

**T.C.
ERCIYES ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
TOPRAK BİLİMİ VE BİTKİ BESLEME ANABİLİM DALI**

**TOPRAKTA AĞIR METAL GİDERİMİNE YÖNELİK
FARKLI BİYOREMEDİASYON YÖNTEMLERİNİN
KULLANILMASI**

**Hazırlayan
Fatma Nur KILIÇ**

**Danışman
Prof. Dr. Osman SÖNMEZ**

Yüksek Lisans Tezi

**Ağustos 2023
KAYSERİ**

**T.C.
ERCIYES ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
TOPRAK BİLİMİ VE BİTKİ BESLEME ANABİLİM DALI**

**TOPRAKTA AĞIR METAL GİDERİMİNE YÖNELİK
FARKLI BİYOREMEDİASYON YÖNTEMLERİNİN
KULLANILMASI
(Yüksek Lisans Tezi)**

**Hazırlayan
Fatma Nur KILIÇ**

**Danışman
Prof. Dr. Osman SÖNMEZ**

**Bu çalışma, Erciyes Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi
tarafından FYL-2022-12210 kodlu proje ile desteklenmiştir.**

**Ağustos 2023
KAYSERİ**

BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK

Bu çalışmadaki tüm bilgilerin, akademik ve etik kurallara uygun bir şekilde elde edildiğini beyan ederim. Aynı zamanda bu kural ve davranışların gerektirdiği gibi, bu çalışmanın özünde olmayan tüm materyal ve sonuçları tam olarak aktardığımı ve referans gösterdiğimi belirtirim.

Fatma Nur KILIÇ

İmza

“Toprakta Ağır Metal Giderimine Yönelik Farklı Biyoremediasyon Yöntemlerinin Kullanılması” adlı Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi Lisansüstü Tez Önerisi ve Tez Yazma Yönergesi’ ne uygun olarak hazırlanmıştır.

Hazırlayan

Fatma Nur KILIÇ

İmza

Danışman

Prof. Dr. Osman SÖNMEZ

İmza

Toprak Bilimi ve Bitki Besleme ABD Başkanı

Prof. Dr. Osman SÖNMEZ

İmza

TEŞEKKÜR

Çalışmalarım süresince her türlü manevi desteklerini esirgemeyen sevgili babam Şemseddin KILIÇ'a, sevgili annem Gülşen KILIÇ'a ve değerli aileme, Saygı değer danışmanım Prof. Dr. Osman SÖNMEZ'e, saygı değer hocalarımdan bana laboratuvar desteğini ve imkanlarını esirgemeyen Doç. Dr. Abdullah ULAŞ'a ve Bitki Beslenme Fizyolojisi laboratuvarı ekibine, bilgi birikimleriyle destek olan Doç. Dr. Adem GÜNEŞ, Doç. Dr. Sevcan AYDIN, Dr. Öğr. Üyesi Oğuzhan UZUN, Doç. Dr. Firdes ULAŞ ve Dr. Öğr. Üyesi Somayyeh Razzaghi'ye, analizler sırasında her daim destek olan Ziraat Yüksek Mühendisi Sultan GÜNEŞ'e, Ziraat Yüksek Mühendisi Oğuz EROL'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Tohum teminatına destek sağlayan Ege Tarımsal Araştırma Enstitüsüne, Ulusoy tohumculuğa ve Genta Tarım'a teşekkür ederim. Çalışmalarım boyunca bana yardımcı olan değerli öğrencilerimizden Yusuf Cem YÜCEL, Nuri KANDIRMAZ, Tarık ALTUN, Mustafa TUNCER, Mehmet Alperen YILDIZ, Zehra ÖZŞAHİN, Fevzi Can GÜNDÜZ, Melih Eren POSTALLI'ya sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Erciyes Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimine FYL-2022-12210 kodlu proje ile desteklerinden dolayı teşekkürlerimi sunarım.

Fatma Nur KILIÇ

Ağustos 2023, KAYSERİ

TOPRAKTA AĞIR METAL GİDERİMİNE YÖNELİK FARKLI BİYOREMEDİASYON YÖNTEMLERİNİN KULLANILMASI

Fatma Nur KILIÇ

Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü
Yüksek Lisans Tezi, Ağustos 2023
Danışman: Prof. Dr. Osman SÖNMEZ

ÖZET

Endüstri, madencilik ve yoğun tarımsal uygulamalar gibi çeşitli yollarla ağır metallerin toprakta birikimi son zamanlarda artmaktadır. Ağır metal kirliliği ile mücadelede farklı ıslah teknikleri kullanılmaktadır. Bu çalışmada, Cd, Pb ve Zn ile kirlenmiş toprakta farklı biyoremediasyon teknikleri kullanılması ve potansiyellerini belirlemek amaçlanmıştır. Deneme *Festuca arundinacea* bitkisinin 3 çeşidi (Nilüfer, Grande II, Jaguar 4G) x 4 farklı mikroalg dozu (0,1.5,3,6 mg kg⁻¹) x 3 tekerrür Tesadüf Blokları Deneme Desenine uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Denemede genel toprak analizlerinin yanı sıra bitki agro-morfolojik özellikleri ve fitoremediasyon parametreleri incelenmiştir. Cd, Pb ve Zn için RV değerlendirildiğinde, Grande II çeşidi en etkili çeşit, en etkili uygulama ise 1.5 g mikroalg dozu olarak belirlenmiştir. BAF Cd, Pb ve Zn oranları çeşitlere göre karşılaştırıldığında Grande II > Nilüfer > Jaguar 4G sırasında belirlenmiş, mikroalg uygulamalarının kontrol gruplarına göre BAF oranını arttırıcı etkisinin olduğu belirlenmiştir. Çalışmada genellikle BAF'ın 1'den büyük TF'nin 1'den küçük olması kullanılan çeşitlerin fitostabilizatör özellikte olduğunu göstermektedir. Mikroalg ilavesi ile kontrol gruplarına göre pH istatistiksel olarak önemli düzeyde düşüş göstermiş, pH düşüşüyle birlikte ortamda ağır metal konsantrasyonunun da arttığı ve bitki agro-morfolojik özelliklerini olumsuz etkilediği düşünülmektedir. Yapılan çalışma sonucunda biyokütlesinin fazla olması, ağır metal stresinden etkilenmemesi ve RV'sinin yüksekliğinden dolayı Grande II çeşidinin, biyokütleyi en iyi teşvik edici doz olmasından dolayı 1.5 g mikroalg dozuyla uygulanması önerilmektedir.

Anahtar Kelimeler: Biyoremediasyon, Fitoremediasyon, Ağır metal, *Festuca arundinacea*, *Haematococcus pluvialis*

USING DIFFERENT BIOREMEDIATION METHODS FOR HEAVY METAL REMOVAL IN SOIL

Fatma Nur KILIÇ

Erciyes University, Graduate School of Natural and Applied Sciences

Master Thesis, August 2023

Supervisor: Prof. Dr. Osman SÖNMEZ

ABSTRACT

The accumulation of heavy metals in the soil has been increasing in recent times through various means such as industry, mining and intensive agricultural practices. Different breeding techniques are used to combat heavy metal pollution. In this study, it was aimed to use different bioremediation techniques and to determine their potential in soil contaminated with Cd, Pb and Zn. The experiment was carried out in accordance with the 3 types of *Festuca arundinacea* plant (Nilüfer, Grande II, Jaguar 4G) x 4 different microalgae doses (0,1.5,3.6 mg kg⁻¹) x 3 replications Random Blocks Trial Design. In the experiment, in addition to general soil analysis, plant agro-morphological characteristics and phytoremediation parameters were examined. When RV was evaluated for Cd, Pb and Zn, Grande II variety was determined as the most effective variety and the most effective application was determined as 1.5 g microalgae dose. When BAF Cd, Pb and Zn ratios were compared according to varieties, it was determined during Grande II > Nilüfer > Jaguar 4G, and it was determined that microalgae applications had an increasing effect on BAF ratio compared to control groups. In the study, the fact that BAF is greater than 1 and TF is less than 1 indicates that the cultivars used have phytostabilizer properties. With the addition of microalgae, the pH showed a statistically significant decrease compared to the control groups. As a result of the study, it is recommended that the Grande II variety be applied with a dose of 1.5 g microalgae, since it has a high biomass, is not affected by heavy metal stress and has a high RV.

Keywords: Bioremediation, Phytoremediation, Heavy metal, *Festuca arundinacea*, *Haematococcus pluvialis*

İÇİNDEKİLER

TOPRAKTA AĞIR METAL GİDERİMİNE YÖNELİK FARKLI BİYOREMEDİASYON YÖNTEMLERİNİN KULLANILMASI

BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK	ii
YÖNERGEYE UYGUNLUK.....	iii
KABUL VE ONAY	iv
TEŞEKKÜR.....	v
ÖZET.....	vi
ABSTRACT.....	vii
İÇİNDEKİLER	viii
KISALTMALAR	xii
TABLolar LİSTESİ.....	xiii
ŞEKİLLER LİSTESİ	xix

1. BÖLÜM

1. Giriş	1
1.1. Ağır Metaller	3
1.2. Ağır Metallerin Çevresel Unsurlara Etkisi.....	3
1.3. Ağır Metallerin Bitki Gelişimine Etkisi	4
1.4. Ağır Metal Giderimi	7
1.5. <i>Festuca arundinacea</i> Bitkisinin Genel Özellikleri	9

2. BÖLÜM

LİTERATÜR ÇALIŞMASI

2.1. Toprakta Ağır Metal Kirliliği Gideriminde Kamışsı Yumak (<i>Festuca arundinacea</i>) Çeşitlerinin Kullanılması Konusunda Yapılan Önceki Çalışmalar ..	11
2.2. Ağır Metal Gideriminde Farklı Mikroalglerin Kullanılması Hakkında Yapılan Önceki Çalışmalar.....	14

3. BÖLÜM

MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Materyal.....	19
3.1.1. Bitki materyali.....	19
3.1.1.1. <i>Festuca arundinacea</i> türünün Jaguar 4G çeşidi genel özellikleri	19
3.1.1.2. <i>Festuca arundinacea</i> türünün Grande II çeşidi genel özellikleri	20
3.1.1.3. <i>Festuca arundinacea</i> türünün Nilüfer çeşidi genel özellikleri	20

3.1.2. Alg materyali	21
3.1.2.1. <i>Haematococcus pluvialis</i> Mikroalginin Genel Özellikleri.....	22
3.1.3. Toprak materyali	23
3.2. Yöntem	24
3.2.1. Denemede Kullanılacak Toprak Hazırlığı ve Saksı Denemesinin Kurulması	24
3.2.2. Saksı Deneme Toprağı ve Bitki Örneklerinde Yapılacak Bazı Fiziksel ve Kimyasal Analizler.....	28
3.2.2.1. Toprak Tekstürü Analizi.....	28
3.2.2.2 Toprak Reaksiyonu (pH) Analizi.....	29
3.2.2.3 Elektriksel İletkenlik (EC) Tayini (dS m^{-1}).....	29
3.2.2.4. Kireç tayini	29
3.2.2.5. Organik madde miktarı.....	30
3.2.2.6. Deneme Toprağının Yarayışlı Fosfor (YP) Analizi.....	31
3.2.2.7 Deneme Toprağının Toplam Metal Analizi	31
3.2.2.8. Bitki Tarafından Alınabilir Mikro Element Ve Ağır Metallerin Tayini	32
3.2.2.9. Bitki Örneklerinin Analize Hazırlanması.....	33
3.2.2.10. Toprak Üstü Aksamı ve Kök Yaş, Kuru Ağırlığının Ölçülmesi	34
3.2.2.11. Bitki Boyu ve Kök Derinliğinin Ölçülmesi	36
3.2.2.12. Bitki Klorofil ve Karoteneid Analizi	36
3.2.2.13. Bitki Örneklerinde Ağır Metal Analizi	38
3.2.2.14. Bitki Fitoekstraksiyon Kapasitelerinin ve Büyümelerinin Değerlendirilmesi	39
3.2.2.15. Toprakta Ağır Metallerin % Biyogiderim Potansiyellerinin Hesaplanması.....	40

4. BÖLÜM

BULGULAR

4.1. Deneme Topraklarının Hasat Öncesi ve Sonrası Bazı Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri.....	42
4.1.1. Farklı Biyoremediasyon Uygulamalarının Toprak pH ve EC'si Üzerine Etkisi	43

4.1.1.1. Farklı Biyoremediasyon Uygulamalarının Toprak pH Üzerine Etkisi	43
4.1.1.2. Farklı Biyoremediasyon Uygulamalarının Toprak EC'si Üzerine Etkisi	45
4.1.2. Farklı Biyoremediasyon Uygulamalarının Toprak Kireci (%CaCO ₃) Üzerine Etkisi	46
4.1.4. Farklı Biyoremediasyon Uygulamalarının Toprakta Yarayışlı Fosfor Üzerine Etkisi	49
4.1.5. Farklı Biyoremediasyon Uygulamalarının Toplam Metal Konsantrasyonu Üzerine Etkisi	51
4.1.5.1. Farklı Biyoremediasyon Uygulamalarının Hasat Sonrası Toplam Cd Konsantrasyonu Üzerine Etkisi.....	51
4.1.5.2. Farklı Biyoremediasyon Uygulamalarının Toplam Pb Konsantrasyonu Üzerine Etkisi	52
4.1.5.3. Farklı Biyoremediasyon Uygulamalarının Toplam Zn Konsantrasyonu Üzerine Etkisi	54
4.1.6. Farklı Biyoremediasyon Uygulamalarının Yarayışlı Metal Konsantrasyonu Üzerine Etkisi	56
4.1.6.1. Deneme Toprağının Hasat Öncesi ve Sonrası Yarayışlı Metal Konsantrasyonları	56
4.1.6.1.2. Deneme Toprağının Hasat Sonrası Yarayışlı Cd Konsantrasyonu Üzerine Etkisi	56
4.1.6.1.3. Deneme Toprağının Hasat Sonrası Yarayışlı Pb Konsantrasyonu Üzerine Etkisi	58
4.1.6.1.4. Deneme Toprağının Hasat Sonrası Yarayışlı Zn Konsantrasyonu Üzerine Etkisi	59
4.2. <i>Festuca Arundinecea</i> Yetiştiriciliği ve Farklı Dozlarda Mikroalg Uygulamaları Sonucunda Elde Edilen Bazı Agro-Morfolojik Özellikler	61
4.2.1. <i>Festuca Arundinecea</i> Yetiştiriciliği ve Farklı Dozlarda Mikroalg Uygulamalarının 1. Ay Toprak Üstü Aksamı Yaş ve Kuru Ağırlığı Üzerine Etkisi	61

4.2.3. <i>Festuca Arundineacea</i> Yetiştiriciliği ve Farklı Dozlarda Mikroalg Uygulamalarının 3. Ay Toprak Üstü Aksamı Yaş ve Kuru Ağırlığı, Kök Yaş ve Kuru Ağırlığı Üzerine Etkisi	65
4.2.4. <i>Festuca Arundineacea</i> Yetiştiriciliği ve Farklı Dozlarda Mikroalg Uygulamalarının Bitki ve Kök Uzunlukları Üzerine Etkisi.....	69
4.2.6. <i>Festuca Arundineacea</i> Yetiştiriciliği ve Farklı Dozlarda Mikroalg Uygulamalarının Kök Gövde Kuru Madde Oranı ve Kök Gövde Uzunluğu Oranı Üzerine Etkisi	78
4.2.7. <i>Festuca Arundineacea</i> Yetiştiriciliği ve Farklı Dozlarda Mikroalg Uygulamalarının Klorofil a, Klorofil b, Klorofil a+b ve Karotenoid Düzeyi Üzerine Etkisi	80
4.2.8. Hasat Sonrası <i>Festuca</i> Çeşitlerinin Toprak Üstü Aksam ve Kök Ağır Metal Konsantrasyonları ve İçerikleri.....	85
4.3. <i>Festuca arundineacea</i> çeşitlerinin Biyoremediasyon Potansiyellerinin Belirlenmesi	100
4.3.1 <i>Festuca Arundineacea</i> Çeşitlerinin Biyoakümülyasyon Potansiyellerinin Belirlenmesi	100
4.3.2 <i>Festuca Arundineacea</i> Çeşitlerinin Translokasyon Faktörünün Belirlenmesi	104
4.3.3. Farklı Biyoremediasyon Tekniklerini %Biyogiderim Potansiyellerinin Belirlenmesi	108
4.3.4. Farklı Biyoremediasyon Tekniklerini Remediasyon Verimini (RV) Üzerine Etkisinin Belirlenmesi.....	113

5. BÖLÜM

SONUÇ ve ÖNERİLER

KAYNAKÇA	122
ÖZGEÇMİŞ.....	139

KISALTMALAR

Al	: Alüminyum
Cd	: Kadmiyum
Cr	: Krom
Cu	: Bakır
Fe	: Demir
Hg	: Cıva
Mn	: Mangan
Ni	: Nikel
Pb	: Kurşun
Zn	: Çinko
Co	: Kobalt
BAF	: Biyoakümülyasyon Faktörü
TF	: Translokasyon Faktörü
EC	: Elektriksel İletkenlik
KDK	: Katyon Değişim Kapasitesi
g	: Gram
Kg	: Kilogram
BAF	: Biyoakümülyasyon Faktörü
TF	: Translokasyon Faktörü
RV	: Remediasyon Verimi

TABLOLAR LİSTESİ

Tablo 1.1. Toprakta ağır metallerin izin verilen limit değerleri (pH>6).....	4
Tablo 1.2. Bitkide ağır metal izin verilebilir limit değerleri	6
Tablo 3.1. Saksı denemesinin şansa bağlı bloklar desen dağılımı	27
Tablo 4.1. Denemede kullanılan toprak örneklerinin bazı fiziksel ve kimyasal özelliklerinin değerlendirilmesi, standart sapmaları (n=3)	42
Tablo 4.2. Denemede kullanılan başlangıç toprağının toplam Cd, Pb ve Zn içerikleri, normal değerleri, toprakta kritik değerleri ve Toprak Kirliliği Kontrol Yönetmeliğine göre sınır değerleri (Toprak Kirliliğinin Kontrolü ve Noktasal Kaynaklı Kirlenmiş Sahalara Dair Yönetmelik, 2010)	43
Tablo 4.3. Deneme toprağında çeşit ve uygulamalar arasındaki pH değişimlerine ait varyans analiz tablosu	44
Tablo 4.4. Deneme toprağında farklı biyoremediasyon uygulamalarının pH değişimlerine ait ortalama değerler.....	44
Tablo 4. 5. Deneme toprağında çeşit ve uygulamalar arasındaki EC düzeylerine ait varyans analiz tablosu	45
Tablo 4. 6. Deneme toprağında farklı biyoremediasyon uygulamalarının EC değişimlerine ait ortalama değerler (dS m ⁻¹)	46
Tablo 4. 7. Deneme toprağında çeşit ve uygulamalar arasındaki %CaCO ₃ düzeylerine ait varyans analiz tablosu	47
Tablo 4. 8. Deneme toprağında farklı biyoremediasyon uygulamalarının %CaCO ₃ değişimlerine ait ortalama değerler.....	47
Tablo 4. 9. Deneme toprağında çeşit ve uygulamalar arasındaki % Organik madde düzeylerine ait varyans analiz tablosu	48
Tablo 4. 10. Deneme toprağında farklı biyoremediasyon uygulamalarının % Organik madde değişimlerine ait ortalama değerler	48
Tablo 4. 11. Deneme toprağında çeşit ve uygulamalar arasındaki P düzeylerine ait varyans analiz tablosu	49
Tablo 4. 12. Deneme toprağında farklı biyoremediasyon uygulamalarının P değişimlerine ait ortalama değerler.....	50

Tablo 4. 13. Deneme toprağında çeşit ve uygulamalar arasındaki Toplam Cd konsantrasyonlarına ait varyans analiz tablosu.....	51
Tablo 4. 14. Deneme toprağında farklı biyoremediasyon uygulamalarının toplam Cd konsantrasyonlarına ait ortalama değerler	52
Tablo 4. 15. Deneme toprağında çeşit ve uygulamalar arasındaki toplam Pb konsantrasyonlarına ait varyans analiz tablosu.....	53
Tablo 4. 16. Deneme toprağında farklı biyoremediasyon uygulamalarının toplam Pb konsantrasyonlarına ait ortalama değerler	53
Tablo 4. 17. Deneme toprağında çeşit ve uygulamalar arasındaki hasat sonrası toprak toplam Zn konsantrasyonlarına ait varyans analiz tablosu	54
Tablo 4. 18. Deneme toprağında farklı biyoremediasyon uygulamalarının Zn konsantrasyonlarına ait ortalama değerler	55
Tablo 4. 19. Deneme Toprağının Hasat Öncesi Yarayırlı Metal Konsantrasyonları ve standart sapmaları (n=3)	56
Tablo 4. 20. Deneme toprağında çeşit ve uygulamalar arasındaki toprakta yarayırlı Cd konsantrasyonlarına ait varyans analiz tablosu	57
Tablo 4. 21. Deneme toprağında farklı biyoremediasyon uygulamalarının toprakta yarayırlı Cd konsantrasyonlarına ait ortalama değerler.....	57
Tablo 4. 22. Deneme toprağında çeşit ve uygulamalar arasındaki toprakta yarayırlı Pb konsantrasyonlarına ait varyans analiz tablosu	58
Tablo 4. 23. Deneme toprağında farklı biyoremediasyon uygulamalarının toprakta yarayırlı Pb konsantrasyonlarına ait ortalama değerler	59
Tablo 4. 24. Deneme toprağında çeşit ve uygulamalar arasındaki toprak yarayırlı Zn konsantrasyonlarına ait varyans analiz tablosu.....	60
Tablo 4. 25. Deneme toprağında farklı biyoremediasyon toprak yarayırlı Zn konsantrasyonlarına ait ortalama değerler	60
Tablo 4. 26. Deneme toprağında çeşit ve uygulamalar arasındaki 1.ay yaş ve kuru ağırlıklarına ait varyans analiz tablosu	62
Tablo 4. 27. Deneme toprağında farklı biyoremediasyon uygulamalarının 1. ay yaş ağırlık değişimlerine ait ortalama değerler	62
Tablo 4. 28. Deneme toprağında farklı biyoremediasyon uygulamalarının 1.ay kuru ağırlık değişimlerine ait ortalama değerler	63

Tablo 4. 29. Deneme toprağında çeşit ve uygulamalar arasındaki 2. ay yaş ve kuru ağırlıklarına ait varyans analiz tablosu	63
Tablo 4. 30. Deneme toprağında farklı biyoremediasyon uygulamalarının 2. ay yaş ağırlık değişimlerine ait ortalama değerler	64
Tablo 4. 31. Deneme toprağında farklı biyoremediasyon uygulamalarının 2. ay kuru ağırlık değişimlerine ait ortalama değerler	64
Tablo 4. 32. Deneme toprağında çeşit ve uygulamalar arasındaki 3. ay yaş ve kuru ağırlıklarına ait varyans analiz tablosu	65
Tablo 4. 33. Deneme toprağında farklı biyoremediasyon uygulamalarının 3. ay yaş ağırlık değişimlerine ait ortalama değerler	65
Tablo 4. 34. Deneme toprağında farklı biyoremediasyon uygulamalarının 3. ay kuru ağırlık değişimlerine ait ortalama değerler	66
Tablo 4. 35. Deneme toprağında çeşit ve uygulamalar arasındaki kök yaş ve kuru ağırlığı düzeylerine ait varyans analiz tablosu.....	67
Tablo 4. 36. deneme toprağında farklı biyoremediasyon uygulamalarının kök yaş ağırlığı değişimlerine ait ortalama değerler	68
Tablo 4. 37. Deneme toprağında farklı biyoremediasyon uygulamalarının kök kuru ağırlık değişimlerine ait ortalama değerler	68
Tablo 4. 38. Deneme toprağında çeşit ve uygulamalar arasındaki 1., 2. ve 3. ay bitki uzunluklarına ait varyans analiz tablosu	70
Tablo 4. 39. Deneme toprağında farklı biyoremediasyon uygulamalarının 1. ay bitki uzunluğu değişimlerine ait ortalama değerler.....	71
Tablo 4. 40. Deneme toprağında farklı biyoremediasyon uygulamalarının 2. ay bitki boy uzunluğu değişimlerine ait ortalama değerler.....	71
Tablo 4. 41. Deneme toprağında farklı biyoremediasyon uygulamalarının 3. ay bitki boy uzunluğu değişimlerine ait ortalama değerler.....	72
Tablo 4. 42. Deneme toprağında çeşit ve uygulamalar arasındaki kök uzunluk düzeylerine ait varyans analiz tablosu	73
Tablo 4. 43. Deneme toprağında farklı biyoremediasyon uygulamalarının kök uzunluk değişimlerine ait ortalama değerler.....	74
Tablo 4. 44. Deneme toprağında çeşit ve uygulamalar arasındaki 1., 2. ve 3. ay ortalama kardeşlenme sayısına ait varyans analiz tablosu.....	76

Tablo 4. 45. Deneme toprağında farklı biyoremediasyon uygulamalarının 2. ay ortalama kardeşlenme sayısı değişimlerine ait ortalama değerler	77
Tablo 4. 46. Deneme toprağında farklı biyoremediasyon uygulamalarının 3. ortalama kardeşlenme sayısı değişimlerine ait ortalama değerler	77
Tablo 4. 47. Deneme toprağında çeşit ve uygulamalar arasındaki kök gövde kuru madde oranı ve kök gövde uzunluğu oranına ait varyans analiz tablosu...	78
Tablo 4. 48. Deneme toprağında farklı biyoremediasyon uygulamalarının kök gövde kuru maddesi oranı değişimleri ve kök gövde uzunluk oranlarına ait ortalama değerler	79
Tablo 4. 49. Deneme toprağında çeşit ve uygulamalar arasındaki Klorofil a, Klorofil b, Klorofil a+b ve Karotenoid düzeyi düzeylerine ait varyans analiz tablosu	82
Tablo 4. 50. Deneme toprağında farklı biyoremediasyon uygulamalarının Klorofil a değişimlerine ait ortalama değerler.....	83
Tablo 4. 51. Deneme toprağında farklı biyoremediasyon uygulamalarının Klorofil b değişimlerine ait ortalama değerler.....	83
Tablo 4. 52. Deneme toprağında farklı biyoremediasyon uygulamalarının klorofil a+b değişimlerine ait ortalama değerler.....	84
Tablo 4. 53. Deneme toprağında farklı biyoremediasyon uygulamalarının Karotenoid değişimlerine ait ortalama değerler.....	84
Tablo 4. 54. Deneme toprağında çeşit ve uygulamalar arasındaki 1. ay toprak üstü aksamı metal konsantrasyonlarına ait varyans analiz tablosu	87
Tablo 4. 55. Deneme toprağında farklı biyoremediasyon 1. ay bitki metal Cd değişimlerine ait ortalama değerler.....	88
Tablo 4. 56. Deneme toprağında farklı biyoremediasyon uygulamalarının 1. ay bitki metal Pb değişimlerine ait ortalama değerler	88
Tablo 4. 57. Deneme toprağında farklı biyoremediasyon uygulamalarının 1. ay bitki metal Zn değişimlerine ait ortalama değerler	89
Tablo 4. 58. Deneme toprağında çeşit ve uygulamalar arasındaki 2. ay toprak üstü aksamı metal konsantrasyonlarına ait varyans analiz tablosu	90
Tablo 4. 59. Deneme toprağında farklı biyoremediasyon uygulamalarının 2. ay bitki metal Cd değişimlerine ait ortalama değerler	91

Tablo 4. 60. Deneme toprağında farklı biyoremediasyon uygulamalarının 2. ay Pb değişimlerine ait ortalama değerler.....	91
Tablo 4. 61. Deneme toprağında farklı biyoremediasyon 2. ay bitki Zn konsantrasyonlarına ait ortalama değerler	92
Tablo 4. 62. Deneme toprağında çeşit ve uygulamalar arasındaki 3. ay toprak üstü aksamı metal konsantrasyonlarına ait varyans analiz tablosu	93
Tablo 4. 63. Deneme toprağında farklı biyoremediasyon uygulamalarının 3. ay bitki Cd değişimlerine ait ortalama değerler	94
Tablo 4. 64. Deneme toprağında farklı biyoremediasyon uygulamalarının 3. ay bitki Pb konsantrasyonlarına ait ortalama değerler	94
Tablo 4. 65. Deneme toprağında farklı biyoremediasyon uygulamalarının 3. ay bitki Zn değişimlerine ait ortalama değerler	95
Tablo 4. 66. Deneme toprağında çeşit ve uygulamalar arasındaki kök metal konsantrasyonlarına ait varyans analiz tablosu.....	97
Tablo 4. 67. Deneme toprağında farklı biyoremediasyon uygulamalarının kökte Cd konsantrasyonlarına ait ortalama değerler	98
Tablo 4. 68. Deneme toprağında farklı biyoremediasyon uygulamalarının kökte Pb konsantrasyonlarına ait ortalama değerler	98
Tablo 4. 69. Deneme toprağında farklı biyoremediasyon uygulamalarının kökte Zn konsantrasyonlarına ait ortalama değerler	99
Tablo 4. 70. Deneme toprağında çeşit ve uygulamalar BAF Cd, BAF Pb ve BAF Zn düzeylerine ait varyans analiz tablosu	101
Tablo 4. 71. Deneme toprağında farklı biyoremediasyon uygulamalarının BAF Cd değişimlerine ait ortalama değerler.....	102
Tablo 4. 72. Deneme toprağında farklı biyoremediasyon uygulamalarının BAF Pb değişimlerine ait ortalama değerler.....	102
Tablo 4. 73. Deneme toprağında farklı biyoremediasyon uygulamalarının BAF Zn değişimlerine ait ortalama değerler.....	103
Tablo 4. 74. Deneme toprağında çeşit ve uygulamalar TF Cd, TF Pb ve TF Zn düzeylerine ait varyans analiz tablosu	105
Tablo 4. 75. Deneme toprağında farklı biyoremediasyon uygulamalarının TF Cd değişimlerine ait ortalama değerler.....	106

Tablo 4. 76. Deneme toprağında farklı biyoremediasyon uygulamalarının TF Pb değişimlerine ait ortalama değerler.....	106
Tablo 4. 77. Deneme toprağında farklı biyoremediasyon uygulamalarının TF Zn değişimlerine ait ortalama değerler.....	107
Tablo 4. 78. Deneme toprağında çeşit ve uygulamalar arasındaki % Cd, Pb ve Zn biyogiderimine ait varyans analiz tablosu	109
Tablo 4. 79. Deneme toprağında farklı biyoremediasyon uygulamalarının % Cd biyogiderim değişimlerine ait ortalama değerler	110
Tablo 4. 80. Deneme toprağında farklı biyoremediasyon uygulamalarının % Pb biyogiderim değişimlerine ait ortalama değerler	111
Tablo 4. 81. Deneme toprağında farklı biyoremediasyon uygulamalarının % Zn biyogiderim değişimlerine ait ortalama değerler	112
Tablo 4. 82. Deneme toprağında çeşit ve uygulamalar arasındaki RV Cd, RV Pb ve RV Zn düzeylerine ait varyans analiz tablosu	114
Tablo 4. 83. Deneme toprağında farklı biyoremediasyon uygulamalarının RV Cd'ye ait ortalama değerler	115
Tablo 4. 84. Deneme toprağında farklı biyoremediasyon uygulamalarının RV Pb değişimlerine ait ortalama değerler.....	115
Tablo 4. 85. Deneme toprağında farklı biyoremediasyon uygulamalarının RV Zn değişimlerine ait ortalama değerler.....	116

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1.	Ağır Metal Giderim Tekniklerinin Sınıflandırılması.....	7
Şekil 1.2.	Türkiye’de Festuca arundinacea türünün yetiştirme alanları ve dağılımı	10
Şekil 3.1.	Festuca arundinacea türü Jaguar 4G çeşidi.....	20
Şekil 3.2.	Festuca arundinacea türü Grande II çeşidi.....	20
Şekil 3.3.	Festuca arundinacea türünün Nilüfer çeşidi.....	21
Şekil 3.4.	Haematococcus pluvialis’in mikroskop altında görüntüsü.....	22
Şekil 3.5.	Kayseri ilinde toprak numunelerinin alındığı yerler.....	23
Şekil 3.6.	Toprak örneklerinin alındığı yerlerin Google Earth görüntüsü	23
Şekil 3.7.	Denemede kullanılacak toprak materyalinin hazırlık aşamaları ve viyollerdeki Jaguar 4G, Grande II ve Nilüfer çeşitleri	25
Şekil 3.8.	Haematococcus pluvialis mikroalginin tartılması ve uygulanması	26
Şekil 3.9.	Ortam ışıklandırılması, sıcaklığı ölçümü ve saksı denemesi.....	28
Şekil 3.10.	Deneme toprağında tekstür tayini	28
Şekil 3.11.	Deneme topraklarının pH Ölçümü.....	29
Şekil 3.12.	Deneme topraklarında kireç analizi	30
Şekil 3.13.	Deneme toprağında organik madde analizi	30
Şekil 3.14.	Deneme toprağında toplam fosfor analizi.....	31
Şekil 3.15.	Deneme toprağının toplam metal analizi ve ICP-OES’ e hazırlanması.....	32
Şekil 3.16.	Deneme toprağının alınabilir metal analizi.....	33
Şekil 3.17.	Hasat edilen bitki aksamalarının kurulanması için serilmesi	33
Şekil 3.18.	Etüvde kurutulmuş bitki örneklerinin öğütülmesi ve analize hazır hale getirilmesi	34
Şekil 3.19.	Saksı denemesindeki bitki örneklerinin 1. ve 2. ay hasadı	35
Şekil 3.20.	Saksı denemesinin 3. ay hasadı, toprak üstü aksamının ve kök yaş ağırlığının tartılması	35
Şekil 3.21.	Saksı denemesinin bitki boyu ve kök uzunluklarının ölçülmesi.....	36
Şekil 3.22.	Hasat edilen bitki örneklerinin Klorofil a, Klorofil b, Klorofil a+b ve Karoteneid (Kx+c) analizleri	38
Şekil 3.23.	Metal analizi için kurutulan bitki örneklerinin öğütülmesi, mikrodalgada yakılması ve ICP-OES cihazına hazırlanması	39
Şekil 4.1.	Deneme toprağında farklı biyoremediasyon uygulamalarının EC değişimlerine ait ortalama değerler (dS m^{-1})	46
Şekil 4.2.	Deneme toprağında farklı biyoremediasyon uygulamalarının $\%\text{CaCO}_3$ değişimlerine ait ortalama değerler	48

1. BÖLÜM

GİRİŞ

Toprak, yer kürenin belirli bölümünde örtü halinde bulunan, iklim ve canlıların, topografik şartlar ile zamanla ana materyal üzerine birlikte etkileri sonucu meydana gelmiş, karakteristik özellikleri olan açık, dinamik, doğal, üç boyutlu, üç fazlı bir sistemdir. Diğer bir ifadeyle canlılar için yaşam kaynağı olan bir yapı dinamiğidir. Toprak tabakasının meydana gelmesi için yüzyıllar geçmesi gerekmektedir (Breemen ve Buurman, 2002; Drever, 2005). Nüfusun orantısız artışı ile, arz talep ilişkisini sağlamak amacıyla endüstri, sanayi faaliyetleri ve kimyasal içeriği çok yüksek derecede olan yoğun tarımsal faaliyetlerin zaman içerisinde artışı antropojenik kaynaklı toprak kirliliğini tetiklemiştir (Mikhailenko ve ark., 2020). Mevcut kirliliğin sonucunda çevresel sistemde çeşitli bozunmalar oluşmuş ve nüfusu yoğun bölgeler diğer bölgelere göre bu bozunma olaylarının daha çok etkisi altında kalmıştır (Karaca ve Turgay, 2012).

Toprak kirliliği, temel anlamda toprakta olması gereken sınır değerlerin üzerinde bulunan maddelerin toprağın fiziksel, kimyasal, biyolojik yapısını ve toprak kalite parametrelerini olumsuz yönde etkilemesi olarak tanımlanmaktadır (Golui ve ark., 2019; Sönmez ve Kılıç, 2021). Ağır metaller, endüstriyel ve kentsel atıklar, tarımsal faaliyetler ile aşırı gübreleme ve pestisitlerin kullanılması gibi faktörler toprak kirliliğinde son derece etkilidir (Sönmez ve Akça, 2023; Fahad ve Sönmez, 2021).

Metaller hücre içi enzim katalizi, ozmotik basıncın düzenlenmesi ve beslenme gibi çeşitli biyokimyasal faaliyetlerde görev almalarına rağmen konsantrasyonları limit değerlerini aştığında toksisiteye sebep olabilmektedir (Hosono ve diğerleri, 2011). Ağır metallerin canlılar üzerindeki toksik etkileri çoktan aza doğru, $Hg > Cu > Zn > Ni > Pb > Cd > Cr > Sn > Fe > Mn > Al$ şeklindedir (Wang ve ark. 2003; Pueyo ve ark. 2004; Filipiak - Szok ve ark., 2015). Ağır metal birikiminin neden olduğu kirlilik bir ekosistem ortamından

diğer ekosistem ortamına besin zinciri yoluyla kolayca iletilmektedir. Ekosistem zincirinde meydana gelen ağır metal kirliliği, zincir halkasında bulunan her canlı için ciddi derecede olumsuzluklar meydana getirebilmektedir (Vareda ve ark., 2016; Sönmez ve ark., 2016; ur Rahman ve ark., 2021). Bu olumsuzluklar genelde canlılarda genetik bozulmalar ve kanserojenik etkilere sebep olduğu için risk teşkil etmektedir (Almasi ve ark., 2016). Toprak kirliliğinin önüne geçmek, tarımda sürdürülebilirliği sağlamak, canlıların yaşamını tehdit eden parametreleri gidermek veya minimum düzeye indirmek gerekmektedir. Toprak sağlığını korumak ve güvenli gıda teminini sağlamak amacıyla toprakta limit değerin üzerinde olan ağır metallerin giderilmesi ya da hareketliliğinin sınırlandırılması için çeşitli ıslah teknikleri geliştirilmiştir. Ağır metal ıslahı biyolojik, fiziksel ve kimyasal ıslah olmak üzere üç ana yöntem vardır. Bu yöntemler ıslah ortamına göre ex-situ ve in-situ olmak üzere ayrılmaktadır (Hettiarachchi ve ark., 2003; Gomes ve ark., 2013). Kimyasal giderim yöntemler, kirliliğin ortamdan uzaklaştırılması ya da hareketsiz hale getirilmesi için kimyasalların uygulanmasıyla sağlanmaktadır. Kimyasal giderim teknikleri vitrifikasyon, immobilizasyon elektrokinetik gibi çeşitli teknikler içermektedir. Kimyasal giderim tekniklerinin en büyük dezavantajları arasında çevresel olamamaları ve maliyet açısından büyük alanlarda kullanımının zor olması yer almaktadır (Ghori ve ark., 2015). Fiziksel giderim yöntemleri izolasyon, toprak değiştirme, çevreleme gibi çeşitli giderim teknikleri içermektedir. Fiziksel teknikler diğer tekniklere kıyasla kısa vadede yani kalıcı bir şekilde çözüm sağlamamaktadır (Yao ve ark., 2012). Biyoremediasyon teknikleri ise çevre açısından sürdürülebilirliğin sağlanması ve doğa dostu teknolojiler olmasından dolayı toprak kirliliği ıslahında kullanılması için oldukça etkili bir tekniktir. Biyoremediasyon tekniğinin altında özellikle bakteri, mantar, mikroalg uygulamaları ve genelde biyokütlesi yüksek bitkiler veya ağır metale toleranslı bitkiler (fitoremediasyon) ile ıslah çalışmaları yapılmaktadır.

Bu çalışmanın amacı; toprakta ağır metal kirliliği tespit edilen toprak örneklerinde farklı biyoremediasyon teknikleri kullanılarak ağır metal gideriminde etkili olup olmayacağını saptamaktır.

1.1. Ağır Metaller

İletkenlik, işlenebilirlik, ligand özgülüğü ve kation stabilitesi gibi metalik özellikler gösteren elementler ağır metaller olarak tanımlanmaktadır (Raskin ve ark., 1994). İnorganik toprak kirleticilerden birisi olan ağır metaller bağıl yoğunluğu 5 g cm^{-3} ten büyük ve atom ağırlığı 20'den fazla olan elementlerdir. Yaygın olarak Cd, Pb, Co, As ve Hg'nin canlılar üzerinde toksik etkileri yüksek, yararlı etkileri yok ve doğada kalıcılık süreleri çok uzundur, bundan dolayı bitkiler ve hayvanlar için 'ana tehditler' olarak kabul edilmektedirler (Lindsay ve Doxtader, 1981; Chibuike ve Obiora, 2014). Ağır metallerin doğal yollarla çevreye yayılımı; kayaçlardaki silikatlara bağlı durumda, sülfür ve sabit karbonat bileşikleri formunda bulunmasıyla olmaktadır. Silikat minerallerine bağlı ağır metaller toprak metal konsantrasyonunu ifade etmektedir ve diğer bileşik formlarıyla karşılaştırıldığında kirletici nitelik taşımazlar. Bunların haricinde kentleşme, sanayileşme ve yoğun tarımsal uygulamalar sonucunda ağır metallerin insan kaynaklı yani antropojenik faaliyetler ile çevreye yayılımı olmaktadır (He ve ark., 2005; Ramos ve ark., 1994). Toprak parçacıkları, ağır metaller ve pestisitler gibi çeşitli kirleticileri tutmalarından dolayı kirlilik materyallerini adsorblama özellikleri vardır (Riffaldi ve ark., 2006). Topraktaki mevcut metaller bir kimyasal formdan başka bir kimyasal forma aktarılabilmekte ve biyolojik süreçler ile parçalanamamalarından çevre için büyük bir tehdit kaynağı olarak değerlendirilmektedir (Naila ve ark., 2019; Zhang ve ark., 2020; Sun ve ark., 2020).

1.2. Ağır Metallerin Çevresel Unsurlara Etkisi

Çevre; insanların, hayvanların, bitkilerin ve makro/mikro organizmaların görevli olduğu ve yaşadığı ortam olarak adlandırılmaktadır. Çevre dört temel unsurun birbiriyle birbirleriyle olan ilişkileriyle oluşmaktadır. Bunlar; atmosfer, biyosfer, hidrosfer ve litosferdir. Çevresel kirletici temel unsurların herhangi bir kısmında ya da kompleks bir şekilde var olması gereken miktardan daha yüksek şekilde bulunmasıyla meydana gelir (Briffa ve ark., 2020). Çevresel kirleticilerde biri olan ağır metaller hava, su, toprak iletimiyle ve canlıların etkileşimleri farklı ortamlara yayılmaktadır. Ağır metaller; bulaşma olmuş gıdaların yutulması; solunum, kirli suların içilmesi, tarım, konut, ilaç ve endüstriyel alanlarda cilde teması ile canlı organizmalara bulaşabilmektedir (Walker ve ark., 2005; Masindi ve Mueldi, 2018). Toprak özelliklerinin ağır metal

konsantrasyonu değişimi üzerine önemli etkileri bulunmaktadır (Leuther ve ark., 2019; Fahad ve Sönmez, 2021). Toprak ağır metal konsantrasyonuna etkisinde fazla olduğu özelliklerden, toprak pH'ı, artan bir eğilim gösterdikçe metallerin hareketliliği sınırlanmakta ya da azalmaktadır. Toprak pH'ının azalmasıyla ise hidrojen iyonları metaller yerine yüksek bağlarla toprağa bağlamakta bundan dolayı metal hareketliliği artabilmektedir (Singh ve ark., 2016; Sönmez ve Kılıç, 2021). Toprak organik maddesi ilavesinin metal hareketliliği ile ters orantılı olduğu, toprak fiziksel özelliklerinden olan toprak nem içeriği, havalanması ve su tutma kapasitesiyle doğru orantılı olduğu saptanmıştır (Sharma ve Raju, 2013; Kaya ve ark., 2018). Metal kirliliği kirleticiden uzaklaştıkça ve toprak derinliği arttıkça genelde azalmaktadır. Çevre güvenliği açısından toprakta izin verilebilen limit değerlerine dikkat edilmesi gerekmektedir. Ağır metallere toprakta izin verilebilir sınır değerleri Tablo 1.1'de yer almaktadır.

Tablo 1.1. Toprakta ağır metallerin izin verilen limit değerleri (pH>6) (WHO, 2022).

Ağır metaller	Cd	Mn	Ni	Pb	Zn	Hg	Cr	As	Fe	Cu
mg kg ⁻¹	3	80	120	300	1100	5	350	20	50000	450

1.3. Ağır Metallerin Bitki Gelişimine Etkisi

Ağır metallerin bitkiler tarafından hücre içine alınabilmesi için kök salgıları etkisiyle çözünmüş veya toprak çözeltisinde çözünebilir durumda olması gerekmektedir (Blaylock, 2000). Bitki köklerindeki salgılar rizosfer bölgesindeki toprak pH'ını düşürmektedir, böylelikle ağır metallerin çözünebilirliğini arttırmaktadır (Dalvi ve Bhalerao, 2013). Bazı metaller yaşam için esansiyel yani fizyolojik veya biyokimyasal faaliyetler için gerekli iken bazıları esansiyel nitelik taşımaz. Örneğin; çeşitli enzimlerde kofaktör görevi gören Cu, Mn, Co, Zn, Ni ve Fe düşük konsantrasyonlarda canlılar için esansiyelken yüksek konsantrasyonlarda ortamda toksisiteye neden olmaktadır. Esansiyel olmayan metallerden yaygın olanlar Pb, Cd ve Hg canlılar için düşük konsantrasyonlarda bile toksisiteye neden olabilmektedir (Monni ve ark., 2000; Yıldıztekin ve ark.; 2019).

Yüksek metal konsantrasyonunun bitkiler üzerine doğrudan ve dolaylı etkileri bulunmaktadır. Örneğin ağır metallerin doğrudan etkileri arasında sitoplazmik enzimlerin

inhibisyonu, süper oksit radikalleri, hidroksil ve hidrojen peroksit dahil olmak üzere fazla değerlerde reaktif oksijen formları meydana gelmektedir, böylelikle hücre yapısında hasarlara yol açmaktadır (Muthuchelian ve ark., 2001; Jadia ve Fulekar, 2009; El-Saadony ve ark., 2021). Buna ilaveten ağır metaller toksik etkilerinden dolayı toprak canlılarını özellikle de mikroorganizmaları etkileyebilmektedir. Ağır metaller yüksek konsantrasyonlarda mikroorganizmaların yaşamını olumsuz etkilemekte ve bu olumsuzluklar sonucunda toprakta ayrışma-parçalanma süreçlerini olumsuz etkilemelerinden dolayı bitkiler ihtiyaç duydukları elementleri karşılayamaz bu durumda dolaylı yoldan etkilenirler (El-Saadony ve ark., 2021; Jasım ve ark., 2022).

Ağır metallerin bitki gelişimi üzerine etkileri metal çeşidine göre farklılık gösterebilmektedir (Kaya ve ark., 2013). Örneğin; Hg'nin domates (*Lycopersicon esculentum*) bitkisinde çimlenmede azalma, bitki boyunda, çiçek ve meyve olumunda gerileme (Shekar ve ark., 2011), Mn'nin nane (*Mentha spicata*) bitkisinde köklerde birikiminin bitki klorofil a, karotenoid içeriğinde azalma (Asrar ve ark., 2005), Ni'in buğday (*Triticum sp.*) bitkisinde besin elementi alımında gerileme, Pb'in mısır (*Zea mays*) bitkisinde çimlenmede ve biyokütlede azalma ve protein içeriğinde düşüş (Hussain ve ark., 2013), yüksek konsantrasyonlarda Cd'in sarımsak (*Allium sativum*) ve buğday (*Triticum sp.*) bitkisinde tohum çimlenmesinde azalma, sürgün büyümesinde gerileme (Yourtchi ve ark., 2013; Jiang ve ark., 2001) gibi olumsuz sonuçlara yol açmıştır. Bitkide izin verilebilir metal limit değerleri Tablo 1.2'de verilmiştir.

Bazı bitkilerin ağır metallere toleransı düşük bazılarınsı ise yüksektir. Tolerans mekanizması fitoremediasyona için çok önemli bir yer tutmaktadır. Bitkilerin kullanılarak kirleticilerin ortamdan uzaklaştırılması ya da daha az zararsız hale getirilmesi fitoremediasyon diğer bir adıyla yeşil ıslah olarak adlandırılmaktadır. Ağır metal toleransı bitkilerde moleküler ve fizyolojik mekanizmalar aracılığıyla belirlenmektedir (Singh ve ark., 2003). Ağır metal toleransı yüksek bitkiler 3 mekanizma ile bu süreci gerçekleştirmektedir. Bunlar;

- 1) Metal dışlama (Exclusion): Bitki iletim organlarında metal iletiminin kısıtlanmakta ve rizosfer bölgesinde bazı organik asitlerin artması sonucunda organik asitlerin metallere bağlanmasıyla hücre içi metal alımı azalmakta,

sürgünde ise metal konsantrasyonu korunmaktadır (Baker, 1981; Terzi ve Yıldız, 2011; Meena ve ark., 2017).

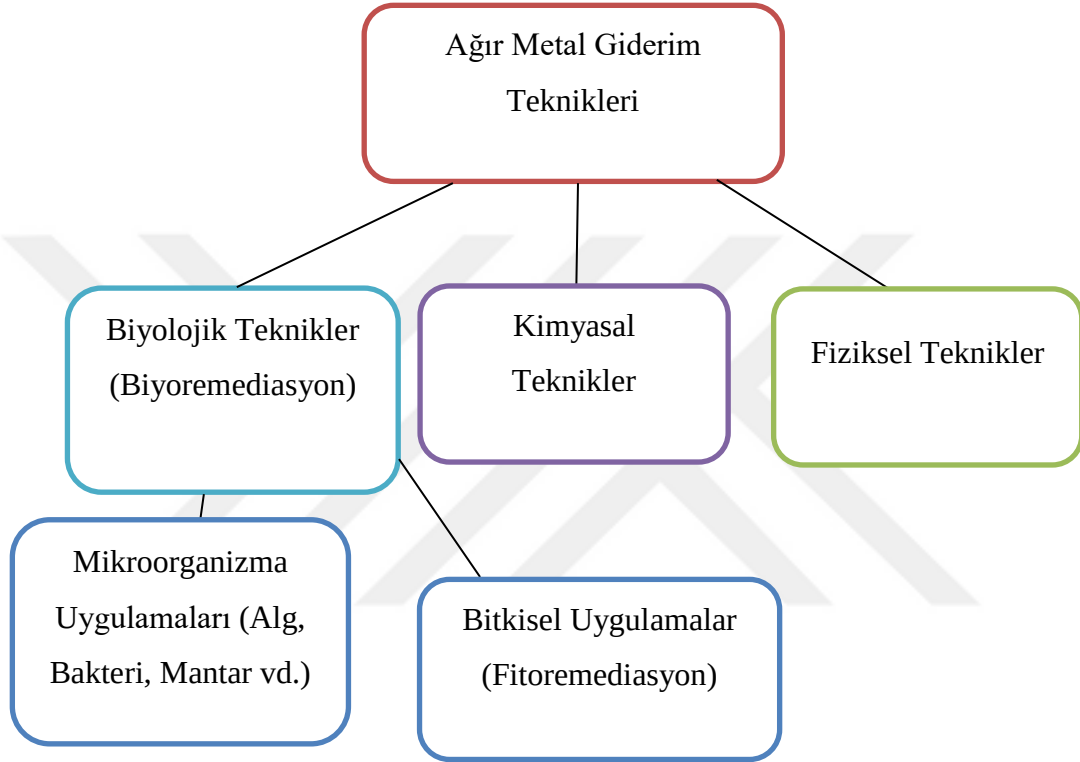
- 2) Metal dahil etme: Toprak çözeltisindeki metalleri doğrudan bitki dokularında biriktirirler ve metal seviyesini doğrudan göstererek indikatör görevi görürler.
- 3) Biyobirikim: Toprak çözeltisindeki metallerin düşük ve yüksek konsantrasyonları bitkilerin kök ve sürgünlerinde birikmektedir. Toprakta mevcut metal seviyesine göre daha fazla dokularına metal biriktiren bitkiler akümülatör, 10-500 kat kadar bünyesine biriktiren bitkiler hiperakümülatör bitkiler olarak tanımlanmaktadır (Clemens, 2006; Sönmez ve Kılıç, 2021). Bitkiler genellikle aldıkları metalleri vakuolde biriktirirler (Baker, 1981; Okcu ve ark., 2009). Bitkinin hiperakümülatör bitki olarak sınıflandırılması için 4 kriter gerekmektedir. Bunlar;
 - Diğer bitkilerle karşılaştırıldığında, 10 – 500 kat daha fazla ağır metali bitki dokularına alması,
 - Toprak üstü aksam, Toprak altı aksam oranının 1’den yüksek olması,
 - Bünyelerinde 1000 mg kg⁻¹’dan fazla kurşun, bakır, krom, nikel ya da 1000 mg kg⁻¹’dan fazla Zn veya 100 mg kg⁻¹’dan fazla Zn metali bulundurması,
 - Toprak üstü aksamın içerdiği ağır metal konsantrasyonunun, toprak toplam ağır metal konsantrasyonuna oranının 1’den yüksek olması gerekmektedir (McGrath ve Zhao, 2003; Yanqun ve ark., 2005).

Tablo 1.2. Bitkide ağır metal izin verilebilir limit değerleri (WHO, 2022).

Ağır metaller	Cd	Mn	Ni	Pb	Zn	Hg	Cr	As	Fe	Cu
mg kg ⁻¹	0.2	500	67	0.3	60	0.03	5	0.1	450	40

1.4. Ağır Metal Giderimi

Ağır metallerce kirliliğin giderilmesi için birçok yöntem geliştirilmiş, bu yöntemler fiziksel, kimyasal ve biyolojik olmak üzere 3 ana tekniğe dayanmaktadır. Giderim tekniklerinin sınıflandırılması Şekil 1’de belirtilmiştir.



Şekil 1.1. Ağır Metal Giderim Tekniklerinin Sınıflandırılması

Fiziksel teknikler toprak üst tabakasını taşıma, kirliliği izole bir şekilde kapatma gibi çeşitli yöntemlerle yapılmaktadır. Fiziksel yöntemler küçük alanlarda avantajlı olabilir ancak büyük alanlarda yüksek iş gücü ve zaman gerektirmekte, bundan dolayı maliyet açısından kirliliğin olduğu büyük alanlarda dezavantajlıdır (Sönmez ve ark., 2008; Ahmed ve ark., 2021). Kimyasal teknikler; vitrifikasyon (sıcaklık uygulaması), kimyasal liç, elektrokinetik ve kimyasal fiksasyon gibi çeşitli yöntemlerle yapılmaktadır. Kimyasal yöntemler küçük ve büyük alanlarda avantajlı olabilir ancak kimyasal yöntemlerle kısmi iyileştirme sağlanmakta ve tam anlamıyla kirliliği ortamdan uzaklaştıramamaktadır. Yoğun enerji kullanımı, maliyet açısından pahalı olması, zehirli çamur oluşumu ve çevre dostu olmaması dezavantajları arasındadır (Sönmez ve Kılıç, 2021; Rajendran ve ark., 2022).

Biyolojik tekniğin esaslı kirlili alanların iyileştirilmesi için mikroorganizmaların (bakteri, mantar, alg), bitkilerin ya da ikisinin birlikte uygulanmasına dayanmaktadır (Chibuike ve ark., 2014). Bakteri, mantar uygulamalarının kirliletiçi giderimi üzerine yapılan çalışmalar sürdürölmekteyken alg uygulamaları son zamanlarda yenilikçi bir teknoloji olarak ortaya çıkmıştır. Bitkiler için ana biyostimulant kaynağı olan alglar, geberellin, oksin ve sitokinin hormonlarına benzer şekilde bitkide görev almaktadırlar (Navarro-López ve ark., 2020). Farklı kaynaklardan gelen ağır metallerin mikroalgler üzerinde zararlı bir etkisi olsa da gelişme enzimleri, detoksifikasyon mekanizmaları ile bu etkileri azaltabilmektedirler (Abinandan ve ark., 2015; Manikandan ve ark., 2021). Mikroalgler ağır metal kirliliğinin giderimi için çevre dostu ve biyokimyasal çeşitliliğe sahip olmasından dolayı ümit verici bir potansiyele sahiptir (Li ve ark., 2020). *Chlorella salina*, *Stichococcus Bacillaris*, *Haematococcus pluvialis* gibi bazı mikroalg çeşitleri ağır metal kirliliğinin gideriminde biyolojik mekanizmalara sahiptir (Dolganyuk ve ark., 2020; Zada ve ark., 2021). Mikroalgler uygulama sonrasında biyoenerji ve biyoyakıt olarak kullanılabilir niteliktedir (Phukan ve ark., 2011; Singh ve ark., 2015; Aydın, 2016). *Haematococcus pluvialis* selüloz ve glikoproteinden oluşan hücre duvarı, hücre bozulmasına karşı dirençli olmasını sağlar (Eroglu ve ark., 2015).

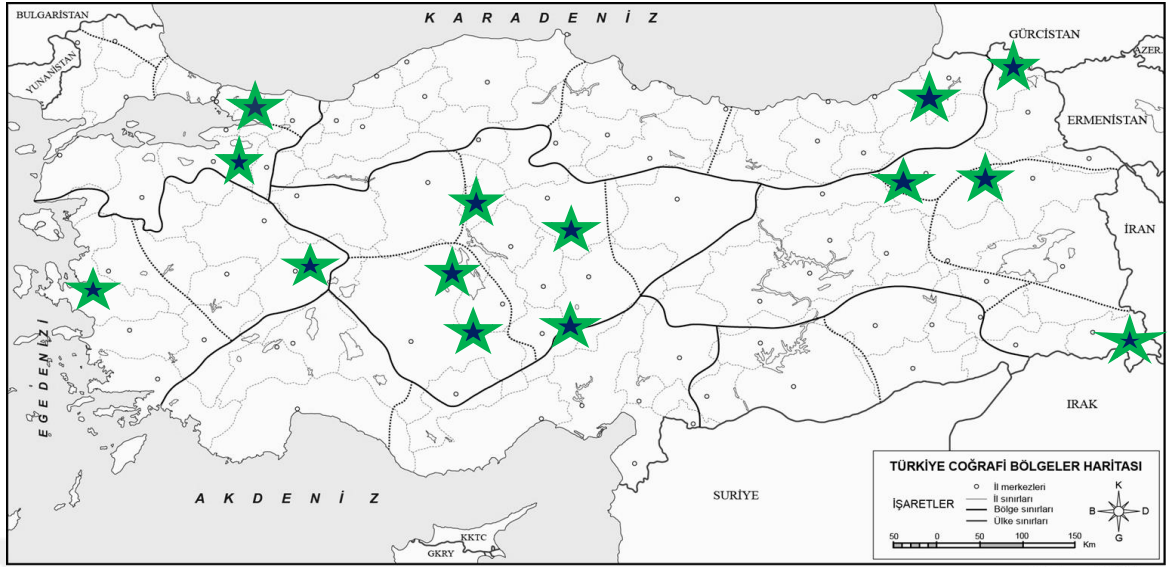
Ağır metal gideriminde bitkisel (fitoremediasyon) amaçlı uygulamalarda hücre dokularına metal alımı yüksek olan ve biyokütlesi fazla olan bitkiler tercih edilmektedir. Metal alım seviyelerine göre akümülatör ve hiper akümülatör bitkiler olarak iki sınıfa ayrılmaktadırlar. Hiper akümülatör bitki çeşitlerinden biri olan *Festuca arundinacea* (kamışsı yumak), kuraklık ve tuzluluk gibi uyarıcı faktörlere karşı dirençli olduğu bildirilmiştir (Nosalewicz ve ark., 2018; Pawłowicz ve ark., 2018). *Festuca arundinacea* arazi ve laboratuvaradaki çalışmalar sonucunda hem inorganik hem de organik kirlileticilerin gideriminde önemli bir yere sahip olduğu saptanmıştır (Li ve ark., 2013; Lu ve ark., 2014). *Festuca arundinacea* dayanıklı, güçlü köklerinden ve fazla biyokütle üretebilmesinden dolayı fitoekstraksiyon kapasitesi yüksek bir bitkidir.

Biyoremediasyon tekniklerinin esaslı, kirliletiçi konsantrasyonunu zararsız forma indirgemek (detoksifiye etmek, zararsız forma dönüştürmek, mineralize etmek, bozundurmak) gibi biyolojik mekanizmalara dayanmaktadır (Azubuike ve ark., 2016). Biyoremediasyon tekniği seçilirken kirliliğin derinliği ve derecesi, kirliletiçi çeşidi, çevrenin konumu, çevre politikaları ve maliyet gibi kriterler dikkate alınmalıdır (Frutos

ve ark., 2012; Smith ve ark., 2015). Biyoremediasyon teknikleri; diğer teknikler ile kıyaslandığı zaman çevre dostu olması, her türlü organik ve inorganik materyale uygulanabilir olması, rüzgâr ve su erozyonunun olumsuz etkilerine karşı koruması, maliyet açısından daha ekonomik olması avantajlarının arasındadır (Khashij ve ark., 2018). Biyoremediasyon tekniklerinin dezavantajları ise; organizmaların ortama adaptasyonu zaman alabilir, yerli olmayan organizmaların kullanılması ekosistemi olumsuz etkileyebilir, pH ve sıcaklık gibi çevre faktörleri, uygun miktarda besin gereksinimi kısıtlayıcı rol oynayabilir (Khashij ve ark., 2018; Sodhi ve ark., 2019; Sodhi ve ark., 2022).

1.5. *Festuca arundinacea* Bitkisinin Genel Özellikleri

Poaceae ailesinden ve *Festuca* cinsinden olan *Festuca arundinacea* genellikle kamışsı yumak olarak adlandırılan bir bitki türüdür. *Festuca arundinacea* türü doğa bilimci Johann Christian Daniel Von Schreber tarafından 1771 yılında tanımlanmıştır. *Festuca arundinacea* derin köklü, çok yıllık, uzun ömürlü, C3 bitkisi ve serin iklim yem bitkisidir. Kısa rizomları bulunmaktadır bu sayede biçim veya hasat sonrası kolaylıkla çim kapağı oluşturmaktadır. Serin, ılıman veya nemli iklim koşullarında yetişmekte, zayıf drenaj koşullarına, kötü toprak koşullarına, hastalık ve zararlılara karşı dayanıklılık sağlamaktadır. Derin kökleri olduğu için sıcaklığa ve kuraklığa karşı toleransı yüksektir (Açıkgöz, 1994; Yönter, 2016). Yem bitkisi olarak kullanılmakta ancak diğer yem bitkilerine göre daha az lezzetli olduğu için hayvanlar daha az tüketmektedir. Aynı zamanda peyzaj ve kirli bölgelerin ıslahında fitoremediasyon bitkisi olarak kullanılmaktadır. Peyzaj bitkisi olarak kullanımında basmaya karşı dayanıklılığı ve çok biçime karşı hızlı çıkış vermesi önem kazandırmaktadır. Fitoremediasyon bitkisi olarak kullanımı olumsuz çevre şartlarına karşı duyarlılığı, kötü toprak özelliklerine karşı yetişmesi, tuz gibi birçok bitki gelişimini olumsuz etkileyebilecek koşullara karşı dirençli olması, aynı zamanda vejetatif aksamının bol ve yayılmacı olması hızlı biçime imkân sağlaması etkili olmuştur. Anavatanı Kuzey Afrika'dır. Türkiye'de genellikle; İstanbul, Bursa, İzmir, Afyonkarahisar, Aksaray, Kayseri, Niğde, Yozgat, Hakkâri, Ankara, Kars, Çorum, Erzincan illerinde doğal yetişme alanları ve dağılımı görülmektedir (Şekil 1.2) (Tübives, 2017; Kale, 2019).



Şekil 1.2. Türkiye’de *Festuca arundinacea* türünün yetiştirme alanları ve dağılımı (Tübives, 2017)

2. BÖLÜM

LİTERATÜR ÇALIŞMASI

2.1. Toprakta Ağır Metal Kirliliği Gideriminde Kamışsı Yumak (*Festuca arundinacea*) Çeşitlerinin Kullanılması Konusunda Yapılan Önceki Çalışmalar

Wasilkowski ve ark. (2019) yaptıkları çalışmada sodyum bentonit ve kompostu tek tek ve *Festuca arundinacea* ile kombine bir şekilde, yüksek seviyede Pb, Zn ve Cd ile kirlenmiş toprağın ıslahının yapılması amacıyla kullanmışlardır. Aynı ayrı toprak katkı maddeleri şeklinde kullanılan hem sodyum bentonit hem de kompost ve bunların *Festuca arundinacea* ile kombinasyonu, toprakta bulunan Pb, Zn ve Cd'yi önemli düzeyde azaltmıştır. Tüm uygulamalar içerisinde, toprak faaliyetlerinin iyileştirilmesinde en iyi sonuçlar, kompost, bentonit ve *Festuca arundinacea*'nin kombine uygulanmasından sonra elde edilmiştir. Çalışma sonucunda kompost ve çim bitkisinin toprak mikrobiyotasını önemli ölçüde etkilediğini bildirmişlerdir.

Espada ve ark. (2022) yaptıkları çalışmada *Festuca arundinacea*'yı Pb ile kirli alanlardan alınan toprağı ıslah etmek ve ıslah sonrası ortaya çıkan atıkları biyoenerji olarak kazandırılması amacıyla gerçekleştirmişlerdir. *Festuca arundinacea*'nın başarılı bir şekilde toprak ağır metal gideriminde kullanılabilirliğine ek olarak geleneksel yöntemlere göre biyoenerji olarak kullanılmasının daha çevre dostu olduğunu bildirmişlerdir.

Steliga ve Kluk (2020) yaptıkları çalışmada *Festuca arundinacea*'yı Pb, Ni, Cd ve petrol hidrokarbonları ile kirlenmiş toprakların kirliliğini azaltmak amacıyla uygulamışlardır. Pb, Ni, Cd ve petrol hidrokarbonları ile kirlenmiş toprakta 6 ay süresince sürdürülen fitoremediasyon sonucunda Pb (%25.4-34.1), Ni (%18.7-23.8), Cd (%26.3-46.7) seviyelerinde önemli azalmalar olduğunu belirtmişlerdir. *Festuca arundinacea*'da traslokasyon faktörü Pb (0.46-0.53), Ni (0.29-0.33) ve Cd (0.21-0.25) oranlarında tespit

edilmiştir. Uygulanan fitoremediasyon tekniğinin toprak ağır metal toksisitesini azalttığını saptamışlardır.

Yavari ve ark. (2021) yaptıkları çalışmada ahşap koruyucu maddelerin içeriğinde bulunan özellikle As, Cr ve Cu ‘nun neden olduğu toprak kirliliğinin giderimi için *Festuca arundinacea* ve *Salix* çeşitlerini kullanmışlardır. İnorganik gübreler arasından nitrojen ve fosfor (NaNO_3 ve NaH_2PO_4) ilavesinin fitoekstraksiyon faaliyeti üzerine etkisini gözlemlemek amacıyla gerçekleştirilmiştir. Gübrelerin eklenmesi, *Festuca arundinacea* ‘nın klorofil içeriğini buna ek olarak, *Salix* ve *Festuca arundinacea* ‘nın kök bölgesi biyokütlesini arttırmıştır. 1:1 N:P gübresi varlığında *Salix* ve *Festuca* ‘nın kök bölgesinde ekstrakte edilen As ve Cu miktarları sırasıyla iki ve dört katına, *Festuca* ‘daki Cu düzeyi iki katına çıkmıştır. Gübrelemenin fitoremediasyon etkinliğini arttırdığını bildirmişlerdir.

Cao ve ark. (2007) yaptıkları çalışmada ağır metal seviyesi yüksek olan topraklarda (özellikle Cu ve Zn) farklı akümülatör bitkiler kullanarak fitoremediasyon kabiliyetlerinin karşılaştırılması amacıyla gerçekleştirilmiştir. Çalışma sonucunda *Helichrysum italicum* ve *Juncus compactus* Zn tolere edememiştir. Bilinen yaygın bir Zn hiperakümülatörü olan *Thalaspi caerulescens* Zn ‘yi bitki dokularında 3.08 mg g^{-1} , *Festuca arundinacea* ise 6.6 mg g^{-1} birikmiştir. Hem *Helichrysum italicum* hem de *Festuca arundinacea* ‘nın Pb bünyelerinde biriktirme kapasitelerinin çok düşük olduğunu, *Mirabilis jalapa* bitkisinin ise büyüme hızının ve Pb biriktirme kapasitesinin yüksek olduğunu gözlemlemişlerdir.

Er ve Elibol (2022) yaptıkları çalışmada farklı tuz konsantrasyonlarında *Festuca arundinacea* ve *Portulaca oleracea* bitkilerinin, tuzlu topraklarda fitoremediasyon potansiyellerini kullanarak iyileştirme kapasiteleri üzerine etkisini belirlemek amacıyla gerçekleştirmişlerdir. Çalışmada dört farklı 0, 75, 150, 200 mM tuz konsantrasyonu uygulanmıştır. Hasat öncesi ve hasat sonrası alınan toprak örneklerinde elektriksel iletkenlik (EC), değişebilir sodyum yüzdesi (ESP) ve katyon değişim kapasitesi (KDK) değerleri araştırılmıştır. Hesaplamalar sonucunda *Festuca arundinacea* ‘nın *Portulaca oleracea* ‘ya göre topraktaki ESP ve EC değerlerini daha fazla azalttığını belirlemişlerdir. Fitoremediasyon tekniğinin tuzlu toprakların ıslahında da kullanılabileceğini ifade etmişlerdir.

Kalkan ve ark. (2019) yaptıkları çalışmada kükürt fabrikasındaki flotasyon atıklarına kirlilik giderimi için farklı kireç düzeyleri % 10-20-30-40 ve ahır gübresi %4-8'inin ilavesi, sonrasında *Festuca arundinacea* çim bitkisinin yetiştiriciliği gerçekleştirmişlerdir. 12 haftalık çalışma periyodundan sonra uygulama alanlarında sadece kireçli toprak uygulamasında *Festuca*'da Mn, Cd, Cr konsantrasyonunda kirecin düşük pH'yı dengelemesi nedeniyle artış sağlamış, ahır gübresi ilaveli olanlarda Zn, Fe, Ni, Co ve Pb konsantrasyonunda ve bitki kuru ağırlığında ahır gübresinin ortamdaki besin elementlerini karşılamasından dolayı artış olduğunu ve kirletilmiş alanlarda ıslah maddeleri ve fitoremediasyon bitkisi olan *Festuca arundinacea*'nın giderimde iyi sonuçlar verdiğini bildirmişlerdir.

Duyuşen ve ark. (2016) yaptıkları çalışmada funda toprağına farklı dozlarda ilave edilen deri arıtma çamurunda *Festuca arundinacea*'nın da bulunduğu çim yetiştiriciliği yapmışlar ve bitkiye iletilen Cu, Zn, Ni ve Cr katsayılarını araştırmışlardır. 1.5 aylık deneme süreci sonunda Ağır metallerin bitkiye iletim katsayıları çoktan aza doğru sırasıyla Zn>Cu>Ni>Cr bulmuşlardır. Ağır metallerin topraktaki kimyasal bağlanma formlarının bitkiye transferlerinde doğrudan etkisi olduğunu ifade etmişlerdir.

Şahin (2007) çalışmasında, farklı seviyelerde 0,0.5,1.5 mmol EDTA kg⁻¹ uygulamasının, kamışsı yumak (*Festuca arundinacea* Schreb.) ve mısır (*Zea Mays L.*) bitkilerini Pb ile kirlenmiş toprakta fitoekstraksiyon kapasitelerini belirlemek amacıyla gerçekleştirmiştir. 7 haftalık süre içerisinde hasattan 1 hafta önce EDTA uygulaması yapılmış ve EDTA çözeltisinin uygulanmasıyla topraktaki Pb konsantrasyonu artış göstermiştir. Toprak konsantrasyonundaki Pb artışının *Zea Mays* ve *Festuca arundinacea*'yı etkilemediği ve fitoekstraksiyon için kapasitelerinin yüksek olduğunu ifade etmiştir.

Küçükhemek ve ark. (2006) yaptıkları çalışmada toprak özellikleri bakımından fakir topraklara evsel atık uygulamaları yapmışlar ve yetiştirilen çim bitkisinin ağır metal giderimine etkisini araştırmışlardır. Arıtma çamuru 0-40-80-120 ton ha⁻¹ düzeylerinde iki yıl arazide uygulanmıştır. Çalışma sonucunda çim bitkisinde konsantrasyonu en fazla bulunan ağır metallerin Pb, Zn ve Cr olduğunu belirlemişlerdir. Çim bitkisinin ağır metal içeren yerlerde kullanılabileceğini ifade etmişlerdir.

2.2. Ağır Metal Gideriminde Farklı Mikroalglerin Kullanılması Hakkında Yapılan Önceki Çalışmalar

Şen (2020) çalışmasında, metal işletme tesisinden aldığı atık suları hacimce % 0-10-20 düzeyinde seyreltmış ve katı kültüre ekimi sağlanan *Chlorella* ESP-6 mikroalginin Fe, Zn, Ca, Mg, Na, Al ve K alımını belirlemek amacıyla gerçekleştirmiştir. Çalışma sonucunda yüksek düzeylerde giderim belirlemiştir. Metal işletmelerinde atık suyun gideriminde mikroalglerin iyi bir potansiyel olduğunu ifade etmiştir.

Maltsev ve ark. (2023) yaptıkları çalışmada bakırın toprak mikroalg türleri üzerindeki etkilerini, ağır metal suyunun uygulanmasının biyoteknolojik üretim potansiyellerini, kirlenmiş toprakta alg çeşitliliği ve biyoremediasyon potansiyellerinin belirlenmesini amaçlamışlardır. Bakır kaynağı olarak CuSO_4 ve $\text{Cu}(\text{CH}_3\text{COO})_2$ kullanılarak farklı başlangıç hücre yoğunlukları *Vischeria magna*, *Botrydiopsis* sp. ve *Tetracystis* sp. (10^3 ve 10^6 hücre mL^{-1}) ile 28 günlük uygulama yapmışlardır. Bakırın toksik etkisinin bakır konsantrasyonuna, uygulanan alg hücrelerinin ilk yoğunluğuna ve bakırın kimyasal kaynağına bağlı olduğunu ifade etmişlerdir. Sonuçlara göre en yüksek dirence sahip alg'i *Tetracystis* sp. bulmuşlardır ve 50 mg l^{-1} ye kadar bakır konsantrasyonuna dayandığını ifade etmişlerdir.

Subramaniyam ve ark. (2016) yaptıkları çalışmada farklı çeşit demir tuzlarının (FeSO_4 , FeCl_3 ve $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3$) toprak mikroalg izolatı olan *Chlorella* sp. MM3, *Chlamydomonas* sp. MM7 ve *Chlorococcum* sp.'ye karşı toksisitesi üzerine etkilerini araştırmışlardır. Çalışma sonucunda ferrik nitratin diğer demir tuzlarına göre daha toksik olduğunu, ardından ferröz sülfat ve ferrik klorürün toksik etki ettiği saptanmıştır. *Chlorella* sp. çalışılan diğer mikroalgelere göre daha dirençli olduğunu bulmuşlardır. Biyoakümülyasyonda zamanla, üç mikroalgin ferrik nitrat ve ferrik klorür gibi ferrik tuzlarının demir tuzuna göre daha hızlı adsorbe ettiğini bulmuşlardır ve alglerin hücre duvarında bulunan O atomunun ve P=O grubu polisakkaritin demir biyoakümülyasyonunda büyük bir rol oynadığını ifade etmişlerdir.

Gümüş ve ark. (2021) yaptıkları çalışmada Konya'da yer alan Altınapa Barajından farklı habitatlardan alg örneklendirilmesi yapmışlar ve ağır metal giderim potansiyelini araştırmışlardır. Alg örnekleri izole edilmiş ve izole edilen saf kültürler arasında ağır metal absorpsiyon kapasitelerinin değişimini çalışmışlardır. Farklı yaşam alanlarından

alınan alglerden, *Chlorochytrium paradoxum*, *Haematococcus lacustris* ve *Scenedesmus circumfusus* türlerini mangan ve bakıra maruz bırakmış, 5., 10., 20., 30., 45., 60., 90 ve 120. dakikalardan sonra alınan örneklerde biyosorpsiyon özellikleri tespit edilmeye çalışmışlardır. Hem mangan hem bakır için *Scenedesmus circumfusus* en iyi absorblama kapasitesine sahip olduğunu tespit etmişlerdir. Araştırma sonucunda ağır metal gideriminde alglerin kullanılabilirliğinin iyi sonuçlar verebileceğini ifade etmişlerdir.

Djearmane ve ark. (2019) yaptıkları çalışmada temizlik ürünlerinde ve kozmetikte yaygın olarak kullanılan ZnO nano parçacıklarının son zamanlarda meydana getirdiği kirliliğin giderilmesini değerlendirmek amacıyla, 96 saat boyunca her 24 saatte bir bir 10–200 $\mu\text{g mL}^{-1}$ 'e artan ZnO nano parçacıkların konsantrasyonlarının doza ve zamana bağlı *Haematococcus pluvialis* mikroalginde hücresel birikimini ve buna karşılık gelen sitotoksik etkilerini araştırmışlardır. Çalışma sonucunda, EM-EDX spektrumu, alg biyokütlesinde ZnO nano parçacıkların birikiminin olduğunu ve ICP OES sonuçları, araştırılan ZnO nano parçacıklarının konsantrasyonları için 24 saatten sonra alg hücrelerinde doza ve zamana bağlı yüksek miktarda Zn birikiminin olduğunu tespit etmişlerdir.

Sanchez (2014) yaptığı çalışmada, atık suda bakır metalinin giderim potansiyelleri araştırmak amacıyla atık suya farklı alg karışımları uygulamıştır. En etkili olan alg karışımı, sırasıyla *Selenastrum Capricornutum*, *Pediastrum Simplex*, *Scenedesmus Spiriluna*, *Haematococcus* olarak tespit edilmiştir. Atık suda bakırın giderimi %50-55 civarında olduğu ver alglerin metal giderimin olumlu yönde etki ettiğini tespit etmiştir.

Das ve ark. (2016) yaptıkları çalışmada endüstriyel atık sulardaki ağır metal kirliliğinin su ve toprak üzerine meydana getirdiği çevre sorunlarının önüne geçmek için *Phormidium* sp. alg türünü Pb^{+2} gideriminde kullanmayı ve biyosorpsiyon potansiyelini tespit etmek için kullanmışlardır. Termodinamik, kinetik ve izoterm çalışmaları sonucunda alg türünün biyosorpsiyon potansiyelinin yüksek olduğunu ve %92.2 Pb gideriminin olduğunu ifade etmişlerdir.

2.3. Mikroalglerin Tarımsal Açidan Kullanımı Hakkında Yapılan Önceki Çalışmalar

Garcia-Gonzalez ve Sommerfeld (2016) çalışmalarında, mikroalglerin, tarımsal ürünlerin geliştirilmesi ve korunması için potansiyel, sürdürülebilir uygulamalar olabileceğini araştırmışlardır. Domates bitkisinde tohum çimlenmesini, bitki büyümesini ve meyve üretimini değerlendirmek için mikroalg *Acutodesmus dimorphus*'un hücresel özleri ve kuru biyokütlesini yapraktan ve biyogübre olarak uygulamışlardır. Çimlenme üzerindeki etkileri belirlemek için *Acutodesmus dimorphus* kültürünü, farklı konsantrasyonlarda (%0, 1, 5, 10, 25, 50, 75 ve 100) tohum primerleri olarak kullanmışlardır. Çalışma sonucunda, biyogübre ve yapraktan uygulamaların kontrol bitkisine göre bitki gelişimini arttırdığını tespit etmişlerdir.

Dineshkumar ve ark. (2020) yaptıkları çalışmada soğan bitkisinde biyogübre olarak mikro algleri kullanmışlar ve mikroalglerin soğan bitkisi üzerine etkilerini araştırmışlardır. Soğan bitkisinin ekiminden önce toprağa 10 g inek gübresi ve iki mikroalg, *Chlorella vulgaris* ve *Spirulina platensis* kullanılmış, ayrı ayrı kg toprak başına 3 g kuru toz dozunda mikroalg ilave edilmiştir. Sera koşullarında gerçekleştirilen deneme sonucunda bitkide büyüme parametreleri, verim özellikleri, biyokimyasal içerikleri ve mineral içeriklerinin *Spirulina platensis* ve inek gübresi karışımli biyogübre uygulamasının diğer uygulamalara kıyasla etkisinin daha fazla olduğunu bulmuşlardır. Bundan dolayı, mikroalgal biyogübrelerin kimyasal gübrelerin yerini alabileceğini ifade etmişlerdir.

Uysal ve ark. (2015) çalışmalarında, kimyasal gübrelerin çevrede meydana getirdiği olumsuz etkilere karşın bu etkiyi azaltmak amacıyla mikroalg biyokütlesini kullanmışlardır. Çalışmada elde edilen mikroalglerden üretilen mikroalg biyogübresi, mikrobiyal gübreler 0, 0.5, 1, 1.5 dozlarında buğday ve mısır bitkilerine uygulanmıştır. Bir aylık çimlendirme üzerine etkisi sonucunda en iyi dozun 1.5 kg litre⁻¹ uygulaması olduğunu ifade etmişlerdir.

Nayak ve ark. (2019) yaptıkları çalışmada yoğun kimyasal gübrelerin kullanımı sonucu ortaya çıkan kirliliğin yerine çevreye dost bir kaynak olan biyogübre olarak yağı alınmış *Scenedesmus* sp. mikroalg biyokütlesinin pirinç bitkisinin tarımında kullanılmasını araştırmışlardır. Ayrı ayrı veya kombine uygulanan ticari kimyasal gübreler, solucan gübresi ile biyogübre kaynağının pirinç bitkisinin büyümesi ve verimi açısından değerlendirmişlerdir. Çalışma sonucunda mikroalg uygulamasının kimyasal gübre ile

kombinasyonunun bitki boyu, kardeş sayısı, biyokütle ve tane verimi açısından en yüksek değeri vermiştir. Hasat aşamasında ise diğer uygulamalara kıyasla maksimum bitki kuru ağırlığına mikroalg+ kimyasal gübre uygulamasıyla ulaşılmıştır. Mikroalg biyokütlesinin iyi bir kaynak ve sürdürülebilir tarımda potansiyel olarak kullanılabileceğini, kimyasal gübrelerin azaltılmasında etkin olabileceğini ifade etmişlerdir.

Kuşvuran (2021) yaptığı çalışmada, *Chlorella vulgaris beijerinck* alg' inin yaprağa %1, %3, %5 (v/v) dozlarında uygulamalarının, %25 oranında su eksikliğine maruz bırakılan brokoli bitkisinde kuraklık stresinin azaltılmasını araştırmıştır. Mikroalg uygulamasının kurak stresini hafiflettiğini, kontrol bitkilerine göre daha çok büyümeyi teşvik ettiğini ifade etmiştir. %5 mikroalg uygulamasının brokoli bitkisinde oksidatif hasarı azalttığını, kuraklık stresinde kullanım potansiyelinin yüksek olduğunu saptamıştır.

Dineshkumar ve ark. (2017) yaptıkları çalışmada mikroalg gübresinin mısırın (*Zea mays* L.) büyümesi ve verimi üzerine etkisini araştırmışlardır. Mısır bitkileri, sera koşullarında 2.5 ay süresince inek gübresi ile iki farklı mikroalgi kg toprak başına 3 g *Chlorella vulgaris* ve *Spirulina platensis* ile uygulanmıştır. *Chlorella vulgaris* ve *Spirulina platensis* uygulaması, tohum çimlenmesini artırmasına ilaveten büyüme performansını arttırmış, verim özelliklerini pozitif yönde etkilediğini ifade etmişlerdir.

Suchithra ve ark. (2022) yaptıkları çalışmada topraktan ve yapraktan *Chlorella vulgaris* mikroalginin uygulamasının domates (*Solanum lycopersicum* L.) bitkisinin yetiştiriciliğinde potansiyel bir biyogübre ve biyostimülan olarak kullanılmasını amaçlamışlardır. Topraktan 1 kg toprak başına 3 g kuru toz mikroalg uygulanmış, yapraktan 10 g alg kuru biyokütlesi, %100 ekstrakt olarak kabul edilerek 100 ml suda çözmüşlerdir. Yaprğa suda seyreltilmiş dört konsantrasyon şeklinde (%25, %50, %75 ve %100) uygulama yapmışlardır. *Chlorella vulgaris* inek gübresi ile karışık muamelesi, tek başına yeşil mikroalge kıyaslandığında verim parametrelerini arttırdığını, topraktan uygulamanın ise yapraktan uygulamaya göre daha iyi sonuç verdiğini ifade etmişlerdir.

Schreiber ve ark. (2018) yaptıkları çalışmada alg biyokütlesi kullanılarak alg hücrelerinin besin maddelerini kökler için uygun forma dönüştürdüğünü ve bitki büyümesini desteklemesiyle toprakta uygun ortam meydana getirmesinden, dolayı *Triticum aestivum* bitkisinin yetiştiriciliğini gerçekleştirmişler ve alg gübresi kullanarak değişimleri karşılaştırmayı amaçlamışlardır. Buğdayın büyümesini 8 hafta boyunca gözlemlemişler

ve hasattan sonra bitkinin N, C ve P içeriklerini ölçmüşlerdir. Besin elementlerince ve özellikle fosfor içeriği düşük materyallerde yetiştirilen buğday bitkisinde alg gübrelemesi sonrasında genel olarak fosfor eksikliği sınırlayıcı bir faktör olmamış bitkinin büyümesini ve gelişimini arttırdığını saptamışlardır. Besin elementlerinin geri kazanımı için alg biyokütlesinin gübre olarak kullanılabileceğini ifade etmişlerdir.



3. BÖLÜM

MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Materyal

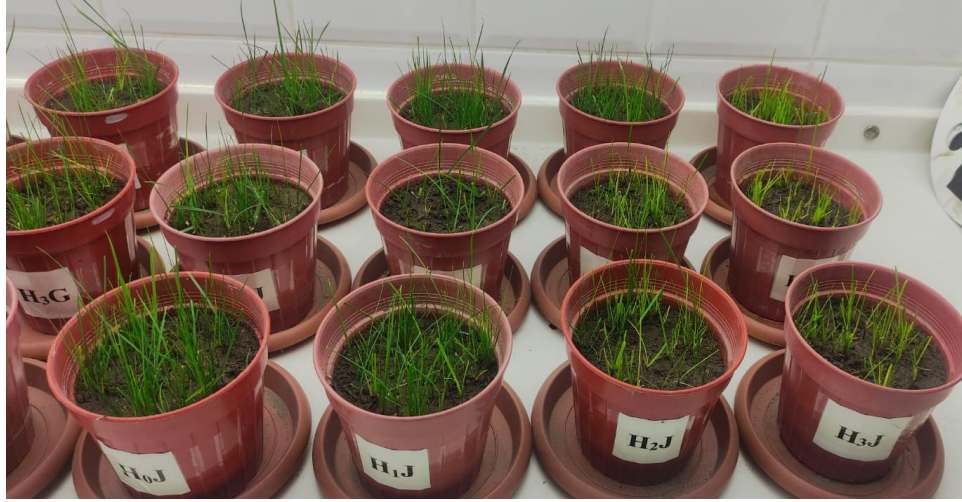
3.1.1. Bitki materyali

Tek yıllık bir bitki türü olan, *Festuca arundinacea*'nın denemede kullanılma nedeni biyokütle için vejetatif aksamının fazla olması ve hızlı gelişim göstermesi, ağır metal hiperakümülatörü arasında yer alması, köklerinin saçak kök olup kök uzunluğunun fazla olması, olumsuz çevresel koşullara karşı dirençli olması, kolay uygulama ve ekonomik olması, çevre açısından yeşil ıslah yani tarımsal sürdürülebilirliği devam ettirebilir olmasından dolayı çalışmada tercih edilmiştir.

Deneme için kullanılması planlanan *Festuca arundinacea* bitki materyalinin Nilüfer çeşidi Ege Tarımsal Araştırma Müdürlüğü Enstitüsünden, Jaguar 4G çeşidi Ulusoy Tohumculuktan, Grande II çeşidi Genta Tarımdan temin edilmiştir.

3.1.1.1. *Festuca arundinacea* türünün Jaguar 4G çeşidi genel özellikleri

Festuca arundinacea türü Jaguar 4G çeşidinin yaprakları koyu yeşil renkte ve ince dokulu bir bitki çeşididir (Şekil 3.1). Sıcaklık değişimlerine, tuzluluğa, kuraklığa ve yıpranmaya karşı dayanıklı bundan dolayı hem sıcaklığa hem de soğuk iklim koşullarına karşı uyum sağlama özelliği ve bitki hastalıklarına karşı direnci yüksektir. Derin köklü olmalarından dolayı, su ihtiyacını daimî bir şekilde karşılamakta ve uzun süreli yeşil görünümünü korumaktadır. Boylanması ise diğer çeşitlere göre daha kısadır (Anonim, 2016; Yöner, 2016).



Şekil 3.1. *Festuca arundinacea* türü Jaguar 4G çeşidi

3.1.1.2. *Festuca arundinacea* türünün Grande II çeşidi genel özellikleri

Festuca arundinacea türü Grande II çeşidi, rizom sayısı fazla, koyu yeşil renkli, bodur yapılı ve ince yapraklı dokusuna sahiptir. Olumsuz çevre koşullarına karşı yüksek dayanım göstermektedir. Biçim sıklığına karşı dayanıklı olup çim kapağı oluşumu hızlıdır. Yüksek rizom sayısına sahiptir. Grande II hastalıklara karşı dayanıklı bir bitki çeşididir (Şekil 3.2).

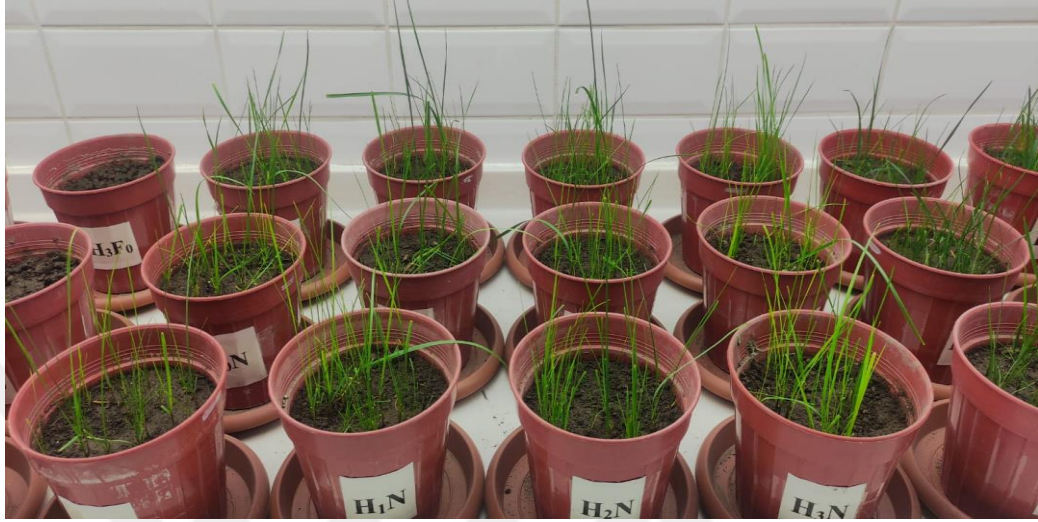


Şekil 3.2. *Festuca arundinacea* türü Grande II çeşidi

3.1.1.3. *Festuca arundinacea* türünün Nilüfer çeşidi genel özellikleri

Festuca arundinacea türünün Nilüfer çeşidi, diğer *Festuca* çeşitlerine göre yaprakları daha kalın dokulu ve koyu yeşil renktedir. Kardeşlenmeye eğilimi yüksektir. Kökleri

derin ve sık yapıdadır. Kuraklığa, olumsuz çevre koşullarına, kötü toprak özelliklerine karşı gelişimini etkilemeden devam eder. Rizom sayısı yüksektir. Bitki hastalıklarına karşı dayanımı yüksek bir bitki çeşididir (Şekil 3.3).



Şekil 3.3. *Festuca arundinacea* türünün Nilüfer çeşidi

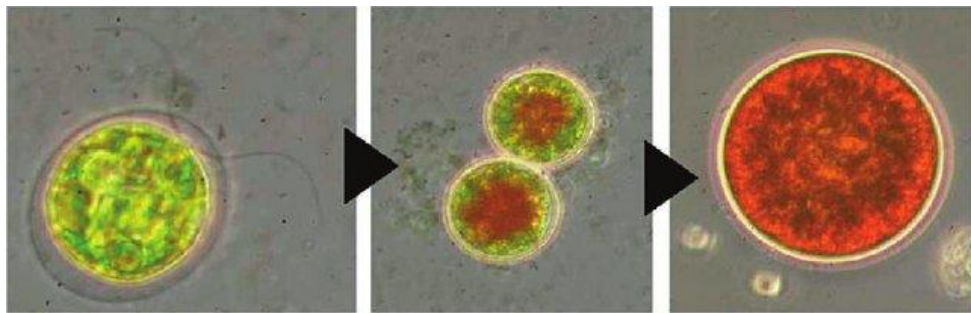
3.1.2. Alg materyali

Haematococcus pluvialis suşu SCCAP 34/7 (İskoç Deniz Enstitüsü, İskoçya, Birleşik Krallık), %2 CO₂ ile zenginleştirilmiş hava ile fototrofik olarak yetiştirilmiştir. Kültüre alınmasında üç kat azot ve vitaminlerle zenginleştirilmiş Bold Bazal Besiyeri (3N-BBM+V) kullanılacaktır. Seçilen *Haematococcus pluvialis* mikroalg türü 8000-10.000 lux LED ışık kullanılarak 25°C’de fotobiyoreaktör sisteminde yetiştirilmiştir. Mikroalg kütlesi 20 günlük inkübasyon sonunda toplanarak santrifüj edilmiştir. Kuru alg kütlesi paketlenmiş ve deneme için İstanbul Üniversitesi, Fen Fakültesi, Biyoloji Bölümünden temin edilmiştir.

Chlorella’nin *Haematococcus pluvialis* türünün kullanılma nedeni, hücre duvarının bitki hücre duvarına benzer şekilde, selüloz ve glikoproteinlerden oluşması ve bundan dolayı hücre bozunmasına karşı dirençli olması, hücre duvarının inorganik kirleticileri bağlayabilmesi ya da yarayışsız forma dönüştürmesi, yapılan uygulamalar sonucunda biyoyakıt ve/veya biyoenerji olarak kullanılabilme potansiyeli, çevre için ekonomik ve sürdürülebilir olmasından dolayı denemede tercih edilmiştir (Schwede ve ark., 2013; Eroğlu ve ark., 2015; Milano ve ark., 2016; Aydın, 2016).

3.1.2.1. *Haematococcus pluvialis* Mikroalginin Genel Özellikleri

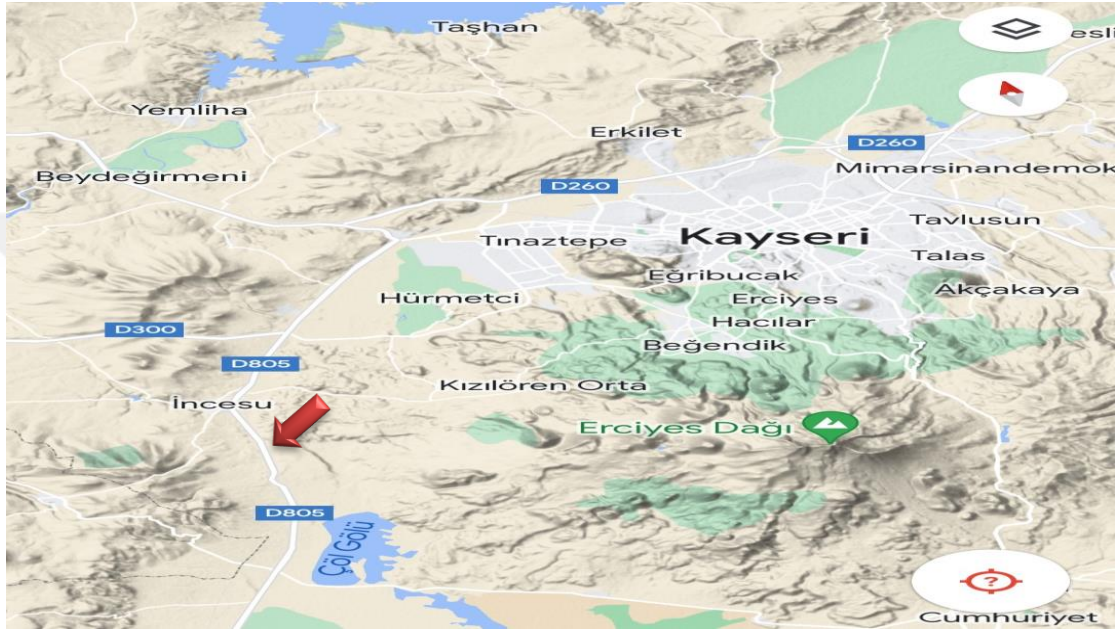
Haematococcus pluvialis, Chlorophyceae sınıfına, Volvocales takımı, Haematococcaceae familyasında olan doğada çoğu habitatta yaygın olarak varlığını sürdüren tek hücreli, tatlı su mikroalgidir (Niizawa ve ark., 2021). Mikroskop altında görüntüsü Şekil 3.4'te yer almaktadır. *Haematococcus pluvialis*'in farklı stres faktörlerine maruz kalması, hücrenin yaşam döngüsü boyunca yapısal değişikliklerini beraberinde getirir. Örneğin hücre duvarı kalınlığı normalde 30 µm çapta oval, küresel bir şekilde ve renkli olmasına rağmen stres faktörlerine maruz kaldığında hücre duvarı kalınlığını artırır ve rengini kaybetmeye başlar (Wang, 2019; Mularczyk, 2020). *Haematococcus pluvialis*'in optimum gelişimi için pH'nın 6-8 arasında olması, sıcaklığın 23-25°C arasında olması gerekmektedir (Oslan ve ark., 2021). Ürettiği karotenoidlerden özellikle astaksantin (3, 3'-dihidroksi-β, β'-karoten-4, 4'-dion), somon, karides, yengeç vb. gibi sucul türler arasında yaygın olarak bulunan doğal bir pigmenttir (Fang ve ark., 2019; Oslan ve ark., 2021). Astaksantin güçlü bir antioksidan aktivitesine sahip bir pigment olmasının yanında, özellikle stres esnasında fotosentez mekanizmalarını koruyucu görev yapmaktadır (Nisar ve ark., 2015). *Haematococcus pluvialis* astaksantin üretiminde son zamanlarda büyük bir kaynak ve model tür olarak yer almıştır (Leu ve Boussiba, 2014). Astaksantin'in meydana getirdiği stres faktörlerine karşı savunma mekanizması, hücre duvarının inorganik kirleticileri bağlaması ve canlılar için yararlı formaya dönüştürebilmesi bu mikroalg türünü tarımsal üretim açısından kullanılabilirliğini sağlamıştır.



Şekil 3.4. *Haematococcus pluvialis*'in mikroskop altında görüntüsü (Kristoffersen ve ark., 2012).

3.1.3. Toprak materyali

Çalışmada kullanılan ağır metaller ile kirli toprak materyali Kayseri ili, İncesu ilçesinden çinko üretim tesisi karşısındaki yolun 1-2 m uzaklığından, 0-30 cm toprak derinliğinden tesadüfî örnekleme yapılarak alınmıştır. Ağır metallerle kirlenmiş toprak örneklerinin alındığı yerler Küresel Konumlama Sistemi (GPS) ile belirtilmiştir (Şekil 3.5; Şekil 3.6).



Şekil 3.5. Kayseri ilinde toprak numunelerinin alındığı yerler



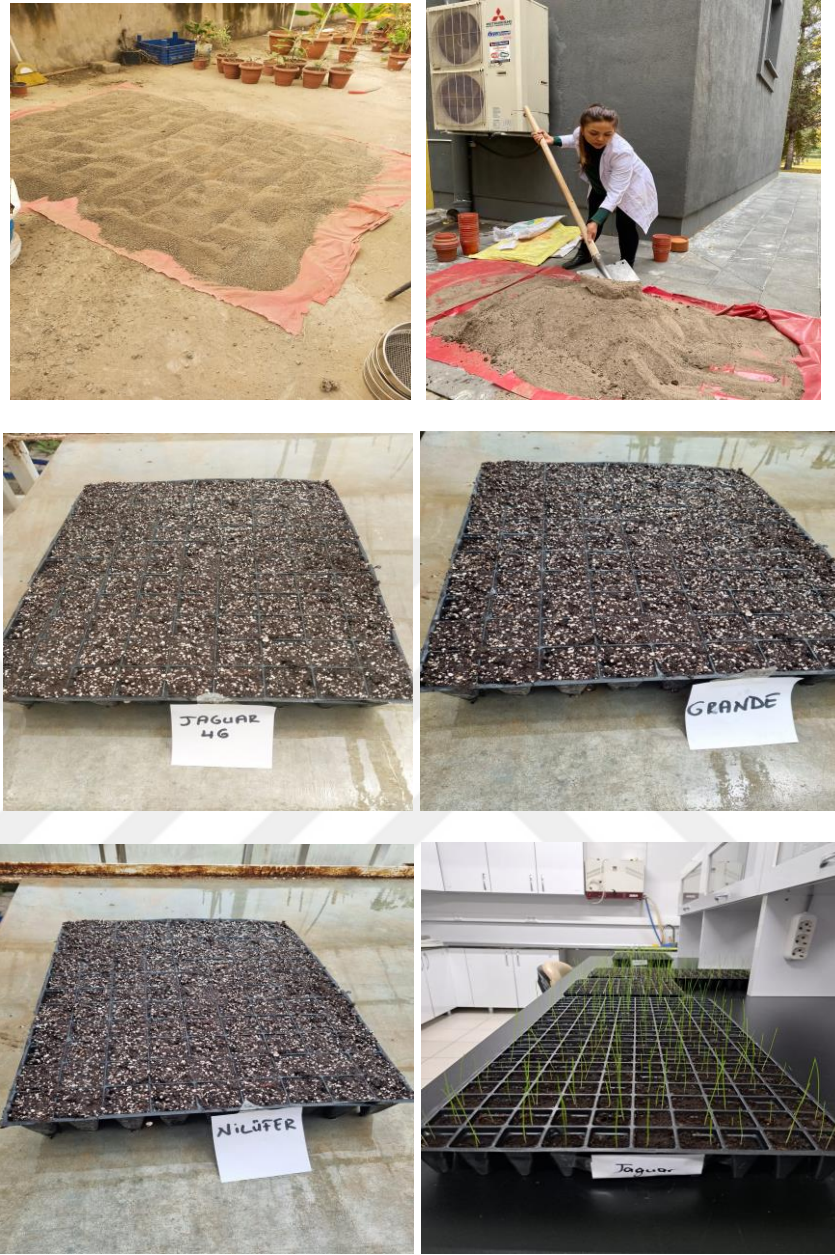
Şekil 3.6. Toprak örneklerinin alındığı yerlerin Google Earth görüntüsü (38,7143144 enlem, 35,2625447 boylam)

3.2. Yöntem

3.2.1. Denemede Kullanılacak Toprak Hazırlığı ve Saksı Denemesinin Kurulması

İncesu ilçesinden çoklu ağır metal kirliliği tespit edilen bölgeden tesadüfi olacak şekilde farklı noktalardan toprak örnekleri kürek ve bel yardımıyla 0-30 cm'den alınmıştır. Alınan toprak örnekleri saksıların içerisine ilave edilmeden önce arazi koşullarını temsil etmesi için 4 mm ve 8 mm'lik eleklerden elenerek brandanın üzerine serilmiş. Kullanılacak toprağın homojen olması için deneme kurulmadan önce alt üst edilmiştir (Şekil 3.7).





Şekil 3.7. Denemede kullanılacak toprak materyalinin hazırlık aşamaları ve viyollerdeki Jaguar 4G, Grande II ve Nilüfer çeşitleri

Elenen toprak örnekleri 1.5 kg'lık saksılara ilave edilmiştir. Saksılara 0.14 g 15-15-15 ön gübrelemesi yapılmıştır. Dineshkumar ve ark., (2020) çalışmalarındaki uygulama dozları dikkate alınarak, *Haematococcus pluvialis* mikroalgi 6 g kg⁻¹ %0, 25, 50, 100 oranlarında ayarlanmış ve saksı topraklarına karıştırılmıştır (Şekil 3.8).



Şekil 3.8. *Haematococcus pluvialis* mikroalginin tartılması ve uygulanması

Bitki Beslenme Fizyolojisi laboratuvarında gerçekleşen deneme saksılarına viyollere ekilmiş Jaguar 4G, Grande II ve Nilüfer çeşitleri her saksıya 20 adet olacak şekilde dikilmiş ve daha sonra 15 bitkiye seyreltilmiştir. Deneme alanının ışıklandırılması 16 saat aydınlık 8 saat karanlık olacak şekilde 13.000 lüks ışık şiddetinde ayarlanmıştır. Ortam sıcaklığı 23-25 °C arasında kontrol altında tutulmuştur. Deneme planı, şansa bağlı tam bloklar deneme deseninde, 3 tekerrürlü olacak şekilde toplam 48 saksıda yürütülmüştür. Saksı denemesi dağılımı Tablo 3.2’de verilmiştir.

Tablo 3.1. Saksı denemesinin şansa bağlı bloklar desen dağılımı

Bitki Çeşidi	<i>Haematococcus pluvialis</i> Mikroalg Dozu (6 g kg ⁻¹ saksı)				Saksı Sayısı
	0 (Kontrol)	1.5 g kg ⁻¹ saksı	3 g kg ⁻¹ saksı	6 g kg ⁻¹ saksı	
Bitkisiz Ortam					12
Jaguar 4G					12
Grande II					12
Nilüfer					12
Toplam					48

Saksılar tarla kapasitesinde olacak şekilde (su tutma kapasitesinin %70'i) düzenli aralıklarla sulanmıştır. Her ay bitki örnekleri hasat edilerek analiz edilmiş ve son ay toprak analizleri gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.9). Saksı denemesinin inkübasyon ve bitkileri yetiştirme süresi 3 ay sürmüştür. İlk iki ay toprak yüzeyinden 2-3 cm çim aksamı kalacak şekilde vejetatif aksam hasat edilmiş, son ay kök aksamı ve vejetatif aksamın tümü hasat edilmiştir. Toprak üstü aksam, kök aksamı metal fitoekstrasyon kapasitesini değerlendirmek için kullanılmıştır. Son ay alınan toprak örnekleri genel analizler ve metal analizlerini belirlemek için kullanılmıştır.





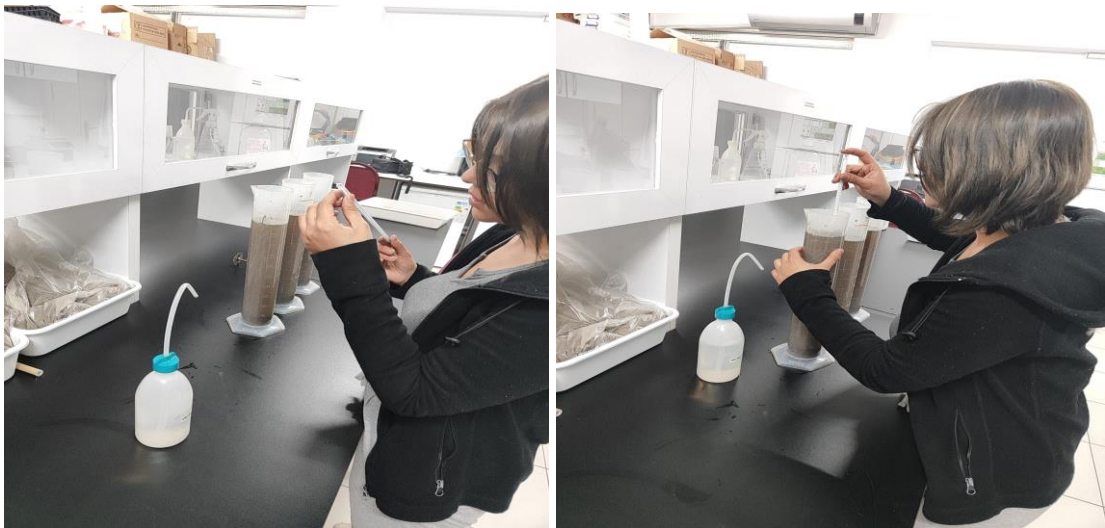
Şekil 3.9. Ortam ışıklandırılması, sıcaklığı ölçümü ve saksı denemesi

3.2.2. Saksı Deneme Toprağı ve Bitki Örneklerinde Yapılacak Bazı Fiziksel ve Kimyasal Analizler

Toprak analizleri için toprak örnekleri kurutma kağıtlarının üzerlerine serilmiş ve serilen hava kurusu toprak örnekleri 2 mm'lik elekten geçirilerek toprak analizleri için ön hazırlıkları tamamlanmıştır.

3.2.2.1. Toprak Tekstürü Analizi

Toprağın % kum, silt, kil oranının ifadesi toprak tekstürü olarak ifade edilmektedir. Deneme toprağı Bouycous yöntemi kullanılarak analiz edilmiş (Şekil 3.10) ve tekstür üçgeni kullanılarak hesaplanmıştır (Bouycous, 1951).



Şekil 3.10. Deneme toprağında tekstür tayini

3.2.2.2 Toprak Reaksiyonu (pH) Analizi

Deneme toprağının pH'sı 1:2.5 toprak:saf su çözeltisindeki (20 g toprak 50 ml saf su) H^+ iyonu konsantrasyonu cam elektrotlu pH metre ile potansiyometrik olarak belirlenmiştir (Şekil 3.11) (McLean, 1982).

3.2.2.3 Elektriksel İletkenlik (EC) Tayini ($dS\ m^{-1}$)

Deneme toprağının doygun ekstraktındaki iletkenliği, iletkenlik ölçer (kondaktivimetre) aletiyle 1:2.5 toprak:saf su çözeltisi oranında (20 g toprak 50 ml saf su) ölçülmüştür (Şekil 3.11).



Şekil 3.11. Deneme topraklarının pH Ölçümü

3.2.2.4. Kireç tayini

Kalsimetre yöntemi 1+3'lük HCL ile reaksiyona giren toprakta kalsiyum karbonatın parçalanması ile açığa çıkan CO_2 hacminin kapalı boruda ölçülmesi prensibine dayanmaktadır. Bu prensibe göre 0.5 g tartılan toprak örnekleri 1+3'lük HCL ile tepkimesi sonucu ortaya çıkan CO_2 hacmi Scheibler kalsimetresi ile belirlenmiştir (Şekil 3.12). Kireç içeriği % olarak ifade edilmiştir (Nelson, 1982).



Şekil 3.12. Deneme topraklarında kireç analizi

3.2.2.5. Organik madde miktarı

Organik madde analizi, Walkley-Black yöntemine göre belirlenmiştir (Nelson ve Sommers, 1996). Walkey-Black tayininin prensibi; toprakğın potasyum dikromat ve sülfürik asit tepkimesi sonucunda toprak içerisindeki organik karbonun potasyum dikromat ile yükseltgenmesini sağlamak ve oksitlenme için kullanılan miktardan artan potasyum dikromat çözeltisini standart demir sülfat ile titrasyon yapılmasıyla toprakta bulunan karbonu ölçerek organik madde miktarının belirlenmesine dayanmaktadır. Deneme toprağında organik madde tayini yapılmış (Şekil 3.13) ve sonuçları % olarak ifade edilmiştir.



Şekil 3.13. Deneme toprağında organik madde analizi

3.2.2.6. Deneme Toprağının Yarayışlı Fosfor (YP) Analizi

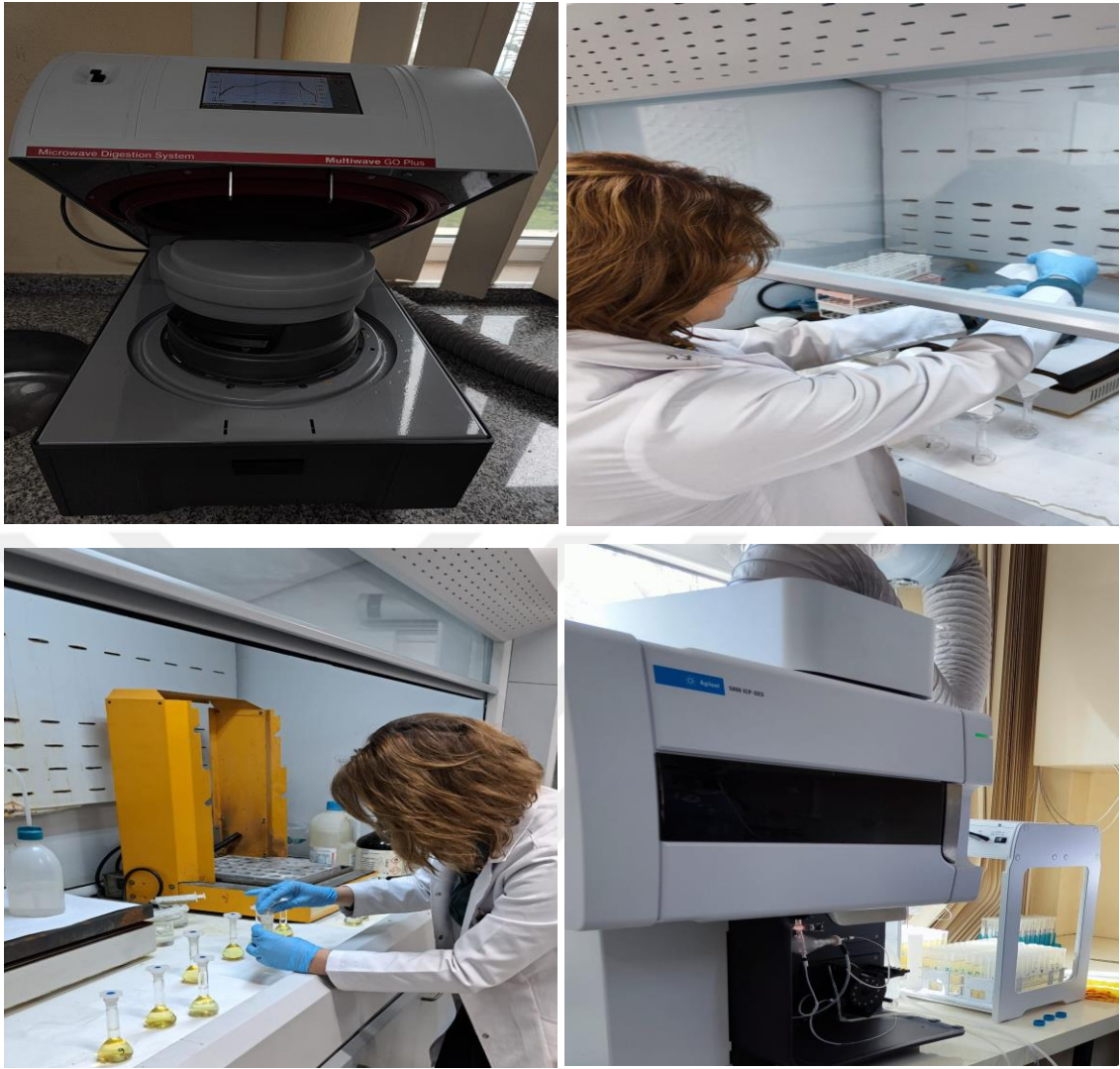
Deneme toprağının YP analizi, Hardwvok ve ark., (1969) yaptıkları analize göre, sodyum karbonat (Na_2CO_3) ilave edilen toprağın çözünmez durumdaki P'nin çözünebilir duruma dönüşümünü sonrada fosfomolibdat ve askorbik asit bileşimini molibden mavisiyle indirgeyerek çözelti içerisindeki P'yi kalorimetrik olarak hesap edilmesi yöntemini baz alarak analiz yapılmıştır (Şekil 3.14).



Şekil 3.14. Deneme toprağında toplam fosfor analizi

3.2.2.7 Deneme Toprağının Toplam Metal Analizi

Deneme toprağının toplam ağır metal içeriğinin belirlenmesi için 0.1 g toprak tartılmış ve tartılan toprak örnekleri mikrodalga tüplerine ilave edilmiştir. Mikrodalga tüplerinin içerisine konsantre 9 ml HNO_3 ve 3 ml HCl eklendikten sonra tüplerin kapağı ayarına göre kapatılarak cihazın içerisine yerleştirilmiştir. Mikrodalgada yapılan yaş yakma uygulamasından sonra alınan örnekler süzülerek 25 ml'lik balon jöjelere aktarılmış, ardından hacim çizgisine kadar saf su ile tamamlanmıştır. Yakılan toprak örnekleri 15 ml'lik falcon tüplerine alınarak İndüktif Eşleşmiş Plazma Optik Emisyon Spektrometre (ICP-OES) okuması için hazır hale getirilmiştir (Şekil 3.15). ICP-OES cihazı kullanılarak toplam metal analizi ve element analizi yapılmıştır.



Şekil 3.15. Deneme toprağının toplam metal analizi ve ICP-OES' e hazırlanması

3.2.2.8. Bitki Tarafından Alınabilir Mikro Element Ve Ağır Metallerin Tayini

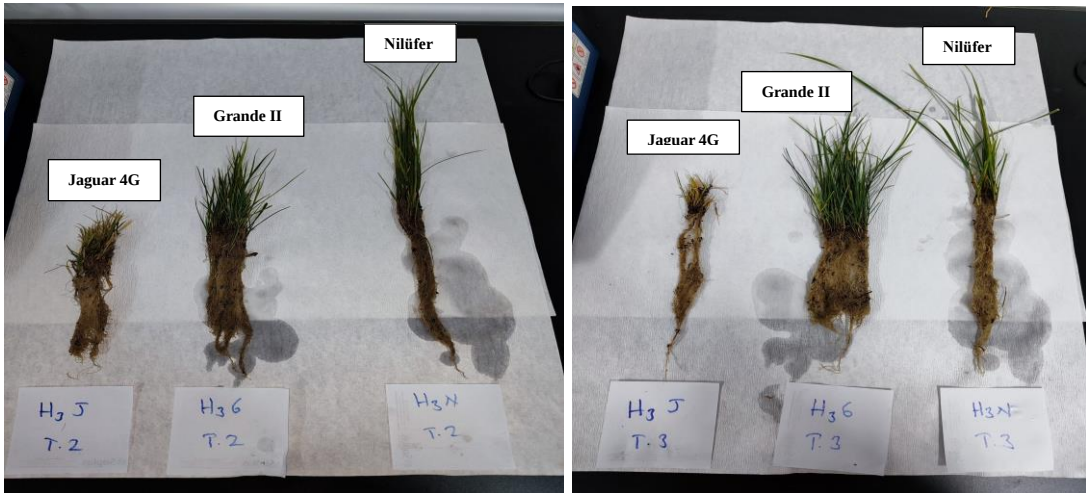
Bitki için alınabilir metal analizi, DTPA (Dietilentriaminpentaasetik asit) ilavesiyle çalkalanması ardından filtre kağıtlarıyla süzülmesi, alınan süzüklerin ICP OES'te okunması esasına dayanmaktadır. Hazırlanan toprak örneklerinden 20 gr tartılmış sonra DTPA ilave edilerek 2 saat çalkalayıcıda çalkalamaya bırakılmıştır. Çalkalanan örnekler Whatman 42 yardımıyla süzölmüş (Şekil 3.16). ICP-OES ile okumaları yapılmıştır (Lindsay ve Norvell, 1978).



Şekil 3.16. Deneme toprağının alınabilir metal analizi

3.2.2.9. Bitki Örneklerinin Analize Hazırlanması

Saksı denemesinde hasat edilen toprak altı ve toprak üstü aksamlarında toz ve toprak kalıntılarının kalmaması için sürekli bir biçimde saf su ile, kalıntı kalmayıncaya kadar yıkaması gerçekleştirilmiştir. Yıkanan toprak altı ve toprak üstü aksamlarının kurulanması için kurutma kağıdı üzerine serilmiştir (Şekil 3.17). Yaş tartımla yapılacak işlemler gerçekleştirildikten sonra kese kağıtlarına alınarak 70°C’de sabit ağırlığa gelinceye kadar etüvde kurutulmuştur. Kurutulan örnekler öğütme değirmeninden geçirilmiş ardından kuru örneklerle yapılacak analizler için hazır hale getirilmiştir (Şekil 3.18).



Şekil 3.17. Hasat edilen bitki aksamalarının kurulanması için serilmesi



Şekil 3.18. Etüvde kurutulmuş bitki örneklerinin öğütülmesi ve analize hazır hale getirilmesi

3.2.2.10. Toprak Üstü Aksamı ve Kök Yaş, Kuru Ağırlığının Ölçülmesi

Saksı denemesinin kurulumunun 1. ayı sonunda bitkiler toprak yüzeyinden 1-2 cm yukarıda kalacak şekilde yaklaşık 5-8 cm arası biçilmiş, 2. ayın sonundada aynı işlemler gerçekleştirilmiştir. 3. ayın bitimini takiben bitkiler saksıdan çıkarılmış ve hasat edilmiştir (Şekil 3.19). Hasat edilen bitki örnekleri toz ve toprak kalıntılarından arındırılması için sürekli bir biçimde saf sudan geçirilmiş sonrasında kurulanması için serilerek hassas terazide tartımı yapılmıştır (Şekil 3.20). Yaş ağırlıkları ölçülen bitki ve kök örnekleri kese kağıtlarına alınarak etüvde 70°C'de sabit ağırlığa gelinceye kadar kurutulmaya bırakılmıştır (Kaçar ve İnal, 2008). Etüvde sabit ağırlığa ulaşan örneklerin hassas terazide tartılmıştır.



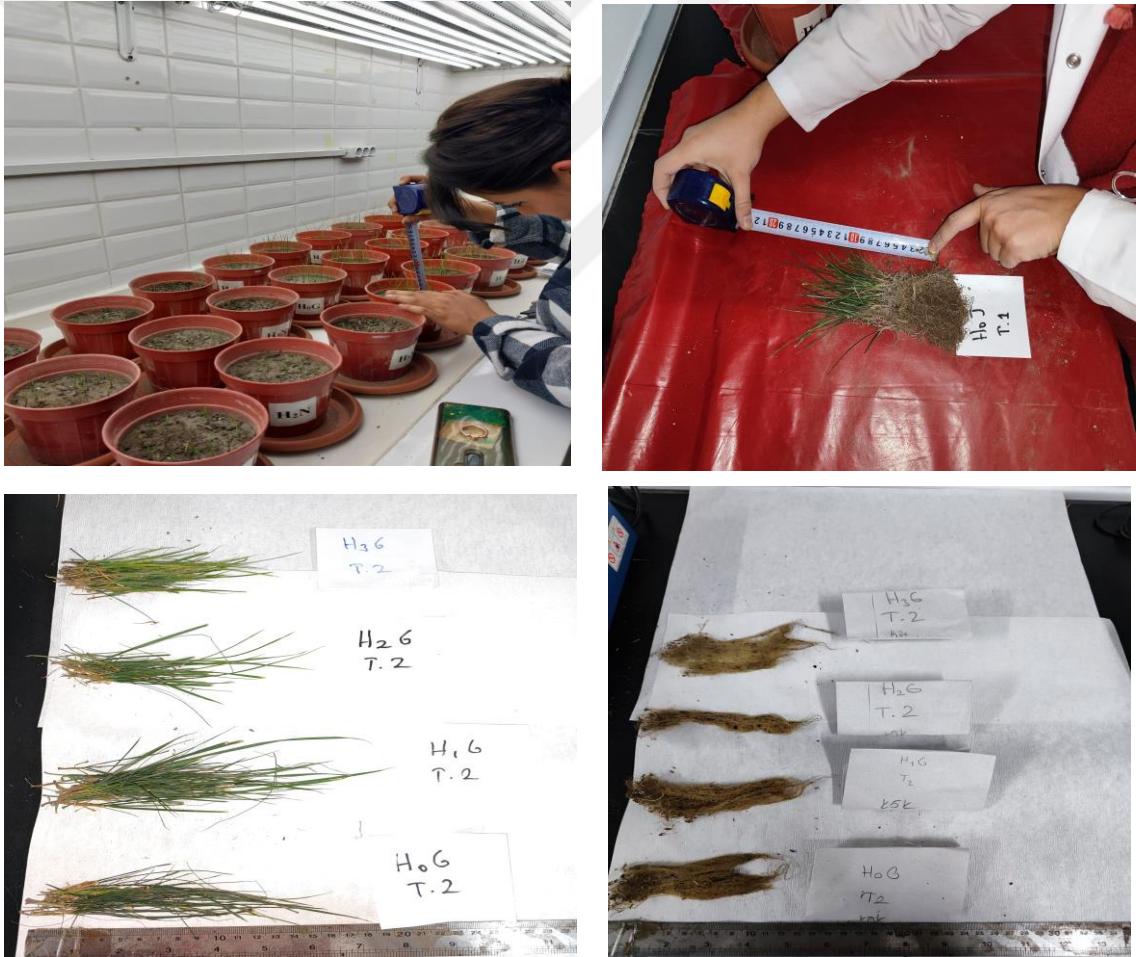
Şekil 3.19. Saksı denemesindeki bitki örneklerinin 1. ve 2. ay hasadı



Şekil 3.20. Saksı denemesinin 3. ay hasadı, toprak üstü aksamının ve kök yağı ağırlığının tartılması

3.2.2.11. Bitki Boyu ve Kök Derinliğinin Ölçülmesi

Her ay bitiminde olacak şekilde 3 ay boyunca bitki boyu uzunlukları bitkinin toprak yüzeyinde başlangıcından en uç noktasına kadar olan kısım cm olarak milimetrik cetvelle ölçülmüştür. Son ay saksılardan alınan bitkiler toz ve toprak patikülllerinden ayırmak için saf suda sürekli bir biçimde yıkanmış ve kurulanması için serilmiştir. Serilen örnekler kök ve gövde kısmından ayrılması için kesilmiştir (Şekil 3.21). Bitki boy uzunluğu ortalama boy uzunlukları milimetrik cetvelle ölçülmüş, kardeşlenme sayıları ve ortalama kardeşlenme sayıları sayılarak not edilmiştir. Örneklerin kök derinlikleri serilen yerde milimetrik cetvelle ölçülmüştür.



Şekil 3.21. Saksı denemesinin bitki boyu ve kök derinliklerinin ölçülmesi

3.2.2.12. Bitki Klorofil ve Karoteneid Analizi

Klorofil a, Klorofil b, Klorofil a+b ve Karoteneid (K_{x+c}) analizleri Lichtenthaler, 1987 UV- VIS Spektroskopik yöntemiyle yapılmıştır. Hasat edilen bitki doku örneklerinden 5

mg tartılmış, 15 ml'lik falcon tüplerine ilave edilmiştir. Örneklerin eklendiği tüpe 8 ml (%96) etanol çözeltisi eklenmiş ve çalkalama işlemi yapıldıktan sonra tüpler alüminyum folyoya sarılarak 24 saat inkübasyona bırakılmıştır. 24 saat sonra folyodan çıkarılan örneklerin partiküllerinin çökmesi için tekrar çalkalama yapılmıştır. Çalkalama sonrası çökelen patiküllerin üzerindeki sıvının 480, 648.6 ve 664.2 nm dalga boyunda okuması yapılmıştır (Şekil 3.22). Spektrofotometrede ölçülen değerler aşağıdaki formüller ile hesaplanmıştır.

$$K_a = \frac{(13.36 \cdot D_{664.2} - 5.19 \cdot D_{648}) \cdot 8.1}{\text{Kuru Doku Ağırlığı (mg)}}$$

$$K_b = \frac{(27.43 \cdot D_{648.6} - 8.12 \cdot D_{664.2}) \cdot 8.1}{\text{Kuru Doku Ağırlığı (mg)}}$$

$$K_{a+b} = \frac{(5.24 \cdot D_{664.2} + 22.24 \cdot D_{648.6}) \cdot 8.1}{\text{Kuru Doku Ağırlığı (mg)}}$$

$$K_{x+c} = \frac{(4.785 \cdot D_{470} + 3.657 \cdot D_{664.2} - 12.76 \cdot D_{648.6}) \cdot 8.1}{\text{Kuru Doku Ağırlığı (mg)}}$$

$D_{648.6}$ = 648.6 nm dalga boyunda okuma değeri

$D_{664.2}$ = 664.2 nm dalga boyunda okuma değeri

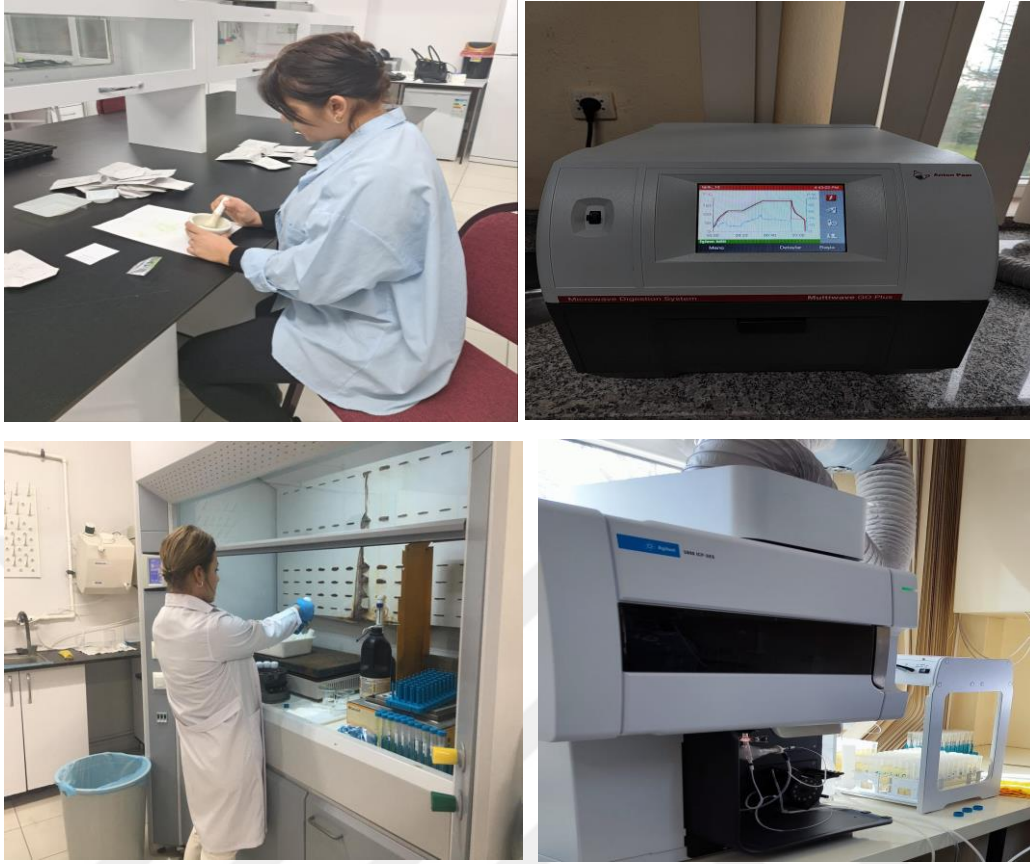
D_{470} = 470 nm dalga boyunda okuma değeri



Şekil 3.22. Hasat edilen bitki örneklerinin Klorofil a, Klorofil b, Klorofil a+b ve Karoteneid (Kx+c) analizleri

3.2.2.13. Bitki Örneklerinde Ağır Metal Analizi

0.2 g tartımı yapılan kuru bitki örnekleri mikrodalga tüplerine eklenmiştir. Mikrodalga tüplerinin içerisine konsantre 5 ml HNO_3 , konsantre 1 ml H_2O_2 eklenmiş mikrodalga tüplerinin kapağı kapatılarak cihaza yerleştirilmiştir. Mikrodalga cihazı bitkide yakma işlemi için 10 dk 120°C 'ye çıkarak 10 dk 120°C 'de beklemekte, 5 dk'da 180°C 'ye çıkmakta, 20 dk sonrasında 180°C 'de beklemekte ardından kendini soğutmaya alarak yakma işleminin tamamlanmasını sağlamaktadır. Mikrodalgada yakılan örnekler 15 ml'lik falkon tüplerine süzülerek çizgilerine kadar saf su ile tamamlanmış ve analize hazır duruma getirilmiştir. Hazırlanan süzüklerin ICP-OES cihazı ile okunması gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.23).



Şekil 3.23. Metal analizi için kurutulmuş bitki örneklerinin öğütülmesi, mikrodalgada yakılması ve ICP-OES cihazına hazırlanması

3.2.2.14. Bitki Fitoekstraksiyon Kapasitelerinin ve Büyümlerinin Değerlendirilmesi

Yapılan saksı denemesinde bitkilerin fitoremediasyon ve fitoekstraksiyon kapasitelerini belirlemek için iki ana faktör kullanılmıştır. Bu faktörlerden ilki translokasyon faktörü (TF), ikincisi ise biyoakümülyasyon faktörü (BAF)'tır. Translokasyon faktörü, toprak altı aksamından alınan metalin toprak üstü aksamına taşınımının bir ifadesidir. Translokasyon faktörü; bitkinin toprak üstü aksamındandaki mevcut metal derişiminin, toprak altı aksamındaki mevcut metal derişimine oranı ile hesaplanmaktadır (Karami ve Sahamsuddi, 2010). TF hesabı aşağıda yer almaktadır.

$$\text{Translokasyon Faktörü (TF)} = \frac{\text{Bitki toprak üstü aksamı metal konsantrasyonu (mg kg}^{-1}\text{)}}{\text{Bitki toprak altı aksamı metal konsantrasyonu (mg kg}^{-1}\text{)}}$$

Biyoakümülyasyon faktörü, bitki bünyesindeki metal konsantrasyonunu dahil ettiği için bitki bünyesine metal biriktirme kapasitesini değerlendirmede önemli bir parametredir (Zayed, 2013). Biyoakümülyasyon faktörünün sonucunun yüksek çıkması kullanılan bitkinin fitoremediasyon için uygun olduğunu ifade etmektedir. Metal fitoremediasyonunda kullanılacak bitkinin biyoakümülyasyon faktörünün 1 den büyük olması istenmektedir (Salt ve ark., 1997; Mellem ve ark., 2012). Biyoakümülyasyon faktörü bitki dokusundaki toplam metal konsantrasyonunun toprak içerisindeki metal konsantrasyonu oranı ile hesap edilmektedir (Li ve ark., 2007; Malik ve ark., 2010; Rezvani ve Zaefarian 2011; Tözser ve ark., 2019). BAF hesabı formülü aşağıda yer almaktadır.

$$\text{Biyoakümülyasyon Faktörü (BAF)} = \frac{\text{Bitki toplam metal konsantrasyonunun (mg kg}^{-1}\text{)}}{\text{Toprak içerisindeki metal konsantrasyonu (mg kg}^{-1}\text{)}}$$

3.2.2.15. Toprakta Ağır Metallerin % Biyogiderim Potansiyellerinin Hesaplanması

ICP-OES cihazında okuması yapılan çoklu metal kirliliği görülen topraklarda farklı biyoremediasyon tekniklerinin uygulamaları sonucu, topraktan giderimi sağlanan ağır metal düzeyinin değerlendirilmesi %Biyogiderim ile belirlenmiştir. %Biyogiderim, başlangıç toprağındaki metal konsantrasyonunun (mg kg⁻¹), uygulama sonrası toprak metal konsantrasyonundan (mg kg⁻¹) farkının başlangıç toprağındaki metal konsantrasyonuna (mg kg⁻¹) oranı sonucu ortaya çıkan değerin 100 ile çarpımı sonucu elde edilmektedir (Adams, 2017; Şen, 2022).

$$\% \text{ Biyogiderim} = \frac{C_o - C_f}{C_o} \times 100$$

C_o : Başlangıç toprağındaki metal konsantrasyonu (mg kg⁻¹)

C_f : uygulama sonrası toprak metal konsantrasyonu (mg kg⁻¹)

3.2.2.16. Farklı Biyoremediasyon Uygulamalarının Remediasyon Veriminin Hesaplanması

Remediasyon verimi (RV), kirlilik tespit edilen ortamdan kirliliğin uzaklaştırılması amacıyla kullanılacak bitkinin toprak üst aksamının ile hasat döneminde alınan total miktarının, toprak kirleticisinin konsantrasyonuna ve miktarına bölümünün yüzde olarak hesaplanmasıyla belirlenmiştir (Neugschwandtner ve ark., 2008)

$$RV = \frac{M_G \times V_G}{T_T \times T_M} \times 100$$

M_G : Gövde metal konsantrasyonu (mg kg^{-1})

V_G : Gövde verimi (g)

T_T : Toplam toprak metal konsantrasyonu (mg kg^{-1})

T_M : Toprak miktarı (g)

3.3. Verilerin Değerlendirilmesi

Araştırma tesadüf blokları deneme desenine göre 3 tekerrürlü olarak kurulmuştur. Araştırma sonucunda elde edilen veriler bilgisayarda “JMP 13.2.0” programı ile tesadüf blokları deneme desenine göre analiz edilmiştir. Değerler Tukey Çoklu Karşılaştırma Testi ile gerçekleştirilmiştir (Snedecorand Cochran, 1967).

4. BÖLÜM

BULGULAR

4.1. Deneme Topraklarının Hasat Öncesi ve Sonrası Bazı Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri

Bu çalışmada; saksı denemesi için toprak örnekleri, Çiftçi (2016) ve Doğancı (2022)'nin çalışmalarında kritik ağır metal sınır değerlerini aştığı daha önce saptanmış ve Kayseri-İncesu bölgesinden ağır metal kirliliğinin tespit edildiği alandan alınmıştır. Kurulan saksı denemesinde, toprakta ağır metal giderimi için farklı biyoremediasyon teknikleri uygulanmıştır.

Deneme 3 tekerrür olacak şekilde toplamda 48 saksıda uygulanmıştır. Deneme öncesi ve sonrası laboratuvar analizleri için ön işlemleri tamamlanan toprak örneklerinin ağır metal içeriklerindeki değişimleri değerlendirmek için bazı fiziksel ve kimyasal toprak analizleri değerleri Tablo 4.1'de verilmiştir.

Tablo 4.1. Denemede kullanılan toprak örneklerinin bazı fiziksel ve kimyasal özelliklerinin değerlendirilmesi, standart sapmaları (n=3)

Özellik	Değer	Kaynak
pH (1:2.5)	8.39 $\pm$ 0.01	(McLean, 1982)
EC (dS m ⁻¹)	0.45 $\pm$ 0.02	(Rohoades, 1982)
Kum (0.02-2 mm) (%)	78.7	(Bouyoucos, 1951)
Silt (0.002-0.02 mm) (%)	10.74	Bouyoucos, 1951)
Kil (<0.002 mm) (%)	10.56	Bouyoucos, 1951)
Tekstür Sınıfı	Kumlu Tın	Bouyoucos, 1951)
Kireç (%CaCO ₃)	3.59 $\pm$ 0.015	(Nelson, 1996)
Organik madde (%)	1.14 $\pm$ 0.01	(Nelson ve Sommers, 1996)
Yarayışlı P (mg kg ⁻¹)	2.92 $\pm$ 0.036	(Olsen, 1954)

Tablo 4.1’de görüldüğü üzere başlangıç toprağının pH’sı hafif alkali karakterde, EC değeri az tuzlu, bünye sınıfı kumlu tın, % kireç (CaCO_3) az kireçli, alınabilir P toprakta az, % organik madde az olarak sınıflaması yapılmıştır (Ülgen ve Yurtsever, 1995).

Başlangıç toprağının toplam Cd, Pb ve Zn içerikleri, normal değerleri, toprakta kritik değer aralıkları ve Toprak Kirliliği Kontrol Yönetmeliğine göre değerlendirmeleri Tablo 4.2’de verilmiştir.

Tablo 4.2. Denemede kullanılan başlangıç toprağının toplam Cd, Pb ve Zn içerikleri, normal değerleri, toprakta kritik değerleri ve Toprak Kirliliği Kontrol Yönetmeliğine göre sınır değerleri (Toprak Kirliliğinin Kontrolü ve Noktasal Kaynaklı Kirilenmiş Sahalara Dair Yönetmelik, 2010)

Ağır metal	Deneme Toprağı (n=3)	Normal değerler	Kritik değerler	Toprak Kirliliği Kontrol Yönetmeliği Sınır değerleri (mg kg^{-1} fırın kuru toprak) pH >6
Cd (mg kg^{-1})	284.94±0.52	0.01-2	3-8	3
Pb (mg kg^{-1})	9959.37±0.11	2-300	100-400	300
Zn (mg kg^{-1})	48035.00±0.16	1-900	70-400	1100

Denemede kullanılan toprağın ICP-OES’te ağır metal okuması yapılmış ve elde edilen değerlerde Pb, Cd ve Zn metalleri Toprak Kontrol Yönetmeliğine göre ve toprakta olması gereken normal değerlerine göre çok yüksek düzeyde bulunmuş, topraktaki diğer metaller Toprak Kirliliği Kontrol Yönetmeliğine göre sınır değerlerinin altında kalmıştır.

4.1.1. Farklı Biyoremediasyon Uygulamalarının Toprak pH ve EC’si Üzerine Etkisi

4.1.1.1. Farklı Biyoremediasyon Uygulamalarının Toprak pH Üzerine Etkisi

Festuca arundinacea çeşitleri ve farklı mikroalg dozlarının toprak pH değişimlerine ait varyans analiz tablosu Tablo 4.3’te, pH değişimlerine ait ortalama değerler Tablo 4.4’te verilmiştir.

Tablo 4.3. Deneme toprağında çeşit ve uygulamalar arasındaki pH değişimlerine ait varyans analiz tablosu

Varyasyon Kaynakları	Serbestlik Derecesi	Kareler Ort.	F
Tekerrür	2	0,001	0,833
Çeşit	3	0,0011	27,691**
Uygulama	3	0,1024	2558,941**
Çeşit*Uygulama	9	0,0023	57,737**
Hata	30	0,00004	
Genel	47		

** : 0.01 düzeyinde önemli, * : 0.05 düzeyinde önemli

Varyans analiz tablosu incelendiğinde çeşit, uygulama ve çeşit*uygulama interaksiyonunun pH üzerine etkisi istatistiksel olarak %1 düzeyinde önemli olarak bulunmuştur.

Tablo 4.4. Deneme toprağında farklı biyoremediasyon uygulamalarının pH değişimlerine ait ortalama değerler

Çeşitler	Mikroalg Dozları g kg ⁻¹				Ortalama
	Kontrol	1.5	3	6	
Jaguar 4G	8.36 ^b	8.34 ^{cd}	8.26 ^{fg}	8.14 ^{ij}	8.27 ^b
Nilüfer	8.35 ^{bc}	8.33 ^d	8.25 ^g	8.13 ^j	8.26 ^c
Grande II	8.36 ^b	8.33 ^d	8.26 ^{fg}	8.19 ^h	8.28 ^a
Bitkisiz Ortam	8.40 ^a	8.27 ^{ef}	8.28 ^e	8.15 ⁱ	8.27 ^b
Ortalama	8.37 ^a	8.31 ^b	8.26 ^c	8.15 ^d	

*: Aynı sütunda aynı harfle gösterilen ortalamalar arasında fark yoktur (p<0.05)

Tablo 4.4 incelendiğinde Saksı denemesinin başlangıcından itibaren 3 aylık periyot süresince toprak pH'sında elde edilen verilere göre uygulama dozlarının artışı çeşitlerde pH düşüşüne yol açmış ve en yüksek pH, bitki yetiştiriciliği yapılmayan kirli kontrol toprağında 8.40, en düşük pH değeri 8.13 ile Nilüfer çeşidinde 6 g kg⁻¹ mikroalg uygulamasından elde edilmiştir.

Mikroalg ve Fetuca çeşitlerinin uygulaması, genel olarak toprak pH'sında azalan bir eğilim göstermiştir. Bu azalma eğiliminin kök solunumu ürünü olan CO₂ 'nin ve mikroalglerin ürettiği organik asitler sonucunda olduğu düşünülmektedir. Çeşitler değerlendirildiğinde çoktan aza doğru pH değişimi; Grande II > Jaguar 4G = Bitkisiz ortam > Nilüfer sırasındadır. pH düşüşünde kontrole göre en etkili mikroalg dozu 6 g kg⁻¹ olduğu saptanmıştır.

Bulgularla aynı doğrultuda; Özbucak ve ark. (2018) yaptıkları çalışmada maden yataklarından izole edilen bazı bakteri türlerinin toprağa ilavesinin toprak kontrole göre pH'sını düşürücü etkisi olduğunu, benzer şekilde Aybar ve Sağlam (2022) yaptıkları çalışmada ağır metal kirliliği görülen alanlarda fitoremediasyon çalışmaları gerçekleştirmiş ve toprak pH'sında düşüş olduğunu, Tamer ve ark., (2016) yaptıkları çalışmada ise ayçiçeği bitkisi yetiştiriciliği yapılan topraklarda nispi oranda pH düşüşü bildirmişlerdir. Bu çalışmalara paralel olarak, Mahmood, (2016) yaptığı çalışmada mikroalg uygulamalarının toprak pH'sında önemli seviyede düşürdüğünü, Benzer şekilde pirinç yetiştiriciliğinde mikroalg uygulamalarının pH'yı düşürdüğü tespit edilmiştir (Elayarajan 2002).

4.1.1.2. Farklı Biyoremediasyon Uygulamalarının Toprak EC'si Üzerine Etkisi

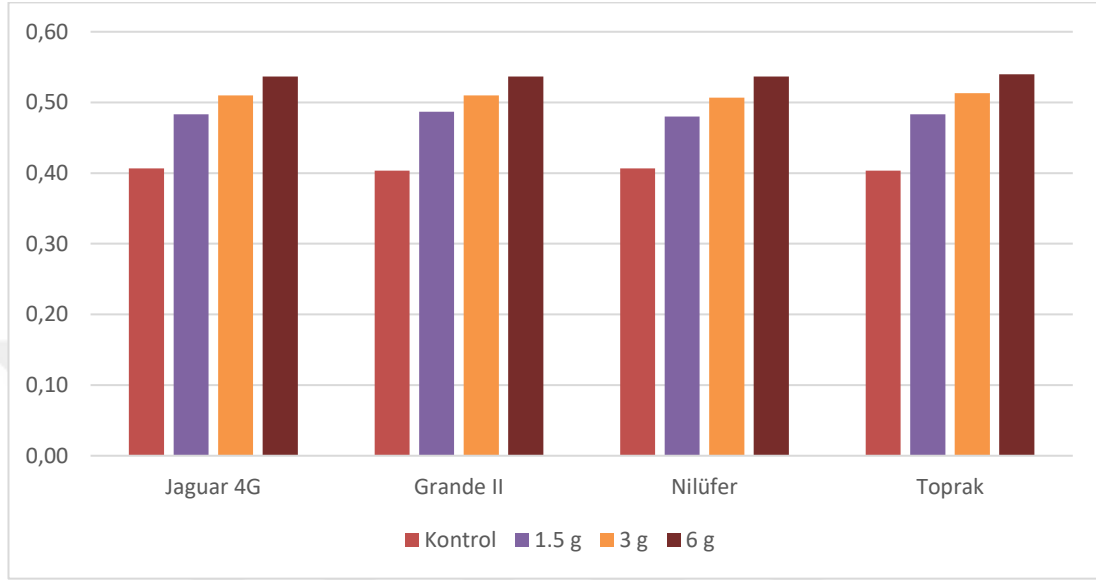
Festuca arundinacea çeşitleri ve farklı mikroalg dozlarının toprak EC'si değişimlerine ait varyans analiz tablosu Tablo 4.5'te, EC değişimlerine ait ortalama değerler Şekil 4.1.'de verilmiştir.

Tablo 4.5. Deneme toprağında çeşit ve uygulamalar arasındaki EC düzeylerine ait varyans analiz tablosu

Varyasyon Kaynakları	Serbestlik Derecesi	Kareler Ort.	F
Tekerrür	3	0.00001	4,5475
Çeşit	2	0,00013	0,4299
Uygulama	3	0,03911	1274,457**
Çeşit*Uygulama	9	0.0016	0,5505
Hata	30	0,00001	
Genel	47		

** : 0.01 düzeyinde önemli, * : 0.05 düzeyinde önemli

Varyans analiz tablosu incelendiğinde uygulamaların toprak EC'si üzerine etkisi %1 düzeyinde önemli bulunmuştur. Çeşit ve çeşit*uygulama interaksyonu istatistiksel olarak önemsiz bulunmuştur.



Şekil 4.1. Deneme toprağında farklı biyoremediasyon uygulamalarının EC değişimlerine ait ortalama değerler (dS m^{-1})

Deneme sonuçları değerlendirdiğinde, en yüksek EC değeri, 6 g kg^{-1} mikroalg dozunda 0.54 dS m^{-1} , en düşük EC değeri grubunda 0.4 dS m^{-1} ölçülmüştür. Toprak EC'sinden elde edilen verilere göre uygulama dozunun artışının çeşitlerde EC'yi arttırdığı belirlenmiştir.

Bulgulara paralel olarak, Mahmood (2016) toprakta mikroalg uygulamalarının kontrol gruplarına göre EC'yi arttırdığını bildirmiştir.

4.1.2. Farklı Biyoremediasyon Uygulamalarının Toprak Kireci ($\text{\%CaCO}_3$) Üzerine Etkisi

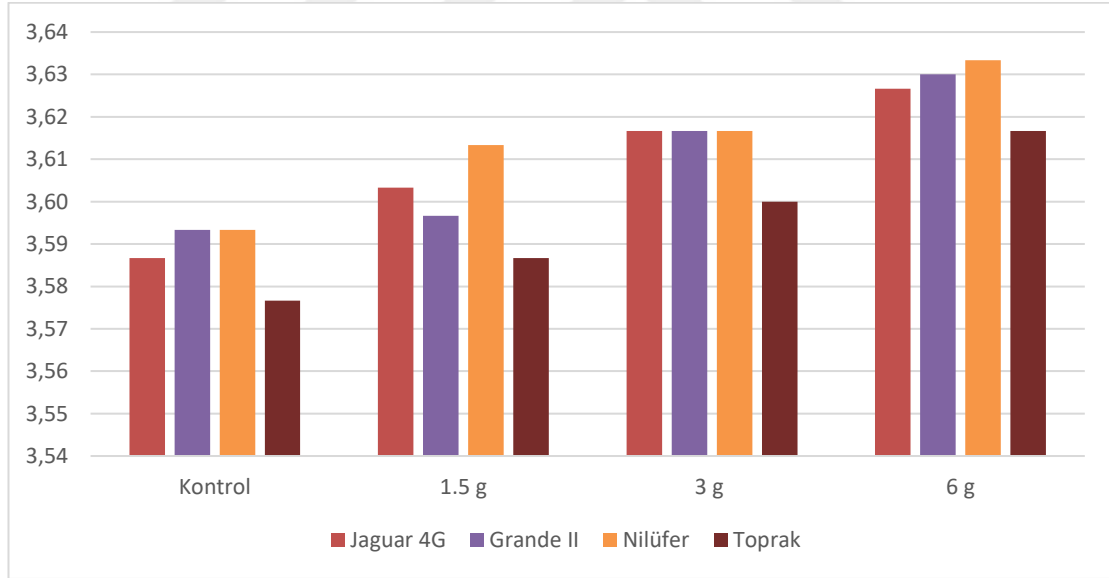
Deneme toprağında çeşit ve uygulamalar arasındaki $\text{\%CaCO}_3$ düzeylerine ait varyans analiz tablosu Tablo 4.7'te, deneme toprağında farklı biyoremediasyon uygulamalarının $\text{\%CaCO}_3$ değişimlerine ait ortalama değerler Şekil 4.2'de verilmiştir.

Tablo 4.6. Deneme toprağında çeşit ve uygulamalar arasındaki %CaCO₃ düzeylerine ait varyans analiz tablosu

Varyasyon Kaynakları	Serbestlik Derecesi	Kareler Ort.	F
Tekerrür	3	0.00001	1,7711
Çeşit	2	0,0008	13,9759
Uygulama	3	0,0033	58,6988**
Çeşit*Uygulama	9	0.0001	0,7068
Hata	30	0,0003	
Genel	47		

** : 0.01 düzeyinde önemli, * : 0.05 düzeyinde önemli

Varyans analiz tablosu incelendiğinde uygulamaların toprak %CaCO₃ üzerine etkisi %1 düzeyinde önemli bulunmuştur. Çeşit ve çeşit*uygulama interaksiyonu istatistiksel olarak önemsiz bulunmuştur.



Şekil 4.2. Deneme toprağında farklı biyoremediasyon uygulamalarının %CaCO₃ değişimlerine ait ortalama değerler

Saksı denemesi sonuçları değerlendirildiğinde en yüksek % CaCO₃ değerleri, 6 g kg⁻¹ dozundaki gruplarda en yüksek, kontrol gruplarında ise en düşük değerler belirlenmiştir.

4.1.3. Farklı Biyoremediasyon Uygulamalarının Toprak Organik Maddesine Etkisi

Deneme toprağında çeşit ve uygulamalar arasındaki organik madde düzeylerine ait varyans analiz tablosu Tablo 4.9’da, deneme toprağında farklı biyoremediasyon uygulamalarının organik madde değişimlerine ait ortalama değerler Şekil 4.10’da verilmiştir.

Tablo 4.7. Deneme toprağında çeşit ve uygulamalar arasındaki % Organik madde düzeylerine ait varyans analiz tablosu

Varyasyon Kaynakları	Serbestlik Derecesi	Kareler Ort.	F
Tekerrür	2	0.00001	0,6522
Çeşit	3	0,0014	110,6522**
Uygulama	3	0,0052	408,913**
Çeşit*Uygulama	9	0.0002	18,0435**
Hata	30	0,00001	
Genel	47		

** : 0.01 düzeyinde önemli, * : 0.05 düzeyinde önemli

Varyans analiz tablosu incelendiğinde uygulama, çeşit ve çeşit*uygulama interaksyonu toprak % organik maddesi üzerine etkisi %1 düzeyinde önemli bulunmuştur.

Tablo 4.8. Deneme toprağında farklı biyoremediasyon uygulamalarının % Organik madde değişimlerine ait ortalama değerler

Çeşitler	Mikroalg Dozları g kg ⁻¹				Ortalama
	Kontrol	1.5	3	6	
Jaguar 4G	1.31 ^{gh}	1.32 ^{ef}	1.35 ^{bc}	1.35 ^{bc}	1,33^c
Nilüfer	1.31 ^{fg}	1.33 ^{de}	1.36 ^{bc}	1.38 ^a	1,34^b
Grande II	1.30 ^h	1.31 ^{fgh}	1.34 ^{cd}	1.36 ^b	1,33^d
Bitkisiz Ortam	1.33 ^d	1.35 ^{bc}	1.36 ^b	1.36 ^b	1,35^a
Ortalama	1,31^d	1,33^c	1,35^b	1,36^a	

*: Aynı sütunda aynı harfle gösterilen ortalamalar arasında fark yoktur (p<0.05)

Tablo 4.10 incelendiğinde farklı uygulamalar sonucunda en yüksek organik madde değeri, Nilüfer çeşidi toprağında 6 g kg^{-1} mikroalg dozunda %1.38, en düşük organik madde Grande II çeşidi toprağında kontrol grubunda %1.31 olarak belirlenmiştir. Değerler %1.30-1.38 arasında yer almaktadır. Organik madde toprak için en önemli verimlilik parametreleri arasında yer almaktadır. Mikroalg ve Fetuca çeşitlerinin uygulaması, toprakta genel olarak kontrol grubuna göre organik madde düzeyi artış göstermiştir. Bu artışın mikroalg ilavesinin fotosentetik aktivite göstermesi ortamına organik madde sağlaması ile ilişkili olabileceği düşünülmektedir (Costa, 2014; Chen, 2011).

Bulgulara benzer şekilde Kaushik (1985) çalışmasında toprağına mikroalg uygulaması yapmış, altı aylık çalışma sonucunda toprak organik maddesinin nispi düzeyde arttırdığını bildirmiştir. Mahmood (2016) çalışmasında alg ilavesinin organik karbonu ve organik maddeyi arttırıcı etkilerinin olduğunu tespit etmiştir. Bulguların tersine, Aybar ve Sağlam (2022) yaptıkları çalışmada toprakta fitoremediasyon amaçlı uygulamalarının organik madde içeriğinde azalmaya yol açtığını saptamışlardır.

4.1.4. Farklı Biyoremediasyon Uygulamalarının Toprakta Yararışlı Fosfor Üzerine Etkisi

Deneme toprağında çeşit ve uygulamalar arasındaki YP düzeylerine ait varyans analiz tablosu Tablo 4.11’de, deneme toprağında farklı biyoremediasyon uygulamalarının YP değişimlerine ait ortalama değerler Şekil 4.12’de verilmiştir.

Tablo 4.9. Deneme toprağında çeşit ve uygulamalar arasındaki P düzeylerine ait varyans analiz tablosu

Varyasyon Kaynakları	Serbestlik Derecesi	Kareler Ortalaması	F
Tekerrür	2	0.0052	0.8680
Çeşit	3	0.0614	10.1865**
Uygulama	3	0.4420	73.3242**
Çeşit*Uygulama	9	0.0757	12.5624**
Hata	30	0,0060	
Genel	47		

** : 0.01 düzeyinde önemli, * : 0.05 düzeyinde önemli

Varyans analiz tablosu incelendiğinde uygulamaların toprak P'si üzerine etkisi %1 düzeyinde önemli bulunmuştur. Çeşit ve çeşit*uygulama interaksiyonu istatistiksel olarak önemsiz bulunmuştur.

Tablo 4.10. Deneme toprağında farklı biyoremediasyon uygulamalarının P değişimlerine ait ortalama değerler

Çeşitler	Mikroalg Dozları g kg ⁻¹				Ortalama
	Kontrol	1.5	3	6	
Jaguar 4G	2.77 ^{cd}	2.91 ^c	2.91 ^c	2.93 ^c	2.88^c
Nilüfer	2.93 ^c	2.96 ^c	2.98 ^c	3.35 ^{ab}	3.05^a
Grande II	2.88 ^c	2.92 ^c	2.92 ^c	3.23 ^b	2.99^{ab}
Bitkisiz Ortam	2.81 ^{cd}	2.95 ^c	2.58 ^d	3.50 ^a	2.96^{bc}
Ortalama	2.85^c	2.94^b	2.85^c	3.25^a	

*: Aynı sütunda aynı harfle gösterilen ortalamalar arasında fark yoktur (p<0.05)

Saksı denemesi sonuçları değerlendirildiğinde en yüksek yarayışlı P₂O₅ düzeyi, bitki yetiştiriciliği olmayan toprakta 6 g kg⁻¹ mikroalg dozunda 3.51 mg kg⁻¹, en düşük yarayışlı P₂O₅ düzeyi bitki yetiştiriciliği olmayan 3 g kg⁻¹ mikroalg dozunda 2.59 mg kg⁻¹ ölçülmüştür.

Mikroalg ve bitki uygulamalarının genelinde toprakta yarayışlı fosfor düzeyinde nispi düzeyde artış belirlenmiştir. Fosfor yarayışlılığı üzerinde olumlu etkilerinin, bitki kök metabolitleri ve toprak mikroorganizmalarının organik asitleri neticesinde ortamdaki H iyonlarının toprak pH'sını düşürebileceği, böylelikle alınabilir fosforu arttırabileceği düşünülmektedir (Schreiber, 2018).

Bulgularla paralel şekilde, Whitton ve ark. (1991) toprakta fosfor yarayışlılığının artmasının zamanla olacağını, yarayışlı fosfor düzeyinin desteklenmesinin alglerin ürettiği fosfataz enzimleri sayesinde olduğunu ifade etmişlerdir. Tunç (2015) yaptığı çalışmada mikroalg uygulamalarının toprakta yarayışlı fosforda artış eğilimi gösterdiğini ifade etmiştir. Benzer şekilde Mahmood (2016) alg uygulamalarının toprak yarayışlı fosforunu arttırıcı etkisi olabileceğini ifade etmiştir. Ancak alglerin fosfataz enzimlerinin etki edebilmesi için ortamda yeterli miktarda fosfor kaynağının olması

gerektiğini bildirmiştir. Schreiber ve ark. (2018) yaptıkları çalışmada alg uygulamalarının bitkinin kök bölgesinde besin elementlerini alınabilirliğini arttırdığını ifade etmişlerdir.

4.1.5. Farklı Biyoremediasyon Uygulamalarının Toplam Metal Konsantrasyonu Üzerine Etkisi

Hasat sonrası deneme topraklarının toplam Cd, Pb ve Zn konsantrasyonlarının toplam ağır metal analizleri için, mikrodalga cihazında yakılmış, yakılan örnek süzüklerinin ICP-OES'te okuması yapılmıştır. Okuma sonucu elde edilen toplam ağır metal verilerinin değerlendirilmesi için aralarındaki fark ve önemlilik düzeyleri incelenmiştir.

4.1.5.1. Farklı Biyoremediasyon Uygulamalarının Hasat Sonrası Toplam Cd Konsantrasyonu Üzerine Etkisi

Deneme toprağında çeşit ve uygulamalar arasındaki toplam Cd konsantrasyonlarına ait varyans analiz tablosu Tablo 4.13'te, deneme toprağında farklı biyoremediasyon uygulamalarının toplam Cd konsantrasyonlarına ait ortalama değerler Şekil 4.14'te verilmiştir.

Tablo 4.11. Deneme toprağında çeşit ve uygulamalar arasındaki Toplam Cd konsantrasyonlarına ait varyans analiz tablosu

Varyasyon Kaynakları	Serbestlik Derecesi	Kareler Ortalaması	F
Tekerrür	2	0.155	0.1883
Çeşit	3	62089	74781**
Uygulama	3	6812	8204**
Çeşit*Uygulama	9	2384	2871**
Hata	30	0,8304	
Genel	47		

** : 0.01 düzeyinde önemli, * : 0.05 düzeyinde önemli

Varyans analiz tablosu incelendiğinde uygulama, çeşit ve çeşit*uygulama interaksyonu hasat sonrası toplam Cd üzerine etkisi istatistiksel olarak %1 düzeyinde önemli bulunmuştur.

Tablo 4.12. Deneme toprağında farklı biyoremediasyon uygulamalarının toplam Cd konsantrasyonlarına ait ortalama değerler

Çeşitler	Mikroalg Dozları g kg ⁻¹				Ortalama
	Kontrol	1.5	3	6	
Jaguar 4G	72.55 ^f	70.61 ^{fg}	49.17 ^{jk}	46.63 ^k	59.74 ^d
Nilüfer	77.90 ^e	71.48 ^f	52.81 ⁱ	50.98 ^{ij}	63.29 ^c
Grande II	71.24 ^f	68.14 ^g	63.66 ^h	61.51 ^h	66.14 ^b
Bitkisiz Ortam	283.79 ^a	227.56 ^b	186.89 ^c	129.05 ^d	206.82 ^a
Ortalama	126.37 ^a	109.44 ^b	88.13 ^c	72.04 ^d	

*: Aynı sütunda aynı harfle gösterilen ortalamalar arasında fark yoktur (p<0.05)

Tablo 4.14 değerlendirildiğinde en yüksek toplam Cd konsantrasyonu bitki yetiştiriciliği olmayan toprakta kontrol grubunda 283.80 mg kg⁻¹, en düşük Jaguar 4G'de 6 g kg⁻¹ mikroalg uygulamasından 46.63 mg kg⁻¹ ölçülmüştür. Toplam Cd konsantrasyonunun çeşitlere göre çoktan aza doğru sıralaması Bitkisiz ortam > Grande II > Nilüfer > Jaguar 4G şeklinde olup, en etkili çeşit Jaguar 4G grubu olarak belirlenmiştir. Mikroalg dozlarında en etkili doz 6 mg kg⁻¹ olarak belirlenmiştir.

Bulgulara paralel olarak, Arıkan (2021) ağır metal kirliliği görülen topraklarda fitoremediasyon çalışmaları gerçekleştirmiş, kontrol toprağı ile kıyaslandığında uygulama olan topraklarda toplam kadmiyum konsantrasyonunda azalma olduğunu ifade etmiştir. Ağırağaç ve Çelebi (2021) yaptıkları çalışmada atık sularla sulanan toprakta *Festuca* yetiştiriciliği sonucunda toplam ve yarıyırlı Cd konsantrasyonunun nispi düzeyde azalma gösterdiğini bildirmişlerdir. Benzer şekilde, Wasilkowski ve ark. (2019) yaptıkları çalışmada, Cd kirliliği olan toprakta *Festuca* bitkisinin yetiştirildiği topraklarda toplam ve yarıyırlı Cd konsantrasyonunda azalma olduğunu tespit etmişlerdir.

4.1.5.2. Farklı Biyoremediasyon Uygulamalarının Toplam Pb Konsantrasyonu Üzerine Etkisi

Deneme toprağında çeşit ve uygulamalar arasındaki toplam Pb konsantrasyonlarına ait varyans analiz tablosu Tablo 4.15'te, deneme toprağında farklı biyoremediasyon

uygulamalarının toplam Pb konsantrasyonlarına ait ortalama değerler Tablo 4.16’da verilmiştir.

Tablo 4.13. Deneme toprağında çeşit ve uygulamalar arasındaki toplam Pb konsantrasyonlarına ait varyans analiz tablosu

Varyasyon Kaynakları	Serbestlik Derecesi	Kareler Ortalaması	F
Tekerrür	2	23999	5.9487
eşit	3	70132197	17383.9**
Uygulama	3	6189773	1534.28**
eşit*Uygulama	9	2242586	555.878**
Hata	30	4034.31	
Genel	47		

** : 0.01 düzeyinde önemli, * : 0.05 düzeyinde önemli

Varyans analiz tablosu incelendiğinde toplam Pb konsantrasyonlarına üzerine etkisi, uygulama, çeşit ve çeşit*uygulama interaksyonu istatistiksel olarak %1 düzeyinde önemli bulunmuştur.

Tablo 4.14. Deneme toprağında farklı biyoremediasyon uygulamalarının toplam Pb konsantrasyonlarına ait ortalama değerler

Çeşitler	Mikroalg Dozları g kg ⁻¹				Ortalama
	Kontrol	1.5	3	6	
Jaguar 4G	2609.40 ^f	2449.07 ^{fg}	2270.11 ^{gh}	1704.57 ^k	2258.29 ^c
Nilüfer	2813.53 ^e	2429.51 ^{fg}	2227.72 ^{hi}	2069.86 ^{ij}	2385.15 ^b
Grande II	2454.62 ^{fg}	2181.98 ^{hi}	2042.20 ^{ij}	1938.71 ^j	2154.38 ^d
Bitkisiz Ortam	9878.18 ^a	7197.77 ^b	5876.38 ^c	5436.77 ^d	7097.27 ^a
Ortalama	4438.93 ^a	3564.58 ^b	3104.10 ^c	2787.47 ^d	

* : Aynı sütunda aynı harfle gösterilen ortalamalar arasında fark yoktur (p<0.05)

Tablo 4.16 incelendiğinde hasat sonrası toprak toplam Pb değerleri 1704.18-9878.19 mg kg⁻¹ arasında bulunmuştur. En yüksek toplam Pb konsantrasyonu bitki yetiştiriciliği olmayan toprakta kontrol grubunda 9878.19 mg kg⁻¹, en düşük toplam Pb konsantrasyonu Jaguar 4G çeşidinde 6 g kg⁻¹ mikroalg dozunda 1704.18 mg kg⁻¹ belirlenmiştir. Toprak toplam Pb konsantrasyonu çoktan aza doğru çeşitler arasında Bitkisiz ortam > Nilüfer > Jaguar 4G > Grande II sırasında olup toplam Pb kaldırılmasında en etkili çeşit Grande II, mikroalg dozlarında toplam Pb'nin düşüşünde en etkili doz 6 g kg⁻¹ olarak belirlenmiştir.

Bulgulara benzer şekilde, Wang ve ark. (2010) yaptıkları çalışmada Pb kirliliği olan alanlarda mikroalg uygulamalarının toplam ve yarayışlı Pb konsantrasyonunu önemli düzeyde azalttığını, Hammouda ve ark. (2010) yaptıkları çalışmada mikroalg uygulamalarının Pb ve diğer ağır metallerin gideriminde kullanılabileceğini ifade etmişlerdir. Mwangi ve Ngila (2012) çalışmalarında, mikroalglerin hücre duvarlarındaki fonksiyonel grupları sayesinde Pb gibi ağır metalleri biyosorbe ettiklerini böylelikle ortamdaki toplam ve yarayışlı durumda olan Pb gibi ağır metallerin azaldığını saptamışlardır.

4.1.5.3. Farklı Biyoremediasyon Uygulamalarının Toplam Zn Konsantrasyonu Üzerine Etkisi

Deneme toprağında çeşit ve uygulamalar arasındaki toplam Zn konsantrasyonlarına ait varyans analiz tablosu Tablo 4.18'de, deneme toprağında farklı biyoremediasyon uygulamalarının toplam Zn konsantrasyonlarına ait ortalama değerler Tablo 4.19'da verilmiştir.

Tablo 4.15. Deneme toprağında çeşit ve uygulamalar arasındaki hasat sonrası toprak toplam Zn konsantrasyonlarına ait varyans analiz tablosu

Varyasyon Kaynakları	Serbestlik Derecesi	Kareler Ort.	F
Tekerrür	2	28.1707	0.9264
Çeşit	3	2035921756	66949938**
Uygulama	3	215739157	7094439**
Çeşit*Uygulama	9	60111864.11	1976739**
Hata	30	30.4096	
Genel	47		

** : 0.01 düzeyinde önemli, * : 0.05 düzeyinde önemli

Varyans analiz tablosu incelendiğinde hasat sonrası toprak toplam Zn konsantrasyonlarına üzerine etkisi, uygulama, çeşit ve çeşit*uygulama interaksyonu istatistiksel olarak %1 düzeyinde önemli bulunmuştur.

Tablo 4.16. Deneme toprağında farklı biyoremediasyon uygulamalarının Zn konsantrasyonlarına ait ortalama değerler

Çeşitler	Mikroalg Dozları g kg ⁻¹				Ortalama
	Kontrol	1.5	3	6	
Jaguar 4G	12304.33 ^f	10560.00 ^j	9574.12 ^l	847527 ⁿ	10228.43^c
Nilüfer	13691.18 ^e	11401.27 ^h	8703.22 ^m	7738.82 ^o	10383.62^b
Grande II	11977.45 ^g	10868.25 ⁱ	9867.41 ^k	7584.77 ^p	10074.47^d
Bitkisiz Ortam	48135.06 ^a	42032.85 ^b	31153.32 ^c	2379217 ^d	36278.35^a
Ortalama	21527.01^a	18715.59^b	14824.51^c	11897.76^d	

*: Aynı sütunda aynı harfle gösterilen ortalamalar arasında fark yoktur (p<0.05)

Tablo 4.19 incelendiğinde toplam Zn konsantrasyonu değerleri 7584.78-48135.07 mg kg⁻¹ arasında değişmektedir. En yüksek toplam Zn konsantrasyonu bitki yetiştiriciliği olmayan toprakta kontrol grubunda 48135.07 mg kg⁻¹, en düşük toplam Zn konsantrasyonu Grande II çeşidinde 6 g kg⁻¹ mikroalg dozunda 7584.78 mg kg⁻¹ belirlenmiştir. Toplam Zn konsantrasyonu çeşitlerin topraklarında çoktan aza doğru sırasıyla Bitkisiz ortam > Nilüfer > Jaguar 4G > Grande II sırasında olup total Zn düzeyinin azalmasında en etkili çeşit Grande II, mikroalg dozlarında en etkili doz 6 g kg⁻¹ olarak belirlenmiştir.

Bulgulaa paralel olarak, Zn düzeyinde azalmanın nedeni, *Festuca* çeşitlerinin akümülyasyon potansiyeli ve mikroalglerin hücre duvarlarına Zn'yi bağlaması ya da hücreler arasında biyobirikimi ile olabileceği düşünülmektedir (Shibi, 2012). Bulgulara benzer şekilde Wasilkowski ve ark. (2019) yaptıkları çalışmada ağır metal kirliliği olan ortamda *Festuca* yetiştiriciliğinin toplam ve yarayıslı Zn konsantrasyonunu azalttığını, Sbihi ve ark. (2012) çalışmalarında mikroalglerin toplam ve yarayıslı Zn metalini ortamdaki uzaklaştırmak için iyi bir potansiyel olduğunu bildirmişlerdir.

4.1.6. Farklı Biyoremediasyon Uygulamalarının Yarayışlı Metal Konsantrasyonu Üzerine Etkisi

Hasat öncesi ve sonrası deneme topraklarının toplam Cd, Pb ve Zn konsantrasyonlarının yarayışlı ağır metal analizleri için, DTPA ile çalkalanmış, çalkalanan örneklerin süzüklerinin ICP- OES'te okuması yapılmıştır. Okuma sonucu elde edilen yarayışlı ağır metal verilerinin değerlendirilmesi için aralarındaki fark ve önemlilik düzeyleri incelenmiştir.

4.1.6.1. Deneme Toprağının Hasat Öncesi ve Sonrası Yarayışlı Metal Konsantrasyonları

Kayseri- İncesu bölgesinden alınan toprak örneklerinin yarayışlı metal analizinin deneme kurulumundan önce toprak yarayışlı metal analizleri yapılmış, Cd, Pb ve Zn konsantrasyonları ve sapmaları Tablo 4.20'de verilmiştir.

Tablo 4. 17. Deneme Toprağının Hasat Öncesi Yarayışlı Metal Konsantrasyonları ve standart sapmaları (n=3)

Ağır metal çeşitleri	Yarayışlı metal konsantrasyonları
Cd (mg kg ⁻¹)	24.59±0.002
Pb (mg kg ⁻¹)	61.37±0.001
Zn (mg kg ⁻¹)	1047.88±0.001

Hasat sonrası deneme topraklarının yarayışlı Cd, Pb ve Zn konsantrasyonlarının ölçümü için ICP- OES'te okuması yapılmış, okuma sonucu elde edilen yarayışlı ağır metal değerlerinin karşılaştırılması için aralarındaki fark ve önemlilik düzeyleri incelenmiştir.

4.1.6.1.2. Deneme Toprağının Hasat Sonrası Yarayışlı Cd Konsantrasyonu Üzerine Etkisi

Deneme toprağında çeşit ve uygulamalar arasındaki hasat sonrası toprak yarayışlı Cd konsantrasyonlarına ait varyans analiz tablosu Tablo 4.21'de, deneme toprağında farklı biyoremediasyon uygulamalarının toprak yarayışlı Cd konsantrasyonlarına ait ortalama değerler Tablo 4.22'de verilmiştir.

Tablo 4.18. Deneme toprağında çeşit ve uygulamalar arasındaki toprakta yarayışlı Cd konsantrasyonlarına ait varyans analiz tablosu

Varyasyon Kaynakları	Serbestlik Derecesi	Kareler Ortalaması	F
Tekerrür	2	0.16217	0.3239
Çeşit	3	89.43314	178.6091**
Uygulama	3	128.6815	256.993**
Çeşit*Uygulama	9	4.0794	8.1472**
Hata	30	0.5007	
Genel	47		

** : 0.01 düzeyinde önemli, * : 0.05 düzeyinde önemli

Varyans analiz tablosu incelendiğinde hasat sonrası toprak yarayışlı Cd konsantrasyonları üzerine etkisi, uygulama, çeşit ve çeşit*uygulama interaksyonu istatistiksel olarak %1 düzeyinde önemli bulunmuştur.

Tablo 4.19. Deneme toprağında farklı biyoremediasyon uygulamalarının toprakta yarayışlı Cd konsantrasyonlarına ait ortalama değerler

Çeşitler	Mikroalg Dozları g kg ⁻¹				Ortalama
	Kontrol	1,5	3	6	
Jaguar 4G	21.44 ^c	18.67 ^{de}	16.52 ^{ef}	11.65 ¹	17.07 ^b
Nilüfer	21.79 ^{bc}	18.44 ^{de}	15.28 ^{fg}	13.08 ^{hi}	17.15 ^b
Grande II	22.05 ^{bc}	18.10 ^e	15.63 ^{fg}	14.27 ^{gh}	17.51 ^b
Bitkisiz Ortam	24.7 ^a	23.90 ^b	21.64 ^c	20.52 ^{cd}	22.69 ^a
Ortalama	22.49 ^a	19.78 ^b	17.27 ^c	14.88 ^d	

*: Aynı sütunda aynı harfle gösterilen ortalamalar arasında fark yoktur (p<0.05)

Tablo 4.22 incelendiğinde değerler 11.65-27.70 mg kg⁻¹ arasında değişmektedir. En yüksek yarayışlı Cd konsantrasyonu bitki yetiştiriciliği olmayan toprakta, kontrol grubunda 24.70 mg kg⁻¹, en düşük yarayışlı Cd konsantrasyonu Jaguar 4G çeşidinde 6 g kg⁻¹ mikroalg dozunda 11.65 mg kg⁻¹ ölçülmüştür. Hasat sonrası toprak yarayışlı Cd

konsantrasyonu çeşitlerin toprağında çoktan aza doğru sırasıyla Bitkisiz ortam > Grande II > Nilüfer > Jaguar 4G sırasında ve yarayışlı Cd düşünde en etkili çeşit Jaguar 4G, en etkili doz 6 g kg⁻¹ olarak belirlenmiştir.

Bulgulara benzer şekilde, Ağırağaç ve Çelebi (2021) çalışmalarında atık sularla sulanan toprakta *Festuca* yetiştiriciliği sonucunda toplam ve yarayışlı Cd konsantrasyonunda nispi düzeyde azalma gösterdiğini, Steliga ve Kluk (2020) yaptıkları çalışmada çoklu metal kirliliği ve petrol kirliliği görülen topraklarda *Festuca* yetiştiriciliği sonrası toplam ve yarayışlı Cd değerlerinde önemli düzeyde azalmalar olduğunu ifade etmişlerdir. Aynı şekilde, Wasilkowski ve ark. (2019) yaptıkları çalışmada Cd kirliliği olan toprakta *Festuca* bitkisinin yetiştirildiği topraklarda toplam ve yarayışlı Cd konsantrasyonunun azaldığını bildirmişlerdir.

4.1.6.1.3. Deneme Toprağının Hasat Sonrası Yarayışlı Pb Konsantrasyonu Üzerine Etkisi

Deneme toprağında çeşit ve uygulamalar arasındaki hasat sonrası toprak yarayışlı Pb konsantrasyonlarına ait varyans analiz tablosu Tablo 4.23'te, deneme toprağında farklı biyoremediasyon uygulamalarının toprak yarayışlı Pb konsantrasyonlarına ait ortalama değerler Tablo 4.24'te verilmiştir.

Tablo 4. 23. Deneme toprağında çeşit ve uygulamalar arasındaki toprakta yarayışlı Pb konsantrasyonlarına ait varyans analiz tablosu

Varyasyon Kaynakları	Serbestlik Derecesi	Kareler Ortalaması	F
Tekerrür	2	0.0654	0.7735
Çeşit	3	1553.563	18381.65**
Uygulama	3	138.0333	1633.2**
Çeşit*Uygulama	9	1.8905	22.3692**
Hata	30	0.0845	
Genel	47		

** : 0.01 düzeyinde önemli, * : 0.05 düzeyinde önemli

Varyans analiz tablosu incelendiğinde hasat sonrası toprakta yarayışlı Pb konsantrasyonları üzerine etkisi, uygulama, çeşit ve çeşit*uygulama interaksyonu istatistiksel olarak %1 düzeyinde önemli bulunmuştur.

Tablo 4. 24. Deneme toprağında farklı biyoremediasyon uygulamalarının toprakta yarayışlı Pb konsantrasyonlarına ait ortalama değerler

Çeşitler	Mikroalg Dozları g kg ⁻¹				
	Kontrol	1.5	3	6	Ortalama
Jaguar 4G	39.47 ^e	37.40 ^f	33.36 ^h	29.32 ^j	34.89^d
Nilüfer	39.51 ^e	38.78 ^e	35.74 ^g	33.01 ^h	36.76^b
Grande II	39.37 ^e	37.77 ^f	34.91 ^g	31.76 ⁱ	35.95^c
Bitkisiz Ortam	61.21 ^a	60.31 ^b	57.61 ^c	55.16 ^d	58.57^a
Ortalama	44.89^a	43.56^b	40.40^c	37.31^d	

*: Aynı sütunda aynı harfle gösterilen ortalamalar arasında fark yoktur (p<0.05)

Tablo 4.24. incelendiğinde, en yüksek yarayışlı Pb konsantrasyonu bitki yetiştiriciliği olmayan toprakta kontrol grubunda 61.21 mg kg⁻¹, en düşük yarayışlı Pb konsantrasyonu Jaguar 4G çeşidinde 6 g kg⁻¹ mikroalg dozunda 29.32 mg kg⁻¹ ölçülmüştür. Toprakta yarayışlı Pb konsantrasyonunun çoktan aza doğru çeşitlere göre Bitkisiz ortam > Nilüfer > Grande II > Jaguar 4G sırasındadır. Yarayışlı Pb düşüşünde en etkili çeşit Jaguar 4G, en etkili doz 6 g kg⁻¹ olarak belirlenmiştir.

Bulgularla aynı doğrultuda, Hackbarth ve ark. (2014) mikroalglerin bulunduğu ortamda özellikle Cd ve Pb'nin mikroalgin karboksil gruplarına bağlanmaları ile gideriminde etkili olduğunu ifade etmişlerdir. Mwangi ve Ngila (2012) çalışmalarında, mikroalglerin hücre duvarlarındaki fonksiyonel grupları sayesinde Pb gibi ağır metalleri biyosorbe ettiklerini böylelikle ortamdaki toplam ve yarayışlı durumda olan Pb gibi ağır metallerin azaldığını bildirmişlerdir.

4.1.6.1.4. Deneme Toprağının Hasat Sonrası Yarayışlı Zn Konsantrasyonu Üzerine Etkisi

Deneme toprağında çeşit ve uygulamalar arasındaki hasat sonrası toprak yarayışlı Zn konsantrasyonlarına ait varyans analiz tablosu Tablo 4.25'te, deneme toprağında farklı biyoremediasyon uygulamalarının toprak yarayışlı Zn konsantrasyonlarına ait ortalama değerler Tablo 4.26'da verilmiştir.

Tablo 4.20. Deneme toprağında çeşit ve uygulamalar arasındaki toprak yarayışlı Zn konsantrasyonlarına ait varyans analiz tablosu

Varyasyon Kaynakları	Serbestlik Derecesi	Kareler Ortalaması	F
Tekerrür	2	0.0325583	0.1725
Çeşit	3	411322.07	2179607**
Uygulama	3	53399.433	282965.1**
Çeşit*Uygulama	9	711.12222	3768.24**
Hata	30	0.19	
Genel	47		

** : 0.01 düzeyinde önemli, * : 0.05 düzeyinde önemli

Varyans analiz tablosu incelendiğinde hasat sonrası toprakta yarayışlı Zn konsantrasyonları üzerine etkisi, uygulama, çeşit ve çeşit*uygulama interaksyonu istatistiksel olarak %1 düzeyinde önemli bulunmuştur.

Tablo 4.21. Deneme toprağında farklı biyoremediasyon toprak yarayışlı Zn konsantrasyonlarına ait ortalama değerler

Çeşitler	Mikroalg Dozları g kg ⁻¹				Ortalama
	Kontrol	1.5	3	6	
Jaguar 4G	669.09 ^f	587.11 ^j	550.85 ^l	510.90 ^o	579.48 ^c
Nilüfer	654.88 ^g	590.98 ⁱ	537.27 ^m	528.27 ⁿ	577.80 ^d
Grande II	670.51 ^e	613.93 ^h	574.04 ^k	528.05 ⁿ	596.63 ^b
Bitkisiz Ortam	1047.34 ^a	993.23 ^b	920.08 ^c	857.46 ^d	954.53 ^a
Ortalama	760.45 ^a	696.31 ^b	645.56 ^c	606.12 ^d	

*: Aynı sütunda aynı harfle gösterilen ortalamalar arasında fark yoktur (p<0.05)

Tablo 4.26 incelendiğinde yarayışlı Zn konsantrasyonu değerleri 510.9-1047.34 mg kg⁻¹ arasında değişmektedir. En yüksek toprakta yarayışlı Zn konsantrasyonu bitki yetiştiriciliği olmayan kontrol grubunda 1047.34 mg kg⁻¹, en düşük yarayışlı Zn konsantrasyonu Jaguar 4G çeşidinde 6 g kg⁻¹ mikroalg dozunda 510.90 mg kg⁻¹ ölçülmüştür. Toprakta yarayışlı Zn konsantrasyonu çoktan aza doğru çeşitlerde Bitkisiz ortam > Grande II > Jaguar 4G > Nilüfer sırasındadır. Toprak yarayışlı Zn konsantrasyonlarında en etkili düşüş çeşitlerde Nilüfer, dozlarda 6 g kg⁻¹ olarak belirlenmiştir.

Bulguları destekler doğrultuda, Heidarpour ve ark. (2019) yaptıkları çalışmada endüstriyel atık sularda alg uygulamalarının Zn giderim potansiyelinde önemli düzeyde etkili olduğunu ve kirli ortamdaki Zn konsantrasyonunu azalttığını, Duyuşen ve ark. (2016) funda topraklarına farklı dozlardaki deri arıtma çamurları uygulamaları sonucu ortaya çıkan yüksek Zn düzeyinin *Festuca arundinacea* bitkisi ile alımının yüksek olduğunu ve sonucunda ortamdan yarayışlı miktarın uzaklaştırıldığını bildirmişlerdir.

4.2. *Festuca Arundinacea* Yetiştiriciliği ve Farklı Dozlarda Mikroalg Uygulamaları Sonucunda Elde Edilen Bazı Agro-Morfolojik Özellikler

Yürütülen saksı çalışmasında çoklu metal kirliliği belirlenen topraklarda *Festuca* çeşitleri yetiştirilmiş ve *Haemotacocus pluvialis* mikroalg dozları uygulanmıştır. Biyoremediasyon uygulamalarının bitki agro-morfolojik özellikleri üzerine etkisinin sonuçları, sapmaları ve önemlilik düzeyleri incelenmiştir.

4.2.1. *Festuca Arundinacea* Yetiştiriciliği ve Farklı Dozlarda Mikroalg Uygulamalarının 1. Ay Toprak Üstü Aksamı Yaş ve Kuru Ağırlığı Üzerine Etkisi

Deneme toprağında çeşit ve uygulamalar arasındaki 1. ay toprak üstü aksamı yaş ve kuru ağırlığı üzerine etkisine ait varyans analiz tablosu Tablo 4.27’de, deneme toprağında farklı biyoremediasyon uygulamalarının 1. ay toprak üstü aksamı yaş ağırlığı üzerine etkisine ait ortalama değerler Tablo 4.28’de, kuru ağırlığı üzerine etkisi Tablo 4.29’da verilmiştir.

Tablo 4.22. Deneme toprağında çeşit ve uygulamalar arasındaki 1.ay yaş ve kuru ağırlıklarına ait varyans analiz tablosu

Varyasyon Kaynakları	Yaş Ağırlık			Kuru Ağırlık		
	Serbestlik Derecesi	Kareler Ortalaması	F	Serbestlik Derecesi	Kareler Ortalaması	F
Tekerrür	2			2		
		0.0000005	0.3615		0.00001	1.37500
Çeşit	2	0.0048843	3026.9110**	2	0.0027	334.4687**
Uygulama	3	0.00081622	505.8279**	3	0.0006	79.7500**
Çeşit*Uygulama	6	0.00270966	1679.23**	6	0.0017	218.9687**
Hata	22			22		
		0.00000161			0.00001	1.37500
Genel	35			35		

** : 0.01 düzeyinde önemli, * : 0.05 düzeyinde önemli

Varyans analiz tablosu incelendiğinde hasat sonrası 1.ay yaş ve kuru ağırlıkları üzerine etkisi, uygulama, çeşit ve çeşit*uygulama interaksyonu istatistiksel olarak %1 düzeyinde önemli bulunmuştur.

Tablo 4.23. Deneme toprağında farklı biyoremediasyon uygulamalarının 1. ay yaş ağırlık değişimlerine ait ortalama değerler (g)

Çeşitler	Mikroalg Dozları g kg ⁻¹				
	Kontrol	1.5	3	6	Ortalama
Jaguar 4G	0.17 ^g	0.16 ^{gh}	0.18 ^f	0.16 ^l	0.17^c
Nilüfer	0.21 ^d	0.22 ^b	0.23 ^c	0.19 ^e	0.21^a
Grande II	0.16 ^{gh}	0.16 ^{gh}	0.16 ^h	0.25 ^a	0.19^b
Ortalama	0.18^d	0.18^c	0.18^b	0.20^a	

*: Aynı sütunda aynı harfle gösterilen ortalamalar arasında fark yoktur (p<0.05)

Tablo 4.28 incelendiğinde ilk hasat yaş ağırlık değerleri 0.16-0.26 g arasında belirlenmiştir. En yüksek yaş ağırlık Grande II çeşidinde 6 g kg⁻¹ mikroalg dozunda 0.26 g, en düşük Jaguar 4G çeşidinde 6 g kg⁻¹ mikroalg dozunda 0.16 g olarak belirlenmiştir. İlk hasat bitki yaş ağırlığında en etkili çeşit Nilüfer, mikroalg dozunda da 6 g kg⁻¹ olarak belirlenmiştir.

Tablo 4.24. Deneme toprağında farklı biyoremediasyon uygulamalarının 1.ay kuru ağırlık değişimlerine ait ortalama değerler (g)

Çeşitler	Mikroalg Dozları g kg ⁻¹				Ortalama
	Kontrol	1.5	3	6	
Jaguar 4G	0.07 ^e	0.07 ^e	0.08 ^d	0.07 ^e	2.00^b
Nilüfer	0.11 ^e	0.1 ^b	0.11 ^b	0.09 ^d	2.16^{ab}
Grande II	0.07 ^e	0.07 ^e	0.073 ^e	0.14 ^a	2.25^a
Ortalama	2.11^{ab}	2.00^b	2.11^{ab}	2.33^a	

*: Aynı sütunda aynı harfle gösterilen ortalamalar arasında fark yoktur (p<0.05)

Tablo 4.29 incelendiğinde ilk hasat kuru ağırlık değerleri 0.07-0.14 g arasında belirlenmiştir. En düşük kuru ağırlık Jaguar 4G çeşidinde 6 g kg⁻¹ mikroalg dozunda 0.07 g, en yüksek Grande II çeşidinde 6 g kg⁻¹ mikroalg dozunda 0.14 g ölçülmüştür. Kuru ağırlık üzerine en etkili çeşit Grande II, mikroalg dozu 6 g kg⁻¹ olarak belirlenmiştir.

4.2.2. *Festuca Arundinecea* Yetiştiriciliği ve Farklı Dozlarda Mikroalg Uygulamalarının 2. Ay Toprak Üstü Aksamı Yaş ve Kuru Ağırlığı Üzerine Etkisi

Deneme toprağında çeşit ve uygulamalar arasındaki 2. ay toprak üstü aksamı yaş ve kuru ağırlığı üzerine etkisine ait varyans analiz tablosu Tablo 4.30'da, deneme toprağında farklı biyoremediasyon uygulamalarının 2. ay toprak üstü aksamı yaş ağırlığı üzerine etkisine ait ortalama değerler Tablo 4.31'de, kuru ağırlığı üzerine etkisi Tablo 4.32'de verilmiştir.

Tablo 4.25. Deneme toprağında çeşit ve uygulamalar arasındaki 2. ay yaş ve kuru ağırlıklarına ait varyans analiz tablosu

Varyasyon Kaynakları	Yaş Ağırlık			Kuru Ağırlık		
	Serbestlik Derecesi	Kareler Ortalaması	F	Serbestlik Derecesi	Kareler Ortalaması	F
Tekerrür	2	0.0842	1.0121	2	0.000003	1.1017
Çeşit	2	29389	3530183**	2	0.0156	5670.8380**
Uygulama	3	29388	3530064**	3	0.0032	1194.0570**
Çeşit*Uygulama	6	29392	3530521**	6	0.0025	930.1396**
Hata	22	0.8181		22	0.000002	1.1017
Genel	35			35		

** : 0.01 düzeyinde önemli, * : 0.05 düzeyinde önemli

Varyans analiz tablosu incelendiğinde hasat sonrası 2.ay yaş ve kuru ağırlıkları üzerine etkisi, uygulama, çeşit ve çeşit*uygulama interaksiyonu istatistiksel olarak %1 düzeyinde önemli bulunmuştur.

Tablo 4.26. Deneme toprağında farklı biyoremediasyon uygulamalarının 2. ay yaş ağırlık değişimlerine ait ortalama değerler (g)

Çeşitler	Mikroalg Dozları g kg ⁻¹				Ortalama
	Kontrol	1.5	3	6	
Jaguar 4G	0.93 ^b	0.89 ^b	0.87 ^b	0.76 ^b	0.86 ^b
Nilüfer	0.49 ^b	12.16 ^b	0.66 ^b	0.69 ^b	0.62 ^b
Grande II	0.61 ^b	0.78 ^b	0.81 ^b	1085 ^a	271.80 ^a
Ortalama	0.67 ^b	0.77 ^b	0.78 ^b	362.15 ^a	

*: Aynı sütunda aynı harfle gösterilen ortalamalar arasında fark yoktur (p<0.05)

Tablo 4.31 incelendiğinde ikinci hasat sonrası yaş ağırlık ölçümlerine göre değerler 0.5-1.09 g arasında değişmektedir.En yüksek yaş ağırlık Grande II çeşidinde 6 g kg⁻¹ mikroalg dozunda 1.09 g, en düşük Nilüfer çeşidinde kontrol grubunda 0.50 g ölçülmüştür. İkinci hasat yaş ağırlıkta en etkili çeşit Grande II, mikroalg dozu 6 g kg⁻¹ olarak belirlenmiştir.

Tablo 4.27. Deneme toprağında farklı biyoremediasyon uygulamalarının 2. ay kuru ağırlık değişimlerine ait ortalama değerler (g)

Çeşitler	Mikroalg Dozları g kg ⁻¹				Ortalama
	Kontrol	1,5	3	6	
Jaguar 4G	0.19 ^b	0.16 ^e	0.12 ^f	0.20 ^a	0.17 ^a
Nilüfer	0.09 ^h	0.12 ^f	0.09 ^h	0.10 ^g	0.10 ^b
Grande II	0.12 ^f	0.17 ^d	0.18 ^c	0.20 ^a	0.17 ^a
Ortalama	0.13 ^c	0.15 ^b	0.13 ^d	0.17 ^a	

*: Aynı sütunda aynı harfle gösterilen ortalamalar arasında fark yoktur (p<0.05)

Tablo 4.32 incelendiğinde ikinci hasat kuru ağırlık değerleri 0.1-0.21 arasında değişmektedir. En yüksek kuru ağırlık Grande II ve Jaguar 4G çeşidinde 6 g kg⁻¹ mikroalg dozunda 0.21 g, en düşük Nilüfer çeşidinde kontrol grubunda 0.10 g ölçülmüştür. İkinci

hasat kuru ağırlık değerlerinde en etkili çeşitler Grande II ve Jaguar 4G, en etkili doz 6 g kg⁻¹ olarak belirlenmiştir.

4.2.3. *Festuca Arundinacea* Yetiştiriciliği ve Farklı Dozlarda Mikroalg Uygulamalarının 3. Ay Toprak Üstü Aksamı Yaş ve Kuru Ağırlığı, Kök Yaş ve Kuru Ağırlığı Üzerine Etkisi

Deneme toprağında çeşit ve uygulamalar arasındaki 3. ay toprak üstü aksamı yaş ve kuru ağırlığı üzerine etkisine ait varyans analiz tablosu Tablo 4.33'te, deneme toprağında farklı biyoremediasyon uygulamalarının 3. ay toprak üstü aksamı yaş ağırlığı üzerine etkisine ait ortalama değerler Tablo 4.34'te, kuru ağırlığı üzerine etkisi Tablo 4.35'te verilmiştir.

Tablo 4.28. Deneme toprağında çeşit ve uygulamalar arasındaki 3. ay yaş ve kuru ağırlıklarına ait varyans analiz tablosu

Varyasyon Kaynakları	Yaş Ağırlık			Kuru Ağırlık		
	Serbestlik Derecesi	Kareler Ortalaması	F	Serbestlik Derecesi	Kareler Ortalaması	F
Tekerrür	2	0.00005	1	2	0.00001	0.2895
Çeşit	2	2.8666	49143**	2	0.5229	13623.86**
Uygulama	3	1.7323	29697.14**	3	0.07421	1933.178**
Çeşit*Uygulama	6	1.4147	24252.71**	6	0.07818	2036.809**
Hata	22	0.00005		22	0.00003	0.2895
Genel	35			35		

** : 0.01 düzeyinde önemli, * : 0.05 düzeyinde önemli

Varyans analiz tablosu incelendiğinde hasat sonrası 3. ay yaş ve kuru ağırlıkları üzerine etkisi, uygulama, çeşit ve çeşit*uygulama interaksyonu istatistiksel olarak %1 düzeyinde önemli bulunmuştur.

Tablo 4.29. Deneme toprağında farklı biyoremediasyon uygulamalarının 3. ay yaş ağırlık değişimlerine ait ortalama değerler (g)

Çeşitler	Mikroalg Dozları g kg ⁻¹				Ortalama
	Kontrol	1,5	3	6	
Jaguar 4G	2.64 ^f	2.82 ^c	1.26 ^k	0.42 ^l	1.78 ^c
Nilüfer	2.06 ⁱ	2.48 ^g	2.68 ^e	1.85 ^j	2.26 ^b
Grande II	2.43 ^h	3.02 ^a	2.72 ^d	2.87 ^b	2.76 ^a
Ortalama	2.38 ^b	2.77 ^a	2.22 ^c	1.71 ^d	

*: Aynı sütunda aynı harfle gösterilen ortalamalar arasında fark yoktur (p<0.05)

Saksı denemesinin kurulumundasın itibaren 3 aylık süre boyunca toprak üstü aksam yaş ve kuru ağırlık, Grande II ve Jaguar 4G çeşidi 1.5 g kg⁻¹ mikroalg dozunda artış göstermiş sonrasında artan uygulama dozlarında azalan bir eğilim göstermiş, Nilüfer çeşidinde 3 g kg⁻¹ mikroalg dozuna kadar artış gösterirken, sonrasında azalan eğilim göstermiştir. Tablo 4.34 incelendiğinde yaş ağırlık değerleri 0.42-3.03 g arasında belirlenmiştir. En yüksek yaş ağırlık Grande II çeşidinde 1.5 g kg⁻¹ mikroalg dozunda 3.03 g, en düşük Jaguar 4G çeşidinde 6 g kg⁻¹ mikroalg dozunda 0.42 g ölçülmüştür. 3. ay hasat yaş ağırlıkları değerlerine göre en etkili çeşit Grande II, mikroalg dozu 1.5 g kg⁻¹ olarak belirlenmiştir.

Tablo 4.30. Deneme toprağında farklı biyoremediasyon uygulamalarının 3. ay kuru ağırlık değişimlerine ait ortalama değerler (g)

Çeşitler	Mikroalg Dozları g kg ⁻¹				Ortalama
	Kontrol	1.5	3	6	
Jaguar 4G	0.53 ^h	0.72 ^e	0.28 ⁱ	0.17 ^j	0.42 ^c
Nilüfer	0.58 ^g	0.69 ^f	0.75 ^d	0.52 ^h	0.64 ^b
Grande II	0.77 ^d	0.86 ^b	0.83 ^c	0.92 ^a	0.84 ^a
Ortalama	0.63 ^b	0.76 ^a	0.62 ^b	0.54 ^c	

*: Aynı sütunda aynı harfle gösterilen ortalamalar arasında fark yoktur (p<0.05)

Tablo 4.35 incelendiğinde kuru ağırlık değerleri 0.17-0.93 g arasında belirlenmiştir. En yüksek kuru ağırlık Grande II çeşidinde 6 g kg⁻¹ mikroalg dozunda 0.93 g, en düşük Jaguar 4G çeşidinde 6 g kg⁻¹ mikroalg dozunda 0.17 g ölçülmüştür. 3. ay kuru ağırlıkta en etkili çeşit Grande II, mikroalg dozu 1.5 g kg⁻¹ olarak belirlenmiştir. Hasat sonrası bitki yaş ve kuru ağırlıkları mikroalg uygulamalarına göre değerlendirildiğinde, Grande II ve Jaguar 4G çeşidi 1.5 g kg⁻¹ mikroalg dozunda maksimum yaş ve kuru ağırlığında ölçülmüş, sonrasında uygulama dozlarının artışıyla azalan bir eğilim gösterirken; Nilüfer çeşidi 3 g kg⁻¹ mikroalg dozuna kadar yaş ve kuru ağırlığında artış gözlemlenmiş, 3 g kg⁻¹ dozunda maksimum yaş ve kuru ağırlığında ölçülmüştür. Bitki yaş ve kuru ağırlıklarındaki bu değişimin nedeninin ağır metal toksisitesi ve mikroalg dozlarının artışının ortam pH'sını düşürmesiyle ağır metal çözünürlüğünün artışı sağlanmasından dolayı olabileceği düşünülmektedir (Uchimiya, 2020).

Benzer şekilde Aybar ve Sağlam (2022) çalışmalarında artan dozlarda ağır metallerin ayçiçeği ve hint yağı bitkisinin biyokütlesinde azalmaya neden olduğunu, Shahid ve ark. (2014) çalışmalarında bitkilerin ağır metal stresine karşı biyokütlelerinde azalma olabileceğini, Kökten ve ark. (2019) çalışmalarında ağır metallerin varlığının sorgum çeşidinin gelişimini ve ağırlığını olumsuz yönde etkilediğini, Al-Jobori ve Kadhim (2019) çalışmalarında ağır metal konsantrasyonunun artışının bitki yaş ve kuru ağırlığında önemli seviyelerde azalmalara neden olduğunu, Gül ve Yazıcı, (2021) ise çalışmalarında çim bitkisinin kurşun varlığında fide ağırlığında artış, kadmiyum uygulamalarında bitki ağırlığında azalma olduğunu bildirmişlerdir.

Deneme toprağında çeşit ve uygulamalar arasındaki 3. ay kök yaş ağırlığı üzerine etkisine ait varyans analiz tablosu Tablo 4.36’da, deneme toprağında farklı biyoremediasyon uygulamalarının 3. ay yaş kuru ağırlığı üzerine etkisine ait ortalama değerler Tablo 4.37’de, kök kuru ağırlığı üzerine etkisi Tablo 4.38’de verilmiştir.

Tablo 4.31. Deneme toprağında çeşit ve uygulamalar arasındaki kök yaş ve kuru ağırlığı düzeylerine ait varyans analiz tablosu

Varyasyon Kaynakları	Yaş Ağırlık			Kuru Ağırlık		
	Serbestlik Derecesi	Kareler Ortalaması	F	Serbestlik Derecesi	Kareler Ortalaması	F
Tekerrür	2	0.0008	1,3536	2	0.00002	0.234
Çeşit	2	9.3840	14799.18**	2	0.0246	230.609**
Uygulama	3	4.68311	7385.55**	3	0.5169	4839.549**
Çeşit*Uygulama	6	3.17500	5007.17**	6	0.2105	1970.916**
Hata	22	0.00063		22	0.0001	0.234
Genel	35			35		

** : 0.01 düzeyinde önemli, * : 0.05 düzeyinde önemli

Varyans analiz tablosu incelendiğinde hasat sonrası 3. ay kök yaş ve kuru ağırlıkları üzerine etkisi, uygulama, çeşit ve çeşit*uygulama interaksiyonu istatistiksel olarak %1 düzeyinde önemli bulunmuştur.

Tablo 4.32. Deneme toprağında farklı biyoremediasyon uygulamalarının kök yaş ağırlığı değişimlerine ait ortalama değerler (g)

Çeşitler	Mikroalg Dozları g kg ⁻¹				
	Kontrol	1.5	3	6	Ortalama
Jaguar 4G	3.77 ^d	3.81 ^d	1.48 ^h	0.54 ⁱ	2.40^c
Nilüfer	4.55 ^b	3.62 ^{ef}	3.56 ^{ef}	2.96 ^g	3.67^b
Grande II	3.55 ^f	4.11 ^b	5.11 ^a	3.62 ^e	4.10^a
Ortalama	3.95^a	3.84^b	3.38^c	2.37^d	

*: Aynı sütunda aynı harfle gösterilen ortalamalar arasında fark yoktur (p<0.05)

Tablo 4.37 incelendiğinde kök yaş ağırlığı değerleri 0.54-5.11 g arasında belirlenmiştir. Saksı denemesinin kurulumundasın itibaren 3 aylık süre boyunca kök yaş ağırlığı, Grande II 1.5 g kg⁻¹ mikroalg dozunda artış gösterirken sonrasında artan uygulama dozlarında azalan bir eğilim göstermiş, Jaguar 4G çeşidi 1.5 g kg⁻¹ mikroalg dozunda artış gösterirken sonrasında artan uygulama dozlarında azalan bir eğilim göstermiş, Nilüfer çeşidinde azalan eğilim göstermiştir. En yüksek kök yaş ağırlığı Grande II çeşidinde 3 kg⁻¹ mikroalg dozunda 5.11 g, en düşük Jaguar 4G çeşidinde 6 g kg⁻¹ mikroalg dozunda 0.54 g olarak belirlenmiştir. Kök yaş ağırlığında çeşitler arasında Grande II’de, uygulamalarda ise kontrol gruplarında en iyi kök ağırlığı elde edilmiştir.

Tablo 4.33. Deneme toprağında farklı biyoremediasyon uygulamalarının kök kuru ağırlık değişimlerine ait ortalama değerler (g)

Çeşitler	Mikroalg Dozları g kg ⁻¹				
	Kontrol	1.5	3	6	Ortalama
Jaguar 4G	1.28 ^a	0.69 ^d	0.32 ⁱ	0.16 ^j	0.61^b
Nilüfer	0.94 ^b	0.53 ^g	0.50 ^g	0.37 ^h	0.586^c
Grande II	0.61 ^f	0.78 ^c	0.64 ^{ef}	0.67 ^{de}	0.675^a
Ortalama	0.94^a	0.66^b	0.48^c	0.4^d	

*: Aynı sütunda aynı harfle gösterilen ortalamalar arasında fark yoktur (p<0.05)

Tablo 4.38 incelendiğinde kök kuru ağırlık değerleri 0.16-1.28 arasında olduğu belirlenmiştir. En yüksek kök kuru ağırlığı Jaguar 4G çeşidinde kontrol grubunda 1.28 g,

en düşük Jaguar 4G çeşidinde 6 g kg^{-1} mikroalg dozunda 0.16 g olarak belirlenmiştir. Kök kuru ağırlığında çeşitler arasında Grande II’de, uygulamalarda ise kontrol gruplarında en iyi kök kuru ağırlığı elde edilmiştir. Hasat sonrası kök yaş ve kuru ağırlıkları mikroalg uygulamalarına göre değerlendirildiğinde, Grande II ve Jaguar 4G çeşidi 1.5 g kg^{-1} mikroalg dozunda maksimum yaş ve kuru ağırlığında ölçülmüş, sonrasında uygulama dozlarının artışıyla azalan bir eğilim gösterirken; Nilüfer çeşidinde kontrol gruplarına göre kök yaş ve kuru ağırlıkları azalmıştır. Mikroalglerin salgıladıkları organik asitler uygulama dozu arttıkça artmakta ve toprak pH’sı düşmekte böylelikle de ortamdaki iz elementler düşük dozlarda kök gelişimini olumlu etkilemesine rağmen dozların artmasıyla strese sebep olmakta ve kök gelişimini olumsuz etkileyebileceği düşünülmektedir.

Bulgulara paralel şekilde Güven ve ark. (2016) deri arıtma çamuru ilavelerinin çim bitkisi üzerine etkilerinde ilave edilen miktarların artmasıyla bitki toplam ağırlığında azalma olduğunu, Bayrak (2021) çalışmasında bazı ağır metallerin düşük seviyelerde gelişimi teşvik edici özellikte olduğunu ancak dokularda artışıyla bitki kök yaş ve kuru ağırlığında azalmalar olduğunu, Zhang ve ark. (2014) yaptıkları çalışmada, ağır metallerin kök ağırlığını önemli ölçüde azalttığını, Özdemir (2014) çalışmasında mikroalg uygulamalarının domates bitkisinde biyogübre olarak kullanılan mikroalglerin kök yaş ve kuru ağırlıklarını arttırdığını bildirmişlerdir.

4.2.4. *Festuca Arundinacea* Yetiştiriciliği ve Farklı Dozlarda Mikroalg Uygulamalarının Bitki ve Kök Derinlikleri Üzerine Etkisi

Deneme toprağında çeşit ve uygulamalar arasındaki 1. ay, 2. ay ve 3. ay bitki uzunlukları üzerine etkisine ait varyans analiz tablosu Tablo 4.39’da, deneme toprağında farklı biyoremediasyon uygulamalarının 1. ay, 2. ay ve 3. ay bitki uzunlukları üzerine etkisine ait ortalama değerler Tablo 4.40’de, 1. ay, 2. ay ve 3. ay bitki uzunlukları üzerine etkisi Tablo 4.41’de verilmiştir.

Tablo 4.34. Deneme toprağında çeşit ve uygulamalar arasındaki 1., 2. ve 3. ay bitki uzunluklarına ait varyans analiz tablosu

	1. Ay			2. Ay			3. Ay		
Varyasyon Kaynakları	Serbestlik Derecesi	Kareler Ortalaması	F	Serbestlik Derecesi	Kareler Ortalaması	F	Serbestlik Derecesi	Kareler Ortalaması	F
Tekerrür	2	2.5443	0.9236	2	0.75	2.9118	2	0.1280	0.8243
Çeşit	2	41.1113	14.9236**	2	230.8125	896.0956**	2	1178.3471	7589.566**
Uygulama	3	30.5768	11.0995**	3	47.7476	185.3734**	3	67.8747	437.1712**
Çeşit*Uygulama	6	3.6412	1.32175*	6	39.69213	154.0989**	6	42.5490	274.0521**
Hata	22	0.363		22	0.2575	2.9118	22	0.1552	
Genel	35			35			35		

** : 0.01 düzeyinde önemli, * : 0.05 düzeyinde önemli

Varyans analiz tablosu incelendiğinde 1. ay bitki uzunluklarında uygulama ve çeşit etkileri istatistiksel olarak %1 düzeyinde anlamlı bulunmuş, çeşit *uygulama interaksyonu %5 düzeyinde anlamlı bulunmuştur. 2. ay ve 3. ay bitki uzunluklarında uygulama, çeşit, çeşit*uygulama interaksyonu istatistiksel olarak %1 düzeyinde önemli bulunmuştur.

Tablo 4.35. Deneme toprağında farklı biyoremediasyon uygulamalarının 1. ay bitki uzunluğu değişimlerine ait ortalama değerler (cm)

Çeşitler	Mikroalg Dozları g kg ⁻¹				Ortalama
	Kontrol	1.5	3	6	
Jaguar 4G	10.33 ^c	10 ^{cd}	10 ^{cd}	8.33 ^d	9.66 ^c
Nilüfer	12.33 ^{ab}	12.16 ^{ab}	13 ^a	9.83 ^{cd}	11.83 ^b
Grande II	10.83 ^{bc}	10.83 ^{bc}	10 ^{cd}	13.16 ^a	11.20 ^a
Ortalama	11.16 ^b	11 ^b	12.05 ^a	9.38 ^c	

*: Aynı sütunda aynı harfle gösterilen ortalamalar arasında fark yoktur (p<0.05)

Tablo 4.40 incelendiğinde bitki maksimum boy uzunlukları 8.33-13.17 cm arasında yer almaktadır. Saksı denemesinin kurulumundan itibaren 1 aylık süre boyunca toprak üstü aksam maksimum uzunluk, Grande II, Jaguar 4G ve Nilüfer çeşitlerinde 3 g kg⁻¹ mikroalg dozunda artış gösterirken sonrasında artan uygulama dozlarında azalan bir eğilim göstermiştir. En yüksek maksimum boy uzunluğu Grande II çeşidinde 6 g kg⁻¹ mikroalg dozunda 13.17 cm, en düşük Jaguar 4G çeşidinde 6 g kg⁻¹ mikroalg dozunda 8.33 cm olarak bulunmuştur.

Tablo 4.36. Deneme toprağında farklı biyoremediasyon uygulamalarının 2. ay bitki boy uzunluğu değişimlerine ait ortalama değerler (cm)

Çeşitler	Mikroalg Dozları g kg ⁻¹				Ortalama
	Kontrol	1.5	3	6	
Jaguar 4G	13.50 ^g	13.16 ^g	12.50 ^g	16.50 ^{ef}	13.91 ^c
Nilüfer	18.00 ^{de}	20.00 ^{bc}	31.00 ^a	20.66 ^b	22.41 ^a
Grande II	13.50 ^g	15.83 ^f	16.83 ^{ef}	19.00 ^{cd}	16.29 ^b
Ortalama	15 ^d	16.33 ^c	18.72 ^b	20.11 ^a	

*: Aynı sütunda aynı harfle gösterilen ortalamalar arasında fark yoktur (p<0.05)

Tablo 4.41'e göre 2. ay bitki boy uzunlukları 12.5-31 cm arasında yer almaktadır. 2 aylık süre boyunca toprak üstü aksam maksimum uzunluk, Nilüfer çeşidinde 3 g kg^{-1} mikroalg dozuna kadar artış gösterirken sonrasında artan uygulama dozlarında azalan bir eğilim göstermiş, Jaguar 4G ve Grande II çeşitlerinde uygulama dozlarının artışı ile maksimum boy uzunluğu artan bir eğilim göstermiştir. En yüksek maksimum boy uzunluğu Nilüfer çeşidinde 3 g kg^{-1} mikroalg dozunda 31 cm, en düşük Jaguar 4G çeşidinde 3 g kg^{-1} mikroalg dozunda 12.5 cm olarak belirlenmiştir. 2. ay bitki boy uzunluklarında en etkili çeşit Nilüfer, en etkili doz ise 6 g kg^{-1} olarak belirlenmiştir.

Tablo 4.37. Deneme toprağında farklı biyoremediasyon uygulamalarının 3. ay bitki boy uzunluğu değişimlerine ait ortalama değerler (cm)

Çeşitler	Mikroalg Dozları g kg^{-1}				Ortalama
	Kontrol	1.5	3	6	
Jaguar 4G	17.5 ^f	17.5 ^f	15.5 ^g	7.66 ^h	14.54^c
Nilüfer	28.66 ^d	37.83 ^b	39.33 ^a	30.16 ^c	34^a
Grande II	20.55 ^e	20.5 ^e	21.66 ^e	21.33 ^e	21.01^b
Ortalama	22.23^b	25.27^a	25.5^a	19.72^c	

*: Aynı sütunda aynı harfle gösterilen ortalamalar arasında fark yoktur ($p < 0.05$)

Tablo 4.42 incelendiğinde 3. ay bitki uzunlukları 17.67-39.33 cm arasında bulunmuştur. 3 aylık süre boyunca toprak üstü aksam maksimum uzunluk, Nilüfer çeşidinde 3 g kg^{-1} mikroalg dozuna kadar artış gösterirken sonrasında artan uygulama dozlarında azalan bir eğilim göstermiş, Jaguar 4G çeşidinde azalma, Grande II çeşidinde uygulama dozlarının artışı ile maksimum boy uzunluğu stabil kalmıştır. Saksı denemesi sonuçları değerlendirildiğinde en yüksek maksimum boy uzunluğu Nilüfer çeşidinde 3 g kg^{-1} mikroalg dozunda 39.33 cm, en düşük Jaguar 4G çeşidinde 6 g kg^{-1} mikroalg dozunda 17.67 cm ölçülmüştür. 3. ay maksimum bitki boyu uzunluğunda en etkili çeşit Nilüfer, en etkili mikroalg dozu 1.5 g kg^{-1} olarak belirlenmiştir. Bu değişimlerin çeşitler arasında farklılık göstermesi bitki çeşitlerinin ağır metallere gösterdiği direncin farklı olmasından

kaynaklanabileceği düşünülmektedir. Aynı zamanda Nilüfer ve Grande II çeşitlerinde mikroalg uygulamalarının bitki gelişimini teşvik ettiği düşünülmektedir.

Çalışma ile aynı doğrultuda CAN ve ark. (2022) çalışmalarında mikroalg uygulamalarının kontrol grubuna göre bitki boy uzunluğunu önemli düzeyde arttırdığını saptamışlardır. Ergün ve ark. (2020) çalışmalarında su kültüründe yetiştirdikleri marul bitkisine mineral gübre ve alg uygulamışlar ve sonucunda çalışmamızla aynı doğrultuda kontrol gruplarıyla karşılaştırıldığında bitki boy uzunluğunu arttırdığını bildirmişlerdir. Rathore ve ark. (2009) çalışmalarında soya bitkisinde alg ekstraktının bitki boy uzunluğunu arttırıcı etkisi olduğunu ifade etmişlerdir.

Deneme toprağında çeşit ve uygulamalar arasındaki kök derinliği üzerine etkisine ait varyans analiz tablosu Tablo 4.43'te, deneme toprağında farklı biyoremediasyon uygulamalarının kök uzunlukları üzerine etkisine ait ortalamalar Tablo 4.44'te verilmiştir.

Tablo 4.38. Deneme toprağında çeşit ve uygulamalar arasındaki kök derinlik düzeylerine ait varyans analiz tablosu

Varyasyon Kaynakları	Serbestlik Derecesi	Kareler Ortalaması	F
Tekerrür	2	0.0104	0.0816
Çeşit	2	114.0844	887.7033**
Uygulama	3	15.5398	120.9175**
Çeşit*Uygulama	6	40.4659	314.8697**
Hata	22	0.1285	
Genel	35		

** : 0.01 düzeyinde önemli, * : 0.05 düzeyinde önemli

Varyans analiz tablosu incelendiğinde hasat sonrası kök derinliği üzerine etkisi, uygulama, çeşit ve çeşit*uygulama interaksiyonu istatistiksel olarak %1 düzeyinde önemli bulunmuştur.

Tablo 4.39. Deneme toprağında farklı biyoremediasyon uygulamalarının kök derinliği (cm)

Çeşitler	Mikroalg Dozları g kg ⁻¹				
	Kontrol	1.5	3	6	Ortalama
Jaguar 4G	18.65 ^d	18.83 ^d	12.50 ^h	14.66 ^g	16.16^c
Nilüfer	17.55 ^{ef}	21.5 ^c	24.5 ^{ab}	25.5 ^a	22.26^a
Grande II	16.65 ^f	21.33 ^c	23.66 ^b	18.33 ^{de}	19.99^b
Ortalama	17.61^c	20.55^a	20.22^a	19.50^b	

*: Aynı sütunda aynı harfle gösterilen ortalamalar arasında fark yoktur (p<0.05)

Tablo 4.44 incelendiğinde kök derinlikleri 12.6-25.5 cm arasında yer almaktadır. 3 aylık süre boyunca kök maksimum uzunluğu, Grande II 3 g kg⁻¹ mikroalg dozuna kadar artış gösterirken sonrasında artan uygulama dozunda azalan bir eğilim göstermiş, Nilüfer çeşidinde artan, Jaguar 4G çeşidinde azalan bir eğilim göstermiştir. Saksı denemesi sonuçları değerlendirildiğinde en yüksek kök derinliği Nilüfer çeşidinde 6 g kg⁻¹ mikroalg dozunda 25.5 cm, en düşük Jaguar 4G çeşidinde 3 g kg⁻¹ mikroalg dozunda 12.60 cm ölçülmüştür. Kök derinliğinde en etkili çeşit Nilüfer, en etkili mikroalg dozu 3 g kg⁻¹ olarak belirlenmiştir. Farklı dozlarda mikroalg uygulamalarının kök derinliği üzerine etkileri değerlendirildiğinde genel olarak Jaguar 4G çeşidi 1.5 g kg⁻¹ mikroalg dozunda en yüksek kök derinliğinde daha sonrasında ise kontrol grubuna göre daha az kök derinliğinde olduğu ölçülmüştür. Nilüfer ve Grande II çeşitlerinde ise genel olarak 3 g kg⁻¹ mikroalg dozuna kadar kök derinliğine kadar artış tespit edilmiştir. 6 g kg⁻¹ mikroalg dozunda bütün çeşitlerin kök derinliğinde azalma saptanmıştır. Bu değişimlerin çeşitler arasında farklılık göstermesi bitki çeşitlerinin ağır metallerle gösterdiği direncin farklı olmasından kaynaklanabileceği düşünülmektedir. Aynı zamanda Nilüfer ve Grande II çeşitlerinde mikroalg uygulamalarının kök gelişimini teşvik ettiği düşünülmektedir.

Çalışma ile benzer şekilde, Teixeira ve ark. (2015) yaptıkları çalışmada atık sularıyla sulamada ağır metallerin kök uzunluğunu olumsuz etkilediğini ifade etmişlerdir. Özkan, (2019) çalışmasında hıyar çeşitlerinde ağır metal içeren atık sularla sulamasının bitki kök uzunluğunu olumsuz yönde etkilediğini, kontrol grubuna göre kök derinliğinde düşüş

olduğunu bildirmiştir. CAN ve ark. (2022) yaptıkları çalışmada mikroalg uygulamalarının kontrol grubuna göre kök boy uzunluğunu önemli düzeyde arttırdığını, Shaaban ve ark. (2001) mikroalg ilavesinin mısırdaki kök boy uzunluğunu arttırdığını, Suchithra ve ark. (2022) yaptıkları çalışmada domates bitkisinde mikroalg uygulamasının bitki kök uzunluğunu arttırdığını bildirmişlerdir. Çalışmamızla aynı doğrultuda olan çalışmalar doğrultusunda, mikroalg dozlarının bitki gelişimini olumlu etkilediğini ancak mikroalglerin ortam pH'sını arttırmasıyla ağır metal çözünürlüğünü arttırmasıyla ağır metallerin bitki gelişimini olumsuz etkileyebileceğini doğrulamaktadır.

4.2.5. *Festuca Arundinacea* Yetiştiriciliği ve Farklı Dozlarda Mikroalg Uygulamalarının Ortalama Kardeşlenme Sayısı Üzerine Etkisi

Deneme toprağında çeşit ve uygulamalar arasındaki 1., 2. ve 3. ay ortalama kardeşlenme sayısı üzerine etkisine ait varyans analiz tablosu Tablo 4.45'te, deneme toprağında farklı biyoremediasyon uygulamalarının 2. ay ortalama kardeşlenme sayısı üzerine etkisine ait ortalama değerler Tablo 4.46'da, 3. ay Tablo 4.47'de verilmiştir.

Tablo 4.40. Deneme toprağında çeşit ve uygulamalar arasındaki 1., 2. ve 3. ay ortalama kardeşlenme sayısına ait varyans analiz tablosu

Varyasyon Kaynakları	1. Ay			2. Ay			3. Ay		
	Serbestlik Derecesi	Kareler Ortalaması	F	Serbestlik Derecesi	Kareler Ortalaması	F	Serbestlik Derecesi	Kareler Ortalaması	F
Tekerrür	2	0.1111	2.2	2	0.0833	0.7333	2	0.0833	1.5714
Çeşit	2	0.1944	3.85	2	4.0833	35.9333**	2	6.3333	119.4286**
Uygulama	3	0.1759	3.4833	3	6.7685	59.5630**	3	14.4074	271.6825**
Çeşit*Uygulama	6	0.3425	6.7833*	6	1.2685	11.1630**	6	2.6296	49.5873**
Hata	22	0.0505		22	0.1136	0.7333	22	0.05303	
Genel	35			35			35		

** : 0.01 düzeyinde önemli, * : 0.05 düzeyinde önemli

Varyans analiz tablosu incelendiğinde 1. ay ortalama kardeşlenme sayısı çeşit*uygulama interaksiyonunda istatistiksel olarak %5 düzeyinde anlamlı bulunmuş, uygulama ve çeşit istatistiksel olarak anlamsız bulunmuştur. 2. ve 3. ay ortalama kardeşlenme sayısı uygulama, çeşit ve çeşit*uygulama interaksiyonu istatistiksel olarak %1 düzeyinde anlamlı bulunmuştur.

Tablo 4.41. Deneme toprağında farklı biyoremediasyon uygulamalarının 2. ay ortalama kardeşlenme sayısı değişimlerine ait ortalama değerler (cm)

Çeşitler	Mikroalg Dozları g kg ⁻¹				Ortalama
	Kontrol	1.5	3	6	
Jaguar 4G	3 ^e	5 ^{abcd}	4.66 ^{bcd}	4 ^{de}	4.16^b
Nilüfer	3 ^e	4 ^{de}	4.33 ^{cd}	6 ^a	4.33^{ab}
Grande II	4 ^e	5.33 ^{abc}	5.66 ^{ab}	6 ^a	5.25^a
Ortalama	3.33^c	4.77^b	4.88^b	5.33^a	

*: Aynı sütunda aynı harfle gösterilen ortalamalar arasında fark yoktur (p<0.05)

Tablo 4.46 incelendiğinde ikinci ay kardeşlenme sayıları 2-6 adet arasındadır. En yüksek ortalama kardeşlenme sayısı Nilüfer ve Grande II çeşidinde 6 g kg⁻¹ mikroalg dozunda 6 adet, en düşük Jaguar 4G ve Nilüfer çeşitlerinde kontrol gruplarında belirlenmiştir. Kardeşlenme sayısında en etkili çeşit Grande II, en etkili mikroalg dozu 6 g kg⁻¹ dozunda elde edilmiştir.

Tablo 4.42. Deneme toprağında farklı biyoremediasyon uygulamalarının 3. ortalama kardeşlenme sayısı değişimlerine ait ortalama değerler (cm)

Çeşitler	Mikroalg Dozları g kg ⁻¹				Ortalama
	Kontrol	1.5	3	6	
Jaguar 4G	4 ^d	5 ^c	5 ^c	4.66 ^{cd}	4.66^b
Nilüfer	4 ^d	5 ^c	6.33 ^b	8 ^a	5.83^a
Grande II	4 ^d	5 ^c	7 ^b	8 ^a	6^a
Ortalama	4^d	5^c	6.11^b	6.88^a	

*: Aynı sütunda aynı harfle gösterilen ortalamalar arasında fark yoktur (p<0.05)

Tablo 4.47 incelendiğinde üçüncü ay ortalama kardeşlenme sayıları 4-8 adet arasındadır. En yüksek ortalama kardeşlenme sayısı Nilüfer ve Grande II çeşidinde 6 g kg⁻¹ mikroalg dozunda 8 adet, en düşük çeşitlerin tümünde kontrol gruplarında belirlenmiştir. Kardeşlenme sayısında en etkili çeşit Grande II ve Nilüfer, en etkili mikroalg dozu 6 g kg⁻¹ dozunda elde edilmiştir.

Saksı denemesinin kurulumundan itibaren 1., 2. ve 3. ay kardeşlenme sayısında, Grande II, Jaguar 4G ve Nilüfer çeşitleri, genel olarak artan uygulama dozlarında artan bir eğilim göstermiştir. Farklı dozlarda mikroalg uygulamalarının bitki çeşitlerinde kardeşlenme sayısı üzerine etkileri değerlendirildiğinde genel olarak kardeşlenme sayısı kontrol grubuna göre mikroalg uygulamalı gruplarda daha fazla olduğu saptanmıştır. Mikroalglerin besin elementlerinin ve minerallerin emilimini arttırmasıyla bitki gelişimini teşvik edici özelliğinin kardeşlenme sayısını da olumlu yönde etkileyebileceği düşünülmektedir (Kapoor, 2021; Win, 2018; Colla, 2017).

4.2.6. *Festuca Arundinacea* Yetiştiriciliği ve Farklı Dozlarda Mikroalg Uygulamalarının Kök Gövde Kuru Madde Oranı ve Kök Gövde Uzunluğu Oranı Üzerine Etkisi

Deneme toprağında çeşit ve uygulamalar arasındaki kök gövde kuru madde oranı ve kök gövde uzunluğu üzerine etkisine ait varyans analiz tablosu Tablo 4.48’te, deneme toprağında farklı biyoremediasyon uygulamalarının kök gövde kuru madde oranı ve kök gövde uzunluğu oranı üzerine etkisine ait ortalama değerler Tablo 4.49’da verilmiştir.

Tablo 4.43. Deneme toprağında çeşit ve uygulamalar arasındaki kök gövde kuru madde oranı ve kök gövde uzunluğu oranına ait varyans analiz tablosu

Kök Gövde Kuru Madde Oranı				Kök Gövde Uzunluğu Oranı		
Varyasyon Kaynakları	Serbestlik Derecesi	Kareler Ortalaması	F	Serbestlik Derecesi	Kareler Ortalaması	F
Tekerrür	2	0.00002	0.234	2	0.00041	3,152
Çeşit	2	0.0246	230.609**	2	0.9577	7392,772**
Uygulama	3	0.5169	4839.549**	3	0.32308	2494,019**
Çeşit*Uygulama	6	0.2105	1970.916**	6	0.27681	2136,788**
Hata	22	0.0001		22	0.00012	
Genel	35			35		

** : 0.01 düzeyinde önemli, * : 0.05 düzeyinde önemli

Tablo 4.44. Deneme toprağında farklı biyoremediasyon uygulamalarının kök gövde kuru maddesi oranı değişimleri ve kök gövde uzunluk oranlarına ait ortalama değerler

Kök Gövde Kuru Madde Oranı (g g ⁻¹)						Kök Gövde Uzunluk Oranı (cm cm ⁻¹)				
Çeşitler	Mikroalg Dozları g kg ⁻¹									
	Kontrol	1.5	3	6	Ortalama	Kontrol	1.5	3	6	Ortalama
Jaguar 4G	1.28 ^a	0.69 ^d	0.32 ¹	0.16 ^j	0.61 ^b	1,05 ^c	1,08 ^b	0,82 ^e	1.97 ^a	1.23 ^a
Nilüfer	0.94 ^b	0.53 ^g	0.50 ^g	0.37 ^h	0.586 ^c	0,61 ^f	0,57 ^g	0,62 ^f	0,86 ^d	0,66 ^c
Grande II	0.61 ^f	0.78 ^c	0.64 ^{ef}	0.67 ^{de}	0.675 ^a	0,81 ^e	1,04 ^c	1,09 ^b	0,86 ^d	0.95 ^b
Ortalama	0.94 ^a	0.66 ^b	0.48 ^c	0.4 ^d		0.82 ^d	0.90 ^b	0.84 ^c	1.23 ^a	

*: Aynı sütunda aynı harfle gösterilen ortalamalar arasında fark yoktur (p<0.05)

Tablo 4.49 incelendiğinde kök gövde kuru madde ağırlığı oranı 0.16-1.28 g bitki⁻¹ arasında yer almaktadır. Saksı denemesinin kurulumundan itibaren 3 aylık süre boyunca kök gövde kuru madde oranı, Grande II, Jaguar 4G ve Nilüfer çeşitlerinde, artan uygulama dozlarında azalan bir eğilim göstermiştir. En yüksek kök gövde kuru madde oranı Jaguar 4G çeşidinde kontrol grubunda 1.28 g bitki⁻¹, en düşük Jaguar 4G çeşidinde 6 g kg⁻¹ mikroalg dozunda 0.16 g bitki⁻¹ saptanmıştır. Çeşitler arasındaki oransal değişim çoktan aza doğru Grande II> Jaguar 4G> Nilüfer sırasındadır. Bu değişimin bitki çeşitlerinin ağır metallere karşı direnci dolayısıyla olabileceği düşünülmektedir (Fernandes ve Henriques, 1991).

Benzer şekilde, Özay (2019) *Alyssum discolor*'un Cu konsantrasyonunun artmasıyla kök gövde oranının kontrole göre önemli düzeyde azaldığını, Sen (2013) çalışmasında *Brassica juncea*'ın ağır metal konsantrasyonunun artmasıyla kök gövde oranının kontrole göre önemli düzeyde azalttığını, Zengin (2005) çalışmasında metallerin köklerde absorplanarak biriktirilmesi ile köklerin anatomisini, morfolojisini ve büyümesinin diğer bitki organlarına kıyasla çok daha fazla etkilendiğini bildirmiştir.

Kök gövde uzunluk oranı, Jaguar 4G ve Nilüfer çeşitlerinde, artan uygulama dozlarında artan bir eğilim göstermiş, Grande II çeşidi 3 g kg⁻¹ mikroalg uygulamasından sonra azalan bir eğilim göstermiştir. Saksı denemesi sonuçları değerlendirildiğinde en yüksek kök gövde uzunluk oranı Jaguar 4G çeşidinde 6 g kg⁻¹ mikroalg dozunda 1.97 cm bitki⁻¹, en düşük Nilüfer çeşidinde 1.5 g kg⁻¹ mikroalg dozunda 0.57 cm bitki⁻¹ saptanmıştır.

Farklı dozlarda mikroalg uygulamalarının bitki çeşitlerinde kökün gövde uzunluğuna oranı üzerine etkileri değerlendirildiğinde mikroalg dozlarının artışı kök gövde uzunluğu oranında azalmaya neden olmuştur. Ortamda ağır metal konsantrasyonunun artışının ilk başta kökü etkilediğinden dolayı kök gövde oranının azaldığı düşünülmektedir.

4.2.7. *Festuca Arundinacea* Yetiştiriciliği ve Farklı Dozlarda Mikroalg Uygulamalarının Klorofil a, Klorofil b, Klorofil a+b ve Karotenoid Düzeyi Üzerine Etkisi

Klorofil a, Klorofil b, Klorofil a+b ve Karoteneid (K_{x+c}) analizleri Lichtenthaler, 1987 UV- VIS Spektroskopik yöntemiyle, çalkalama sonrası çökelen patiküllerin üzerindeki

sınının 480, 648.6 ve 664.2 nm dalga boyunda okunan sonuçlar doğrultusunda değerlendirme yapılmıştır.

Deneme toprağında çeşit ve uygulamalar arasındaki klorofil a, klorofil b, klorofil a+b ve karotenoid etkisine ait varyans analizi Tablo 4.50’de, deneme toprağında farklı biyoremediasyon uygulamalarının klorofil a üzerine etkisine ait ortalama değerler Tablo 4.51’de, klorofil b Tablo 4.52’de, klorofil a+b Tablo 4.53’te ve karotenoid düzeyşeri Tablo 4.54’te verilmiştir.



Tablo 4.45. Deneme toprağında çeşit ve uygulamalar arasındaki Klorofil a, Klorofil b, Klorofil a+b ve Karotenoid düzeyi düzeylerine ait varyans analiz tablosu

Varyasyon Kaynakları	Klorofil a			Klorofil b			Klorofil a+b			Karotenoid		
	Serbestlik Derecesi	Kareler Ortalaması	F	Serbestlik Derecesi	Kareler Ortalaması	F	Serbestlik Derecesi	Kareler Ortalaması	F	Serbestlik Derecesi	Kareler Ortalaması	F
Tekerrür	2	0.014	0,4378	2	0.0038	2.3166	2	0.00001	0,6522	2	0.0035	0.062
Çeşit	2	61.2399	1883.778 **	2	66,9473	41083 **	2	0,0014	110,6522**	2	50233	4490**
Uygulama	3	27.4929	845.7004 **	3	383,3836	23527 **	3	0,0052	408,913**	3	37259	3330**
Çeşit*Uygulama	6	2.7454	84.4521**	6	11.8327	7261**	6	0.0002	18,0435**	6	27477	2456**
Hata	22	0.0325		22	0,0016		22	0,00001		22	0,0111	
Genel	35			35			35			35		

** : 0.01 düzeyinde önemli, * : 0.05 düzeyinde önemli

Tablo 4.46. Deneme toprağında farklı biyoremediasyon uygulamalarının Klorofil a değişimlerine ait ortalama değerler

Çeşitler	Mikroalg Dozları g kg ⁻¹				Ortalama
	Kontrol	1.5	3	6	
Jaguar 4G	6.27 ^{fg}	6.52 ^f	5.92 ^g	2.31 ^f	5.25 ^c
Nilüfer	9.78 ^c	8.61 ^d	7.19 ^e	7.08 ^e	8.16 ^b
Grande II	11.03 ^b	11.77 ^a	9.51 ^c	6.51 ^b	9.70 ^a
Ortalama	9.03 ^a	8.97 ^a	7.54 ^b	5.3 ^c	

*: Aynı sütunda aynı harfle gösterilen ortalamalar arasında fark yoktur (p<0.05)

Tablo 4.51 değerlendirildiğinde klorofil a değerleri 2.32-11.77 mg g⁻¹ arasındadır. En yüksek klorofil a, Grande II çeşidinde 1.5 g kg⁻¹ mikroalg dozunda 11.77 mg g⁻¹, en düşük Jaguar 4G çeşidinde 6 g kg⁻¹ mikroalg dozunda 2.32 mg g⁻¹ saptanmıştır.

Tablo 4.47. Deneme toprağında farklı biyoremediasyon uygulamalarının Klorofil b değişimlerine ait ortalama değerler

Çeşitler	Mikroalg Dozları g kg ⁻¹				Ortalama
	Kontrol	1.5	3	6	
Jaguar 4G	12.05 ^c	8.72 ^f	4.53 ⁱ	1.62 ^k	6.65 ^c
Nilüfer	18.04 ^b	10.11 ^e	6.11 ^h	1.01 ^l	8.81 ^b
Grande II	22.29 ^a	11.88 ^d	6.93 ^g	4.21 ^j	11.32 ^a
Ortalama	17.46 ^a	10.07 ^b	5.85 ^c	2.28 ^d	

*: Aynı sütunda aynı harfle gösterilen ortalamalar arasında fark yoktur (p<0.05)

Tablo 4.52 incelendiğinde klorofil b değerleri 1.01-22.29 mg g⁻¹ aralığında yer almaktadır. En yüksek Grande II çeşidinde kontrol grubunda 22.29 mg g⁻¹, en düşük Nilüfer çeşidinde, 6 g kg⁻¹ mikroalg dozunda 1.01 mg g⁻¹ saptanmıştır.

Tablo 4.48. Deneme toprağında farklı biyoremediasyon uygulamalarının klorofil a+b değişimlerine ait ortalama değerler

Çeşitler	Mikroalg Dozları g kg ⁻¹				Ortalama
	Kontrol	1.5	3	6	
Jaguar 4G	17.08 ^{de}	23.48 ^b	13.21 ^f	6.85 ^j	15.15^b
Nilüfer	8.38 ⁱ	12.66 ^g	16.63 ^e	13.32 ^f	12.75^c
Grande II	10.63 ^h	17.20 ^d	18.23 ^c	24.95 ^a	17.75^a
Ortalama	12.03^d	17.78^a	16.02^b	15.04^c	

*: Aynı sütunda aynı harfle gösterilen ortalamalar arasında fark yoktur (p<0.05)

Tablo 4.53 incelendiğinde toplam klorofil değerleri 6.85-24.95 mg g⁻¹ aralığında bulunmuştur. En yüksek Grande II çeşidinde 6 g kg⁻¹ mikroalg dozunda 24.95 mg g⁻¹, en düşük Jaguar 4G çeşidinde, 6 g kg⁻¹ mikroalg dozunda 6.85 mg g⁻¹ saptanmıştır. Toplam klorofili en yüksek çeşit Grande II, en etkili doz 1.5 g kg⁻¹ olarak belirlenmiştir.

Tablo 4.49. Deneme toprağında farklı biyoremediasyon uygulamalarının Karotenoid değişimlerine ait ortalama değerler

Çeşitler	Mikroalg Dozları g kg ⁻¹				Ortalama
	Kontrol	1.5	3	6	
Jaguar 4G	722.81 ^h	840.14 ^g	721.58 ⁱ	319.16 ⁱ	650^c
Nilüfer	485.10 ^j	961.54 ^c	1281.73 ^b	1434.24 ^a	1040^a
Grande II	343.54 ^k	725.58 ^g	945.06 ^d	936.91 ^e	737^b
Ortalama	517.15^d	842.42^c	982.79^a	896.77^b	

*: Aynı sütunda aynı harfle gösterilen ortalamalar arasında fark yoktur (p<0.05)

Saksı denemesinin kurulumundan itibaren 3 aylık süre boyunca karotenoid, Jaguar 4G çeşidinde artan uygulama dozlarında azalan bir eğilim göstermiş, Grande II ve Nilüfer çeşidinde artan bir eğilim göstermiştir. Saksı denemesi sonuçları değerlendirildiğinde en yüksek karotenoid, Nilüfer çeşidinde 6 g kg⁻¹ mikroalg dozunda 1434.24 mg g⁻¹, en düşük

Jaguar 4G çeşidinde 6 g kg^{-1} mikroalg dozunda 319.6 mg g^{-1} saptanmıştır. Karotenoid düzeyinde en etkili çeşit Nilüfer, en etkili doz 3 g kg^{-1} olarak belirlenmiştir.

Farklı dozlarda mikroalg uygulamalarının bitki çeşitlerinde bitki klorofil düzeyi üzerine etkileri değerlendirildiğinde mikroalg dozlarının artışı kontrole göre diğer uygulamaların klorofil düzeyinde önemli düzeyde azalmaya neden olduğu belirlenmiştir. Bitki çeşitlerindeki klorofil düzeyinin düşüşü bitki hücrelerinde ağır metal birikimi sonucu toksisiteye neden olmasından kaynaklanabileceği düşünülmektedir. Mikroalg uygulamalarının bitki fotosentetik verimini etkilediği bilinse de kirli ortamda toprak reaksiyonunu düşürmesinden dolayı klorofil düzeyleri ve fotosentetik verimlerinde düşüş olduğu düşünülmektedir.

Çalışma ile benzer şekilde Aybar ve Sağlam (2022) çalışmalarında ağır metal kirliliğinde farklı çeşit bitki uygulamalarının fitoremediasyon yetenekleri araştırmışlar, ağır metal kirlilik düzeyinin artışının bitki çeşitlerinde klorofil miktarında önemli düzeyde azalmaya neden olduğunu saptamışlardır. Buran ve ark. (2017) yaptıkları çalışmada çeşitli bitkilerde ağır metal stresinde kontrol grubuna göre önemli düzeyde bitki klorofil miktarını azalttığını saptamışlardır. Kıran ve ark. (2014) ağır metallerin bitki hücrelerinde birikiminin klorofil miktarında ve karotenoid düzeyinde önemli düzeyde azalmaya neden olduğunu ifade etmişlerdir. Önceki çalışmalar incelendiğinde denemenin bulgularına paralel olarak ağır metaller gibi stres faktörlerinin klorofil ve karotenoid düzeylerinde düşüşe neden olabileceğini tespit etmişlerdir (Munné-Bosch ve Penvelas, 2004). Benzer şekilde Shao ve ark. (2007) çalışmalarında ağır metallerin bitki hücrelerinde klorofil ve fotosentez gibi metabolik süreçleri olumsuz yönde etkilediğini bildirmişlerdir. Ayrıca Çirka ve ark. (2022) çalışmalarında kuraklık stresi altında alg uygulamalarının klorofil düzeyini olumlu yönde etkilediğini saptamışlardır. Aynı doğrultuda Saied ve ark. (2020) çalışmalarında yer fıstığı bitkisinde alg uygulamalarının bitki fotosentez metabolizmasını ve klorofil düzeylerini önemli düzeyde arttırdığını ifade etmişlerdir.

4.2.8. Hasat Sonrası *Festuca* Çeşitlerinin Toprak Üstü Aksam ve Kök Ağır Metal Konsantrasyonları ve İçerikleri

Deneme toprağında çeşit ve uygulamalar arasındaki toprak üstü aksam 1. ay toprak üstü aksamı metal konsantrasyonlarına ait varyans analizi Tablo 4.55'te, 1. Ay Cd ortalama değerleri 4.56'da, 1. ay ortalama Pb değerleri Tablo 4.58'de, 1. ay ortalama Zn değerleri

Tablo 4.59’da, 2. ay aksamı metal konsantrasyonlarına ait varyans analizi Tablo 4.60’da, 2. ay Cd ortalama değerleri Tablo 4.61’de, Pb değerleri Tablo 4.62’de, Zn değerleri Tablo 4.63’te, 3. ay toprak üstü aksamı metal konsantrasyonu ait varyans analizi Tablo 4.64’te, ortalama Cd değeri Tablo 4.65’te, ortalama Pb Tablo 4.66’da, ortalama Zn Tablo 4.66’de, kök aksamı metal konsantrasyonlarına ait varyans analiz tablosu Tablo 4.67’de, ortalama Cd değerleri Tablo 4.68’da, ortalama Pb değerleri Tablo 4.69’de, ortalama Zn değerleri Tablo 4.70’de verilmiştir.



Tablo 4.50. Deneme toprağında çeşit ve uygulamalar arasındaki 1. ay toprak üstü aksamı metal konsantrasyonlarına ait varyans analiz tablosu

Varyasyon Kaynakları	Cd			Pb			Zn		
	Serbestlik Derecesi	Kareler Ortalaması	F	Serbestlik Derecesi	Kareler Ortalaması	F	Serbestlik Derecesi	Kareler Ortalaması	F
Tekerrür	2	0.0002	0.8041	2	0.694455	0.9995	2	0.05315	0.5861
Çeşit	2	3.8920	10938.49**	2	46.9211	67.5291**	2	318.9397	3516.395**
Uygulama	3	52.8436	148517.4**	3	133.8906	192.6959**	3	1454.576	16037.09**
Çeşit*Uygulama	6	4.6746	13138.09**	6	4.4161	6.3557*	6	37.3808	412.1335**
Hata	22	0.0003		22	0.6948		22	0.0907	
Genel	35			35			35		

** : 0.01 düzeyinde önemli, * : 0.05 düzeyinde önemli

Varyans analiz tablosuna göre 1.ay toprak üstü aksam Cd ve Zn konsantrasyonu uygulama, çeşit ve çeşit*uygulama interaksyonu istatistiksel olarak %1 düzeyinde anlamlı bulunmuştur. 1.ay toprak üstü aksam Pb konsantrasyonu uygulama ve çeşit istatistiksel olarak %1 düzeyinde anlamlı bulunmuş, çeşit*uygulama interaksyonu istatistiksel olarak %5 düzeyinde anlamlı bulunmuştur.

Tablo 4.51. Deneme toprağında farklı biyoremediasyon 1. ay bitki metal Cd değişimlerine ait ortalama değerler

Çeşitler	Mikroalg Dozları g kg ⁻¹				Ortalama
	Kontrol	1.5	3	6	
Jaguar 4G	5.25 ^k	6.16 ⁱ	9.86 ^c	13.06 ^a	8.58^b
Nilüfer	5.60 ^j	7.93 ^f	8.08 ^e	9.18 ^d	7.69^c
Grande II	6.28 ^h	7.76 ^g	9.16 ^d	11.83 ^b	8.76^a
Ortalama	5.71^d	7.28^c	9.03^b	11.35^a	

*: Aynı sütunda aynı harfle gösterilen ortalamalar arasında fark yoktur (p<0.05)

Tablo 4.56 incelendiğinde ilk biçim sonrası bitkide Cd konsantrasyonu 5.25-13.06 mg kg⁻¹ arasında yer almaktadır. Bitkide en yüksek Cd değeri Jaguar 4G çeşidinde 6 g kg⁻¹ dozda 13.06 mg kg⁻¹, en düşük Jaguar 4G çeşidinde kontrol grubunda 5.25 mg kg⁻¹ olarak belirlenmiştir. Cd değerleri incelendiğinde Cd alımında en etkili çeşit Grande II, en etkili doz 6 g kg⁻¹ olarak belirlenmiştir.

Tablo 4.52. Deneme toprağında farklı biyoremediasyon uygulamalarının 1. ay bitki metal Pb değişimlerine ait ortalama değerler

Çeşitler	Mikroalg Dozları g kg ⁻¹				Ortalama
	Kontrol	1.5	3	6	
Jaguar 4G	20.16 ^{de}	22.86 ^c	26.55 ^b	25.90 ^b	23.86^b
Nilüfer	18.87 ^e	22.23 ^{cd}	25.75 ^b	27.25 ^b	23.52^b
Grande II	20.29 ^{de}	26.54 ^b	31.23 ^a	30.37 ^a	27.11^a
Ortalama	19.77^c	23.87^b	27.804^a	27.84^a	

*: Aynı sütunda aynı harfle gösterilen ortalamalar arasında fark yoktur (p<0.05)

Tablo 4.57 incelendiğinde ilk biçim sonrası bitkide Pb konsantrasyonu 18.87-30.37 mg kg⁻¹ arasında yer almaktadır. Bitkide en yüksek Pb değeri Grande II çeşidinde 6 g kg⁻¹ dozda 30.37 mg kg⁻¹, en düşük Nilüfer çeşidinde kontrol grubunda 18.87 mg kg⁻¹ olarak

belirlenmiştir. Pb değerleri incelendiğinde Pb alımında en etkili çeşit Grande II, en etkili dozlar 3 ve 6 g kg⁻¹ olarak belirlenmiştir.

Tablo 4.53. Deneme toprağında farklı biyoremediasyon uygulamalarının 1. ay bitki metal Zn değişimlerine ait ortalama değerler

Çeşitler	Mikroalg Dozları g kg ⁻¹				Ortalama
	Kontrol	1.5	3	6	
Jaguar 4G	137.83 ^h	145.87 ^f	162.70 ^b	168.02 ^a	153.605 ^a
Nilüfer	133.53 ⁱ	146.45 ^f	157.19 ^c	168.68 ^a	153.605 ^b
Grande II	132.37 ^j	141.07 ^g	148.78 ^e	153.14 ^d	143.8 ^c
Ortalama	134.519 ^d	144.467 ^c	156.228 ^b	163.28 ^a	

*: Aynı sütunda aynı harfle gösterilen ortalamalar arasında fark yoktur (p<0.05)

Tablo 4.58 incelendiğinde ilk biçim sonrası bitkide Zn konsantrasyonu 132.37-168.02 mg kg⁻¹ arasında yer almaktadır. Bitkide en yüksek Zn değeri Jaguar 4G çeşidinde 6 g kg⁻¹ dozda 168.02 mg kg⁻¹, en düşük Grande II çeşidinde kontrol grubunda 132.37 mg kg⁻¹ olarak belirlenmiştir. Zn değerleri incelendiğinde Zn alımında en etkili çeşit Jaguar 4G, en etkili dozlar 6 g kg⁻¹ olarak belirlenmiştir.

Tablo 4.54. Deneme toprağında çeşit ve uygulamalar arasındaki 2. ay toprak üstü aksamı metal konsantrasyonlarına ait varyans analiz tablosu

Varyasyon Kaynakları	Cd			Pb			Zn		
	Serbestlik Derecesi	Kareler Ortalaması	F	Serbestlik Derecesi	Kareler Ortalaması	F	Serbestlik Derecesi	Kareler Ortalaması	F
Tekerrür	2	0.000785	1.1162	2	0.998	80.85001	2	0.001186	0.0135
Çeşit	2	16.15882	22943.32**	2	0.3477	28.16991	2	30814.76	351299.8**
Uygulama	3	216.9373	30802.4**	3	3.9892	323.1806*	3	21369.9	243624.9**
Çeşit*Uygulama	6	7.639827	10847.51**	6	1.9241	155.8768	6	10064.6	114740.2**
Hata	22	0.00070409		22	81.01392		22	0.087727	
Genel	35			35			35		

** : 0.01 düzeyinde önemli, * : 0.05 düzeyinde önemli.

Varyans analiz tablosuna göre 2. ay bitki Cd ve Zn konsantrasyonunda uygulama, çeşit ve çeşit*uygulama interaksyonu istatistiksel olarak %1 düzeyinde anlamlı bulunmuştur. 2. ay Pb konsantrasyonunda uygulama istatistiksel olarak %5 düzeyinde önemli bulunmuş, çeşit ve çeşit*uygulama interaksyonu istatistiksel olarak anlamlı bulunmamıştır.

Tablo 4.55. Deneme toprağında farklı biyoremediasyon uygulamalarının 2. ay bitki metal Cd değişimlerine ait ortalama değerler

Çeşitler	Mikroalg Dozları g kg ⁻¹				Ortalama
	Kontrol	1.5	3	6	
Jaguar 4G	15.8 ^k	18.46 ^g	22.48 ^e	29.8 ^a	21.635^b
Nilüfer	15.47 ^l	17.08 ⁱ	21.93 ^f	24.19 ^d	19.6725^c
Grande II	16.88 ^j	18.22 ^h	25.59 ^c	26.21 ^b	21.7266^a
Ortalama	16.05^d	17.92^c	23.33^b	26.73^a	

*: Aynı sütunda aynı harfle gösterilen ortalamalar arasında fark yoktur (p<0.05)

Tablo 4.60 incelendiğinde ikinci biçim Cd konsantrasyonları 15.47-29.8 mg kg⁻¹ arasında yer almaktadır. En yüksek Cd değeri Jaguar 4G çeşidinde 6 g kg⁻¹ mikroalg dozunda 29.8 mg kg⁻¹, en düşük Nilüfer çeşidinde kontrol grubunda 15.46 mg kg⁻¹ olarak belirlenmiştir. İkinci biçimde Cd alımında en etkili çeşit Grande II, en etkili doz 6 g kg⁻¹ olarak bulunmuştur.

Tablo 4.56. Deneme toprağında farklı biyoremediasyon uygulamalarının 2. ay Pb değişimlerine ait ortalama değerler

Çeşitler	Mikroalg Dozları g kg ⁻¹				Ortalama
	Kontrol	1.5	3	6	
Jaguar 4G	55.22 ^{ab}	57.85 ^{ab}	42.31 ^b	75.68 ^a	57.76
Nilüfer	51.45 ^{ab}	53.47 ^{ab}	57.55 ^{ab}	58.7 ^{ab}	55.29
Grande II	55.16 ^{ab}	56.84 ^{ab}	57.48 ^{ab}	62.9 ^{ab}	58.09
Ortalama	53.94^b	56.05^{ab}	52.44^b	65.76^a	

*: Aynı sütunda aynı harfle gösterilen ortalamalar arasında fark yoktur (p<0.05)

Tablo 4.61 incelendiğinde ikinci biçim bitkide Pb konsantrasyonu 42.31-75.68 mg kg⁻¹ arasında yer almaktadır. Bitkide en yüksek Pb değeri Jaguar 4G çeşidinde 6 g kg⁻¹ dozda 75.68 mg kg⁻¹, en düşük Jaguar 4G çeşidinde kontrol grubunda 42.31 mg kg⁻¹ olarak belirlenmiştir. Pb değerleri incelendiğinde en etkili uygulama dozu 6 g kg⁻¹ olduğu saptanmıştır.

Tablo 4.57. Deneme toprağında farklı biyoremediasyon 2. ay bitki Zn konsantrasyonlarına ait ortalama değerler

Çeşitler	Mikroalg Dozları g kg ⁻¹				Ortalama
	Kontrol	1.5	3	6	
Jaguar 4G	581.72 ^j	586.06 ⁱ	765.26 ^b	798.97 ^a	683.00^a
Nilüfer	575.70 ^l	587.00 ^h	598.22 ^f	612.88 ^d	593.45^c
Grande II	579.99 ^k	588.54 ^g	600.66 ^e	619.30 ^c	597.12^b
Ortalama	579.14^d	587.20^c	654.71^b	677.05^a	

*: Aynı sütunda aynı harfle gösterilen ortalamalar arasında fark yoktur (p<0.05)

Tablo 4.62 incelendiğinde ikinci biçim sonrası bitkide Zn konsantrasyonu 575.7-787.97 mg kg⁻¹ arasında yer almaktadır. Bitkide en yüksek Zn değeri Jaguar 4G çeşidinde 6 g kg⁻¹ dozda 168.02 mg kg⁻¹, en düşük Nilüfer çeşidinde kontrol grubunda 575.7 mg kg⁻¹ olarak belirlenmiştir. İkinci biçim sonrası Zn alımında en etkili çeşit Jaguar 4G, en etkili dozlar 6 g kg⁻¹ olarak belirlenmiştir.

Tablo 4.58. Deneme toprağında çeşit ve uygulamalar arasındaki 3. ay toprak üstü aksamı metal konsantrasyonlarına ait varyans analiz tablosu

Varyasyon Kaynakları	Cd			Pb			Zn		
	Serbestlik Derecesi	Kareler Ortalaması	F	Serbestlik Derecesi	Kareler Ortalaması	F	Serbestlik Derecesi	Kareler Ortalaması	F
Tekerrür	2	0.00062	1,6698	2	0.12	1,0754	2	0.001103	0,2135
Çeşit	2	79.54417	214428,1**	2	7812.069	69904,45**	2	4453256	862000000**
Uygulama	3	193.7673	522342,4**	3	4870.067	43578,64**	3	524280.2	101500000**
Çeşit*Uygulama	6	2.610022	7035,864**	6	1333.627	11933,64**	6	163112.7	31571747**
Hata	22	0.000371		22	0.111773		22	0.005166	
Genel	35			35			35		

** : 0.01 düzeyinde önemli, * : 0.05 düzeyinde önemli.

Varyans analiz tablosuna göre 3. ay Cd, Pb ve Zn konsantrasyonlarının uygulama, çeşit ve çeşit*uygulama interaksiyonu istatistiksel olarak %1 düzeyinde anlamlı bulunmuştur.

Tablo 4.59. Deneme toprağında farklı biyoremediasyon uygulamalarının 3. ay bitki Cd değişimlerine ait ortalama değerler

Çeşitler	Mikroalg Dozları g kg ⁻¹				Ortalama
	Kontrol	1.5	3	6	
Jaguar 4G	22.83 ⁱ	23.65 ^h	31.77 ^b	33.81 ^a	28.0158 ^a
Nilüfer	18.5 ⁱ	20.70 ^k	25.59 ^f	27.27 ^e	26.5783 ^b
Grande II	22.02 ^j	23.85 ^g	29.86 ^d	30.57 ^c	23.0150 ^c
Ortalama	21.1189 ^d	22.7344^c	29.0733^b	30.5522 ^a	

*: Aynı sütunda aynı harfle gösterilen ortalamalar arasında fark yoktur (p<0.05)

Tablo 4.64 incelendiğinde hasat sonrası bitkide Cd konsantrasyonu 18.5-33.81 mg kg⁻¹ arasında yer almaktadır. Bitkide en yüksek Cd değeri Jaguar 4G çeşidinde 6 g kg⁻¹ dozda 33.81 mg kg⁻¹, en düşük Nilüfer çeşidinde kontrol grubunda 18.5 mg kg⁻¹ olarak belirlenmiştir. Bitki Cd konsantrasyonu çeşitler arasında çoktan aza Grande II > Nilüfer > Jaguar 4G sırasında, uygulamalarda 6 g mg⁻¹ > 3 g kg⁻¹ > 1.5 g kg⁻¹ > Kontrol sırasındadır. Son biçimler değerlendirildiğinde Cd alımında en etkili çeşit Jaguar 4G, en etkili doz 6 g kg⁻¹ olarak belirlenmiştir.

Tablo 4.60. Deneme toprağında farklı biyoremediasyon uygulamalarının 3. ay bitki Pb konsantrasyonlarına ait ortalama değerler

Çeşitler	Mikroalg Dozları g kg ⁻¹				Ortalama
	Kontrol	1.5	3	6	
Jaguar 4G	194.87 ^f	200.97 ^d	239.43 ^b	294.8 ^a	232.51 ^a
Nilüfer	178.05 ^j	189.06 ^h	191.84 ^g	197.88 ^e	189.20 ^b
Grande II	164.96 ^k	180.56 ⁱ	201.43 ^d	203.01 ^c	187.49 ^c
Ortalama	179.29 ^d	190.19 ^c	210.90 ^b	231.89 ^a	

*: Aynı sütunda aynı harfle gösterilen ortalamalar arasında fark yoktur (p<0.05)

Tablo 4.61 incelendiğinde hasat sonrası bitkide Pb konsantrasyonu 164.96-294.8 mg kg⁻¹ arasında yer almaktadır. Bitkide en yüksek Pb değeri Jaguar 4G çeşidinde 6 g kg⁻¹ dozda 294.8 mg kg⁻¹, en düşük Grande II çeşidinde kontrol grubunda 164.96 mg kg⁻¹ olarak belirlenmiştir. Bitki Pb konsantrasyonu çeşitler arasında Jaguar 4G > Nilüfer > Grande II sıralamasında, uygulamalarda 6 g mg⁻¹ > 3 g kg⁻¹ > 1.5 g kg⁻¹ > Kontrol sırasındadır. Pb değerleri incelendiğinde Pb alımında en etkili çeşit Jaguar 4G, en etkili dozlar 6 g kg⁻¹ olarak belirlenmiştir.

Tablo 4.61. Deneme toprağında farklı biyoremediasyon uygulamalarının 3. ay bitki Zn değişimlerine ait ortalama değerler

Çeşitler	Mikroalg Dozları g kg ⁻¹				Ortalama
	Kontrol	1.5	3	6	
Jaguar 4G	1473.16 ^d	1766.60 ^c	2001.38 ^b	2651.12 ^a	1973.06^a
Nilüfer	798.14 ^k	860.62 ^j	871.81 ⁱ	936.63 ^h	866.80^c
Grande II	765.03 ^l	955.04 ^g	1011.38 ^f	1179.90 ^e	977.84^b
Ortalama	1012.11^d	1194.09^c	1294.86^b	1589.21^a	

*: Aynı sütunda aynı harfle gösterilen ortalamalar arasında fark yoktur (p<0.05)

Tablo 4.66 incelendiğinde Zn konsantrasyonları 765.03-2651.12 mg kg⁻¹ arasında yer almaktadır. En yüksek Zn konsantrasyonu Jaguar 4G çeşidinde 6 g kg mikroalg dozunda 2651.12 mg kg⁻¹, en düşük Grande II çeşidinde kontrol grubunda 765.03 mg kg⁻¹ değerinde elde edilmiştir. Çeşitlerde Zn konsantrasyonu çoktan aza doğru Jaguar 4G > Grande II > Nilüfer sırasında, uygulamalarda 6 g mg⁻¹ > 3 g kg⁻¹ > 1.5 g kg⁻¹ > Kontrol sırasındadır. Son hasatta Zn alımında en etkili çeşit Jaguar 4G, en etkili uygulama 6 g kg⁻¹ olarak belirlenmiştir.

Mikroalg dozları arttıkça çeşitlerin kontrol gruplarına göre toprak üstü aksamalarının ağır metal konsantrasyonları da artan bir eğilim göstermiştir. Ancak konsantrasyonların artmasının bitki çeşitleri arasındaki etkisi farklıdır. Toprak üstü biyokütlesi en düşük olan Jaguar 4G çeşidinde toksisite diğer çeşitlere göre daha belirgindir. Ağır metal alımına en dirençli çeşit ise Nilüfer çeşidi olduğu tespit edilmiştir.

Bulgulara benzer şekilde Yavari ve ark. (2021) kamışsı yumak çeşidini ağır metal kirliliğini giderim amacıyla kullanmış, sonucunda hasat edilen bitki örneklerinin kontrol grubuna göre ağır metal içeriklerinin daha fazla olduğunu ifade etmişlerdir. Steliga ve Kluk (2020) çalışmalarında, *Festuca arundinacea*'yı Pb, Ni, Cd ve petrol hidrokarbonları ile kirlenilmiş topraklarda araştırmış çalışma ile paralel olarak *Festuca*'nın toprak üstü aksamının ağır metal içeriğinin yüksek olduğunu saptamıştır. Kalkan ve ark. (2019) yaptıkları çalışmada flotasyon atıklarındaki Cd, Pb ve Zn gibi ağır metallerin çim bitkisinde zamanla ve uygulamalara göre toprak üstü aksamlarında ağır metal konsantrasyonunun arttığını ifade etmişlerdir.



Tablo 4.62. Deneme toprağında çeşit ve uygulamalar arasındaki kök metal konsantrasyonlarına ait varyans analiz tablosu

Varyasyon Kaynakları	Cd			Pb			Zn		
	Serbestlik Derecesi	Kareler Ortalaması	F	Serbestlik Derecesi	Kareler Ortalaması	F	Serbestlik Derecesi	Kareler Ortalaması	F
Tekerrür	2	0.0004	0,1629	2	0.00072	0.2032	2	1.4092	1.1769
Çeşit	2	35.458	12305,16**	2	2326223.3	65700000**	2	25375926	21193648**
Uygulama	3	2.6922	934,3146**	3	2299406.3	64940000**	3	19825252	16557797**
Çeşit*Uygulama	6	74.259	25770,67**	6	161569.9	45632751**	6	2825152	2359531**
Hata	22	0.0028		22	0.00354		22	1.1818	
Genel	35			35			35		

** : 0.01 düzeyinde önemli, * : 0.05 düzeyinde önemli.

Varyans analiz tablosuna göre kök Cd, Pb ve Zn konsantrasyonlarının uygulama, çeşit ve çeşit*uygulama interaksiyonu istatistiksel olarak %1 düzeyinde anlamlı bulunmuştur.

Tablo 4.63. Deneme toprağında farklı biyoremediasyon uygulamalarının kökte Cd konsantrasyonlarına ait ortalama değerler

Çeşitler	Mikroalg Dozları g kg ⁻¹				
	Kontrol	1.5	3	6	Ortalama
Jaguar 4G	52.01 ^c	48.05 ^h	45.82 ^j	41.91 ^l	46.9475^c
Nilüfer	42.32 ^k	50.45 ^f	51.23 ^d	54.03 ^a	49.5141^b
Grande II	53.62 ^b	49.14 ^g	47.28 ^l	50.8 ^e	50.2116^a
Ortalama	49.3211^a	49.2155^b	48.1122^d	48.9155^c	

*: Aynı sütunda aynı harfle gösterilen ortalamalar arasında fark yoktur (p<0.05)

Tablo 4.68 incelendiğinde kök Cd konsantrasyon değerleri 41.91-54.03 mg kg⁻¹ arasında yer almaktadır. Kök Cd konsantrasyonu en yüksek Nilüfer çeşidinde 6 g kg⁻¹ mikroalg dozunda 54.03 mg kg⁻¹, en düşük Jaguar 4G çeşidinde 6 g kg⁻¹ mikroalg dozunda 41.91 mg kg⁻¹ olarak belirlenmiştir. Kök Cd alımı çoktan aza doğru çeşitler içerisinde Grande II > Nilüfer > Jaguar 4G sırasında, uygulamalar içerisinde Kontrol > 1.5 g kg⁻¹ > 3 g kg⁻¹ > 6 g kg⁻¹ sırasındadır. Kök Cd alımında en etkili olan çeşit Grande II ve uygulamalarda alg uygulaması olmayan saksılarda olduğu saptanmıştır.

Tablo 4.64. Deneme toprağında farklı biyoremediasyon uygulamalarının kökte Pb konsantrasyonlarına ait ortalama değerler

Çeşitler	Mikroalg Dozları g kg ⁻¹				
	Kontrol	1.5	3	6	Ortalama
Jaguar 4G	1836.15 ^f	1321.32 ⁱ	1040.43 ^k	889.1 ^l	1271.75^c
Nilüfer	2801.38 ^a	2599.37 ^b	1898.54 ^d	1210.52 ^j	2127.45^a
Grande II	2458.25 ^c	1888.85 ^e	1694.54 ^g	1476.62 ^h	1879.56^b
Ortalama	2365.26^a	1936.51^b	1544.5^c	1192.08^d	

*: Aynı sütunda aynı harfle gösterilen ortalamalar arasında fark yoktur (p<0.05)

Tablo 4.69 incelendiğinde kök Pb konsantrasyonları 889.1-2801.38 mg kg⁻¹ arasında yer almaktadır. Kök Pb konsantrasyonu en yüksek Nilüfer çeşidinde kontrol grubunda 2801.38 mg kg⁻¹, en düşük Jaguar 4G çeşidinde 6 g kg⁻¹ mikroalg dozunda 889.1 mg kg⁻¹ olarak belirlenmiştir. Kök Pb alımı çoktan aza doğru çeşitler içerisinde Nilüfer > Grande II > Jaguar 4G sırasında, uygulamalar içerisinde Kontrol > 1.5 g kg⁻¹ > 3 g kg⁻¹ > 6 g kg⁻¹ sırasındadır. Kök Pb alımında en etkili olan çeşit Nilüfer ve uygulamalarda alg uygulaması olmayan saksılarda olduğu saptanmıştır.

Tablo 4.65. Deneme toprağında farklı biyoremediasyon uygulamalarının kökte Zn konsantrasyonlarına ait ortalama değerler

Çeşitler	Mikroalg Dozları g kg ⁻¹				
	Kontrol	1.5	3	6	Ortalama
Jaguar 4G	5999.34 ^g	4896.58 ⁱ	4530.46 ^k	3981.45 ^l	4851.96 ^c
Nilüfer	10715.17 ^a	8770.01 ^b	6520.22 ^e	4827.20 ^j	7708.15 ^a
Grande II	8233.55 ^c	6748.99 ^d	6288.17 ^f	5749.46 ^h	6755.04 ^b
Ortalama	8316.02 ^a	6805.19 ^b	5779.62 ^c	4852.70 ^d	

*: Aynı sütunda aynı harfle gösterilen ortalamalar arasında fark yoktur (p<0.05)

Tablo 4.70 incelendiğinde kök Zn konsantrasyonları 3981.45-10715.17 mg kg⁻¹ arasında yer almaktadır. Kök Zn konsantrasyonu en yüksek Nilüfer çeşidinde kontrol grubunda 10715.17 mg kg⁻¹, en düşük Jaguar 4G çeşidinde 6 g kg⁻¹ mikroalg dozunda 3981.45 mg kg⁻¹ olarak belirlenmiştir. Kök Zn alımı çoktan aza doğru çeşitler içerisinde Nilüfer > Grande II > Jaguar 4G sırasında, uygulamalar içerisinde Kontrol > 1.5 g kg⁻¹ > 3 g kg⁻¹ > 6 g kg⁻¹ sırasındadır. Kök Zn alımında en etkili olan çeşit Nilüfer ve uygulamalarda alg uygulaması olmayan saksılarda olduğu saptanmıştır.

Farklı dozlarda mikroalg uygulamalarının hasat sonrası Jaguar 4G, Grande II ve Nilüfer çeşitlerinin köklerinde Cd, Pb ve Zn konsantrasyonu üzerine etkileri değerlendirildiğinde; çeşitlerin tümünde kökte Cd ve Zn konsantrasyonu mikroalg dozlarının arttığı gruplarda kontrol gruplarına göre daha düşük olduğu, Jaguar 4G ve Grande II çeşitlerinin köklerinde mikroalg uygulamalarının arttığı gruplarda kontrol grubuna göre Pb konsantrasyonları azalan bir eğilim gösterdiği, Nilüfer çeşidinde ise mikroalg dozlarının

artığı gruplara göre kökte Pb konsantrasyonunun kontrol gruplarında daha yüksek olduğu belirlenmiştir. *Haematococcus pluviialis* uygulamalarının kökte ağır metal alımını ve stabilizasyonunu arttırdığı düşünülmektedir.

4.3. *Festuca arundinecea* çeşitlerinin Biyoremediasyon Potansiyellerinin Belirlenmesi

Bitkilerin fitoremediasyon ve fitoekstraksiyon kapasitelerini BAF ve TF'ye göre belirlenmektedir.

4.3.1 *Festuca Arundinecea* Çeşitlerinin Biyoakümülyasyon Potansiyellerinin Belirlenmesi

Deneme toprağında çeşit ve uygulamalar arasındaki BAF Cd, Pb ve Zn'ye ait varyans analizi Tablo 4.71'de, BAF Cd ortalama değerleri Tablo 4.72'de, BAF Pb ortalama değerleri Tablo 4.73'te, BAF Zn ortalama değerleri Tablo 4.73'te verilmiştir.

Tablo 4.66. Deneme toprağında çeşit ve uygulamalar BAF Cd, BAF Pb ve BAF Zn düzeylerine ait varyans analiz tablosu

Varyasyon Kaynakları	BAF Cd			BAF Pb			BAF Zn		
	Serbestlik Derecesi	Kareler Ortalaması	F	Serbestlik Derecesi	Kareler Ortalaması	F	Serbestlik Derecesi	Kareler Ortalaması	F
Tekerrür	2	0.0000361	1	2	0.00025	2.11	2	0.0000027	1
Çeşit	2	0.09141945	2531.615**	2	0.32396	2712.30**	2	0.0650361	23413**
Uygulama	3	0.392358333	10865.31**	3	0.0855	715.81**	3	0.01267	4561**
Çeşit*Uygulama	6	0.123375	3416.53**	6	0.03758	314.62**	6	0.018269	6577**
Hata	22	0.000036109		22	0.0001		22	0.000002	
Genel	35			35			35		

** : 0.01 düzeyinde önemli, * : 0.05 düzeyinde önemli

Varyans analiz tablosu incelendiğinde BAF Cd, BAF Pb ve BAF Zn ‘ye uygulama, çeşit ve çeşit*uygulama interaksyonu istatistiksel olarak %1 düzeyinde anlamlı bulunmuştur.

Tablo 4.67. Deneme toprağında farklı biyoremediasyon uygulamalarının BAF Cd değişimlerine ait ortalama değerler

Çeşitler	Mikroalg Dozları g kg ⁻¹				
	Kontrol	1.5	3	6	Ortalama
Jaguar 4G	1.03 ^g	1.02 ^g	1.12 ^e	1.12 ^e	1.07 ^c
Nilüfer	0.77 ⁱ	0.98 ^e	1.45 ^d	1.72 ^a	1.23 ^a
Grande II	1.07 ^f	1.13 ^g	1.25 ^f	1.39 ^d	1.21 ^b
Ortalama	0.95 ^d	1.04 ^c	1.27 ^b	1.41 ^a	

*: Aynı sütunda aynı harfle gösterilen ortalamalar arasında fark yoktur (p<0.05)

Tablo 4.71 incelendiğinde BAF Cd değerleri 0.77-1.72 değerleri arasında yer almaktadır. BAF Cd, en yüksek Nilüfer çeşidinde 6 g kg⁻¹ mikroalg dozunda 1.73, en düşük Nilüfer çeşidinde kontrol grubunda 0.77 saptanmıştır. BAF Cd oranı en yüksek çeşit Nilüfer, en etkili doz ise 6 gkg-1 olarak belirlenmiştir. Çeşitlerde BAF Cd oranı çoktan aza doğru Nilüfer > Grande II > Jaguar 4G sırasındadır.

Tablo 4.68. Deneme toprağında farklı biyoremediasyon uygulamalarının BAF Pb değişimlerine ait ortalama değerler

Çeşitler	Mikroalg Dozları g kg ⁻¹				
	Kontrol	1.5	3	6	Ortalama
Jaguar 4G	0.78 ^e	0.61 ^g	0.57 ^h	0.68 ^f	0.66 ^b
Nilüfer	1.05 ^b	1.13 ^a	0.92 ^c	0.68 ^f	0.95 ^a
Grande II	1.05 ^b	0.95 ^c	0.93 ^c	0.86 ^d	0.95 ^a
Ortalama	0.96 ^a	0.9 ^b	0.81 ^c	0.74 ^d	

*: Aynı sütunda aynı harfle gösterilen ortalamalar arasında fark yoktur (p<0.05)

Tablo 4.72 incelendiğinde BAF Pb değerleri 0.57-1.13 değerleri arasında yer almaktadır. BAF Pb, en yüksek Nilüfer çeşidinde 1.5 g kg⁻¹ mikroalg dozunda 1.13, en düşük Jaguar

4G çeşidinde kontrol grubunda 0.57 saptanmıştır. BAF Pb oranı en yüksek çeşit Nilüfer, ve Grande II, en etkili uygulama ise kontrol gruplarında belirlenmiştir. Çeşitlerde BAF Pb oranı çoktan aza doğru Nilüfer = Grande II > Jaguar 4G sırasındadır.

Tablo 4.69. Deneme toprağında farklı biyoremediasyon uygulamalarının BAF Zn değişimlerine ait ortalama değerler

Çeşitler	Mikroalg Dozları g kg ⁻¹				Ortalama
	Kontrol	1.5	3	6	
Jaguar 4G	0.61 ^j	0.63 ^l	0.68 ^h	0.78 ^d	0,675^c
Nilüfer	0.84 ^c	0.84 ^c	0.85 ^b	0.74 ^f	0,8175^b
Grande II	0.75 ^e	0.71 ^g	0.74 ^f	0.91 ^a	0,7783^a
Ortalama	0,7333^c	0,7277^d	0,7566^b	0,81^a	

*: Aynı sütunda aynı harfle gösterilen ortalamalar arasında fark yoktur (p<0.05)

Tablo 4.73 incelendiğinde BAF Zn oranları 0.61-0.91 arasında yer almaktadır. BAF Zn oranı en yüksek Grande II çeşidinde 6 g kg⁻¹ mikroalg dozunda 0.91, en düşük Jaguar çeşidinde kontrol grubunda 0.61 bulunmuştur. BAF Zn oranı çeşitlere göre Grande II > nilüfer > Jaguar 4G sırasında belirlenmiştir.

Ağır metal kirliliğinde fitoremediasyon için bitkinin BAF oranının 1'den büyük olması gerekmektedir. BAF oranı yüksek olan çeşitler akümülatör veya hiperakümülatör bitkiler olarak değerlendirilmektedir. *Festuca arundinacea* çeşitlerinin biyoremediasyon potansiyellerini belirlemek için Cd, Pb ve Zn metallerinin biyoakümülyasyon oranları değerlendirildiğinde, BAF Cd oranı mikroalg uygulamalarının artmasıyla, çeşitlerde biyoakümülyasyon faktörü artan, BAF Pb oranı mikroalg uygulamalarının artmasıyla çeşitlerde biyoakümülyasyon faktörü azalan, BAF Zn oranı uygulamaların artmasıyla Jaguar 4G ve Grande II çeşidinde artan, Nilüfer çeşidinde azalan bir eğilim saptanmıştır. *Festuca arundinacea* çeşitlerinin Cd, Pb ve Zn ağır metallerine göre akümülatör bitki olup olmadığı ve fitoekstraksiyon kapasitesiteleri değerlendirilmiş, çeşitlerin tümünün Cd için akümülatör özellikte olduğunu, ancak en çok Cd akümülyasyonunu Grande II

çeşidinin sağladığı belirlenmiştir. Pb için Grande II ve Nilüfer çeşitlerinin akümülatör özellik taşıdığı, Zn biyoakümülyasyon değerlerine göre ise çeşitlerin tümünün akümülatör özellik gösterdiği ancak en çok Nilüfer çeşidinin akümülyasyon düzeyinin yüksek olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, Mikroalglerin ağır metali köklerde tutarak toprak üstü aksama taşımaması için direnç oluşturabileceği düşünülmektedir.

Çalışmayla benzer şekilde Şahin (2007) çalışmasında, Kamışsı Yumak (*Festuca arundinacea* Schreb.) ve Mısır (*Zea mays* L.) bitkilerini kurşunla kirlenmiş toprakta akümülyasyon potansiyellerini araştırmış, sonucunda *Festuca arundinacea* bitkisinin biyoakümülyasyon oranının yüksek olduğunu bildirmiştir. Aynı doğrultuda Wasilkowski ve ark. (2019) çalışmalarında, sodyum bentonit ve kompostu tek tek ve *Festuca arundinacea* ile kombine bir şekilde, yüksek seviyede Pb, Zn ve Cd ile kirlenmiş toprağın ıslahında değerlendirmişler, sonucunda *Festuca arundinacea*'nın ağır metalleri topraktan önemli düzeyde kaldırdığını ve potansiyeli yüksek olan akümülatör bitki olduğunu ifade etmişlerdir. Espada ve ark. (2022) yaptıkları çalışmada *Festuca arundinacea*'yı Pb ile kirli alanların ıslahında kullanmışlar, sonucunda bitkinin başarılı bir şekilde akümüle etme yeteneğinin yüksek olduğunu, Küçükhemek ve ark. (2006) çalışmalarında ağır metal gideriminde çim bitkisinin akümülyasyon potansiyelini araştırmışlar, sonucunda çim bitkisinin ağır metal kirliliği görülen yerlerde iyi bir akümülatör bitki olarak kullanılacağını bildirmişlerdir. Ancak Cao ve ark. (2007) çalışmalarında ağır metal kirliliği olan sahalarda *Festuca arundinacea* ve farklı çeşit bitkiler kullanarak fitoremediasyon kapasitelerini araştırmışlar, sonucunda *Festuca*'nın diğer bitkilere göre biyoakümülyasyon oranının düşük olduğunu bildirmişlerdir.

4.3.2 *Festuca Arundinecea* Çeşitlerinin Translokasyon Faktörünün Belirlenmesi

Deneme toprağında çeşit ve uygulamalar arasındaki TF Cd, Pb ve Zn'ye ait varyans analizi Tablo 4.74'te, TF Cd ortalama değerleri Tablo 4.75'de, TF Pb ortalama değerleri Tablo 4.76'da, TF Zn ortalama değerleri Tablo 4.77'de verilmiştir.

Tablo 4.70. Deneme toprağında çeşit ve uygulamalar TF Cd, TF Pb ve TF Zn düzeylerine ait varyans analiz tablosu

Varyasyon Kaynakları	TF Cd			TF Pb			TF Zn		
	Serbestlik Derecesi	Kareler Ortalaması	F	Serbestlik Derecesi	Kareler Ortalaması	F	Serbestlik Derecesi	Kareler Ortalaması	F
Tekerrür	2	0.0001	2.40	2	0.000001	1	2	0.00001	1
Çeşit	2	0.0645	1996.58**	2	0.04232	5079**	2	0.3454	12436**
Uygulama	3	0.096	2992.31**	3	0.029	3480**	3	0.0779	28060**
Çeşit*Uygulama	6	0.0163	5007.34**	6	11.8327	483**	6	0.0016	6037 **
Hata	22	0.00003		22	0.004		22	0.00001	
Genel	35			35			35		

** : 0.01 düzeyinde önemli, * : 0.05 düzeyinde önemli

Varyans analiz tablosu incelendiğinde TF Cd, Pb ve Zn oranlarında uygulama, çeşit ve çeşit uygulama interaksiyonları istatistiksel olarak %1 düzeyinde anlamlı bulunmuştur.

Tablo 4.71. Deneme toprağında farklı biyoremediasyon uygulamalarının TF Cd değişimlerine ait ortalama değerler

Çeşitler	Mikroalg Dozları g kg ⁻¹				
	Kontrol	1.5	3	6	Ortalama
Jaguar 4G	0.43 ^g	0.48 ^{ef}	0.60 ^b	0.8 ^a	0.60^a
Nilüfer	0.41 ^h	0.43 ^g	0.48 ^f	0.5 ^e	0.45^c
Grande II	0.4 ^h	0.48 ^{ef}	0.63 ^c	0.60 ^d	0.53^b
Ortalama	0.42^d	0.46^c	0.60^b	0.63^a	

*: Aynı sütunda aynı harfle gösterilen ortalamalar arasında fark yoktur (p<0.05)

Tablo 4.75 incelendiğinde TF Cd oranları 0.4-0.81 değerleri arasında değişmektedir. TF Cd, en yüksek Jaguar 4G çeşidinde 6 g kg⁻¹ mikroalg dozunda 0.81, en düşük Grande II çeşidinde kontrol grubunda 0.4 oranında saptanmıştır. TF Cd oranı için en etkili çeşit Jaguar 4G, en etkili uygulama 6 g kg⁻¹ olarak belirlenmiştir.

Tablo 4.72. Deneme toprağında farklı biyoremediasyon uygulamalarının TF Pb değişimlerine ait ortalama değerler

Çeşitler	Mikroalg Dozları g kg ⁻¹				
	Kontrol	1.5	3	6	Ortalama
Jaguar 4G	0.11 ^g	0.15 ^d	0.23 ^b	0.33 ^a	0.20^a
Nilüfer	0.06 ^j	0.07 ⁱ	0.1 ^h	0.16 ^e	0.09^c
Grande II	0.07 ⁱ	0.1 ^h	0.12 ^f	0.14 ^e	0.10^b
Ortalama	0.08^d	0.1^c	0.15^b	0.21^a	

*: Aynı sütunda aynı harfle gösterilen ortalamalar arasında fark yoktur (p<0.05)

Tablo 4.76 incelendiğinde TF Pb oranları 0.06-0.33 değerleri arasında yer almaktadır. TF Pb, en yüksek Jaguar 4G çeşidinde 6 g kg⁻¹ mikroalg dozunda 0.33, en düşük Nilüfer çeşidinde kontrol grubunda 0.06 saptanmıştır. TF Pb’de en etkili çeşit Jaguar 4G, en etkili uygulama 6 g kg⁻¹ olarak belirlenmiştir.

Tablo 4.73. Deneme toprağında farklı biyoremediasyon uygulamalarının TF Zn değişimlerine ait ortalama değerler

Çeşitler	Mikroalg Dozları g kg ⁻¹				Ortalama
	Kontrol	1.5	3	6	
Jaguar 4G	0.24 ^d	0.36 ^c	0.44 ^b	0.67 ^a	0.42^a
Nilüfer	0.07 ^l	0.1 ^j	0.13 ⁱ	0.19 ^f	0.12^c
Grande II	0.09 ^k	0.14 ^h	0.16 ^g	0.21 ^e	0.15^b
Ortalama	0.13^d	0.2^c	0.24^b	0.35^a	

*: Aynı sütunda aynı harfle gösterilen ortalamalar arasında fark yoktur (p<0.05)

Tablo 4.77 incelendiğinde TF Zn oranları 0.08-0.67 değerleri arasında yer almaktadır. TF Zn, en yüksek Jaguar 4G çeşidinde 6 g kg⁻¹ mikroalg dozunda 0.67, en düşük Nilüfer çeşidinde kontrol grubunda 0.08 saptanmıştır. En etkili çeşit Jaguar 4G, en etkili uygulama 6 g kg⁻¹ olarak belirlenmiştir.

Bulgularda, TF Cd, TF Pb ve TF Zn oranları uygulamaların artmasıyla çeşitlerde artan bir eğilim göstermiş ve mikroalg uygulamalarının topraktan ağır metal kaldırılmasında önemli bir etkisinin olduğu saptanmıştır. Çeşitlere göre Cd, Pb ve Zn translokasyonu faktörü çoktan aza doğru Jaguar 4G>Grande II>Nilüfer sırasındadır. TF değerinin 1'den küçük olması ağır metallerin kökte tutularak üst aksamaya iletilmediğini göstermekte ve fitostabilizasyon sağladığı düşünülmektedir (Tiryaki ve Potur, 2017; Arlı 2006; Vanlı ve ark., 2008).

Çalışma ile aynı doğrultuda, Khashij ve ark. (2018) *Festuca* bitkisinin TF değerinin 1'den daha düşük olduğunu, fitostabilizatör özellikte bir çeşit olduğunu ifade etmişlerdir. Benzer şekilde Gonzalez ve ark. (2021) çalışmalarında *Festuca arundinacea* bitkisini Zn kirliliği görülen topraklarda ıslah amacıyla kullanmışlar ve çalışmaları sonucunda çalışmayı destekler doğrultuda, BAF değerinin 1'den yüksek olduğunu ancak TF değerinin 1'den düşük olduğunu bildirmişlerdir. Soleimani ve ark. (2009) nikel ve kurşun kirliliği olan topraklarda *Festuca arundinacea* bitkisinin kirlilik giderimi amacıyla kullanmış, bitkinin TF değerinin 1'den küçük, BAF değerinin 1'den büyük olduğunu, bitkinin fitoekstraksiyon için yeterli olmadığını ancak potansiyeli yüksek bir

fitoakümülatör olduğunu, Pandey (2013) çalışmasında, Pb, Zn ve Ni kirliliği olan yerlerde *Ricinus communis* L.'yi fitoremediasyon amacıyla kullanmış ve BAF oranının 1'den büyük olduğunu ancak TF oranının 1'den küçük olduğunu ve ağır metallerin kökte daha fazla biriktiğini bildirmiştir.

4.3.3. Farklı Biyoremediasyon Tekniklerini %Biyogiderim Potansiyellerinin Belirlenmesi

Deneme toprağında çeşit ve uygulamalar arasındaki % Biyogiderim Cd, Pb ve Zn'ye ait varyans analizi Tablo 4.78'de, % Biyogiderim Cd ortalama değerleri Tablo 4.79'de, % Biyogiderim Pb ortalama değerleri Tablo 4.80'da, % Biyogiderim Zn ortalama değerleri Tablo 4.81'de verilmiştir.

Tablo 4.74. Deneme toprağında çeşit ve uygulamalar arasındaki % Cd, Pb ve Zn biyogiderimine ait varyans analiz tablosu

Varyasyon Kaynakları	Cd			Pb			Zn		
	Serbestlik Derecesi	Kareler Ortalaması	F	Serbestlik Derecesi	Kareler Ortalaması	F	Serbestlik Derecesi	Kareler Ortalaması	F
Tekerrür	3	0,02	0.1964	3	31.185	5,276	3	29,4	0,8183
Çeşit	2	7666,9493	75258.4**	2	270549.37	45771,2**	2	352826,2	9827,031**
Uygulama	3	840,3496	8248.832**	3	34801.3833	5887,654**	3	87012,23333	2423,494**
Çeşit*Uygulama	9	294,4734	2890.537**	9	2218.1133	375,2577**	9	4385,677778	122,1514**
Hata	30	0,1012		30	5.276		30	3.9033	0,8183**
Genel	47			47			47		

** : 0.01 düzeyinde önemli, * : 0.05 düzeyinde önemli.

Varyans analiz tablosu incelendiğinde % Biyogiderim Cd, Pb ve Zn’de uygulama, çeşit ve çeşit*uygulama interaksiyonu istatistiksel olarak %1 düzeyinde anlamlı bulunmuştur.

Tablo 4.75. Deneme toprağında farklı biyoremediasyon uygulamalarının % Cd biyogiderim değişimlerine ait ortalama değerler

Çeşitler	Mikroalg Dozları g kg ⁻¹				Ortalama
	Kontrol	1.5	3	6	
Jaguar 4G	74.53 ^{gh}	75.19 ^{ef}	82.72 ^{ab}	83,61 ^a	79.0158^a
Nilüfer	72.63 ^g	74.88 ^f	81.44 ^c	82.08 ^{bc}	77.7583^b
Grande II	74.96 ^f	76.05 ^e	77.63 ^d	78.38 ^d	76.76^c
Bitkisiz Ortam	0.28 ^k	20.04 ^j	34.33 ⁱ	54.65 ^h	27.325^d
Ortalama	55.60^d	61.54^c	69. 03^b	74.68^a	

*: Aynı sütunda aynı harfle gösterilen ortalamalar arasında fark yoktur (p<0.05)

Tablo 4.79 incelendiğinde bütün uygulamalarda % Cd biyogiderimi kontrol gruplarına göre artış göstermiş ve değerler içerisinde en çok 6 g kg dozu etkili olurken, kontrol gruplarında en düşük değerler elde edilmiştir. Çeşitler arasında en yüksek giderim potansiyeli olan çeşit jaguar, en düşük giderim bitki yetiştiriciliği olmayan ortamda belirlenmiştir. %Cd biyogiderimi, en yüksek Jaguar 4G çeşidinde 6 g kg⁻¹ dozunda %83.61, en düşük bitki yetiştiriciliği olmayan toprakta kontrol grubunda %0.28 elde edilmiştir. Bulgular sonucunda, *Festuca arundinacea* yetiştiriciliği ve *Haematococcus pluvialis* uygulaması olan saksılarda % biyogiderim'in daha yüksek olduğu, mikroalg dozlarının arttığı gruplarında kontrol gruplarına göre daha yüksek seviyede Cd biyogiderimi olduğu belirlenmiştir. % Cd biyogideriminde mikroalg uygulamalarının etkisi 6 g kg⁻¹ > 3 g kg⁻¹ > 1.5 g kg⁻¹ > Kontrol, çeşitlerin etkisi Jaguar 4G > Nilüfer > Grande II > Kontrol olarak elde edilmiştir.

Bulguları destekler doğrultuda, Seyfikalhor ve ark. (2020) yaptıkları çalışmada mısır (*Zea mays L.*) tohumunun salep sakızı, *Spirulina platensis* ve kombinasyonu ile Cd konsantrasyonunun yüksek olduğu yetiştirme ortamında etkisinin değerlendirmişler, *Spirulina platensis* mikroalginin Cd toksisitesine karşı direnç oluşturduğunu bitkiye alımını engellediğini ve biyogiderim potansiyelinin yüksek olduğunu, Palta (2019) çalışmasında *Escherichiae coli* ile ağır metal biyogiderimini araştırmış sonucunda Pb ve

Cd'nin hücre dışında daha çok adsorplandığını ve biyogiderim potansiyelinin yüksek olduğunu, Zeraatkar ve ark. (2016) mikroalglerin kirli alanlarda ıslah amaçlı kullanılabileceğini ve biyogiderimi yüksek bir materyal olduğunu ifade , Murugesan ve ark. (2008) yaptıkları çalışmada *Spirulina platensis* mikroalgini ağır metal biyosorpsiyonu ve biyogiderimi amacıyla kullanmış, Cd biyogiderim potansiyelinin yüksek olduğunu bildirmişlerdir. Ayrıca, mikroalglerin ağır metal toksisitesine karşı immobilizasyon, şelasyon, redoks etkisini azaltan antioksidanlar gibi birçok mekanizmalara sahip oldukları bilinmektedir (Barquilha ve ark, 2017; Saravanan ve ark, 2021; Ratnasari ve ark, 2022).

Tablo 4 76. Deneme toprağında farklı biyoremediasyon uygulamalarının % Pb biyogiderim değişimlerine ait ortalama değerler

Çeşitler	Mikroalg Dozları g kg ⁻¹				Ortalama
	Kontrol	1.5	3	6	
Jaguar 4G	285.62 ^h	303.42 ^g	342.23 ^e	472.34 ^a	350.9 ^b
Nilüfer	251.27 ⁱ	311.59 ^f	345.16 ^e	382.64 ^c	322.66 ^c
Grande II	301.44 ^g	360.4 ^d	388.89 ^c	410.55 ^b	365.32 ^a
Bitkisiz Ortam	0.61 ^m	38.37 ^l	69.5 ^k	83.88 ^j	48.09 ^d
Ortalama	209.73 ^d	253.44 ^c	286.44 ^b	337.35 ^a	

*: Aynı sütunda aynı harfle gösterilen ortalamalar arasında fark yoktur (p<0.05)

Tablo 4.80 incelendiğinde %Pb biyogiderim % 0.61-472.34 arasında yer almaktadır. %Pb giderimi, en yüksek Jaguar 4G çeşidinde 6 g kg⁻¹ mikroalg dozunda % 472.34, en düşük bitki yetiştiriciliği olmayan toprakta kontrol grubunda hasat öncesi değerle aynı olduğu saptanmıştır. Çeşitlerde Pb biyogideriminde en etkili çeşit Grande II, uygulama dozlarında ise 6 g kg⁻¹ olarak belirlenmiştir.

Tablo 4.77. Deneme toprağında farklı biyoremediasyon uygulamalarının % Zn biyogiderim değişimlerine ait ortalama değerler

Çeşitler	Mikroalg Dozları g kg ⁻¹				Ortalama
	Kontrol	1.5	3	6	
Jaguar 4G	290.38 ^f	354.87 ^d	471.71 ^c	466.76 _b	387,36^b
Nilüfer	250.84 ^g	321.31 ^e	451.96 ^b	451.96 ^c	386,19^a
Grande II	301.04 ^f	328.32 ^e	386.80 ^c	533.30 ^a	378,43^a
Bitkisiz Ortam	0.83 ^j	13.83 ^j	45.95 ^g	103.97 ^h	41,15^c
Ortalama	210.77^d	254.58^c	321.59^b	406.18^a	

*: Aynı sütunda aynı harfle gösterilen ortalamalar arasında fark yoktur (p<0.05)

Tablo 4.81 incelendiğinde % Zn biyogiderim değerleri 0.83-533.3 aralığında yer almaktadır. %Zn giderimi, en yüksek Jaguar 4G çeşidinde 6 g kg⁻¹ mikroalg dozunda %533.3, en düşük bitki yetiştiriciliği olmayan toprakta kontrol grubunda hasat öncesi değerle aynı olduğu saptanmıştır. Zn biyogideriminde çeşitler arasında en etkili çeşit Nilüfer çeşidi, uygulamalar arasında en etkili doz 6 g kg⁻¹ olarak belirlenmiştir.

Bulgular sonucunda, *Festuca arundinacea* yetiştiriciliği ve *Haematococcus pluvialis* uygulaması olan saksılarda % biyogiderim'in daha yüksek olduğu, mikroalg dozlarının arttığı gruplarında kontrol gruplarına göre daha yüksek seviyede Cd, Pb ve Zn biyogiderimi olduğu saptanmıştır. Çeşitler arasında % Cd ve Pb giderim potansiyelleri çoktan aza doğru Jaguar 4G>Grande II>Nilüfer>Toprak sırasındadır. Zn giderim potansiyelleri ise çeşitlere göre çoktan aza doğru Jaguar 4G>Nilüfer> Grande II sırasındadır. Sadece *Haematococcus pluvialis* uygulamalarının ağır metal çeşitlerini giderim sırası çoktan aza doğru Zn>Cd>Pb, farklı biyoremediasyon tekniklerinin birlikte kullanımının ağır metallerin giderim potansiyelleri üzerine etkisinin ise Cd>Pb>Zn sırasında olduğu saptanmıştır.

4.3.4. Farklı Biyoremediasyon Tekniklerini Remediasyon Verimini (RV) Üzerine Etkisinin Belirlenmesi

Deneme toprağında çeşit ve uygulamalar arasındaki RV Cd, Pb ve Zn'ye ait varyans analizi Tablo 4.82'de, RV Cd ortalama değerleri Tablo 4.83'te, RV Pb ortalama değerleri Tablo 4.84'de, RV Zn ortalama değerleri Tablo 4.85'te verilmiştir.



Tablo 4.78. Deneme toprağında çeşit ve uygulamalar arasındaki RV Cd, RV Pb ve RV Zn düzeylerine ait varyans analiz tablosu

	Cd			Pb			Zn		
Varyasyon Kaynakları	Serbestlik Derecesi	Kareler Ortalaması	F	Serbestlik Derecesi	Kareler Ortalaması	F	Serbestlik Derecesi	Kareler Ortalaması	F
Tekerrür	2	0.7066	726.7343	2	0.17596	6.886	2	0.00084	0.6433
Çeşit	2	567	726,7343**	2	26.9215	1053.55**	2	37.4174	28642.51**
Uygulama	3	313.42	401,7228**	3	7.49118	293.16**	3	21.5318	16482.33**
Çeşit*Uygulama	6	0.0002	398,3656**	6	13.0473	510.594**	6	52.9038	40497.16**
Hata	22	0.078		22	0.02555		22		
Genel	35			35			35		

** : 0.01 düzeyinde önemli, * : 0.05 düzeyinde önemli.

Varyans analiz tablosu incelendiğinde RV Cd, Rv Pb ve RV Zn’de uygulama, çeşit ve çeşit uygulama interaksiyonları istatistiksel olarak %1 düzeyinde önemli bulunmuştur.

Tablo 4.79. Deneme toprağında farklı biyoremediasyon uygulamalarının RV Cd'ye ait ortalama değerler

Çeşitler	Mikroalg Dozları g kg ⁻¹				Ortalama
	Kontrol	1,5	3	6	
Jaguar 4G	27.22 ^e	31.43 ^d	27.23 ^e	10.24 ^h	24.03 ^c
Nilüfer	16.25 ^g	23.89 ^f	42.13 ^d	32.77 ^{cd}	28.76 ^b
Grande II	24.9 ^{ef}	35.2 ^c	42.37 ^b	47.83 ^a	37.57 ^a
Ortalama	22.79 ^c	30.17 ^b	37.24 ^a	30.28 ^b	

*: Aynı sütunda aynı harfle gösterilen ortalamalar arasında fark yoktur (p<0.05)

Tablo 4.83 incelendiğinde RV Cd değerleri %16.25-47.83 aralığında yer almaktadır. En yüksek RV değeri Grande II çeşidinde 6 g kg mikroalg dozunda %47.83, en düşük Nilüfer çeşidinde kontrol grubunda % 16.25 değerinde elde edilmiştir. Çeşitlerde Cd için RV çoktan aza doğru Grande II> Nilüfer > Jaguar 4G sırasında, uygulamalarda etkisi 3 g kg⁻¹ > 6 g kg⁻¹ > 1.5 g kg⁻¹ > Kontrol sırasında olduğu belirlenmiştir.

Tablo 4.80. Deneme toprağında farklı biyoremediasyon uygulamalarının RV Pb değişimlerine ait ortalama değerler

Çeşitler	Mikroalg Dozları g kg ⁻¹				Ortalama
	Kontrol	1.5	3	6	
Jaguar 4G	6.56 ^e	7.74 ^d	4.43 ^g	2.44 ^h	5.29 ^c
Nilüfer	4.36 ^g	6.42 ^e	7.68 ^d	5.87 ^f	6.08 ^b
Grande II	5.46 ^f	8.34 ^c	8.93 ^b	10.03 ^a	8.19 ^a
Ortalama	5.46 ^d	7.50 ^a	7.01 ^b	6.11 ^c	

*: Aynı sütunda aynı harfle gösterilen ortalamalar arasında fark yoktur (p<0.05)

Tablo 4.84 incelendiğinde Pb Rv değerleri %5.46-10.03 arasında yer almaktadır. En yüksek Pb RV Grande II çeşidinde 6 g kg⁻¹ mikroalg dozunda %10.03, en düşük Grande II çeşidinde kontrol grubunda %5.46 elde edilmiştir. Çeşitlerin Pb RV değerleri çoktan aza doğru Grande II > Nilüfer > Jaguar 4G sırasında, uygulamalar 1.5 g kg⁻¹ > 3 g kg⁻¹ >

6 g kg⁻¹ > Kontrol sırasındadır. Çeşitlerde en etkili Pb RV sağlayan Grande II, uygulamalarda 1.5 g kg⁻¹ olarak belirlenmiştir.

Tablo 4.81. Deneme toprağında farklı biyoremediasyon uygulamalarının RV Zn değişimlerine ait ortalama değerler

Çeşitler	Mikroalg Dozları g kg ⁻¹				
	Kontrol	1.5	3	6	Ortalama
Jaguar 4G	10.52 ^c	15.74 ^a	8.77 ^f	4.41 ^j	9.86^a
Nilüfer	4.01 ^k	6.23 ^h	8.94 ^e	7.46 ^g	6.66^c
Grande II	5.17 ⁱ	8.86 ^{ef}	9.30 ^d	14.91 ^b	9.56^b
Ortalama	6.57^d	10.28^a	9.01^b	8.93^c	

*: Aynı sütunda aynı harfle gösterilen ortalamalar arasında fark yoktur (p<0.05)

Tablo 4.85 incelendiğinde Zn Rv değerleri %4.01-15.74 arasında yer almaktadır. En yüksek Zn RV Jaguar 4G çeşidinde 3 g kg⁻¹ mikroalg dozunda %15.74, en düşük Grande II çeşidi kontrol grubunda %5.17 elde edilmiştir. Çeşitlerin Zn RV değerleri çoktan aza doğru Jaguar 4G > Grande II > Nilüfer sırasındadır, uygulamalar 1.5 g kg⁻¹ > 3 g kg⁻¹ > 6 g kg⁻¹ > Kontrol sırasındadır. Çeşitlerde en etkili Zn RV sağlayan Jaguar 4G, uygulamalarda 1.5 g kg⁻¹ olarak belirlenmiştir.

Bulgulara paralel şekilde Kumar ve ark. (2022) gerçekleştirdikleri çalışmada *Monochoria korsakowi*, *Lolium perenne*, *Festuca rubra*, *Poa pratensis*, *Ricinus communis*, *Siegesbeckia orientalis* çeşitlerinin RV arttırıcı etkilerinin olduğunu, Awad ve ark. (2022) gerçekleştirdikleri çalışmada kirlilik görülen ortamda *Amaranthus tricolor* L. bitkisi kullanmış ve organik madde uygulamış, çalışma sonucunda kontrol grubuna göre organik madde uygulaması olan ortamlarda daha fazla Cu, Pb ve Zn için RV sağladığını, Qiao ve ark. (2020) *Brassica napus* L. bitkisi ve organik asitler kullanılarak fitoremediasyon verimlerini araştırmışlar ve çalışma sonucunda kontrol gruplarına göre organik asit ilaveli ortamların Cd RV'sinin daha fazla olduğunu ifade etmişlerdir. Bulguların çalışmayı destekler nitelikte olduğunu göz önüne alarak, mikroalg uygulamalarının RV'yi desteklediği, çeşitler arasında ise metal mekanizmasına bağlı olarak RV'yi önemli düzeyde arttırdığı düşünülmektedir.

5. BÖLÜM

SONUÇ ve ÖNERİLER

Çalışma kapsamında; Cd, Pb ve Zn metalleri ile kirlenmiş topraklarda akümülatör bir bitki olan *Festuca arundinacea* çim türünün; Nilüfer, Grande II, Jaguar 4G çeşitleri ve *Haematococcus pluvialis* mikroalgi (0,1.5,3,6 mg kg⁻¹) biyoremediasyon amacıyla ayrı ayrı ve kombinasyonlarıyla uygulanabilirliği araştırılmıştır. Çalışma sonuçları ve öneriler aşağıda yer almaktadır.

Denemede; toprak pH'sında elde edilen verilere göre uygulama dozlarının artışı çeşitlerde pH düşüşüne yol açmış ve en yüksek pH, bitki yetiştiriciliği yapılmayan kirli kontrol toprağında 8.40, en düşük pH değeri 8.13 ile Nilüfer çeşidinde 6 g kg⁻¹ mikroalg uygulamasından elde edilmiştir.

En yüksek organik madde değeri, Nilüfer çeşidi toprağında 6 g kg⁻¹ mikroalg dozunda %1.38, en düşük organik madde Grande II çeşidi toprağında kontrol grubunda %1.31 olarak belirlenmiştir. Değerler %1.30-1.38 arasında yer almaktadır. Organik madde toprak için en önemli verimlilik parametreleri arasında yer almaktadır. Mikroalg ve Fetuca çeşitlerinin uygulaması, toprakta genel olarak kontrol grubuna göre organik madde düzeyi artış göstermiştir.

En yüksek yarayışlı P₂O₅ düzeyi, bitki yetiştiriciliği olmayan toprakta 6 g kg⁻¹ mikroalg dozunda 3.51 mg kg⁻¹, en düşük yarayışlı P₂O₅ düzeyi bitki yetiştiriciliği olmayan 3 g kg⁻¹ mikroalg dozunda 2.59 mg kg⁻¹ ölçülmüştür.

En yüksek yarayışlı Cd konsantrasyonu bitki yetiştiriciliği olmayan toprakta, kontrol grubunda 24.70 mg kg⁻¹, en düşük yarayışlı Cd konsantrasyonu Jaguar 4G çeşidinde 6 g kg⁻¹ mikroalg dozunda 11.65 mg kg⁻¹ ölçülmüştür. Hasat sonrası toprak yarayışlı Cd

konsantrasyonu çeşitlerin toprağında çoktan aza doğru sırasıyla Bitkisiz ortam > Grande II > Nilüfer > Jaguar 4G sırasında ve yarayışlı Cd düşünde en etkili çeşit Jaguar 4G, en etkili doz 6 g kg⁻¹ olarak belirlenmiştir.

En yüksek yarayışlı Pb konsantrasyonu bitki yetiştiriciliği olmayan toprakta kontrol grubunda 61.21 mg kg⁻¹, en düşük yarayışlı Pb konsantrasyonu Jaguar 4G çeşidinde 6 g kg⁻¹ mikroalg dozunda 29.32 mg kg⁻¹ ölçülmüştür. Toprakta yarayışlı Pb konsantrasyonunun çoktan aza doğru çeşitlere göre Bitkisiz ortam > Nilüfer > Grande II > Jaguar 4G sırasındadır. Yarayışlı Pb düşünde en etkili çeşit Jaguar 4G, en etkili doz 6 g kg⁻¹ olarak belirlenmiştir.

En yüksek toprakta yarayışlı Zn konsantrasyonu bitki yetiştiriciliği olmayan kontrol grubunda 1047.34 mg kg⁻¹, en düşük yarayışlı Zn konsantrasyonu Jaguar 4G çeşidinde 6 g kg⁻¹ mikroalg dozunda 510.90 mg kg⁻¹ ölçülmüştür. Toprakta yarayışlı Zn konsantrasyonu çoktan aza doğru çeşitlerde Bitkisiz ortam > Grande II > Jaguar 4G > Nilüfer sırasındadır. Toprak yarayışlı Zn konsantrasyonlarında en etkili düşüş çeşitlerde Nilüfer, dozlarda 6 g kg⁻¹ olarak belirlenmiştir.

En yüksek yaş ağırlık Grande II çeşidinde 1.5 g kg⁻¹ mikroalg dozunda 3.03 g, en düşük Jaguar 4G çeşidinde 6 g kg⁻¹ mikroalg dozunda 0.42 g ölçülmüştür. 3. ay hasat yaş ağırlıkları değerlerine göre en etkili çeşit Grande II, mikroalg dozu 1.5 g kg⁻¹ olarak, en yüksek kuru ağırlık Grande II çeşidinde 6 g kg⁻¹ mikroalg dozunda 0.93 g, en düşük Jaguar 4G çeşidinde 6 g kg⁻¹ mikroalg dozunda 0.17 g ölçülmüştür. Yaş ağırlıkları değerlerine göre en etkili çeşit Grande II, mikroalg dozu 1.5 g kg⁻¹ olarak, kuru ağırlıkta en etkili çeşit Grande II, mikroalg dozu 1.5 g kg⁻¹ olarak belirlenmiştir.

En yüksek kök yaş ağırlığı Grande II çeşidinde 3 kg⁻¹ mikroalg dozunda 5.11 g, en düşük Jaguar 4G çeşidinde 6 g kg⁻¹ mikroalg dozunda 0.54 g olarak belirlenmiştir. Kök yaş ağırlığında çeşitler arasında Grande II'de, uygulamalarda ise kontrol gruplarında en iyi kök yaş ağırlığı, kök kuru ağırlığında çeşitler arasında Grande II'de, uygulamalarda ise kontrol gruplarında en iyi kök kuru ağırlığı elde edilmiştir.

Jaguar 4G, Grande II ve Nilüfer çeşitlerinin özellikle 1.5 g kg⁻¹ mikroalg uygulaması sonrası bitki boy ve kök derinliğinde artış göstermiş, bitki gelişiminde ve direncinde

önemli etkilerinin olduğu gözlemlenmiştir. Bitki ve kök boy uzunlukları çeşitlere göre Nilüfer > Grande II > Jaguar 4G sırasında yer almaktadır.

BAF faktörleri değerlendirildiğinde, BAF Cd, en yüksek Nilüfer çeşidinde 6 g kg^{-1} mikroalg dozunda 1.73, en düşük Nilüfer çeşidinde kontrol grubunda 0.77 saptanmıştır. BAF Cd oranı en yüksek çeşit Nilüfer, en etkili doz ise 6 g kg^{-1} olarak belirlenmiştir. Çeşitlerde BAF Cd oranı çoktan aza doğru Nilüfer > Grande II > Jaguar 4G sırasında belirlenmiştir. BAF Pb, en yüksek Nilüfer çeşidinde 1.5 g kg^{-1} mikroalg dozunda 1.13, en düşük Jaguar 4G çeşidinde kontrol grubunda 0.57 saptanmıştır. BAF Pb oranı en yüksek çeşit Nilüfer, ve Grande II, en etkili uygulama ise kontrol gruplarında belirlenmiştir. Çeşitlerde BAF Pb oranı çoktan aza doğru Nilüfer = Grande II > Jaguar 4G sırasında belirlenmiştir. BAF Zn oranı en yüksek Grande II çeşidinde 6 g kg^{-1} mikroalg dozunda 0.91, en düşük Jaguar çeşidinde kontrol grubunda 0.61 bulunmuştur. BAF Zn oranı çeşitlere göre Grande II > Nilüfer > Jaguar 4G sırasında belirlenmiştir. *Haematococcus pluvialis* mikroalg uygulamalarının biyoakümüülasyon potansiyelini arttırıcı etkisi olduğu saptanmıştır.

TF faktörleri değerlendirildiğinde, TF Cd, en yüksek Jaguar 4G çeşidinde 6 g kg^{-1} mikroalg dozunda 0.81, en düşük Grande II çeşidinde kontrol grubunda 0.4 oranında saptanmıştır. TF Cd oranı için en etkili çeşit Jaguar 4G, en etkili uygulama 6 g kg^{-1} olarak belirlenmiştir. TF Pb en yüksek Jaguar 4G çeşidinde 6 g kg^{-1} mikroalg dozunda 0.33, en düşük Nilüfer çeşidinde kontrol grubunda 0.06 saptanmıştır. TF Pb'de en etkili çeşit Jaguar 4G, en etkili uygulama 6 g kg^{-1} olarak belirlenmiştir. TF Zn oranları 0.08-0.67 değerleri arasında yer almaktadır. TF Zn, en yüksek Jaguar 4G çeşidinde 6 g kg^{-1} mikroalg dozunda 0.67, en düşük Nilüfer çeşidinde kontrol grubunda 0.08 saptanmıştır. En etkili çeşit Jaguar 4G, en etkili uygulama 6 g kg^{-1} olarak belirlenmiştir. Denemede; *Festuca arundinacea* çeşitlerinin BAF oranlarının 1'den büyük olması ve TF oranlarının 1'den küçük olması çeşitlerin ağır metalleri köklerin daha çok biriktirdiğini, toprak üstü aksamına daha az düzeyde ilettiklerini göstermektedir. Jaguar 4G, Grande II ve Nilüfer çeşitleri fitostabilizasyon amacıyla kullanılabilecek çeşitlerdir. *Haematococcus pluvialis* mikroalg uygulamalarının fitostabilizasyon kapasitesini arttırıcı etkisi olduğu saptanmıştır.

% Cd biyogideriminde mikroalg uygulamalarının etkisi $6 \text{ g kg}^{-1} > 3 \text{ g kg}^{-1} > 1.5 \text{ g kg}^{-1} >$ Kontrol, çeşitlerin etkisi Jaguar 4G> Nilüfer> Grande II> Bitkisiz ortam olarak elde edilmiştir. % Pb biyogideriminde mikroalg uygulamalarının etkisi $6 \text{ g kg}^{-1} > 3 \text{ g kg}^{-1} > 1.5 \text{ g kg}^{-1} >$ Kontrol, çeşitlerin etkisi Grande II> Jaguar 4G> Nilüfer> Bitkisiz ortam olarak elde edilmiştir. % Zn biyogideriminde mikroalg uygulamalarının etkisi $6 \text{ g kg}^{-1} > 3 \text{ g kg}^{-1} > 1.5 \text{ g kg}^{-1} >$ Kontrol, çeşitlerin etkisi Grande II> Nilüfer > Jaguar 4G > Bitkisiz ortam olarak elde edilmiştir.

RV değerlerine göre, Cd için RV çoktan aza doğru Grande II> Nilüfer > Jaguar 4G sırasında, uygulamalarda etkisi $3 \text{ g kg}^{-1} > 6 \text{ g kg}^{-1} = 1.5 \text{ g kg}^{-1} >$ Kontrol sırasında olduğu belirlenmiştir. En yüksek Cd RV değeri Grande II çeşidinde 6 g kg^{-1} mikroalg dozunda belirlenmiştir. Çeşitlerin Pb RV değerleri çoktan aza doğru Grande II > Nilüfer > Jaguar 4G sırasında, uygulamalar $1.5 \text{ g kg}^{-1} > 3 \text{ g kg}^{-1} > 6 \text{ g kg}^{-1} >$ Kontrol sırasındadır. En yüksek Pb RV Grande II çeşidinde 6 g kg^{-1} mikroalg dozunda belirlenmiştir. Çeşitlerin Zn RV değerleri çoktan aza doğru Jaguar 4G > Grande II > Nilüfer sırasında, uygulamalar $1.5 \text{ g kg}^{-1} > 3 \text{ g kg}^{-1} > 6 \text{ g kg}^{-1} >$ Kontrol sırasındadır. En yüksek Zn RV Jaguar 4G çeşidinde 3 g kg^{-1} mikroalg dozunda belirlenmiştir.

Yapılan çalışma sonucunda katkı sağlaması amacıyla aşağıdaki öneriler yapılabilir:

Heamatococcus Pluvialis mikroalginin, bitki gelişimini arttırıcı ve toksisiteye karşı olumsuz etkileri azalttığı gözlemlenmiştir. Bitki çeşidi, metal çeşidi ve konsantrasyonu gibi faktörlerle etkisinin değişebileceği düşünülmektedir. Sürdürülebilir olması, çevre dostu olması ve kolay uygulanabilirliğinden dolayı toprakta gelecekte yapılacak diğer çalışmalar için ümit vaat etmektedir.

Deneme sonucunda ağır metaller ile kirli alanlarda *Festuca arundinacea* bitkisi ve *Heamatococcus Pluvialis* mikroalgini kirliliğin giderilmesi ve/veya minimize edilmesi için kombine bir teknikle uygulanması tercih edilmelidir. Biyoakümülayon ve biyobirikim mekanizmaları ağır metal kirliliğini toprakta azaltmakta daha sonrasında hücre dışına detoksifikasyon süreçleriyle ağır metalleri toksik olmayan formlarda taşımaktadırlar. Detoksifikasyon süreci boyunca mikroalglerin şelasyon, indirgenme ve adsorpsiyon mekanizmaları ağır metallerle kirlenen toprakların temizlenmesinde büyük önem arz etmektedir. Bundan dolayı toprakta biyogiderim esnasında mikroalgler ve

bitkiler arasındaki ilişkilerin incelenmesi gelecekte yapılacak olan çalışmalara katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

Metal alımı açısından en yüksek çeşit Jaguar 4G çeşidi olmasına rağmen toksisiteye karşı gösterdiği stresten dolayı, biyokütle düşüklüğü nedeniyle RV veriminin düşüklüğünden dolayı, Grande II çeşidini tercih etmek daha iyi bir seçim olabilir. Grande II çeşidinin hem biyokütlesini yüksek olması hemde RV'sinin yüksek olması nedeniyle kirletici ortam gideriminde en etkin çeşit olarak kullanılabileceği düşünülmektedir. Grande II çeşidini takiben Nilüfer çeşidini veya iki çeşidin kombine olarak kirli bölgelerde giderim amacıyla daha yüksek etkinlik sağlayabileceği düşünülmektedir.

Haematococcus pluvialis'in bitki gelişimini teşvik edici özelliğinin olmasının yanı sıra ortam pH'sını düşürmesiyle toprakta metal hareketliliğini arttırmıştır. Fitoremediasyon parametrelerinin incelemesi ile en etkili dozun 6 g kg^{-1} olmasına rağmen, önemlilik düzeyine göre en yakın olan 1.5 g kg^{-1} alg dozunun biyokütleyi daha fazla arttırması ve RV'de daha etkin olması sebebiyle yapılacak çalışmalarda 1.5 g kg^{-1} dozunun giderimde kullanılması önerilmektedir.

Toprak sürdürülebilirliği için diğer ağır metal ıslah tekniklerinin toprak üzerine etkileri ve giderim potansiyelleri karşılaştırılmalı ve biyogiderim teknikleri hakkında az çalışma olmasından dolayı biyogiderim tekniklerinin sistematik bir şekilde araştırılması sonraki çalışmalar için destek sağlayabilecektir.

KAYNAKÇA

- Abinandan, S., Shanthakumar, S., 2015. Challenges And Opportunities İn Application Of Microalgae (Chlorophyta) For Wastewater Treatment: A Review. **Renew Sustain Energ Review** 52: 123– 32.
- Açıkgöz, E., 1994. Çim alanlar yapım ve bakım tekniği. Çevre Peyzaj Mimarlığı Yayınları No:4, Bursa, 204 s.
- Ağırağaç, Z., Çelebi, Ş.Z., 2021. Kentsel Atık Suların Karamba (*Lolium multiflorum* cv. Caramba)'nın Ağır Metal ve Bazı Besin Elementi İçeriğine Etkisi. **Journal of the Institute of Science and Technology**, 11(3), 2400-2411.
- Ahmed, S.F., Mofijur, M., Nuzhat, S., Chowdhury, A. T., Rafa, N., Uddin, M. A., Show, P.L., 2021. Recent Developments İn Physical, Biological, Chemical, and Hybrid Treatment Techniques For Removing Emerging Contaminants From Wastewater. **Journal of hazardous materials**, 416, 125912.
- Akca, M. O., Sonmez, O. 2023. Role of Biochar in the Adsorption of Heavy Metals. In Sustainable Agriculture Reviews 61: Biochar to Improve Crop Production and Decrease Plant Stress under a Changing Climate (pp. 293-307). Cham: **Springer International Publishing**.
- Al-Jobori, K.M., Kadhim, A.K., 2019. Evaluation Of Sunflower (*Helianthus Annuus* L.) For Phytoremediation Of Lead Contaminated Soil. **Journal of Pharmaceutical Sciences and Research**, 11(3), 847-854.
- Almasi, A., Dargahi, A., Ahagh, M.M.H., Janjani, H., Mohammadi, M., Tabandeh L., 2016. Efficiency Of A Constructed Wetland İn Controlling Organic Pollutants, Nitrogen, And Heavy Metals From Sewage. **Journal of Chemical and Pharmaceutical Sciences**, 9: 2924-2928.
- Anonim., 2016. Kamışsı Yumak Jaguar 4G Çeşidi, [http://ulusoyseed.com.tr/urunler/cimtohumu-cesitleri/Festuca arundinacea-](http://ulusoyseed.com.tr/urunler/cimtohumu-cesitleri/Festuca_arundinacea-) (Erişim tarihi: 11/06/2023).
- Arıkan, E.N., Bağdatlı, M.C., 2021. Bazı Ağır Metallerce Kirlenmiş Tarım Topraklarının Çim Bitkisi (*Lolium Perenne* L.) Kullanılarak Fitoremediasyon Yöntemleriyle Doğal Arıtımı (Yüksek Lisans Tezi, Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi).
- Arlı, S., 2006. Arıtma Çamurlarındaki Ağır Metallerin Bitkilerle Giderimi. (Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Çevre Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya).

- Asrar, Z., Khavari-Nejad, R.A., Heidari, H., 2005. Excess Manganese Effects On Pigments Of *Mentha Spicata* At Flowering Stage. **Archives of Agronomy and Soil Science**, **51**(1), 101-107.
- Aybar, M., Sağlam, B., 2022. Ağır metal iyonlarıyla kirlenmiş maden yatağı ve yakın çevresindeki toprakların fitoremediasyon yöntemiyle giderilmesinin araştırılması. (Doktora Tezi, Artvin Çoruh Üniversitesi).
- Aydin, S., 2016. Enhancement Of Microbial Diversity And Methane Yield By Bacterial Bioaugmentation Through The Anaerobic Digestion Of *Haematococcus pluvialis*. **Applied Microbiology and Biotechnology**, **100**(12), 5631-5637.
- Azubuike, C.C., Chikere, C.B., Okpokwasili, G.C., 2016. Bioremediation Techniques–Classification Based on Site of Application: Principles, Advantages, Limitations and Prospects. **World Journal of Microbiology and Biotechnology**, **32**, 1-18.
- Awad, M., El-Desoky, M. A., Ghallab, A., Kubes, J., Abdel-Mawly, S. E., Danish, S., El Sabagh, A., (2021). Ornamental Plant Efficiency for Heavy Metals Phytoextraction from Contaminated Soils Amended with Organic Materials. **Molecules**, **26**(11), 3360.
- Baker, A.J., 1981. Accumulators And Excluders-Strategies In The Response of Plants To Heavy Metals. **Journal of plant nutrition**, **3**(1-4), 643-654.
- Barquilha, C.E.R., Cossich, E.S., Tavares, C.R.G., Silva, E.A. 2017. Biosorption of Nickel (II) and Copper (II) İons in Batch And Fixed-Bed Columns by Free and İmmobilized Marine Algae *Sargassum* Sp. **Journal of Cleaner Production**, **150**, 58-64.
- Bayrak, M., 2021. Kimi Dış Mekân Süs Bitkilerinin Ağır Metal Alım Yeteneklerinin Ve Fitoremediasyonda Kullanım Potansiyellerinin Belirlenmesi (Doktora Tezi, Bursa Uludağ Üniversitesi).
- Blaylock, M.J., 2000. Phytoextraction of Metals. *Phytoremediation of Toxic Metals: Using Plants to Clean Up The Environment*, 53-70.
- Briffa, J., Sinagra, E., Blundell, R., 2020. Heavy Metal Pollution in The Environment And Their Toxicological Effects on Humans. **Heliyon**, **6**(9), 04691.
- Eren, A., Mert, M. 2017. Ağır Metal (Ni, Cd ve Cu) Uygulamalarının Andız Otu, Fener Otu Ve Sığırkuyruğu Bitkilerinin Büyüme ve Gelişmesi Üzerine Etkisi. **Türkiye Tarımsal Araştırmalar Dergisi**, **4**(1), 50-58.

- Can, B.G., Yıldız, M., Şensoy, S., 2022. Mikroalg Kullanımının Ispanakta Bitki Gelişimi Üzerine Etkisi. **Journal of the Institute of Science and Technology**, 12(4), 1884-1895.
- Cao, A., Cappai, G., Carucci, A., Muntoni, A., 2004. Selection of Plants for Zinc and Lead Phytoremediation. **Journal of Environmental Science and Health, Part A**, 39(4), 1011-1024.
- Chen C, Yeh K, Aisyah R, Lee D, Chang J. “Cultivation, Photobioreactor Design and Harvesting of Microalgae for Biodiesel Production: A Critical Review”. **Bioresource Technology**, 102, 71-81, 2011.
- Chibuike, G.U., Obiora, S.C., 2014. Heavy Metal Polluted Soils: Effect on Plants and Bioremediation Methods. **Applied and Environmental Soil Science**.1-12.
- Çiftçi, A., 2016. Çoklu Metal (Kadmiyum, Kurşun ve Çinko) ile Kirlenmiş Bir Toprağın Arıtımında Yabani Hint Yağı (*Ricinus Communis*) ve Aspir (*Carthamus Tinctorius*) Bitkilerinin Fitoremediasyon Kapasitesinin Araştırılması (Yüksek lisans tezi, Mersin Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Mersin).
- Çirka, M., Tunçtürk, R., Kulaz, H., Tunçtürk, M., Eryiğit, T., Baran, İ. 2022. Kuraklık Stresi Altında Yetiştirilen Bakla (*Vicia Faba L.*) Bitkisinde Rizobakteri ve Alg Uygulamalarının Bitki Gelişimi Üzerindeki Etkilerinin İncelenmesi. **Journal of the Institute of Science and Technology**, 12(2), 1124-1133.
- Colla, G., Hoagland, L., Ruzzi, M., Cardarelli, M., Bonini, P., Canaguier, R., Roupheal, Y. (2017). Biostimulant Action of Protein Hydrolysates: Unraveling Their Effects on Plant Physiology and Microbiome. **Frontiers in plant science**, 8, 2202.
- Costa J.A.V, Morais MG. An Open Pond System for Microalgal Cultivation. Editors: Pandey A, Lee DJ, Chisti Y, Soccol CR. Biofuels from Algae, 1-22, Oxford, UK, Elsevier, 2014.
- Dalvi, A.A., Bhalerao, S.A., 2013. Response of Plants Towards Heavy Metal Toxicity: An Overview of Avoidance, Tolerance and Uptake Mechanism. **Ann Plant Sci**, 2(9), 362-368.
- Das, D., Chakraborty, S., Bhattacharjee, C., Chowdhury, R., 2016. Biosorption of Lead İons (Pb^{2+}) From Simulated Wastewater Using Residual Biomass of Microalgae. **Desalination and water treatment**, 57(10), 4576-4586.

- Dineshkumar, R., Subramanian, J., Arumugam, A., Ahamed Rasheeq, A., Sampathkumar, P., 2020. Exploring the Microalgae Biofertilizer Effect on Onion Cultivation by Field Experiment. **Waste and Biomass Valorization**, **11**, 77-87.
- Dineshkumar, R., Subramanian, J., Gopalsamy, J., Jayasingam, P., Arumugam, A., Kannadasan, S., Sampathkumar, P., 2019. The Impact of Using Microalgae As Biofertilizer in Maize (*Zea Mays L.*). **Waste and Biomass Valorization**, **10**, 1101-1110.
- Djearmane, S., Lim, Y.M., Wong, L.S., Lee, P.F., 2019. Cellular Accumulation and Cytotoxic Effects of Zinc Oxide Nanoparticles in Microalga *Haematococcus pluvialis*. **PeerJ**, **7**, e7582.
- Doğancı, N., 2022. Kirlenmiş Topraklardaki Ağır Metal Hareketliliği Üzerine Çeşitli Toprak Düzenleyicilerinin Etkilerinin Belirlenmesi (Yüksek lisans tezi, Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri).
- Dolganyuk, V., Belova, D., Babich, O., Prosekov, A., Ivanova, S., Katserov, D., Sukhikh, S., 2020. Microalgae: A Promising Source of Valuable Bioproducts. **Biomolecules**, **10**(8), 1153.
- Drever, J.I., (2005). Surface and Ground Water, Weathering, and Soils: Treatise on Geochemistry, Volume 5. Elsevier.
- Duyuşen Güven, E., Akıncı, G., Gök, G., 2016. Deri Arıtma Çamuru Kompostu İlavesiyle Gerçekleştirilen Çim Yetiştiriciliğinde Cr, Cu, Zn ve Ni Metallerinin Kimyasal Dağılımı ve Bitkiye Transferi. **Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi**, **31**(3), 589-596.
- El-Saadony, M.T., Desoky, E.S.M., Saad, A.M., Eid, R.S., Selem, E., Elrys, A.S. 2021. Biological Silicon Nanoparticles Improve *Phaseolus Vulgaris L.* Yield And Minimize Its Contaminant Contents on A Heavy Metals-Contaminated Saline Soil. **Journal of Environmental Sciences**, **106**, 1-14.
- Ergün O., Daşgan H.Y., Işık O., 2020. Effects of Micromikroalgae *Chlorella Vulgaris* on Hydroponically Grown Lettuce. **Acta Horticulturae**, **1273**: 169176.
- Eroglu E., Smith S.M., Raston, C.L., 2015 Biomass and Biofuels from Microalgae. 2:331–345. Doi:10.1007/978-3-319-16640-7Return.
- Eroglu, E., Smith, S.M., Raston, C.L., 2015. Biomass and Biofuels From Microalgae. **Biofuel and Biorefinery Technologies**, **2**.

- Espada, J.J., Rodríguez, R., Gari, V., Salcedo-Abraira, P., Bautista, L.F., 2022. Coupling Phytoremediation of Pb-Contaminated Soil and Biomass Energy Production: A Comparative Life Cycle Assessment. **Science of the Total Environment**, **840**, 156675.
- Fahad, S., Sönmez, O., Saud, S., Wang, D., Wu, C., Adnan, M., Arif, M., 2021. Engineering tolerance in crop plants against abiotic stress. CRC Press.
- Fernandes, J.C., Henriques, F.S., 1991. Biochemical, Physiological and structural Effect of Excess Copper in Plants. **The Botanic Review.**, 57: 246-273.
- Filipiak-Szok, A., Kurzawa, M., Szlyk, E., 2015. Determination of Toxic Metals by ICP-MS in Asiatic and European Medicinal Plants and Dietary Supplements. **Journal of Trace Elements in Medicine and Biology**, **30**, 54-58.
- Frutos, F.G., Pérez, R., Escolano, O., Rubio, A., Gimeno, A., Fernandez, M.D., Laguna, J., 2012. Remediation Trials for Hydrocarbon-Contaminated Sludge From A Soil Washing Process: Evaluation of Bioremediation Technologies. **Journal of Hazardous Materials**, **199**, 262-271.
- Garcia-Gonzalez, J., Sommerfeld, M., 2016. Biofertilizer And Biostimulant Properties of the Microalga *Acutodesmus Dimorphus*. **Journal of applied phycology**, **28**, 1051-1061.
- Ghori Z., Iftikhar H., Bhatti M.F., Nasar U.M., Sharma I., Kazi A.G., Ahmad P., 2015. Phytoextraction: The Use of Plants to Remove Heavy Metals From Soil. **Plant Metal Interaction: Emerging Remediation Techniques**, **29**: 361-384.
- Golui D., Datta S.P., Dwivedi B.S., Meena M.C., Varghese E., Sanyal S.K., Ray P., Shukla A.K., Trivedi V.K., 2019. Assessing Soil Degradation in Relation to Metal Pollution—A Multivariate Approach. **Soil and Sediment Contamination**, **28**: 630-649.
- Gomes H.I., Dias F.C., Ribeiro A.B., 2013. Overview of In Situ And Ex Situ Remediation Technologies for PCB-Contaminated Soils and Sediments and Obstacles for Full-Scale Application. **Science of The Total Environment**, 237-260.
- Gonzalez, M.A., Ruscitti, M.F., Plaza Cazón, J.D.C., Arango, M.C., 2021. Bioaccumulation and Physiological Responses of *Festuca arundinacea* (Poaceae) to Zn (II) Excess. **Agronomía and Ambiente**, **41**(1).
- Gümüş, N.E., Aşıkkutlu, B., Kesinkaya, H. B., Akküz, C., 2021. Comparison of Heavy Metal Absorption of Some Algae Isolated from Altınapa Dam Lake

- (Konya). **Journal of Anatolian Environmental and Animal Sciences**, 6(1), 50-56.
- Güven, D.E., Akinci, G.G., Gök, G., 2016. Deri Arıtma Çamuru Kompostu İlavesiyle Gerçekleştirilen Çim Yetiştiriciliğinde Cr, Cu, Zn ve Ni Metallerinin Kimyasal Dağılımı ve Bitkiye Transferi. **Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi**, 31(3), 589-596.
- Hackbarth, F.V., Girardi, F., Selene M.A. Guelli U., De Souza, A.A.U.D., Boaventura, R.A., Vilar, V.J., 2014. Marine Macroalgae *Pelvetia Canaliculata* (Phaeophyceae) As A Natural Cation Exchanger For Cadmium and Lead Ions Separation in Aqueous Solutions. **Chemical Engineering Journal**, 242, 294–305.
- Hammouda O., Abdel-Raouf N., Shaaban M., Kamal, M., 2015. Treatment of Mixed Domestic-industrial Wastewater Using Microalgae *Chlorella* sp., **Journal of American Science**, 11(12), 303-315.
- Harwood, J. E., Van Steenderen and Kuhn, A. L., 1969. A Rapid Method for Orthophosphate Analysis at High Concentrations in Water. **Water Res.** 3:417-423.
- Hasan, E.R., Elibol, S., 2022. Farklı Tuz Konsantrasyonlarında Semiz Otu (*Portulaca oleracea*) ve Kamışsı Yumak (*Festuca arundinacea*) Bitkileri Uygulanarak Tuzlu Toprakların Fitoremediasyon Yöntemiyle İyileştirilmesi. **Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi**, (34), 70-74.
- Hettiarachchi, G.M., Pierzynski, G.M., Oehme, F.W., Sonmez, O., Ryan, J.A., 2003. Treatment of contaminated soil with phosphorus and manganese oxide reduces lead absorption by Sprague–Dawley rats. **Journal of environmental quality**, 32(4), 1335-1345.
- Heidarpour, A., Aliasgharzad, N., Khoshmanzar, E., Lajayer, B.A., 2019. Bio-Removal of Zn from Contaminated Water by Using Green Algae Isolates. **Environmental Technology & Innovation**, 16, 100464.
- Hosono, T., Su, C., Delinom, R., Umezawa, Y., Toyota, T., Kaneko, S., Taniguchi, M., 2011. Decline in Heavy Metal Contamination in Marine Sediments in Jakarta Bay, Indonesia Due to Increasing Environmental Regulations. **Estuar. Coast. Shelf Sci.** 92, 297- 306.
- Hussain, A., Abbas, N., Arshad, F., Akram, M., Khan, Z. I., Ahmad, K., Mirzaei, F., 2013. Effects of Diverse Doses of Lead (Pb) on Different Growth Attributes of Zea-Mays L. **Agricultural Sciences**, 4(5), 262-265.

- Jadia, C.D., Fulekar, M.H., 2009. Phytoremediation of Heavy Metals: Recent Techniques. **African Journal of Biotechnology**, 8(6).
- Jasım, R., Kılıç, F. N., & Sönmez, O., (2022). Santrali çevreleyen arazilerde bazı ağır metaller (Pb, Cd, Ni, Co, As) ile toprak kirliliği. **5th International Eurasian Conference on Biological and Chemical Sciences** (pp.72). Ankara, Turkey.
- Jiang, W., Liu, D., Hou, W., 2001. Hyperaccumulation of Cadmium by Roots, Bulbs and Shoots of Garlic (*Allium sativum* L.). **Bioresource Technology**, 76(1), 9-13.
- Kaçar B., İnal A., 2008. Bitki Analizleri. Nobel Yayın Dağıtım, Ankara.
- Kalkan, H., Kaplan, M., Orman, Ş., 2019. Keçiörlü Kükürt Fabrikası Flotasyon Atıklarının İslah Edilmesi ve Kamışsı Yumak (*Festuca arundinacea*) Çimiyle Yeniden Bitkilendirilmesi. **Mediterranean Agricultural Sciences**, 32, 69-74.
- Karaca, A., Turgay, O.C., 2012. Toprak kirliliği. **Toprak Bilimi ve Bitki Besleme Dergisi**, 1(1), 13-19.
- Kaya, C., Sonmez, O., Aydemir, S., Ashraf, M., Dikilitas, M., 2013. Exogenous application of mannitol and thiourea regulates plant growth and oxidative stress responses in salt-stressed maize (*Zea mays* L.). **Journal of plant interactions**, 8(3), 234-241.
- Kaya, C., Akram, N. A., Ashraf, M., Sonmez, O., 201. Exogenous application of humic acid mitigates salinity stress in maize (*Zea mays* L.) plants by improving some key physico-biochemical attributes. **Cereal Research Communications**, 46(1), 67-78.
- Khashij, S., Karimi, B., Makhdoumi, P., 2018. Phytoremediation with *Festuca arundinacea*: A Mini Review. **International Journal of Health and Life Sciences**, 4(2).
- Kıran, S., Özkay, F., Kuşvuran, Ş., Ellialtıoğlu Ş.Ş., 2014. Ağır Metal İçeriği Yüksek Sularla Sulanan Patlıcan Bitkilerine Uygulanan Humik Asidin Bazı Morfolojik, Fizyolojik ve Biyokimyasal Özellikleri Üzerine Etkisi. **Türk Tarım-Gıda Bilim ve Teknoloji Dergisi**, 2(6): 280-288.
- Kökten, K., Yılmaz, H. Ş., Kaplan, M., Çağan, E., Çağlayan, B., 2019. Bazı Ağır Metallerin (Cd, Cr, Ni) Farklı Tane Sorgum (*Sorghum bicolor* L.) Çeşitlerinin Kök Ağırlıklarına Etkisinin Araştırılması, Uluslararası Tarım ve Kırsal Kalkınma Kongresi, 10-12 Haziran 2019, Siirt.

- Kumar, A., Tripti, Raj, D., Maiti, S. K., Maleva, M., & Borisova, G. (2022). Soil Pollution and Plant Efficiency Indices for Phytoremediation of Heavy Metal (loid) s: Two-Decade Study (2002–2021). **Metals**, 12(8), 1330.
- Kumar, K.S., Dahms, H.U., Won, E.J., Lee, J.S., Shin, K.H., 2015. Microalgae–A Promising Tool for Heavy Metal Remediation. **Ecotoxicology and environmental safety**, 113, 329-352.
- Kuşvuran, S., 2021. Microalgae (*Chlorella vulgaris beijerinck*) Alleviates Drought Stress of Broccoli Plants by Improving Nutrient Uptake, Secondary Metabolites, and Antioxidative Defense System. **Horticultural Plant Journal**, 7(3), 221-231.
- Küçükhemek, M., Gür, K., Berktaş, A., 2006. Eysel Karakterli Atıksu Arıtma Çamurlarının Çim Bitkisi Ağır Metal (Mn, Zn, Ni, Cu, Cr, Pb, Cd) İçeriği Üzerine Etkisi. **Selçuk Üniversitesi Mühendislik, Bilim ve Teknoloji Dergisi**, 21(3), 1-12.
- Leuther, F., Schlüter, S., Wallach, R., Vogel, H.J., 2019. Structure and Hydraulic Properties in Soils Under Long-Term Irrigation with Treated Wastewater. **Geoderma**, 333.
- Li, H., Watson, J., Zhang, Y., Lu, H., Liu, Z., 2020. Environment-Enhancing Process for Algal Wastewater Treatment, Heavy Metal Control and Hydrothermal Biofuel Production: A Critical Review. **Bioresource technology**, 298, 122421.
- Li, Y., Liang, F., Zhu, Y., Wang, F., 2013. Phytoremediation of a PCB-Contaminated Soil by Alfalfa and Tall Fescue Single and Mixed Plants Cultivation. **Journal of Soils and Sediments**, 13, 925-931.
- Lichtenthaler, H.K., 1987. [34] Chlorophylls and Carotenoids: Pigments of Photosynthetic Biomembranes. **In Methods in Enzymology** (Vol. 148, pp. 350-382). Academic Press.
- Lindsay, W.L., Doxtader K.G., 1981. Environmental Chemistry of the Elements. **Journal of Environmental Quality**, 10: 249-249.
- Lindsay, W.L., Norvell, W.A., 1978, Development of a DTPA Soil Test for Zinc, Iron, Manganese, and Copper, **Soil Science Society of America Journal**, 42 (3), 421-428.
- Lu, M., Zhang, Z.Z., Wang, J.X., Zhang, M., Xu, Y.X., Wu, X.J., 2014. Interaction of Heavy Metals and Pyrene on Their Fates in Soil and Tall Fescue (*Festuca arundinacea*). **Environmental Science and Technology**, 48(2), 1158-1165.

- Maltsev, Y., Maltseva, S., Kulikovskiy, M., 2023. Toxic Effect of Copper on Soil Microalgae: Experimental Data and Critical Review. **International Journal of Environmental Science and Technology**, 1-18.
- Manikandan, A., Suresh Babu, P., Shyamalagowri, S., Kamaraj, M., Muthukumaran, P., Aravind, J., 2022. Emerging Role of Microalgae in Heavy Metal Bioremediation. **Journal of Basic Microbiology**, 62(3-4), 330-347.
- Masindi, V., Muedi, K.L., 2018. Environmental Contamination by Heavy Metals. **Heavy metals**, 10, 115-132.
- McGrath, S.P., Zhao, F.J., 2003. Phytoextraction of Metals and Metalloids from Contaminated Soils. **Current Opinion in Biotechnology**, 14(3), 277-282.
- McLean, E., 1982. Soil pH and Lime Requirement, Methods of Soil Analysis. Part 2. Chemical and Microbiological Properties (methodsofsoilan2), 199-224.
- Meena, K.K., Sorty, A.M., Bitla, U.M., Choudhary, K., Gupta, P., Pareek, A., Minhas, P. S., 2017. Abiotic Stress Responses and Microbe-Mediated Mitigation in Plants: The Omics Strategies. **Frontiers in Plant Science**, 8, 172.
- Okcu M., Tozlu, E., Kumlay M., Pehlivan, M., 2009. Ağır Metallerin Bitkiler Üzerine Etkileri. **Alinteri Journal of Agriculture Science**, 17(2), 14-26.
- Mikhailenko A.V., Ruban D.A., Ermolaev V.A., Loon A.J., 2020. Cadmium Pollution in the Tourism Environment: A Literature Review. **Geosciences**, 10: 1-18.
- Milano, J., Ong, H.C., Masjuki, H.H., Chong, W.T., Lam, M.K., Loh, P.K., Vellayan, V., 2016. Microalgae Biofuels as an Alternative to Fossil Fuel for Power Generation. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 58, 180-197.
- Monni, S., Salemaa, M., Millar, N., 2000. The Tolerance of Empetrum Nigrum to Copper and Nickel. **Environmental Pollution**, 109(2), 221-229.
- Cennet, Ö. Z. A. Y. Endemik Alyssum discolor'un (Brassicaceae) Tohum Çimlenmesi ve Kök-Gövde Gelişimi Üzerine Nikel, Bakır ve Demir Etkisi. **Erzincan University Journal of Science and Technology**, 12(1), 87-94.
- Munné-Bosch, S., Penvelas, J., 2004. Drought-Induced Oxidative Stres in Strawberry Tree (Arbutus Unedo L.) Growing in Mediterranean Field Conditions. **Plant Science**, 166:1105-1110.
- Murugesan, A.G., Maheswari, S., Bagirath, G., 2008. Biosorption of Cadmium by Live and Immobilized Cells of *Spirulina Platensis*. **International Journal of Environmental Research**, 2(3), 307-312.

- Muthuchelian, K., Bertamini, M., Nedunchezian, N., 2001. Triacntanol Can Protect *Erythrina Variegata* from Cadmium Toxicity. **Journal of Plant Physiology**, **158**(11), 1487-1490.
- Mwangi, I.W., Ngila, J.C., 2012. Removal of heavy metals from contaminated water using ethylenediamine-modified green seaweed (*Caulerpa serrulata*), **Physics and Chemistry of the Earth**, Parts A/B/C 50-52, 111–120.
- Naila, A., Meerdink, G., Jayasena, V., Sulaiman, A.Z., Ajit, A.B., Berta, G., 2019. A Review On Global Metal Accumulators-Mechanism, Enhancement, Commercial Application, and Research Trend. **Environmental Science and Pollution Research**, **26**, 26449-26471.
- Navarro-López, E., Ruiz-Nieto, A., Ferreira, A., Acién, F.G., Gouveia, L., 2020. Biostimulant Potential of *Scenedesmus Obliquus* Grown in Brewery Wastewater. **Molecules**, **25**(3), 664.
- Nayak, M., Swain, D. K., Sen, R., 2019. Strategic Valorization of De-Oiled Microalgal Biomass Waste As Biofertilizer For Sustainable and Improved Agriculture of Rice (*Oryza Sativa L.*) Crop. **Science of The Total Environment**, **682**, 475-484.
- Nelson, D.W., Sommers, L.E., 1996. Total Carbon, Organic Carbon, and Organic Matter. **Methods of Soil Analysis: Part 3 Chemical Methods**, **5**, 961-1010.
- Nelson, R., 1982, Carbonate and Gypsum, Methods of Soil Analysis. Part 2. Chemical and Microbiological Properties (methodsofsoilan2), 181-197.
- Niizawa, I., Espinaco, B. Y., Zorrilla, S. E., Sihufe, G. A., 2021. Astaxanthin Production by Autotrophic Cultivation of *Haematococcus pluvialis*: A Success Story. In Global Perspectives on Astaxanthin (pp. 71-89). Academic Press.
- Nosalewicz, A., Siecińska, J., Kondracka, K., Nosalewicz, M., 2018. The Functioning of *Festuca arundinacea* and *Lolium Perenne* Under Drought Is Improved To A Different Extend By The Previous Exposure To Water Deficit. **Environmental and Experimental Botany**, **156**, 271-278.
- Özbucak, T., Ertürk, Ö., Akçin, Ö. E., Polat, G., Özbucak, S., 2018. Maden Yataklarında Bulunan Bazı Bakterilerin Ağır Metallerin Biyoremidasyonunda Kullanılabilme Potansiyellerinin Belirlenmesi. **Ordu Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi**, **8**(1), 114-124.
- Özdemir, S. 2014. Sera Organik Domates Yetiştiriciliğinde *Chlorella vulgaris beyerinck*'in Biyogübre Olarak Kullanımının Bitki Gelişimi, Verim ve Meyve

- Kalitesi Üzerine Etkileri, Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi (Basılmış).
- Özkan, S., 2019. Bazı Turşuluk Hıyar Çeşitlerinde Atık Sularla Sulamanın Verim, Kalite ve Ağır Metal İçerikleri Üzerine Etkileri (Bursa Uludağ Üniversitesi, Doktora tezi).
- Palta, E., 2019. Sulu Çözeltilerden Kurşun ve Kadmiyumun *Escherichiae Coli* ile Biyogiderimi (Doktora Tezi, Adıyaman Üniversitesi).
- Pawłowicz, I., Waśkiewicz, A., Perlikowski, D., Rapacz, M., Ratajczak, D., Kosmala, A., 2018. Remodeling of Chloroplast Proteome Under Salinity Affects Salt Tolerance of *Festuca arundinacea*. **Photosynthesis Research**, **137**, 475-492.
- Phukan, M. M., Chutia, R. S., Konwar, B. K., Kataki, R., 2011. Microalgae *Chlorella* as a potential bio-energy feedstock. **Applied Energy**, **88**(10), 3307-3312.
- Pueyo, M., López-Sánchez, J. F., Rauret, G., 2004. Assessment of CaCl_2 , NaNO_3 and NH_4NO_3 extraction procedures for the study of Cd, Cu, Pb and Zn extractability in contaminated soils. **Analytica chimica acta**, **504**(2), 217-226.
- Rajendran, S., Priya, T.A.K., Khoo, K.S., Hoang, T.K., Ng, H.S., Munawaroh, H.S. H., Show, P. L., 2022. A Critical Review on Various Remediation Approaches for Heavy Metal Contaminants Removal from Contaminated Soils. **Chemosphere**, **287**, 132369.
- Ramos, L., Hernandez, L. M., Gonzalez, M. J., 1994. Sequential Fractionation of Copper, Lead, Cadmium and Zinc in Soils from or Near Donana National Park (Vol. 23, No. 1, pp. 50-57). American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, and Soil Science Society of America.
- Raskin, I., Kumar, P.N., Dushenkov, S., Salt, D.E., 1994. Bioconcentration of Heavy Metals by Plants. **Current Opinion in Biotechnology**, **5**(3), 285-290.
- Rathore S.S., Chaudhary D.R., Borincha G.N., Ghosh A., Bhatt B.P., Zadape S.T., Patolia J.S., 2009. Effect Of Seaweed Extract on The Growth, Yield and Nutrient Uptake of Soybean (Glycine Max) under Rainfed Conditions, **South African Journal of Botany**, **75**(2): 351-355.
- Ratnasari, A., Syafiuddin, A., Zaidi, N. S., Kueh, A.B.H., Hadibarata, T., Prastyo, D.D., Sathishkumar, P., 2022. Bioremediation of Micropollutants Using Living and Non-Living Algae-Current Perspectives and Challenges. **Environmental Pollution**, **292**, 118474.
- Rhoades, J., 1982, Soluble salts, Methods of soil analysis. Part, 2 (2), 167-178.

- Riffaldi, R., Levi-Minzi, R., Cardelli, R., Palumbo, S., Saviozzi, A., 2006. Soil Biological Activities in Monitoring The Bioremediation of Diesel Oil-Contaminated Soil. **Water, air, and soil pollution**, **170**, 3-15.
- El-Sayed S., El-Mohsen A., Hellal, R.F., 2020. Drought Stress Mitigation by Application of Algae Extract on Peanut Grown under Sandy Soil Conditions. **Asian Journal of Plant Sciences**, **19**: 230-239.
- Sanchez Roldan, L. 2014. Metal Removal in Wastewater.
- Saravanan, A., Kumar, P. S., Varjani, S., Jeevanantham, S., Yaashikaa, P. R., Thamarai, P., George, C.S., 2021. A Review on Algal-Bacterial Symbiotic System for Effective Treatment of Wastewater. **Chemosphere**, **271**, 129540.
- Sbihi, K., Cherifi, O., El Gharmali, A., Oudra, B., Aziz, F., 2012. Accumulation and Toxicological Effects of Cadmium, Copper and Zinc on The Growth and Photosynthesis of The Freshwater Diatom *Planorhynchium lanceolatum* (Brébisson) Lange-Bertalot: A Laboratory Study. **J Mater Environ Sci**, **3**(3), 497-506.
- Schreiber, C., Schiedung, H., Harrison, L., Briesse, C., Ackermann, B., Kant, J., Nedbal, L., 2018. Evaluating Potential of Green Alga *Chlorella Vulgaris* to Accumulate Phosphorus and to Fertilize Nutrient-Poor Soil Substrates for Crop Plants. **Journal of Applied Phycology**, **30**, 2827-2836.
- Schwede, S., Rehman, Z. U., Gerber, M., Theiss, C., Span, R., 2013. Effects of Thermal Pretreatment on Anaerobic Digestion of *Nannochloropsis Salina* Biomass. **Bioresource Technology**, **143**, 505-511.
- Sen A, Shukla KK, Singh S, Tejovathi G, 2013. Impact of heavy Metals on Root and Shoot Length of Indian Mustard: An Initial Approach for Phytoremediation. **Science Secure Journal of Biotechnology**, **2**(2): 48-55.
- Seifikalhor, M., Hassani, S.B., Aliniaefard, S., 2020. Seed Priming by Cyanobacteria (*Spirulina Platensis*) and Salep Gum Enhances Tolerance of Maize Plant Against Cadmium **Journal of Plant Growth Regulation**, **39**toxicity., 1009-1021.
- Shaaban M.M., 2001. Nutritional Status and Growth of Maize Plants as Affected by Green Microalgae as Soil Additives, **Online Journal of Biological Sciences** **1**(6): 475-479.
- Shahid, M., Pourrut, B., Dumat, C., Nadeem, M., Aslam, M., Pinelli, E., 2014. Heavy-Metal-induced Reactive Oxygen Species: Phytotoxicity and Physicochemical

- Changes in Plants. **Reviews of Environmental Contamination and Toxicology**, **232**, 1-44.
- Shao, G., Chen, M., Wang, W., Mou, R., Zhang, G. 2007. Iron Nutrition Affects Cadmium Accumulation and Toxicity in Rice Plants. **Plant Growth Regulation**, **53**: 33-42.
- Sharma, M.R., Raju, N.S., 2013. Correlation of Heavy Metal Contamination with Soil Properties of Industrial Areas of Mysore, Karnataka, India by Cluster Analysis. **International Research Journal of Environment Sciences**, **2**(10), 22-27.
- Shekar, C.C., Sammaiah, D., Shasthree, T., Reddy, K.J., 2011. Effect of Mon Tomato Growth And Yield Attributes. **International Journal of Pharma and Bio Sciences**, **2**(2).
- Singh, S., Parihar, P., Singh, R., Singh V.P., Prasad, S.M., 2016. Heavy metal Tolerance in Plants: Role of Transcriptomics, Proteomics, Metabolomics, and ionomics. **Frontiers in Plant Science**, **6**: 1-36.
- Singh, B., Bauddh, K., Bux, F., 2015. Algae and Environmental Sustainability (Vol. 7). India: Springer.
- Singh, O.V., Labana, S., Pandey, G., Budhiraja, R., Jain, R.K., 2003. Phytoremediation: an Overview of Metallic Ion Decontamination from Soil. **Applied Microbiology and Biotechnology**, **61**, 405-412.
- Smith, E., Thavamani, P., Ramadass, K., Naidu, R., Srivastava, P. ve Megharaj, M., 2015. Kurak Ortamlarda Hidrokarbonla Kirlenmiş Topraklar İçin İyileştirme Denemeleri: Biyolojik Bulamaç ve Biyoyıkma Tekniklerinin Değerlendirilmesi. **Uluslararası Biyolojik Bozulma ve Biyolojik Bozunma**, **101**, 56-65.
- Snedecor G.W., Cochran W.R., 1967. Statistical methods, 6th ed., Iowa State University Press, Ames, Iowa, p. 274.
- Sodhi, K. K., Kumar, M., Agrawal, P. K., Singh, D.K, 2019. Perspectives on Arsenic Toxicity, Carcinogenicity and Its Systemic Remediation Strategies. **Environmental Technology & Innovation**, **16**, 100462.
- Sodhi, K.K., Mishra, L.C., Singh, C.K.M., 2022. Perspective on The Heavy Metal Pollution and Recent Remediation Strategies. **Current Research in Microbial Sciences**, 100166.

- Soleimani, M., Hajabbasi, M.A., Charkhabi, A.H., Shariatmadari, H., 2009. Bioaccumulation of nickel and lead by Bermuda grass (*Cynodon dactylon*) and tall fescue (*Festuca arundinacea*) from two contaminated soils. **Caspian Journal of Environmental Sciences**, 7(2), 59-70.
- Sönmez, O., Bukun, B., Kaya, C., Aydemir, S., 2008. The Assessment of Tolerance to Heavy Metals (Cd, Pb And Zn) And Their Accumulation İn Three Weed Species. **Pak. J. Bot**, 40(2), 747-754.
- Sönmez, O., Kılıç, F.N., 2021. Toprakta Ağır Metal Kirliliği ve Giderim Yöntemleri. **Turkish Journal of Agricultural Engineering Research**, 2(2), 493-507.
- Sonmez, O., Pierzynski, G., Kaya, C., Aydemir, S., 2016. The evaluation of diffusive gradients in thin films (DGT) and CaCl₂ extraction on phosphorus-zinc interaction in sudan grass. **Pakistan Journal of Botany**, 48(1), 393-397.
- Steliga, T., Kluk, D., 2020. Application of Festuca Arundinacea in Phytoremediation of Soils Contaminated with Pb, Ni, Cd and Petroleum Hydrocarbons. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, 194, 110409.
- Subramaniam, V., Subashchandrabose, S. R., Thavamani, P., Chen, Z., Krishnamurti, G. S. R., Naidu, R., Megharaj, M., 2016. Toxicity and Bioaccumulation of İron in soil microalgae. **Journal of Applied Phycology**, 28, 2767-2776.
- Suchithra, M.R., Muniswami, D. M., Sri, M.S., Usha, R., Rasheeq, A.A., Preethi, B.A., Dineshkumar, R., 2022. Effectiveness of Green Microalgae As Biostimulants and Biofertilizer Through Foliar Spray and Soil Drench Method For Tomato Cultivation. **South African Journal Of Botany**, 146, 740-750.
- Sun, R., Yang, J., Xia, P., Wu, S., Lin, T., Yi, Y., 2020. Contamination Features and Ecological Risks of Heavy Metals in The Farmland Along Shoreline of Caohai Plateau Wetland, China. **Chemosphere**, 254, 126828.
- Şahin, Y., 2007. Kurşun ile kirlenmiş toprakların bitkisel ekstraksiyon ile iyileştirilmesi (Ankara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi).
- Şen, H., 2020. Metal Endüstrisi Atık Sularından Mikroalg İle Metal Gideriminin İncelenmesi (Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, yüksek Lisans Tezi).
- Tamer, N., Başalma, D., Türkmen, C., Namlı, A., 2016. Organik Toprak Düzenleyicilerin Toprak Parametreleri ve Ayçiçeği (*Helianthus Annuus* L.) Bitkisinin Verim ve

- Verim Öğeleri Üzerine Etkileri. **Toprak Bilimi ve Bitki Besleme Dergisi**, 4(1), 11-20.
- Teixeira, M.B., Fernandes, Í.A., de Castro, E.M., Techio, V.H., 2015. Genotoxicity and Anatomical Root Changes in *Allium Cepa* L. (Amaryllidaceae) Caused by The Effluent Of The Processing of Ornamental Rocks. **Water, Air & Soil Pollution**, 226 (12): 1-11.
- Terzi, H., Yıldız, M., 2011. Ağır Metaller ve Fitoremediasyon: Fizyolojik ve Moleküler Mekanizmalar. **Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi**, 11(1), 1-22.
- Tiryaki, O., Potur, T., 2017. Toprakta Pestisitlerin Arındırılmasında Önemli Bir Araç: Fitoremediasyon. **Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fen Bilimleri Dergisi**, 33(1), 59-68.
- Uchimiya, M., Bannon, D., Nakanishi, H., McBride, M.B., Williams, M.A., Yoshihara, T., 2020. Chemical Speciation, Plant Uptake, and Toxicity of Heavy Metals in Agricultural Soils. **Journal of agricultural and food chemistry**, 68(46), 12856-12869.
- Uysal, O., Uysal, F. O., Ekinci, K., 2015. Evaluation of Microalgae as Microbial Fertilizer. **European Journal of Sustainable Development**, 4(2), 77-77.
- Ur Rahman, M. H., Ahmad, I., Wang, D., Fahad, S., Afzal, M., Ghaffar, A., Sönmez O., Nasim, W., 2021. Influence of semi-arid environment on radiation use efficiency and other growth attributes of lentil.
- Vanlı, Ö., Yazgan, M., 2008. Ağır Metallerle Kirlenmiş Toprakların Temizlenmesinde Fitoremediasyon Tekniği. <http://www.tarimsal.com/fitoremediasyon/-fitoremediasyon.htm> (Erişim Tarihi: 08.07.2023).
- Van Breemen, N., and Buurman, P. (2002). Soil Formation. **Springer Science and Business Media**.
- Vareda, J.P., Valente, A.J.M. Durães, L., 2016. Heavy Metals in Iberian Soils: Removal by Current Adsorbents/Amendments and Prospective for a Arogels. **Advances in Colloid and Interface Science**, 237: 28-42.
- Walker, C.H., Sibly, R.M., Peakall, D.B., 2005. **Principles of Ecotoxicology**. CRC press.
- Wang L., Min M., Li Y., Chen P., Chen Y., Liu Y., Wang Y., Ruan R., 2010. Cultivation of Green Algae *Chlorella* sp. in Different Wastewaters from Municipal Wastewater Treatment Plant, **Appl Biochem Biotechnol**, 162, 1174-1186.

- Wang, A.S., Angle, J.S., Chaney, R.L., Delorme, T.A., Reeves, R.D., 2006. Soil pH Effects on Uptake of Cd and Zn by *Thlaspi Caerulescens*. **Plant and Soil**, **281**, 325-337.
- Wang, Q. R., Cui, Y. S., Liu, X. M., Dong, Y. T., Christie, P., 2003. Soil Contamination and Plant Uptake of Heavy Metals at Polluted Sites in China. **Journal of Environmental Science and Health, Part A**, **38**(5), 823-838.
- Wasilkowski, D., Nowak, A., Michalska, J., Mrozik, A., 2019. Ecological Restoration of Heavy Metal-Contaminated Soil Using Na-Bentonite And Green Compost Coupled with The Cultivation of the Grass *Festuca arundinacea*. **Ecological Engineering**, **138**, 420-433.
- Win, T.T., Barone, G.D., Secundo, F., Fu, P. (2018). Algal Biofertilizers and Plant Growth Stimulants for Sustainable Agriculture. **Industrial Biotechnology**, **14**(4), 203-211.
- World Health Organization. (2022). *A health perspective on the role of the environment in One Health* (No. WHO/EURO: 2022-5290-45054-64214). World Health Organization. Regional Office for Europe.
- Yanqun, Z., Yuan, L., Jianjun, C., Haiyan, C., Li, Q., Schwartz, C., 2005. Hyperaccumulation of Pb, Zn and Cd in Herbaceous Grown on Lead–Zinc Mining Area in Yunnan, China. **Environment International**, **31**(5), 755-762.
- Yao, Z., Li, J., Xie, H., Yu, C., 2012. Review on Remediation Technologies of Soil Contaminated by Heavy Metals. **Procedia Environmental Sciences**, **16**: 722-729.
- Yavari, S., Courchesne, F., Brisson, J., 2021. Nutrient-Assisted Phytoremediation of Wood Preservative–Contaminated Technosols With Co-Planting of *Salix Interior* and *Festuca arundinacea*. **Environmental Science and Pollution Research**, **28**(41), 58018-58034.
- Yıldıztekin, M., Ulusoy, H., Tuna, A.L., 2019. Ağır Metallerle Kirlenmiş Toprakların İyileştirilmesinde Fitoremediasyon Yöntemi: Tıbbi ve Aromatik Bitkilerin Uygunluğu. Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi, Bitkisel ve Hayvansal Üretim Bölümü.
- Yourtchi, M.S., Bayat, H.R., 2013. Effect of Cadmium Toxicity on Growth, Cadmium Accumulation and Macronutrient Content of Durum Wheat (Dena CV.). *International Journal of Agriculture and Crop Sciences (IJACS)*, **6**(15), 1099-1103.

- Yönter, F., 2016. Farklı Arıtma Çamurlarının Kamışsı Yumak (*Festuca arundinacea* Schreb.) Çim Türünde Bitki Gelişimi ve Çim Kalitesi Üzerine Etkileri (Doktora Tezi, Bursa Uludağ Üniversitesi).
- Zada, S., Lu, H., Khan, S., Iqbal, A., Ahmad, A., Ahmad, A., Zhang, X., 2021. Biosorption of Iron İons Through Microalgae from Wastewater and Soil: Optimization and Comparative Study. **Chemosphere**, **265**, 129172.
- Zengin, F. K. (2006). Fasulye Fidelerin (*Phasoeus vulgaris* L. cv. *Strike*) Kök, Gövde ve Yaprak Büyümesi Üzerine Nikel (Ni+ 2) ve Krom'un (Cr+ 3) Etkileri. **Yuzuncu Yıl University Journal of Agricultural Sciences**, **16**(1), 49-56.
- Zeraatkar, A.K., Ahmadzadeh, H., Talebi, A.F., Moheimani, N.R., McHenry, M.P., 2016. Potential Use of Algae for Heavy Metal Bioremediation, A Critical Review. **Journal of Environmental Management**, **181**, 817-831.
- Zeynep, G., Yazıcı, A., 2021. Farklı Ağır Metal Uygulamalarının Tek Yıllık Çim (*Lolium multiflorum*) Bitki Gelişimi ve Fizyolojisi Üzerine Etkisi. **MAS Journal of Applied Sciences**, **6** (Özel Sayı), 1110-1117.
- Zhang, B., Liu, Z., Wang, S., Yao, J., Borthwick, A.G., 2020. Vanadium Contamination and Associated Health Risk of Farmland Soil Near Smelters Throughout China. **Environmental Pollution**, **263**, 114540.
- Zhang, X., Gao, B., Xia, H., 2014. Effect of Cadmium on Growth, Photosynthesis, Mineral Nutrition and Metal Accumulation of Bana Grass and Vetiver Grass. **Ecotoxicology And Environmental Safety**, **106**: 102–108.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı: Fatma Nur Kılıç

Uyruğu: Türkiye (T.C)

EĞİTİM

Derece	Kurum	Mezuniyet Tarihi
Yüksek Lisans	Erciyes Üniversitesi- Ziraat Fakültesi- Toprak Bilimi ve Bitki Besleme Bölümü	2021-2023
Yüksek Lisans	Selçuk Üniversitesi- Ziraat Fakültesi- Toprak Bilimi ve Bitki Besleme Bölümü	2020-2021
Lisans	Selçuk Üniversitesi-İktisadi İdari Bilimler Fakültesi- İşletme Bölümü (Çift Anadal)	2017-2020
Lisans	Selçuk Üniversitesi- Ziraat Fakültesi- Toprak Bilimi ve Bitki Besleme Bölümü	2016-2020
Lise	Osman Nuri Hekimoğlu Anadolu Lisesi	2016

YABANCI DİL

İngilizce- Orta, Almanca- Orta

YAYINLAR

1. Sönmez, O. ve Kılıç, F. N. (2021). Toprakta Ağır Metal Kirliliği ve Giderim Yöntemleri. *Turkish Journal of Agricultural Engineering Research*, 2(2), 493-507.
2. Yılmaz, Y., Kılıç, F. N. ve Sönmez, O. (2022). Develi Ovası Topraklarının Yarayışlı ve Toplam Fosfor İçeriklerinin Belirlenmesi. *Turkish Journal of*

Agricultural Engineering Research, 3 (2), 325-337. DOI: 10.46592/turkager.1125258

3. Jasım R., Kılıç F.N. ve Sönmez O. (2022). Santrali Çevreleyen Arazilerde Bazı Ağır Metaller (Pb, Cd, Ni, Co, As) ile Toprak Kirliliği. 5 th International Eurasian Conference On Biological And Chemical Sciences, Ankara, Türkiye, 23 -25 Kasım 2022, ss.72.
4. Kılıç F.N. ve Sönmez O. (2023). Farklı Bioremediasyon Teknikleri ile Toprakta Ağır Metal Kirliliğinin Giderimi. 10th International Zeugma Conference On Scientific Research, Gaziantep, Türkiye, 25 -26 Haziran 2023, ss.136-137.