



**T.C.
AMASYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**SÜS LAHANASININ KÖMÜR MADENİ ATIKLARININ ISLAHINDA
KULLANILABİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

BÜŞRA CABA

KASIM

BÜŞRA CABA	BIYOLOJİ ANABİLİM DALI	KASIM 2025
-------------------	-------------------------------	-------------------

**SÜS LAHANASININ KÖMÜR MADENİ ATIKLARININ ISLAHINDA
KULLANILABİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI**

Büşra CABA

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
BİYOLOJİ ANABİLİM DALI**

**Danışman
Dr. Öğr. Üyesi Veli ÇELİKTAŞ**

**AMASYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

KASIM 2025

Yüksek Lisans Tezi Kabul ve Onay Sayfası

Büşra CABA tarafından hazırlanan “Süs Lahanasının Kömür Madeni Atıklarının Islahında Kullanılabilirliğinin Araştırılması” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile Amasya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Biyoloji Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Veli ÇELİKTAŞ

Biyoloji Anabilim Dalı, Amasya Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum

Başkan: Doç. Dr. Ekrem BÖLÜKBAŞI

Biyoloji Anabilim Dalı, Amasya Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum

Üye: Dr. Öğr. Üyesi Sara YASEMİN BENELLİ

Süs Bitkileri Yetiştiriciliği ve Islahı Anabilim Dalı, Siirt Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum

Tez Savunma Tarihi: 12/11/2025

Jüri tarafından kabul edilen bu tezin Yüksek Lisans Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum.

.....

Prof. Dr. Ümit YILDIRIM

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ETİK BEYAN

Amasya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu, bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Büşra CABA

12/11/2025

SÜS LAHANASININ KÖMÜR MADENİ ATIKLARININ ISLAHINDA
KULLANILABİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI
(Yüksek Lisans Tezi)

Büşra CABA

AMASYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Kasım 2025

ÖZET

Madencilik faaliyetleri, ağır metaller ve diğer toksik bileşiklerin çevreye yayılmasına neden olarak giderek artan çevre kirliliği problemlerinin kaynaklarından biri olarak değerlendirilmektedir. Bu faaliyetler; toprak, su ve bitki örtüsü üzerinde önemli ekolojik riskler oluşturarak ekosistemleri olumsuz yönde etkilemektedir. Bu nedenle madencilik kaynaklı kirliliğin izlenmesi, kontrolü ve azaltılmasına yönelik çevresel stratejilerin geliştirilmesi bir gerekliliktir. Bu çalışmada, Kamome Red F1, Kamome Pink F1 ve Kamome White F1 süs lahanası (*Brassica oleracea* L. var. *acephala*) çeşitleri kullanılarak bu bitkilerin kömür madeni atıklarının ıslahında kullanılabilme potansiyellerinin araştırılması amaçlanmıştır. Bu amaçla farklı konsantrasyonlarda kömür madeni atığı içeren (0, %10, %20, %40 ve %60) yetiştirme ortamları hazırlanmış ve her çeşit için her dozda dört saksı olacak şekilde toplam 60 saksı kurulmuştur. Hazırlanan tüm yetiştirme ortamlarında saturasyon, kireç, tuzluluk, pH, organik madde ile makro ve mikro element analizleri gerçekleştirilmiştir. Yetiştirilen ve hasat edilen bitkilerde ise sürgün boyu, taze ve kuru ağırlık, klorofil pigment içerikleri, prolin düzeyi, lipit peroksidasyonu, elektrolit sızıntısı analizleri yapılmış; ayrıca yaprak doku örneklerinden katalaz (*CAT*) ve süperoksit dismutaz (*SOD*) gen ekspresyon düzeyleri belirlenmiştir. Elde edilen bulgular, yetiştirme ortamlarında maden atığı oranı arttıkça ortamın fiziksel ve kimyasal özelliklerinde belirgin değişimler meydana geldiğini göstermiştir. Klorofil içerikleri genel olarak büyük değişim göstermemiş, özellikle Kamome White F1 çeşidinde pigment düzeylerinin korunması fotosentezin stres altında daha az etkilendiğini göstermiştir. Kamome Red F1 çeşidinde yüksek maden atığı uygulamalarında prolin artışı gözlenirken, Kamome White F1 çeşidinde malondialdehit konsantrasyonlarının ve elektrolit sızıntısı değerlerinin düşük kalması membran hasarının sınırlı olduğunu ortaya koymuştur. *CAT* ve *SOD* gen ekspresyonları tüm çeşitlerde özellikle %20 ve %40 maden atığı içeren ortamlarda en yüksek düzeye ulaşmıştır. Tüm veriler birlikte değerlendirildiğinde, Kamome White F1 çeşidinin kömür madeni atığına karşı en dengeli fizyolojik, biyokimyasal ve moleküler yanıtı gösterdiği sonucuna varılmıştır.

Sayfa Adedi : 78
Anahtar Kelimeler : Süs lahanası, Brassicaceae, Fitoremediasyon
Danışman : Dr. Öğr. Üyesi Veli ÇELİKTAŞ

INVESTIGATION OF THE USABILITY OF ORNAMENTAL KALE IN REHABILITATION OF COAL MINE WASTES

(M. Sc. Thesis)

Büşra CABA

AMASYA UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

November 2025

ABSTRACT

Mining activities are considered among the sources of environmental pollution, as they lead to the release of heavy metals and other toxic compounds into the environment. These activities pose significant ecological risks to soil, water and vegetation, thereby negatively affecting overall ecosystems. Therefore, the development of environmental strategies for monitoring, controlling and reducing mining-related pollution is a necessity. In this study, the ornamental kale (*Brassica oleracea* L. var. *acephala*) cultivars Kamome Red F1, Kamome Pink F1 and Kamome White F1 were used to investigate their potential for the remediation of coal mine waste. For this purpose, growth media containing different concentrations of coal mine waste (0, 10%, 20%, 40% and 60%) were prepared and a total of 60 pots were established with four replicates for each cultivar and each treatment. In all prepared growth media, analyses of saturation, lime content, salinity, pH, organic matter and macro and micro element concentrations were conducted. In the cultivated and harvested plants, analyses of shoot length, fresh and dry weight, chlorophyll pigment contents, proline level, lipid peroxidation and electrolyte leakage were performed; additionally, catalase (*CAT*) and superoxide dismutase (*SOD*) gene expression levels were determined from leaf tissue samples. The findings indicated that increasing the proportion of coal mine waste in the growth media led to pronounced changes in their physical and chemical properties. Among the cultivars, Kamome White F1 exhibited the most stable growth response and was identified as the most tolerant to stress conditions. Chlorophyll contents generally showed limited variation and the preservation of pigment levels particularly in the Kamome White F1 cultivar indicated that photosynthesis was less affected under stress conditions. While an increase in proline was observed in the Kamome Red F1 cultivar under high coal mine waste applications, the low malondialdehyde concentrations and electrolyte leakage values in the Kamome White F1 cultivar revealed that membrane damage was more limited. *CAT* and *SOD* gene expression levels reached their highest values in all cultivars, particularly in the environments containing 20% and 40% mine waste. When all data were evaluated together, it was concluded that the Kamome White F1 cultivar exhibited the most stable physiological, biochemical and molecular response to coal mine waste.

Number of pages : 78

Keywords : Ornamental kale, Brassicaceae, Phytoremediation

Supervisor : Asst. Prof. Dr. Veli ÇELİKTAŞ

ÖN SÖZ VE TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimim boyunca hoşgörüsüyle ve sabrıyla beni aydınlatan, bilgi ve tecrübelerini esirgemeyen, destekleyici tutumuyla rehberlik eden, tezin her aşamasında ve laboratuvar çalışmalarında azmimi kırmadan çözüm odaklı yaklaşımıyla yardımcı olan, bitki biyolojisi alanında araştırma yapma ve akademik yolda yürüme konusunda cesaretlendiren danışman hocam Sayın Dr. Öğr. Üyesi Veli ÇELİKTAŞ'a teşekkür ederim.

Yüksek lisans eğitimimde moleküler biyoloji alanında bilgi sahibi olmamı sağlayan, bu alandaki bilgileri sabırlı bir şekilde öğreten ve tez çalışmasının tamamlanması için vaktini ayıran Sayın Doç. Dr. Ekrem BÖLÜKBAŞI'na teşekkür ederim.

Yüksek lisans eğitimim boyunca bitki biyolojisi alanında bilgi sahibi olmamı sağlayan Sayın Prof. Dr. Neslihan KARAVİN ve Sayın Prof. Dr. D. Duygu KILIÇ'a teşekkürlerimi sunarım.

Laboratuvar çalışmalarında gönüllü bir şekilde bana yardımcı olan Suluova Meslek Yüksekokulu öğrencilerine teşekkür ederim.

Hayatları boyunca beni destekleyen, her durumda güvenen ve çocukları olmaktan gurur duyduğum annem Hacer CABA'ya ve babam Selahattin CABA'ya teşekkür ederim.

Eğitim hayatım boyunca maddi ve manevi desteğini hissettiğim ve varlığından güç aldığım kardeşim Muhammet Talha CABA'ya teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT	v
ÖN SÖZ VE TEŞEKKÜR	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	x
ŞEKİLLER DİZİNİ	xi
RESİMLER DİZİNİ	xii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	xiii
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Çevre ve Çevre Kirliliği.....	1
1.2. Çevre Kirliliği ve Türleri	1
1.2.1. Toprak kirliliği.....	1
1.2.2. Su kirliliği.....	2
1.2.3. Hava kirliliği.....	3
1.3. Madencilik Faaliyetleri ve Kirlilik	3
1.4. Süs Bitkilerinin Toprakların İyileştirilmesinde Kullanımı	6
1.5. Brassicaceae Familyası (Hardalgiller) ve <i>Brassica oleracea</i> var. <i>acephala</i> (Süs Lahanası) Taksonunun Toprakların Islahında Kullanılabilme Potansiyelleri	7
1.6. Bitkilerde Stres ve Ağır Metal Stresi.....	8
1.7. Bitkilerde Ağır Metal Stresine Yönelik Oluşturulan Cevaplar.....	9
1.8. Bitkilerin Moleküler Çalışmalarda Kullanımı	9
2. LİTERATÜR.....	11

3. MATERYAL VE METOD	26
3.1. Materyal.....	26
3.2. Metod.....	26
3.2.1. Bitkilerin yetiştirme ortamlarının hazırlanması, tohumların ekilmesi ve deneme deseni oluşturulması	27
3.2.2. Bitkilerin yetiştirilmesi	27
3.2.3. Bitkilerin analizler için hazırlanması.....	28
3.2.4. Sürgünlerde boy, taze-kuru ağırlık ölçümleri ve yüzde su miktarının hesaplaması	28
3.2.5. Klorofil ölçümleri.....	29
3.2.6. Prolin analizi.....	29
3.2.7. Lipit peroksidasyonu (Malondialdehit konsantrasyonu) analizi	30
3.2.8. Membran geçirgenliği (Elektrolit sızıntısı)	30
3.2.9. Yetiştirme ortamı analizleri	31
3.2.10. Moleküler biyolojik analizler.....	32
3.2.11. İstatistik değerlendirmeleri.....	38
4. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	39
4.1. Yetiştirme Ortamı Özellikleri	39
4.2. Sürgün Boyu Ölçümleri, Sürgün Kuru-Taze Ağırlıkları ve Yüzde Su İçeriği	40
4.3. Klorofil Pigmenti Ölçümleri.....	45
4.4. Prolin, Malondialdehit ve Elektrolit Sızıntısı Bulguları	49
4.5. Total RNA İzolasyonu.....	54
4.6. cDNA (Komplementer DNA) Sentezi.....	54
4.7. Süs Lahanası Çeşitlerine Ait Sonuçların Normalizasyonu ve İstatistiksel Analizi	55
5. SONUÇ VE ÖNERİLER	61

5.1. Sonuçlar	61
5.2. neriler	62
KAYNAKLAR	64
ÖZGEÇMİŞ	78



ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 3.1. RNase free tüpe karıştırılan bileşenler	34
Çizelge 3.2. Primer karışımı ile total RNA'nın bileşenleri ve son konsantrasyonları	34
Çizelge 3.3. Ters transkripsiyon reaksiyonuna yönelik yararlanılan bileşenler ve bileşenlerin miktarları	35
Çizelge 3.4. Ters transkripsiyon reaksiyonunun yürütüldüğü program	35
Çizelge 3.5. Çalışmada hedeflenen genlere ait bilgiler ile Real-Time PCR'de kullanılan primerlerin dizi ve erime sıcaklıkları	36
Çizelge 3.6. Optimize edilmiş olan ve yararlanılan Real-Time PCR bileşenleri ve bu bileşenlerin konsantrasyonları	37
Çizelge 3.7. Real Time PCR reaksiyonunun uygulandığı program	37
Çizelge 4.1. Farklı konsantrasyonlarda maden atığı içeren yetiştirme ortamlarının bazı fiziksel ve kimyasal özellikleri.....	40
Çizelge 4.2. Süs lahanası çeşitlerinde sürgün boyu, sürgün taze-kuru ağırlıkları ve su içerikleri ortalama değerleri.....	40
Çizelge 4.3. Büyüme parametreleri ve yetiştirme ortamı özellikleri arasındaki ilişkiler.....	44
Çizelge 4.4. Klorofil-a, klorofil-b ve toplam klorofil ölçümleri (SPAD değeri)	45
Çizelge 4.5. Klorofil içerikleri ve yetiştirme ortamı özellikleri arasındaki ilişkiler	49
Çizelge 4.6. Prolin, malondialdehit ve elektrolit sızıntısı konsantrasyonları	50
Çizelge 4.7. Prolin, malondialdehit ve elektrolit sızıntısı ile yetiştirme ortamı özellikleri arasındaki ilişkiler	53
Çizelge 4.8. Farklı maden atığı konsantrasyonlarında yetiştirilen süs lahanası çeşitlerinden elde edilen Total RNA ve sentezlenen cDNA'ların saflık ve miktar tayinleri	55
Çizelge 4.9. Süs lahanası çeşitlerinin yaprak doku örneklerine ait normalize edilmiş <i>SOD</i> ve <i>CAT</i> genlerinin ekspresyon verilerinin ortalama, standart sapma değerleri (ortalama $\pm$)	57
Çizelge 4.10. <i>CAT</i> ve <i>SOD</i> genleri ifadeleri ve yetiştirme ortamı özellikleri arasındaki ilişkiler	59

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil	Sayfa
Şekil 1.1. Abiyotik stres kaynakları ve abiyotik stresin bitkiler üzerinde oluşturduğu etkiler (Yılmaz ve Çiftçi, 2023:7).....	8
Şekil 4.1. Süs lahanası çeşitlerinde yetiştirme ortamlarının sürgün boyu, sürgün taze ve kuru ağırlıkları ile su içeriği üzerine etkileri.....	43
Şekil 4.2. Süs lahanası çeşitlerinde klorofil-a, klorofil-b ve toplam klorofil içeriklerinin yetiştirme ortamları karşısındaki durumu	48
Şekil 4.3. Süs lahanası çeşitlerinde prolin, malondialdehit ve elektrolit sızıntısı konsantrasyonlarının yetiştirme ortamları karşısındaki durumu	52
Şekil 4.4. İzole edilen bazı (Red) örneklerle ait RNA'lara ait %1,2'lik agaroz jel görüntüleri	54
Şekil 4.5. Süs lahanası çeşitlerinin yaprak doku örneklerine ait <i>SOD</i> ve <i>CAT</i> genlerinin ekspresyon grafikleri.....	58

RESİMLER DİZİNİ

Resim	Sayfa
Resim 3.1. Çalışma kapsamında incelenen ve atık alınan maden alanı	26
Resim 3.2. Deneme planı genel görünümü	27
Resim 3. 3. Bitkilerin yetiştirildiği ortamın genel görünümü	28
Resim 3.4. Klorofil ölçümlerinde yararlanılan SPAD cihazı	29
Resim 3.5. Prolin analizi	29
Resim 3.6. Elektrolit sızıntısı uygulaması.....	30
Resim 3.7. Tez çalışmasına yönelik tasarlanan primerler	36

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Bu çalışmada kullanılmış bazı simgeler ve kısaltmalar, yanda açıklamaları verilmek üzere aşağıda listelenmiştir.

Simgeler	Açıklama
Ag	Gümüş
Al	Alüminyum
As	Arsenik
B	Bor
Cd	Kadmiyum
Ca	Kalsiyum
Co	Kobalt
Cu	Bakır
Cr	Krom
Ct	Cycle threshold
°C	Santigrat
Fe	Demir
Hg	Cıva
K	Potasyum
Mg	Magnezyum
Mn	Mangan
Mo	Molibden
N	Azot
Na	Sodyum
Ni	Nikel

P	Fosfor
Pb	Kurşun
Se	Selenyum
Si	Silisyum
V	Vanadyum
Zn	Çinko
W	Wolfram
µg	Mikrogram
µL	Mikrolitre
µM	Mikromolar

Kısaltmalar

Açıklama

ACT	Aktin
APX	Askorbat peroksidaz
CAT	Katalaz
DNA	Deoksiribonükleik asit
MDA	Malondialdehitler
POD	Peroksidaz
RNA	Ribonükleik asit
SOD	Süperoksit dismutaz

1. GİRİŞ

1.1. Çevre ve Çevre Kirliliği

Çevre: Canlıların yaşamları boyunca ilişkilerini sürdürdükleri ve karşılıklı etkileşim içinde oldukları fiziki, biyolojik, kültürel, sosyal ve ekonomik ortamları ifade eder (Çevre Kanunu Madde 2.). Çevre, canlıların birbirleriyle bağlantılı olduğu tüm kısımları ve boyutları içermektedir (Akyüz, 2024). Çevre dünyada yaşamını sürdüren bütün canlıların ve canlılık faaliyetinin devamlılığı için gerekli olan toprak, hava ve sudan meydana gelen bir sistem olarak tanımlanmaktadır (Çelikkıran, 1995). İçinde bulunduğumuz fiziksel çevreyi genel anlamda birbirine tamamen bağlı olan toprak, su ve hava meydana getirmektedir. Toprak, su ve hava dünyanın bütün yaşam formlarının devamlılığının sürdürülmesi yönünden önem arz etmektedir (Bayram, Dörtbudak, Fişekçi Evyapan, Kargın ve Bülbül, 2006).

1.2. Çevre Kirliliği ve Türleri

Son yıllarda nüfusun hızlı artışı, sanayileşme ve teknolojik gelişmelerdeki ivme çevrede kirlenmeye sebep olmuştur. Çevre kirliliği birçok yönden bitki, hayvan ve insan sağlığı üzerinde olumsuz etkilere sahiptir. Tanım olarak ise çevre için uygun olmayan ya da kaynakları tahrip eden maddelere kirlilik adı verilmektedir (Chaudhry ve Malik, 2017). Çevre kirliliği genel olarak kirliliğin ortaya çıktığı yere göre hava, su, toprak kirliliği olarak değerlendirilebilirken kirlilik kaynağının türüne göre de (ağır metal kirliliği, pestisit kirliliği vb.) sınıflandırılabilir.

1.2.1. Toprak kirliliği

En genel haliyle toprak yeryüzünün dışını saran, organik maddelerin ve kayaların türlü ayrışma ürünlerinin karışımından ortaya çıkan üzerinde ve içerisinde sayısız canlının barınmasını sağlayan ve onları besleyen bir maddedir (Güler ve Çobanoğlu, 1997:12). Toprak, dünyayı meydana getiren su, hava ve kara ile bağlantı sağlayan ve tüm canlıların yaşamında önemli olan kaynaklardanır (Karaca ve Turgay, 2012). Sayılamayacak kadar birçok organizma için bir yaşam alanıdır ve bitkilerin de yetişebilmesi için uygun ortam sunmaktadır. Aynı zamanda hidrosfer, atmosfer, biyosfer ve litosfer arasındaki madde döngüsünün işleyişinde önemli bir

role sahiptir (Mirsal, 2008:2). Biyotik ve abiyotik ögelerden meydana gelen dinamik bir yapıyı temsil etmektedir. Organik madde ile farklı büyüklüklerdeki mineral parçacıkları (silt, kum ve kil) abiyotik kısmı oluştururken hayvan, bitki ve mikroorganizma (mantar ve bakteri) gibi canlı organizmalar ise biyotik kısmı meydana getirmektedir (Cachada, Rocha-Santos ve Duarte, 2018:1).

Toprak, ağır metalleri ve diğer kirlilik faktörlerini filtreleyebilme özelliğine de sahiptir. Toprak kirliliğinde asıl sorun kirleticilerin toprakta hızlı birikim göstermesi ve bu birikimin toprak tarafından yavaş bir şekilde filtrelenmesidir (Pouresmaeli, Ataei, Forouzandeh, Azizollahi ve Mahmoudifard, 2022). Toprak kirliliği yalnızca toprakla sınırlı kalmayıp toprağı, suyu ve havayı da etkileyebilmektedir. Toprakta kimyasal, nükleer ve katı atıklardan kaynaklı kirlenmeler olabilir. Toprakta biriken atıklar metaller, kâğıtlar vb. maddeler hem görüntü hem de çevre kirliliği nedeni olurken, hastalık taşıyıcı canlıların üremesi için de önemli bir ortam oluşturmaktadırlar. Pestisitler ve gübreleme gibi işlemler de toprakta kirlilik oluşturabilir. Gübre uygulamalarının bilinçsiz olarak yürütülmesi ağır metal birikimine, mikroorganizma faaliyetlerinin zarar görmesine, sularda nitrat düzeyinin artmasına, besin maddelerinin dengesinin bozulmasına, ötrofikasyonun ortaya çıkmasına, kükürt ve azot içeriğine sahip gazların hava ortamına yayılmasına ve sera etkisinin oluşumuna zemin hazırlamaktadır (Kadioğlu, 2021). Ağır metal kirliliği de toprak kirliliği içerisinde değerlendirilebilir.

1.2.2. Su kirliliği

Su bir oksijen ile iki hidrojen atomundan oluşmuş ve kimyasal formülü H_2O olarak ifade edilen bir bileşiktir (Güler ve Çobanoğlu, 1994:11). Çevre kirliliği sucul ortamlarda da ortaya çıkabilmektedir. Tarım alanlarında tercih edilen ilaçlar ve gübreler yer altı suyuna karışabilmektedir. Bu kirlilik sucul ekosistemdeki flora ve fauna unsurları ile bu kirliliğin içme sularına ulaşması hâlinde insan sağlığı üzerinde de olumsuz etkiler ortaya çıkarabilmektedir (Çeliksaş, 2020). Kirli suyun içerisinde patojen özellikte mikroorganizmaların olması tehlikeli sayılabilecek rahatsızlıklara yol açabilmektedir (Chaudhry ve Malik, 2017; Kılıç, 2021). Su kirliliği insanlarda birincil olarak tüberküloz ve kolera gibi pek çok hastalıklara sebep olabilmektedir. Ayrıca, sularda alg birikiminin fazla olması da balıklar ve diğer canlıların su tüketimlerinin sınırlanmasına yol açmaktadır (Doğan ve diğerleri, 2018). Bununla birlikte balıklar ve diğer canlıların DNA'larında hasar bırakmaktadır (Jeevanantham ve diğerleri, 2019).

Plastik atıklarla bağlantılı olan mikroplastikler (MP) ve nanoplastikler (NP) de su kirliliğinde rol oynayabilmektedir. Geçmişte yapılmış çalışmalarda ticari balıklarda hem mikroplastiklerin hem de nanoplastiklerin kalıntılarının yer aldığı gözlemlenmiştir. Bununla birlikte sucul organizmalarda; reaktif oksijen türlerinin üretimi, enerji ve lipid metabolizmasında tahribat, sitotoksosite ile nörotoksitenin ortaya çıktığı da bulunmuştur (Shukla, Y. Pei, Li ve D. Pei, 2024). Toprak kirliliğinde olduğu gibi su kirliliğinde de ağır metaller önemli kirlilik unsurlarıdır.

1.2.3. Hava kirliliği

Hava, renksiz ve kokusuz olan ve çeşitli gazların birleşiminden oluşan bir yapı olarak tanımlanmaktadır (Nişancı, 1986). Kentleşme ve sanayileşme gibi insan faaliyetleri veya doğal faktörlerle bağlantılı olan toz fırtınaları, yanardağ patlamaları ile bitki örtüsü ve orman yangınları gibi olaylar hava kirliliğinin kaynaklarıdır (Çakır Sümer, 2014). Bu kaynaklardan havaya yayılan partiküller (uçucu kül, aerosoller, duman vb.) ve gazlar (CO, HC, CO₂, NO_x ve SO₂) hava kirliliğine sebep olan maddelerdir (İmal, Karapınar ve Doğan, 2013). Hava kirliliği esas itibari ile atmosferde yer alan kirletici gaz, koku, duman, toz, is veya su buharı gibi öğelerin olması gereken seviyelerin üstüne çıkması ile de ifade edilebilir (Alkan, 2018). Hava kirliliğinin insan ve hayvan sağlığı üzerindeki olumsuz etkilerinin yanında bitkiler üzerinde de olumlu veya olumsuz etkileri bulunmaktadır (Blande, Holopainen ve Li, 2010; Çeliktaş ve diğerleri, 2019; Karakoyun ve Osma, 2015). Yukarıda da ifade edildiği üzere havayı kirleten maddelerden ilki partiküllerdir. Partiküller yaygın olarak kullanılan bir gösterge niteliğindedir. Temel bileşenleri sülfatlar, amonyak, siyah karbon, nitratlar, mineral tozları, sodyum klorür ve sudur. Bunların yanında odunsu yakıtlar, benzin, kömür, doğalgaz ve gazyağı gibi karbon içeren yakıtların eksik yanması sonucu oluşan karbonmonoksit (CO), atmosferin başlıca bileşenlerinden biri olan ozon (O₃), ulaşım ve sanayi sektörlerindeki yakıt yanmaları sonucu atmosfere salınan azot dioksit (NO₂), yakıtların (petrol ve kömür) yakılması ve kükürt içeren maden cevherlerinin eritilmesi sırasında ortaya çıkan kükürtdioksit (SO₂) gibi gazlar da hava için kirleticidir (Dünya Sağlık Teşkilatı, 2024).

1.3. Madencilik Faaliyetleri ve Kirlilik

Türkiye, tarım ülkesi olmasının yanında bir maden ülkesidir. Ülkemizin yerüstü zenginlikleri kadar yeraltı varlığı da önemlidir. Madencilik genel olarak madenlerin araştırılması, çıkarılması

işlenmesi ve buna dair teknolojilerin kullanılması işlemlerinin tümü olarak ifade edilebilir. Madenler çok önemli yer altı kaynakları olmasının yanında madencilik faaliyetlerinden kaynaklanan çevre kirliliği de göz ardı edilmemelidir. Madencilik aşamaları, farklı alanlarda pek çok çevresel problemlere yol açmaktadır. Madeni içeren bölgelerin keşfedilmesi, minerallerin saflaştırılması ve rafine edilmesi ile doğrudan veya dolaylı olarak pek çok kirlilik içeren atık ortaya çıkmaktadır (Hilson, 2000). Madencilik çalışmaları ile oluşan bu atıklar bulundukları bölgede toprak kirliliğine neden olmaktadır. Çünkü, madencilik çalışmaları toprakta yüksek seviyelerde ağır metal ile kontamine olmuş atıkların ortaya çıkışına zemin hazırlamaktadır (Menteşe ve Böbrek, 2020). Yüksek düzeyde toksik metal konsantrasyonlarına sahip bu atıklar insanları ve diğer canlıları olumsuz etkilemektedir (Vural ve Çiçek, 2020). Madencilik faaliyetleri sülfür miktarının artmasına yol açarak asit maden drenajı gibi bazı olumsuz durumlara da neden olabilmektedir (Akcil ve Koldas, 2006). Bu olayın sonucunda o alanda bulunan sular asidik özellik taşımaya başlamaktadır (Yörükoğlu ve Karadeniz, 2003).

İnsanların enerji ihtiyacı rüzgâr, güneş gibi yenilenebilir enerji kaynaklarının veya kömür, petrol ve doğalgaz gibi fosil içerikli enerji kaynaklarının ortaya çıkmasını desteklemiştir (Engin, 2020). Kömür madenleri de insanların geçmişten bu yana ihtiyaç duyduğu enerjinin elde edilmesinde önemli rol oynayan madenlerdendir. Kömür, mineral içeriği olan ve pek çok organik materyali barındıran organik bir kayadır (Demirbilek, 1987). Fosil yakıtlardan olan kömürün çıkarılması yeraltı madenciliği ve açık ocak madenciliği (yüzey) olarak iki şekilde gerçekleşmektedir (Demirarslan ve Kaya, 2017). Kömür madenciliğinde kömürün yer aldığı konumun bulunabilmesi için üst katmandaki kısımların kazılması gerekmektedir. Fakat, kömür daha derinlerde bulunuyorsa kapalı işletme uygulaması ile kömüre ulaşıp yüzeye çıkarılabilmektedir (Şimşek, 2022). Hem açık ocak hem de yeraltı madenciliğinin çevre üzerinde olumsuz etkileri bulunabilmektedir. Bu çevre sorunlarından başlıcası ise hava kirliliğidir. Kömürün kullanılmasıyla meydana gelen emisyonlar; NO₂, ağır metaller, CO, polisiklik aromatik bileşikler, CO₂, SO₂ ve atık ısıdır. Kömür işletmeciliğinden meydana gelen emisyonlar ise metan gazı (CH₄) ve partikül maddedir (Demirarslan ve Kaya, 2017).

Kömür madenciliği faaliyetlerinde atıklar, yıkama işleminden geçirilmiş ince taneli atıklar ve kömür atığı ya da maden taşı olarak ifade edilen iri taneli atıklar şeklinde ortaya çıkmaktadır. Aktif olarak faaliyet gösteren kömür madenciliği atık sahalarından ya da terk edilmiş madenlerden ortaya çıkan pek çok problem bulunmaktadır (Bian ve diğerleri, 2008). Bunlardan biri metan gazı problemidir. Atmosferde sera gazları sınıfında bulunan metan gazı,

karbondioksit ile kıyaslandığında karbondioksite oranla daha düşük seviyelerde bulunduğu ve karbondioksitten 20 kat daha etkili olduğu bilinmektedir (Dontala, Reddy ve Vadde, 2015). Uçucu küller ve maden atıkları yeraltı ve yüzey suları ile toprağın kirlenmesine ve parçacıkların rüzgâr yardımıyla sürüklenip ortama dağılmasına yol açarak insan sağlığına ve çevreye zarar vermektedir (Gajić ve diğerleri, 2018). Yakıtı kömür olan enerji santrallerinin atıkları zehirli düzeyde kadmiyum, kurşun, arsenik ve krom gibi metaller içerebilmektedir (Dontala, Reddy ve Vadde, 2015). Su ve toprak çok yüksek metal konsantrasyonuna sahip endüstriyel atıklara maruz kalırsa bu metaller sebzelere ve gıdalara dâhil olabilmekte ve besin ağını etkisi altına alabilmektedir (Kisku ve diğerleri, 2018). Bunun yanında, bu toksik maddeler akarsulara da karışabilmektedir (Klukanová ve Rapant, 1999).

Kömür madenciliğinden kaynaklanan çevresel sorunları çözmek için pek çok yol mevcuttur. Maden alanındaki kayaların sülfür içeriklerinin ve seviyelerinin analiz edilmesiyle su ve toprak kirliliğinin önüne geçilebilmektedir. Maden alanında toprağın üst katmanlarını iyileştirmek için organik madde ve gübre ile o alanda bulunan bitki örtüsü tekrardan canlandırılabilir. Ayrıca, fitoremediasyon da kömür madeni alanlarının temizlenmesinde etkili bir yöntem olarak görülmektedir (Rouhani, Skousen ve Tack, 2023). Geleneksel fitoremediasyon metotları genellikle kirlleticilerin alandan uzaklaştırılması, kirliliğe maruz kalmış alanın rehabilite edilmesi ve bitkilerin yetiştirilmesini kapsamaktadır.

Uçucu küller ve maden atıklarının yol açtığı sorunlar ise ekolojik restorasyon ile çözümlenebilmektedir. Bu da bitki örtüsü ile sağlanabilmektedir. Bitki örtüsü; çevredeki kirlilik faktörlerinin toksisitesinin ve yayılımının azaltılması, erozyonun engellenmesi ya da en az seviyeye düşürülmesi ve kirleticilerin tutunması için organik madde sağlanması açısından değerlidir. Atıkların yer aldığı sahalarda yerli bitki türlerinin oluşumuna katkı sağlanması ve baklagiller, otlar, ağaçlar ve çalıların maden atıkları ve uçucu küllere maruz kalmış ortama eklenmesi ile dik yamaçların sağlamlaştırılması ekolojik restorasyon için önemlidir (Gajić ve diğerleri, 2018). Özellikle yerli bitkilerin tercih edilmesi madencilik çalışmalarının çevreye yönelik etkilerini hafifletmeye yönelik maliyeti düşük ve sürdürülebilir bir yaklaşım ortaya çıkarmaktadır (Shakeel ve diğerleri, 2024).

1.4. Ss Bitkilerinin Toprakların İyileştirilmesinde Kullanımı

Güneş enerjisi ile faaliyet gösteren ve ekosistemin en önemli parçaları olarak görülen bitkiler, madde döngüleri ve bu döngülerin düzenli işleyişiyle bir kirlilik kontrol metodu ortaya koymaktadır (Zaman, Ali ve Akhtar, 2024). Kirliliğe maruz kalmış ortamların iyileştirilmesinde bitkilerden yararlanılması düşüncesi eski zamanlardan beri vardır. Yunanca “phyto” (bitki) ve latince “remedium” (iyileştirme, ıslah etme) kelimelerinden oluşan fitoremediasyon kavramı organik kirleticiler ve ağır metaller ile kontamine olmuş alanların rehabilite edilmesi veya toksik etkilerinin azaltılması için bitkilerin kullanıldığı bir teknolojidir (Ahmad, 2024; Miranda ve diğerleri, 2022; Yadav ve Srivastava, 2014). Fitoremediasyon metodu içerisinde fitoekstraksiyon, fitostabilizasyon, fitovolatilizasyon, fitofiltrasyon ve fitodegradasyon gibi farklı mekanizmalar mevcuttur (Hamutoğlu, Dinçsoy, Cansaran Duman ve Aras, 2012).

Fitoekstraksiyon metodunda ağır metallerin topraktan bitkinin üst kısımlarına taşınması, fitostabilizasyon metodunda ise toksik metallerin kök bölgesinde tutulması söz konusudur. Fitoekstraksiyon ve fitostabilizasyon süreçlerinde bitki türlerinin seçimi çok önemlidir (Anjum, Umar ve Iqbal, 2014).

Bitkilerin hangi fitoremediasyon mekanizmasına uygun olduğu bazı hesaplamalarla belirlenmektedir. Bunlar bitki organları arasındaki metal konsantrasyonlarının oranlanması ile veya bitkideki metal konsantrasyonlarının büyüme ortamı metal konsantrasyonuna oranlanması ile hesaplanmaktadır. Örneğin bir bitkinin toprak üstü kısımlarındaki metal konsantrasyonu kök metal konsantrasyonuna oranlandığında elde edilen değer ne kadar yüksek ise o bitkinin kirleticileri uzaklaştırmada güçlü bir aday olacağı çıkarımına varılmaktadır (Mishra, Upadhyaya, Pandey ve Tripathi, 2008).

Kentsel bölgelerde yaşayan insanlar yoğun kent yaşamından uzaklaşmak için rekreasyon alanlarını oldukça sık olarak tercih etmektedir. Bu alanların tercih edilmesindeki sebeplerden bir tanesi de bu alanları süsleyen bitki varlığıdır. Süs bitkileri bu işlevlerin yanında remediasyon çalışmalarında da kullanılarak toprak ıslahı yapabilmektedir ve bununla ilgili araştırmalar da mevcuttur (Liu, Xin ve Zhou, 2018; Rocha ve diğerleri, 2022).

Ss bitkilerinin kullanılması besin zinciriyle bağlantılı çevresel kirlilikte daha az tehdit ortaya çıkarmaktadır (Capuana, 2020). Çünkü süs bitkileri çoğunlukla insanlar tarafından besin olarak

tercih edilemeyeceği için ağır metal (loid) ve diğer kirletici faktörlerin besin zincirine daha az girmesini sağlayacaktır.

Süs bitkilerinin büyüme döngüleri genellikle kısadır ve hızlı gelişim göstermektedirler (Deepika ve Haritash, 2023). Yukarıda bahsedilen özellikler göz önüne alındığında süs bitkilerinin toprak ıslahında tercih edilmesi büyük avantajlar sağlamaktadır.

1.5. Brassicaceae Familyası (Hardalgiller) ve *Brassica oleracea* var. *acephala* (Süs Lahanası) Taksonunun Toprakların Islahında Kullanılabilme Potansiyelleri

Dünya üzerinde 4000 civarında tür ile temsil edilen (Hendriks ve diğerleri, 2023) Brassicaceae (Cruciferae) ailesi Türkiye’de 96 cinse ait 270’i endemik olmakla birlikte tür ve türaltı düzeyinde 782 taksona sahiptir (Güner, Aslan, Ekim, Vural ve Babaç, 2012). Brassicaceae familyası birçok ağır metal ve metaloidler açısından remediasyon yeteneği olan türlere sahip olup bu açıdan önemli bir bitki ailesidir (Dar ve diğerleri, 2015; Gall ve Rajakaruna, 2013; Palmer, Warwick ve Keller, 2001). Brassicaceae familyası içerisinde bu özellikleri yönüyle dikkat çeken cinslerden bir tanesi de remediasyon yeteneği hakkında birçok çalışma olan *Brassica* cinsidir.

Brassica türleri fitoremediasyon metodları için etkin enzimatik ve enzimatik olmayan savunma mekanizmaları ile etkin süreçlere sahiptir. Bununla birlikte *Brassica* türleri toksik nitelikteki ağır metallerin metabolizmada ortaya çıkardığı oksidatif hasara tolerans gösterebilmekte ve potansiyel fitoremediatörler olarak da tanımlanmaktadır (Bortoloti ve Baron, 2022).

B. oleracea’nın bir varyetesi olarak nitelendirilen süs lahanasının (*Brassica oleracea* L. var. *acephala*) yaprakları alacalı ve renklidir. Bu lahana türünün renkleri açık sarı, kırmızı, sarı, mor, beyaz, pembe vb. olabilmektedir. Bu şekilde yaprak renklerinin ve yapılarının çeşitlilik göstermesi süs lahanasını değerli tarımsal bitkilerden biri hâline getirmektedir (Liu ve diğerleri, 2020; Muntean, Munteanu ve Andrieş, 2012). Bundan dolayı, kesme çiçek ya da saksı bitkisi olarak sıklıkla tercih edilmektedir (Zhang, Fu, Dai ve Bao, 2008). Mevsimlik çiçekler arasında yer alan süs lahanaları dikkat çekici formlarıyla tasarıma fayda sağlamaktadır (Dikbaş, Parlakova Karagöz, Uçar ve Demir, 2023).

Süs lahanasının ağır metal kirliliğine karşı fitoremediasyon potansiyeline yönelik çeşitli araştırmalar mevcuttur. Kurşun ve kadmiyum içeren tuzlu toprakların fitoremediasyonu (Haghighi, Kafi, Pessarakli, Sheibanirad ve Sharifinia, 2016), krom ve çinko ile kirliliğe maruz kalmış toprakların ıslahı (Sepehr ve Moradli, 2021), çinko ve kurşun birikiminin rehabilite edilmesi (Taghizadeh, Solgi, Karimi, Sanati ve Khoshbin, 2018), bor stresine maruz kalmış toprakların fitoremediasyonu (Gökseven, Kıran ve Ellialtıoğlu, 2022) üzerine gerçekleştirilen pek çok çalışma araştırmacılar tarafından bildirilmiştir.

Süs lahanası fitoremediasyon uygulamasında kullanılan diğer bitki türlerinin yetiştirilemediği kış ve sonbahar aylarında yetiştirilebilmektedir. Bu avantajlardan dolayı süs lahanası fitoremediasyonda yararlanılacak potansiyel bir tür ve metal hiperakümülatörü bir tür olarak yer alabilmektedir (Abdollahi, Golchin ve Shahryari, 2020).

1.6. Bitkilerde Stres ve Ağır Metal Stresi

Çevre koşullarının, bir bitkinin süregelen büyüme ve gelişim faaliyetlerini olumsuz olarak etkileyecek kadar değişmesi durumunda bitkide ortaya çıkan durum stres olarak ifade edilmektedir (Büyük, Soydam Aydın ve Aras, 2012; Lichtenthaler, 1998). Bitkiler, stres faktörü olarak gördükleri tüm abiyotik çevresel öğelere yönelik geri dönüşümlü ya da geri dönüşümsüz olarak cevaplar ortaya koyarak yaşamlarını sürdürmeye çalışmaktadırlar (Korkmaz ve Durmaz, 2017).



Şekil 1.1. Abiyotik stres kaynakları ve abiyotik stresin bitkiler üzerinde oluşturduğu etkiler (Yılmaz ve Çiftçi, 2023:7)

Bitkilerde sıcaklık değişimleri, ışık stresi, su basması, kuraklık, ağır metal, toprak tuzluluğu, radyasyon gibi ögeler stres faktörü olarak adlandırılabilir (Şekil 1.1.) (Yılmaz ve Çiftçi, 2023: 5). Bitkilerde ağır metal ve metaloid stresi bitkinin büyümesi ve gelişiminde önemli sorunlar ortaya çıkararak çevresel sürdürülebilirlik ve küresel tarım açısından önemli problemler meydana getirebilmektedir. Bununla birlikte, bu toksik elementler bitkinin morfolojik, fizyolojik ve moleküler sürecinde olumsuzluklara yol açarak verimliliğini düşürmektedir (Greco ve diğerleri, 2025).

1.7. Bitkilerde Ağır Metal Stresine Yönelik Oluşturulan Cevaplar

Toksik düzeylerdeki ağır metaller DNA ve nükleer proteinler gibi hayati öneme sahip hücresel biyomoleküllerle bağlantı kurarak reaktif oksijen türlerinin (ROT) çok fazla artmasına neden olmakta (Emamverdian, Ding, Mokhberdoran ve Xie, 2015) ve oksidatif stres meydana gelmektedir (Yadav, 2010).

Bitkiler oksidatif stres koşullarında hayatlarını sürdürebilmek ve bu stresin üstesinden gelebilmek için reaktif oksijen türlerinin detoksifikasyonu ve kontrolünü sağlayan pek çok antioksidanlar içermektedir. Antioksidanlar, konsantrasyonun düşük olduğu durumlarda oksidasyon yapabilen ve başka bir substratın oksidasyonunu elektron aktarımı ile düşürebilen ya da engel olabilen maddelerdir (Büyük, Soydam Aydın ve Aras, 2012).

1.8. Bitkilerin Moleküler Çalışmalarda Kullanımı

Watson ve Crick'in 1953'te DNA'nın yapısına yönelik yaptığı yorumlarla başlayan moleküler biyoloji süreci, özellikle 1990'dan sonra daha da gelişmiştir. Transgenik bitkilerin üretilip gündeme geldiği 1996 yılından sonra ise moleküler biyoloji sürecinin kapsamı daha da genişlemiştir. Günümüzde ise klasik bitki ıslahı yöntemlerine ek olarak tamamlayıcı ve doğrulayıcı yeni moleküler ve biyolojik uygulamalar yapılmaktadır. Son yıllarda moleküler biyoloji alanında hızlı bir şekilde ilerlemeler kaydedilmiştir. Bu ilerlemeler bitki genetiği araştırmalarına, genetik çeşitliliğin koruma altına alınmasına, ıslah ve üretime önemli faydalar sağlamaktadır (Yorgancılar, Yakışır ve Erkoyuncu, 2015).

Ağır metal kirliliğine yönelik çevresel sorunlar, insan faaliyetlerinin çeşitlenmesiyle birlikte zamanla artmaktadır. Bitkiler ağır metal stresine maruz kaldıklarında tolerans mekanizmaları ve metabolik cevaplar ortaya çıkarmaktadırlar (Doğru, Altundağ ve Dündar, 2021). Ayrıca, ağır metaller gen ifadesinde belli değişiklikler meydana getirebilmektedir (Matters ve Scandalios, 1986). Bitkiler gen ifadesinde kalıtsal açıdan değişiklikler oluşturarak ağır metal stresinin üstesinden gelebilmektedir (Cong ve diğerleri, 2019). Ayrıca, ağır metal birikiminin bitkiler üzerinde fitotoksik etkileri de bulunmaktadır (Doğru, Altundağ ve Dündar, 2021).

Stres etkisinde kalmış bitkilerde fizyolojik açıdan farklılıkların tespitine yönelik yürütülen çalışmalar ile beraber bitkiler tarafından moleküler düzeyde ortaya çıkan cevabın saptanmasını amaç edinen (Enzimle ilgili immüno sorbent testi (ELISA), Polimeraz Zincir Reaksiyonu (PCR), İmmünofloresan görüntüleme, DNA mikrodizileri ve akış sitometrisi) çalışmalar da gerçekleştirilebilmektedir (Furtana ve Özdamar, 2004: 6).

Real-time PCR metodu çok küçük orandaki biyolojik bir örneğin niteliklerini güvenilir, hızlı ve doğru bir şekilde sonuçlandırabilmektedir (Günel ve Aydın, 2009). Bu metod ile belirlenmiş bir DNA dizisi laboratuvar koşullarında çoğaltılabilmektedir (Şener, 2020:33).

Real-time PCR uygulamasında bağıl (relative) ve mutlak (absolute) olarak ifade edilen iki tane kantifikasyon yöntemi mevcuttur. Bağıl kantifikasyon yönteminde, tespit edilmek istenen genin oranı normalizasyon için yararlanılan başka bir gen ile karşılaştırma yapılarak (korunmuş gen) ortaya koyulmaktadır. Mutlak kantifikasyon yönteminde ise test örnekleri değişik seviyelerde seyreltilen dilüsyon serisine yönelik standart eğriden yararlanılarak bulunmaktadır (Palacioğlu, Özer ve Bayraktar, 2021).

2. LİTERATÜR

Literatürde, madencilik faaliyetleriyle kirlenmiş toprakların ıslahına yönelik çalışmaların büyük bir kısmını, ağır metal biriktirme potansiyeline sahip bitkilerin incelendiği fitoremediasyon araştırmaları oluşturmaktadır. Bu doğrultuda, çalışmamızla konu ve kapsam açısından benzerlik gösteren bazı çalışmalar bu bölümde ele alınmıştır.

Ashraf ve Mehmood (1990) tarafından dört *Brassica* türünün (*B. carinata* A. Br., *B. campestris* L., *B. napus* L. ve *B. juncea* (L.) Czern ve Coss.) su basmasına karşı dayanıklılıkları incelenmiştir. Su basması uygulaması yapıldığında, dört *Brassica* türünde de klorofil içeriğinde düşüş gözlemlenmiştir. Ayrıca, bu uygulama ile dört türün kök ve sürgünlerinin demir içeriğinde yükselme de tespit edilmiştir.

Shen, Zhao ve McGrath (1997) tarafından yapılan çalışmada, hiperakümülatör özelliğe sahip *Thlaspi caerulescens* bitkisi ile hiperakümülatör özelliğe sahip olmayan *Thlaspi ochroleucum* bitkisi su kültürü ortamlarında kontrollü koşullarda yetiştirilmiştir. Çalışmada, bu bitkilerin büyümeleri ve Zn ağır metalinin bitkiler tarafından alınmasında Zn'nin etkisi incelenmiştir. *T. caerulescens* türüne konsantrasyon olarak 500 mmol Zn uygulandığında gövde ve kök uzunluğunda herhangi bir farklılık görülmemiştir. *T. ochroleucum* türüne 500 mmol Zn uygulandığında ise toksik bazı belirtilerin meydana geldiği bulunmuştur. Bunun yanında, birikim yönünden inceleme yapıldığında *T. caerulescens* türünde en fazla gövdede birikim olduğu saptanmıştır. *T. ochroleucum* türünde ise en fazla köklerde birikim olduğu tespit edilmiştir. Bitkilerin gövdelerindeki birikim incelendiğinde, *T. caerulescens* türünün gövde kısmında *T. ochroleucum* türünün iki katı kadar Zn birikimi yaptığı sonucuna ulaşılmıştır. Bütün bunlardan yola çıkarak *T. caerulescens* türünde Zn ağır metalinin daha iyi taşındığı ve bu bitkinin akümülyasyon yeteneğinin olduğu belirlenmiştir.

Yanqun, Yuan, Schvartz, Langlade ve Fan (2004), Çin'de bulunan bir kurşun-çinko madeninde yayılım gösteren karasal yapıya sahip bitkiler üzerinde araştırma yapmışlardır. On yedi bitki türünden alınan yirmi örnekte normalden fazla Cu, Pb, Cd ve Zn konsantrasyonlarının olduğu belirlenmiştir. Bitkilerde ve toprakta yer alan Zn ve Pb konsantrasyonlarının Cd ve Cu konsantrasyonlarından daha fazla olduğu gözlemlenmiştir. Bitkilerdeki Cu, Zn, Cd ve Pb metallerinin zenginleştirme katsayısına yönelik ortalaması sıralandığında ise $Pb < Cu < Cd < Zn$

şeklinde olduğu tespit edilmiştir. Bitkilerin metaller yönünden zenginleştirme katsayılarına bakıldığında, Pb metali için *Rhododendron annae* ve *Llex plyneura* türlerinin zenginleştirme katsayısının 1'den büyük olduğu belirlenmiştir. Cd metali için *R. annae*, *Salix cathayana* ve *L. plyneura* türlerinin zenginleştirme katsayısının 1'den büyük olduğu saptanmıştır. Zn için ise *R. annae* türünün zenginleştirme katsayısının 1'den büyük olduğu belirlenmiştir. Buna ek olarak, altı bitki türünün (*R. annae*, *Fargesia dura*, *Lithocarpus dealbatus*, *S. cathayana*, *L. plyneura* ve *Arundinella yunnanensis*) biriktirme yeteneğinin fazla olduğu bulunmuştur. Cd, Pb ve Zn için *R. annae* bitkisinin; Cd için *S. cathayana* bitkisinin; Cd ve Pb için ise *L. plyneura* bitkisinin hiperakümülayon potansiyeli olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Conesa, Faz ve Arnaldos (2006) tarafından Güneydoğu İspanya'daki üç maden sahasında bitkilerin ağır metal biriktirme durumları incelenmiştir. Çalışmanın sonucunda, bitkilerin yüksek metal konsantrasyonlarına sahip olduğu belirlenmiştir. Maden sahalarındaki metal konsantrasyonlarına bakıldığında, Zn değerinin 7600–12300 mg/kg ve Pb değerinin 5000–8000 mg/kg olduğu ve bu değerlerin en yüksek metal konsantrasyonlarını oluşturduğu tespit edilmiştir. Ayrıca, çalışma kapsamındaki maden sahalarından ikisinin pH değerlerinin 6–7 aralığında olduğu belirtilmiştir. Üçüncü maden sahasının pH değerinin ise asidik özellik gösterdiği saptanmıştır. Bu maden sahalarında yer alan bitkilerin sürgün yapılarındaki metal konsantrasyonları Pb, Cu ve Zn yönünden incelenmiştir. Bununla birlikte, çalışmada hiperakümülatör bir tür tespit edilememiştir.

Haque, Peralta-Videa, Jones, Gill ve Gardea-Torresdey (2008) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, Amerika Birleşik Devletleri'nin Arizona Eyaleti'ndeki maden atıklarında yer alan *Baccharis sarothroides* bitkisi araştırılmıştır. Toprakta, bitkilerde ve atıklarda bulunan metal değerleri çeşitli metal analizleri ile incelenmiştir. Çalışmada konsantrasyonlar değerlendirildiğinde, kurşun 207,4; krom 84,5; kobalt 35,6; bakır 526,4; molibden 89,1; çinko 51,7; nikel 39,7 ve arsenik 49,6 mg/kg olarak tespit edilmiştir. Köklerdeki konsantrasyonlar incelendiğinde, kurşun 151,9; krom 57,1; kobalt 26,7; bakır 818,3; arsenik 44,6; molibden 73,9; çinko 40,1 ve nikel 96,8 mg/kg olarak belirlenmiştir. Gövdedeki konsantrasyonlar değerlendirildiğinde ise krom 105,5; nikel 30,9; molibden 105,8; çinko 55,2; bakır 1214,1; kobalt 10,9; arsenik 36,9 ve kurşun 107,3 mg/kg olarak bulunmuştur. Buna ek olarak, çalışmada biyoakümülayon faktörü, zenginleştirme faktörü ve translokasyon faktörü değerlendirilmiştir. *Baccharis sarothroides* bitkisinin As, Cu, Ni, Zn, Pb ve Cr açısından hiperakümülatör olabileceği sonucuna ulaşılmıştır.

Tang ve diğeri (2009), Çin’de yer alan ve bölgedeki en büyük kurşun-çinko maden alanında kadmiyum ve çinko birikimini incelemek üzere araştırma gerçekleştirmişlerdir. Bu araştırmanın yürütülmesi için *Picris divaricata* Vant. bitkisi üzerinde incelemelerde bulunmuşlar ve alan çalışması yapmışlardır. Bu bitkinin üst kısımlarında Zn değerinin $15,183 \mu\text{g g}^{-1}$ ve Cd değerinin $364 \mu\text{g g}^{-1}$ düzeyinde birikme gösterdiğini tespit etmişlerdir. Bununla birlikte, araştırmacılar tarafından Cd ve Zn yönünden translokasyon faktörü değerlerinin 1’den büyük olduğu saptanmıştır. Araştırmacılar, *Picris divaricata* bitkisini yeni bir Cd ve Zn hiperakümülatör tür olarak değerlendirmişlerdir.

Kumari, Lal, Pakade ve Chand (2011), Hindistan’da (Bihar Eyaleti) termik santralin etrafındaki beş ayrı kısımda gözlemlenen *Pteris vittata* L. bitkisini Si, Cr, Zn, As, Fe, Ni, Cu, Al ve Pb konsantrasyonları yönünden değerlendirmişlerdir. Araştırmacılar, Si, Cr, Zn, As, Fe, Ni, Cu, Al ve Pb metallerinin *Pteris vittata* bitkisinin toprak üstü bölgelerinde, toprak altı bölgelerine oranla önemli düzeyde daha yüksek miktarda biriktiğini bildirmişlerdir. *Pteris vittata* bitkisinin metalle kontamine olmuş sahalarda fitoremediasyon amaçlı kullanılabileceğini de ortaya koymuşlardır.

Nouri ve diğeri (2011) tarafından İran’ın Hamedan şehrinde yer alan bir maden sahasında çeşitli bitkilerin fitoremediasyon kapasiteleri değerlendirilmiştir. Çalışmada, translokasyon ve biyokonsantrasyon faktörleri üzerinde durulmuştur. Biyokonsantrasyon faktörü (BF) ile ilgili değerler incelendiğinde, Zn ağır metali için *Centaurea virgata*, *Scariola orientalis* ve *Echinophora platyloba* bitkilerinden ve Pb ağır metali için *Scrophularia scoparia* bitkisinden fitoremediasyon amaçlı yararlanılabileceği saptanmıştır. *Cirsium congestum* ve *Centaurea virgata* bitkilerinin ise Mn ağır metale yönelik fitoremediasyon amaçlı kullanılabileceği gözlemlenmiştir.

Bech ve diğeri (2012) tarafından Peru’nun Cajamarca Eyaleti’nde yer alan maden sahasında *Senecio* sp. ve *Bidens triplinervia* bitkilerinin fitoremediasyon için uygun olup olmadığı incelenmiştir. Araştırmada, kirliliğe maruz kalmış alanların Zn değerinin $28,393 \text{ mg/kg}$ ve Pb değerinin $13,105 \text{ mg/kg}$ olduğu ve bu değerlerin yüksek bulunduğu saptanmıştır. Bununla birlikte, *B. triplinervia* bitkisinden Zn ve Pb metali açısından fitostabilizasyonda yararlanılabileceği tespit edilmiştir.

LoRESTANI, Cheraghi ve Yousefi (2012) İran'daki çinko-kurşun madeni bölgesinde bir vaka araştırması gerçekleştirmişlerdir. Araştırmada, zenginleştirme faktörü ve translokasyon faktörü değerlerinden yararlanılmıştır. Araştırmanın sonucunda, bitkilerdeki metal birikiminin hem türler hem de bitki bölümleri açısından farklılık gösterdiği tespit edilmiştir. Metal içeriğinin yüksek olduğu alanlarda yetiştirilen bitkilerin oldukça fazla metal düzeyine sahip olduğu gözlemlenmiştir. Araştırmacılar tarafından *Centaurea virgata* ve *Euphorbia macroclada* türlerinin ağır metal ile kirlenmiş sahalarda fitoremediasyon amacıyla kullanılabileceği ifade edilmiştir.

Olivares, Carrillo-González, González-Chávez ve Hernández (2013), metal açısından kirlenmiş maden atıklarının bulunduğu alanların ıslah edilmesinde *Ricinus communis* L. bitkisinden yararlanılma durumunu incelemişlerdir. Translokasyon faktörü değerleri ve içerikleri incelendiğinde, bu bitki türünün metal akümülatörü olmadığı tespit edilmiştir. Bunun yanında, bitkinin sürgünlerindeki metal konsantrasyonunun düşük düzeyde olduğu belirlenmiştir. Köklerde yer alan metal konsantrasyonunun ise yüksek düzeyde olduğu gözlemlenmiştir. Bütün bunlardan hareketle, *Ricinus communis* bitkisinin fitostabilizasyon amacıyla değerlendirilebileceği sonucuna ulaşılmıştır.

R. Dragović, Zlatković, S. Dragović, Petrović ve Mandić (2014) tarafından Sırbistan'da *Salsola tragus* bitkisinde ağır metal birikimi hakkında çalışma yapılmıştır. Bu çalışma için toprak ve bitkilerden örnek alımı gerçekleştirilmiş ve on farklı metal (Zn, Cu, Co, Ni, Fe, Cd, Cr, Pb, Mn ve V) için biyoakümülyasyon ve transfer faktörleri hesaplanarak incelemede bulunulmuştur. Çalışmada, transfer faktörü değerleri 1,92; 1,27; 1,08; 0,96; 1,06; 1,06; 1,18; 1,02; 2,18 ve 0,63 biyoakümülyasyon faktörü değerleri ise 0,24; 0,15; 5,42; 1,80; 0,22; 6,32; 2,08; 1,82; 0,06 ve 3,18 olarak araştırmacılar tarafından sıralanmıştır. Ayrıca çalışmada, bitkinin Cu, Pb, Cd ve Cr ağır metalleri açısından fitoremediasyonda kullanılabileceği bilgisine ulaşılmıştır.

Yang ve diğerleri (2014), Çin'in Hunan Eyaleti'nde manganez madeninde araştırma gerçekleştirmişlerdir. Yirmi bir familyanın elli bir taksonu kapsamında dominant özelliğe sahip on iki bitki türünün fitostabilizasyon ve ağır metal biriktirebilme kapasiteleri incelenmiştir. Bu bağlamda translokasyon ve biyokonsantrasyon faktörü hesaplamalarından yararlanılmıştır. Bu araştırma kapsamındaki sekiz bitki türü olan *Setaria plicata*, *Artemisia princeps*, *Bidens pilosa*, *Erigeron canadensis*, *Cynodon dactylon*, *Digitaria sanguinalis*, *Alternanthera philoxeroides* ve *Bidens frondosa* biyokonsantrasyon faktörü yönünden incelendiğinde Mn, Zn, Pb ve Cd ağır

metallerinin birikiminin az olduğu tespit edilmiştir. Bununla birlikte, ağır metal stresi mevcut olsa da bitkilerin gelişimlerine devam ettikleri araştırma sonucunda belirlenmiştir.

Ağar (2015) tarafından yapılan çalışmada, süs lahanası yetiştiriciliğinde arıtma çamuru ile topraktan oluşan beş farklı ortamdan yararlanılmıştır. Çalışmada fizyolojik parametreler (PSII, SPAD, turgor kaybı, iyon sızıntısı ve yaprak oransal su kapsamı), bitkisel büyüme parametreleri (kök uzunluğu, yaprak sapı uzunluğu ve çapı, yaprak uzunluğu ve genişliği, gövde boyu, bitki yüksekliği, baş yüksekliği, üst aksam ve kök yaş ağırlıkları, kök kuru ağırlıkları, gövde ve kök boğazı çapı vb.) ile arıtma çamurundaki ağır metaller ve bitki besin elementleri (Zn, N, K, P, Ca, Mn, Cu, Mg, Fe, B, Na) araştırılmıştır. Çalışmanın sonunda arıtma çamurunun besin elementi alımında önemli olduğu tespit edilmiştir.

Doğan (2015), bir maden alanından açığa çıkan su içerisindeki Ni, Cr ve Co metallerinin *Lemna minor* L. ve *Lemna gibba* L. bitkileri tarafından alınma durumunu incelemiştir. Araştırmacı, bu bitki türlerini bir botanik bahçesinden almış ve maden sularının yer aldığı alanda 8 gün süresince bekletmiştir. Bitkileri toplayarak çeşitli laboratuvar işlemlerinden geçirip değerlendirmiştir. Araştırmacı, *Lemna minor* ve *Lemna gibba* bitkilerinin araştırmaya konu olan metalleri önemli ölçüde akümüle ettiği sonucuna ulaşmıştır.

Čudić, Stojiljković ve Jovović (2016), Sırbistan'daki çinko atık depolama alanında yürüttükleri araştırmada doğal yayılış gösteren bitkileri belirleyerek bu bitkilerin fitoremediasyon yeteneklerini incelemek istemişlerdir. Araştırmada, kök bölgesi topraklarındaki ağır metal içeriklerinin ortalamalarına bakıldığında bu değerlerin Cu için 3193,3; Cr için 41,7; Cd için 865,4; Ni için 50,7; Pb için 22948,6; Zn için 85301,7 ve As için 617,9 mg/kg olduğu belirlenmiştir. Ek olarak, incelemeye konu olan *Artemisia artemisiifolia* bitki türünden As, Pb ve Cd için fitostabilizasyon amacıyla yararlanılabileceği araştırmada tespit edilmiştir.

Gevrek Kürüm (2016) tarafından *Eriophorum vaginatum*, *Noccaea caerulescens* ve *Eriophorum scheuchzeri* bitkilerinin çimlendirilerek büyütülmesi ve ağır metal uygulaması yapılarak bitkilerin metal biriktirme kapasitelerinin belirlenmesi için çalışma yapılmıştır. Çalışma kapsamında bakır madeni alanından tohumlar elde edilmiştir. Çeşitli işlemler yapılmış ve büyütülen bitkilere bakır, kadmiyum ile çinko uygulaması yapılmıştır. Bitkiler üzerindeki metal birikim değerleri ölçülmüştür. *Eriophorum vaginatum* çinko ağır metali açısından hiperakümülatör bir bitki olarak adlandırılmıştır. Ek olarak, bu çalışmada kullanılan bitkilerin

fitostabilizasyon ve fitoekstraksiyon amacıyla yararlanılabileceği ve metalle kontamine olmuş bölgelerde bu bitkilerin etkili olabileceği sonucuna da ulaşılmıştır.

Haghighi ve diğerleri (2016) yaptıkları araştırmalarında tuzlu topraklarda süs lahanasının vejetatif büyüme ve çimlenme durumlarını incelemişlerdir. Toprakta yer alan kurşun ve kadmiyum konsantrasyonlarının artmasıyla birlikte bitkilerin kuru ve taze ağırlıklarında azalma meydana geldiği bulunmuştur. Bununla birlikte, araştırmada kurşun ve kadmiyum stresinin bitkilerin prolin içeriğinde de azalmaya yol açtığı sonucuna ulaşılmıştır.

Kiazolu (2016) çalışmasını kullanılmayan bir wolfram maden işletmesinde üç ayrı sahada bitki ve topraktan örnekleme yaparak gerçekleştirmiştir. Çalışmasını maden sahasında ve maden sahasından ortalama 500 metre ileride olan iki örnek sahada yürütmüştür. Araştırmacı, bu iki örnek sahanın kirletilmemiş bir bölge olduğunu kabul etmiştir. Çalışmasının sonunda *P. holosteum* türünün Mn, Zn, B, Cd, W ve Cu yönünden biyoakümülatör bir tür olarak kabul edilebileceğini ve bu metaller için indikatör olarak yararlanılabileceğini tespit etmiştir.

Mahdavian, Ghaderian ve Torkzadeh-Mahani (2015) İran'da Yazd Eyaleti'nde çinko ve kurşun maden alanında yürüttükleri araştırmada bu alanda yer alan bitkileri gümüş, çinko ve kurşun metalleri yönünden incelemişlerdir. Bu amaca yönelik transfer faktörü ve biyokonsantrasyon faktörü değerleri hakkında hesaplama yapmışlardır. Zn ve Pb elementinin fitostabilizasyonu açısından *Achillea wilhelmsii*, *Mentha longifolia*, *Nonnea persica* ve *Erodium cicutarium* bitkilerinin uygun olduğunu vurgulamışlardır. Ag elementinin düşük yoğunlukta olduğu bölgelerde ise *Hordeum glaucum*, *Lallemantia royleana*, *Colchicum schimperi*, *Thuspeinantha persica*, *Bromus tectorum* ve *Londesia eriantha* bitkilerinin fitoekstraksiyon için elverişli olduğunu bildirmişlerdir.

Fernández ve diğerleri (2017) tarafından Kuzey İspanya'da yapılan çalışmada As-Hg ve Zn-Pb içeren maden atıklarının yer aldığı bölgede çeşitli bitkilerin fitoremediasyon potansiyelleri incelenmiştir. Bundan hareketle, bitkilerden ve topraklardan alınan örnekler araştırılmıştır. Bitkilerdeki ve topraktaki ağır metal içeriklerinden yararlanılarak biyoakümülatör faktörü sonuçları değerlendirildiğinde Zn ağır metaline yönelik BAC değerlerinin (*Pteridium aquilinum* (BAC=1,40), *Coincya monensis* (BAC=6,59), *Betula celtiberica* (BAC=1,20) ve *Salix atrocinerea* (BAC=3,73)) önemli olduğu tespit edilmiştir. Cd ağır metaline yönelik BAC değerlerine bakıldığında bu değerlerin (*Juncus effusus* (BAC=2,32), *Coincya monensis*

(BAC=18,57) ve *Salix atrocinerea* (BAC=1,75)) önemli olduğu bildirilmiştir. Hg ağır metale yönelik BAC değerleri incelendiğinde ise bu değerlerin (*Cistus salviifolius* (BAC=1,95), *Anarrhinum bellidifolium* (BAC=2,96), *Dactylis glomerata* (BAC=3,90), *Salix atrocinerea* Brot. (BAC=2,11), *Piptatherum miliaceum* (BAC=2,24) ve *Brassica* sp. (BAC=4,03)) önemli olduğu saptanmıştır. Bununla beraber Pb, Hg, Zn ve As ağır metallerine yönelik bu alanda yer alan bitkilerin fitoremediasyon yeteneklerinin olduğu da araştırmacılar tarafından vurgulanmıştır.

Yıldırım ve Şaşmaz (2017) tarafından Gümüşköy’de yer alan gümüş maden alanında gerçekleştirilen çalışmada maden topraklarında yer alan Zn, As ve Pb elementleri yönünden 11 karasal özelliğe sahip bitki araştırılmıştır. Bu amaç doğrultusunda bitkilerin gövde ve kök bölümlerinde zenginleştirme faktörü değerleri incelenmiştir. Araştırılan bitkilerin gövde, toprak ve köklerindeki metal konsantrasyonlarının ortalama değerleri Pb metali için gövdede 1050, toprakta 4180 ve kökte 1424 mg/kg olduğu tespit edilmiştir. As metali için gövdede 1340, toprakta 4771 ve kökte 2320 mg/kg olduğu bulunmuştur. Ag metali için ise gövdede 11,51, toprakta 35,93 ve kökte 10,19 mg/kg olduğu belirlenmiştir. Zenginleştirme faktörü değerleri araştırıldığında *Verbascum thapsus* gövdelerinin, *Glaucium flavum* köklerinin ve *Phlomis* sp. gövde ve köklerinin As metale yönelik zenginleştirme faktörü değerlerinin yüksek olduğu gözlemlenmiştir. *Phlomis* sp. gövde ve köklerinin Pb metale yönelik zenginleştirme faktörü değerlerinin yüksek olduğu sonucuna ulaşılmıştır. *Verbascum thapsus* gövdelerinin, *Glaucium flavum* köklerinin ve *Silene compacta* gövde ve köklerinin ise Ag metale yönelik zenginleştirme faktörü değerlerinin yüksek olduğu belirlenmiştir.

Mohsenzadeh ve Mohammadzadeh (2018) çalışmalarını çinko ve kurşun madeni bölgesinde üç tane baskın bitki türü olan *Stachys inflata*, *Conium maculatum* ve *Reseda lutea* üzerinde gerçekleştirmişlerdir. Ortamdan hasat edilen bitkilerin toprak altı kısımları ve sürgünlerindeki bakır, nikel, kurşun, kadmiyum ve çinko konsantrasyonlarını incelemişlerdir. Çalışmaya konu olan bitkilerden çinko ve kurşunun en fazla *C. maculatum*'da (sırasıyla 820 ve 1200 mg/kg) olduğunu belirlemişlerdir. En fazla nikel, bakır ve kadmiyum konsantrasyonunun *S. inflata*'da (sırasıyla 96, 140, 20 mg/kg) olduğunu bulmuşlardır. Madende yer alan toprağın metal içeriğinin kontrol bölgesinden (maden bölgesinin 1 km uzağı) daha yüksek olduğu da tespit edilmiştir. Çalışmanın sonunda araştırmacılar, bu üç bitki türünün biriktirme özelliğinin olduğunu da bildirmişlerdir.

Palutoglu ve diğerkleri (2018) tarafından yapılan çalışmada Gümüşköy maden sahasında çalışma gerçekleştirilmiştir. 11 bitki üzerinde kadmiyum (Cd) ağır metali yönünden fitoremediasyon araştırması yapılmıştır. Çalışmada bitkilerin sürgün, toprak ve köklerindeki yaklaşık Cd değeri sıralandığında $43,5 \pm 4$; $82,8 \pm 5$ ve $55,4 \pm 6$ mg/kg olarak bulunmuştur. Ayrıca, bitkiler kök ve gövdelerine yönelik zenginleştirme katsayılarına bakılarak gruplandırılmıştır. Çalışma kapsamındaki *Phlomis* sp. ve *Carduus nutans* bitkilerinin Cd ile kirliliğe maruz kalmış topraklarda fitoremediasyon amaçlı kullanılabileceği ve akümülatör özellik gösterebileceği de bulunmuştur.

Midhat, Ouazzani, Hejjaj, Ouhammou ve Mandi (2019) Fas'ın güney kısmında kullanılmayan üç maden alanında yer alan bitki türlerinin metal kapasitelerini ve toprakların metal yönünden içeriğini anlamaya yönelik araştırma yapmışlardır. Bu üç maden alanında yayılış gösteren bitki türleri ve topraklar Zn, Cd, Cu, Pb konsantrasyonları yönünden değerlendirmişlerdir. İncelemeye konu olan toprakların makro besinler yönünden yeterli olmadığını ve toksik seviyede Zn, Cd, Cu ve Pb içerdiğini gözlemlemişlerdir. Araştırmadaki 46 bitki türünden sekizinin (*Hammada scoparia* (Pomel) Iljin, *Lactuca viminea* (L.) J.Presl ve C.Presl, *Lycium intricatum* Boiss., *Hirschfeldia incana* (L.) Lagr.-Foss, *Portulaca oleracea* L., *Forsskaolea tenacissima* L., *Stipa capensis* Thunb., *Citrullus vulgaris* (L.) Schrad.) metal içeriğinin fazla olmasından etkilenmediğini gözlemlemişlerdir. Köklerde ve sürgünlerde çoklu metal biriktirme kapasitelerinin fazla olduğu da bulunmuştur. Araştırmacılar, transfer faktörü değerinin de 1'den büyük olmasının bu araştırma sonuçlarını destekler nitelikte olduğunu vurgulamışlardır.

Çelikaş (2020) tarafından Adana İli Aladağ ilçesinde yer alan krom maden alanları floristik yönden araştırmaya konu olmuştur. Gözlemlenen bitki türleri sık, nadir, seyrek ve dominant olarak gruplara ayrılmıştır. *Salvia cryptantha*, *Convolvulus compactus*, *Alyssum alyssoides*, *Alyssum floribundum*, *Onosma cappadocicum*, *Aethionema spicatum*, *Thlaspi oxyceras*, *Fumana arabica* ve *Alsum oxycarpum* olarak sayılan bu 9 tür (sık ve dominant) remediasyon özelliklerinin ortaya çıkarılması için belirlenmiştir. Bu bitkilerin fitoremediasyon yeteneklerinin ortaya çıkarılması için bitkilerin gövde, kök, yaprak ve kök bölgesinde yer alan topraklarında metal incelemesi (Mn, Pb, Fe, Ni, Zn, Cr, Co ve Cu) yapılmıştır. Araştırmada transfer faktörü, zenginleştirme faktörü, translokasyon faktörü ve biyokonsantrasyon faktörü değerleri metal konsantrasyonları göz önünde bulundurularak hesaplanmıştır. Bununla beraber bu bitkiler fitoekstraksiyon ve fitostabilizasyon yetenekleri açısından gözlemlenmiştir. Fitoekstraksiyon yeteneği açısından araştırma yapıldığında *Aethionema spicatum* Mn için,

Convolvulus compactus ve *Onosma cappadocicum* Cr için, *Thlaspi oxyceras* Zn için ve *Aethionema spicatum* Co için fitoekstraksiyon yeteneği olduğu araştırma sonucunda gözlemlenmiştir. Fitostabilizasyon yeteneği açısından araştırma yapıldığında ise *Onosma cappadocicum* Cu için ve *Salvia cryptantha* Ni için fitostabilizasyon yeteneği olduğu araştırma sonucunda tespit edilmiştir. Buna ek olarak Ni için *Thlaspi oxyceras*, *Aethionema spicatum*, *Alyssum floribundum* ve *Alyssum oxycarpum* türlerinin hiperakümülatör özelliğe sahip olduğu tespit edilmiştir.

Bölükbaşı (2021) tarafından Cd stresine maruz kalmış domates bitkisinin gen ifadesindeki değişikliklerin tespit edilmesi amacıyla bir çalışma yürütülmüştür. Domates fideleri, 20 ve 1280 mg L⁻¹ aralığındaki kadmiyum ağır metale farklı konsantrasyonlarda ve bir gün boyunca maruz bırakılmıştır. Çalışma sonunda domates fidelerindeki GR-1 ve MT-2 genlerinin Cd stresine yönelik korunma mekanizmasında önemli bir işleve sahip olduğu tespit edilmiştir.

Sepehr ve Moradli (2021) süs lahanasında krom ve çinko ağır metallerinin birikim durumunu incelemek için gerçekleştirdikleri çalışmalarında süs lahanası fidelerini 30 gün boyunca farklı krom ve çinko konsantrasyonlarında (300, 200, 100 ve 0 ppm) yetiştirerek incelemede bulunmuşlardır. Çalışmanın sonucunda bitki fidelerine yüksek konsantrasyon uygulandığında çoğunlukla büyüme parametrelerinin olumsuz yönde etkilendiği belirlenmiştir. Bununla birlikte, bu bitkinin krom ve çinko ile kontamine olmuş topraklarda canlılığını ve dayanıklılığını sürdürdüğü için biriktirme potansiyeli olan bir tür olarak değerlendirilebileceği de araştırmacılar tarafından ifade edilmiştir.

Wu ve diğerleri (2021) tarafından farklı uzaklıktaki maden atıklarının yer aldığı üç alanda baskın özellikteki bitki türlerindeki ve topraktaki ağır metal içeriği konusunda alan araştırması yapılmıştır. Araştırmada, ağır metallerin bitkilerde birikme durumu ve ortamdaki dağılımı karşılaştırılmış ve ekosistemin restorasyonuna yönelik aday türlerin belirlenmesi sağlanmıştır. Kadmiyum, nikel, krom ve bakır açısından toprağın olması gerekenden fazla kirliliğe maruz kaldığı tespit edilmiştir. Maden atıklarının bulunduğu alandan uzaklaştıkça kurşun, krom ve bakır konsantrasyonunda azalma olduğu ve kadmiyum, nikel ve çinko konsantrasyonunda artış olduğu görülmüştür. Baskın özelliğe sahip olan 29 bitkide bakır, nikel, krom ve kadmiyum içerikleri ölçülmüştür. Bu değerlerin olması gereken konsantrasyon değerlerinin üzerinde olduğu tespit edilmiştir. Bitkilerde mevcut olan ağır metal içeriğinin değerlendirilebilmesi için translokasyon faktörü ve biyokonsantrasyon faktörü analizleri karşılaştırmalı olarak yapılmıştır.

Bu analizler sonucunda *Arthraxon hispidus*, *Rubus setchuenensis*, *Boehmeria nivea*, *Miscanthus floridulus*, *Senecio scandens*, *Conyza canadensis* ve *Chrysanthemum indicum* bitkilerinin fitoremediasyon adayı olarak görülebileceği belirtilmiştir. Bununla birlikte bu bitkilerin nikel, krom, bakır ve kadmiyum açısından kayda değer fitostabilizasyon potansiyelleri olduğu bildirilmiştir. Araştırmada *Polygonum capitatum* bitkisinin fitoekstraksiyon potansiyeli olduğu da belirtilmiştir.

Aybar (2022) tarafından akümülatör özelliğe sahip olan bitkiler ile araştırma yürütülmüştür. *Populus tremula*, *Ricinus communis*, *Helianthus annuus* L. ve *Betula pendula* bitkileri ile gerçekleştirilen çalışmada birden fazla metal ile kirliliğe uğramış topraklar iyileştirilmek üzere araştırma iki basamakta yapılmıştır. Cu kirliliğinin ortamdaki alınmasında en fazla etkili olandan en az etkili olana doğru sıralama yapıldığında Hint yağı, ayçiçeği, kavak, huş olarak bulunmuştur. Arazide yürütülen çalışmanın sonuçları değerlendirildiğinde yabancı Hint yağı bitkisi kullanılarak Zn içeren kirlilik 4,33 yıl, Cu içeren kirlilik yaklaşık 6,18 yıl ve Pb içeren kirlilik 3,10 yıl gibi az bir zamanda topraktaki olması gereken seviyeye ulaşabileceği bulunmuştur. Huş bitkisi incelendiğinde ise Zn içeren kirliliği Hint yağı bitkisinden daha az zamanda (2,78 yıl) topraktan arındırabileceği gözlemlenmiştir. Araştırmada çok ve tek yıllık bitkiler için de hesaplamalardan yararlanılmıştır. Bu hesaplamalarda kontrollü bir şekilde büyütülen bitkilerden biri olan yabancı Hint yağı bitkisi devamlı olarak bir toprakta ortalama olarak 3,58 yıl yetiştirilmeye çalışıldığında Zn kirliliği içeren toprakları bu metalden arındırabildiği sonucuna ulaşılmıştır. Kavak bitkisi ise en kısa zaman olarak 2,34 yılda Pb içeren topraklarda yetiştirildiğinde bu toprakları bu metalden arındırabileceği sonucuna ulaşılmıştır. Bununla birlikte; ayçiçeği, huş, Hint yağı, kavak bitkilerinden madencilik faaliyetleri ile zarar gören sahaların iyileştirilmesinde ağaçlandırma çalışmaları yapmadan önce ve fidan dikim süreçlerinde yararlanılabileceği araştırma sonucunda bulunmuştur.

Chamba-Eras, Griffith, Kalinhoff, Ramírez ve Gázquez (2022) Ekvador'un güney kısmında yer alan tropikal ormanlarda araştırma yapmışlardır. İki adet odunsu özelliğe sahip yerli bitkilerin Pb, Hg, Cd ve Zn ağır metallerini biriktirme yeteneklerini incelemişlerdir. *Miconia* sp. ve *Erato polymnioides* bitkilerinin beraberinde rizosferik toprakları da örneklem yapılmıştır. Araştırmada dağlık bulut ormanı alanından ve aktif olarak altın madenciliği yapılarak kirlilikten etkilenmiş olan alandan örneklemeler yapılmıştır. Araştırma sonucunda *E. polymnioides* türünün Zn ve Cd ağır metallerine yönelik fitoekstraksiyon yeteneğinin olduğu bulunmuştur. *Miconia* sp. türünün ise Zn ve Cd ağır metali yönünden fitostabilizasyon yeteneğinin olduğu

tespit edilmiştir. Bunun yanı sıra, Hg metali yönünden her iki bitki türünün de fitoekstraksiyon yeteneğinin olduğu saptanmıştır.

Siyar ve diğerleri (2022) fitostabilizasyon ve fitoekstraksiyona uygun bitki türlerinin seçimini yapabilmek için İran'da bulunan bir bakır dökümhanesinin yakınlarında çalışmalarını yürütmüşlerdir. Bu tesiste bulunan yerli bitki türlerinin fitoremediasyon yöntemine elverişli olma durumlarını ve fitoremediasyon kapasitelerini anlamaya yönelik yürüttükleri çalışmalarında biyokonsantrasyon faktörü (BCF), metal birikim endeksi (MAI) ve translokasyon faktörü (TF) değerlerini incelemişlerdir. Bu dökümhane yakınlarında yayılış gösteren (*Artemisia* sp., *Stipa* sp., *Launaea acanthodes*, *Peganum harmala* ve *Cousinia congesta*) beş bitki türünden elli bitki üzerinde incelemelerde bulunmuşlardır. Çalışmada, TF ve BCF değerlerinin 1'den fazla olduğu durumlarda o bitki türünün fitoekstraksiyon potansiyelini barındırdığını vurgulamışlardır. *Artemisia* sp. bitkisinin fitoekstraksiyon için elverişli olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca, çalışmada yalnızca *Artemisia* sp. hiperakümülatör bir bitki olarak adlandırılmıştır. *Cousinia congesta* ve *Launaea acanthodes* bitkilerinde ise BCF değerlerinin fazla olduğunu ve TF değerinin az olduğunu araştırmacılar aktarmışlardır ve bu bitkilerin fitostabilizasyon amacıyla kullanılabileceğini bildirmişlerdir. Bununla birlikte, *Launaea acanthodes* bitkisinin TF değerinin 1'den az olduğu ve BCF değerinin 1'den fazla olduğu söylenerek bu bitkinin arseniğin fitostabilizasyonunda kullanılabileceğinden de bahsedilmiştir.

Dou ve diğerleri (2023) tarafından Çin'in Guixi şehrinde bir bakır dökümhanesinin yakınlarında bulunan dört kültür ve 14 yerli bitki türü ile bu bitki türlerinin bulunduğu topraklar incelenmek üzere toplanmıştır. Kirletici faktörler (CF), biyokonsantrasyon faktörü (BCF), jeobirikim indeksi (Igeo) ve translokasyon faktörü (TF) değerlerinin incelendiği çalışmada kadmiyum için kirletici faktörlerin değerinin 5,45–44,2 olduğu ve bakır için kirletici faktörlerin değerinin 8,67–32,3 olduğu saptanmıştır. Jeobirikim indeksine göre toprak kirlilik düzeyinin ise orta ve şiddetli kirlilik düzeyi arasında olduğu tespit edilmiştir. Çalışmaya konu olan 18 bitki türünün translokasyon potansiyeli ve ağır metal birikimi analiz edildiğinde kadmiyumun bakıra nazaran daha çok biriktirilebildiği ve transloke edilebildiği gözlemlenmiştir. Çalışmada, bahsedilen bu 18 bitki türünün hepsi araştırmacılar tarafından hiperakümülatör bir bitki olarak tanımlanmasa da *Mosla chinensis* Maxim, *Sedum plumbizincicola* ve *Elsholtzia splendens* Nakai bitkilerinin bitkisel ekstraksiyon için aday olarak gösterilebileceği aktarılmıştır.

Ilyas, Sabo, Akomolafe ve Mustafa (2023) tarafından yapılan çalışmada Nijerya’da bir maden bölgesinde çeşitli yerli bitkilerin fitoremediasyon yetenekleri incelenmiştir. Fitoremediasyon yeteneklerinin belirlenmesi için de topraktan ve bitkilerden örnekler alınarak biyokonsantrasyon faktörü (BCF), zenginleştirme faktörü (EF) ve translokasyon faktörü (TF) değerleri incelenmiştir. Bitkilerdeki ağır metal içeriklerinin toprağa nazaran daha fazla olduğu tespit edilmiştir. Araştırmacılar, bunun nedeninin bitkilerin bu metalleri akümüle ve tolere etme potansiyellerinden kaynaklandığını bildirmişlerdir. Değerlendirilen bitkilerin genellikle fitoekstraksiyon ve fitostabilizasyon özelliğini taşıdığı belirtilmiştir. *Acalypha indica* bitkisi Pb ağır metali için fitostabilizatör niteliğine sahip olduğu tespit edilmiştir. *Ageratum conyzoides*, *Triumfetta rhomboidea*, *Sida acuta*, *Acalypha indica* ve *Fumaria parviflora* bitkilerinin Cu ağır metali için fitoekstraksiyon amacıyla kullanılabileceği belirtilmiştir. Fitoekstraksiyonda Mn metali için *Fumaria parviflora*, *Calopogonium mucunoides* ve *Ageratum conyzoides* bitkilerinden ve fitostabilizasyonda Mn metali için *Sida acuta* ve *Triumfetta rhomboidea* bitkilerinden yararlanılabileceği çalışma sonucunda bulunmuştur. Ek olarak, çalışmada zenginleştirme faktörünün 1’den fazla olduğu aktarılmıştır.

Kaonda ve Chileshe (2023) tarafından madenlerden ortaya çıkan atıkların fitoremediasyonunda *Helianthus annuus* L. bitkisinin potansiyelinin incelenmesi amacıyla araştırma yürütülmüştür. *Helianthus annuus* bitkisi, pirit madeni atıklarında ve tarım alanı toprağında (kontrol) yetiştirilmiştir. Çalışmada maden atıklarında Cu konsantrasyonunun başta 40,76 mg/kg olduğu, gittikçe bu konsantrasyonun 36,59 mg/kg’a düşüş gösterdiği, Fe metalinin başta 23,70 mg/kg olduğu, zaman geçtikçe 10 mg/kg’a düşüş gösterdiği ve Zn metalinin konsantrasyonunun ise 3,58 mg/kg’dan 3,49 mg/kg’a düşüş gösterdiği saptanmıştır. Toplanan ayçiçeğinin yaprakları, sapları ve kökleri üzerinde de incelemelerde bulunulmuştur ve ağır metallerin atık alanlarından alınmasında etkili olduğu belirtilmiştir. Bunun yanında, araştırmada translokasyon faktörü değerinin en çok 0,25 olduğundan bahsedilmiştir.

Marcelo-Silva, Ramabu ve Siebert (2023) yaptıkları çalışmalarında metalle kontamine olmuş topraklara uyum sağlamış iki tür olan *A. castanea* ve *Aloe burgersfortensis* bitkilerinin fitoremediasyon yetenekleri ve yardımcı olma durumları ilk defa incelenmiştir. Altın ve platin atıklarını barındıran saksılarda bu bitkileri yetiştirip incelemelerde bulunmuşlardır. Bitkilerin yapraklarını biyoakümülyasyon faktörü yönünden araştırmışlardır. Öncü bitki özelliğinde olan Afrika papatyası ve Bermuda çimi tohum olarak bu bitkilerle birlikte saksılara ekilmiştir. Araştırmacılar, *A. castanea* bitkisinin Co, Zn, Cd, Ni, Mn metallerinin biyoakümülyasyonunda

daha çok etkili olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca, *A. castanea*'nın metal açısından kirliliğe maruz kalmış toprakların ıslah edilerek metallerin ortamdan alınmasında ve fitoremediasyonunda kullanılabileceği de aktarılmıştır. Özellikle çalışmada, altın ve platin atıklarından ortaya çıkan ağır metal içeren topraklarda *A. castanea* ve *Aloe burgersfortensis* bitkilerinin fitoekstraksiyon ve biyoakümülyasyon özelliklerinin olduğu bahsedilmiştir.

Toishimanov ve diğerleri (2023) Güney Kazakistan'ın Çimkent şehrinde kullanılmayan bir kurşun fabrikasının maden atıklarında tatlı patates üzerinde araştırma yapmışlardır. Maden atıklarının konsantrasyonları araştırıldığında Cd, Zn ve Pb değerlerinin sırasıyla 61,08; 262,90; 1354,50 mg/kg olduğunu belirtmişlerdir. Bu maden atığının yakınlarında bulunan toprakların Cd, Zn ve Pb metalleri ile kirlenme durumuna bakıldığında ise konsantrasyonların sırasıyla 8,25; 551,49; 7,76 mg/kg ile 19,23; 5,40 ve 245,74 mg/kg arasında olduğunu söylemişlerdir. Tatlı patatesteki konsantrasyonlar Cd için 1,19–1,80; Zn için 70,0–94,20 ve Pb için 28,70–45,10 olarak bulunmuştur. Ek olarak, kirlilik katsayısı da araştırılmış olup toprak deney alanlarının orta seviyede kirliliğe sahip olduğunu belirtmişlerdir. Bütün bunlardan yola çıkarak araştırmacılar, tatlı patatesin Zn ve Pb açısından hiperakümülatif bir bitki özelliğine sahip olduğu sonucuna ulaşmışlardır.

Vardumyan ve diğerleri (2024) tarafından yapılan çalışmada Ermenistan'daki Zangezur Molibden ve Bakır fabrikasının etrafında yer alan bölgedeki topraklardan örnekler alarak ex-situ yöntemlerle *Medicago lupulina* L. bitkisinin fitoremediasyon potansiyeli araştırılmıştır. Çeşitli katkı maddelerinden (EDTA, sitrik asit, amonyum nitrat, malik asit) yararlanılarak yürütülen çalışmada, katkı maddesinin bakırın fitoekstraksiyon hızını arttırdığı tespit edilmiştir. Bununla birlikte, bu katkı maddelerinin *Medicago lupulina* bitkisinin kök büyüme durumuna, biyokütlesine ve klorofil içeriğine olumlu yönde etki ettiği gözlemlenmiştir. Ayrıca, araştırmacılar tarafından Cu metali yönünden translokasyon faktörü ve biyokonsantrasyon faktörü değerlerinin 1'den büyük olduğu ve bu bitkinin fitoekstraksiyona uygun olduğu bulunmuştur.

Diallo, Hasnaoui, Dallahi, Smouni ve Fahr (2024) tarafından Fas'ın doğu kısmında yer alan ve kullanılmayan kurşun/çinko maden alanında metal kirliliğini tespit etmeye yönelik ve bu alanın iyileştirilmesinde kullanılacak olan yerel bitkileri belirlemeye yönelik araştırma yürütülmüştür. Alanda bulunan yedi yerel bitkiden ve topraktan çeşitli örnekler elde edilmiştir. Elde edilen bu örnekler aracılığı ile biyolojik konsantrasyon faktörü, ekolojik risk endeksi (ERI), translokasyon faktörü (TF), biyolojik birikim katsayısı (BAC) ve kirlilik indeksi (PI) değerleri

hesaplanmıştır. TF, BCF ve BAC değerlerinden hareketle *Stipa tenacissima* bitkisinin kadmiyum ve nikel açısından fitostabilizasyon kabiliyetinin olduğu ve çinko açısından fitoekstraksiyon kabiliyetinin olduğu araştırmacılar tarafından gözlemlenmiştir. Zenginleştirme faktörü ile ilgili sonuçlar incelendiğinde ise ortaya çıkan metal kirliliğinin madencilik çalışmalardan ve antropojenik faaliyetlerden kaynaklandığı gözlemlenmiştir. Araştırmada, kirlilik indeksi değerinin (PI) 1,6 ve 10,01 aralığında olduğu ve bu değer oldukça yüksek bir metal(loid) kirlilik düzeyini gösterdiği belirlenmiştir. *Artemisia herba alba* ise kadmiyum açısından fito-ekstraktör bir özellik gösterdiği belirtilmiştir. Ek olarak, *Astragalus armatus* incelendiğinde bu bitkinin nikel ile çinkoyu fitostabilize ettiği ve antimon ve arsenik yönünden ise fito-ekstraktör bir potansiyel taşıdığı tespit edilmiştir.

Medina-Díaz, López-Bellido, Alonso-Azcárate, Fernández-Morales ve Rodríguez (2024) İspanya'daki kullanılmayan kurşun/çinko madenindeki metalleri maden alanından uzaklaştırmak ve bu metallerin geri kazanımını sağlamak için araştırma gerçekleştirmişlerdir. Bu araştırmayı gerçekleştirmeye yönelik yerel bitki *Spergularia rubra* kullanılmıştır. Araştırmacılar, bitki türünün metali alabilme potansiyelini değerlendirmek için hem doğal bir ortam hem de voltaj gradyanı ve alternatif akımdan oluşan bir sistem ortaya koymuşlardır. Araştırmanın sonucunda araştırmacılar, bu bitki türünün sera ve doğal koşullarda kadmiyum ve çinko için hiperakümülatör bir özellik gösterdiğini bildirmişlerdir.

Lashkari Sanami, Ghorbani, Vahabzadeh, Hodjati ve Motesharezadeh (2024) Kuzey İran'da yer alan terk edilmiş kömür madeni atıklarında bitki türlerinin fitoremediasyon kabiliyeti olup olmadığını tespit etmek amacıyla araştırma yapmışlardır. *Capparis spinosa* (42,48 mg/kg) ve *Artemisia scoparia* (41,06 mg/kg) bitkilerinin Cu'nun fitoekstraksiyonunda etkili olduğunu gözlemlemişlerdir. Bunun yanında *Capparis spinosa* (7,67 mg/kg) Pb'nin fitoekstraksiyonunda ve *Cynodon dactylon* (3,4 mg/kg) Cr'nin fitoekstraksiyonunda potansiyel türler olarak araştırmacılar tarafından vurgulanmıştır. *Melica persica* ve *Hordeum vulgare* Ni'nin önemli bir fitoekstraktörü olduğu da belirlenmiştir. Ek olarak araştırmada *Glaucium fimbriigerum* ve *Sylibum marianum* bitki türlerinin As açısından dışlayıcı bir tür oldukları belirtilmiştir.

Shakeel ve diğerleri (2024) yaptıkları çalışmada Harnoi Abbottabad'da (Pakistan) bulunan kirliliğe maruz kalmış kömür madeni alanının çevresinde yer alan bitki türlerinin ağır metalleri biriktirebilme ve üst dokularına taşıma kapasitelerini incelemişlerdir. Çalışmada, bitki türleri ve bitkilerin geliştiği topraktan örnekler alınmış ve bu örnekler Ni, Cr, Cd, Pb ve Cu

konsantrasyonları açısından incelenmiştir. Ayrıca, dengeleyici ve çoklu metal hiperakümülatörü bitkileri tespit etmeye yönelik fitoremediasyon indekslerinden (BCF, TI, BAF ve TF) yararlanılmıştır. Çalışmada, bazı bitki türleri çoklu metal hiperakümülatörü olarak ifade edilmiştir. Araştırmacılar tarafından bu bitki türleri: *Amaranthus spinosus* (Cd, Cu ve Cr), *Chenopodium ambrosioides* (Cd, Cu ve Ni), *Ajuga bracteosa* (Pb ve Ni), *Bidens pilosa* (Cu, Pb ve Ni) ve *Rumex hastatus* (Cd ve Ni) şeklinde aktarılmıştır. Çoklu metali stabilize eden bitki türünün ise *Dodonaea viscosa* (Cd, Cu ve Ni) olduğu bildirilmiştir.

Zhang ve diğerleri (2012) *Arabidopsis thaliana* cinsine ait bitkilerde abiyotik strese yönelik savunma cevabında önem arz ettiği düşünülen FAD2 geninin tuz stresine yönelik cevabındaki görevini incelemişlerdir. Çalışmada FAD2 geninin tuz stresi koşullarında tohumun çimlenmesinde önemli olduğunu bildirmişlerdir.

3. MATERİYAL VE METOD

Bu çalışmada, süs lahanası (*Brassica oleracea* L. var. *acephala*) çeşitleri farklı konsantrasyonlarda kömür madeni atığına maruz bırakılmış ve koşullara en toleranslı çeşidin belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu doğrultuda çalışmada kullanılan materyaller ile uygulanan yöntemlere ilişkin ayrıntılar bu bölümde sunulmuştur.

3.1. Materyal

Süs lahanasına (*Brassica oleracea* L. var. *acephala*) ait Kamome Red F1 (Red), Kamome Pink F1 (Pink) ve Kamome White F1 (White) çeşitlerinin tohumları Antalya’da bulunan yerel bir firmadan (Tasaco Tarım) temin edildi. Tohumların yetiştirileceği farklı yetiştirme ortamları oluşturulmasında kullanılan kömür madeni atığı bakımında zengin topraklar Suluova Yeni Çeltik Kömür Madeni işletmesi atık alanlarından alınarak laboratuvara getirildi. Çalışma kapsamında incelenen ve atık alınan maden alanı Resim 3.1’de belirtilmiştir.



Resim 3.1. Çalışma kapsamında incelenen ve atık alınan maden alanı

3.2. Metod

Tez çalışmasında denemenin kurulmasında ve çalışma bulgularının elde edilmesinde kullanılan tüm metodlar aşağıda detayları ile verilmiştir.



Resim 3.3. Bitkilerin yetiştirildiği ortamın genel görünümü

3.2.3. Bitkilerin analizler için hazırlanması

Taze örnek gerektiren analizler (boy ölçümleri, taze ağırlıklar, yüzde su miktarı, elektriksel iletkenlik, klorofil, prolin ve malondialdehit) konsantrasyonları için aynı gün analiz yapılırken kurutulmuş örneklerde yapılacak analizler (kuru ağırlık) için bitki örnekleri etüvde 65 °C’de kurutularak laboratuvarında kese kâğıtları içerisinde saklanmıştır. Moleküler analizler için kullanılacak örnekler soğuk zincirde -80 °C’de analize kadar muhafaza edilmiştir.

3.2.4. Sürgünlerde boy, taze-kuru ağırlık ölçümleri ve yüzde su miktarının hesaplanması

Hasat sırasında her uygulama (C, %10, %20, %40 ve %60) için her saksıdan iki bitkide ölçüm yapılarak 8 tekerrürlü olacak şekilde boy ölçümleri yapılmıştır. Sürgün taze ve kuru ağırlık ölçümleri için her saksıdan 3 bitki seçilerek 12 tekerrürlü olacak şekilde yapılmıştır. Boy ölçümleri cetvel yardımı ile ağırlık ölçümleri ise hassas terazi ile gerçekleştirilmiştir. Taze ağırlıklar hasat sırasında ölçülürken kuru ağırlık ölçümleri için aynı bitki parçaları kese kâğıdı içerisinde 65 °C’de etüvde 72 saat kurutulmuş ve tekrar tartılmıştır. Su içeriği (Munns, 2008) aşağıdaki eşitliğe göre hesaplanmıştır.

$$\text{Yüzde Su Miktarı} = \frac{\text{Taze ağırlık} - \text{Kuru ağırlık}}{\text{Taze ağırlık}} \times 100 \quad (1)$$

3.2.5. Klorofil ölçümleri

Klorofil ölçümlerinde Falker ClorofiLOG CFL2060 SPAD ölçüm cihazı kullanılarak klorofil-a, klorofil-b ve toplam klorofil yoğunlukları ölçülmüştür (Resim 3.4.).



Resim 3.4. Klorofil ölçümlerinde yararlanılan SPAD cihazı

3.2.6. Prolin analizi

Prolin analizi için (Bates, Waldern ve Teare, 1973), 500 mg taze bitki örneği %3 sülfosalisilik asit ile ekstrakte edilmiş ve süzölmüştür. Daha sonra bir cam tüp içerisine sırasıyla 2 ml örnek, 2 ml ninhidrin çözeltisi (ninhidrin, ortofosforik asit ve asetik asit içeren) ve 2 ml asetik asit eklenmiştir. Örnekler, kaynar su banyosunda bir saat inkübasyona bırakıldıktan sonra buz banyosuna alınmış ve 4 ml toluen eklenerek 520 nm dalga boyunda spektrofotometrik olarak ölçüm yapılmıştır (Resim 3.5.). Spektrofotometre okumalarına göre prolin konsantrasyonları ($\mu\text{mol g}^{-1}$) hesaplanmıştır.



Resim 3.5. Prolin analizi

3.2.7. Lipit peroksidasyonu (Malondialdehit konsantrasyonu) analizi

Lipit peroksidasyonu Hodges, DeLong, Forney ve Prange (1999)'ın metoduna göre belirlenmiştir. 1 gram taze bitki materyali %80'lik etil alkolle ekstrakte edildikten sonra 10 dakika santrifüj edilmiş ve iki aşamalı olarak yürütülmüştür. Birinci aşamada trikloroasetik asit (TCA) ve %0.01'lik butilen hidroksitoluen (BHT) eklenip karışım vortekslenerek ve örnekler 95 °C'lik su banyosunda 25 dakika inkübe edilmiştir. Ardından buz banyosuna alınarak 10 dakika santrifüj edilmiş ve spektrofotometrede 532 ve 600 nm dalga boylarında okuma yapılmıştır. İkinci aşamada ise, 1 ml örnek üzerine %0,65'lik tiyobarbitürik asit (TBA) içeren %20'lik TCA konulmuş ve işlemin devamı birinci aşamadakinin aynısı olacak şekilde devam etmiş ve spektrofotometrik okuma 440, 532 ve 600 nm dalga boylarında yapılmıştır. Sonuçlar aşağıdaki formülde yerine konularak malondialdehit (MDA) konsantrasyonları (nmol g⁻¹) hesaplanmıştır.

$$[(\text{ABS } 532 + \text{TBA}) - (\text{ABS } 600 + \text{TBA}) - (\text{ABS } 532 - \text{TBA}) - (\text{ABS } 600 - \text{TBA})] = A \quad (2)$$

$$[(\text{ABS } 440 + \text{TBA} - \text{ABS } 600 + \text{TBA}) \cdot 0.0571] = B \quad (3)$$

$$\text{nmol MDA} / \text{ml} = (A - B / 157\,000) \cdot 10^6 \quad (4)$$

3.2.8. Membran geçirgenliği (Elektrolit sızıntısı)

Elektrolit sızıntısı Lutts, Kinet ve Bouharmont (1996) metoduna göre yapıldı. Her uygulamadan bitkilere ait yapraklardan 12 disk alındı ve 3 tüpe 4'er disk konuldu. Yapraklar deiyonize su ile üç kez yıkandı. Diskler 10 ml saf su içeren tüplere konuldu (Resim 3.6.).



Resim 3.6. Elektrolit sızıntısı uygulaması

Tüplere koyulduktan 24 saat sonra EC metre ile ölçüm (EC1) yapıldı. Daha sonra örnekler otoklavda 120 °C ve 20 dakika inkübe edildi. Dengeye geldikten sonra iletkenlik ölçümü (EC2) yapıldı. Elektrolit sızıntısı, EC1/EC2 oranı olarak tanımlandı ve yüzde olarak kullanıldı.

3.2.9. Yetiştirme ortamı analizleri

Örneklerde fiziksel ve kimyasal özelliklerin belirlenmesinde ulusal ve uluslararası standart yöntemler uygulanmıştır.

Su ile doygunluk (Saturasyon %)

Toprağın su ile doygunluk yüzdesi TS 8333 standardına göre belirlenmiştir. Bu yöntemde toprak üzerine saf su ilave edilerek doygunluk noktası tespit edilmiş ve doygunluk yüzdesi hesaplanmıştır.

pH tayini

Toprak pH'sı, potansiyometrik yöntemle cam elektrotlu pH metre kullanılarak ölçülmüş ve analizler EN ISO 10390 standardına uygun olarak gerçekleştirilmiştir.

Kireç (CaCO₃) içeriği

Topraktaki kireç miktarı, kalsimetrik yöntem ile belirlenmiş olup ölçümler TS EN ISO 10693 standardına göre yapılmıştır.

Organik madde

Organik madde miktarı (Walkley ve Black, 1934) ıslak yakma yöntemi ile belirlenmiş ve analizler TS 8336 standardına göre yürütülmüştür. Organik madde ölçümlerinde, %40 ve %60 maden atığı içeren yetiştirme ortamlarında nicel sonuç elde edilememiştir. Yöntemin yüksek karbon içeren topraklarda güvenilirliğinin azalabildiği ve bu koşullarda sonuçların güvenilir biçimde tahmin edilemeyebileceği literatürde de bildirilmiştir (De Leenheer ve Van Hove, 1958; De Vos, Lettens, Muys ve Deckers, 2007). Bu nedenle, yöntemsel sınırlılıklar nedeniyle nicel olarak belirlenemeyen veriler ilgili tablolarda “ÖLÇ.” (Ölçülemedi) olarak gösterilmiştir.

Alınabilir fosfor (P)

Fosfor analizi, (Olsen, Cole, Watanabe ve Dean, 1954) yöntemine dayalı olarak yapılmış ve spektrofotometrik tayin gerçekleştirilmiştir (SM 4500-PE). Fosfor, metal süzüntüsünden alınan örnekler kullanılarak analiz edilmiştir.

Makro ve mikro element analizi

Örneklerde bulunan toplam makro elementler (Ca, Mg, K) ve mikro elementler (Fe, Mn, Zn) elementlerinin çözeltiye alınmasında geri soğutmalı sistemde nitrik asit ile yaş yakma yapılmıştır. Süzüntüler atomik absorpsiyon spektrofotometresi ile ölçülmüş ve konsantrasyonlar mg/kg olarak verilmiştir.

3.2.10. Moleküler biyolojik analizler

Total RNA izolasyonu

Kömür madeni atıklarının modellenmesi yapılarak, gen ekspresyon farklılıkları araştırılacak olan farklı süs lahanası çeşitlerinden (Pink, White ve Red) alınan yaprak örnekleri RNA izolasyonu işlemine kadar -80 °C’de derin dondurucuda bekletilmiştir. Bu örneklerden RNA izolasyonu; kit aracılığıyla üretici firmanın (Cat. No./ID 74034, Qiagen, Germany) protokolüne göre yapılmış olup devamında RNA saflığı ve miktarı Nanodrop ND-Spectrometer 1000 (NanoDrop Technologies, Wilmington, DE, USA) cihazı kullanılarak belirlenmiştir.

Uygulanan RNA izolasyon Protokolü şu şekildedir:

1. Bitki örnekleri (Maksimum 10 mg) havan yardımıyla parçalanmıştır.
2. Yaprak örneklerine 450 µl RLC Tamponu eklenmiş ve bu karışım vortekslenmiştir.
3. Karışım; 2 ml’lik bir toplama tüpüne oturtulmuş olan bir QIAshredder kolonuna boşaltılmıştır. Daha sonra 2 dakika boyunca santrifüjlenmiştir ve bu karışım yeni bir mikrosantrifüj tüpüne boşaltılmıştır.

4. Arındırılmış olan süpernatant kısmına 0,5 hacim etanol karıştırılarak ardından pipetleme yöntemi ile karışması sağlanmıştır.
5. Numune RNeasy Mini kolonuna aktarılmış ve kapağı kapatılarak 15 saniye boyunca numunenin santrifüjlenmesi sağlanmıştır ve süpernatant RNeasy Mini kolonundan uzaklaştırılmıştır.
6. RNeasy Mini kolonuna 700 µl RW1 Tamponu eklenmiştir. Kolonun kapağı kapatılarak $\geq 8000 \times g$ 'de süresi 15 saniye olacak şekilde santrifüjlenmesi sağlanmıştır.
7. RNeasy mini kolonuna 500 µl Tampon RPE dahil edilerek ve kolonun kapağı kapatılarak $\geq 8000 \times g$ 'de süresi 15 saniye olacak şekilde santrifüjlenmesi sağlanmıştır.
8. RNeasy mini kolonuna 500 µl Tampon RPE eklenerek ve kolonun kapağı kapatılarak 2 dakika boyunca santrifüjlenmiştir ($\geq 8000 \times g$ 'de).
9. RNeasy mini kolonu 1,5 ml toplama tüpüne (yeni) geçirilmiştir. Daha sonra spin kolon membranına 30-50 µl RNaz içeriğine sahip olmayan (dH_2O) su eklenmiştir. Kolonun kapağı kapatılarak 1 dakika boyunca santrifüjlenmiştir ($\geq 8000 \times g$ 'de).

RNA izolasyon protokolüne göre izole edilen RNA'ların saflık ve miktar tayini Nanodrop ND-Spectrometer 1000 kullanılarak ölçülmüştür. Bununla birlikte izole edilen bazı örneklerin RNA'ları %1,2'lik agaroz jel elektroforezinden faydalanılarak da doğrulanmıştır.

DNaz uygulaması

İzole edilen bütün RNA örnekleri ortaya çıkabilecek DNA kontaminasyonuna yönelik DNase enzimi (Thermo Scientific EN0521) ile muamele edilmiştir. DNaz uygulama evreleri aşağıdaki gibi ifade edilebilmektedir:

- a) RNase free tüpe, Çizelge 3.1'de belirtildiği gibi bileşenler sırayla karıştırılmaktadır.

Çizelge 3.1. RNase free tüpe karıştırılan bileşenler

Bileşenler	Miktar
RNA	3 µL
10X Reaksiyon tamponu	1 µL
DNase enzimi (1U)	1 µL
DEPC'li ultra saf su aracılığı ile son hacim 10 µL'ye tamamlanmış olur.	

- b) 37 °C'de 1 saat boyunca inkübe edilmesi sağlanmıştır.
- c) Üzerine 1 µL 50 mM olacak şekilde EDTA aktarılmıştır.
- d) DNase inhibasyonuna yönelik 65 °C'de ve süresi 10 dk olacak şekilde inkübe edilmiştir.

Agaroz jel elektroforezi

İzole edilmiş olan bazı örneklerle ait RNA'lar doğrulamak amacıyla içerisinde 0,5 µl/ml etidyum bromür ile %1,2 agaroz konsantrasyonu olan jelde ve 1X TBE (Tris borat EDTA) tamponu içerisinde 5 V/cm olacak şekilde ortalama 1-1,5 saat jelde yürütülmüştür. Jel görüntülenerek (Syngene, Gene Genius) fotoğrafları kaydedilmiştir.

cDNA (Komplementer DNA) sentezi

cDNA sentezi, ProtoScript-II First Strand cDNA Synthesis Kit (BioLabs Inc., USA) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, tespiti yapılacak gen bölgelerinin uzun olmasından dolayı anchored-oligo(dT)₁₈ primeri tercih edilmiştir. Çizelge 3.2'de cDNA sentezinin ilk basamağında hazır hâle getirilen RNA-primer karışımı yer almaktadır. Bununla birlikte bu karışımdaki mevcut bileşenler ile son konsantrasyonları belirtilmiştir.

Çizelge 3.2. Primer karışımı ile total RNA'nın bileşenleri ve son konsantrasyonları

Bileşenler	Son konsantrasyonlar
Total RNA	1-6 µL (µg)
anchored-oligo(dT) ₁₈ (50 µM)	2 µL
ddH ₂ O	Toplam hacim 8 µL'ye tamamlanmış olmaktadır.

cDNA sentezi protokolü aşağıda belirtildiği şekilde yürütülmüştür:

- Çizelge 3.2’de belirtilmiş olan bileşenler soğuk zincir içinde 0,2 mL’lik tüpe sırasıyla karıştırılmıştır.
- Primer-total RNA karışımı Thermo marka ısı döngü cihazında sıcaklığı 65 °C olacak şekilde ve 10 dk süreyle bekletilerek RNA’nın ikincil yapısının denatürasyonu elde edilmiştir.
- Bu basamakların devamında örnekler anında buz üzerine koyulmuştur. Ters transkripsiyon reaksiyonunu yürütmek için Çizelge 3.3’te belirtilen diğer bileşenler sırası bozulmadan buzun üstünden alınmadan eppendorf tüpe aktarılmıştır.

Çizelge 3.3. Ters transkripsiyon reaksiyonuna yönelik yararlanılan bileşenler ve bileşenlerin miktarları

Bileşenler	Miktar
ProtoScript II Reaction Mix (2X)	10 µL
ProtoScript II Enzyme Mix (10X)	2 µL

- Yukarıda ifade edilmiş ve bileşenlerle hazırlanmış olan tüpler pipetaj işleminin devamında santrifüj edilmiştir.
- Ters transkripsiyon reaksiyonu Çizelge 3.4’te belirtilen programdan yararlanılarak Thermo marka ısı döngü cihazında yapılmıştır.

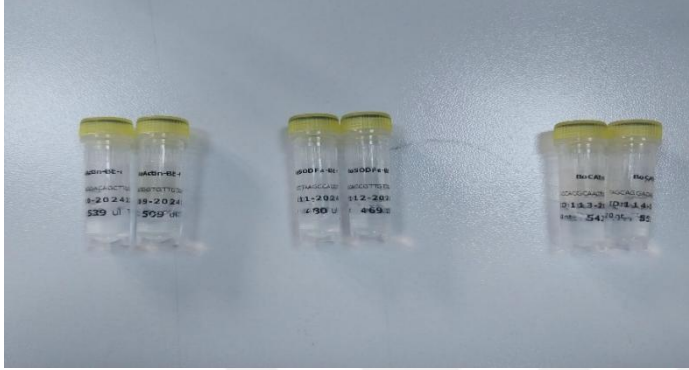
Çizelge 3.4. Ters transkripsiyon reaksiyonunun yürütüldüğü program

Primer	Hedef RNA	İnkübasyon Süresi
Anchored-oligo (Dt)₁₈ primer	4kb’a kadar	70 °C’de 5dk
		42 °C’de 60 dk
		80 °C’de 5dk

- Sentezlenen cDNA’lar Real time PCR reaksiyonu yürütülene kadar -20 °C’de derin dondurucuda bekletilmiştir.

Primer dizaynı

Tez çalışmasında housekeeping gen olarak kullanılan Aktin (*ACT*) ve hedef genler olarak belirlenen *SOD* ve *CAT* gen bölgelerine ait primerlerin tasarımı gen bankasında (NCBI; National Center for Biotechnology Information) bulunan lahana bitkisine (*Brassica oleracea* var. *acephala*) ait diziler kullanılarak yapılmıştır (Resim 3.7.).



Resim 3.7. Tez çalışmasına yönelik tasarlanan primerler

Çalışmada kullanılan primerlerin tasarımı için stresle ilişkili genlere (*SOD* ve *CAT*) ait bilgiler gen bankasından (NCBI) alınmıştır. Bu genlere ait bilgiler Çizelge 3.5'te verilmiştir. Bu genlere ait diziler belirlenmiş ve en uygun primerler bu tez çalışması için dizayn edilmiştir.

Çizelge 3.5. Çalışmada hedeflenen genlere ait bilgiler ile Real-Time PCR'de kullanılan primerlerin dizi ve erime sıcaklıkları

Gen/ Primer İsimleri	Uzunluk	Gen Bank No	Dizi (5'-3')	T _m (°C)
<i>BoSODFe-BE</i>	536 bp	JQ321586.1	F: GCTCCTTAAGCCACCTCCAT R: ACAGCAGCGTTGTTGAAAGG	58-60 °C
<i>BoCAT-BE</i>	1770 bp	GQ500124.1	F: CGCACGCAACTCAGGACTTA R: ATGCAGGACAGAAGGCAAGC	58-60 °C
<i>BoActin-BE</i>	1500 bp	AF044573.1	F: ACAGCATGGTGTGTTGTGAGCA R: TCGGAGAGGACAGCTTGGAT	58-60 °C

Real-Time PCR reaksiyonu

cDNA sentezinin ardından, SYBR Green I Master boyası kullanılarak Pico Real Time (Thermo, Almanya) cihazında Real-Time PCR analizleri gerçekleştirilmiştir. Çalışmada yer alan hedef genlere ilişkin diziler NCBI veri tabanından araştırılmış ve tespit edilmiştir. Bununla birlikte, bu bölgelere yönelik primerler tasarlanmış ve bu primerlerin ticari olarak sentezlenmesi sağlanmıştır. Normalizasyon işlemini yürütmek için housekeeping gen olarak Actin (*ACT*) geni tercih edilmiştir.

Çalışmalar gerçekleştirilmeden önce reaksiyon koşullarının optimizasyonu uygun hâle getirilmiştir. Buna yönelik ön denemeler gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen bu denemeler ile en uygun primer ile cDNA konsantrasyonları ortaya koyulmuştur. Real-Time PCR ön denemeleri sırasında uygun görülen koşullar arasında en iyi *cq* (quantification of cycle) değerini ortaya koyan koşullar çalışmada kullanılmak için tercih edilmiştir. Belirlenen optimal koşullardan yararlanılarak Real-Time PCR reaksiyonları üç teknik tekrar ile yürütülmüştür. Real-Time PCR reaksiyonları sırasında yararlanılan bileşenler ve konsantrasyonları (Çizelge 3.6.) ile belirlenen koşulların (Çizelge 3.7.) ifade edildiği çizelgeler aşağıdaki gibidir.

Çizelge 3.6. Optimize edilmiş olan ve yararlanılan Real-Time PCR bileşenleri ve bu bileşenlerin konsantrasyonları

Bileşen	Son konsantrasyon
cDNA	3 µL (~1,5-2,0 µg)
Forward Primer	1 µM
Reverse Primer	1 µM
Light Cycler ® SYBR Green 1 Master	1X
Toplam hacim 10 µl'dir.	

Çizelge 3.7. Real Time PCR reaksiyonunun uygulandığı program

Primer	Sıcaklık	Süre	Döngü sayısı
Ön denatürasyon	95 °C	10 dk	1
Denatürasyon	95 °C	15 s	40
Bağlanma	58-60 °C	20 s	
Uzama	72 °C	20 s	

Farklı konsantrasyonlardaki kömür madeni atığı modelinde yetiştirilmiş olan süs lahanası çeşitlerinin yapraklarından alınmış örneklerde *SOD*, *CAT* ve *ACT* genlerinin Real-Time PCR reaksiyonu takip edilerek pik profilleri belirlenmiştir.

Ct (Cycle Threshold) değeri reaksiyon hakkında pik profilinde logaritmik artış fazına geçiş yapılan döngüyü (ilk noktayı) temsil etmektedir. Her bir örneğe yönelik Ct değerleri gözlemlenen bu pik profilleri yardımıyla tespit edilmiştir.

Normalizasyon

Gen ekspresyon sonuçları Ct (Cycle Threshold) değeri olarak belirlenmiştir. Çalışmada kullanılan *ACT* (aktin) ve kontrol koşulları, housekeeping gen dikkate alınarak normalize edilmiştir. Süs lahanası çeşitlerinden alınan yaprak örneklerinden elde edilen transkript profilleri, housekeeping gen olarak seçilen aktin (*ACT*) ile karşılaştırılmıştır. Elde edilen veriler, Livak ve Schmittgen'in $2^{-\Delta\Delta Ct}$ yöntemi (Livak ve Schmittgen, 2001) esas alınarak normalize edilmiştir.

3.2.11. İstatistik değerlendirmeleri

Çalışmada elde edilen verilerin istatistiksel değerlendirilmesinde JASP yazılımı kullanılmıştır. Her bir parametre için öncesinde homojenlik testi yapılarak verilerin homojen dağılım gösterdiği belirlenmiş ve bu doğrultuda, parametreler açısından çeşitler arasındaki ve aynı çeşit üzerinde farklı yetiştirme ortamlarının etkilerinden kaynaklanan farklılıkları belirlemek amacıyla önce iki faktörlü varyans analizi (Two Way ANOVA, $p < 0.05$) uygulanmıştır. İki faktörlü varyans analizi sonuçlarında farklılıklar görüldükten sonra çeşitleri kendi içerisinde değerlendirmek amacıyla tek yönlü varyans analizi (ANOVA, $p < 0.05$) uygulanmıştır. Anlamli farklılıkların tespit edildiği durumlarda gruplar arasındaki karşılaştırmalar Tukey testi ile yapılmıştır. Tablolarda anlamlı sonuçlar gösteren veriler harflendirilmiş diğerleri boş bırakılmıştır. Ayrıca, yetiştirme ortamlarının özellikleri ile incelenen parametreler arasındaki ilişkileri ortaya koymak için korelasyon analizi gerçekleştirilmiştir. Korelasyon tablolarında önem düzeyleri ilgili değerin yanına yıldızlama yapılarak belirtilmiştir.

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1. Yetiştirme Ortamı Özellikleri

Bitkilerin deneme boyunca yetiştirildiği farklı ortamlara ait ortalama Saturasyon (%), Tuzluluk (%), pH, Kireç (%), Organik Madde (%), Fosfor (mg/kg), Ca (mg/kg), Mg (mg/kg), K (mg/kg), Mn (mg/kg), Zn (mg/kg) ve Fe (mg/kg) değerleri Çizelge 4.1’de görülmektedir.

Yetiştirme ortamlarının (Kontrol, %10, %20, %40 ve %60 maden atığı) kimyasal ve fiziksel özellikleri birlikte değerlendirildiğinde, çevresel koşullar arasında belirgin farklılıklar olduğu görülmektedir. Araştırılan özelliklere ilişkin veriler değerlendirildiğinde saturasyon değerleri %41–46 arasında değişmiş olup maden atığı oranının artmasıyla birlikte hafif bir artış eğilimi göstermiştir. Tuzluluk değerleri tüm uygulamalarda düşük düzeyde kalmış (0,02–0,06) ve toksik seviyelere ulaşmamıştır. pH değerleri ise 6,7–7,4 aralığında olup nötr sınırlarda kalmıştır. Bu durum, pH açısından ortamların bitki gelişimi için uygun koşulları sağladığını göstermektedir. Kireç içeriği, kontrol ortamında 10,83 iken artan maden atığı oranlarında 5,42–10,44 aralığında değişmiştir. Organik madde düzeylerinin maden atığı konsantrasyonlarının artışına paralel olarak artma eğiliminde olduğu görülmüştür. Fosfor konsantrasyonu 1,00–3,50 mg/kg arasında değişmiş, en yüksek değer %40 uygulamasında gözlenmiştir.

Makro elementler incelendiğinde, kalsiyum (Ca) içeriği 6,52–14,33 mg/kg, magnezyum (Mg) 3,53–5,18 mg/kg ve potasyum (K) 1,53–2,23 mg/kg aralıklarında değişmiştir. Mikro elementlerden mangan (Mn) 144,8–376,5 mg/kg, çinko (Zn) 6,2–18,87 mg/kg, demir (Fe) ise 16,060–19,350 mg/kg arasında ölçülmüştür. Özellikle Ca, Fe ve Mn elementlerinin tüm uygulamalarda yüksek düzeyde bulunması dikkat çekicidir. Bu veriler, maden atığı oranı arttıkça özellikle organik madde ve bazı besin elementlerinin konsantrasyonlarında değişiklikler meydana geldiğini göstermektedir. Bu değişimler, bitki stres yanıtı üzerinde belirleyici rol oynayabilecek bir durum oluşturmaktadır. Ayrıca pH ve tuzluluk değerlerinin düşük düzeyde kalması, stresin daha çok ağır metal ve besin elementi konsantrasyonlarındaki farklılıklardan kaynaklanabileceğini düşündürmektedir.

Çizelge 4.1. Farklı konsantrasyonlarda maden atığı içeren yetiştirme ortamlarının bazı fiziksel ve kimyasal özellikleri

	Kontrol	%10	%20	%40	%60
Saturasyon	41,00	41,00	42,00	42,00	46,00
Tuzluluk	0,02	0,04	0,04	0,04	0,06
pH	7,40	7,10	6,90	6,80	6,70
Kireç	10,83	10,44	10,06	6,58	5,42
Organik Madde	0,89	2,54	3,97	ÖLÇ.	ÖLÇ.
Fosfor	1,00	1,00	1,50	3,50	1,50
Ca	14264,19±47,4 4	13506±133,65	13638,14±133,0 6	8078,03±71,5 6	6599,41±77,0 3
Mg	5162±15,86	4771±8,51	4978,37±0,56	3986,37±6,34	3533,63±7,9
K	2219,68±3,23	1811,87±1,77	2228,78±5,18	1527,93±2,55	1595,62±0,67
Mn	374,74±1,38	338,75±2,33	346,5±5,53	179,8±1,11	148,94±3,48
Zn	18,12±0,94	17,08±1,16	10,56±0,64	6,78±0,39	13,93±0,11
Fe	17848,38±253, 3	16179,18±90,3 2	19230,82±11,63	17050±56,25	18820±170,93

ÖLÇ. (Ölçülemedi)

4.2. Sürgün Boyu Ölçümleri, Sürgün Kuru-Taze Ağırlıkları ve Yüzde Su İçeriği

Birbirinden farklı maden atığı konsantrasyonlarına sahip ortamlarda yetiştirilen bitkilerin sürgün boyu, sürgün taze ve kuru ağırlığı ile su içeriği değerleri Çizelge 4.2’de sunulmuştur.

Çizelge 4.2. Süs lahanası çeşitlerinde sürgün boyu, sürgün taze-kuru ağırlıkları ve su içerikleri ortalama değerleri

		Sürgün Boyu (mm)	Sürgün Taze Ağırlık (g)	Sürgün Kuru Ağırlık (g)	Su İçeriği (%)
Red	Kontrol	131,25±16,2	0,26±0,07 ^a	0,03±0,01 ^a	87,78±2,53
	%10	143,13±20,52	0,33±0,13 ^{ab}	0,06±0,03 ^b	82,25±2,03
	%20	143,13±13,08	0,35±0,13 ^{ab}	0,05±0,02 ^b	83,43±6,63
	%40	131,5±17,87	0,43±0,12 ^b	0,06±0,02 ^b	85,18±1,97
	%60	128,5±12,46	0,35±0,09 ^{ab}	0,05±0,01 ^{ab}	85,32±3,14
Pink	Kontrol	104,75±28,39	0,35±0,06	0,05±0,01	84,43±4,48
	%10	101,25±10,26	0,41±0,14	0,07±0,04	84,39±5,24
	%20	100,00±8,86	0,31±0,06	0,05±0,02	83,22±3,58
	%40	103,13±21,54	0,38±0,08	0,07±0,02	82,73±2,19
	%60	112,50±25,63	0,37±0,10	0,05±0,03	86,78±4,05
White	Kontrol	111,25±21,17	0,35±0,07	0,06±0,02	84,39±4,53
	%10	113,75±19,04	0,38±0,10	0,07±0,03	82,45±7,12
	%20	116,88±6,51	0,35±0,08	0,06±0,02	81,93±4,02
	%40	116,88±17,31	0,36±0,07	0,06±0,02	84,76±3,86
	%60	118,13±12,23	0,35±0,09	0,05±0,01	85,3±2,82

İstatistiksel olarak farklılık gösteren (Tukey, p<0,05) değerler sağ üst köşelerinde harflendirme yapılarak gösterilmiştir.

Sürgün boyu üzerine yapılan iki yönlü varyans analizi, çeşit faktörünün istatistiksel olarak anlamlı etkisini göstermiştir ($p < 0,001$). Buna karşılık uygulama faktörü ($p = 0,902$) ve çeşit $\times$ uygulama etkileşimi ($p = 0,515$) sürgün boyu üzerinde anlamlı bir farklılık oluşturmamıştır. Bu bulgu, sürgün boyundaki değişimlerin esas olarak çeşitler arasındaki genetik farklılıklardan kaynaklandığını, uygulama dozlarının ise belirgin bir etkiye sahip olmadığını ortaya koymaktadır.

Red, Pink ve White çeşitleri için yapılan tek yönlü ANOVA'da da uygulamaların sürgün boyuna etkisi istatistiksel olarak anlamsız bulunmuştur ($p_{Red} = 0,223$; $p_{Pink} = 0,766$ ve $p_{White} = 0,912$). Bu sonuçlar, çeşitler içerisinde farklı maden atığı oranlarının sürgün boyunu değiştirmedığını göstermektedir. Süs lahanasında metal stresi uygulanan bazı çalışmalarda bitki boyunda önemli bir değişiklik oluşturmadağını ifade eden çalışmaların (Haghighi ve diğerleri, 2016) yanında Brassicaceae aile bitkilerinde ağır metal stresinin bitki boyu üzerine olumsuz etkilerini ortaya koyan çalışmalar da (Ahmad ve diğerleri, 2020; Ahmed, Ahmad, Sardar ve Ismail, 2023) mevcuttur.

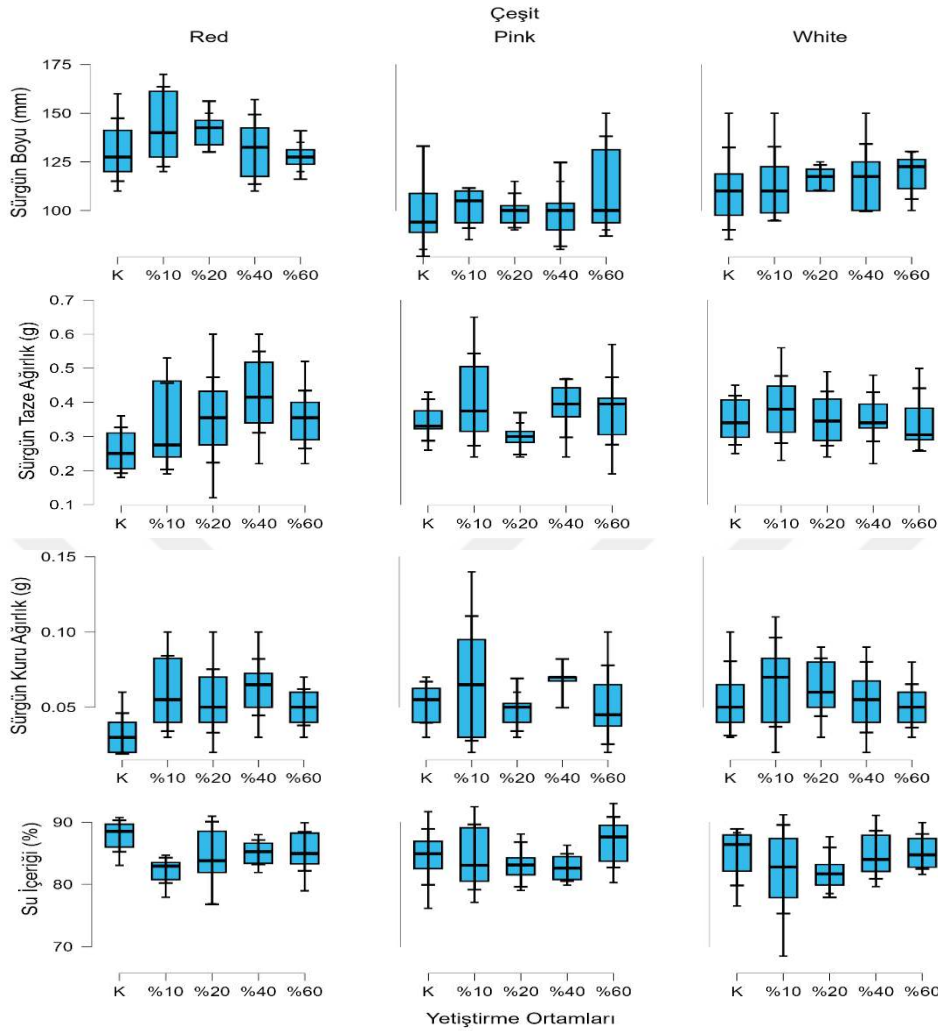
Sürgün taze ağırlığı üzerine yapılan iki yönlü varyans analizi sonucunda çeşit ($p = 0,252$), uygulama ($p = 0,227$) ve çeşit $\times$ uygulama etkileşimi ($p = 0,092$) istatistiksel olarak anlamlı bulunmamıştır. Çeşitler kendi içerisinde değerlendirildiğinde Pink ve White çeşitlerinde sürgün taze ağırlığındaki farklar anlamlı bulunmazken ($p_{Pink} = 0,651$, $p_{White} = 0,638$), Red çeşidinde genel değerlendirmenin aksine anlamlı farklılık bulunmuştur ($p = 0,02$). Sürgün kuru ağırlık üzerine yapılan iki yönlü varyans analizi sonucunda, uygulama faktörünün etkisi istatistiksel olarak anlamlı bulunmuştur ($p = 0,004$). Buna karşılık çeşit ($p = 0,173$) ve uygulama $\times$ çeşit etkileşimi ($p = 0,392$) istatistiksel olarak anlamlı bulunmamıştır.

Bu bulgular, uygulamaların sürgün kuru ağırlığı üzerinde genel olarak etkili olduğunu, ancak çeşitler arasında farklı bir tepkinin gözlenmediğini göstermektedir. Çeşitler ayrı ayrı incelendiğinde, Red çeşidinde sürgün kuru ağırlığında yetiştirme ortamları arasında anlamlı fark tespit edilmiştir ($p = 0,002$). Pink ($p = 0,258$) ve White ($p = 0,463$) çeşitlerinde ise fark gözlenmemiştir. Bu durum, yetiştirme ortamlarının özellikle Red çeşidinde sürgün kuru ağırlığını etkilediğini, ancak Pink ve White çeşitlerinde benzer bir etki göstermediğini ortaya koymaktadır. Haghighi ve diğerleri (2016) yürüttükleri çalışmalarında toprakta yer alan Pb ve Cd konsantrasyonlarının artması ile birlikte *Brassica oleracea* var. *acephala* bitkisinin taze ve kuru ağırlıklarında azalma meydana geldiğini ifade etmişlerdir. Ebbs ve Kochian (1997)

çalışmalarında hidroponik ortamda yetiştirilen üç *Brassica* türünde (*B. rapa*, *B. napus* ve *B. juncea*) Zn ve Cu uygulamasının hem sürgün hem de kök kuru ağırlığında düşüşe yol açtığını belirlemişlerdir.

Şekil 4.1’de verilen bulgulara bakıldığında, bu bulgular süs lahanası çeşitlerinin maden atığı içeren ortamlara verdikleri büyüme yanıtlarının çeşitlere göre farklılık gösterdiğini ortaya koymaktadır. Red çeşidinde taze ve kuru ağırlık değerleri arasında daha geniş varyasyon gözlenirken, White çeşidi daha dar dağılımlar ile daha stabil bir yanıt sergilemiştir. Pink çeşidinde ise özellikle yüksek dozlarda sürgün boyu ve taze ağırlıkta düşüş eğilimi dikkat çekmiştir. Abiyotik stres faktörlerinin bitkilerde büyüme parametrelerinde gerilemeye neden olduğu önceki çalışmalarda da ifade edilmiştir. Santangeli ve diğerleri (2019), tuzluluk stresine maruz kalan *Brassica napus*’ta biyokütle azalmasını rapor etmiş ve fotokimyasal aktivitenin kısmen etkilendiğini belirtmiştir. Yapılan başka bir çalışmada *Brassica juncea*’da ağır metal stresinin (kadmiyum) bitki boyunda, kök uzunluğunda ve kuru ağırlığında düşüşe neden olduğu bulunmuştur (Ahmad ve diğerleri, 2015). Bununla birlikte aynı abiyotik faktörün çeşitler arasında farklı tepkilere yol açtığı da bilinmektedir. Gisbert ve diğerleri (2006) tarafından yapılan çalışmada, kirlenmiş topraklarda yetiştirilen *Brassica juncea*, *B. carinata* ve *B. oleracea*’nın büyüme parametrelerinin ağır metal stresiyile baskılandığı, ancak *B. juncea*’nın kök ve sürgün gelişimini büyük ölçüde koruyarak en yüksek toleransı gösterdiği; buna karşılık *B. oleracea* ve *Hirschfeldia incana*’da büyüme gerilemeleriyle birlikte Cd ve Pb birikiminin daha yüksek seviyelerde gerçekleştiği rapor edilmiştir. Değerilen çalışmalar bizim bulgularımıza paralel şekilde abiyotik stres faktörlerinin büyüme parametrelerini olumsuz etkilediğini ve bu etki düzeyinin çeşide bağlı olduğunu açıkça göstermektedir.

Şekil 4.1’de görüldüğü üzere sürgün boyu, sürgün taze ve kuru ağırlıkları ile yüzde su içeriği değerleri birlikte ele alındığında dalgalanmaların nispeten en az olduğu çeşit White çeşidi iken Red çeşidinde en fazla dalgalanma görülmüştür. Bu bulgular büyüme parametreleri açısından farklı konsantrasyonlarda maden atığı içeren ortamlara White çeşidinin daha toleranslı olduğunu göstermektedir.



Şekil 4.1. Süs lahanası çeşitlerinde yetiştirme ortamlarının sürgün boyu, sürgün taze ve kuru ağırlıkları ile su içeriği üzerine etkileri

Çizelge 4.3'te görüldüğü üzere yetiştirme ortamı özellikleri ile sürgün gelişimi arasındaki korelasyon incelendiğinde, % saturasyonun sürgün taze ağırlıkla pozitif yönde ilişkili olduğu ($r = 0,367$; $p < 0,05$) görülmüştür. Bununla birlikte, pH'nın sürgün kuru ağırlıkla negatif korelasyon göstermesi ($r = -0,359$; $p < 0,05$) daha yüksek pH koşullarında kuru madde birikiminin azaldığını düşündürmektedir. Organik maddenin ($r = 0,407$; $p < 0,05$) ve fosfor ($r = 0,322$; $p < 0,05$) içeriklerinin sürgün kuru ağırlığı ile olan pozitif korelasyonu bu faktörlerin kuru ağırlık artışında etkili olduğunu göstermektedir. Organik madde konsantrasyonları ayrıca su içeriği ile negatif korelasyon ($r = 0,448$; $p < 0,05$) göstermiştir. Demir konsantrasyonunun sürgün taze ağırlıkla pozitif ($r = 0,410$; $p < 0,01$), çinko konsantrasyonlarının ise sürgün kuru ağırlıkla negatif ($r = -0,42$; $p < 0,00$) korelasyon gösterdiği görülmektedir.

Çizelge 4.3. Büyüme parametreleri ve yetiştirme ortamı özellikleri arasındaki ilişkiler

	Sürgün Boyu		Sürgün Taze Ağırlık		Sürgün Kuru Ağırlık		Su İçeriği (%)	
	r	p	r	p	r	p	r	p
Saturasyon	0,05	0,77	0,37**	0,01	0,16	0,28	0,29	0,05
Tuzluluk	0,15	0,33	0,25	0,10	0,20	0,18	0,24	0,12
pH	-0,16	0,31	-0,21	0,17	-0,36*	0,02	-0,17	0,26
Kireç	-0,08	0,59	-0,26	0,09	-0,27	0,07	-0,22	0,15
Organik Madde	0,18	0,37	0,01	0,97	0,41*	0,04	-0,45*	0,02
Fosfor	0,08	0,61	0,01	0,96	0,34*	0,02	-0,03	0,83
Ca	-0,08	0,61	-0,23	0,13	-0,25	0,10	-0,22	0,15
Mg	-0,10	0,52	-0,21	0,16	-0,22	0,14	-0,23	0,13
K	-0,13	0,39	-0,01	0,96	-0,15	0,34	-0,14	0,35
Mn	-0,09	0,56	-0,21	0,16	-0,26	0,09	-0,21	0,17
Zn	-0,08	0,61	-0,06	0,71	-0,42**	0,00	0,03	0,87
Fe	-0,03	0,83	0,41**	0,01	0,22	0,15	0,10	0,50

r(Pearson korelasyon katsayısı), p önemlilik düzeyi *p<0,05, **p<0,01

Yetiştirme ortamı bitkilerin çimlenmeden itibaren tüm süreçlerini etkileyen ve içerisinde birçok parametreyi barındıran bir kavramdır. Yetiştirme ortamı özelliklerinden biri de organik madde içeriğidir ve bitkilerin gelişmesinde önemlidir. Solomou, Michopoulos ve Mantakas (2023) tarafından yapılan çalışmada, boksit madeni atık alanında büyüme ve örtü parametrelerinin özellikle organik madde artışı ile belirgin şekilde iyileştiği bildirilmiştir. Ayrıca Naveed ve diğerleri (2021) tarafından yapılan başka bir çalışmada Cr kirliliği altında *Brassica napus*'un büyüme parametrelerinin ciddi şekilde baskılandığı, ancak özellikle biyokömür uygulamasıyla bitki boyu, kök uzunluğu ve kuru biyokütlede önemli artışlar sağlanarak büyümenin korunduğu rapor edilmiştir. Yetiştirme ortamının su düzeyi de büyüme parametreleri üzerine etkili olup yapılan bir çalışmada, su baskını koşullarında *Brassica juncea*'nın sürgün biyokütlesini diğer türlere kıyasla daha iyi koruyarak en yüksek toleransı gösterdiği, buna karşılık *B. napus*'un en düşük büyüme değerlerine sahip olduğu bildirilmiştir (Ashraf ve Mehmood, 1990). Bunlarla birlikte, Brassicaceae familyasına dâhil bitkilerde artan tuzluluk seviyelerinin büyümeyi olumsuz etkilediği (Sharaya, R. Gill, Naeem, Tuteja ve S. Gill, 2023), asidik toprak koşullarında büyümenin baskılandığı (Fornes, García-de-la-Fuente, Belda ve Abad, 2009) ifade edilmiştir.

Makro ve mikro element içerikleri de bitkilerin büyüme ve gelişmesinde önemli rol oynamaktadır. Buna örnek olarak Jadwisieńczyk, Majkowska-Gadomska, Francke ve Kaliniewicz (2023) tarafından yapılan çalışmada, farklı organik substratların *Brassica* fidelerinin büyüme parametrelerini iyileştirdiği, ancak besin elementleri açısından türlere bağlı

değişimlerin ortaya çıktığı; özellikle brokolide makro element alımının artarken mikro elementlerin azaldığı, White çeşidinde hem makro hem mikro elementlerde azalmalar görüldüğü, karnabaharda ise makro elementlerde düşüşe rağmen mikro element birikiminin arttığı bildirilmiştir.

4.3. Klorofil Pigmenti Ölçümleri

Birbirinden farklı ortamlarda yetiştirilen süs lahanası çeşitlerine (Red, Pink, White) ait ortalama klorofil-a, klorofil-b ve toplam klorofil değerleri Çizelge 4.4’de sunulmuştur. Red çeşidinde klorofil-a değerleri 13,80 ile 70,30 arasında değişim göstermiştir. Klorofil-b değerleri 5,70 ile 59,00 aralığında, toplam klorofil değerleri ise 28,60 ile 106,10 arasında ölçülmüştür. Pink çeşidinde klorofil-a değerleri 26,10–60,70 arasında, klorofil-b değerleri ise 3,70 ile 66,90 arasında değişmiştir. Toplam klorofil içerikleri 38,00–105,10 aralığında bulunmuştur. White çeşidinde klorofil-a değerleri 25,60–49,50 arasında, klorofil-b değerleri 9,00–26,90 arasında, toplam klorofil değerleri ise 41,70–66,40 arasında kalmıştır.

Çizelge 4.4. Klorofil-a, klorofil-b ve toplam klorofil ölçümleri (SPAD değeri)

		Klorofil-a	Klorofil-b	Toplam Klorofil
Red	Kontrol	43,22±8,83	17,74±4,48	61,00±6,70
	%10	36,93±11,32	16,72±6,79	53,69±9,93
	%20	39,15±7,92	25,07±14,23	64,26±20,72
	%40	36,33±6,65	20,47±7,85	56,99±11,70
	%60	36,19±6,43	17,49±4,68	53,67±7,57
Pink	Kontrol	39,68±8,56	18,38±7,03	58,12±9,54 ^{ab}
	%10	35,22±5,38	13,24±2,74	48,46±6,93 ^a
	%20	36,23±5,08	12,66±2,21	48,93±5,05 ^a
	%40	38,47±9,48	16,43±8,43	54,93±6,72 ^{ab}
	%60	41,27±7,47	20,41±15,47	61,78±15,47 ^b
White	Kontrol	38,23±3,09	18,63±2,28	56,90±4,77
	%10	35,85±3,88	16,45±5,38	52,38±6,29
	%20	39,62±3,10	17,84±4,37	57,51±6,61
	%40	38,77±1,56	18,57±4,47	57,36±5,22
	%60	38,57±4,39	15,48±4,38	53,33±7,05

İstatistiksel olarak farklılık gösteren (Tukey, $p < 0,05$) değerler sağ üst köşelerinde harflendirme yapılarak gösterilmiştir.

Klorofil-a değerleri üzerinde çeşit, yetiştirme ortamı ve etkileşimlerinin istatistiksel olarak anlamlı bir etkisi bulunmamıştır ($p > 0,05$). Klorofil-b değerlerinde ise çeşit faktörü sınırda bir etki göstermiştir ($p = 0,051$), yetiştirme ortamı etkisi ise anlamlı bulunmamıştır ($p = 0,364$).

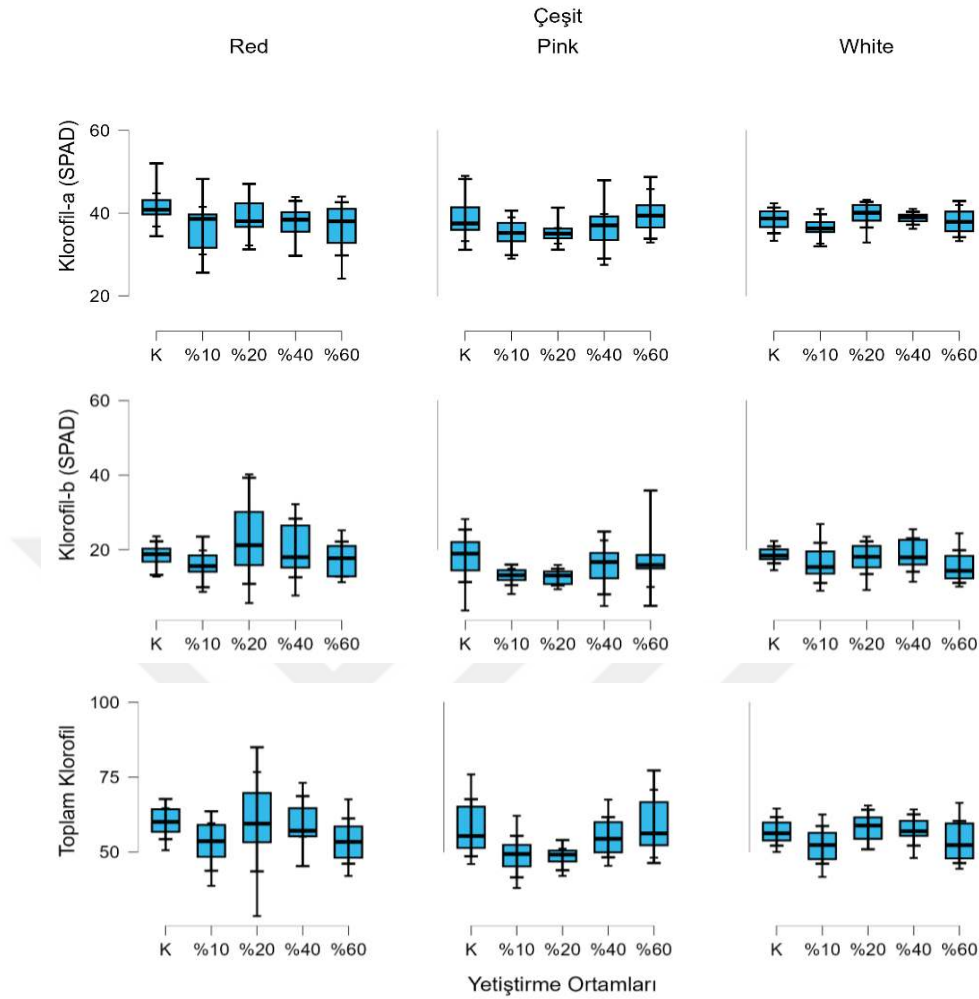
Bununla birlikte çeşit × yetiştirme ortamı etkileşimi istatistiksel olarak anlamlı çıkmıştır ($p = 0,033$). Bu sonuç, farklı süs lahanası çeşitlerinin klorofil-b içeriklerinin yetiştirme ortamı koşullarına farklı tepkiler verdiğini göstermektedir. Toplam klorofil içeriği üzerinde çeşit etkisi istatistiksel olarak anlamlı değildir ($p = 0,132$). Ancak yetiştirme ortamı faktörü ($p = 0,031$) ve çeşit × yetiştirme ortamı etkileşimi ($p = 0,012$) anlamlı bulunmuştur. Bu durum, farklı uygulamaların toplam klorofil düzeylerini etkilediğini ve çeşitlerin bu uygulamalara verdikleri yanıtların farklı olduğunu ortaya koymaktadır. Genel değerlendirmenin ardından çeşitler kendi içinde değerlendirilmiştir. Klorofil-a, klorofil-b ve toplam klorofil değerleri üzerinde yetiştirme ortamı uygulamaları değerlendirildiğinde, Red çeşidinde klorofil-a değerleri üzerinde yetiştirme ortamlarının etkisi istatistiksel olarak anlamlı bulunmamıştır ($p = 0,219$). Benzer şekilde klorofil-b içerikleri de yetiştirme ortamlarına göre farklılık göstermemiştir ($p = 0,108$). Toplam klorofil değerlerinde de yetiştirme ortamlarının etkisi önemsiz bulunmuştur ($p = 0,165$). Bu sonuçlar, Red çeşidinde klorofil-a, klorofil-b ve toplam klorofil içeriklerinin yetiştirme ortamı koşullarından anlamlı düzeyde etkilenmediğini ve bu çeşidin klorofil parametreleri bakımından yetiştirme ortamına karşı daha stabil bir yapıya sahip olabileceğini göstermektedir. Pink çeşidinde klorofil-a değerleri üzerinde yetiştirme ortamlarının etkisi istatistiksel olarak anlamlı bulunmamıştır ($p = 0,266$). Benzer şekilde klorofil-b içerikleri de yetiştirme ortamlarına göre farklılık göstermemiştir ($p = 0,149$). Buna karşın toplam klorofil içerikleri açısından yetiştirme ortamlarının etkisi anlamlı bulunmuştur ($p = 0,003$). White çeşidinde klorofil-a değerleri üzerinde yetiştirme ortamlarının etkisi istatistiksel olarak anlamlı bulunmamıştır ($p = 0,088$). Benzer şekilde klorofil-b içerikleri de yetiştirme ortamlarına göre farklılık göstermemiştir ($p = 0,303$). Toplam klorofil değerleri açısından da yetiştirme ortamlarının etkisi önemsiz bulunmuştur ($p = 0,113$). Bu sonuçlar, White çeşidinde klorofil-a, klorofil-b ve toplam klorofil içeriklerinin yetiştirme ortamları arasında istatistiksel olarak anlamlı bir farklılık göstermediğini ortaya koymaktadır.

Klorofil pigmenti, bitkilerde fotosentezin temel bileşenidir ve bitkilerin büyüme ve gelişmesinde oldukça önemli bir yere sahiptir. Brassicaceae familyasında abiyotik faktörler fotosentetik pigmentler üzerinde olumsuzluklara neden olabilmektedir. Rosca ve diğerleri (2021) tarafından yapılan çalışmada, Pb ve Cd uygulamaları altında *Brassica napus*'un büyüme parametrelerinin baskılandığı, özellikle Cd uygulamalarında klorofil ve karotenoid içeriklerinde belirgin azalmaların görüldüğü bildirilmiştir. Endüstriyel faaliyetler sonucu ortama verilen atıkların etkilerini ölçmek amacıyla da klorofil pigmenti içeriklerinden faydalanan birçok çalışma bulunmaktadır. Bir çalışmada *Brassica juncea*'nın bakır madeni

atığında yetiştirilmesi sonucunda çimlenme ve erken gelişiminin baskılandığı, ancak teknosol ve kompost katkılarıyla fidelerin daha yüksek büyüme ve oksidatif strese karşı direnç gösterdiği, bu koşullarda klorofil sentezinin korunarak fotosentetik kapasitenin desteklendiği bildirilmiştir (Novo ve González, 2014). Termik santral külü içeren ortamlarda yetiştirilen *Brassica juncea*'da büyüme ve verim parametrelerinin yanı sıra klorofil-a, klorofil-b ve toplam klorofil içeriklerinin yüksek dozlarda belirgin şekilde azaldığı bildirilmiştir (Shakeel, Khan ve Ahmad, 2019). Lee, Luitel ve Kang (2011) *Brassica rapa* L. ssp. *campestris*'in fizyolojik özellikleri ve büyümesine manganez uygulamasının etkisini incelemek amacıyla yaptıkları çalışmalarında mangan konsantrasyonunun artışıyla birlikte klorofil-a içeriklerinde düşüş gözlemlenmiştir. Pandey ve Sharma (2002) tarafından lahana bitkisi ile yapılan çalışmada ise Ni, Cd ve Co ağır metallerine yüksek derecede maruz kalma durumunun klorofil içeriğini azalttığından bahsedilmiştir. Bir başka çalışmada, *Brassica oleracea* var. *acephala* bitkisinde bor uygulaması arttıkça klorofil içeriğinde azalma meydana geldiği bulunmuştur (Gökseven, Kıran ve Ellialtıoğlu, 2021). Değerlenen çalışmalar klorofil içeriklerinin Brassicaceae familyası bitkilerinde abiyotik stres faktörlerinin ölçülmesinde klorofil içeriklerinin önemine vurgu yapmaktadır.

Şekil 4.2'de verilen grafikler incelendiğinde süs lahanası çeşitlerinin farklı konsantrasyonlarda maden atığı içeren ortamlara klorofil pigmenti açısından verdikleri tepkiler birbirinden farklı bulunmuştur. Literatür çalışmalarında genel kanı maden atığı konsantrasyonları artışı ile pigment içeriklerinde bir azalma eğilimi olsa da bazı çeşitlerde pigment konsantrasyonları sabit denebilecek düzeylerde kalmış hatta bazı durumlarda yükselmiştir.

Red çeşidinde klorofil-a değerleri uygulamalardan belirgin şekilde etkilenmezken, klorofil-b özellikle %20 uygulamasında yükselmiş, ileri dozlarda ise düşüş eğilimi göstermiştir. Pink çeşidi hem klorofil-a hem de klorofil-b açısından daha fazla dalgalanma sergilemiş, düşük dozlarda azalış, %60 uygulamasında ise kısmi artış ortaya çıkmıştır. White çeşidi ise tüm uygulamalarda kontrol grubuna en yakın değerleri korumuş, klorofil-a, klorofil-b ve toplam klorofil düzeylerinde ciddi bir değişim göstermemiştir. Bu sonuçlar, White çeşidinin klorofil metabolizmasını stres koşullarında daha stabil tutabilmesi nedeniyle en toleranslı tür olduğunu ortaya koymaktadır.



Şekil 4.2. Süs lahanası çeşitlerinde klorofil-a, klorofil-b ve toplam klorofil içeriklerinin yetiştirme ortamları karşısındaki durumu

Çizelge 4.5 incelendiğinde, yetiştirme ortamı özellikleri ile klorofil-a, klorofil-b ve toplam klorofil değerleri arasında anlamlı bir korelasyonun bulunmadığı görülmektedir ($p > 0,05$). Klorofil-a, klorofil-b ve toplam klorofil düzeyleri ile toprak özellikleri arasındaki korelasyon katsayıları oldukça düşük olup, bu da çevresel parametrelerin klorofil sentezi üzerinde sınırlı bir etkiye sahip olduğunu düşündürmektedir.

Klorofil-a içeriği ile pH ($r = -0,03$), kireç ($r = -0,15$) ve organik madde ($r = -0,15$) arasında zayıf düzeyde negatif ilişki bulunmaktadır. Benzer şekilde, klorofil-b içeriği ile toprak kireci ($r = 0,14$) ve fosfor ($r = -0,06$) arasında düşük düzeyli ilişkiler tespit edilmiştir.

Çizelge 4.5. Klorofil içerikleri ve yetiştirme ortamı özellikleri arasındaki ilişkiler

	Klorofil-a (SPAD)		Klorofil-b (SPAD)		Toplam Klorofil	
	r	p	r	p	r	p
Saturasyon	0,13	0,41	-0,10	0,51	-0,00	0,97
Tuzluluk	-0,05	0,73	-0,14	0,37	-0,15	0,34
pH	-0,03	0,84	0,11	0,47	0,07	0,64
Kireç	-0,15	0,32	0,14	0,37	0,02	0,90
Organik Madde	-0,15	0,44	0,00	0,99	-0,08	0,69
Fosfor	0,14	0,35	-0,06	0,68	0,04	0,80
Ca	-0,14	0,37	0,14	0,35	0,03	0,84
Mg	-0,09	0,57	0,16	0,29	0,08	0,61
K	0,03	0,83	0,19	0,22	0,17	0,26
Mn	-0,12	0,43	0,14	0,35	0,04	0,78
Zn	-0,16	0,29	0,02	0,89	-0,08	0,59
Fe	0,23	0,13	0,07	0,66	0,20	0,20

r(Pearson korelasyon katsayısı), p önemlilik düzeyi *p<0,05, **p<0,01

4.4. Prolin, Malondialdehit ve Elektrolit Sızıntısı Bulguları

Birbirinden farklı saksı ortamlarında yetiştirilen süs lahanası çeşitlerine (Red, Pink, White) ait ortalama prolin, malondialdehit ve elektrolit sızıntısı değerleri Çizelge 4.6’da sunulmuştur. Red çeşidinde prolin değerleri 0,240 ile 2,470 $\mu\text{mol/g}$ arasında değişmiş, ortalama 0,748 $\mu\text{mol/g}$ olarak bulunmuştur. Pink çeşidinde ortalama prolin konsantrasyonları 0,020 ve 3,550 $\mu\text{mol/g}$ arasında değişmekle beraber çeşitler arasında en yüksek ortalamaya (0,778) sahip olduğu görülmüştür. White çeşidinde ise ortalama prolin miktarı 0,658 $\mu\text{mol/g}$ olup üç çeşit arasında en düşük ortalama değere sahiptir. Prolin içerikleri 0,100 ile 2,200 $\mu\text{mol/g}$ arasında değişmiştir. MDA konsantrasyonları için en yüksek ortalama değer Red çeşidinde (1,318 nmol/ml) olduğu, bunu sırasıyla Pink (1,189 nmol/ml) ve White (0,744 nmol/ml) çeşitlerinin izlediği görülmektedir. Red çeşidinde MDA değerlerinin 0,850–1,930 nmol/ml arasında değiştiği, Pink çeşidinde 0,690–1,790 nmol/ml , White çeşidinde ise 0,380–1,780 nmol/ml aralığında olduğu belirlenmiştir. Elektrolit sızıntısı değerleri incelendiğinde, Red çeşidinde minimum %9,68 ve maksimum %50,39 arasında değişim göstermiştir. Pink çeşidinde bu değerler %9,77 ile %58,85 arasında belirlenirken, White çeşidinde minimum %13,22 ve maksimum %41,31 olarak kaydedilmiştir. Bu sonuçlar, çeşitlerin farklı yetiştirme ortamlarında elektrolit sızıntısı bakımından geniş bir varyasyon sergilediğini ortaya koymaktadır.

Çizelge 4.6. Prolin, malondialdehit ve elektrolit sızıntısı konsantrasyonları

		Prolin ($\mu\text{mol g}^{-1}$)	MDA (nmol g^{-1})	Elektrolit Sızıntısı
Red	Kontrol	0,27 $\pm$ 0,05 ^a	1,14 $\pm$ 0,32	14,71 $\pm$ 5,33
	%10	0,27 $\pm$ 0,03 ^a	1,39 $\pm$ 0,32	25,47 $\pm$ 9,10
	%20	0,67 $\pm$ 0,09 ^a	1,20 $\pm$ 0,41	22,01 $\pm$ 4,46
	%40	1,61 $\pm$ 0,65 ^b	1,31 $\pm$ 0,28	31,82 $\pm$ 16,24
	%60	0,91 $\pm$ 0,57 ^{ab}	1,55 $\pm$ 0,36	15,98 $\pm$ 0,57
Pink	Kontrol	0,38 $\pm$ 0,28	1,14 $\pm$ 0,24 ^{ab}	20,66 $\pm$ 10,05
	%10	0,38 $\pm$ 0,34	1,52 $\pm$ 0,26 ^b	21,86 $\pm$ 3,49
	%20	1,01 $\pm$ 0,72	1,39 $\pm$ 0,16 ^b	26,59 $\pm$ 19,59
	%40	1,40 $\pm$ 1,46	1,11 $\pm$ 0,10 ^{ab}	37,96 $\pm$ 18,11
	%60	0,72 $\pm$ 0,77	0,79 $\pm$ 0,10 ^a	13,20 $\pm$ 3,41
White	Kontrol	0,51 $\pm$ 0,42	0,79 $\pm$ 0,27	21,18 $\pm$ 9,51
	%10	0,85 $\pm$ 0,20	0,67 $\pm$ 0,16	21,47 $\pm$ 6,18
	%20	0,74 $\pm$ 0,99	0,77 $\pm$ 0,13	15,12 $\pm$ 2,07
	%40	0,65 $\pm$ 1,03	0,60 $\pm$ 0,06	15,97 $\pm$ 1,53
	%60	0,53 $\pm$ 0,49	0,88 $\pm$ 0,78	25,09 $\pm$ 14,46

İstatistiksel olarak farklılık gösteren (Tukey, $p < 0,05$) değerler sağ üst köşelerinde harflendirme yapılarak gösterilmiştir.

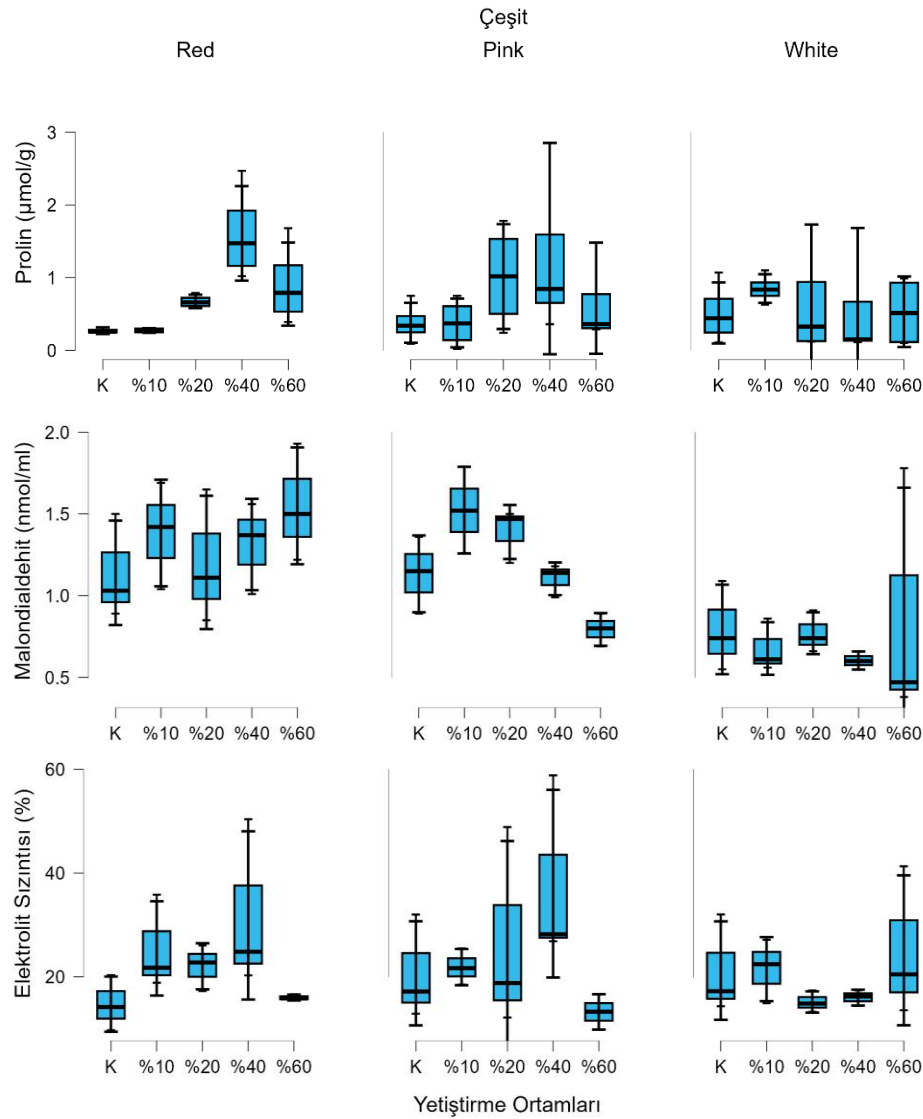
İki yönlü varyans analizi bulgularına göre prolin birikimi üzerinde çeşitlerin etkisi istatistiksel olarak önemsiz bulunmuştur ($p = 0,839$). Ancak yetiştirme ortamlarının etkisi anlamlıdır ($p = 0,036$). Çeşit $\times$ yetiştirme ortamı etkileşimi ise anlamlı değildir ($p = 0,502$). Bu durum, prolin birikiminin çeşitler arasında benzer bir eğilim gösterdiğini, fakat yetiştirme ortamındaki farklılıkların prolin düzeylerini belirgin şekilde etkilediğini ortaya koymaktadır. Red çeşidi ayrı olarak değerlendirildiğinde, yetiştirme ortamlarının prolin içerikleri üzerindeki etkisi oldukça anlamlı bulunmuştur ($p = 0,001$). Red çeşidinde düşük düzeyli maden atığı uygulamalarının prolin birikimini belirgin şekilde değiştirmediğini, fakat özellikle %40 ve %60 maden atığı içeren ortamlarda yetişen bitkilerde prolin konsantrasyonlarının farklılık yarattığını göstermektedir. Pink ($p=0,382$) ve White ($p=0,954$) çeşitlerinde ise prolin konsantrasyonlarında yetiştirme ortamlarının anlamlı bir etkisi saptanmamıştır. Pandey ve Sharma (2002) tarafından yapılan bir çalışmada Ni, Cd ve Co ağır metallerinin etkisinde kalan lahana bitkilerinin yapraklarında prolin içeriğinin artış gösterdiği tespit edilmiştir. Bir başka çalışmada ise Pb ve Cd stresine maruz kalma durumunun *Brassica oleracea* var. *acephala* bitkisinde prolin içeriğini önemli ölçüde arttırdığı gözlemlenmiştir (Haghighi ve diğerleri, 2016).

Malondialdehit için yapılan istatistik değerlendirmelerinde ise çeşit faktörü istatistiksel olarak anlamlı bulunmuştur ($p < 0,001$). Buna karşılık yetiştirme ortamlarının etkisi ($p = 0,713$) ve çeşit $\times$ ortam etkileşimi ($p = 0,199$) önemsizdir. Bu sonuç, MDA düzeylerindeki farklılıkların esas

olarak çeşitlerden kaynaklandığını göstermektedir. Red çeşidinde yetiştirme ortamlarının MDA içerikleri üzerinde etkisi istatistiksel olarak önemsiz bulunmuştur ($p = 0,631$). Bu durum, Red çeşidinin MDA düzeyleri bakımından yetiştirme ortamı koşullarına karşı daha stabil bir yapı sergilediğini göstermektedir. White çeşidinde de yetiştirme ortamlarının etkisi istatistiksel olarak anlamlı değildir ($p = 0,915$). Bu bulgu, White çeşidinin de Red çeşidi gibi MDA düzeyleri açısından farklı uygulamalara karşı benzer ve dengeli bir tepki verdiğini ortaya koymaktadır. Pink çeşidinde ise yetiştirme ortamlarının etkisi anlamlı bulunmuştur ($p = 0,006$). Tukey testi sonuçlarına göre Pink çeşidinin yetiştirme ortamı farklılıklarına daha duyarlı olduğu saptanmıştır. Natasha ve diğerleri (2020) yaptıkları çalışmalarında Cr, Se ve Ni ağır metallerinin *B. oleracea*'da lipit peroksidasyonuna yol açtığını bildirmişlerdir. İki hardal çeşidiyle gerçekleştirilen başka bir çalışmada ise Pb ve Cd stresinin lipit peroksidasyonuna neden olduğu vurgulanmıştır (Ahmad, Ozturk ve Gucl, 2012).

Elektrolit sızıntısı sonuçlarına ilişkin varyans analizi incelendiğinde, çeşit ($p = 0,526$), yetiştirme ortamı ($p = 0,228$) ve çeşit $\times$ yetiştirme ortamı etkileşimi ($p = 0,238$) faktörlerinin istatistiksel olarak anlamlı bir etkisinin olmadığı görülmektedir. Bu bulgu, uygulamaların membran bütünlüğü üzerinde belirgin bir farklılık oluşturmadığını göstermektedir. Çeşitler kendi içinde analiz edildiğinde Red ($p=0,191$), Pink ($p=0,275$) ve White ($p=0,578$) çeşitlerinde yetiştirme ortamlarının elektrolit sızıntısı üzerinde etkisiz olduğu bulunmuştur. Bulgular çeşitlerin elektrolit sızıntısı açısından benzer yanıtlar verdiğini göstermektedir. Çin lahanası ile yürütülen bir çalışmada Cu uygulamaları, bitkinin sürgün dokularındaki elektrolit sızıntılarının önemli düzeyde artmasını sağlamıştır. Ayrıca araştırmacılar, bu sonucun bir fitotoksosite göstergesi olduğunu bildirmişlerdir (Xiong ve Wang, 2005). Li ve diğerleri (2021)'nin abiyotik stres etkisinde kalmış *B. rapa*'da hidrojen sülfür uygulamasının etkisini araştırdıkları çalışmalarında artan Cd içeriğinin elektrolit sızıntısı düzeylerinde artışa yol açtığı ifade edilmiştir.

Bulgular bütüncül olarak değerlendirildiğinde ve Şekil 4.3'e bakıldığında, White çeşidi stres koşullarına karşı en toleranslı tür olarak öne çıkmaktadır. Prolin birikiminde yetiştirme ortamlarının anlamlı bir etkisi görülmemesi, White çeşidinin osmotik dengeyi koruma konusunda istikrarlı olduğunu göstermektedir. Benzer şekilde, MDA düzeylerinde de yetiştirme ortamlarına bağlı anlamlı bir değişim saptanmamış ve bu durum membran lipit peroksidasyonunun White çeşidinde diğer çeşitlere kıyasla daha düşük düzeyde gerçekleştiğine işaret etmiştir.



Şekil 4.3. Süs lahanası çeşitlerinde prolin, malondialdehit ve elektrolit sızıntısı konsantrasyonlarının yetiştirme ortamları karşısındaki durumu

Şekil 4.3'e bakıldığında elektrolit sızıntısı analizlerinde de White çeşidinin uygulamalara karşı anlamlı farklılık göstermemesi, membran bütünlüğünü koruma kapasitesinin yüksek olduğunun bir göstergesidir. Buna karşılık Pink çeşidi özellikle MDA düzeylerinde yetiştirme ortamlarına daha duyarlı bulunmuş, Red çeşidinde ise yüksek maden atığı uygulamalarında prolin artışı gözlenmiştir. Dolayısıyla White çeşidi, farklı stres parametreleri (prolin, MDA, elektrolit sızıntısı) birlikte değerlendirildiğinde, diğer çeşitlere oranla daha dengeli bir yanıt vermiş ve tolerans açısından öne çıkmıştır.

Çizelge 4.7. Prolin, malondialdehit ve elektrolit sızıntısı ile yetiştirme ortamı özellikleri arasındaki ilişkiler

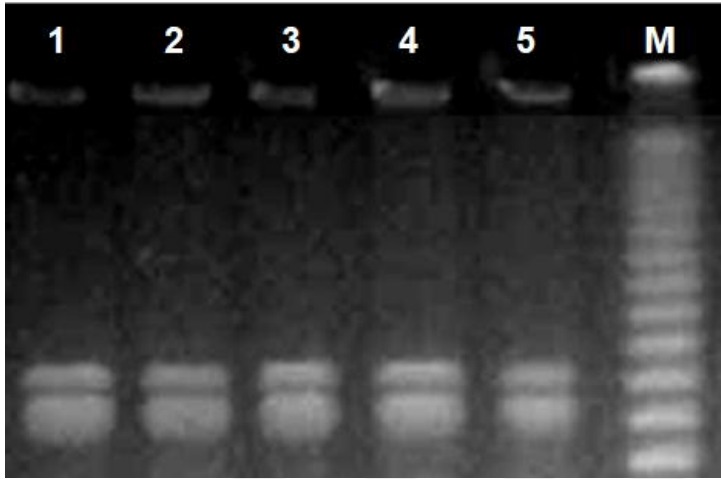
	Prolin ($\mu\text{mol/g}$)		Malondialdehit (nmol/ml)		Elektrolit Sızıntısı (%)	
	r	p	r	p	r	p
Saturasyon	0,15	0,33	-0,03	0,87	-0,14	0,38
Tuzluluk	-0,19	0,20	0,14	0,36	0,05	0,76
pH	-0,37*	0,02	0,00	0,99	-0,10	0,54
Kireç	-0,34*	0,02	0,07	0,65	-0,06	0,69
Organik Madde	0,40*	0,04	0,12	0,56	0,12	0,54
Fosfor	0,43**	0,00	-0,10	0,53	0,29	0,05
Ca	-0,34*	0,02	0,06	0,68	-0,08	0,61
Mg	-0,30*	0,04	0,05	0,76	-0,05	0,74
K	-0,29	0,05	0,03	0,87	-0,16	0,28
Mn	-0,35*	0,02	0,07	0,68	-0,10	0,53
Zn	-0,46**	0,00	0,05	0,73	-0,24	0,11
Fe	0,02	0,88	-0,09	0,57	-0,19	0,21

r(Pearson korelasyon katsayısı), p önemlilik düzeyi *p<0,05, **p<0,01

Çizelge 4.7’de verilen korelasyon analizi tablosuna göre, prolin birikimi yetiştirme ortamı özellikleriyle anlamlı ilişkiler göstermektedir. pH, kireç, Ca, Mg, Mn ve Zn ile prolin arasında negatif korelasyon bulunması, bu parametrelerin artışının prolin düzeylerini baskıladığını ortaya koyarken; organik madde ve fosfor ile pozitif korelasyon, bu parametrelerin osmotik düzenlemeyi destekleyerek prolin birikimini artırdığını göstermektedir. Buna karşın malondialdehit (MDA) düzeyleri ile ortam özellikleri arasında anlamlı bir ilişki tespit edilmemiştir; bu durum, lipid peroksidasyonunun esasen çeşitsel farklılıklardan kaynaklandığını düşündürmektedir. Benzer şekilde, elektrolit sızıntısı da ortam özellikleriyle anlamlı ilişki göstermemiş, membran bütünlüğünün korunmasının daha çok genotipik faktörlere bağlı olduğunu işaret etmiştir. Genel olarak bu bulgular, prolinin yetiştirme ortamı koşullarına karşı daha duyarlı bir stres göstergesi olduğunu, buna karşın MDA ve elektrolit sızıntısının çeşitlere özgü tepkilerle belirlendiğini ortaya koymaktadır. Korelasyon bulgularına paralel olarak Brassicaceae familyası bitkilerinde yetiştirme ortamı özelliklerinin değişmesinin stres seviyelerinde değişimlere neden olduğunu gösteren birçok çalışma literatürde mevcuttur (Feizabadi, Noormohammadi ve Fatehi, 2021; Hniličková, Hniliček, Orsák ve Hejnák, 2019; Li, Zhang, Jiang ve Liu, 2013; Zemanova ve diğerleri, 2017).

4.5. Total RNA İzolasyonu

İzole edilen RNA örneklerinin bütünlüğü, %1,2'lik agaroz jel elektroforezi ile değerlendirilmiştir (Şekil 4.4). Tüm örneklerde net ve belirgin bantların gözlenmesi, RNA'nın yüksek kalitede ve degradasyona uğramadan izole edildiğini göstermektedir. Bu sonuçlar, elde edilen RNA'ların sonraki moleküler analizler (cDNA sentezi ve RT-qPCR) için uygun kalitede olduğunu ortaya koymuştur.



Şekil 4.4. İzole edilen bazı (Red) RNA'lara ait %1,2'lik agaroz jel görüntüleri

4.6. cDNA (Komplementer DNA) Sentezi

Farklı maden atığı konsantrasyonlarında yetiştirilen farklı süs lahanalarına ait yaprak doku örneklerinden elde edilen total RNA ve sentezlenen cDNA'ların saflık (260/280) ve miktar tayinleri Çizelge 4.8'de verilmiştir. Tüm çeşitlerde RNA saflık oranları 1,98–2,10 arasında değişmiş ve bu değerler RNA izolasyonunun yüksek kalitede olduğunu göstermektedir. Red çeşidinde total RNA miktarları 178–320 ng/μL arasında, cDNA miktarları ise 1680–2800 ng/μL aralığında değişmiştir. Pink çeşidinde total RNA miktarı 255–514 ng/μL, cDNA miktarı 1254–2050 ng/μL arasında ölçülürken; White çeşidinde total RNA miktarı 298–507 ng/μL, cDNA miktarı ise 1189–1800 ng/μL arasında bulunmuştur. Özellikle yüksek maden atığı uygulamalarında (Red %60, Pink %40 ve White %40) elde edilen RNA miktarlarının yüksekliği izolasyonun verimli olduğunu desteklemektedir. Ayrıca tüm örneklerde 260/280 oranlarının yaklaşık 2,0 civarında olması, RNA örneklerinin RT-qPCR analizleri için uygun kalitede olduğunu ortaya koymuştur.

Çizelge 4.8. Farklı maden atığı konsantrasyonlarında yetiştirilen süs lahanası çeşitlerinden elde edilen Total RNA ve sentezlenen cDNA'ların saflık ve miktar tayinleri

Çeşit	No	Yetiştirme Ortamı	Total RNA		cDNA	
			260/280	ng/μL	260/280	ng/μL
Red	1a	Kontrol	2,02	320	1,80	1680
	1b	Kontrol	2,01	304	1,83	2500
	2a	%10	2,0	231	1,82	2470
	2b	%10	2,0	232	1,80	2460
	3a	%20	1,98	183	1,81	2350
	3b	%20	1,98	178	1,82	2600
	4a	%40	2,0	223	1,82	2060
	4b	%40	2,0	218	1,80	2070
	5a	%60	2,0	196	1,81	2630
	5b	%60	2,1	186	1,83	2800
Pink	1a	Kontrol	2,01	457,30	1,81	1254,6
	1b	Kontrol	2,00	514,50	1,80	1312,5
	2a	%10	1,98	379,60	1,79	1890,5
	2b	%10	2,00	380,70	1,80	1900,4
	3a	%20	2,04	255,40	1,82	1472,5
	3b	%20	2,06	265,90	1,80	1480,4
	4a	%40	2,00	388,60	1,80	2050,3
	4b	%40	2,00	395,40	1,82	2040,9
	5a	%60	1,99	450,30	1,80	1954,5
	5b	%60	2,01	429,50	1,80	1900,7
White	1a	Kontrol	2,04	356,30	1,81	1500,2
	1b	Kontrol	2,02	368,50	1,80	1482,6
	2a	%10	2,00	425,80	1,81	1355,2
	2b	%10	2,01	458,60	1,82	1340,1
	3a	%20	2,00	298,60	1,80	1740,6
	3b	%20	2,00	342,30	1,80	1650,1
	4a	%40	2,04	445,60	1,84	1800,4
	4b	%40	2,03	478,40	1,81	1746,8
	5a	%60	2,00	507,30	1,81	1258,6
	5b	%60	2,01	478,80	1,80	1189,5

4.7. Süs Lahanası Çeşitlerine Ait Sonuçların Normalizasyonu ve İstatistiksel Analizi

Farklı konsantrasyonlarda maden atığı içeren ortamlarda yetiştirilen (Kontrol, %10, %20, %40 ve %60) süs lahanası çeşitlerine ait yaprak örneklerinin *SOD* ve *CAT* genlerine ait normalizasyon sonucu elde edilen ortalama gen ekspresyonu verileri Çizelge 4.9'da görülmektedir. Red çeşidinde *SOD* ekspresyonu 0,761 ile 5,533 arasında değişirken, *CAT*

ekspresyonu 1,157 ile 7,846 arasında gözlenmiştir. Red çeşidinde kontrole kıyasla *CAT* gen ifade düzeyi yaklaşık 4,93 kat ile en yüksek %20'lik konsantrasyonda, en düşük ise %10'luk konsantrasyonda yaklaşık 1,46 kat şeklinde ifade olmuştur. *SOD* geni en yüksek %20'lik ve en düşük %60'lık konsantrasyonda ifade olmuştur. Artan konsantrasyonlarda *CAT* ve *SOD* genlerinin her ikisi de %20'lik konsantrasyonda en yüksek seviyede ifade olmuş, devamında ise artan konsantrasyonlara bağlı olarak yeniden düşüşe geçmiştir.

Pink çeşidinde *SOD* ekspresyonu 0,509 ile 4,213, *CAT* ekspresyonu ise 1,448 ile 7,706 arasındadır. Kontrole kıyasla *CAT* gen ifade düzeyi yaklaşık 4,32 kat ile en yüksek %20'lik konsantrasyonda, en düşük ise %60'lık konsantrasyonda yaklaşık 1,70 kat şeklinde ifade olmuştur. *SOD* geni en yüksek %20'lik ve en düşük %60'lık konsantrasyonda ifade olmuştur. Artan konsantrasyonlarda *CAT* ve *SOD* genlerinin her ikisi de %20'lik konsantrasyonda en yüksek seviyede ifade olmuş, devamında ise artan konsantrasyonlara bağlı olarak yeniden düşüşe geçmiştir.

White çeşidinde *SOD* ekspresyon değerleri 0,685 ile 5,438, *CAT* değerleri ise 1,000 ile 8,604 arasında değişim göstermiştir. Kontrole kıyasla *CAT* gen ifade düzeyi yaklaşık 3,31 kat ile en yüksek %20'lik konsantrasyonda, en düşük ise %60'lık konsantrasyonda yaklaşık 1,52 kat şeklinde ifade olmuştur. *SOD* geni en yüksek %20'lik ve en düşük %60'lık konsantrasyonda ifade olmuştur. Artan konsantrasyonlarda *CAT* ve *SOD* genlerinin her ikisi de %20'lik konsantrasyonda en yüksek seviyede ifade olmuş, devamında ise artan konsantrasyonlara bağlı olarak yeniden düşüşe geçmiştir. Tüm çeşitlerde en yüksek konsantrasyon olan %60'lukta ifade seviyesi kontrol grubuna yaklaşmıştır (Çizelge 4.9.).

Tüm çeşitlerde en yüksek *SOD* ve *CAT* gen ekspresyon düzeyleri %20'lik uygulamalarda saptanırken, %60'lık konsantrasyonda bu değerlerin belirgin şekilde azaldığı görülmüştür. Bu sonuçlar, orta düzey stres uygulamalarında savunma genlerinin aktive olduğunu, yüksek stres düzeyinde ise ekspresyonun azaldığını göstermektedir.

Çizelge 4.9. Süs lahanası çeşitlerinin yaprak doku örneklerine ait normalize edilmiş *SOD* ve *CAT* genlerinin ekspresyon verilerinin ortalama, standart sapma değerleri (ortalama $\pm$)

		<i>CAT</i>	<i>SOD</i>
Red	K	1,00 $\pm$ 0,00	1,00 $\pm$ 0,00 ^a
	%10	1,46 $\pm$ 0,27	2,04 $\pm$ 0,74 ^{ab}
	%20	4,93 $\pm$ 2,86	3,82 $\pm$ 1,49 ^b
	%40	4,04 $\pm$ 3,39	3,24 $\pm$ 1,48 ^{ab}
	%60	2,03 $\pm$ 0,69	1,22 $\pm$ 0,46 ^{ab}
Pink	K	1,00 $\pm$ 0,00	1,00 $\pm$ 0,00 ^a
	%10	2,75 $\pm$ 1,82	3,24 $\pm$ 1,23 ^{ab}
	%20	4,32 $\pm$ 3,34	3,52 $\pm$ 1,19 ^b
	%40	3,31 $\pm$ 0,90	2,44 $\pm$ 0,84 ^{ab}
	%60	1,7 $\pm$ 0,64	1,14 $\pm$ 0,78 ^{ab}
White	K	1,00 $\pm$ 0,00	1,00 $\pm$ 0,00
	%10	2,38 $\pm$ 1,66	1,87 $\pm$ 0,93
	%20	3,31 $\pm$ 4,59	2,57 $\pm$ 1,05
	%40	2,56 $\pm$ 1,42	2,35 $\pm$ 2,68
	%60	1,52 $\pm$ 2,01	1,15 $\pm$ 0,78

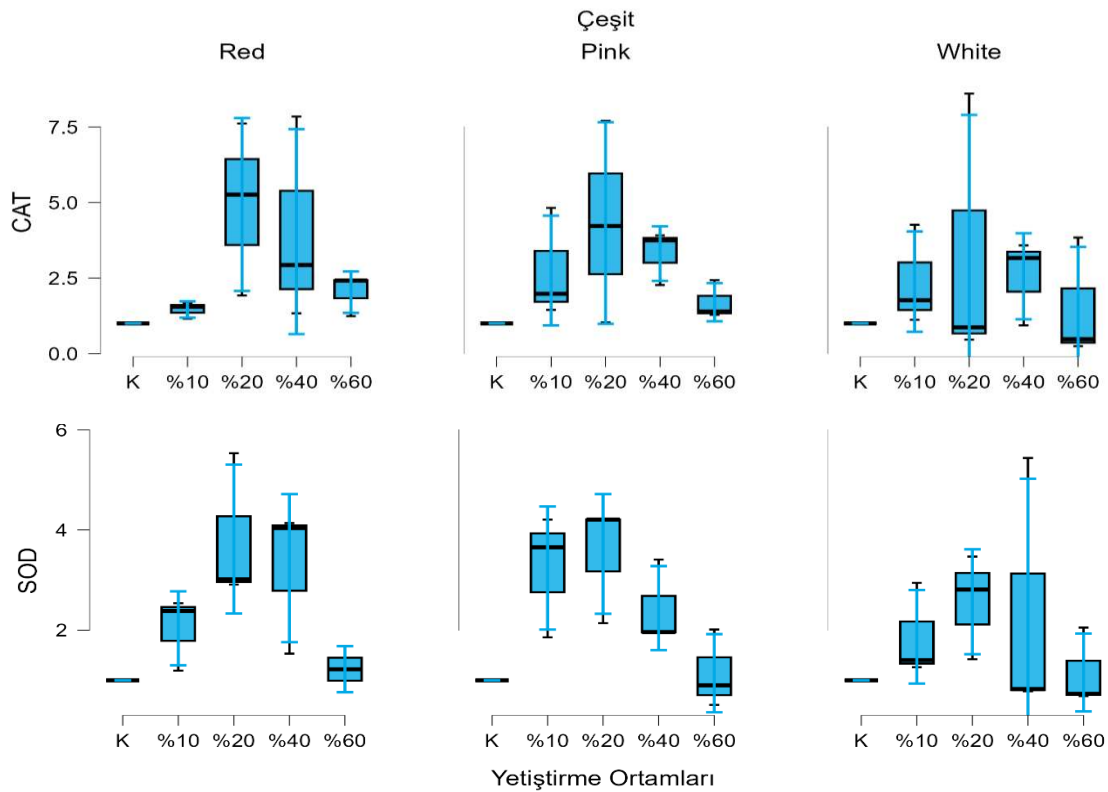
İstatistiksel olarak farklılık gösteren (Tukey, $p < 0,05$) değerler sağ üst köşelerinde harflendirme yapılarak gösterilmiştir.

CAT gen ekspresyonu üzerine çeşit faktörünün etkisi istatistiksel olarak önemsiz bulunmuştur ($p = 0,751$). Yetiştirme ortamlarının etkisi ise anlamlıdır ($p = 0,024$), bu da uygulanan farklı stres düzeylerinin *CAT* gen ekspresyonunu önemli ölçüde etkilediğini göstermektedir. Buna karşılık çeşit $\times$ yetiştirme ortamı etkileşimi istatistiksel olarak anlamlı değildir ($p = 0,984$). Bu bulgu, *CAT* gen ekspresyonundaki farklılıkların esas olarak uygulama koşullarından kaynaklandığını, çeşitler arasında ise benzer bir tepki gösterildiğini ortaya koymaktadır.

Çeşitler kendi içerisinde değerlendirildiğinde Red ($p=0,148$) ve Pink ($p=0,239$) ve White ($p=0,796$) çeşitlerinin tümünde yetiştirme ortamının *CAT* geninin ifadesinde etkili olmadığını göstermiştir. *SOD* gen ekspresyonu üzerine yetiştirme ortamlarının etkisi istatistiksel olarak oldukça anlamlı bulunmuştur ($p < 0,001$). Bu durum, uygulanan farklı maden atığı oranlarının *SOD* geninin ekspresyon düzeyini önemli ölçüde etkilediğini göstermektedir. Buna karşılık çeşit faktörü istatistiksel olarak anlamlı bulunmamıştır ($p = 0,419$). Benzer şekilde, çeşit $\times$ yetiştirme ortamı etkileşiminin de anlamlı olmadığı görülmüştür ($p = 0,848$). Çeşitler kendi içinde değerlendirildiğinde farklı konsantrasyonlarda maden atığı içeren yetiştirme ortamlarının *SOD* geni ifadesi üzerinde Red ($p=0,025$) ve Pink ($P=0,020$) çeşitlerinde anlamlı

etkisi saptanırken White ($p=0,579$) çeşidinde istatistiksel önem düzeyinde bir etki bulunmamıştır.

Çevresel stres faktörleri tüm bitkilerde olduğu gibi Brassicaceae familyası bitkilerinde de morfolojik, fizyolojik ve biyokimyasal etkilere neden olmaktadır. Bunların yanında gen ifadeleri anlamında da bu etkiler görülmektedir. Bu faktörlerden en önemlilerinden biri de ağır metal kirliliğinden kaynaklanan çevre problemleridir. Brassicaceae familyası bitkilerinde yapılan çalışmalar ağır metal stresinin *SOD*, *CAT* gibi gen ifadelerinde güçlü yanıtlar oluşturduğunu göstermektedir (Małacka ve diğerleri, 2019). *Brassica napus*'ta gen ifadelerinin yüksekliğini oksidatif stresle baş etmede rol sahibi olduğu da araştırmalarda ifade edilmektedir (Li ve diğerleri, 2025). Yang ve diğerleri (2024), *Brassica carinata*'nın Cd stresine yüksek tolerans gösterdiğini ve bu toleransın *CAT*, *SOD*, *POD*, *APX* enzim aktivitelerinin artışı ile ilişkili olduğu bildirmiştir. Yapılan bu araştırmada da literatürle uyumlu şekilde *CAT* ve *SOD* genlerinin ifade düzeylerinin maden atığı konsantrasyonları karşısında artışı görülmüştür.



Şekil 4.5. Süs lahanası çeşitlerinin yaprak doku örneklerine ait *SOD* ve *CAT* genlerinin ekspresyon grafikleri

CAT ve *SOD* gen ekspresyon düzeyleri dikkate alındığında süs lahanası çeşitleri arasında maden atığı stresine karşı farklı tolerans tepkileri gözlenmiştir (Şekil 4.5.). Red çeşidi, özellikle %20 ve %40 oranındaki stres uygulamalarında hem *CAT* hem de *SOD* genlerinde belirgin bir ekspresyon artışı göstererek stres koşullarına güçlü bir savunma tepkisi vermiştir. Pink çeşidinde de benzer bir eğilim görülmekle birlikte ekspresyon düzeyi Red çeşidine kıyasla daha düşük kalmıştır. White çeşidi ise farklı stres konsantrasyonlarına karşı daha sınırlı bir gen ekspresyonu sergilemiştir. Özellikle *SOD* gen ekspresyonu stres konsantrasyonlarına anlamlı düzeyde yanıt vermemiştir. Bulgulara göre Red çeşidinin oksidatif stres koşullarına karşı daha yüksek adaptasyon kapasitesine sahip olduğu görülmekle birlikte tolerans düzeyleri açısından White çeşidinde görülen daha az gen ekspresyonu bu çeşitte ortam koşullarının daha az hasara neden olduğunu ve toleransın daha yüksek olduğunu göstermektedir. Yapılan bir çalışmada *Brassica napus* bitkisinde *CAT* genlerinin çevresel streslere duyarlı bir ekspresyon profiline sahip olduğu ve özellikle soğuk, tuzluluk ve absisik asit uygulamalarının gen ekspresyonunu artırdığı rapor edilmiştir (Raza ve diğerleri, 2021). Davosir ve diğerleri (2025), su baskını stresine karşı *B. oleracea* çeşitlerinde özellikle IAA biyosentezi ve antioksidan enzim genlerinin (*CAT*, *POD*, *SOD*) ekspresyon düzeylerinde belirgin farklılıklar olduğunu ve bu farklılıkların tolerans düzeylerini etkilediğini bildirmiştir. Değinilen çalışmalarda göstermektedir ki Brassicaceae familyasında bu genlerin ifadelerinin araştırılması stres faktörlerine bitkilerin yanıtlarını anlamakta oldukça önemlidir.

Çizelge 4.10. *CAT* ve *SOD* genleri ifadeleri ve yetiştirme ortamı özellikleri arasındaki ilişkiler

	<i>CAT</i>		<i>SOD</i>	
	r	p	r	p
Saturasyon (%)	-0,06	0,70	-0,23	0,12
Tuzluluk	-0,07	0,65	0,10	0,50
pH	-0,28	0,06	-0,22	0,14
Kireç	-0,03	0,85	0,11	0,48
Organik Madde	0,56**	0,00	0,73**	0,00
Fosfor	0,26	0,09	0,25	0,10
Ca	0,00	0,99	0,13	0,41
Mg	0,01	0,96	0,13	0,40
K	0,01	0,95	0,05	0,77
Mn	-0,03	0,86	0,09	0,58
Zn	-0,40**	0,01	-0,41**	0,01
Fe	0,14	0,36	-0,02	0,87

r(Pearson korelasyon katsayısı), p önemlilik düzeyi *p<0,05; **p<0,01

Çizelge 4.10'da *CAT* ve *SOD* gen ekspresyon düzeyleri ile yetiştirme ortamı özellikleri arasındaki korelasyonlar incelendiğinde, her iki gen için de bazı çevresel parametrelerle anlamlı ilişkiler belirlenmiştir. Özellikle organik madde içeriği, hem *CAT* ($r = 0,555$; $p = 0,003$) hem de *SOD* ($r = 0,728$; $p = 0,001$) gen ekspresyonu ile pozitif ve yüksek düzeyde anlamlı bir ilişki göstermiştir. Buna karşılık Zn elementi her iki gen için de negatif korelasyon göstermiştir (*CAT* için $r = -0,398$, $p = 0,007$; *SOD* için $r = -0,406$, $p = 0,006$). Bu bulgu, Zn birikiminin artmasının gen ekspresyonu üzerinde baskılayıcı bir etki oluşturabileceğini ortaya koymaktadır. Diğer çevresel parametreler (saturasyon, tuzluluk, pH, kireç, fosfor, Ca, Mg, K, Mn, Fe) ile *CAT* ve *SOD* gen ekspresyonları arasında istatistiksel olarak anlamlı bir ilişki saptanmamıştır. Elde edilen sonuçlar, yetiştirme ortamındaki organik madde ve Zn düzeylerinin antioksidan gen yanıtlarını şekillendirmede önemli rol oynadığını göstermektedir.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

5.1. Sonuçlar

Bu çalışmada, farklı oranlarda kömür madeni atığı içeren yetiştirme ortamlarında Kamome Red F1, Kamome Pink F1 ve Kamome White F1 süs lahanası (*Brassica oleracea* L. var. *acephala*) çeşitlerinin büyüme, fizyolojik, biyokimyasal ve moleküler yanıtları değerlendirilmiş ve kirlilik koşullarına en toleranslı çeşidin belirlenmesi amaçlanmıştır. Denemede kullanılan kömür madeni atığının yetiştirme ortamına artan oranlarda ilavesiyle özellikle organik madde ve bazı besin elementlerinin düzeylerinde belirgin değişimler meydana gelmiştir.

Sürgün boyu üzerine uygulamaların etkisi sınırlı kalmış, varyans analizleri çeşit faktörünün daha belirleyici olduğunu göstermiştir. Buna karşılık, sürgün taze-kuru ağırlıkları ve su içeriği birlikte değerlendirildiğinde White çeşidinde dalgalanmaların en düşük düzeyde olduğu görülmüştür. Yetiştirme ortamı özellikleri ile büyüme parametreleri arasındaki ilişkiler incelendiğinde, organik madde ve fosfor içeriklerinin sürgün kuru ağırlığıyla pozitif korelasyon göstermesi, besin durumunun büyüme üzerinde düzenleyici bir rol oynadığını göstermiştir.

Klorofil-a, klorofil-b ve toplam klorofil içerikleri çeşitler ve uygulamalar arasında genel olarak büyük değişimler sergilememiş; özellikle White çeşidinde pigment düzeylerinin kontrol uygulamasına oldukça yakın seyretmesi, bu çeşitte fotosentetik yapının maden atığı varlığında büyük ölçüde korunduğuna işaret etmiştir.

Prolin birikimi üzerine yetiştirme ortamı etkisi önemli bulunmuş, özellikle Red çeşidinde yüksek maden atığı uygulamalarında prolin düzeylerinde artış gözlenmiştir. Buna karşın, malondialdehit (MDA) konsantrasyonları ve elektrolit sızıntısı bakımından Kamome White F1 çeşidinde daha düşük ve nispeten stabil değerler elde edilmiş; bu durum, membran lipid peroksidasyonu ve zar bütünlüğü açısından White çeşidinde stres hasarının diğer çeşitlere göre daha sınırlı kaldığını göstermiştir. Korelasyon analizleri, prolinin yetiştirme ortamı özelliklerine karşı duyarlı bir stres indikatörü olduğunu ortaya koymuştur. Prolin düzeyi pH, kireç, Ca, Mg, Mn ve Zn ile negatif, organik madde ve fosfor ile pozitif ilişki göstermiş; böylece organik madde ve fosfor artışının osmotik düzenlemeyi destekleyerek prolin birikimini teşvik ettiği, bazı makro ve mikro elementlerin ise bu yanıtı baskıladığı sonucuna varılmıştır. Buna karşın

MDA ve elektrolit sızıntısı değerlerinin yetiştirme ortamı parametreleriyle anlamlı korelasyon göstermemesi, bu göstergelerin daha çok genotipik farklılıklara bağlı olduğunu düşündürmüştür.

Moleküler düzeyde, tüm çeşitlerde *CAT* ve *SOD* gen ekspresyon düzeylerinin özellikle %20 ve kısmen %40 maden atığı içeren ortamlarda en yüksek değerlere ulaştığı, %60 konsantrasyonda ise kontrole yakın düzeylere gerilediği tespit edilmiştir. Ayrıca organik madde içeriği her iki genin ekspresyonu ile pozitif, Zn konsantrasyonu ise negatif korelasyon göstermiştir. Bu bulgu, organik maddenin antioksidan savunma sisteminin aktivasyonunu desteklediğini, Zn birikiminin ise gen yanıtını baskılayabileceğini düşündürmüştür.

Red çeşidi, *CAT* ve *SOD* genlerinde daha güçlü ekspresyon artışları göstererek oksidatif strese karşı yüksek uyum kapasitesine sahip görünmekle birlikte, MDA ve büyüme parametreleri göz önüne alındığında stresten daha fazla etkilenen bir profil sergilemiştir. Buna karşın White çeşidinde gen ekspresyon artışları daha sınırlı olmakla birlikte büyüme, pigment içerikleri, MDA ve elektrolit sızıntısı bakımından daha dengeli bir yanıt ortaya çıkmış; bu durum, söz konusu çeşitte stres faktörlerinin bitki dokularında daha az hasara yol açtığını ve tolerans düzeyinin daha yüksek olduğunu göstermiştir.

Tüm bulgular bir arada değerlendirildiğinde, White süs lahanası çeşidinin kömür madeni atığı içeren ortamlara karşı en dengeli büyüme performansını, en düşük düzeyde membran hasarını ve görece stabil fizyolojik-biyokimyasal yanıtları sergilediği görülmüştür.

5.2. Öneriler

Madencilik uygulamalarına başlamadan önce atık yönetimi planları hazırlanmalıdır. Atıkların depolanması, izlenmesi, izole edilmesi ve olası sızıntı risklerinin önlenmesine yönelik detaylı bir atık yönetim planı ortaya koyulmalıdır.

Tarım alanlarına komşu olan maden sahalarında kontrollü üretim ve sıkı denetim yapılmalıdır. Özellikle tarım alanlarına yakın maden sahalarında atık depolama alanlarının altyapısı, konumu ve sızdırmazlık özellikleri devamlı olarak denetlenmeli; bu bölgelerde yürütülecek olan tarımsal uygulamalar, su ve toprak kalitesine ilişkin periyodik analizlere dayalı olarak “kontrollü üretim” prensipleri çerçevesinde sürdürülmelidir.

Mevcut bilimsel çalışmalar doğrultusunda uygulanabilir özellikte olan fitoremediasyon projeleri geliştirilmelidir. Literatürde maden atıklarının iyileştirilmesine yönelik çok sayıda çalışma bulunmakta olup, bu çalışmaların sonuçları sentezlenerek saha koşullarına uyarlanmış, ekonomik ve uygulanabilir fitoremediasyon projeleri geliştirilip ortaya koyulmalıdır.

Maden atığı içeren sahalara yönelik uygun bitki türlerinin seçilip çoğaltılması ve kullanımı teşvik edilmelidir. Maden sahalarında, özellikle maden atığı içeren ortamlarda ıslah sürecinde rol oynayabilecek bitki türleri belirlenmeli, bu türlerin fidanlık veya sera koşullarında çoğaltılması desteklenmeli ve rehabilitasyon projelerinde aktif olarak kullanılması sağlanmalıdır.

Islah edilen maden sahalarının ekosisteme tekrar entegrasyonu için uzun dönemli olan izleme programları ortaya koyulmalıdır. Fitoremediasyon veya diğer iyileştirme yöntemleri uygulandıktan sonra, söz konusu sahalarda toprak kalitesi, bitki örtüsü gelişimi ile biyotik ve abiyotik göstergeler uzun dönemli olarak izleme programlarıyla takip edilmeli ve gerekli durumlarda ek iyileştirme tedbirlerinin alınması sağlanarak bu sahalarda ekosisteme sürdürülebilir biçimde geri kazandırılmalıdır.

KAYNAKLAR

- Abdollahi, S., Golchin, A. and Shahryari, F. (2020). Lead and Cadmium-Resistant Bacterial Species Isolated from Heavy Metal-Contaminated Soils Show Plant Growth-Promoting Traits. *International Microbiology*, 23(4), 625-640.
- Ağar, A. (2015). *Atık Su Arıtma Çamurunun Süs Lahanasının Gelişimi ve Besin Elementi İçeriği Üzerine Etkisi*, Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana.
- Ahmad, R., Ali, S., Abid, M., Rizwan, M., Ali, B., Tanveer, A., Ahmad, I., Azam, M. and Ghani, M. A. (2020). Glycinebetaine Alleviates the Chromium Toxicity in *Brassica oleracea* L. by Suppressing Oxidative Stress and Modulating the Plant Morphology and Photosynthetic Attributes. *Environmental Science and Pollution Research*, 27(1), 1101-1111.
- Ahmad, P., Sarwat, M., Bhat, N. A., Wani, M. R., Kazi, A. G. and Tran, L. S. P. (2015). Alleviation of Cadmium Toxicity in *Brassica juncea* L. (Czern. and Coss.) by Calcium Application Involves Various Physiological and Biochemical Strategies. *Plos One*, 10(1), 1-17.
- Ahmad, P., Ozturk, M. and Gucl, S. (2012). Oxidative Damage and Antioxidants Induced by Heavy Metal Stress in Two Cultivars of Mustard (*Brassica juncea* L.) Plants. *Fresenius Environmental Bulletin*, 21(10), 2953-2961.
- Ahmed, S., Ahmad, M., Sardar, R. and Ismail, M. A. (2023). Triacantanol Priming as a Smart Strategy to Attenuate Lead Toxicity in *Brassica oleracea* L. *International Journal of Phytoremediation*, 25(9), 1173-1188.
- Akcil, A. and Koldas, S. (2006). Acid Mine Drainage (AMD): Causes, Treatment and Case Studies. *Journal of Cleaner Production*, 14(12-13), 1139-1145.
- Akyüz, E. (2024). Çevre Sorunları ve İnsan Hakları İlişkisi. *The Journal of Academic Social Science*, 15(15), 427-436.
- Alkan, A. (2018). Hava Kirliliğinin Ciddi Boyutlara Ulaştığı Kentlere Bir Örnek: Siirt. *Bitlis Eren Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, 7(2), 641-666.
- Anjum, N. A., Umar, S. and Iqbal, M. (2014). Assessment of Cadmium Accumulation, Toxicity and Tolerance in Brassicaceae and Fabaceae Plants Implications for Phytoremediation. *Environmental Science and Pollution Research*, 21(16), 10286-10293.
- Ashraf, M. and Mehmood, S. (1990). Effects of Waterlogging on Growth and Some Physiological Parameters of Four *Brassica* Species. *Plant and Soil*, 121(2), 203-209.
- Aybar, M. (2022). *Ağır Metal İyonlarıyla Kirlenmiş Maden Yatağı ve Yakın Çevresindeki Toprakların Fitoremediasyon Yöntemiyle Giderilmesinin Araştırılması*, Yayınlanmamış Doktora Tezi, Artvin Çoruh Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Artvin.

- Bates, L. S., Waldern, R. P. and Teare, I. D. (1973). Rapid Determination of Free Proline for Water-Stress Studies. *Plant and Soil*, 39(2), 205-207.
- Bayram, H., Dörtbudak, Z., Fişekçi Evyapan, F., Kargın, M. ve Bülbül, B. (2006). Hava Kirliliğinin İnsan Sağlığına Etkileri, Dünyada, Ülkemizde ve Bölgemizde Hava Kirliliği Sorunu” Paneli Ardından. *Dicle Tıp Dergisi*, 33(2), 105-112.
- Bech, J., Duran, P., Roca, N., Poma, W., Sánchez, I., Roca-Pérez, L., Boluda R., Barceló J. and Poschenrieder, C. (2012). Accumulation of Pb and Zn in *Bidens triplinervia* and *Senecio* sp. Spontaneous Species from Mine Spoils in Peru and their Potential Use in Phytoremediation. *Journal of Geochemical Exploration*, 123(1-2), 109-113.
- Bian, Z., Dong, J., Lei, S., Leng, H., Mu, S. and Wang, H. (2009). The Impact of Disposal and Treatment of Coal Mining Wastes on Environment and Farmland. *Environmental Geology*, 58(3), 625-634.
- Blande, J. D., Holopainen, J. K. and Li, T. (2010). Air Pollution Impedes Plant-to-Plant Communication by Volatiles. *Ecology Letters*, 13(9), 1172-1181.
- Bortoloti, G. A. and Baron, D. (2022). Phytoremediation of Toxic Heavy Metals by *Brassica* Plants: A Biochemical and Physiological Approach. *Environmental Advances*, 8(100204), 1-13.
- Bölükbaşı, E. (2021). Expression Analysis of Some Stress-Related Genes induced by Cadmium on Tomato (*Solanum lycopersicum* L.) Plants. *Hittite Journal of Science and Engineering*, 8(4), 339-345.
- Büyük, İ., Soydam-Aydın, S. ve Aras, S. (2012). Bitkilerin Stres Koşullarına Verdiği Moleküler Cevaplar. *Türk Hijyen ve Deneysel Biyoloji*, 69(2), 97-110.
- Cachada, A., Rocha-Santos, T. and Duarte, A. C. (2018). *Soil and Pollution: An Introduction to the Main Issues*. USA: Academic Press, 1-28.
- Capuana, M. (2020). A Review of the Performance of Woody and Herbaceous Ornamental Plants for Phytoremediation in Urban Areas. *iForest-Biogeosciences and Forestry*, 13(2), 139-151.
- Chamba-Eras, I., Griffith, D. M., Kalinhoff, C., Ramírez, J. and Gázquez, M. J. (2022). Native Hyperaccumulator Plants with Differential Phytoremediation Potential in an Artisanal Gold Mine of the Ecuadorian Amazon. *Plants*, 11(9), 1-14.
- Chaudhry, F. N. and Malik, M. F. (2017). Factors Affecting Water Pollution: A Review. *Journal Ecosystem Ecography*, 7(1), 225-231.
- Conesa, H. M., Faz, Á. and Arnaldos, R. (2006). Heavy Metal Accumulation and Tolerance in Plants from Mine Tailings of the Semiarid Cartagena-La Unión Mining District (SE Spain). *Science of the Total Environment*, 366(1), 1-11.

- Cong, W., Miao, Y., Xu, L., Zhang, Y., Yuan, C., Wang, J., Zhuang, T., Lin, X., Jiang, L., Wang, N., Ma, J., Sanguinet, K. A., Liu, B., Rustgi, S. and Ou, X. (2019). Transgenerational Memory of Gene Expression Changes induced by Heavy Metal Stress in Rce (*Oryza sativa* L.). *Biomed Central Plant Biology*, 19(282), 1-14.
- Çakır Sümer, G. (2014). Hava Kirliliği Kontrolü: Türkiye’de Hava Kirliliğini Önlemeye Yönelik Yasal Düzenlemelerin ve Örgütlenmelerin İncelenmesi. *Uluslararası İktisadi ve İdari İncelemeler Dergisi*, 7(13), 37-56.
- Çelikkıran, A. (1995). İnsan, Çevre, Eğitim. *Kuram ve Uygulamada Eğitim Yönetimi*, 4(4), 569-572.
- Çeliksaş, V. (2020). *Adana İli Aladağ İlçesindeki Krom Maden Yataklarında Bulunan Bitkilerin Fitoremediasyon Özelliklerinin Belirlenmesi*, Yayınlanmamış Doktora Tezi, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana.
- Çeliksaş, V., Otu, H., Düzenli, S., Alharby, H., Bamagoos, A., Islam, M. S., Hossain, A. and El Sabagh, A. (2019). Traffic-induced Air Pollution Effects on Physio-Biochemical Activities of the Plant *Eucalyptus camuldensis*. *Fresenius Environmental Bulletin*, 28(12), 9373-9378.
- Čudić, V., Stojiljković, D. and Jovović, A. (2016). Phytoremediation Potential of Wild Plants Growing on Soil Contaminated with Heavy Metals. *Archives of Industrial Hygiene and Toxicology*, 67(3), 229-239.
- Dar, M. I., Khan, F. A., Rehman, F., Masoodi, A., Ansari, A. A., Varshney, D., Naushin, F. and Naikoo, M. I. (2015). *Roles of Brassicaceae in Phytoremediation of Metals and Metalloids. Phytoremediation: Management of Environmental Contaminants*. Switzerland: Springer, 201-215.
- Davosir, D., Jahn, L., Šola, I. and Ludwig-Müller, J. (2025). Variety-Specific Responses of Young *Brassica oleracea* Plants to Waterlogging: Comparative Biochemical, Metabolic and Gene Expression Analysis. *Plant Physiology and Biochemistry*, 227(110098), 1-15.
- Deepika and Haritash, A. K. (2023). Phytoremediation Potential of Ornamental Plants for Heavy Metal Removal from Contaminated Soil: A Critical Review. *Horticulture, Environment, and Biotechnology*, 64(5), 709-734.
- Demirarslan, K. O. ve Kaya, A. (2017). Kömür Madenciliği Kaynaklı Hava Kirliliği: Partikül Madde ve Metan Emisyonları Üzerine Literatür Araştırması. *Bilimsel Madencilik Dergisi*, 56(1), 23-31.
- Demirbilek, S. (1987). Kömür Kullanımı ve İlgili Çevre Kirlenmesi. *Bilimsel Madencilik Dergisi*, 26(3), 33-43.
- De Leenheer, L. and Van Hove, J. (1958). Determination of Soil Organic Matter. *Pedologie*, 8(1), 233–247.

- De Vos, B., Lettens, S., Muys, B. and Deckers, J. A. (2007). Walkley-Black Analysis of Forest Soil Organic Carbon: Recovery, Limitations and Uncertainty. *Soil Use and Management*, 23(3), 221-229.
- Diallo, A., Hasnaoui, S. E., Dallahi, Y., Smouni, A. and Fahr, M. (2024). Native Plant Species Growing on the Abandoned Zaida Lead/Zinc Mine Site in Morocco: Phytoremediation Potential for Biomonitoring Perspective. *Plos One*, 19(6), 1-20.
- Dikbaş, N., Parlakova Karagöz, F., Uçar, S. and Demir, Y. (2023). Ornamental Cabbage (*Brassica oleracea* var. *acephala*) Responses to Phytase Enzyme Purified from *Lactobacillus coryniformis* Application. *Biotechnology and Applied Biochemistry*, 70(3), 1407-1420.
- Doğan, İ. M. (2015). *Guleman (Elâziğ) Krom Yatağı Çevresindeki Sularda Lemna gibba L. ve Lemna minor L. Kullanılarak Cr, Ni ve Co Alım Kapasitelerinin İncelenmesi*, Yayımlanmamış Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elâziğ.
- Doğan, M., Yalçın, E., Acar, A., Çavuşoğlu, D., Şengül, Ü., Yapar, K. ve Çavuşoğlu, K. (2018). Civil Dere Suyunda Bulunan Ağır Metal İyonlarının *Allium cepa* L. (Amaryllidaceae)'da Teşvik Ettiği Fizyolojik, Sitogenetik ve Anatmik Değişimlerin Araştırılması. *Gaziosmanpaşa Bilimsel Araştırma Dergisi*, 7(2), 1-13.
- Doğru, A., Altundağ, H. ve Dünder, Ş. (2021). Bitkilerde Ağır Metal Hiperakümülayonu ve Fitoremediasyon. *Journal of Agricultural Biotechnology*, 2(2), 32-55.
- Dontala, S. P., Reddy, T. B. and Vadde, R. (2015). Environmental Aspects and Impacts Its Mitigation Measures of Corporate Coal Mining. *Procedia Earth and Planetary Science*, 11(2), 2-7.
- Dou, C., Cui, H., Zhang, W., Yu, W., Sheng, X. and Zheng, X. (2023). Copper and Cadmium Accumulation and Phytoretraction Potential of Native and Cultivated Plants Growing around a Copper Smelter. *Agronomy*, 13(12), 2874.
- Dragović, R., Zlatković, B., Dragović, S., Petrović, J. and Mandić, L. J. (2014). Accumulation of Heavy Metals in Different Parts of Russian Thistle (*Salsola tragus*, Chenopodiaceae), a Potential Hyperaccumulator Plant Species. *Biologica Nyssana*, 5(2), 83-90.
- Ebbs, S. D. and Kochian, L. V. (1997). Toxicity of Zinc and Copper to *Brassica* Species: Implications for Phytoremediation. *Journal Environmental Quality*, 26(3), 776-78.
- Emamverdian, A., Ding, Y., Mokherdoran, F. and Xie, Y. (2015). Heavy Metal Stress and Some Mechanisms of Plant Defense Response. *The Scientific World Journal*, 1(756120), 1-18.
- Engin, Ö. (2020). Tekirdağ İlinde Maden Kömürü Üretimnin Analizi. *Balkan ve Yakın Doğu Sosyal Bilimler Dergisi*, 6(1), 1-6.
- Feizabadi, A., Noormohammadi, G. and Fatehi, F. (2021). Changes in Growth, Physiology, and Fatty Acid Profile of Rapeseed Cultivars Treated with Vermicompost under Drought Stress. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 21(1), 200-208.

- Fernández, S., Poschenrieder, C., Marcenò, C., Gallego, J. R., Jiménez-Gómez, D., Bueno, A. and Afif, E. (2017). Phytoremediation Capability of Native Plant Species Living on Pb-Zn and Hg-As Mining Wastes in the Cantabrian Range, North of Spain. *Journal of Geochemical Exploration*, 174(375-6742), 10-20.
- Fornes, F., García-de-la-Fuente, R., Belda, R. M. and Abad, M. (2009). ‘Alperujo’ Compost Amendment of Contaminated Calcareous and Acidic Soils: Effects on Growth and Trace Element Uptake by Five *Brassica* Species. *Bioresource Technology*, 100(17), 3982-3990.
- Furtana, G. ve Özdamar, F. (2024). *Stres Faktörlerine Karşı Bitkilerin Moleküler Cevapları*. Ankara: İksad Yayınevi, 3-26.
- Gajić, G., Djurdjević, L., Kostić, O., Jarić, S., Mitrović, M. and Pavlović, P. (2018). Ecological Potential of Plants for Phytoremediation and Ecorestoration of Fly Ash Deposits and Mine Wastes. *Frontiers in Environmental Science*, 6(124), 1-24.
- Gall, J. E. and Rajakaruna, N. (2013). *The Physiology, Functional Genomics, and Applied Ecology of Heavy Metal-tolerant Brassicaceae*. *Brassicaceae: Characterization, Functional Genomics and Health Benefits*. New York: Nova Science Publishers, 121-148.
- Gevrek Kürüm, N. (2016). *Norveç (Røros) Bakır Madenlerinde Yetişen Bazı Bitkilerde Metal Birikimi ve Fitoremediasyon Potansiyelinin Araştırılması*, Yayımlanmamış Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Gisbert, C., Clemente, R., Navarro-Avinó, J., Baixauli, C., Ginér, A., Serrano, R., Walker, D. J. and Bernal, M. P. (2006). Tolerance and Accumulation of Heavy Metals by Brassicaceae Species Grown in Contaminated Soils from Mediterranean Regions of Spain. *Environmental and Experimental Botany*, 56(1), 19-27.
- Gökseven, Ş. B. E., Kıran, S. and Ellialtıoğlu, Ş. Ş. (2021). Determination of Morphological and Physiological Changes of Ornamental Cabbage (*Brassica oleracea* var. *acephala*) Against Boron Toxicity in Phytoremediation. *Horticultural Studies*, 38(1), 29-38.
- Gökseven, Ş. B. E., Kıran, S. and Ellialtıoğlu, Ş. Ş. (2022). The Effects of Humic Acid and Chelate Applications on Some Morphophysiological Properties and Antioxidant Enzyme Activities of Ornamental Cabbage (*Brassica oleracea* var. *acephala*) under Boron Stress. *Soil Studies*, 11(2), 85-95.
- Güler, Ç. ve Çobanoğlu, Z. (1994). Su Kirliliği. *Çevre Sağlığı Temel Kaynak Dizisi*, 12(1), 11-113.
- Güler, Ç. ve Çobanoğlu, Z. (1997). Toprak Kirliliği. *T.C. Sağlık Bakanlığı Çevre Sağlığı Temel Kaynak Dizisi*, 40(1), 11-14.
- Günel, T. ve Aydın, K. (2009). Real-Time PCR ve Uygulama Alanları. *Türk Bilimsel Derlemeler Dergisi*, 2(2), 43-45.

- Güner, A., Aslan, S., Ekim, T., Vural, M. ve Babaç, M.T. (Editörler). (2012). *Brassicaceae. Türkiye Bitkileri Listesi (Damarlı Bitkiler)*. İstanbul: Nezahat Gökyiğit Botanik Bahçesi ve Flora Araştırmaları Derneği Yayını.
- Greco, E., Talarico, E., Guarasci, F., Camoli, M., Palermo, A.M., Zambelli, A., Chiappetta, A., Araniti, F. and Bruno, L. (2025). Epigenetic Mechanisms of Plant Adaptation to Cadmium and Heavy Metal Stress. *Epigenomes*, 9(4), 1-27.
- Haghighi, M., Kafi, M., Pessarakli, M., Sheibanirad, A. and Sharifinia, M. R. (2016). Using Kale (*Brassica oleracea* var. *acephala*) as a Phytoremediation Plant Species for Lead (Pb) and Cadmium (Cd) Removal in Saline Soils. *Journal of Plant Nutrition*, 39(10), 1460-1471.
- Hamutoğlu, R., Dinçsoy, A. B., Cansaran Duman, D. ve Aras, S. (2012). Biyosorpsiyon, Adsorpsiyon ve Fitoremediasyon Yöntemleri ve Uygulamaları. *Türk Hijyen ve Deneysel Biyoloji Dergisi*, 69(4), 242-257.
- Haque, N., Peralta-Videa, J. R., Jones, G. L., Gill, T. E. and Gardea-Torresdey, J. L. (2008). Screening the Phytoremediation Potential of Desert Broom (*Baccharis sarothroides* Gray) Growing on Mine Tailings in Arizona, USA. *Environmental Pollution*, 153(2), 362-368.
- Hendriks, K. P., Kiefer, C., Al-Shehbaz, I. A., Bailey, C. D., van Huysduynen, A. H., Nikolov, L., Nauheimer, L., Zuntini, A. R., German, D. A., Franzke, A., Koch, M. A., Lysak, M. A., Toro-Núñez, O., Özüdoğru, B., Invernón, V. R., Walden, N., Maurin, O., Hay, N. M., Şuşkov, F., Mandakova, T. and Lens, F. (2023). Global Brassicaceae Phylogeny Based on Filtering of 1,000-Gene Dataset. *Current Biology*, 33(19), 4052-4068.
- Hilson, G. (2000). Pollution Prevention and Cleaner Production in the Mining Industry: An Analysis of Current Issues. *Journal of Cleaner Production*, 8(2), 119-126.
- Hniličková, H., Hniličková, F., Orsák, M. and Hejnák, V. (2019). Effect of Salt Stress on Growth, Electrolyte Leakage, Na⁺ and K⁺ Content in Selected Plant Species. *Plant, Soil and Environment*, 65(2), 90-96.
- Hodges, D. M., DeLong, J. M., Forney, C. F. and Prange, R. K. (1999). Improving the Thiobarbituric Acid-Reactive-Substances Assay for Estimating Lipid Peroxidation in Plant Tissues. *HortScience*, 34(4), 700-702.
- Ilyas, S., Sabo, A., Akomolafe, G. F. and Mustafa, Y. S. (2023). Metal Accumulation Assessment in Plants and Soil at Kuduku Mining Site, Nasarawa, Nigeria. *Fudma Journal of Sciences*, 7(2), 313-320.
- İmal, M., Karapınar, Ç. ve Doğan, O. (2013). Hava Kalitesine Doğalgazın Etkisi: Kahramanmaraş Örneği Çalışması. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 16(2), 22-28.
- İnternet: Ahmad, H. (2024). Phytoremediation: The Green Solution. *Bioremediation for Environmental Sustainability*. URL: <https://www.intechopen.com/books/1004259>. Son Erişim Tarihi: 09.12.2025.

- İnternet: Çevre kanunu. (1983, Ağustos). Çevre Kanun, T.C. Resmî Gazete. URL: <https://www.mevzuat.gov.tr/mevzuat?MevzuatNo=2872&MevzuatTur=1&MevzuatTertip=5>. Son Erişim Tarihi: 09.12.2025.
- İnternet: Dünya sağlık teşkilatı. (2024). Ambient (outdoor) Air Pollution. URL: [https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health). Son Erişim Tarihi: 09.12.2025.
- İnternet: Munns, R. (2008). Plant Water Content and Relative Water Content. Prometheus Protocols. URL: <https://prometheusprotocols.net/function/water-relations/water-content-and-rwc/plant-water-content-and-relative-water-content/>. Son Erişim Tarihi: 09.12.2025.
- Jadwisieńczyk, K. K., Majkowska-Gadomska, J., Francke, A. and Kaliniewicz, Z. (2023). An Evaluation of the Physical and Chemical Parameters in *Brassica* Seedlings Grown on Various Organic Substrates. *Applied Sciences*, 13(16), 1-14.
- Jeevanantham, S., Saravanan, A., Hemavathy, R. V., Kumar, P. S., Yaashikaa, P. R. and Yuvaraj, D. (2019). Removal of Toxic Pollutants from Water Environment by Phytoremediation: A Survey on Application and Future Prospects. *Environmental Technology and Innovation*, 13(100346), 264-276.
- Kadıoğlu, B. (2021). Toprak Kirliliği ile Kimyasal Gübre Kullanımı Arasındaki Olası Bağlantıların İncelenmesi. *Muş Alparslan Üniversitesi Tarımsal ve Üretim Teknolojileri Dergisi*, 1(2), 26-38.
- Kaonda, M. K. M. and Chileshe, K. (2023). Assessment of Sunflower (*Helianthus annuus* L.) for Phytoremediation of Heavy Metal Polluted Mine Tailings A Case Study of Nampundwe Mine Tailings Dam, Zambia. *Journal of Environmental Protection*, 14(7), 481-492.
- Karaca, A. ve Turgay, O. C. (2012). Toprak Kirliliği. *Toprak Bilimi ve Bitki Besleme Dergisi*, 1(1), 13-19.
- Karakoyun, G. ve Osmalı, E. (2015). Erzincan'da Hava kirliliğine Bağlı Olarak Sarı Çamlarda (*Pinus sylvestris* L.) Ağır Metal Birikimi. *Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 5(2), 67-77.
- Kılıç, Z. (2021). Water Pollution: Causes, Negative Effects and Prevention Methods. *İstanbul Sabahattin Zaim Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 3(2), 129-132.
- Kiazolu, H. (2016). *Plantago holosteum* Scop. (Plantaginaceae) Türünün Element İçeriği, Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi, Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa.
- Kisku, G. C., Kumar, V., Sahu, P., Kumar, P. and Kumar, N. (2018). Characterization of Coal Fly Ash and use of Plants Growing in Ash Pond for Phytoremediation of Metals From Contaminated Agricultural Land. *International Journal of Phytoremediation*, 20(4), 330-337.

- Klukanová, A. and Rapant, S. (1999). Impact of Mining Activities Upon the Environment of the Slovak Republic: Two Case Studies. *Journal of Geochemical Exploration*, 66(1-2), 299-306.
- Korkmaz, H. ve Durmaz, A. (2017). Bitkilerin Abiyotik Stres Faktörlerine Karşı Geliştirilen Cevaplar. *Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 7(2), 192-207.
- Kumari A., Lal, B., Pakade, Y. B. and Chand, P. (2011). Assessment of Bioaccumulation of Heavy Metal by *Pteris vittata* L. Growing in the Vicinity of Fly Ash. *International Journal of Phytoremediation*, 13(8), 779-787.
- Lashkari Sanami, N., Ghorbani, J., Vahabzadeh, G., Hodjati, S. M. and Motesharezadeh, B. (2024). Spontaneous Growth of Plants Enhances Phytoextraction on Abandoned Coal Mine Wastes in Central Alborz Coalfield, Iran. *International journal of Phytoremediation*, 26(13), 2154-2162.
- Lee, T. J., Luitel, B. P. and Kang, W. H. (2011). Growth and Physiological Response to Manganese Toxicity in Chinese Cabbage (*Brassica rapa* L. ssp. *campestris*). *Horticulture, Environment, and Biotechnology*, 52(3), 252-258.
- Li, Y., Zhang, S., Jiang, W. and Liu, D. (2013). Cadmium Accumulation, Activities of Antioxidant Enzymes, and Malondialdehyde (MDA) Content in *Pistia stratiotes* L. *Environmental Science and Pollution Research*, 20(2), 1117-1123.
- Li, L., Fan, Z., Gan, Q., Xiao, G., Luan, M., Zhu, R. and Zhang, Z. (2025). Conservative Mechanism through Various Rapeseed (*Brassica napus* L.) Varieties Respond to Heavy Metal (Cadmium, Lead, Arsenic) Stress. *Frontiers in Plant Science*, 15(1521075), 1-16.
- Li, G., Shah, A. A., Khan, W. U., Yasin, N. A., Ahmad, A., Abbas, M., Ali, A. and Safdar, N. (2021). Hydrogen Sulfide Mitigates Cadmium Induced Toxicity in *Brassica rapa* by Modulating Physiochemical Attributes, Osmolyte Metabolism and Antioxidative Machinery. *Chemosphere*, 263(127999), 1-12.
- Lichtenthaler, H. K. (1998). The Stress Concept in Plants: An introduction. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 851(1), 187-198.
- Liu, J., Xin, X. and Zhou, Q. (2018). Phytoremediation of Contaminated Soils Using Ornamental Plants. *Environmental Reviews*, 26(1), 43-54.
- Liu, X., Zhang, B., Wu, J., Li, Z., Han, F., Fang, Z., Yang, L., Zhuang, M., Lv, H., Liu, Y., Li, Z., Yu, H., Li, X. and Zhang, Y. (2020). Pigment Variation and Transcriptional Response of the Pigment Synthesis Pathway in the S2309 Triple-Color Ornamental Kale (*Brassica oleracea* L. var. *acephala*) Line. *Genomics*, 112(3), 2658-2665.
- Livak, J. K. and Schmittgen, T. D. (2001). Analysis of Relative Gene Expression Data Using Real- Time Quantitative PCR and the $2^{-\Delta\Delta C_t}$ Method. *Methods*, 25(4), 402-408.

- LoRESTANI, B., Cheraghi, M. and Yousefi, N. (2012). The Potential of Phytoremediation Using Hyperaccumulator Plants: A Case study at a Lead-Zinc Mine Site. *International Journal of Phytoremediation*, 14(8), 786-795.
- Lutts, S., Kinet, J.-M. and Bouharmont, J. (1996). NaCl-Induced Senescence in Leaves of Rice (*Oryza sativa* L.) Cultivars Differing in Salinity Resistance. *Annals of Botany*, 78(3), 389–398.
- Mahdavian, K., Ghaderian, S. M. and Torkzadeh-Mahani, M. (2015). Accumulation and Phytoremediation of Pb, Zn, and Ag by Plants Growing on Koshk Lead–Zinc Mining Area, Iran. *Journal of Soils and Sediments*, 17(1), 1310-1320.
- Marcelo-Silva, J., Ramabu, M. and Siebert, S. J. (2023). Phytoremediation and Nurse Potential of Aloe Plants on Mine Tailings. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 20(2), 1-10.
- Matters, G. L. and Scandalios, J. G. (1986). Changes in Plant Gene Expression During Stress. *Developmental Genetics*, 7(4), 167-175.
- Małacka, A., Konkolewska, A., Hanć, A., Barańkiewicz, D., Ciszewska, L., Ratajczak, E., Staszak, A. M., Kmita, A. and Jarmuszkiewicz, W. (2019). Insight into the Phytoremediation Capability of *Brassica juncea* (v. Malopolska): Metal Accumulation and Antioxidant Enzyme Activity. *International Journal of Molecular Sciences*, 20(18), 1-17.
- Medina-Díaz, H. L., López-Bellido, F. J., Alonso-Azcárate, J., Fernández-Morales, F. J. and Rodríguez, L. (2024). A New Hyperaccumulator Plant (*Spergularia rubra*) for the Decontamination of Mine Tailings through Electrokinetic-Assisted Phytoextraction. *Science of the Total Environment*, 912(1), 1-12.
- Menteşe, S. ve Böbrek, O. (2020). Madencilik Faaliyetlerinin Topraktaki Ağır Metaller (As, Cd, Co, Fe ve Ni) Üzerine Etkisi: Orhaneli ve Büyük Orhan (Bursa) Örneği. *Ege Coğrafya Dergisi*, 29(1), 45-56.
- Midhat, L., Ouazzani, N., Hejjaj, A., Ouhammou, A. and Mandi, L. (2019). Accumulation of Heavy Metals in Metallophytes from Three Mining Sites (Southern Centre Morocco) and Evaluation of Their Phytoremediation Potential. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 169(1), 150-160.
- Miranda, R., Boechat, C. L., Bomfim, M. R., Santos, J. A. G., Coelho, D. G., Assunção, S. J. R., Cardoso, K. M. and Cardoso, E. B. (2022). *Phytoremediation: A Sustainable Green Approach for Environmental Cleanup*. In: *Phytoremediation Technology for the Removal of Heavy Metals and Other Contaminants from Soil and Water*. Netherlands: Elsevier, 49-75.
- Mirsal, I. A. (2008). *Soil Pollution*. Berlin: Springer, 1-11.

- Mishra, V. K., Upadhyaya, A. R., Pandey, S. K. and Tripathi, B. D. (2008). Heavy Metal Pollution Induced Due to Coal Mining Effluent on Surrounding Aquatic Ecosystem and its Management Through Naturally Occurring Aquatic Macrophytes. *Bioresource Technology*, 99(5), 930-936.
- Mohsenzadeh, F. and Mohammadzadeh, R. (2018). Phytoremediation Ability of the New Heavy Metal Accumulator Plants. *Environmental and Engineering Geoscience*, 24(4), 441-450.
- Muntean, D., Munteanu, N. and Andrieş, I. (2012). Research on Main Morphological and Physiological Characters of the Species *Brassica oleracea* var. *Acephala* in Iaşi. *Lucrări Ştiinţifice*, 55(2), 443-446.
- Natasha, Shahid, M., Saleem, M., Anwar, H., Khalid, S., Tariq, T. Z., Murtaza, B., Amjad, M. and Naeem, M. A. (2020). A Multivariate Analysis of Comparative Effects of Heavy Metals on Cellular Biomarkers of Phytoremediation Using *Brassica oleracea*. *International Journal of Phytoremediation*, 22(6), 617-627.
- Naveed, M., Tanvir, B., Xiukang, W., Brtnicky, M., Ditta, A., Kucerik, J., Subhani, Z., Nazir, M. Z., Radziemska, M., Saeed, Q. and Mustafa, A. (2021). Co-composted Biochar Enhances Growth, Physiological, and Phytostabilization Efficiency of *Brassica napus* and Reduces Associated Health Risks under Chromium Stress. *Frontiers in Plant Science*, 12(775785), 1-15.
- Nişancı, A. (1986). Belli Hava Durumlarında Erzurum'un Hava Kirliliği. *Edebiyat ve Beşerî Bilimler Dergisi*, 1(15), 319-324.
- Nouri, J., Lorestani, B., Yousefi, N., Khorasani, N., Hasani, A. H., Seif, F. and Cheraghi, M. (2011). Phytoremediation Potential of Native Plants Grown in the Vicinity of Ahangaran Lead–Zinc Mine (Hamedan, Iran). *Environmental Earth Sciences*, 62(3), 639-644.
- Novo, L. A. and González, L. (2014). Germination and Early Growth of *Brassica juncea* in Copper Mine Tailings Amended with Technosol and Compost. *The Scientific World Journal*, 1(506392), 1-9.
- Olivares, A. R., Carrillo-González, R., González-Chávez, M. D. C. A. and Hernández, R. M. S. (2013). Potential of Castor Bean (*Ricinus communis* L.) for Phytoremediation of Mine Tailings and Oil Production. *Journal of Environmental Management*, 114(1), 316-323.
- Olsen, S. R., Cole, C.V., Watanabe, F. S. and Dean, L. A. (1954). *Estimation of Vailable Phosphorus in Soils by Extraction with Sodium Bicarbonate*. Washington: US Government Printing Office, 1-22.
- Palacioğlu, G., Özer, G. ve Bayraktar, H. (2021). Bitki Patojeni Fungusların Tespitinde Polimeraz Zincir Reaksiyonu'na Dayalı Bazı Moleküler Teknikler. *Journal of the Institute of Science and Technology*, 11(3), 1831-1845.
- Palmer, C. E., Warwick, S. and Keller, W. (2001). Brassicaceae (Cruciferae) Family, Plant Biotechnology, and Phytoremediation. *International Journal of Phytoremediation*, 3(3), 245-287.

- Palutoglu, M., Akgul, B., Suyarko, V., Yakovenko, M., Kryuchenko, N. and Sasmaz, A. (2018). Phytoremediation of Cadmium by Native Plants Grown on Mining soil. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 100(2), 293- 297.
- Pandey, N. and Sharma, C. P. (2002). Effect of Heavy Metals Co^{2+} , Ni^{2+} and Cd^{2+} on Growth and Metabolism of Cabbage. *Plant Science*, 163(4), 753-758.
- Pouresmaieli, M., Ataei, M., Forouzandeh, P., Azizollahi, P. and Mahmoudifard, M. (2022). Recent Progress on Sustainable Phytoremediation. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 10(108482), 1-24.
- Raza, A., Su, W., Gao, A., Mehmood, S. S., Hussain, M. A., Nie, W., Lv, Y., Zou, X. and Zhang, X. (2021). Catalase (CAT) Gene Family in Rapeseed (*Brassica napus* L.): Genome-Wide Analysis, Identification, and Expression Pattern in Response to Multiple Hormones and Abiotic Stress Conditions. *International Journal of Molecular Sciences*, 22(8), 4281.
- Rocha, C. S., Rocha, D. C., Kochi, L. Y., Carneiro, D. N. M., Dos Reis, M. V. and Gomes, M. P. (2022). Phytoremediation by Ornamental Plants: A Beautiful and Ecological Alternative. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(3), 3336-3354.
- Rosca, M., Cozma, P., Minut, M., Hlihor, R. M., Bețianu, C., Diaconu, M. and Gavrilescu, M. (2021). New Evidence of Model Crop *Brassica napus* L. in Soil Clean-up: Comparison of Tolerance and Accumulation of Lead and Cadmium. *Plants*, 10(10), 2051.
- Rouhani, A., Skousen, J. and Tack, F. M. (2023). An Overview of Soil Pollution and Remediation Strategies in Coal Mining Regions. *Minerals*, 13(8), 1064.
- Santangeli, M., Capo, C., Traversari, S., Pugliesi, C. and Fambrini, M. (2019). Physiological Mechanisms Underlying Acclimation to Salt Stress in *Brassica napus*. *Water*, 11(1667), 1-21.
- Sepehr, M. F. and Moradli, A. (2021). The Study of Chromium and Zinc Contaminated Soil Influence on Iron Content and Protein Profile of Ornamental Cabbage Plant. *Biology Bulletin*, 48(3), 54-61.
- Shakeel, T., Shah, G. M., Zeb, B. S., Gul, I., Bibi, S., Hussain, Z. and Irshad, M. (2024). Phytoremediation Potential and Vegetation Assessment of Plant Species Growing on Multi-Metals Contaminated Coal Mining Site. *Environmental Research Communications*, 6(055006), 1-15.
- Shakeel, A., Khan, A. A. and Ahmad, G. (2019). The Potential of Thermal Power Plant Fly Ash to Promote the Growth of Indian Mustard (*Brassica juncea*) in Agricultural Soils. *SN Applied Sciences*, 1(375), 1-5.
- Sharaya, R., Gill, R., Naeem, M., Tuteja, N. and Gill, S. S. (2023). Exploring Salt Tolerance in Indian Mustard [*Brassica juncea* (L.) Czern. and Coss.] Genotypes: A Physiological and Biochemical Perspective. *South African Journal of Botany*, 160(1), 446-455.

- Shen, Z. G., Zhao, F. J. and McGrath, S. P. (1997). Uptake and Transport of Zinc in the Hyperaccumulator *Thlaspi caerulescens* and the Non-Hyperaccumulator *Thlaspi ochroleucum*. *Plant, Cell and Environment*, 20(7), 898-906.
- Shukla, S., Pei, Y., Li, W. G. and Pei, D. S. (2024). Toxicological Research on Nano and Microplastics in Environmental Pollution: Current Advances and Future Directions. *Aquatic Toxicology*, 270(106894), 1-10.
- Siyar, R., Doulati Ardejani, F., Norouzi, P., Maghsoudy, S., Yavarzadeh, M., Taherdangkoo, R. and Butscher, C. (2022). Phytoremediation Potential of Native Hyperaccumulator Plants Growing on Heavy Metal-Contaminated Soil of Khatunabad Copper Smelter and Refinery, Iran. *Water*, 14(22), 3597.
- Solomou, A. D., Michopoulos, P. and Mantakas, G. (2023). Monitoring Reclamation of Plant Biodiversity and Soil Parameters in an Area of Bauxite Mine Spoils (A Case Study of Greece). *Sustainability*, 15(20), 15120.
- Şener, K. (2020). *Real time PCR: Eş Zamanlı Bir Bakış*. İçinde M. S. Doğru (Ed.), Bilimin Doğası Üzerine Bir İnceleme (s. 31-62). Ankara: İksad Yayınevi.
- Şimşek, C. (2022). Açık Ocak Madenciliğinde Su Kaynaklarının Yönetimine Bağlı Sorunlar. *Yer Altı Kaynakları Dergisi*, 11(22), 25-40.
- Taghizadeh, M., Solgi, M., Karimi, M., Sanati, M. H. and Khoshbin, S. (2018). Heavy Metals Effects on *Brassica oleracea* and Elements Accumulation by Salicylic Acid. *Archives of Hygiene Sciences*, 7(1), 1-11.
- Tang, Y., Qiu, R., Zeng, X., Fang, X., Yu, F., Zhou, X. and Wu, Y. (2009). Zn and Cd Hyperaccumulating Characteristics of *Picris divaricata* Vant. *International Journal of Environment and Pollution*, 38(1-2), 26-38.
- Toishimanov, M., Abilda, Z., Daurov, D., Daurova, A., Zhapar, K., Sapakhova, Z., Kanat, R., Stamgaliyeva, Z., Zhambakin, K. and Shamekova, M. (2023). Phytoremediation Properties of Sweet Potato for Soils Contaminated by Heavy Metals in South Kazakhstan. *Applied Sciences*, 13(17), 9589.
- Vardumyan, H., Singh, A., Rajput, V. D., Minkina, T., El-Ramady, H. and Ghazaryan, K. (2024). Additive-Mediated Phytoextraction of Copper-Contaminated Soils Using *Medicago lupulina* L., *Egyptian Journal of Soil Science*, 64(2), 599-618.
- Vural, A. ve Çiçek, B. (2020). Cevherleşme Sahasında Gelişmiş Topraklardaki Ağır Metal Kirliliği. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 8(2), 1533-1547.
- Yadav, S. K. (2010). Heavy Metals Toxicity in Plants: An Overview on the Role of Glutathione and Phytochelatins in Heavy Metal Stress Tolerance of Plants. *South African Journal of Botany*, 76(2), 167-179.
- Yadav, S. and Srivastava, J. (2014). Phytoremediation of Cadmium Toxicity by *Brassica* spp: A Review. *International Journal of Biology and Biological Sciences*, 3(5), 47-52.

- Yang, T., Pang, B., Zhou, L., Gu, L., Wang, H., Du, X., Wang, H. and Zhu, B. (2024). Transcriptome Profiling, Physiological and Biochemical Analyses Reveal Comprehensive Insights in Cadmium Stress in *Brassica carinata* L. *International Journal of Molecular Sciences*, 25(2), 1-17.
- Yang, S., Liang, S., Yi, L., Xu, B., Cao, J., Guo, Y. and Zhou, Y. (2014). Heavy Metal Accumulation and Phytostabilization Potential of Dominant Plant Species Growing on Manganese Mine Tailings. *Frontiers of Environmental Science and Engineering*, 8(3), 394-404.
- Yanqun, Z., Yuan, L., Schwartz, C., Langlade, L. and Fan, L. (2004). Accumulation of Pb, Cd, Cu and Zn in Plants and Hyperaccumulator Choice in Lanping Lead-Zinc Mine Area, China. *Environment International*, 30(4), 567-576.
- Yıldırım, D. and Şaşmaz, A. (2017). Phytoremediation of As, Ag, and Pb in Contaminated Soils Using Terrestrial Plants Grown on Gumuskoy Mining Area (Kutahya Turkey). *Journal of Geochemical Exploration*, 1(182), 228-234.
- Yılmaz, H. ve Çiftçi, V. (2023) *Bitkilerde Abiyotik Stres Direncini Artırmada Çinkonun Rolü*. Ankara: İksad Yayınevi, 3-18.
- Yorgancılar, M., Yakışır, E. ve Erkoyuncu, M. T. (2015). Moleküler Markörlerin Bitki Islahında Kullanımı. *Bahri Dağdaş Bitkisel Araştırma Dergisi*, 4(2), 1-12.
- Yörükoğlu, A. ve Karadeniz, M. (2003). *Asit Maden Drenajı Kestirim Yöntemlerinin Karşılaştırılması*, 18. Uluslararası Madencilik Kongresi, Ankara.
- Zaman, W., Ali, S. and Akhtar, M. S. (2024). Harnessing the Power of Plants: Innovative Approaches to Pollution Prevention and Mitigation. *Sustainability*, 16(23), 10587.
- Zemanova, V., Břendová, K., Pavlikova, D., Kubátová, P. and Tlustoš, P. (2017). Effect of Biochar Application on the Content of Nutrients (Ca, Fe, K, Mg, Na, P) and Amino Acids in Subsequently Growing Spinach and Mustard. *Plant Soil Environment*, 63(7), 322-327.
- Zhang, J., Liu, H., Sun, J., Li, B., Zhu, Q., Chen, S. and Zhang, H. (2012). *Arabidopsis* Fatty Acid Desaturase FAD2 is Required for Salt Tolerance During Seed Germination and Early Seedling Growth, *Plos One*, 7(1), 303-313.
- Zhang, W., Fu, Q., Dai, X. and Bao, M. (2008). The Culture of Isolated Microspores of Ornamental Kale (*Brassica oleracea* var. *acephala*) and the Importance of Genotype to Embryo Regeneration. *Scientia Horticulturae*, 117(1), 69-72.
- Walkley, A. and Black, I. A. (1934). An Examination of the Degtjareff Method for Determining Soil Organic Matter and a Proposed Modification of the Chromic Acid Titration Method. *Soil Science*, 37(1), 29-38.
- Wu, B., Peng, H., Sheng, M., Luo, H., Wang, X., Zhang, R., Xu, F. and Xu, H. (2021). Evaluation of Phytoremediation Potential of Native Dominant Plants and Spatial Distribution of Heavy Metals in Abandoned Mining Area in Southwest China. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 220(112368), 1-10.

Xiong, Z. T. and Wang, H. (2005). Copper Toxicity and Bioaccumulation in Chinese Cabbage (*Brassica pekinensis* Rupr.). *Environmental Toxicology: An International Journal*, 20(2), 188-194.



ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Adı Soyadı: Büşra CABA

Eğitim Derecesi	Okul/Program	Mezuniyet Yılı
Lisans	Gazi Üniversitesi Fen Bilgisi Öğretmenliği	2018
Yüksek Lisans	Amasya Üniversitesi Fen Bilgisi Eğitimi	2021

Bilimsel Faaliyetler

Caba, B. ve Çelikleş, V. (2025, 19-20 Mayıs). *Maden Sahaları Atıklarında Fitoremediasyon Yöntemlerinin Kullanılabilirliği*, 13. 19 Mayıs Yenilikçi Bilimsel Yaklaşımlar Kongresi, Samsun.