilerinin %50 sulama uygulama grubunda tespit edilirken en düşük MDA içeriği $3,29 \pm 0,50$ nmol/mg TA ile *F. mosseae* bitkilerinin %25 sulama uygulanan grubunda görülmüştür. Kontrol bitkilerinin %75 ve tam sulama uygulanan gruplarında MDA içerikleri sırasıyla $5,71 \pm 0,20$ ve $4,79 \pm 0,32$ nmol/mg TA olarak bulunmuştur. Her üç sulama grubundaki Kontrol bitkilerinde MDA içeriği bakımından $p < 0,05$ düzeyinde anlamlı bir fark olduğu gözlenmiştir.



Şekil 4.3. *F. mosseae* ve *R. intraradices* mantarları ile inoküle edilen ve farklı oranlarda sulama uygulanan *C. annuum* bitkilerinin MDA içerikleri

F. mosseae bitkilerinin %50, 75 ve tam sulama uygulanan gruplarında MDA içerikleri sırasıyla $4,19 \pm 0,37$; $4,11 \pm 0,72$ ve $3,66 \pm 0,30$ nmol/mg TA olarak bulunmuştur. *F. mosseae* bitkileri için %50 ve 75 sulama grupları arasında MDA içeriği bakımından $p < 0.05$ düzeyinde anlamlı bir fark oluşmazken %25 ve tam sulama uygulanan gruplar ile aralarında istatistiki açıdan anlamlı bir fark olduğu gözlenmiştir. *R. intraradices* bitkilerinin %25, 50, 75 ve tam sulama uygulanan gruplarında MDA içerikleri sırasıyla $3,50 \pm 0,52$; $3,63 \pm 0,14$; $3,79 \pm 0,17$ ve $4,12 \pm 0,18$ nmol/mg TA olarak bulunmuştur. *R. intraradices* bitkileri için %25, 50 ve 75 sulama uygulanan sulama grupları arasında $p < 0,05$ düzeyinde anlamlı bir fark oluşmazken tam sulama uygulanan grup ile aralarında istatistiki açıdan anlamlı bir fark olduğu gözlenmiştir.

Tuz stresine karşı *F. mosseae* mantarı ile inokule edilen biber bitkileri ile yapılan başka bir çalışmada da benzer şekilde mikoriza uygulanan bitkilerin kontrol grubu bitkilerine kıyasla değişen NaCl konsantrasyonlarında daha az lipid peroksidasyonuna maruz kaldıklarını dolayısıyla daha düşük miktarda MDA içeriğine sahip olduklarını ortaya koymuştur (Abdel Latef ve Chaoxing, 2014).

Phytophthora capsici patojen mantarının biber bitkisinde fenilalanin amonyum liyaz enzim aktivitesi ve MDA miktarına olan etkisinin araştırıldığı bir çalışmada artan patojen mikroorganizma inokulum miktarı ile bitki yapraklarında tespit edilen MDA miktarı arasında bir doğru orantı olduğu sonucuna varılmıştır (Koç vd., 2011). Bununla birlikte

R. intraradices ve *F. mosseae* mikorizal mantarları uygulanan ve uzun süreli tuz stresine maruz bırakılan biber bitkilerindeki biyokimyasal değişimlerin ve antioksidan enzim aktivitelerinin araştırıldığı bir çalışmada tuz stresine maruz bırakılan kontrol bitkilerine kıyasla mikoriza uygulanan bitkilerin daha düşük miktarlarda MDA içeriğine sahip oldukları tespit edilmiştir (Çekiç vd., 2012).

Gerçekleştirilen MDA analizi sonucunda elde edilen veriler literatürde kayıtlı veriler ile uyum göstermiş mikoriza uygulanan bitki gruplarında kontrol grubu bitkilerine kıyasla daha düşük miktarda MDA içeriği tespit edilmiştir. Elde edilen sonuçlar ayrıca biber bitkilerinde mikorizal enfeksiyon oranları ile karşılaştırıldığında bitki gruplarının MDA içerikleri ile köklerde tespit edilen mikorizal enfeksiyon oranları arasında bir ilişki olabileceğini düşündürmüştür.

4.4.3 Biber bitkilerinin fenilalanin amonyum liyaz (PAL; E.C. 4.3.1.24) aktivitesi

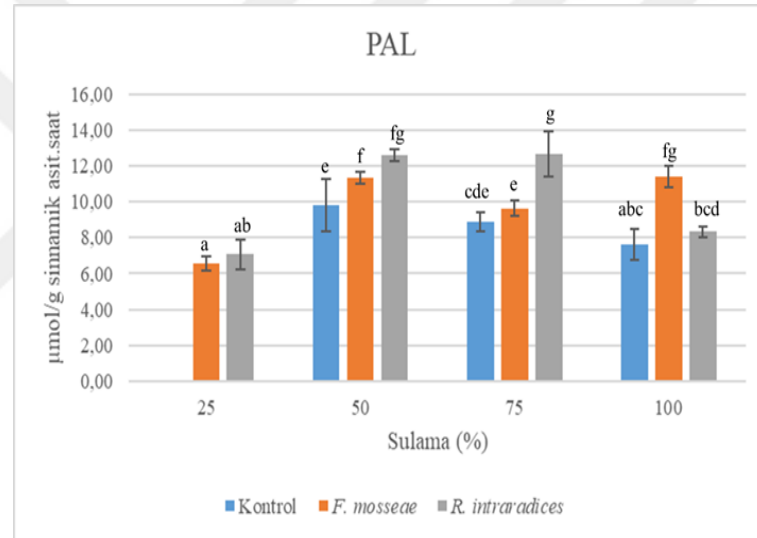
Fenilalanin amonyum liyaz (PAL, EC. 4.3.1.24) enzimi bitkilerde fenil propanoid biyosentezinde görev alan ilk enzim olarak L-fenilalaninin sinnamik aside katalizlenmesinden sorumludur. Bitki savunma mekanizmasının çeşitli biyotik ve abiyotik stres koşullarında (UV, kuraklık, patojen enfeksiyonu vs.) ürettiği pek çok metabolitin (flavanoidler, taninler, kumarinler vs.) sentezi PAL enziminin görev aldığı fenil propanoid biyosentezi ile gerçekleşmektedir. Pek çok çalışmada farklı stres koşulları altında bitkide PAL enzim aktivitesinde bir artış olduğu rapor edilmiştir (Chitara vd., 2020; Koç vd., 2014; Pereira, 1998; Sundaramoorthy vd., 2012).

F. mosseae ve *R. intraradices* mantarları ile inokule edilen ve farklı oranlarda sulama uygulanarak geliştirilen *C. annuum* bitkilerinden alınan yaprak numunelerine ait PAL enzim aktivitesi değerleri Şekil 4.4'te gösterilmiştir. Buna göre, en yüksek PAL enzim aktivitesi $12,68 \pm 1,25$ $\mu\text{mol/g}$ sinnamik asit.saat değeri ile *R. intraradices* bitkilerinin %75 sulama uygulanan grubunda tespit edilirken en düşük PAL aktivitesi $6,58 \pm 0,39$ $\mu\text{mol/g}$ sinnamik asit.saat ile *F. mosseae* bitkilerinin %25 sulama uygulanan grubunda bulunmuştur.

R. intraradices bitkilerinin %25, 50 ve tam sulama uygulanan gruplarında PAL enzim aktivitesi sırasıyla $7,07 \pm 0,84$; $12,59 \pm 0,32$ ve $8,33 \pm 0,30$ $\mu\text{mol/g}$ sinnamik asit.saat olarak

bulunmuştur. *R. intraradices* bitkilerinde PAL enzim aktivitesi bakımından dört sulama grubu arasında $p<0,05$ düzeyinde anlamlı bir fark olduğu gözlenmiştir.

F. mosseae bitkilerinin %50, 75 ve tam sulama uygulanan gruplarında PAL enzim aktivitesi sırasıyla $11,34\pm0,36$; $9,62\pm0,44$ ve $11,40\pm0,61$ $\mu\text{mol/g}$ sinnamik asit.saat olarak tespit edilmiştir. *F. mosseae* bitkilerinde PAL enzim aktivitesi bakımından dört sulama grubu arasında $p<0,05$ düzeyinde anlamlı bir fark olduğu gözlenmiştir. Kontrol bitkilerinde %50, 75 ve tam sulama uygulanan gruplarda PAL enzim aktivitesi sırasıyla $9,81\pm1,46$; $8,88\pm0,56$ ve $7,63\pm0,86$ $\mu\text{mol/g}$ sinnamik asit.saat olarak bulunmuştur. Her üç sulama grubu arasında Kontrol bitkilerinde PAL enzim aktivitesi bakımından $p<0,05$ düzeyinde anlamlı bir fark olduğu gözlenmiştir.

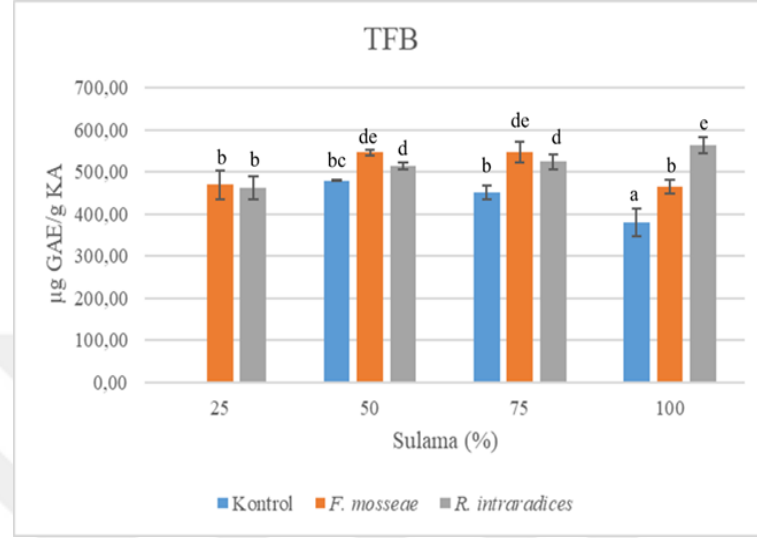


Şekil 4.4. *F. mosseae* ve *R. intraradices* mantarları ile inoküle edilen ve farklı oranlarda sulama uygulanan *C. annuum* bitkilerinde PAL (E.C. 4.3.1.24) enzimi aktivitesi

4.4.4 Biber meyvelerinin toplam fenolik bileşik içerikleri

F. mosseae ve *R. intraradices* mantarları ile inoküle edilerek geliştirilen *C. annuum* bitkilerinden hasat edilen meyvelerin metanolik ekstraktlarının toplam fenolik bileşik içerikleri spektrofotometrik Folin-Ciocalteu yöntemine göre belirlenmiş ve elde edilen sonuçlar Şekil 4.5'te gösterilmiştir. Buna göre en yüksek toplam fenolik bileşik (TFB) içerik $563,05\pm19,46$ μg GAE/g KA değeri ile *R. intraradices* bitkilerinin tam sulama uygulanan grubunda tespit edilirken en düşük TFB içeriği Kontrol bitkilerinin tam sulama uygulanan grubunda $378,50\pm32,88$ μg GAE/g KA olarak bulunmuştur. *R. intraradices*

bitkilerinin %25, 50 ve 75 sulama uygulanan gruplarında TFB içerikleri sırasıyla 461,73±26,23; 512,89±8,29; 523,70±16,95 µg GAE/g KA olarak tespit edilmiştir. Dört sulama grubu için *R. intraradices* bitkilerinde TFB içeriği bakımından p<0,05 düzeyinde anlamlı bir fark olduğu gözlenmiştir.



Şekil 4.5. *F. mosseae* ve *R. intraradices* mantarları ile inoküle edilen ve farklı oranlarda sulama uygulanan *C. annuum* bitkilerinden alınan meyve örneklerinin toplam fenolik bileşik içerikleri

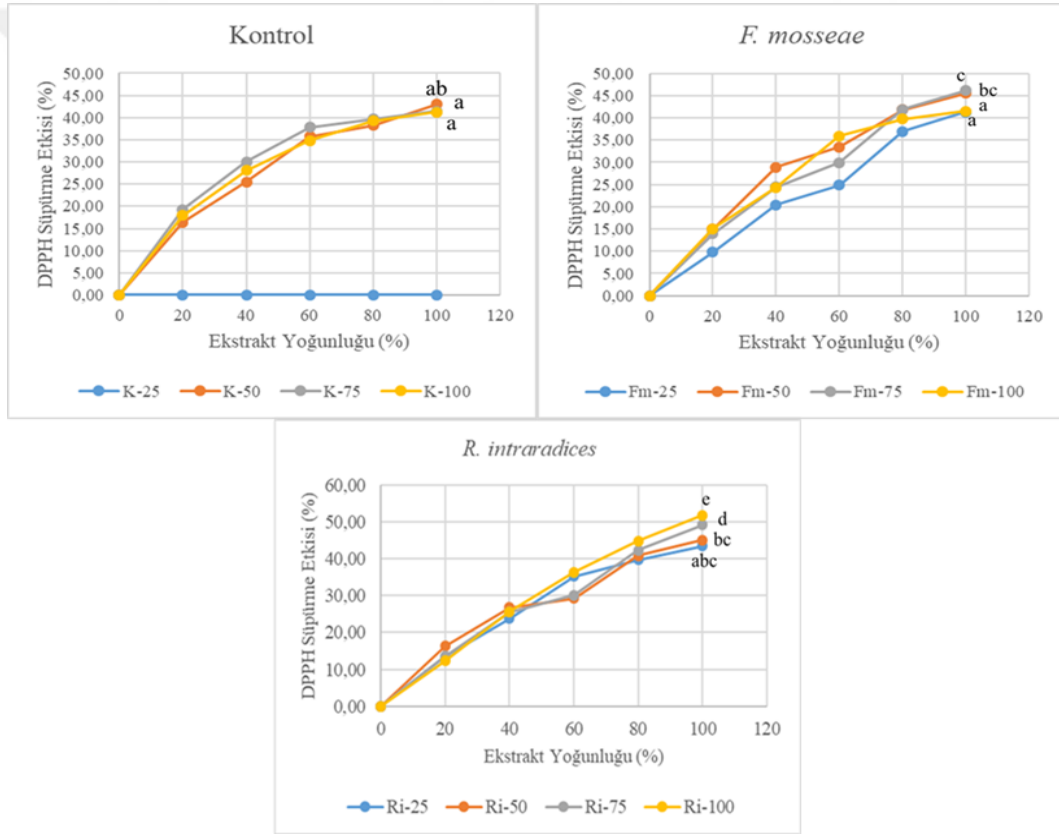
F. mosseae bitkilerinin %25, 50, 75 ve tam sulama uygulanan gruplarında TFB içeriği sırasıyla 469,43±34,82; 546,25±7,09; 546,87±24,90 ve 463,83±16,54 µg GAE/g KA olarak bulunmuştur. *F. mosseae* bitkilerinin %50 ve 75 sulama uygulanan gruplarında TFB içeriği bakımından p<0,05 düzeyinde anlamlı bir fark oluşmazken %25 ve tam sulama uygulanan gruplar ile aralarında istatistiki açıdan anlamlı bir fark olduğu gözlenmiştir. Kontrol bitkilerinin %50 ve 75 sulama uygulanan gruplarında TFB içeriği sırasıyla 479,55±1,62 ve 450,12±16,70 µg GAE/g KA olarak tespit edilmiştir. Her üç sulama grubu arasında Kontrol bitkilerinde TFB içeriği bakımından p<0,05 düzeyinde anlamlı bir fark olduğu gözlenmiştir.

4.4.5 Biber meyvelerinin antioksidan özellikleri

F. mosseae ve *R. intraradices* mantarları ile inoküle edilerek geliştirilen *C. annuum* bitkilerinden hasat edilen meyvelerin metanolik ekstraktlarının antioksidan özelliklerinin

belirlenmesi için DPPH radikalini süpürme etkileri araştırılmış ve elde edilen bulgular Şekil 4.6’da sunulmuştur.

Buna göre en yüksek DPPH radikal süpürücü etkiyi $51,78 \pm 1,87$ ile *R. intraradices* bitkilerinin tam sulama uygulanan grubu gösterirken en düşük DPPH süpürücü etki $41,20 \pm 0,73$ ile Kontrol bitkilerinin tam sulama uygulanan grubunda tespit edilmiştir. *R. intraradices* bitkilerinin %25, 50 ve 75 sulama uygulanan gruplarında DPPH süpürme etkisi değerleri sırasıyla $43,42 \pm 0,71$; $45,05 \pm 0,29$ ve $49,15 \pm 2,78$ olarak tespit edilmiştir. *R. intraradices* bitkilerinin her dört sulama grubu arasında DPPH süpürme etkisi bakımından $p < 0,05$ düzeyinde anlamlı bir fark olduğu gözlenmiştir.



Şekil 4.6. *F. mosseae* ve *R. intraradices* mantarları ile inoküle edilen ve farklı oranlarda sulama uygulanan *C. annuum* bitkilerinden alınan meyve örneklerinin DPPH radikalini süpürme etkileri

F. mosseae bitkilerinin %25, 50, 75 ve tam sulama uygulanan gruplarında tespit edilen DPPH süpürme etkisi değerleri sırasıyla $41,29 \pm 0,24$; $45,48 \pm 0,77$; $46,14 \pm 1,62$ ve $41,45 \pm 1,29$ olarak bulunmuştur. *F. mosseae* bitkilerinin %25 ve tam sulama uygulanan grupları arasında $p < 0,05$ düzeyinde anlamlı bir fark oluşmazken %50 ve 75 sulama

grupları ile aralarında istatistiki açıdan anlamlı bir fark olduğu gözlenmiştir. Kontrol bitkilerinin %50 ve 75 sulama uygulanan gruplarında DPPH süpürme etkisi değerleri sırasıyla $43,04 \pm 0,89$ ve $41,46 \pm 0,37$ olarak tespit edilmiştir. Kontrol bitkilerinin %75 ve tam sulama uygulanan grupları arasında $p < 0,05$ düzeyinde anlamlı bir fark oluşmazken %50 sulama uygulanan grup ile aralarında istatistiki açıdan anlamlı bir fark olduğu gözlenmiştir.

Çekiç vd. (2012) tarafından *F. mosseae* ve *R. intraradices* mikorizal mantarlarının biber bitkisinde (*C. annuum*) tuz stresine karşı etkilerinin araştırıldığı bir çalışmada kontrol bitkileri ve farklı konsantrasyonlarda tuz stresi uygulanan deney grubu bitkilerinde süperoksit dismutaz (SOD), katalaz (CAT), glutatyon redüktaz (GR) ve askorbat peroksidaz enzim (APX) aktiviteleri belirlenmiş antioksidan enzimlerin enzim türüne ve tuz konsantrasyonuna bağlı olarak değişen seviyelerde etki gösterdiği bildirilmiştir. Deney grubu bitkilerinde SOD, GR ve APX aktiviteleri artan tuz konsantrasyonu ile doğru orantılı bir aktivite seviyesi gösterirken CAT aktivitesi ters orantılı bir seviye göstermiştir.

F. mosseae ve *R. intraradices* mikorizal mantarlarını ve bitki gelişimine faydalı olduğu bilinen bazı mantar ve bakterileri barındıran bir konsorsiyumla birlikte ticari organik bir besin elementleri bileşiminin biber bitkisinde meyve kalite parametrelerine etkilerinin araştırıldığı bir çalışmada (Caruso vd., 2019) mikroorganizma konsorsiyumu ve mikroorganizma konsorsiyumu+organik besin elementleri bileşimi uygulanan deney grubu bitkilerinin kontrol grubu bitkilerine ve yalnızca organik besin elementleri bileşimi uygulanan deney grubu bitkilerine göre daha yüksek seviyede DPPH süpürücü etki gösterdiği bildirilmiştir.

4.5 Biber Meyvelerinin Kapsaisin İçerikleri

F. mosseae ve *R. intraradices* mantarları ile inokule edilerek ve farklı sulama miktarları uygulanarak geliştirilen *C. annuum* bitkilerinden hasat edilen meyvelerden elde edilen ekstraktların kapsaisin ve dihidrokapsaisin içerikleri GC-MS ile kantitatif olarak analiz edilmiş ve elde edilen bulgular Çizelge 4.3'te gösterilmiştir.

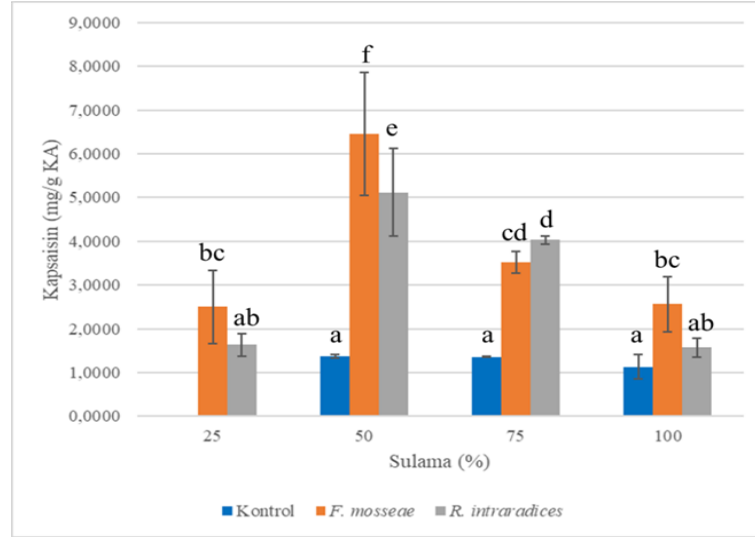
Buna göre en yüksek kapsaisin miktarı $6,45 \pm 0,22$ mg/g KA değeri ile *F. mosseae* bitkilerinin %50 sulama uygulanan grubunda tespit edilirken en düşük miktarda kapsaisin üretimi $1,13 \pm 0,28$ mg/g KA değeri ile Kontrol bitkilerinin tam sulama uygulanan grubunda bulunmuştur. *F. mosseae* bitkilerinin %25, 75 ve tam sulama uygulanan gruplarında kapsaisin miktarları sırasıyla $2,50 \pm 0,83$; $3,52 \pm 0,25$ ve $1,63 \pm 0,26$ mg/g KA olarak tespit edilmiştir. *F. mosseae* bitkilerinin %25 ve tam sulama uygulanan grupları arasında kapsaisin miktarı bakımından $p < 0,05$ düzeyinde anlamlı bir fark oluşmazken %50 ve 75 sulama uygulanan gruplar ile aralarında istatistiki açıdan anlamlı bir fark olduğu gözlenmiştir.

Çizelge 4.5. *F. mosseae* ve *R. intraradices* mantarları ile inoküle edilen ve farklı oranlarda sulama uygulanan *C. annuum* bitkilerinden alınan meyve örneklerinin kapsaisin ve dihidrokapsaisin içerikleri

Mikoriza	Sulama	Kapsaisin	Dihidrokapsaisin
Kontrol	25	-	-
	50	$1,37 \pm 0,04a$	$0,71 \pm 0,05a$
	75	$1,36 \pm 0,01a$	$0,70 \pm 0,09a$
	100	$1,13 \pm 0,28a$	$0,66 \pm 0,25a$
<i>F. mosseae</i>	25	$2,50 \pm 0,83bc$	$1,61 \pm 0,55bc$
	50	$6,45 \pm 0,22f$	$3,18 \pm 0,58d$
	75	$3,52 \pm 0,25cd$	$2,17 \pm 0,30c$
	100	$2,56 \pm 0,64bc$	$1,45 \pm 0,93abc$
<i>R. intraradices</i>	25	$1,63 \pm 0,26ab$	$1,28 \pm 0,28ab$
	50	$5,11 \pm 1e$	$3,10 \pm 0,79d$
	75	$4,03 \pm 0,09d$	$2,18 \pm 0,18c$
	100	$1,57 \pm 0,22ab$	$0,99 \pm 0,02ab$

*Sulama (%), Kapsaisin (mg/g KA), Dihidrokapsaisin (mg/g KA)**Tüm değerler en az üç bağımsız ölçümün ortalaması ve standart sapması olarak sunulmuştur. ***Aynı sütun içerisinde farklı harflerle gösterilen değerler arasında $p < 0,05$ anlamlılık düzeyinde bir fark mevcuttur.

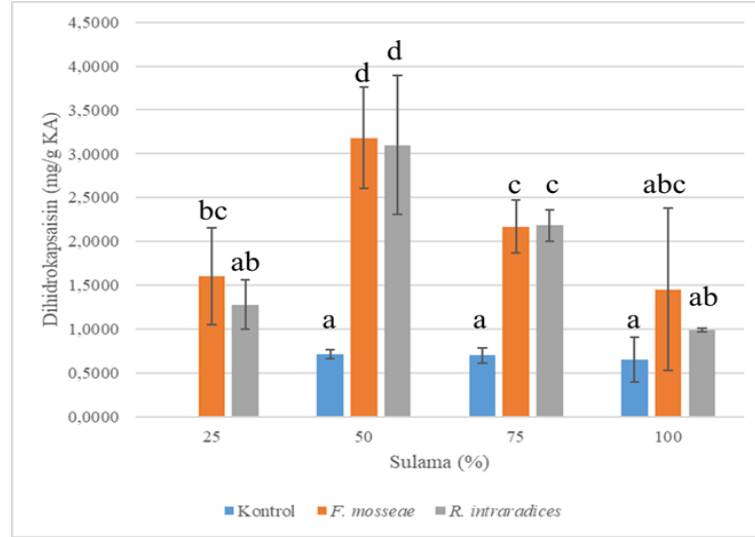
R. intraradices bitkilerinin %25, 50, 75 ve tam sulama uygulanan gruplarında kapsaisin miktarları sırasıyla $1,63 \pm 0,26$; $5,11 \pm 1,00$; $4,03 \pm 0,09$ ve $1,57 \pm 0,22$ mg/g KA olarak bulunmuştur. *R. intraradices* bitkilerinin %25 ve tam sulama uygulanan grupları arasında kapsaisin miktarı bakımından $p < 0,05$ düzeyinde anlamlı bir fark oluşmazken %50 ve 75 sulama uygulanan gruplar ile aralarında istatistiki açıdan anlamlı bir fark olduğu gözlenmiştir. Kontrol bitkilerinin %50 ve 75 sulama uygulanan gruplarında tespit edilen kapsaisin miktarları sırasıyla $1,37 \pm 0,04$ ve $1,36 \pm 0,01$ mg/g KA'dır. Kontrol bitkilerinin her üç sulama grubu arasında kapsaisin miktarı bakımından $p < 0,05$ düzeyinde anlamlı bir fark oluşmadığı gözlenmiştir.



Şekil 4.7. *F. mosseae* ve *R. intraradices* mantarları ile inoküle edilen ve farklı oranlarda sulama uygulanan *C. annuum* bitkilerinden alınan meyve örneklerinin kapsaisin içerikleri

Dihidro-kapsaisin içeriği bakımından en yüksek değer $3,18 \pm 0,58$ mg/g KA ile yine *F. mosseae* bitkilerinin %50 sulama grubunda tespit edilirken en düşük değer de yine Kontrol bitkilerinin tam sulama uygulanan grubunda $0,66 \pm 0,25$ mg/g KA olarak bulunmuştur. *F. mosseae* bitkilerinin %25, 75 ve tam sulama uygulanan gruplarında dihidrokapsaisin miktarları sırasıyla $1,61 \pm 0,55$; $2,17 \pm 0,30$ ve $1,45 \pm 0,93$ mg/g KA olarak tespit edilmiştir. *F. mosseae* bitkilerinin her dört sulama grubu arasında dihidrokapsaisin içeriği bakımından $p < 0,05$ düzeyinde anlamlı bir fark olduğu gözlenmiştir.

R. intraradices bitkilerinin %25, 50, 75 ve tam sulama uygulanan gruplarında dihidrokapsaisin miktarları sırasıyla $1,28 \pm 0,28$; $3,10 \pm 0,79$; $2,18 \pm 0,18$ ve $0,99 \pm 0,02$ mg/g KA olarak tespit edilmiştir. *R. intraradices* bitkilerinin %25 ve tam sulama uygulanan grupları arasında dihidrokapsaisin içeriği bakımından $p < 0,05$ düzeyinde anlamlı bir fark oluşmazken %50 ve 75 sulama uygulana gruplar ile aralarında istatistiki açıdan anlamlı bir fark olduğu gözlenmiştir. Kontrol bitkilerinin %50 ve 75 sulama uygulanan gruplarında dihidrokapsaisin miktarları sırasıyla $0,71 \pm 0,05$ ve $0,70 \pm 0,09$ mg/g KA olarak bulunmuştur. Kontrol bitkilerinin her üç sulama grubu arasında dihidrokapsaisin miktarı bakımından $p < 0,05$ düzeyinde anlamlı bir fark oluşmamıştır.



Şekil 4.8. *F. mosseae* ve *R. intraradices* mantarları ile inoküle edilen ve farklı oranlarda sulama uygulanan *C. annuum* bitkilerinden alınan meyve örneklerinin kapsaisin içerikleri

Bibere acı tat veren bir vanililamit türevi alkaloid olan kapsaisin ($C_{18}H_{27}NO_3$) bilinen en acı maddelerden biridir (Başyigit vd., 2020). Gıda, farmakoloji ve zirai ilaç üretimi gibi geniş bir yelpazede kullanılan önemli bir bitki ikincil metaboliti olan kapsaisinin biber bitkisinde üretiminin artırılmasına yönelik birçok çalışma mevcuttur (İşlek, 2009).

Altı Habanero çeşidi (*C. chinense* Jack. cv Habanero) ve bir hibrit biber çeşidi olan hayalet biber (*C. frutescens* x *C. chinense* “Bhut Jolokia”) ile gerçekleştirilen bir sera çalışmasında hasat edilen biber meyvelerinin taze ve kurutulmuş numunelerinden sıvı kromatografi yöntemi ile kapsaisin analizleri gerçekleştirilmiş, elde edilen sonuçlar hayalet biberin 24944 $\mu\text{g/g}$ KA ve 3041 $\mu\text{g/g}$ TA ile en yüksek kapsaisin içeriğine sahip olduğunu kuru ağırlık bazında en düşük kapsaisin içeriğinin 1128 $\mu\text{g/g}$ KA ile kırmızı Habanero çeşidinde tespit edildiğini ortaya koymuştur (Popelka vd., 2017). Yetiştirme sezonunun ve meyve olgunluğunun üç farklı biber türünde (*C. frutescens*, *C. chinense* ve *C. baccatum*) antioksidan aktivite ve kapsaisin içeriklerine etkisinin araştırıldığı bir çalışmada (Bogusz Jr vd., 2018) en yüksek kapsaisin içeriği ilk hasat sezonunda tam olgunlaşmış *C. chinense* türünde 2,04 mg/g TA olarak tespit edilirken ikinci hasat sezonunda bu tür için kapsaisin içeriğinde % 37’lik bir düşüş gerçekleştiği gözlenmiştir. En düşük kapsaisin içeriği her iki hasat sezonu için *C. baccatum* türünde tespit edilmiş, tam olgunlaşmamış meyvelerin kapsaisin içeriğinin olgun meyvelerden daha düşük olduğu gösterilmiştir. *C. frutescens* türünde ise yetiştirme sezonunun kapsaisin içeriği

üzerinde anlamlı bir fark oluşturmadağı ancak olgunlaşma aşamasının kapsaisin içeriğı bakımından anlamlı bir fark oluşturduğı saptanmıştır. Yetiştirme sezonları arasındaki ortalama sıcaklık, yağış, nem, ışık yoğunluğu gibi çevresel faktörlerin yanı sıra genotip ve olgunlaşma aşamasının da kapsaisin içeriğine etki ettiğı vurgulanmıştır. Bu tez çalışmasında iki farklı mikorizal mantar ile inoküle edilerek yetiştirilen *C. annuum* türünde bitki genotipine, bitki yetiştirme koşullarına, sıcaklık ve nem faktörlerine bağılı olarak farklı miktarlarda kapsaisin içeriğı tespit edilmiştir.

Sulama stresi uygulanan (hergün, 7 günde bir kez ve 9 günde bir kez) Habanero biberindeki (*Capsicum chinense* Jacq.) kapsaisin ve dihidrokapsaisin miktarlarındaki değişimin araştırıldığı bir çalışmada her iki ikincil metabolit için stres uygulanan bitkilerde kontrol bitkilerine kıyasla belirgin bir artış belirlenmiş ve en fazla kapsaisin üretiminin 7 günde bir kez sulama uygulanan bitki grubunda gerçekleştiğı tespit edilmiştir (Ruiz-Lau vd., 2011).

Bu tez çalışmasında en fazla artışın her iki mantar türü için %50 sulama grubunda tespit edilmesi kapsaisin ve dihidrokapsaisin üretiminde sulama miktarının yarıya indirilmesi durumunun mikoriza varlığında sağlıklı bitki gelişimine bir engel oluşturmadağı, aksine temiz su tedariki sorunuyla karşılaşması muhtemel tarım üreticileri için umut vaat eden bir gelişme olduğı kanısı oluşturmaktadır. Farklı biber çeşitlerinin kuraklık stresi altında kapsaisinoid miktarları ve bazı fizyolojik parametreler bakımından değişimlerinin araştırıldığı bir çalışmada 21 gün kuraklık stresine maruz bırakılan biber bitkilerinin 34 gün stres uygulanan bitkilere ve kontrol grubu bitkilerine kıyasla organoleptik Scoville acılık birimi (SHU) bakımından daha yüksek değerlere sahip olduğı tespit edilmiştir (Kopta vd., 2020). Çalışmada denenen bütün biber çeşitlerinde kuraklık süresinin uzamasının SHU değerlerinde düşüşe sebep olduğı gösterilmiştir.

Bu durum ayrıca yaptığımız tez çalışmasında en yüksek kapsaisin ve dihidrokapsaisin miktarlarının %25 sulama uygulanan bitki gruplarında değil de her iki mikorizal mantar uygulaması gerçekleştirilen biber bitkileri için %50 sulama uygulanan bitki gruplarında tespit edilmesini destekleyici niteliktedir.

BÖLÜM V

SONUÇ

Arbusküler mikorizalar ve bitki birlikteliği bitkilerin büyümesini ve verimliliğini arttıran önemli biyolojik birlikteliklerdendir. Biber üretiminde ekonomik verimin artırılmasında büyük bir rol oynar. Mikorizal birlikteliklerin farklı oranlarda sulama uygulanan biber bitkilerinde büyüme, gelişme, biyokimyasal değişimler ve önemli bir ikincil metabolit olan kapsaisin üretimine etkisinin araştırıldığı bu tez çalışmasında *F. mosseae* ve *R. intraradices* mikorizal mantarlarının *Capsicum annuum* L. acı kırmızı biber çeşidi üzerinde mikoriza uygulanmayan kontrol bitkilerine göre istatistiki açıdan anlamlı farklar oluşturacak seviyede olumlu etkileri tespit edilmiştir.

Arbusküler mikorizal mantarların biberin büyümesine ve verimliliğine katkıda bulunduğu mekanizmalar topraktaki makro ve mikro besin elementlerinin kullanılabilirliğini ve alımını iyileştirmek, bitki üzerinde oluşabilecek farklı stres etmenlerini azaltmaktadır. Mikorizal mantar türleri ile inoküle edilen bitkilerin sürgün boyu, sürgün yaş ve kuru ağırlığı, sürgün kuru madde miktarı ve kök kuru madde miktarı gibi bitki gelişim özellikleri açısından kontrol bitkilerine kıyasla daha yüksek değerlere sahip olduğu, bununla birlikte mikorizanın fotosentetik pigment içerikleri, ikincil metabolitlerin sentez yollarını katalizleyen enzim aktiviteleri, antioksidan aktiviteleri ve kapsaisin üretimi açısından da bitkide olumlu etkilere sebep olduğu ortaya konulmuştur.

Mikorizal mantarlar bitkilerin su açığına karşı toleransını arttırmaktadır; ancak çevresel streslere karşı simbiyozun neden olduğu tepkilerin karmaşıklığı ve çeşitliliği net bir mekanizmanın kurulmasını engellemektedir. Bu nedenle mikorizal mantar türlerine, bitki türlerine ve simbiyozun kurulduğu koşullara göre farklı modellemelerin gerektiği düşünülmektedir. Yaptığımız çalışmada farklı oranlarda sulama uygulaması başta kapsaisin üretimi olmak üzere biber bitkisinde olumlu yönde gerçekleşen fizyolojik değişimler üzerinde mikorizanın etkinliğini arttırmıştır. Araştırılan birçok parametrede en iyi bulguların ve en fazla kapsaisin üretiminin mikoriza varlığında %50 sulama uygulanan deneme grubunda tespit edilmiş olması bu tez çalışmasının öne çıkan yönlerindendir. Bu durum küresel iklim değişikliğinin ve gelecekte karşılaşılması muhtemel sulama suyu kıtlığının etkilerini azaltma konusunda umut vaat eden bir gelişme olarak kabul edilebilir.

Ancak, optimum kapsaisin üretimi için biber bitkisinin farklı mikorizal mantar türleri ve/veya farklı toprak mikroorganizmalarından oluşan konsorsiyumlarla inoküle edilerek yetiştirilmesi ve bitkinin gelişim süresince ihtiyaç duyduğu asgari su ihtiyacının belirlenmesi yüksek önem arz etmektedir. Birçok farklı parametrenin devreye girdiği bu olayları anlayabilmek ve açıklayabilmek için daha bütüncül bir yaklaşıma ihtiyaç olduğu düşünülmektedir.



KAYNAKLAR

Abdel Latef, A.A.H. and Chaoxing, H., "Does inoculation with *Glomus mosseae* improve salt tolerance in pepper plants?", ***Journal of Plant Growth Regulation***, 33, 644-653, 2014.

Ahn, S.-J., Badenes-Pérez, F.R. and Heckel, D.G., "A host-plant specialist, *Helicoverpa assulta*, is more tolerant to capsaicin from *Capsicum annuum* than other noctuid species", ***Journal of Insect Physiology***, 57(9), 1212-1219, 2011.

Akande, T.Y., Fagbola, O., Erinle, K.O., Bitire, T.D. and Urhie, J., "Effect of organic manure and mycorrhizal on the growth and yield of *Capsicum annum* (Hot Pepper)", ***New York Scientific Journal***, 11(5), 1-9, 2018.

Akella, A. and Deshpande, S.B., "Reflex hypertensive response induced by capsaicin involves endothelin-dependent mechanisms", ***Indian Journal of Physiology and Pharmacology***, 59(1), 23-29, 2015.

Akyuz, L., Kaya, M., Mujtaba, M., Ilk, S., Sargin, I., Salaberria, A.M., Labidi, J., Cakmak, Y.S. and Islek, C., "Supplementing capsaicin with chitosan-based films enhanced the anti-quorum sensing, antimicrobial, antioxidant, transparency, elasticity and hydrophobicity", ***International Journal of Biological Macromolecules***, 115, 438-446, 2018.

Al-Samydai, A., Al-Mamoori, F., Abdelnabi, H. and Aburjai, T., "An updated review on anticancer activity of capsaicin", ***International Journal of Scientific and Technology Research***, 8(12), 2625-2630, 2019.

Allen, J.W. and Shachar-Hill, Y., "Sulfur transfer through an arbuscular mycorrhiza", ***Plant Physiology***, 149(1), 549-560, 2009.

Altúzar-Molina, A.R., Muñoz-Sánchez, J.A., Vázquez-Flota, F., Monforte-González, M., Racagni-Di Palma, G. and Hernández-Sotomayor, S.M.T., "Phospholipidic signaling and vanillin production in response to salicylic acid and methyl jasmonate in *Capsicum chinense* J. cells", ***Plant Physiology and Biochemistry***, 49(2), 151-158, 2011.

Amantini, C., Morelli, M.B., Nabissi, M., Cardinali, C., Santoni, M., Gismondi, A. and Santoni, G., "Capsaicin triggers autophagic cell survival which drives epithelial mesenchymal transition and chemoresistance in bladder cancer cells in an Hedgehog-dependent manner", ***Oncotarget***, 7(31), 50180, 2016.

Andrino, A., Guggenberger, G., Sauheitl, L., Burkart, S. and Boy, J., "Carbon investment into mobilization of mineral and organic phosphorus by arbuscular mycorrhiza", ***Biology and Fertility of Soils***, 57, 47-64, 2021.

Anonim, "Bitkisel Üretim Verileri",
www.tarimorman.gov.tr/sgb/Belgeler/SagMenuVeriler/BUGEM.pdf, 20 Ekim 2023.

Anyagou, K.C., Fedorov, A.V. and Neckers, D.C., "Synthesis, characterization, and antifouling potential of functionalized copper nanoparticles", ***Langmuir***, 24(8), 4340-4346, 2008.

Arce-Rodríguez, M.L., Martínez, O. and Ochoa-Alejo, N., "Genome-wide identification and analysis of the MYB transcription factor gene family in chili pepper (*Capsicum spp.*)", ***International Journal of Molecular Sciences***, 22(5), 2229-2241, 2021.

Arce-Rodríguez, M.L. and Ochoa-Alejo, N., "An R2R3-MYB transcription factor regulates capsaicinoid biosynthesis", ***Plant Physiology***, 174(3), 1359-1370, 2017.

Askin, B., Öztürk, D., Durusoy, B. and Kaya, Y., "Properties of yogurt fortified with capsaicin extracts dissolved in high oleic sunflower oil", ***Journal of Food Processing and Preservation***, 46(10), e15633, 2022.

Aybak, H.Ç., Biber Yetiştiriciliği, ***Hasad Yayıncılık***, Ankara, 2002.

Baas-Espinola, F.M., Castro-Concha, L.A., Vázquez-Flota, F.A. and Miranda-Ham, M.L., "Capsaicin synthesis requires in situ phenylalanine and valine formation in in vitro maintained placentas from *Capsicum chinense*", ***Molecules***, 21(6), 799-813, 2016.

Bagyaraj, D.J. and Sreeramulu, K.R., "Preinoculation with VA mycorrhiza improves growth and yield of chilli transplanted in the field and saves phosphatic fertilizer", ***Plant and Soil***, 69, 375-381, 1982.

Barbero, G.F., Liazid, A., Azaroual, L., Palma, M. and Barroso, C.G., "Capsaicinoid contents in peppers and pepper-related spicy foods", ***International Journal of Food Properties***, 19(3), 485-493, 2016.

Basith, S., Cui, M., Hong, S. and Choi, S., "Harnessing the therapeutic potential of capsaicin and its analogues in pain and other diseases", ***Molecules***, 21(8), 966-978, 2016.

Başığit, B., Dağhan, Ş. and Karaaslan, M., "Biochemical, compositional, and spectral analyses of İsot (Urfa pepper) seed oil and evaluation of its functional characteristics", ***Grasas Y Aceites***, 71(4), 384-384, 2020.

Beltrano, J., Ruscitti, M., Arango, M.C. and Ronco, M., "Effects of arbuscular mycorrhiza inoculation on plant growth, biological and physiological parameters and mineral nutrition in pepper grown under different salinity and p levels", ***Journal of Soil Science and Plant Nutrition***, 13(1), 123-141, 2013.

Bennett, A.E. and Groten, K., "The costs and benefits of plant–arbuscular mycorrhizal fungal interactions", ***Annual Review of Plant Biology***, 73, 649-672, 2022.

Bernardo, V.F., Garita, S.A., Arango, M.C., Ripodas, J.I., Saparrat, M.C.N. and Ruscitti, M.F., "Arbuscular mycorrhizal fungi against the false root-knot nematode activity in *Capsicum annuum*: Physiological responses in plants", ***Biocontrol Science and Technology***, 31(2), 119-131, 2021.

Biçici, M., "Bitki hastalık etmenleri ile biyolojik mücadelenin başarısını arttırmada mikoriza'nın rolü", ***Türkiye Biyolojik Mücadele Dergisi***, 2(2), 139-174, 2011.

Bogusz Jr, S., Libardi, S.H., Dias, F.F.G., Coutinho, J.P., Bochi, V.C., Rodrigues, D., Melo, A.M.T. and Godoy, H.T., "Brazilian Capsicum peppers: Capsaicinoid content and antioxidant activity", *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 98(1), 217-224, 2018.

Bozokalfa, M.K. and Eşiyok, D., Biberin Anavatanı ve Yayılışı, *Dünya Yayıncılık*, İstanbul, 2006.

Buczowska, H.B. and Sałata, A., "Inoculation with arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) and plant irrigation with yield-forming factors in organic sweet pepper (*Capsicum annuum* L.) cultivation", *Acta Scientiarum Polonorum Hortorum Cultus*, 19(6), 125-138, 2020.

Buitimea-Cantúa, G.V., Velez-Haro, J.M., Buitimea-Cantúa, N.E., Molina-Torres, J. and Rosas-Burgos, E.C., "GC-EIMS analysis, antifungal and anti-aflatoxigenic activity of *Capsicum chinense* and *Piper nigrum* fruits and their bioactive compounds capsaicin and piperine upon *Aspergillus parasiticus*", *Natural Product Research*, 34(10), 1452-1455, 2020.

Bush, D.S., "Calcium regulation in plant cells and its role in signaling", *Annual Review of Plant Biology*, 46(1), 95-122, 1995.

Bücking, H., Mensah, J.A. and Fellbaum, C.R., "Common mycorrhizal networks and their effect on the bargaining power of the fungal partner in the arbuscular mycorrhizal symbiosis", *Communicative & Integrative Biology*, 9(1), e1107684, 2016.

Campbell, C.M., Diamond, E., Schmidt, W.K., Kelly, M., Allen, R., Houghton, W., Brady, K.L. and Campbell, J.N., "A randomized, double-blind, placebo-controlled trial of injected capsaicin for pain in Morton's neuroma", *Pain*, 157(6), 1297-1304, 2016.

Caris, C., Hördt, W., Hawkins, H.-J., Römheld, V. and George, E., "Studies of iron transport by arbuscular mycorrhizal hyphae from soil to peanut and sorghum plants", *Mycorrhiza*, 8, 35-39, 1998.

Carpenter, C.A., Miller, M.C., Sui, X. and West, D.S., "Weight status and sedentary behavior of Alzheimer's disease caregivers", *American Journal of Health Behavior*, 44(1), 3-12, 2020.

Caruso, G., Stoleru, V.V., Munteanu, N.C., Sellitto, V.M., Teliban, G.C., Burducea, M., Ioan, T., Morano, G. and Butnariu, M., "Quality performances of sweet pepper under farming management", *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*, 47(2), 458-464, 2019.

Castillo, C., Sotomayor, L., Ortiz, C., Leonelli, G., Borie, F. and Rubio, R., "Effect of arbuscular mycorrhizal fungi on an ecological crop of chili peppers (*Capsicum annuum* L.)", *Chilean Journal of Agricultural Research*, 69(1), 79-87, 2009.

Cavagnaro, T.R., Jackson, L.E., Six, J., Ferris, H., Goyal, S., Asami, D. and Scow, K.M., "Arbuscular mycorrhizas, microbial communities, nutrient availability, and soil aggregates in organic tomato production", *Plant and Soil*, 282, 209-225, 2006.

Cavagnaro, T.R. and Martin, A.W., "The role of mycorrhizas in plant nutrition: Field and mutant based approaches", *Plant and Soil*, 287, 148-151, 2010.

Chapa-Oliver, A.M. and Mejía-Teniente, L., "Capsaicin: From plants to a cancer-suppressing agent", *Molecules*, 21(8), 931-938, 2016.

Chee, M.J.Y., Lycett, G.W., Khoo, T.-J. and Chin, C.F., "Bioengineering of the plant culture of *Capsicum frutescens* with vanillin synthase gene for the production of vanillin", *Molecular Biotechnology*, 59, 1-8, 2017.

Chen, S., Jin, W., Liu, A., Zhang, S., Liu, D., Wang, F., Lin, X. and He, C., "Arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) increase growth and secondary metabolism in cucumber subjected to low temperature stress", *Scientia Horticulturae*, 160, 222-229, 2013.

Chen, W.T., Lin, G.B., Lin, S.H., Lu, C.H., Hsieh, C.H., Ma, B.L. and Chao, C.Y., "Static magnetic field enhances the anticancer efficacy of capsaicin on HepG2 cells via capsaicin receptor TRPV1", *PLoS One*, 13(1), e0191078, 2018.

Cheok, C.Y., Sobhi, B., Adzahan, N.M., Bakar, J., Rahman, R.A., Ab Karim, M.S. and Ghazali, Z., "Physicochemical properties and volatile profile of chili shrimp paste as affected by irradiation and heat", **Food Chemistry**, 216, 10-18, 2017.

Chitara, M.K., Keswani, C., Varnava, K.G., Birla, H., Dilnashin, H., Singh, S.P., Sarojini, V., Sperry, J. and Singh, H.B., "Impact of the alkaloid colletotrichumine A on the pathogenicity of *Colletotrichum capsici* in *Capsicum annum* L", **Rhizosphere**, 16, e100247, 2020.

Cho, H. and Kwon, Y., "Development of a database of capsaicinoid contents in foods commonly consumed in Korea", **Food Science & Nutrition**, 8(8), 4611-4624, 2020.

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

Cosacak, M.I., Bhattarai, P. and Kizil, C., "Alzheimer's disease, neural stem cells and neurogenesis: cellular phase at single-cell level", **Neural Regeneration Research**, 15(5), 824-832, 2020.

Çalışkan, T., Hatipoğlu, R. and Kırıcı, S., "Production of plant secondary metabolites from cell and organ cultures under in vitro conditions", **Turkish Journal of Agriculture-Food Science and Technology**, 7(7), 971-980, 2019.

Çekiç, F.Ö., Ünyayar, S. and Ortaş, İ., "Effects of arbuscular mycorrhizal inoculation on biochemical parameters in *Capsicum annum* grown under long term salt stress", **Turkish Journal of Botany**, 36(1), 63-72, 2012.

de Farias, V.L., da Silva Araújo, Í.M., da Rocha, R.F.J., dos Santos Garruti, D. and Pinto, G.A.S., "Enzymatic maceration of Tabasco pepper: Effect on the yield, chemical and sensory aspects of the sauce", **Lwt**, 127, e109311, 2020.

Demir, S., "Influence of arbuscular mycorrhiza on some physiological growth parameters of pepper", ***Turkish Journal of Biology***, 28(2), 85-90, 2004.

Devi, J., Sagar, V., Kaswan, V., Ranjan, J.K., Kumar, R., Mishra, G.P., Dubey, R.K. and Verma, R.K., "Advances in breeding strategies of bell pepper (*Capsicum annuum* L. var. *grossum* Sendt.)", ***Advances in Plant Breeding Strategies: Vegetable Crops***, 9, 3-58, 2021.

Diagne, N., Ngom, M., Djighaly, P.I., Fall, D., Hocher, V. and Svistoonoff, S., "Roles of arbuscular mycorrhizal fungi on plant growth and performance: Importance in biotic and abiotic stressed regulation", ***Diversity***, 12(10), 370-381, 2020.

Díaz Franco, A., Alvarado Carrillo, M., Ortiz Chairez, F. and Grageda Cabrera, O., "Plant nutrition and fruit quality of pepper associated with arbuscular mycorrhizal in greenhouse", ***Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas***, 4(2), 315-321, 2013.

Dighton, J., Evaluation of mycorrhizal symbioses as defense in extreme environments, In: Defensive Mutualism in Microbial Symbiosis, J.F. White and M.S. Torres, ***CRC Press Boca Raton***, Brazil, 2009.

Ecco, L.G., Li, J., Fedel, M., Deflorian, F. and Pan, J., "EIS and in situ AFM study of barrier property and stability of waterborne and solventborne clear coats", ***Progress in Organic Coatings***, 77(3), 600-608, 2014.

Echlin, P., "The application of scanning electron microscopy to biological research", ***Philosophical Transactions of the Royal Society of London. B, Biological Sciences***, 261(837), 51-59, 1971.

Faisal, M., Ahmad, T. and Srivastava, N.K., "Influence of different levels of *Glomus macrocarpum* on growth and yield of chilli (*Capsicum annum* L.)", ***Indian Journal of Scientific Research***, 1(2), 97-99, 2010.

Fang, L., He, X., Zhang, X., Yang, Y., Liu, R., Shi, S., Shi, X. and Zhang, Y., "A small amount of nitrogen transfer from white clover to citrus seedling via common arbuscular mycorrhizal networks", *Agronomy*, 11(1), 32-39, 2020.

Feng, Y., Zhu, Y., Wan, J., Yang, X., Firempong, C.K., Yu, J. and Xu, X., "Enhanced oral bioavailability, reduced irritation and increased hypolipidemic activity of self-assembled capsaicin prodrug nanoparticles", *Journal of Functional Foods*, 44, 137-145, 2018.

Finlay, R.D., "Mycorrhizal fungi and their multifunctional roles", *Mycologist*, 18(2), 91-96, 2004.

Franczuk, J., Tartanus, M., Rosa, R., Zaniewicz-Bajkowska, A., Dębski, H., Andrejiová, A. and Dydiv, A., "The effect of mycorrhiza fungi and various mineral fertilizer levels on the growth, yield, and nutritional value of sweet pepper (*Capsicum annuum* L.)", *Agriculture*, 13(4), 857-864, 2023.

Gangadhar, B.H., Mishra, R.K., Pandian, G. and Park, S.W., "Comparative study of color, pungency, and biochemical composition in chili pepper (*Capsicum annuum*) under different light-emitting diode treatments", *HortScience*, 47(12), 1729-1735, 2012.

García- Garrido, J.M. and Ocampo, J.A., "Regulation of the plant defence response in arbuscular mycorrhizal symbiosis", *Journal of Experimental Botany*, 53(373), 1377-1386, 2002.

Garraña- Hernández, R., Monforte- González, M., Canto- Aguilar, A., Vázquez- Flota, F. and Orellana, R., "Enrichment of carbon dioxide in the atmosphere increases the capsaicinoids content in Habanero peppers (*Capsicum chinense* Jacq.)", *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 93(6), 1385-1388, 2013.

Gashua, I.B., Abba, A.M. and Gwayo, G.A., "Occurrence of arbuscular mycorrhizal fungi in chilli peppers (*Capsicum annuum* L.) grown in sahelian soil", *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 4(2), 419-425, 2015.

Geleta, L.F. and Labuschagne, M.T., "Combining ability and heritability for vitamin C and total soluble solids in pepper (*Capsicum annuum* L.)", *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 86(9), 1317-1320, 2006.

Gerdemann, J.W. and Nicolson, T.H., "Spores of mycorrhizal endogone extracted from soil by wet sieving and decanting", *Transactions of the British Mycological Society*, 46(2), 235-244, 1963.

Giovannetti, M. and Mosse, B., "An evaluation of techniques for measuring vesicular arbuscular mycorrhizal infection in roots", *New Phytologist*, 1, 489-500, 1980.

González-Zamora, A., Sierra-Campos, E., Luna-Ortega, J.G., Pérez-Morales, R., Ortiz, J.C.R. and García-Hernández, J.L., "Characterization of different capsicum varieties by evaluation of their capsaicinoids content by high performance liquid chromatography, determination of pungency and effect of high temperature", *Molecules*, 18(11), 13471-13486, 2013.

Gorzelak, M.A., Asay, A.K., Pickles, B.J. and Simard, S.W., "Inter-plant communication through mycorrhizal networks mediates complex adaptive behaviour in plant communities", *AoB Plants*, 7, 50-56, 2015.

Gradinaru, T.-C., Petran, M., Dragos, D. and Gilca, M., "PlantMolecularTasteDB: a database of taste active phytochemicals", *Frontiers in Pharmacology*, 12, 751712, 2022.

Gram, D.X., Hansen, A.J., Wilken, M., Elm, T., Svendsen, O., Carr, R.D., Ahrén, B. and Brand, C.L., "Plasma calcitonin gene-related peptide is increased prior to obesity, and sensory nerve desensitization by capsaicin improves oral glucose tolerance in obese Zucker rats", *European Journal of Endocrinology*, 153(6), 963-969, 2005.

Grusak, M.A., "Plant Macro- and Micronutrient Minerals", *Encyclopedia of Life Sciences*, 1, 1-5, 2001.

Gurung, T., Techawongstien, S., Suriharn, B. and Techawongstien, S., "Impact of environments on the accumulation of capsaicinoids in *Capsicum spp*", **HortScience**, 46(12), 1576-1581, 2011.

Gurung, T., Techawongstien, S., Suriharn, B. and Techawongstien, S., "Stability analysis of yield and capsaicinoids content in chili (*Capsicum spp.*) grown across six environments", **Euphytica**, 187, 11-18, 2012.

Haak, D.C., McGinnis, L.A., Levey, D.J. and Tewksbury, J.J., "Why are not all chilies hot? A trade-off limits pungency", **Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences**, 279(1735), 2012-2017, 2012.

Hashem, A., Alqarawi, A.A., Radhakrishnan, R., Al-Arjani, A.-B.F., Aldehaish, H.A., Egamberdieva, D. and Abd_Allah, E.F., "Arbuscular mycorrhizal fungi regulate the oxidative system, hormones and ionic equilibrium to trigger salt stress tolerance in *Cucumis sativus* L", **Saudi Journal of Biological Sciences**, 25(6), 1102-1114, 2018.

He, T., Wang, M., Tian, Z., Zhang, J., Liu, Y., Zhang, Y., Wang, P. and Xue, Y., "Sex-dependent difference in the association between frequency of spicy food consumption and risk of hypertension in Chinese adults", **European Journal of Nutrition**, 58, 2449-2461, 2019.

Heath, R.L. and Packer, L., "Photoperoxidation in isolated chloroplasts: I. Kinetics and stoichiometry of fatty acid peroxidation", **Archives of Biochemistry and Biophysics**, 125(1), 189-198, 1968.

Hernández- Pérez, T., Gómez- García, M.d.R., Valverde, M.E. and Paredes- López, O., "*Capsicum annuum* (hot pepper): An ancient Latin- American crop with outstanding bioactive compounds and nutraceutical potential. A review", **Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety**, 19(6), 2972-2993, 2020.

Hirrel, M.C. and Gerdemann, J.W., "Improved growth of onion and bell pepper in saline soils by two vesicular- arbuscular mycorrhizal fungi", **Soil Science Society of America Journal**, 44(3), 654-655, 1980.

Hui, Y.H., Handbook of Fruits and Fruit Processing, **John Wiley & Sons**, New York, 2006.

Hurley, J.D., Akers, A.T., Friedman, J.R., Nolan, N.A., Brown, K.C. and Dasgupta, P., "Non-pungent long chain capsaicin-analogs arvanil and olvanil display better anti-invasive activity than capsaicin in human small cell lung cancers", **Cell Adhesion & Migration**, 11(1), 80-97, 2017.

İşlek, C., Serbest ve tutuklanmış *Capsicum annuum* L. hücre süspansiyon kültürlerinde kapsaisin üretimi üzerine bazı uyarıcıların etkisi, Doktora Tezi, **Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Ankara, s. 2009.

Jaiswal, V., Gahlaut, V., Kumar, N. and Ramchiary, N., "Genetics, genomics and breeding of chili pepper *Capsicum frutescens* L. and other *Capsicum* species", **Advances in Plant Breeding Strategies: Vegetable Crops: Volume 9: Fruits and Young Shoots**, 1, 59-86, 2021.

Jamiołkowska, A. and Michalek, W., "Effect of mycorrhiza inoculation of pepper seedlings (*Capsicum annuum* L.) on the growth and protection against *Fusarium oxysporum* infection", **Acta Scientiarum Polonorum-Hortorum Cultus**, 18(1), 161-169, 2019.

Jeeatid, N., Suriharn, B., Techawongstien, S., Chanthai, S., Bosland, P.W. and Techawongstien, S., "Evaluation of the effect of genotype-by-environment interaction on capsaicinoid production in hot pepper hybrids (*Capsicum chinense* Jacq.) under controlled environment", **Scientia Horticulturae**, 235, 334-339, 2018.

Jia, L., Yu, L., Li, R., Yan, X. and Zhang, Z., "Synthesis and solution behavior of hydrophobically associating polyacrylamide containing capsaicin- like moieties", **Journal of Applied Polymer Science**, 130(3), 1794-1804, 2013.

Joe, E. and Ringman, J.M., "Cognitive symptoms of Alzheimer's disease: clinical management and prevention", **BMJ**, 367, e16217, 2019.

Johansson, M., Stomrud, E., Lindberg, O., Westman, E., Johansson, P.M., van Westen, D., Mattsson, N. and Hansson, O., "Apathy and anxiety are early markers of Alzheimer's disease", *Neurobiology of Aging*, 85, 74-82, 2020.

Kadowaki, K., Yamamoto, S., Sato, H., Tanabe, A.S., Hidaka, A. and Toju, H., "Mycorrhizal fungi mediate the direction and strength of plant–soil feedbacks differently between arbuscular mycorrhizal and ectomycorrhizal communities", *Communications Biology*, 1(1), 196-204, 2018.

Karlsson, S., Scheurink, A., Steffens, A. and Ahren, B., "Increased insulin-secretion and glucose-tolerance after neonatal capsaicin in mice", *Diabetologia*, 37, 43-43, 1994.

Kearney, P.M., Whelton, M., Reynolds, K., Muntner, P., Whelton, P.K. and He, J., "Global burden of hypertension: analysis of worldwide data", *The Lancet*, 365(9455), 217-223, 2005.

Kehie, M., Kumaria, S. and Tandon, P., "Biotechnological enhancement of capsaicin biosynthesis in cell suspension cultures of Naga King Chili (*Capsicum chinense* Jacq.)", *Bioprocess and Biosystems Engineering*, 39, 205-210, 2016.

Khoury, C.K., Carver, D., Barchenger, D.W., Barboza, G.E., van Zonneveld, M., Jarret, R., Bohs, L., Kantar, M., Uchanski, M. and Mercer, K., "Modelled distributions and conservation status of the wild relatives of chile peppers (*Capsicum* L.)", *Diversity and Distributions*, 26(2), 209-225, 2020.

Kim, J.S., Park, M., Lee, D.J. and Kim, B.D., "Characterization of putative capsaicin synthase promoter activity", *Molecules and Cells*, 28, 331-339, 2009.

Kim, M.K., Lee, M.A. and Lee, K.G., "Determination of compositional quality and volatile flavor characteristics of radish-based Kimchi suitable for Chinese consumers and its correlation to consumer acceptability", *Food Science and Biotechnology*, 27, 1265-1273, 2018.

Kirii, E., Goto, T., Yoshida, Y., Yasuba, K.I. and Tanaka, Y., "Non-pungency in a Japanese chili pepper landrace (*Capsicum annuum*) is caused by a novel loss-of-function Pun1 allele", **The Horticulture Journal**, 86(1), 61-69, 2017.

Koç, E. and İşlek, C., "Kadmiyumun biber (*Capsicum annuum* L.) fidelerinde fenilalanin amonyum liyaz aktivitesi ve lipid peroksidasyonu üzerine etkisi", **Artvin Çoruh Üniversitesi Orman Fakültesi Dergisi**, 16(1), 50-54, 2015.

Koç, E., İşlek, C. and Üstün, A.S., "Biber (*Capsicum annuum* L. cv. Kahramanmaraş-Acı) Fidelerinde Bakır Sülfatın (CuSO₄) Fenilalanin amonyum liyaz (PAL) enzim aktivitesi, fenolik maddeler ve toplam klorofil üzerine etkisi", **Süleyman demirel üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi**, 13(2), 128-131, 2014.

Koç, E., Üstün, A.S., İşlek, C. and Arıcı, Y.K., "Defence responses in leaves of resistant and susceptible pepper (*Capsicum annuum* L.) cultivars infected with different inoculum concentrations of *Phytophthora capsici* Leon", **Scientia Horticulturae**, 128(4), 434-442, 2011.

Koeda, S., Sato, K., Saito, H., Nagano, A.J., Yasugi, M., Kudoh, H. and Tanaka, Y., "Mutation in the putative ketoacyl-ACP reductase CaKR1 induces loss of pungency in *Capsicum*", **Theoretical and Applied Genetics**, 132, 65-80, 2019.

Koffi-Nevry, R., Kouassi, K.C., Nanga, Z.Y., Koussémon, M. and Loukou, G.Y., "Antibacterial activity of two bell pepper extracts: *Capsicum annuum* L. and *Capsicum frutescens*", **International Journal of Food Properties**, 15(5), 961-971, 2012.

Koffi, A.C., Koffi, A.R., Kossonou, Y.K. and Koffi-Nevry, R., "Activité antimicrobienne et composition phytochimique d'extraits de piment "*Capsicum* sp."", **Pharmacopée et Médecine Traditionnelle Africaine**, 20(2), 29-38, 2022.

Koopmans, S.J., Leighton, B. and DeFronzo, R.A., "Neonatal de-afferentation of capsaicin-sensitive sensory nerves increases in vivo insulin sensitivity in conscious adult rats", **Diabetologia**, 41, 813-820, 1998.

Kopta, T., Sekara, A., Pokluda, R., Ferby, V. and Caruso, G., "Screening of chilli pepper genotypes as a source of capsaicinoids and antioxidants under conditions of simulated drought stress", ***Plants***, 9(3), 364-371, 2020.

Kumar, O.A. and Tata, S.S., "Ascorbic acid contents in chili peppers (*Capsicum* L.)", ***Notulae Scientia Biologicae***, 1(1), 50-52, 2009.

Kumar, S., Rani, R., Dilbaghi, N., Tankeshwar, K. and Kim, K.-H., "Carbon nanotubes: a novel material for multifaceted applications in human healthcare", ***Chemical Society Reviews***, 46(1), 158-196, 2017.

Kwon, Y., "Estimation of dietary capsaicinoid exposure in Korea and assessment of its health effects", ***Nutrients***, 13(7), 2461-2471, 2021.

Lei, X., Ju, L.X. and Zhao, C.Z., "Cloning and plant expression vector construction of CcCAD1 gene in *Capsicum chinense*", ***Molecular Plant Breeding***, 18(16), 5373-5379, 2020.

Li, B., Yang, M., Shi, R. and Ye, M., "Insecticidal activity of natural capsaicinoids against several agricultural insects", ***Natural Product Communications***, 14(7), 1934578-19862695, 2019.

Li, L.Y., Tan, T.C., Liong, M.T. and Easa, A.M., "Preparation and evaluation of chili powder-enriched layered noodles", ***LWT-Food Science and Technology***, 59(1), 566-571, 2014.

Lichtenthaler, H.K., "Chlorophylls and carotenoids: pigments of photosynthetic biomembranes", ***Methods in Enzymology***, 148, 350-382, 1987.

Light, A., Heininger, A., Wessman, K., Frutiger, K. and White, R.J., "8% capsaicin patch as analgesia for severe treprostinil infusion site pain", ***Pain Medicine***, 18(12), 2515-2517, 2017.

Lin, Y.T., Wang, H.C., Hsu, Y.C., Cho, C.L., Yang, M.Y. and Chien, C.Y., "Capsaicin induces autophagy and apoptosis in human nasopharyngeal carcinoma cells by downregulating the PI3K/AKT/mTOR pathway", ***International Journal of Molecular Sciences***, 18(7), 1343-1357, 2017.

Liu, C.H., Bu, X.L., Wang, J., Zhang, T., Xiang, Y., Shen, L.L., Wang, Q.H., Deng, B., Wang, X. and Zhu, C., "The associations between a capsaicin-rich diet and blood amyloid- β levels and cognitive function", ***Journal of Alzheimer's Disease***, 52(3), 1081-1088, 2016.

Liu, S., Li, Y. and Zhao, D., "Cloning and expression analysis of RksAGL gene in seedless chestnut rose (*Rosa kweichonensis* var. *sterilis*)", ***Genomics and Applied Biology***, 34(3), 579-586, 2015a.

Liu, Z., Zhu, P., Tao, Y., Shen, C., Wang, S., Zhao, L., Wu, H., Fan, F., Lin, C. and Chen, C., "Cancer-promoting effect of capsaicin on DMBA/TPA-induced skin tumorigenesis by modulating inflammation, Erk and p38 in mice", ***Food and Chemical Toxicology***, 81, 1-8, 2015b.

Lu, M., Chen, C., Lan, Y., Xiao, J., Li, R., Huang, J., Huang, Q., Cao, Y. and Ho, C.-T., "Capsaicin—The major bioactive ingredient of chili peppers: Bio-efficacy and delivery systems", ***Food & Function***, 11(4), 2848-2860, 2020.

Majkowska-Gadomska, J., Dobrowolski, A. and Mikulewicz, E., "The effect of mycorrhizal inoculum on the leaf greenness index and yield of tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) plants grown in a heated plastic tunnel", ***Acta Agrophysica***, 23(3), 445–453, 2016.

Marihal, A.K., Pradeep, S.M. and Jagadeesh, K.S., "Effect of commercial mycorrhizal inoculant on growth and yield of chilli (*Capsicum annum* L.) in field conditions", ***Karnataka Journal of Agricultural Sciences***, 24(4), 589–590, 2012.

McLean, C. and Lawrie, A.C., "Patterns of root colonization in epacridaceous plants collected from different sites", ***Annals of Botany***, 77(4), 405-412, 1996.

Medina-Lara, F., Echevarría-Machado, I., Pacheco-Arjona, R., Ruiz-Lau, N., Guzmán-Antonio, A. and Martínez-Estevez, M., "Influence of nitrogen and potassium fertilization on fruiting and capsaicin content in habanero pepper (*Capsicum chinense* Jacq.)", **HortScience**, 43(5), 1549-1554, 2008.

Mehravar, E., Iturrospe, A., Arbe, A., Leiza, J.R. and Asua, J.M., "Acrylic-based composite latexes containing nano-sized liquid crystalline domains", **Polymer**, 108, 288-300, 2017.

Mena-Violante, H.G., Ocampo-Jiménez, O., Dendooven, L., Martínez-Soto, G., González-Castañeda, J., Davies, F.T. and Olalde-Portugal, V., "Arbuscular mycorrhizal fungi enhance fruit growth and quality of chile ancho (*Capsicum annum* L. cv San Luis) plants exposed to drought", **Mycorrhiza**, 16, 261-267, 2006.

Monforte- González, M., Guzmán- Antonio, A., Uuh- Chim, F. and Vázquez- Flota, F., "Capsaicin accumulation is related to nitrate content in placentas of habanero peppers (*Capsicum chinense* Jacq.)", **Journal of the Science of Food and Agriculture**, 90(5), 764-768, 2010.

Moran, P. and Coats, B., "Biological sample preparation for SEM imaging of porcine retina", **Microscopy Today**, 20(2), 28-31, 2012.

Morrow, W., The Chile Pepper Encyclopedia by Dave De Witt, **William Morrow Company & Company Inc**, New York, 1999.

Mosqueda-Solís, A., de Mendoza, I.L.I., Aguirre-Urizar, J.M. and Mosqueda-Taylor, A., "Capsaicin intake and oral carcinogenesis: A systematic review", **Medicina Oral, Patología Oral Y Cirugía Bucal**, 26(2), 261-268, 2021.

Mózsik, G., Vincze, Á. and Szolcsányi, J., "Four response stages of capsaicin- sensitive primary afferent neurons to capsaicin and its analog: Gastric acid secretion, gastric mucosal damage and protection", **Journal of Gastroenterology and Hepatology**, 16(10), 1093-1097, 2001.

Murashige, T. and Skoog, F., "A revised medium for rapid growth and bio assays with tobacco tissue cultures", *Physiologia Plantarum*, 15(3), 473-497, 1962.

Namdeo, A.G., "Plant cell elicitation for production of secondary metabolites: a review", *Pharmacognosy Reviews*, 1(1), 69-79, 2007.

Niu, J., Rasmussen, P.E., Wheeler, A., Williams, R. and Chénier, M., "Evaluation of airborne particulate matter and metals data in personal, indoor and outdoor environments using ED-XRF and ICP-MS and co-located duplicate samples", *Atmospheric Environment*, 44(2), 235-245, 2010.

Ochoa-Alejo, N. and Ramirez-Malagon, R., "In vitro chili pepper biotechnology", *In Vitro Cellular & Developmental Biology-Plant*, 37, 701-729, 2001.

Ortas, I., Sari, N., Akpınar, Ç. and Yetisir, H., "Screening mycorrhiza species for plant growth, P and Zn uptake in pepper seedling grown under greenhouse conditions", *Scientia Horticulturae*, 128(2), 92-98, 2011.

Özgenen, H., Biberde kökboğazı yanıklığı (*Phytophthora capsici* Lenion)'na karşı mikorizal funguslar, salisilik asit ve DL-β-amino-Nbutirik asit ile dayanıklılığın teşvik edilmesi, Doktora Tezi, *Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Adana, s. 122, 2004.

Özyılmaz, Ü., "Fitopatoloji laboratuvarında sterilizasyon ve dezenfeksiyon yöntemleri", *Adnan Menderes Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, 12(1), 129-138, 2015.

Pascholati, S.F., Nicholson, R.L. and Butler, L.G., "Phenylalanine ammonia- lyase activity and anthocyanin accumulation in wounded maize mesocotyls", *Journal of Phytopathology*, 115(2), 165-172, 1986.

Peña-Alvarez, A., Ramírez-Maya, E. and Alvarado-Suárez, L.Á., "Analysis of capsaicin and dihydrocapsaicin in peppers and pepper sauces by solid phase microextraction–gas chromatography–mass spectrometry", *Journal of Chromatography A*, 1216(14), 2843-2847, 2009.

Pereira, J.A.P., Vieira, I.J.C., Freitas, M.S.M., Prins, C.L., Martins, M.A. and Rodrigues, R., "Effects of arbuscular mycorrhizal fungi on *Capsicum spp*", ***The Journal of Agricultural Science***, 154(5), 828-849, 2016.

Pereira, L.F.P., Studies on phenylalanine ammonia-lyase and peroxidases in cassava, *Manihot esculenta* Crantz, during root post-harvest deterioration and interaction with *Xanthomonas*, Doctoral Dissertation, ***University of Guelph***, Canada, s. 1998.

Phillips, J.M. and Hayman, D.S., "Improved procedures for clearing roots and staining parasitic and vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi for rapid assessment of infection", ***Transactions of the British mycological Society***, 55(1), 158-168, 1970.

Phimchan, P., Chanthai, S., Bosland, P.W. and Techawongstien, S., "Enzymatic changes in phenylalanine ammonia-lyase, cinnamic-4-hydroxylase, capsaicin synthase, and peroxidase activities in *Capsicum* under drought stress", ***Journal of Agricultural and Food Chemistry***, 62(29), 7057-7062, 2014.

Phimchan, P., Techawongstien, S., Chanthai, S. and Bosland, P.W., "Impact of drought stress on the accumulation of capsaicinoids in *Capsicum* cultivars with different initial capsaicinoid levels", ***HortScience***, 47(9), 1204-1209, 2012.

Popelka, P., Jevinová, P., Šmejkal, K. and Roba, P., "Determination of capsaicin content and pungency level of different fresh and dried chilli peppers", ***Folia Veterinaria***, 61(2), 11-16, 2017.

Poyrazoğlu, E.S., Yemiş, O., Kadakal, Ç. and Artık, N., "Determination of capsaicinoid profile of different chilli peppers grown in Turkey", ***Journal of the Science of Food and Agriculture***, 85(9), 1435-1438, 2005.

Pozo, M.J. and Azcón-Aguilar, C., "Unraveling mycorrhiza-induced resistance", ***Current Opinion in Plant Biology***, 10(4), 393-398, 2007.

Prince, M., Bryce, R., Albanese, E., Wimo, A., Ribeiro, W. and Ferri, C.P., "The global prevalence of dementia: a systematic review and metaanalysis", *Alzheimer's & Dementia*, 9(1), 63-75, 2013.

Punthakee, Z., Goldenberg, R. and Katz, P., "Definition, classification and diagnosis of diabetes, prediabetes and metabolic syndrome", *Canadian Journal of Diabetes*, 42, 10-15, 2018.

Raghavendra Kumar, M., Ashwin, R. and Bagyaraj, D.J., "Screening arbuscular mycorrhizal fungi in order to select the best for alleviating wilt disease complex of capsicum", *Proceedings of the National Academy of Sciences, India Section B: Biological Sciences*, 88, 679-684, 2018.

Rahman, M.J. and Inden, H., "Effect of nutrient solution and temperature on capsaicin content and yield contributing characteristics in six sweet pepper (*Capsicum annuum* L.) cultivars", *Journal of Food, Agriculture & Environment*, 10(1), 524-529, 2012.

Ríos-Silva, M., Santos-Álvarez, R., Trujillo, X., Cárdenas-María, R.Y., López-Zamudio, M., Bricio-Barrios, J.A., Leal, C., Saavedra-Molina, A., Huerta-Trujillo, M. and Espinoza-Mejía, K., "Effects of chronic administration of capsaicin on biomarkers of kidney injury in male Wistar rats with experimental diabetes", *Molecules*, 24(1), 36-47, 2018.

Rodas-Junco, B.A., Cab-Guillen, Y., Muñoz-Sanchez, J.A., Vázquez-Flota, F., Monforte-Gonzalez, M. and Hernández-Sotomayor, S.M.T., "Salicylic acid induces vanillin synthesis through the phospholipid signaling pathway in *Capsicum chinense* cell cultures", *Plant Signaling & Behavior*, 8(10), e26752, 2013.

Rollyson, W.D., Stover, C.A., Brown, K.C., Perry, H.E., Stevenson, C.D., McNees, C.A., Ball, J.G., Valentovic, M.A. and Dasgupta, P., "Bioavailability of capsaicin and its implications for drug delivery", *Journal of Controlled Release*, 196, 96-105, 2014.

Román-García, F., Concentration of plant development regulators induced by endomycorrhizal fungi in two cultivars from Chile (*Capsicum annuum* L.), PhD Thesis, **University of Colima**, Mexico, s. 85, 2003.

Ruiz-Lau, N., Medina-Lara, F., Minero-García, Y., Zamudio-Moreno, E., Guzmán-Antonio, A., Echevarría-Machado, I. and Martínez-Estévez, M., "Water deficit affects the accumulation of capsaicinoids in fruits of *Capsicum chinense* Jacq", **HortScience**, 46(3), 487-492, 2011.

Ruiz-Lozano, J.M., "Arbuscular mycorrhizal symbiosis and alleviation of osmotic stress. New perspectives for molecular studies", **Mycorrhiza**, 13, 309-317, 2003.

Ruscitti, M., Arango, M. and Beltrano, J., "Improvement of copper stress tolerance in pepper plants (*Capsicum annuum* L.) by inoculation with arbuscular mycorrhizal fungi", **Theoretical and Experimental Plant Physiology**, 29, 37-49, 2017.

Samota, M.K., Sasi, M., Awana, M., Yadav, O.P., Amitha Mithra, S.V., Tyagi, A., Kumar, S. and Singh, A., "Elicitor-induced biochemical and molecular manifestations to improve drought tolerance in rice (*Oryza sativa* L.) through seed-priming", **Frontiers in Plant Science**, 8, 934-942, 2017.

Sanatombi, K. and Rajkumari, S., "Effect of processing on quality of pepper: A review", **Food Reviews International**, 36(6), 626-643, 2020.

Sanchez, A.M., Sanchez, M.G., Malagarie-Cazenave, S., Olea, N. and Diaz-Laviada, I., "Induction of apoptosis in prostate tumor PC-3 cells and inhibition of xenograft prostate tumor growth by the vanilloid capsaicin", **Apoptosis**, 11, 89-99, 2006.

Sandhya, M.V.S. and Vijayakumar, N., "Comparative study on antimicrobial activity of eight capsicum species-A novel therapeutic compound", **Indian Journal of Research**, 5(6), 103-107, 2016.

Santander, C., Sanhueza, M., Olave, J., Borie, F., Valentine, A. and Cornejo, P., "Arbuscular mycorrhizal colonization promotes the tolerance to salt stress in lettuce

plants through an efficient modification of ionic balance", *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 19, 321-331, 2019.

Schüßler, A. and Walker, C., Evolution of the 'plant-symbiotic' fungal phylum, glomeromycota, In: The Mycota XIV - Evolution of Fungi and Fungallike Organisms, S. Pöggeler and J. Wöstemeyer, **Springer**, Berlin, 2011.

Schüssler, A. and Walker, C., The Glomeromycota: A Species List With New Families and New Genera, *The Royal Botanic Garden Kew, Botanische Staatssammlung Munich, and Oregon State University*, Germany, 2010.

Selosse, M.-A. and Le Tacon, F., "The land flora: a phototroph-fungus partnership?", *Trends in Ecology & Evolution*, 13(1), 15-20, 1998.

Selvakumar, G. and Thamizhiniyan, P., "The effect of the arbuscular mycorrhizal (AM) fungus *Glomus intraradices* on the growth and yield of chilli (*Capsicum annuum* L.) under salinity stress", *World Applied Sciences Journal*, 14(8), 1209-1214, 2011.

Sensoy, S., Demir, S., Turkmen, O., Erdinc, C. and Savur, O.B., "Responses of some different pepper (*Capsicum annuum* L.) genotypes to inoculation with two different arbuscular mycorrhizal fungi", *Scientia Horticulturae*, 113(1), 92-95, 2007.

Shah, I., Shah, M.A., Nawaz, M.A., Pervez, S., Noreen, N., Vargas-de la Cruz, C., Khan, F., Blundell, R., Briffa, J. and Azzopardi, J., Analysis of other phenolics (capsaicin, gingerol, and alkylresorcinols), In: Recent Advances in Natural Products Analysis, A.S. Silva, S.F. Nabavi, M. Saeedi and S.M. Nabavi, **Elsevier**, Netherland, 2020.

Shalaby, M.A., Nounou, H.A. and Deif, M.M., "The potential value of capsaicin in modulating cognitive functions in a rat model of streptozotocin-induced Alzheimer's disease", *The Egyptian Journal of Neurology, Psychiatry and Neurosurgery*, 55, 1-13, 2019.

Sharif, M. and Claassen, N., "Action mechanisms of arbuscular mycorrhizal fungi in phosphorus uptake by *Capsicum annuum* L", *Pedosphere*, 21(4), 502-511, 2011.

Shi, Z., El-Obeid, T., Riley, M., Li, M., Page, A. and Liu, J., "High chili intake and cognitive function among 4582 adults: an open cohort study over 15 years", **Nutrients**, 11(5), 1183, 2019.

Shi, Z., Riley, M., Brown, A. and Page, A., "Chilli intake is inversely associated with hypertension among adults", **Clinical Nutrition ESPEN**, 23, 67-72, 2018.

Shimada, K., Fujikawa, K., Yahara, K. and Nakamura, T., "Antioxidative properties of xanthan on the autoxidation of soybean oil in cyclodextrin emulsion", **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, 40(6), 945-948, 1992.

Shin, H.W., Jung, S.M., Lee, H.J., Park, T.H., Yoon, J.H., Lee, K.S., Kim, J.T. and Lee, J.D., "Progress in alternative antifouling technologies for healthy biodiversity", **Journal of Environmental Biology**, 40(5), 977-982, 2019.

Si, W., Gao, Y., Mei, X., Wu, C., Li, J. and Zhang, J., "Mesoporous silica nanoparticles loaded with capsaicin and their oxidation resistance in meat preservation", **Food Chemistry**, 344, e128737, 2021.

Si, W., Liang, Y., Ma, K.Y., Chung, H.Y. and Chen, Z.-Y., "Antioxidant activity of capsaicinoid in canola oil", **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, 60(24), 6230-6234, 2012.

Singleton, V.L., "Lamuela-Raventos: Analysis of total phenoles and other oxidation substartes and antioxidants by means of folin-ciocalteu reagent", **Methods in Enzymology**, 299, 152-178, 1999.

Singleton, V.L. and Rossi, J.A., "Colorimetry of total phenolics with phosphomolybdic-phosphotungstic acid reagents", **American journal of Enology and Viticulture**, 16(3), 144-158, 1965.

Sinha, S.N., Bhatnagar, V.K., Doctor, P., Toteja, G.S., Agnihotri, N.P. and Kalra, R.L., "A novel method for pesticide analysis in refined sugar samples using a gas

chromatography–mass spectrometer (GC–MS/MS) and simple solvent extraction method", ***Food Chemistry***, 126(1), 379-386, 2011.

Spjut, R.W., "Limitations of a random screen: search for new anticancer drugs in higher plants", ***Economic Botany***, 39, 266-288, 1985.

Srinivasan, K., "Biological activities of red pepper (*Capsicum annuum*) and its pungent principle capsaicin: a review", ***Critical Reviews in Food Science and Nutrition***, 56(9), 1488-1500, 2016.

Su, X., Yang, Z., Tan, K.B., Chen, J., Huang, J. and Li, Q., "Preparation and characterization of ethyl cellulose film modified with capsaicin", ***Carbohydrate Polymers***, 241, e116259, 2020.

Sumanta, N., Haque, C.I., Nishika, J. and Suprakash, R., "Spectrophotometric analysis of chlorophylls and carotenoids from commonly grown fern species by using various extracting solvents", ***Research Journal of Chemical Sciences***, 4(9), 63-69, 2014.

Sundaramoorthy, S., Raguchander, T., Ragupathi, N. and Samiyappan, R., "Combinatorial effect of endophytic and plant growth promoting rhizobacteria against wilt disease of *Capsicum annum* L. caused by *Fusarium solani*", ***Biological Control***, 60(1), 59-67, 2012.

Sung, Y., Chang, Y.Y. and Ni-Lun, T., "Capsaicin biosynthesis in water-stressed hot pepper fruits", ***Botanical Bulletin of Academia Sinica***, 46, 35-42, 2005.

Şalk, A., Arın, L., Deveci, M. and Polat, S., Özel Sebzecilik, ***Namık Kemal Üniversitesi Ziraat Fakültesi***, Tekirdağ, 2008.

Tallapragada, P., Dikshit, R. and Seshagiri, S., "Influence of *Rhizophagus spp.* and *Burkholderia seminalis* on the growth of tomato (*Lycopersicon esculatum*) and bell pepper (*Capsicum annuum*) under drought stress", ***Communications in Soil Science and Plant Analysis***, 47(17), 1975-1984, 2016.

Tanwar, A., Aggarwal, A., Kadian, N. and Gupta, A., "Arbuscular mycorrhizal inoculation and super phosphate application influence plant growth and yield of *Capsicum annum*", ***Journal of Soil Science and Plant Nutrition***, 13(1), 55-66, 2013.

Teste, F.P., Jones, M.D. and Dickie, I.A., "Dual- mycorrhizal plants: their ecology and relevance", ***New Phytologist***, 225(5), 1835-1851, 2020.

Thiele, R., Mueller-Seitz, E. and Petz, M., "Chili pepper fruits: presumed precursors of fatty acids characteristic for capsaicinoids", ***Journal of Agricultural and Food Chemistry***, 56(11), 4219-4224, 2008.

Türkoğlu, A., Castellano, M.A., Trappe, J. and Güngör, M.Y., "Turkish truffles I: 18 new records for Turkey", ***Turkish Journal of Botany***, 39(2), 359-376, 2015.

Vallee, B.L. and Auld, D.S., "Zinc coordination, function, and structure of zinc enzymes and other proteins", ***Biochemistry***, 29(24), 5647-5659, 1990.

Van Der Heijden, M.G.A. and Horton, T.R., "Socialism in soil? The importance of mycorrhizal fungal networks for facilitation in natural ecosystems", ***Journal of Ecology***, 97(6), 1139-1150, 2009.

Verma, N. and Shukla, S., "Impact of various factors responsible for fluctuation in plant secondary metabolites", ***Journal of Applied Research on Medicinal and Aromatic Plants***, 2(4), 105-113, 2015.

Wang, J., Gao, X., Wang, Q., Sun, H., Wang, X. and Gao, C., "Enhanced biofouling resistance of polyethersulfone membrane surface modified with capsaicin derivative and itaconic acid", ***Applied Surface Science***, 356, 467-474, 2015.

Wang, J., Shi, T., Yang, X., Han, W. and Zhou, Y., "Environmental risk assessment on capsaicin used as active substance for antifouling system on ships", ***Chemosphere***, 104, 85-90, 2014.

White, P.J. and Hammond, J.P., Phosphorus nutrition of terrestrial plants, In: The Ecophysiology of Plant-Phosphorus Interactions, P.J. White and J.P. Hammond, **Springer**, Netherlands, 2008.

Wipf, D., Krajinski, F., van Tuinen, D., Recorbet, G. and Courty, P.E., "Trading on the arbuscular mycorrhiza market: from arbuscules to common mycorrhizal networks", **New Phytologist**, 223(3), 1127-1142, 2019.

Wu, G., Jiang, X., Yu, L., Xia, S. and Yu, X., "Synthesis and quantum chemical calculation of benzamide derivatives containing capsaicin and their bacteriostatic and antifouling properties", **Journal of the Chinese Chemical Society**, 62(10), 861-870, 2015.

Xiao, Y., Zheng, L., Zou, X., Wang, J., Zhong, J. and Zhong, T., "Extracellular vesicles in type 2 diabetes mellitus: key roles in pathogenesis, complications, and therapy", **Journal of Extracellular Vesicles**, 8(1), e1625677, 2019.

Xing, F., Cheng, G. and Yi, K., "Study on the antimicrobial activities of the capsaicin microcapsules", **Journal of Applied Polymer Science**, 102(2), 1318-1321, 2006.

Xu, W., Liu, J., Ma, D., Yuan, G., Lu, Y. and Yang, Y., "Capsaicin reduces Alzheimer-associated tau changes in the hippocampus of type 2 diabetes rats", **PloS One**, 12(2), e0172477, 2017.

Yang, W.J., Neoh, K.G., Kang, E.T., Teo, S.L.M. and Rittschof, D., "Polymer brush coatings for combating marine biofouling", **Progress in Polymer Science**, 39(5), 1017-1042, 2014.

Yang, X.Y. and Du, G.H., Capsaicin, In: Natural Small Molecule Drugs From Plants, G.-H. Du, **Springer**, Singapore, 2018.

Yang, Z.H., Wang, X.H., Wang, H.P., Hu, L.Q., Zheng, X.M. and Li, S.W., "Capsaicin mediates cell death in bladder cancer T24 cells through reactive oxygen species production and mitochondrial depolarization", **Urology**, 75(3), 735-741, 2010.

Yebra, D.M., Kiil, S., Dam-Johansen, K. and Weinell, C., "Reaction rate estimation of controlled-release antifouling paint binders: Rosin-based systems", ***Progress in Organic Coatings***, 53(4), 256-275, 2005.

Yu, S.Q., Ma, S. and Wang, D.H., "Activation of TRPV1 prevents salt-induced kidney damage and hypertension after renal ischemia-reperfusion injury in rats", ***Kidney and Blood Pressure Research***, 43(4), 1285-1296, 2018.

Yu, S.Q., Ma, S. and Wang, D.H., "TRPV1 activation prevents renal ischemia-reperfusion injury-induced increase in salt sensitivity by suppressing renal sympathetic nerve activity", ***Current Hypertension Reviews***, 16(2), 148-155, 2020.

Yuan, L.J., Qin, Y., Wang, L., Zeng, Y., Chang, H., Wang, J., Wang, B., Wan, J., Chen, S.H. and Zhang, Q.Y., "Capsaicin-containing chili improved postprandial hyperglycemia, hyperinsulinemia, and fasting lipid disorders in women with gestational diabetes mellitus and lowered the incidence of large-for-gestational-age newborns", ***Clinical Nutrition***, 35(2), 388-393, 2016.

Zeng, M., Zhang, M., He, Z., Qin, F., Tao, G., Zhang, S., Gao, Y. and Chen, J., "Inhibitory profiles of chilli pepper and capsaicin on heterocyclic amine formation in roast beef patties", ***Food Chemistry***, 221, 404-411, 2017.

Zhang, J., Pan, M., Luo, C., Chen, X., Kong, J. and Zhou, T., "A novel composite paint (TiO₂/fluorinated acrylic nanocomposite) for antifouling application in marine environments", ***Journal of Environmental Chemical Engineering***, 4(2), 2545-2555, 2016a.

Zhang, Q.H., Hu, J.P., Wang, B.L. and Li, Y., "Effects of capsaicin and dihydrocapsaicin on human and rat liver microsomal CYP450 enzyme activities in vitro and in vivo", ***Journal of Asian Natural Products Research***, 14(4), 382-395, 2012.

Zhang, S., Ma, X., Zhang, L., Sun, H. and Liu, X., "Capsaicin reduces blood glucose by increasing insulin levels and glycogen content better than capsiate in streptozotocin-

induced diabetic rats", *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 65(11), 2323-2330, 2017.

Zhang, S., Wei, F. and Han, X., "An edible film of sodium alginate/pullulan incorporated with capsaicin", *New Journal of Chemistry*, 42(21), 17756-17761, 2018.

Zhang, W., Wu, D., Zhang, L., Zhao, C., Shu, H., Cheng, S., Wang, Z., Zhu, J. and Liu, P., "Identification and expression analysis of capsaicin biosynthesis pathway genes at genome level in *Capsicum chinense*", *Biotechnology & Biotechnological Equipment*, 36(1), 232-244, 2022.

Zhang, Z.X., Zhao, S.N., Liu, G.F., Huang, Z.M., Cao, Z.M., Cheng, S.H. and Lin, S.S., "Discovery of putative capsaicin biosynthetic genes by RNA-Seq and digital gene expression analysis of pepper", *Scientific Reports*, 6(1), e34121, 2016b.

Zhao, J., Wei, F., Xu, W. and Han, X., "Enhanced antibacterial performance of gelatin/chitosan film containing capsaicin loaded MOFs for food packaging", *Applied Surface Science*, 510, e145418, 2020.

Zhao, J.W., Zheng, Y., He, Y.X. and Weng, Q.Y., "Biological activity of capsaicin and its effects on development and fecundity in *Bemisia tabaci* (Gennadius)(Hemiptera: Aleyrodidae)", *The Journal of Applied Ecology*, 23(2), 531-535, 2012.

Zhou, J., Zhang, X., Yan, Y., Hu, J., Wang, H., Cai, Y. and Qu, J., "Preparation and characterization of a novel antibacterial acrylate polymer composite modified with capsaicin", *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 27(12), 3043-3052, 2019.

Zhu, M., Yu, X., Zheng, Z., Huang, J., Yang, X. and Shi, H., "Capsaicin suppressed activity of prostate cancer stem cells by inhibition of Wnt/ β -catenin pathway", *Phytotherapy Research*, 34(4), 817-824, 2020.

Zhu, X.C., Song, F.B., Liu, S.Q., Liu, T.D. and Zhou, X., "Arbuscular mycorrhizae improves photosynthesis and water status of *Zea mays* L. under drought stress", *Plant, Soil and Environment*, 58(4), 186-191, 2012.

ÖZ GEÇMİŞ

Şükrü Canpolat tarihinde doğdu. İlk ve orta öğrenimini tamamladı. Ankara Üniversitesi Biyoloji Bölümü'nden 2010 yılında mezun oldu. 2014 yılında Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Biyoloji Bölümü tezli yüksek lisans programına başladı. 2016 yılında yüksek lisans programından mezun oldu. 2017 yılından bu yana Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Biyoteknoloji Anabilim Dalında Doktora çalışmalarını sürdürmektedir. Aynı zamanda 2019 yılından itibaren Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarında öğretim görevlisi olarak çalışmaktadır. Evli ve iki çocuk babasıdır

TEZ ÇALIŞMASINDAN ÜRETİLEN ESERLER

Bu tez çalışmasından, 1 (bir) adet uluslararası makale ile 1 (bir) adet uluslararası bildiri üretilmiştir. Bu çalışmalar aşağıda sunulmuştur.

Canpolat, Ş. and İşlek, C., “The effect of arbuscular mycorrhiza on physiological and biochemical parameters and capsaicinoid production in *Capsicum annuum* L.: A comparative study of extraction methods and solvents”, ***Archives of Biological Sciences***, 75(3), 327-339, 2023.

Canpolat, Ş. and İşlek, C., “An Alternative Method for Preparing Mycorrhizal Root Samples for Scanning Electron Microscopy”, ***2nd International Congress of the Turkish Journal of Agriculture - Food Science and Technology***, 25-29 October 2021.

