



T.C.
NECMETTİN ERBAKAN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



METAL KAPLAMA ENDÜSTRİSİ
ATIKSULARININ SU BİTKİLERİ İLE
ARITIMI

Canan SOĞUKPINAR

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı

2020-Ocak
KONYA
Her Hakkı Saklıdır

TEZ KABUL VE ONAYI

Canan SOĞUKPINAR tarafından hazırlanan “Metal Kaplama Endüstrisi Atıksularının Su Bitkileri İle Arıtımı” adlı tez çalışması 23/01/2020 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği / oy çokluğu ile Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Başkan

Prof. Dr. Mustafa ERSÖZ

.....

Danışman

Prof. Dr. Mehmet Emin AYDIN

.....

Üye

Prof. Dr. Senar AYDIN

.....

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu’nun gün ve sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr. S. Savaş DURDURAN
FBE Müdürü

Bu tez çalışması Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü tarafından 191319011 nolu proje ile desteklenmiştir.

TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.

Canan SOĞUKPINAR

Tarih: 27.01.2020

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

METAL KAPLAMA ENDÜSTRİSİ ATIKSULARININ SU BİTKİLERİ İLE ARITIMI

Canan SOĞUKPINAR

Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Mehmet Emin AYDIN

2020, 72 Sayfa

Jüri

Prof. Dr. Mehmet Emin AYDIN

Prof. Dr. Mustafa ERSÖZ

Prof. Dr. Senar AYDIN

Bu çalışmanın amacı in vitro koşullarda çoğaltılan *Ceratophyllum demersum L.* su bitkisinin, fitoremediasyon yöntemiyle Cd, Cr, Ni ve Zn ağır metalleri ile kirletilmiş sulardan ağır metalleri giderme potansiyeli ve giderme veriminin araştırılmasıdır. Bu kapsamda deiyonize su ve Konya Kentsel Atıksu Arıtma Tesisi çıkış suyu kullanılarak farklı konsantrasyonlarda iki tekrar ve kontrol amaçlı numuneler hazırlanmıştır. Her numune için 7.5 g/L *Ceratophyllum demersum L.* bitkisi kullanılmıştır. *Ceratophyllum demersum L.* bitkisi deiyonize su ile hazırlanan numunelerde 1, 3 ve 5 gün süresince, gerçek atıksu ile hazırlanan numunelerde ise 1 ve 3 gün süresince Cd, Cr, Ni ve Zn ağır metallerine maruz bırakılmıştır. Maruz bırakılma süresi sonunda bitkilerin taze ve kuru ağırlıkları, atıksuda kalan ve bitki bünyesinde alınan ağır metal miktarları, atıksu pH değişimleri, biyokonsantrasyon faktörü (BKF) ve ağır metal giderim verimleri analizlerle tespit edilmiştir. Fitoremediasyon çalışmalarında bitkiye uygulanan metal konsantrasyonunun bitki tarafından akümüle edilebilme yeteneğini gösteren BKF incelendiğinde; gerçek atıksu ile yapılan çalışmalarda günün BKF'nü etkilemediği, konsantrasyonun artması ile BKF'nün azaldığı tespit edilmiştir. Deiyonize su ile yapılan çalışmalarda ise gün arttıkça BKF artmış ağır metal konsantrasyonlarının artışı ise Cr ve Zn çalışmalarında BKF'nü azaltmış, Ni çalışmasında ise BKF'nde artışa neden olmuştur. Fitoremediasyon çalışmalarının sonucunda; deiyonize su ile yapılan çalışmalarda Cd, Cr, Ni ve Zn ağır metallerinin en az bir konsantrasyon için bile olsa %100 giderim veriminin elde edildiği, en yüksek giderimin %97 ile Cd çalışmasında, en düşük giderim verimleri ise %60'a yakın giderim ile Cr ve Zn çalışmalarında elde edildiği tespit edilmiştir. Gerçek atıksu ile yapılan Cd-Cr-Ni-Zn çalışmasında ise en iyi giderim %60 ile Ni çalışmasında elde edilmiştir. Bu sonuçlar ışığında bünyesinde metal biriktirme yeteneğinden dolayı *Ceratophyllum demersum L.* su bitkisi ile fitoremediasyon yönteminin Cd, Cr, Ni ve Zn ile kirlenmiş su ortamları için etkin bir şekilde kullanılabileceğini göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Ağır metal, *Ceratophyllum demersum L.*, fitoremediasyon, metal kaplama endüstrisi, su bitkileri ile arıtım.

ABSTRACT**MS****TREATMENT OF METAL COATING INDUSTRY WASTEWATER BY
WATER PLANTS****Canan SOĞUKPINAR****THE GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCE OF
NECMETTİN ERBAKAN UNIVERSITY
THE DEGREE OF MASTER OF SCIENCE IN ENVIRONMENTAL
ENGINEERING****Advisor: Prof. Dr. Mehmet Emin AYDIN****2020, 72 Pages****Jury****Prof. Dr. Mehmet Emin AYDIN****Prof. Dr. Mustafa ERSÖZ****Prof. Dr. Senar AYDIN**

The aim of this study was to investigate the potency and removal efficiency of *Ceratophyllum demersum* L. aquatic plant propagated in vitro conditions from water contaminated with Cd, Cr, Ni and Zn heavy metals by phytoremediation method. In this context, two non-heavy metal samples were prepared in two concentrations and for control purposes using deionized water and the exit water of Konya Urban Wastewater Treatment Plant. 7.5 g /L *Ceratophyllum demersum* L. plant was used for each sample. *Ceratophyllum demersum* L. was exposed to Cd, Cr, Ni and Zn heavy metals for 1, 3 and 5 days in samples prepared with deionized water and for 1 and 3 days in samples prepared with real wastewater. At the end of the exposure period, fresh and dry weights of the plants, the amount of heavy metals remaining in the wastewater and taken into the plant, the pH changes of the wastewater, the bioconcentration factor (BCF) and the heavy metal removal efficiencies were determined by analysis. BCF, which shows the ability of the metal concentration applied to the plant to accumulate by the plant, was examined in phytoremediation studies; In the studies carried out with real wastewater, it was found that the day did not affect the BCF, but the concentration decreased and the BCF decreased. In studies conducted with deionized water, the increase in BCF increased with increasing heavy metal concentrations decreased the BCF in Cr and Zn studies and caused an increase in BCF in Ni study. At the end of phytoremediation studies; In studies with deionized water, Cd, Cr, Ni and Zn heavy metals, even at least for a concentration of 100% removal efficiency is obtained, the highest removal rate with 97% Cd work, the lowest removal efficiency is close to 60% Cr and Zn studies. In the Cd-Cr-Ni-Zn study performed with real wastewater, the best removal was obtained in the Ni study with 60%. In the light of these results, due to the ability of metal accumulation in the body, the phytoremediation method of *Ceratophyllum demersum* L. can be used effectively for water contaminated with Cd, Cr, Ni and Zn.

Keywords: *Ceratophyllum demersum* L., heavy metal, metal coating industry, phytoremediation, treatment with aquatic plants.

ÖNSÖZ

Tez çalışmam süresince bilgi, tecrübe ve desteklerini esirgemeyerek bana yol gösteren, başta danışman hocam Sayın Prof. Dr. Mehmet Emin AYDIN olmak üzere, deneylerde kullanılan *Ceratophyllum demersum L.* bitkisini tez çalışmam için yetiştirip çoğaltan, PASW Statistics (SPSS) istatistik programını kullanmayı ve yorumlamayı bana öğreten Sayın Doç. Dr. Muhammad ASİM hocama, tez konumun belirlenmesinden deneylerin tamamlanmasına kadar her aşamada bana sabırla yardımcı olan Sayın Prof. Dr. Senar AYDIN hocama tüm emekleri için çok teşekkür ediyorum.

Yaşamım boyunca maddi, manevi destek ve emeklerini eksik etmeyen canım annem Şengül SOĞUKPINAR ve komutanımız canım babam Abdil SOĞUKPINAR' a, bana her zaman güvenen ve inanan küçük öğretmenim Cansu SOĞUKPINAR ve evimizin paşası Muratcan SOĞUKPINAR' a sonsuz teşekkürler.

Canan SOĞUKPINAR
KONYA-2020

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iii
ABSTRACT.....	iv
ÖNSÖZ	v
İÇİNDEKİLER	vi
ÇİZELGE LİSTESİ.....	viii
ŞEKİL LİSTESİ.....	ix
SİMGELER VE KISALTMALAR	x
1. GİRİŞ	1
1.1. Çalışmanın Amacı ve Önemi	2
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	3
2.1. Metal Kaplama Endüstrisi	3
2.2. Metal Kaplama Aşamaları.....	3
2.2.1. Kaplama Yöntemleri	4
2.3. Metal Kaplama Çeşitleri	5
2.3.1. Krom Kaplama.....	5
2.3.2. Nikel Kaplama	6
2.3.3. Çinko Kaplama	6
2.3.4. Kadmiyum Kaplama	7
2.4. Atıksu Arıtma Yöntemleri.....	7
2.4.1. Fiziksel Arıtma	8
2.4.2. Kimyasal Arıtma.....	8
2.4.3. Biyolojik Arıtma	9
2.5. Metal Kaplama Endüstrisi Atıksularının Karakterizasyonu ve Arıtım Alternatifleri.....	10
2.6. Fitoremediasyon Tekniği ve Çeşitleri	13
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	22
3.1. Cihazlar ve Kimyasal	22
3.2. Bitki Materyali	22
3.3. Atıksu Örnekleri.....	24
3.4. Yöntem.....	24
3.4.1. Stok Çözeltilerin Hazırlanması	24
3.4.2. Doz Belirleme Çalışması	24
3.4.3. Bitki ve Atıksu Analizleri	25
3.4.4. Ağır Metal Giderim Verimlerinin Hesaplanması	30
3.4.5. Biyokonsantrasyon Faktörünün (BKF) Hesaplanması.....	30

3.4.6.	İstatistiksel Analiz Metodu	30
4.	ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA.....	31
4.1.	Cd Fitoremediasyon Çalışması	31
4.1.1.	Maruz Kalma Süresi Etkisi	32
4.1.2.	Konsantrasyon Etkisi	33
4.1.3.	Süre × Konsantrasyon Etkisi.....	33
4.1.4.	Giderim Verimi.....	34
4.1.5.	Biyokonsantrasyon Faktörü (BKF).....	35
4.2.	Cr Fitoremediasyon Çalışması	35
4.2.1.	Maruz Kalma Süresi Etkisi	36
4.2.2.	Konsantrasyon Etkisi	36
4.2.3.	Süre × Konsantrasyon Etkisi.....	37
4.2.4.	Giderim Verimi.....	38
4.2.5.	Biyokonsantrasyon Faktörü (BKF).....	38
4.3.	Ni Fitoremediasyon Çalışması	38
4.3.1.	Maruz Kalma Süresi Etkisi	40
4.3.2.	Konsantrasyon Etkisi	41
4.3.3.	Süre × Konsantrasyon Etkisi.....	41
4.3.4.	Giderim Verimi.....	42
4.3.5.	Biyokonsantrasyon Faktörünü (BKF).....	42
4.4.	Zn Fitoremediasyon Çalışması.....	43
4.4.1.	Maruz Kalma Süresi Etkisi	44
4.4.2.	Konsantrasyon Etkisi	45
4.4.3.	Süre × Konsantrasyon Etkisi.....	45
4.4.4.	Giderim Verimi.....	45
4.4.5.	Biyokonsantrasyon Faktörünü (BKF).....	46
4.5.	Gerçek Atıksu ile Cd – Cr – Ni - Zn Çalışması	46
4.5.1.	Maruz Kalma Süresi Etkisi	48
4.5.2.	Konsantrasyon Etkisi	49
4.5.3.	Süre × Konsantrasyon Etkisi.....	50
4.5.4.	Giderim Verimi.....	52
4.5.5.	Biyokonsantrasyon Faktörünü (BKF).....	53
5.	SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	54
5.1.	Sonuçlar.....	54
5.2.	Öneriler	56
6.	KAYNAKLAR	57

ÇİZELGE LİSTESİ

- Çizelge 2.1.** Metal kaplama endüstrisinde kullanılan bazı metaller ve kullanım amaçları
- Çizelge 2.2.** Atıksu arıtma yöntemleri
- Çizelge 2.3.** Temel endüstrilerden atılan metal türleri
- Çizelge 2.4.** Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliği metal sanayi atıksularının alıcı ortama deşarj standartları
- Çizelge 2.5.** Fitoremediasyonun avantajları ve dezavantajları
- Çizelge 2.6.** Fitoremediasyon teknolojilerinin kirletici çeşitlerine göre sınıflandırılması
- Çizelge 2.7.** Metallerin fitoremediasyonunda kullanılan bazı bitki türleri
- Çizelge 2.8.** Akuatik makrofitler tarafından uzaklaştırılan bazı metaller
- Çizelge 3.1.** Ceratophyllum demersum bitkisine uygulanan metal konsantrasyonları
- Çizelge 4.1.** Cd'a maruz kalma süresinin (gün) fitoremediasyon üzerindeki etkisi
- Çizelge 4.2.** Cd konsantrasyonunun fitoremediasyon üzerindeki etkisi
- Çizelge 4.3.** Süre x Cd konsantrasyonunun fitoremediasyon üzerindeki etkisi
- Çizelge 4.4.** Cr'a maruz kalma süresinin (gün) fitoremediasyon üzerindeki etkisi
- Çizelge 4.5.** Cr konsantrasyonunun fitoremediasyon üzerindeki etkisi
- Çizelge 4.6.** Süre x Cr konsantrasyonunun fitoremediasyon üzerindeki etkisi
- Çizelge 4.7.** Ni'e maruz kalma süresinin (gün) fitoremediasyon üzerindeki etkisi
- Çizelge 4.8.** Ni konsantrasyonunun fitoremediasyon üzerindeki etkisi
- Çizelge 4.9.** Süre x Ni konsantrasyonunun fitoremediasyon üzerindeki etkisi
- Çizelge 4.10.** Zn'a maruz kalma süresinin (gün) fitoremediasyon üzerindeki etkisi
- Çizelge 4.11.** Zn konsantrasyonunun fitoremediasyon üzerindeki etkisi
- Çizelge 4.12.** Süre x Zn konsantrasyonunun fitoremediasyon üzerindeki etkisi
- Çizelge 4.13.** Maruz kalma süresinin (gün) Cd fitoremediasyon üzerindeki etkisi
- Çizelge 4.14.** Maruz kalma süresinin (gün) Cr fitoremediasyon üzerindeki etkisi
- Çizelge 4.15.** Maruz kalma süresinin (gün) Ni fitoremediasyon üzerindeki etkisi
- Çizelge 4.16.** Maruz kalma süresinin (gün) Zn fitoremediasyon üzerindeki etkisi
- Çizelge 4.17.** Gerçek atıksudaki Cd konsantrasyonunun fitoremediasyon üzerindeki etkisi
- Çizelge 4.18.** Gerçek atıksudaki Cr konsantrasyonunun fitoremediasyon üzerindeki etkisi
- Çizelge 4.19.** Gerçek atıksudaki Ni konsantrasyonunun fitoremediasyon üzerindeki etkisi
- Çizelge 4.20.** Gerçek atıksudaki Zn konsantrasyonunun fitoremediasyon üzerindeki etkisi
- Çizelge 4.21.** Süre x Cd konsantrasyonunun fitoremediasyon üzerindeki etkisi
- Çizelge 4.22.** Süre x Cr konsantrasyonunun fitoremediasyon üzerindeki etkisi
- Çizelge 4.23.** Süre x Ni konsantrasyonunun fitoremediasyon üzerindeki etkisi
- Çizelge 4.24.** Süre x Zn konsantrasyonunun fitoremediasyon üzerindeki etkisi

ŞEKİL LİSTESİ

- Şekil 2.1. Fitoremediasyon mekanizmaları
- Şekil 3.1. *Ceratophyllum demersum* L. bitkisi
- Şekil 3.2. 1,3 ve 5 gün boyunca numunelerin bekletildiği ortam düzeneği
- Şekil 3.3. Bitki yaş ağırlık tartımı
- Şekil 3.4. Filtre kağıdı ile bitki süzme işlemi
- Şekil 3.5. Bitkilerin etüve yerleştirilmesi
- Şekil 3.6. pH'ı 2.0'ye ayarlanmış farklı Cd konsantrasyona sahip 50 mL'lik su numuneleri
- Şekil 3.7. 4 gün sonunda etüvden çıkartılan bitkiler
- Şekil 3.8. Bitki kuru ağırlık tartımı ve mikrodalga fırın tüpüne yerleştirilmesi
- Şekil 3.9. Mikrodalga fırını
- Şekil 3.10. Mikrodalga fırından alınan numunelerin süzme işlemi
- Şekil 3.11. Atomik Absorpsiyon Spektrofotometresi (AAS)
- Şekil 4.1. Cd çalışması için hazırlanan numunelerin 0. gün görünümü
- Şekil 4.2. 1. gün sonunda Cd ile muamele edilmiş bitkilerin görünümü
- Şekil 4.3. 3. gün sonunda Cd ile muamele edilmiş bitkilerin görünümü
- Şekil 4.4. 5. gün sonunda Cd ile muamele edilmiş bitkilerin görünümü
- Şekil 4.5. Cd giderim verimi (%)
- Şekil 4.6. 1. gün sonunda Cr ile muamele edilmiş bitkilerin görünümü
- Şekil 4.7. 3. gün sonunda Cr ile muamele edilmiş bitkilerin görünümü
- Şekil 4.8. 5. gün sonunda Cr ile muamele edilmiş bitkilerin görünümü
- Şekil 4.9. Cr giderim verimi (%)
- Şekil 4.10. Ni çalışması için hazırlanan numunelerin 0. gün görünümü
- Şekil 4.11. 1. gün sonunda Ni ile muamele edilmiş bitkilerin görünümü
- Şekil 4.12. 3. gün sonunda Ni ile muamele edilmiş bitkilerin görünümü
- Şekil 4.13. 5. gün sonunda Ni ile muamele edilmiş bitkilerin görünümü
- Şekil 4.14. Ni giderim verimi (%)
- Şekil 4.15. Zn çalışması için hazırlanan numunelerin 0. gün görünümü
- Şekil 4.16. 1. gün sonunda Zn ile muamele edilmiş bitkilerin görünümü
- Şekil 4.17. 3. gün sonunda Zn ile muamele edilmiş bitkilerin görünümü
- Şekil 4.18. 5. gün sonunda Zn ile muamele edilmiş bitkilerin görünümü
- Şekil 4.19. Zn giderim verimi (%)
- Şekil 4.20. Gerçek atıksu, Cd-Cr-Ni-Zn çalışması için hazırlanan numunelerin 0. gün görünümü
- Şekil 4.21. Gerçek atıksu Cd-Cr-Ni-Zn çalışması için hazırlanan numunelerin 1. gün görünümü
- Şekil 4.22. Gerçek atıksu Cd-Cr-Ni-Zn çalışması için hazırlanan numunelerin 3. gün görünümü
- Şekil 4.23. Gerçek atıksu Cd giderim verimi (%)
- Şekil 4.24. Gerçek atıksu Ni giderim verimi (%)
- Şekil 4.25. Gerçek atıksu Zn giderim verimi (%)

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

Cd	: Kadmiyum
Cr	: Krom
Cu	: Bakır
Zn	: Çinko
Hg	: Civa
Sn	: Kalay
Ni	: Nikel
Pb	: Kurşun
Mn	: Manganez
As	: Arsenik
Ag	: Gümüş
Tl	: Talyum
Au	: Altın
HNO₃	: Nitrik Asit
CN	: Siyanür
Fe⁺²	: Demir +2 değerlikli
H₂O₂	: Hidrojen peroksit
Cr⁺⁶	: Krom
FeSO₄	: Demirsülfat
SO₄⁻²	: Sülfat
Se	: Selenyum
B	: Bor
Co	: Kobalt

Kısaltmalar

CEBAS	: Kapalı Dengeli Biyolojik Su Sisteminde
EC	: Elektrokoagülasyon
A	: Akım
AAS	: Atomik Absorpsiyon Spektrofotometresi
BKF	: Biyokonsantrasyon Faktörü
KOİ	: Kimyasal Oksijen İhtiyacı
TOK	: Toplam Organik Karbon
İSKİ	: İstanbul Su ve Kanalizasyon İdaresi

1. GİRİŞ

Dünya’da sanayinin gelişmesi ve insan nüfusunun giderek artması ile atıksu miktarı ve kirlilik çeşidi de giderek artmaktadır. Buda atıksu arıtımının gün geçtikçe daha zor ve önemli bir sorun haline gelmesine neden olmaktadır. Doğal kaynakların ve çevrenin kirliliğe karşı korunması ve kirlenmiş alanların temizlenmesi var olan çevre kirliliklerinin çözümü için büyük önem taşımaktadır. Toprak ve suya karışarak buralarda birikme yapan kirleticiler mikrobiyal aktiviteye, toprak verimliliğine, biyolojik çeşitliliğe ve ürün kayıplarına, hatta besin zinciri yoluyla çevre ve insan sağlığına zarar verecek ciddi problemlerin ortaya çıkmasına neden olabilmektedir. Özellikle ağır metaller parçalanamadıkları ve canlı dokularda birikme eğiliminde olduklarından dolayı insan ve çevre sağlığı için ciddi sorunlar oluşturmaktadır.

Gelişen sanayi dallarından biri olan metal kaplama sanayisinde de atıksu oluşum miktarı oldukça fazladır. Sıyırma, yıkama, temizleme ve kaplama işlemlerinden oluşan atık sular; karışık kimyasal maddeler içermekte ve bazılarında siyanürlü atıksular oluşmaktadır. Metal kaplama işlemlerinde oluşan bu tehlikeli ve toksik atıksuların kimyasal karakterleri ve hacimleri birbirinden farklıdır. Bu farklı karakterde oluşan atıksuyun deşarj limitlerine getirilebilmesi için gerekli arıtım teknolojilerinin pahalı olması ve çok fazla kimyasal kullanılması sebebiyle tesisler çevreyi bilinçsizce kirletmektedir. Bu nedenle, mevcut kullanılan metot ve teknolojilerden farklı olarak, daha yüksek verim ve daha düşük maliyet ile işletilebilen arıtma alternatifleri aranmaktadır.

Bu kapsamda kimyasal kullanılarak yapılan arıtma işlemlerine alternatif olarak tamamen doğayı taklit ederek, arıtmada bitkilerin kullanılması prensibine dayanan “*Yeşil ıslah- Fitoremediasyon*” teknikleri bu alternatif arıtma yöntemlerinden biridir. Fitoremediasyon, hiperakümülatör bitkilerin kullanılması ile çevrede bulunan kirleticilerin temizlenmesi veya bu kirleticilerin etkisiz hale getirilmesi olarak tanımlanır. Farklı ıslah yöntemleriyle kıyaslandığında oldukça düşük masraflı, estetik olarak uygun olmasıyla birlikte uygulama kolaylığı ve uygulama süresinin kısıllığı gibi birçok avantaja sahip olduğu bilinmektedir.

1.1. Çalışmanın Amacı ve Önemi

Metal kaplama sanayi atıksularının (Cd, Cr, Ni, Zn) arıtımı için kimyasal arıtıma alternatif olabilmesi amacıyla; in vitro koşullarda çoğaltılan *Ceratophyllum demersum* L. su bitkisinin kullanılabilirliği, arıtma giderimi ve verimi değerlendirilecektir. Elde edilen bilgiler ışığında ağır metal içerikli atıksuların arıtımında su bitkilerinin kullanılabilirliği tespit edilerek, daha az kimyasal kullanımı ve daha az maliyet ile Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliği deşarj standartlarında çıkış suyunun elde edilebilirliği konusun da, daha çevreci bir çözümün bulunarak bu konudaki arıtma yöntemleri için alternatif olarak kullanılabilirliği konusunda literatüre katkı sağlanacaktır.



2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

2.1. Metal Kaplama Endüstrisi

Metallerin yüzeyini korumak metalin kendisini korumaktır. Çünkü yüzeyde küçük bir nokta ile başlayan korozyon zaman içinde metalin iç kısımlarına doğru ilerler ve paslanma daha sonrasında da çürüme gerçekleşir. Bu da metalin kullanım ömrünü kısaltır, malzeme ve iş gücü kaybına neden olur. Yıl boyunca üretilen demirin %20'sinin bu yolla devre dışı kaldığı düşünülürse, metal yüzeyini korumak için alınacak önlemlerin ne kadar değerli olduğu anlaşılabilir. Tüm kayıplar göz önüne alındığında malzemeyi daha dayanıklı hale getirebilmek için en sık başvurulan yöntem; pratikliği ve maliyetinin yüksek olmasına karşın malzeme ömründe sağladığı iyileştirmeye öne çıkan ikinci bir metalle kaplama yöntemidir. Bu da metal kaplama sanayinin hızla gelişen sanayi dalları arasında önemli bir yer almasını sağlamaktadır (Tuna, 2013).

Kaplama ile yüzeyin yapısı ve vasfı değiştirilerek, kaplama yapılan malzemenin; görünüşü (parlaklık, renk), paslanmaya/oksidasyona karşı dayanıklılığı, aşınmaya karşı dayanıklılık/sertlik derecesi, kayganlık/sürtünme, elektrik iletkenliği, lehimlenebilirliği gibi özellikleri daha iyi bir duruma getirilir (ÇYGM, 2012). Kaplamalara ek olarak pasivasyon işlemi de parçalara dekoratif görünüm sağlayan, kaplamanın korozyon dayanımını arttıran basit fakat etkili bir yöntem olarak göze çarpmaktadır (Tütün, 2017).

2.2. Metal Kaplama Aşamaları

Metal yüzeyini işleyerek, kullanıma elverişli hale getirmeyi amaçlayan bu endüstri dalı, çok çeşitli işlemleri içermektedir. Metal kaplama prosesleri genel olarak üç ana grupta toplanabilir. Bunlar; temizleme ve ara kaplama, boyama ve metal kaplamadır (Tütün, 2017). Temizleme; ön temizleme (polisaj) işleminde; kabulden geçen malzemeler; polisaj makineleri, çelik tel fırçalar ya da özel keçe ve özel cilalarla kumaş veya sisal fırçalarla, yüzey temizleme işlemine tabi tutularak kaplanacak yüzeylerin bir ayna parlaklığına getirilmesi sağlanır (Yılmaz, 2008). Ön temizleme yapılan malzeme yağ alma (yüzey temizleme) işlemine alınarak; kaplama yapılmadan önce malzemenin yağdan arındırılması ve iyice temizlenmesi için her uygulamadan sonra malzemenin yıkanması zorunludur. Hazır ilaçlar %5-10 oranında suda eritilerek 65-70 °C'de 15-20 dakika müddet ile işleme tabi tutulurlar. Bu hazır ilaçlarda genellikle "siyanür kostik, soda, trisodyum fosfat" ile inhibitör veya emülgatör gibi yardımcı

kimyasallar bulunur. Tek başına tuz ruhu veya sülfürik asit ya da her ikisinin karışımı muhtelif konsantrasyonlarda kullanılarak demir ve çelikten imal edilmiş parçaların yüzeyindeki oksit ve pasın giderilmesi sağlanır. Temel metale etki vermeyen özelliğiyle, parça yüzeyinde kaynak ve lehimleme sonucu oluşan pisliklerin giderilmesinde de pas ve kireç sökücü geniş bir kullanım alanına sahiptir (Yılmaz, 2008). Gerekli durumlarda malzeme elektrolitik veya kimyasal parlatma işlemlerine alınır. Elektrolitik parlatma işlemi her metal için özel banyolarda yapılır. Metalin çözünmesinde yüzeydeki pürüzler kalkar, yüzey düz ve parlak olur. Kimyasal parlatmada ise, dışarıdan bir potansiyel uygulamadan, metali kendisini çözen bir banyoya daldırıp kimyasal çözünmeye uğratarak yüzeyinin düzeltilmesi işlemidir (Küçükay, 2015).

2.2.1. Kaplama Yöntemleri

Metal kaplama işlemlerinde dört farklı yöntem kullanılmaktadır. Bunlar; sıcak daldırma, püskürtme, sherardizing kaplama, elektroliz yöntemi ile kaplamadır (Küçükay, 2015).

Sıcak daldırma yönteminde; kaplanacak metal başka bir metalin erimiş banyosu içerisine daldırarak kaplama işlemi yapılır. Erimiş metal bu iki metal arasında alaşım meydana getirerek kaplama işleminin tamamlanmasını sağlar. Sıcak daldırma yöntemi; alüminyum, kurşun ve kalay kaplama işlemlerinde kullanılabilir. Çinko kaplama (galvanizleme) ise en yaygın kullanım alanıdır. İşlem esnasında ana metal yüzey ile kaplama metali alaşım hâle gelerek korozyondan korunmayı sağlar (Budak Özlü, 2016). Püskürtülerek yapılan kaplamada; kaplama metali toz haline getirilir ve bir ısı kaynağı ile eritilerek, ana metal yüzeyine püskürtülerek kaplama yapılmaktadır. Bu işlem esnasında kaplama metali, ana metal üzerine yapışmakta ve bu iki metal arasında alaşım meydana gelmemektedir. Sherardizing kaplama yönteminde ise; toz halindeki kaplama metali ile ana metal aynı kasa içerisine konularak, yüksek sıcaklıkta bir müddet bekletilir ardından sıcaklığın etkisiyle kaplama metali uçuculuk özelliği kazanarak ana metali sararak kaplar ve kaplama işlemi tamamlanır. Elektroliz yöntemi ile kaplamada da; uygun bir elektrolit içerisinde ana metal katot, kaplama metali de anot olacak şekilde kaplama yapılmaktadır (Küçükay, 2015).

Kaplama işleminden sonra metal üzerinde parmak izi oluşumunu önlemek için ve metale dekoratif bir görünüm kazandırmak amacıyla ve kaplamanın korozyon mukavemetini arttırmak için kromat kaplama ya da pasivasyon denilen işlem

uygulanabilir. Pasivasyon, genellikle çinko parçaları tuzlu sudan korumak amacı ile metal üzerine koruyucu bir kromat tabaka biriktirme işlemidir. Çinko parçalarını 2.0 pH değerine sahip lityum kromat banyosuna daldırılarak pasivasyon işlemi uygulanır (Tuna, 2013). Kaplama işleminde son işlem olarak elde edilen parçaların lekesiz kurutulması gerekmektedir. Bunu demineralize edilmiş su veya organik su iticiler ile elde etmek mümkündür (ÇYGM, 2012).

2.3. Metal Kaplama Çeşitleri

Metal kaplama tesisleri, teknik dokümanları baz alarak kullanım amacına yönelik olarak birçok farklı metal malzeme işlemi yapmaktadırlar (Küçükay, 2015).

Çizelge 2.1. Metal kaplama endüstrisinde kullanılan bazı metaller ve kullanım amaçları (Küçükay, 2015)

Metal adı	Kullanım amacı
Çinko	Koruma, dekoratif
Nikel	Koruma, dekoratif, mühendislik
Bakır	Dekoratif, mühendislik
Krom	Dekoratif, mühendislik
Kalay	Koruma, dekoratif
Gümüş	Koruma, dekoratif, mühendislik
Kadmiyum	Koruma, dekoratif

2.3.1. Krom Kaplama

Krom (Cr) kaplama, metalin aşınma direncini arttırmak ve yüzeyini korozyona karşı daha kuvvetli hale getirmek için çoğunlukla kalıp, silindir vb. iş aletlerinin kaplanması için kullanılmaktadır. Malzemenin ön temizliği için benzinle yağ alma işlemine tabi tutulur. Krom kaplama banyosunda isteğe göre farklı kalınlıklarda krom kaplama yapılır. Bu işlemlerden sonra yıkama ve temizleme işlemi ile krom kaplama işlemi sonlandırılmaktadır (Yılmaz, 2008).

Canlı sistemlerinde bulunan toksik ve mutajenik metal iyonu olan Cr, insan sağlığı üzerine ciddi zararlara neden olmaktadır. Uzun periyotlarda Cr maruziyetinde karaciğer ve böbrekler zarar görebileceği gibi kan dolaşım sistemi ve solunum sistemi de büyük zarar görebilir. Kısa süre ve düşük oranda Cr maruziyetinde ise mide ve deri rahatsızlığı görülebilmektedir. Cr daha çok sulu ortamlarda birikerek çoğalır. Bu durum Cr ile kirlenmiş ortamdaki su canlılarının tüketimi ile kroma maruz kalılabileceğini göstermektedir. Kişinin genetik yatkınlığına bağlı olarak farklı organlarda kansere yol açabilmekte ve en temel kanserojen etkisi akciğerler üzerinde gözlenmiştir. Cr maruziyeti bitkilerde ise; fotosentez, mineral alımı ve solunum gibi önemli metabolik ve

fizyolojik olayları etkileyerek bitkinin büyüme ve gelişimini engellemektedir. Tohumların çimlenme sürecini değiştirmekte veya tohum çimlenmesini durdurmaktadır. Enzimleri doğrudan etkilemekte veya reaktif oksijen türleri ile oksidatif strese neden olabilmektedir (Doğan, 2017).

2.3.2. Nikel Kaplama

Nikel (Ni) kaplama, dekoratif amaçla uygulanan en eski ve en önemli elektrolitik metal kaplamalardan biridir. Çelik, pirinç gibi metallerde ince bir bakır film üzerine veya tek başına endüstriyel olarak korozyondan korumak amacıyla kullanılmaktadır. Ni' in elektrot potansiyeli hidrojeninkine oranla 0.25 volt daha aktiftir buda nikelin hidrojen reaksiyonu ile korozyona eğilimli olmadığını gösterir. Ortamdaki çözülmüş oksijen miktarının artması ile Ni' in korozyon hızı artar (Tütün, 2017).

Ni'in toksikolojik etkileri; kanserojen etki, solunum sistemine etkisi ve dermatolojik (alerjik) etkiler olarak 3 ana grupta incelenebilir. Derideki etkileşimi genellikle Ni içeren takıların kullanımı ile ortaya çıkarken, deriyi tahriş etmesinin yanı sıra kalp damar sistemine de zararı olan bir metaldir. Zararlı etkileri olmasına rağmen Ni ve tuzlarıyla zehirlenme vakaları nadir rastlanan bir durumdur. Baklagiller için yararlı olan Ni, belli bir doz aşımında (0.18-5 ppm) ise zehirleyici etki göstermektedir. Kanserojen maddeler sınıflandırılmasında; Ni'in kimyasal bileşikleri A1 (kanserojen) kategorisinde yer almaktadırlar.

2.3.3. Çinko Kaplama

Sulu ortamda Çinko'nun (Zn) korozyon hızı çözülmüş oksijen miktarı ile yükselir. Zn kaplamaların korozyon mukavemeti raporlanırken beyaz pas ve kırmızı pas direnci olarak ayrı ayrı belirtilir. Tüm kaplamalar, altındaki malzemenin oksijen ile temasını keserek malzemeyi korurken Zn için durum farklıdır. Zn malzemenin üstünü örterek değil, katodik olarak korumaktadır. Zn oksit beyazdır, bu sebeple de çinko kaplı bir parça oksitlenmeye başladığında önce beyaz bir tabaka ile kaplanır. Zn' nun tamamı oksitlendikten sonra ise demir oksitlenmeye başlar ki buda kırmızı renktedir. Bu nedenle beyaz pas direnci pasivasyon tabakasının performansını, kırmızı pas değeri ise Zn tabakasının performansını tanımlar. Zn kaplama yumuşak bir yapıya sahip olduğu için el ile temasında parmak izi kalır (Tütün, 2017).

Çinkonun diğer ağır metallere göre daha düşük zehirliliğe sahiptir (Ergene, 2013). Bir gün içerisinde 200 mg'dan fazla Zn alınması, mide bulantısı, karın ağrısı ve

kusma problemlerine neden olmaktadır. Her gün düzenli olarak yüksek oranda çinko alımına maruz kalınması; bakır emiliminin bozulması, demir eksikliği ve bağıışıklığın bozulması gibi birçok soruna neden olmaktadır.

2.3.4. Kadmiyum Kaplama

Kadmiyum (Cd) metala yapışması ve korozyon direnci çok iyi olan düzgün yumuşak görünümlü bir kaplamadır. Cd kaplamalar Zn kaplamalara oranla çok daha az miktarda üretilmelerine karşın “anodik” kaplamalar olarak Zn kaplamalarla birlikte alınırlar. Kadmiyum-alüminyum çiftinin düşük kontak potansiyeli ve alkalilere dirençli olması sebebiyle çinko yerine kadmiyum kaplı bağlantı elemanları tercih edilmektedir.

Yüksek Cd’un vücuda alımı böbrek taşı oluşumuna ve kalsiyum metabolizması bozukluklarına sebep olabilir. Uluslararası Kanser Araştırmaları Ajansı (IARC) Cd ve Cd bileşiklerini kanserojen olarak sınıflandırmıştır. Cd maruziyeti bitkilerde ise; büyümenin yavaşlaması, kök uçlarının kahverengileşme ve ölüm gibi ciddi zararlara neden olmaktadır. Bitki için önemli besin elementlerinin alımına, besinlerin kökten sürgün uçlarına taşınmasına ve klorofil biyosentezini durdurarak fotosenteze engel olabilmektedir (Doğan, 2017).

2.4. Atıksu Arıtma Yöntemleri

Atıksuda kirliliğe neden olan birçok yabancı maddelerin, çeşitli arıtım yöntemleri kullanarak atıksudan gideriminin sağlanması mümkündür. Tane boyutuna bağlı olarak çöktülebilir, kolloidal yapısından dolayı askıda tutulabilir ya da çözündürülerek uzaklaştırılabilir. Atıksu arıtımında uygulanan yöntemleri 3 ana grupta (Çizelge 2.2) toplamak mümkündür (Filiz, 2007).

Çizelge 2.2. Atıksu arıtma yöntemleri (Erdaş, 2019)

Fiziksel arıtma yöntemleri	Kimyasal arıtma yöntemleri	Biyolojik arıtma yöntemleri
Izgaralar ve elekler	Koagülasyon (Pıhtılaştırma),	Klasik aktif çamur,
Öğütücü ve parçalayıcılar	Flokülasyon (Yumaklaştırma),	Uzun havalandırmalı aktif çamur
Yüzdürme havuzları	Flotasyon	Oksidasyon hendekleri,
Kum tutucular	Kristalleştirme	Damıtmalı filtreler
Çöktürme havuzları	Solvent ekstaksiyonu	Biyodisk
Yağ ayırıcılar	Klorlama	Anaerobik sistem
Buharlaştırma	Oksidasyon	Biyosorpsiyon
Dengeleme havuzları	Elektroliz	Adsorbsiyon
Filtreleme	Fosfor giderme	
	Azot giderme	
	Membranfiltrasyonu	
	(Ultrafiltrasyon)	
	Ters osmoz	
	İyon değiştirme	

2.4.1. Fiziksel Arıtma

Atıksu içerisinde yer alan kirletici maddelerin fiziksel işlemler uygulanarak atıksudan alınması amacı ile kullanılan proseslerdir. Fiziksel arıtma uygulamaları; ızgaralar, elekler, kum tutucular, yüzdürme sistemleri, çöktürme havuzları, dengeleme havuzları olarak sıralanabilir (Filiz, 2007).

2.4.2. Kimyasal Arıtma

Kimyasal arıtma; atıksu içerisinde çözülmüş ya da çözünmeyerek askıda kalan veya kolloidal halde bulunan maddelerin fiziksel durumunu değiştirerek çökelmelerini sağlayarak arıtma yardımcı olan bir arıtma yöntemidir. Bu arıtma işleminde atıksuya uygun pH değerinde koagülant, polielektrolit vb. gibi kimyasal maddeler eklenerek çökeltimi yapılarak uzaklaştırılmak istenen maddelerin çamur halinde sudan ayrılması sağlanır. Kimyasal çöktürme su arıtımında da sertlik giderimin de kullanılan bir işlemdir. Hidroksit ve karbonat bileşiklerinin sudaki çözünürlüğü oldukça düşük olduğu için genellikle giderilmek istenen metal; hidroksit veya karbonat bileşiği haline dönüştürülerek su ortamından uzaklaştırılabilir. Yumuşatma işleminde ise, sertliğe yol açan kalsiyum ve magnezyum gibi iki değerlikli katyonlar da kimyasal çöktürme işleminde karbonat ve hidroksit bileşiklerine dönüştürülerek su ortamından uzaklaştırılırlar.

Kimyasal arıtımda kullanılan prosesler nötralizasyon, koagülasyon ve flokülasyon olarak sıralanabilir. Asit veya baz ilavesi yapılarak, asidik ve bazik karakterde bulunan atıksuların uygun pH değerine getirilmesi amacıyla yapılan işleme nötralizasyon adı verilmektedir. Koagülasyon ise; koagülant maddelerin uygun pH' da

atıksuya ilave edilmesi ile atıksudaki kolloidal ve askıdaki katı maddelerin birleşerek flok oluşturmaya hazır hale gelmesi işlemidir. Genellikle hızlı karıştırma ünitelerinde yapılır. Koagülasyon işlemi sonrasında oluşan koloidal partiküller ve kimyasal reaksiyon sonucu oluşan tanecikler çok küçük yumaklar halinde birleşirler. Flokülasyon (yumaklaştırma), atıksuyun uygun hızda karıştırılması sonucunda koagülasyon işlemi ile oluşturulmuş küçük taneciklerin, birbiriyle birleşmesi ve kolay çökebilecek flokların oluşturulması işlemidir. Arıtma verimini arttırmak amacıyla yumaklaştırmaya yardımcı maddeler ilave edilir. Kil, kalsit, polielektrolit, aktif silika, çeşitli alkali ve asitler koagülant maddeler olarak kullanılır. Kimyasal yumaklaştırma sonucunda oluşan yumakların çöktürülmesi için çökeltme havuzları kullanılır. Hızlı karıştırma, yavaş karıştırma ve çökeltme havuzları ayrı birimler olarak inşa edilebildiği gibi, bunların bir arada yapıldığı bileşik sistemler de mevcuttur.

2.4.3. Biyolojik Arıtma

Suda yaşayan organizmaların birçoğu çözülmüş ağır metalleri ve radyoaktif elementleri bünyelerine adsorplayabilmektedirler. Mikroorganizmaların bu özelliklerinden yararlanarak deniz suyu, endüstriyel atıksular ve radyoaktivite sonucu kirlenmiş sularda yer alan zararlı metal iyonlarının giderilmesi mümkün olmaktadır. Ağır metal iyonlarının adsorplanarak atıksuyun temizlenmesinde çeşitli alg türleri, mayalar ve bakteriler kullanılabilir. Bu yöntemin avantajları; maliyetin düşük olması, işlem süresinin kısa olması, temiz ve kolay işletilebilir olmasıdır. Dezavantajı ise, bu yöntemle ağır metal gideriminin düşük olmasıdır. Biyolojik arıtma yöntemleri kendi içinde de aerobik ve anaerobik olmak üzere ikiye ayrılır. Arıtmanın oksijenli ortamda gerçekleştiği prosesler aerobik prosesler, havasız ortamda gerçekleştirilen prosesler ise Anaerobiktir. Aerobik proseslerde; aktif çamur sistemleri, damlatmalı filtreler ve aerobik stabilizasyon havuzları gibi yöntemlerle arıtma sağlanır. Genellikle klasik biyolojik arıtmadan çıkan atıksuyun kalitesini daha fazla iyileştirmek için ileri arıtma metotları uygulanır. Bu arıtmada; azot ve fosfor giderme, filtrasyon, dezenfeksiyon, iyon değiştirme, ultrafiltrasyon, ters osmoz, kimyasal çöktürme ve adsorpsiyon yöntemleri uygulanır (Filiz, 2007).

Bu arıtım yöntemlerinin verimi, maliyeti, avantaj ve dezavantajları yapılan bilimsel çalışmalar ile ortaya konulmuştur. Örneğin yapılan araştırmalar ile kimyasal oksidasyon yönteminin etkili bir yöntem olmasıyla birlikte maliyetinin yüksek olduğu, diğer bir arıtma yöntemi olan kimyasal çöktürmede ise çöktürme sonucu aşırı miktarda

çamur oluşturması bu yöntemlerin dezavantajları olarak ortaya çıkmaktadır. Bu tür tehlikeli atıksuların arıtım çamurlarının da tehlikeli atık olma ihtimali oldukça yüksektir. Bu sebeple arıtma çamurunun giderimi içinde ekstra bir bertaraf metodunun uygulanması gerekecek buda maliyeti arttıracaktır (Ergene, 2013).

2.5. Metal Kaplama Endüstrisi Atıksularının Karakterizasyonu ve Arıtım Alternatifleri

Ağır metaller madencilik sektöründe, enerji ve yakıt üretiminde, aşırı pestisit ve gübre kullanımının ve metal kaplama endüstrisi gibi endüstriyel üretimler neticesinde çevreye yayılmaktadır. Topraktaki metal konsantrasyonu 1 ila 100.000 mg/kg arasında değişmektedir. Ağır metallerin yüksek seviyeleri toprak ve suya karışarak elde edilen ürünün veriminin ve kalitesinin azalmasına sebep olarak, tüm canlı hayatı için önemli tehlikelere yol açmaktadır (Terzi ve ark., 2011).

Çizelge 2.3’de de görüldüğü gibi Cd, Cr ve Pb endüstriler ve antropojenik faaliyetler sonucu çevreye en fazla yayılım gösteren toksik elementler arasındadır. Demir-çelik sanayi, termik santraller ve gübre sanayi oldukça fazla çeşitte ağır metalin yayılmasına neden olarak su ortamının kirlenmesine sebep olmaktadır (Doğan, 2017).

Çizelge 2.3. Temel endüstrilerden atılan metal türleri (Doğan, 2017)

Endüstriler	Cd	Cr	Cu	Hg	Pb	Ni	Sn	Zn
Kağıt endüstrisi	-	+	+	+	+	+	-	-
Petro kimya	+	+	-	+	+	-	+	+
Klor-alkali Üretimi	+	+	-	+	+	-	+	+
Gübre sanayi	+	+	+	+	+	+	-	+
Demir-çelik san	+	+	+	+	+	+	+	+
Enerji üretimi (termik)	+	+	+	+	+	+	+	+

Biyolojik sistemlerdeki rollerine göre ağır metaller esansiyel ve esansiyel olmayan olarak sınıflandırılır. Esansiyel ağır metaller küçük miktarlarda canlı organizmaların fizyolojik ve biyokimyasal fonksiyonları için oldukça önemlidir. Fe, Mn, Cu, Zn ve Ni gibi metaller esansiyel ağır metaller olarak bulunmaktadır. Esansiyel olmayan ağır metaller canlıların herhangi bir fizyolojik ve biyokimyasal işlevleri için gerekli değildir. Esansiyel olmayan ağır metallere örnek olarak Cd, Pb, As, Hg ve Cr verilebilir (Doğan, 2017). Özellikle Metal Kaplama Endüstrisinde ağır metal içerikli atıksu oluşum miktarı oldukça fazla olduğu için atıksuların alıcı ortama verilmeden önce arıtımının yapılarak “Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliği Metal Sanayi

Atıksularının Alıcı Ortama Deşarj Standartları'na (Çizelge 2.4) getirilmesi gerekmektedir.

Çizelge 2.4. Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliği metal sanayi atıksularının alıcı ortama deşarj standartları (SKKY, 2004)

Parametre	Birim	Kompozit numune 2 saatlik	Kompozit numune 24 saatlik
Kimyasal oksijen ihtiyacı (KOİ)	(mg/L)	100	-
Askıda katı madde (AKM)	(mg/L)	125	-
Yağ ve gres	(mg/L)	20	-
Nitrit azotu (NO ₂ -N)	(mg/L)	5	-
Aktif klor	(mg/L)	0.5	-
Toplam krom	(mg/L)	1	-
Krom (Cr ⁺⁶)	(mg/L)	0.5	-
Alüminyum (Al)	(mg/L)	3	-
Florür (F ⁻)	(mg/L)	50	-
Çinko (Zn)	(mg/L)	3	-
Kadmiyum (Cd)	(mg/L)	-	0,2
Balık biyodenyi (ZSF)	-	2	-
pH	-	6-9	6-9

Metal kaplama durulama banyolarından çıkan Cd-CN, CN ve Cd içeren atıksuların elektrokoagülasyon (EC) ile arıtımı üzerinde yapılan çalışmada; Cd-CN atıksularının EC'da işletme süresine bağlı olarak akım yoğunluğu arttıkça CN ve Cd giderim veriminin arttığı, yüksek akım yoğunluklarında daha düşük işletme süreleri gerektiği saptanmıştır. Elde edilen sonuçlara göre CN-Cd içeren atıksular için 30 akım yoğunluğu (A/m²) ve 50 dk işletme süresinin optimum olduğu, CN ve Cd giderim verimi %99.70 (0.36 mg/L), %99.59 (0.42 mg/L) elde edilmiştir (Uzun Parlak, 2008).

Fenton prosesinin metal kaplama endüstrisi atıksularına uygulanabilirliği ve fenton prosesi ile arıtımı sonucu Cr⁺⁶, renk ve KOİ gideriminin incelendiği çalışmada; fenton prosesi sırasında Fe⁺⁶ ve H₂O₂ reaksiyonunun kararlılığı oldukça önemli olduğu ve reaksiyon kararlılığının pH'a bağlı olduğu belirlenmiştir. Optimum FeSO₄ konsantrasyonu Cr⁺⁶ giderimi için 1200 mg/L olup giderim verimi %43, KOİ giderimi için optimum FeSO₄ konsantrasyonu 500 mg/L olup giderim verimi %60 olmaktadır. Bu sonuçlara göre metal kaplama endüstrisi krom kaplama atıksularına Fenton prosesi uygulandığında Cr⁺⁶ ve KOİ gideriminin aynı pH şartlarında ve aynı dozlarda etkili olmadığı ve farklı verimlerle çalıştığı belirlenmiştir. Bu yüzden, Cr⁺⁶ ve KOİ'nin eş zamanlı olarak giderimi bu proses ile mümkün olmadığı sonucuna varılmıştır (Yılmaz, 2008).

Metal kaplama endüstrisi atıksuyundan EC flokları ile doğal adsorbentler olan klinoptilolit ve kaolinin Ni⁺² iyonlarının giderimi üzerine yapılan inceleme neticesinde;

EC prosesinde, artan pH ile Ni^{+2} giderim veriminin yükseldiği gözlemlenmiştir. Giriş pH değeri 8 ve 9 iken giderim veriminin % 99'a ulaştığı görülmüştür. Artan akım yoğunluğunun Ni^{+2} giderim verimini arttırdığı görülmüştür. Karıştırma süresi de Ni^{+2} giderim verimi ile doğru orantılı olup, karıştırma süresi arttıkça anotta çözünen Fe^{+2} ve/veya Fe^{+3} iyonlarının hidroksitleri ile Ni^{+2} iyonları ortamdan uzaklaştırılarak verim yükselmektedir. Temas süresi deneyleri 20 ile 360 dakika aralığında yapılmış olup en yüksek giderim verimini sağlayan 300 dakikada giderim verimlerinin EC flokları, kaolin ve klinoptilolit için sırasıyla %52, %56 ve %57 olduğu belirlenmiştir (Deniz Yaşar, 2018).

Çay fabrikası üretim artışı ile metal kaplama atıksularından ağır metal (Cr^{+6} , Cu^{+2} , Ni^{+2} ve Zn^{+2}) giderim adsorpsiyonuna adsorban tanecik boyutunun ve adsorban dozajının etkisini araştırıldığı çalışmada; sentetik atıksudan ağır metal giderimine adsorban boyutunun etkisini değerlendirmek için 0.25 ile 2.5 mm boyutlarındaki atık çay ile çalışılmıştır. En iyi ağır metal gideriminin < 0.25 mm boyutundaki atık çay ile gerçekleştiği tespit edilmiştir. Bu sonuçla adsorban boyutu azaldıkça yüzey alanın artması ve daha çok metal absorbe etmesi ile açıklanabilir. Optimum giderim verimi 40 g/L adsorban ile elde edilmiştir. Sentetik atıksudan sırası ile metal giderim verimleri; Cr^{+6} için %67, Cu^{+2} için %62, Zn^{+2} için %25 ve Ni^{+2} için %15 olarak bulunmuştur. Bu adsorban dozajında adsorpsiyon kapasiteleri sırası ile metal giderim verimleri, Cr^{+6} için 16.05 mg/g, Cu^{+2} için 5.58 mg/g, Ni^{+2} için 2.23 mg/g ve Zn^{+2} için 0.85 mg/g olarak belirlenmiştir (Ergene, 2013).

Organize Sanayi Bölgesinde yer alan Galvanoteknik Metal Kaplamacıları Sanayi Sitesinden alınan metal endüstrisi atıksularına; bakır (Cu), Zn, demir (Fe), Ni, Cr, klorür (Cl), sülfat (SO_4^{-2}) ve TOK parametreleri için elektrokoagülasyon, fenton, elektrofenton ve pH ayarlama işlemleri ayrı ayrı uygulandığı çalışmada; İSKİ deşarj standartlarına göre bakır, nikel, sülfat gideriminde istenilen çıkış konsantrasyonlarına ulaşamamış olup bu parametreler için sırasıyla en etkili giderim yöntemi fenton, hidroksit çöktürmesi ve elektrokoagülasyon olduğu tespit edilmiştir. Bakır ve nikel ağır metali içeren atıksularda siyanür gibi kompleks oluşturucu iyonların bulunması arıtılmış suda düşük nikel ve bakır seviyelerine sebep olduğundan elektrokoagülasyon, fenton, elektrofenton veya hidroksit çöktürmesi öncesinde CN^- arıtımı yapılması söz konusu ağır metallerin giderim verimini arttıracaktır. CN^- giderim yöntemleri; biyolojik arıtma prosesleri, membran prosesler, klor oksidasyonu, hipoklorit oksidasyonu, hidrojen

peroksit oksidasyonu, ozon oksidasyonu, kimyasal çöktürme ve elektrokimyasal proseslerle gerçekleştirilebilir (Budak Özlü, 2016).

2.6. Fitoremediasyon Tekniği ve Çeşitleri

Fiziksel, kimyasal ve biyolojik arıtma yöntemleri haricinde, tamamen doğayı taklit ederek, bitkilerin arıtmada kullanılması prensibine dayanan yeşil ıslah-fitoremediasyon teknikleri çok uzun yıllardır kullanılan yöntemlerden biridir. Bir terim olarak fitoremediasyon “fito” (Yunanca: bitki) ve “remedium” (Latince: bir kötülüğü düzeltmek veya gidermek) kelimelerinden türemiştir. Fitoremediasyon terimi yerine biyoremediasyon, bitki ile iyileştirme gibi farklı terimler ve ifadeler de kullanılabilir. Fitoremediasyon tekniğinde, indirgeme, azaltma, toprak ve sudan taşınmayı önleme gibi yöntemler kullanılarak kirleticinin bitki ile giderilmesi sağlanarak kirlenmiş alanlar temizlenmekte ve canlılar için toksik olmayan bir ortama çevrilmektedir.

Geleneksel teknolojilere kıyasla ağır metallerin giderilmesinde biyolojik işlemlerin maliyeti daha düşüktür. Bu yöntemde, bitkilerin gereksinimi olan enerjiyi güneşten alabilmesi ve yerinde arıtımın gerçekleştirilebilir olması büyük bir avantajdır. Fitoremediasyon organik ksenobiyotikler, ağır metaller ve radyoaktif kirliliğe maruz kalmış atıksular, yeraltı suları, toprak kısacası kontamine olmuş ortamın temizlenmesi için kullanılan önemli bir biyolojik iyileştirme tekniğidir (Asim ve ark., 2019). Fitoremediasyon yöntemi katı, sıvı ve gaz halinde geniş yelpazeyi kapsayan kirleticilerin giderilmesi için başarılı bir şekilde kullanılmaktadır. Bu tekniğin temeli degradasyon, değiştirme veya dönüşüm gibi yöntemlerle inorganik ve organik kirleticileri arındıran bitkilerin doğal süreçlerine dayanmaktadır. Bu teknoloji su, hava ve toprakta bulunan toksik metalleri (Cd, Cu, Hg, Pb, Zn, As vs.) giderme potansiyeline sahiptir (Aliyeva, 2014). Ayrıca kirlenmiş toprakların üzerine ekilen bitkiler erozyonu önleyerek metallerin taşınmasını engeller. Ekonomik açıdan değerlendirildiğinde fitoremediasyonun diğer faydaları ise riski sınırlandırması (fitostabilizasyon), Ni, Tl ve Au gibi piyasada değerli metallerin fitoekstrasyonu, dayanıklı arazi yönetimi, fitoekstrasyon ile arazi kalitesi artırılarak yüksek piyasa ürünlerin daha sonraki ekimine olanak sağlanır (Doğan, 2017).

Çizelge 2.5. Fitoremediasyonun avantajları ve dezavantajları (Eman Gökseven, 2019)

Avantajlar	Dezavantajlar
Zaman /Maliyet	
Düşük sermaye ve işletme maliyeti	Diğer tekniklere göre daha yavaş ve mevsimsel olarak bağımlıdır. Hiperakümülatörlerin çoğu yavaş yetişen bitkidir.
Performans	
Kalıcı iyileştirme çözümü, Kirlenmelerin biyolojik olarak kullanılabilir kısmını iyileştirme yeteneği, Mineralleştirici organik maddeleri yapabilir, Birden fazla kirlenme türü ile kirlenmiş alanları iyileştirme potansiyeli, İyileştirici bitkilerin köklenme derinliği ile sınırlıdır, Oldukça uzmanlaşmış personel gerekli değildir. Alan incelemesi ya da kapatıldıktan sonra da kullanılabilir.	%100 azaltma yeteneğine sahip değildir. Yüksek kirlenme konsantrasyonu bitkiler için toksik olabilir. Toprak fitoremediasyonu sadece yüzey topraklarına uygulanabilir. Düşük kirlenme alanlarla sınırlıdır. Belirli metaller ve bölgeler için uygun türleri ve çeşitleri seçen alan deneyimli uzman proje tasarımcıları, teknik strateji gerektirir.
Uygulama	
Yerinde uygulama kirlenmiş ortamların kazılmasını/çukurlaşmasını ve taşınmasını önler, Uygulanması nispeten kolaydır.	Ağır metallerin ve organik kirlenmelerin çok sayıda türünün varlığı bir sorun oluşturabilir. İklim koşulları sınırlayıcı bir faktördür.
Çevrenin ve nüfusun etkisi	
Kirliliğin yayılma riskini azaltır, İkincil hava veya su kaynaklı atıkları ortadan kaldırır, Estetik nedenlerden dolayı halk tarafından kabul görür.	Metaller yağmurla yıkanabilir ve bitki biyokütlesinin ayrılmasından dolayı toprağa geri taşınabilir. İstilaç, yerli olmayan türlerin kullanımı biyoçeşitliliği etkileyebilir. Yanlış uygulama ve uygun bakım eksikliği durumunda gıda zinciri kirlenmesi riski oluşabilir.

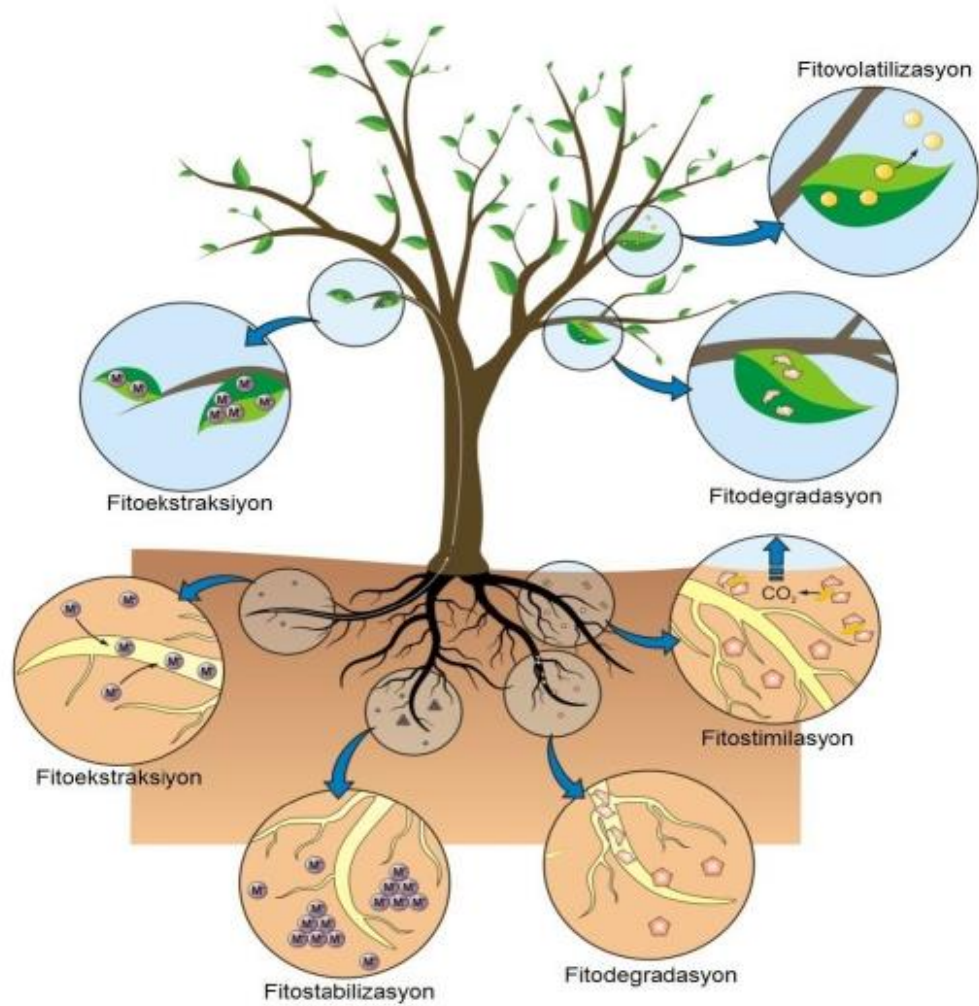
Fitoremediasyon teknolojileri kirlenme çeşitlerine göre; metal ve organik kirlenmeler olmak üzere ikiye ayrılmaktadır (Aybar ve ark., 2015).

Çizelge 2.6. Fitoremediasyon teknolojilerinin kirlenme çeşitlerine göre sınıflandırılması (Aybar ve ark., 2015)

Metal kirlenmelerde kullanılan yöntemler	Organik kirlenmelerde kullanılan yöntemler
Fitoekstraksiyon	Fitodegradasyon
Rizofiltrasyon	Rizodegradasyon
Fitostabilizasyon	Fitovolatilizasyon

Fitoekstraksiyon (bitkisel ekstraksiyon) toprakta kirliliğe yol açan metal kirlenmelerin bitki kökleri yardımı ile alınması yöntemine verilen isimdir. Metal biriktiren bitkiler kullanılarak kirlenmiş topraktan toksik metaller uzaklaştırılmaktadır. Bitkiler bu zararlı metalleri kökleri yardımı ile topraktan alırlar ve diğer vejetatif organlara dağıtımında görev alırlar. Bu nedenle, uygulamada metalleri bünyesinde barındırabilen hiperakümülatör bitkiler kullanılmaktadır. Daha sonra ağır metalleri tutan bitkiler hasat edilir ve yakma fırınlarında yakılırlar veya başka uygun bir metot ile farklı işlemlere tabi tutulurlar (Aybar ve ark., 2015).

Örneğin Göker'in yapmış olduğu çalışma sonucunda; fitoremediasyon yönteminde mısır bitkisinin hiperakümülatör bitki olduğu ve Cr ile kirlenmiş toprakların temizlenmesinde uygulanabilir bir yöntem olduğu tespit edilmiştir (Göker, 2019). Fitoremediasyon tekniğinin başarılı olması için toprak tipi, kirlilik etmeni, kirleticinin bitki tarafından alınması, yetiştirme şartları dikkate alınmalıdır. Bunlar bitkinin yetiştirilmesinde ve kirlenici etmenin uzaklaştırılmasında önemli olan etkenlerdir (Yurdakul, 2015). Kirliliği istenilen seviyelere indirmek için fitoekstraksiyon yöntemi sıklıkla tekrarlanmaktadır. Bazı durumlarda fitomining olarak da bilinen yöntem yardımı ile metallerin yeniden işlenerek geri kazanılabilmesi sağlanmaktadır. Bu yöntem değerli metallerin işlenmesinden ayrı tutulur. Çinko, bakır ve nikel gibi ağır metal içerikli bileşikler başarılı bir şekilde fitoekstrakte edilebilmektedirler (Aybar ve ark., 2015).



Şekil 2.1. Fitoremediasyon mekanizmaları (Aybar ve ark., 2015)

Rizofiltrasyon (kök bölgesi filtrasyonu); kök bölgesi filtrasyonu, bitkilerin kökleri kullanılarak toksik metallerin sulardan uzaklaştırılmasıdır (Yurdakul, 2015). Rizofiltrasyon yönteminde diğer yöntemlere nazaran kullanılacak bitkilerde filtre görevi yapan iyi gelişmiş bir kök sistemine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu yöntemde toprağın ıslahından çok kirlenmiş sudaki ağır metallerin alandan uzaklaştırması için uygulanmaktadır. Kirleticiler ya bitkilerin kök yüzeylerinde absorbe edilir ya da kökler aracılığı ile emilerek bitkinin diğer organlarına taşınır. Rizofiltrasyon yöntemi için tercih edilecek hiperakümülatör bitkilerin kökleri istenilen düzeyde gelişene kadar toprak yerine temiz suda bekletilmesi tercih edilir. Daha sonra başka bir ortamda kirleticiye adaptasyonu sağlanır. Uyum sorunu ortadan kalktıktan sonra olarak rizofiltrasyon yönteminin uygulanacağı kirlenmiş alana dikimleri yapılır. Kökler doymuş hale geldikten sonra hasat işlemine başlanılır ve güvenli bir şekilde imhası gerçekleştirilir (Aybar ve ark., 2015). Rizofiltrasyon yöntemi için hem karasal hem de sulu bitkiler kullanılabilir. Bu yöntem pH ve debi kontrolleri yapılarak uygun ortamların hazırlanması ile atıksularda, doğal ve havuz, tank, gölet gibi yapay alanlarda uygulanabilir (Yurdakul, 2015).

Zhu ve ark. (1999) çalışmasında, altı iz elementin (As^{+5} , Cd^{+2} , Cr^{+6} , Cu^{+2} , Ni^{+2} ve Se^{+6}) bulunduğu ortamda, suda yüzen bir bitki olan su sümbülünün (*Eichhornia Crassipes*) bünyesine alma ve yerini değiştirme ayrılma potansiyelini göstermeye çalışmışlardır. Su sümbülünün kök ve filizinde Cd ve Cr için iyi bir depolayıcı olduğu, Se ve Cu'ı orta seviyelerde, As ve Ni'i ise zayıf seviyede biriktirdiği, toksik Cr^{+6} 'yı hemen toksik olmayan Cr^{+3} 'e çevirerek bünyesinde tuttuğu ortaya konulmuştur.

Fitostabilizasyon (bitkisel sabitleme) bitkide sabitleme tekniğinin tercih edildiği çalışmalar kirlenmiş toprakların iyileştirilmesi için araştırılan konular içerisinde yer bulmuştur (Yurdakul, 2015). Fitostabilizasyon erozyonu önlemek, yer altı sularına kirleticilerin sızmasını ve toprakla doğrudan temasını engellemek amaçlarıyla kullanılır. Bu yöntem için toprak yüzeyi alana uygun olan hiperakümülatör bitkiler ile örtülmektedir. Fitostabilizasyon yöntemi ile bitkiler kökler vasıtası ile kirleticileri fiziksel ve kimyasal olarak sabitleyebilirler. Bu yöntem için, ağır metallerle kirlenmiş topraklarda büyüyüp gelişebilen ve toksik metalleri daha az toksik formlarına dönüştürebilmek için toprağın fiziksel, kimyasal ve biyolojik özelliklerini değiştirebilen bitkilere ihtiyaç duyulmaktadır. Bu teknikte kullanılan materyallerin her bitki ve her kirletici için uygun olmadığı bazı bitkilerin kimi metalleri alımına engel oluştururken, bazılarının metali daha fazla almasına neden olabilmektedir (Aybar ve ark., 2015).

Fitodegradasyon (bitkisel bozunma) bitkide bozunma, metabolik yapısı gereği bitkilerin enzimler yardımıyla bünyesine aldığı organik bileşikler parçalaması işlemidir. Bozunma bitki bünyesine alım, taşıma, metabolik faaliyet ve mikrobiyal faaliyet ile gerçekleşmektedir. (Yurdakul, 2015). Yani bazı kirleticiler ilk önce bitkiler tarafından absorbe edilir, daha sonra enzimler yardımı ile bozunuma uğratılırlar. Bitkiler tarafından bünyesinde tutulan organik bileşikler metabolik mekanizmalar vasıtasıyla daha küçük parçalara ayrılırlar. Parçalara ayrılan bu moleküller daha sonra da bitkiler tarafından metabolik olarak ayrıca kullanılabilir duruma gelip bitki dokuları ile birleşmiş bir hal alırlar. Bu yöntem kullanılarak yeraltı sularındaki çözücüler, topraktaki petrol ve aromatik bileşikler ve havadaki uçucu bileşikler gibi birçok farklı kirletici ıslah edilebilir. Bunla birlikte bitki enzimleri, cephane atıkları ve ayrıca organik herbisitler gibi bozunabilen diğer zararlı maddelerin arıtımında da bu yöntem kullanılabilir. Genel olarak bu yöntem için hiperakümülatör bitkiler kullanılır (Aybar ve ark., 2015).

Mücevher (2010) yapmış olduğu çalışma sonrasında kursalık (*Suaeda carnosissima* post) bitkisinin ve gındıra otu/hasır otu (*Juncus acutus*) bitkilerinin krom ağır metalle kirlenmiş toksik toprakta yaşayabildiğini, bitki boyunda uzama olduğunu ve 99 günlük çalışmanın bitiminde bile bitkilerin halen yaşamlarını sürdürdüğünü gözlemlemiştir. Bu çalışma neticesinde, kromla kontamine olmuş alanların ıslahında hiperakümülatör bir bitki olarak Kursalık (*Suaeda carnosissima* post) bitkisi ve gındıra otu/hasır otu (*Juncus acutus*) bitkilerinin tercih edilebileceği kanısına varmıştır.

Rizodegradasyon (kök bölgesinde bozunma) kök bölgesinde bozunma, toprak mikroorganizmalarının organik kirleticileri çözmesi (şeker, alkol, organik asit ve karbonhidrat), böylece mikrobiyal aktivitenin ve bitkinin desteklenmesidir. Ağır metal alımı ve metale toleranslar bitkiye, toprağa, mikroorganizmalara, rizobiyumlar ile mikorizalar arasındaki ilişkiye göre farklılık göstermektedir. Mikoriza köklerde oluşarak, bitkinin ağır metalden etkilenmemesini bitkinin direncini arttırmak suretiyle gerçekleştirmektedir (Yurdakul, 2015). Rizodegradasyonun en önemli yararlarından biri de kirleticilerin doğal ortamlarında yok olmalarıdır. Olumsuz yönü ise az miktarda da olsa bitki veya atmosfere taşınmalarıdır (Aybar ve ark., 2015).

Fitovolatilizasyon (bitkiden buharlaştırma) bitkisel buharlaştırma olayı organik kirleticiler ve ağır metal içeren suyun büyük bir miktarını kökler vasıtası ile bünyesine alan ağaçlarda meydana gelir. Bu yöntemde kökün inebildiği derinlik çok önemlidir. Yer altı sularının ıslahı söz konusu ise derin kök yapabilen bitkiler seçilmelidir. Kirli

yer altı suları pompalarla yüzeye çıkarılarak suyun daha sıkı bitki köklerine alınması da farklı bir yöntemdir. Fitovolatilizasyon yöntemi ile bitkiler tarafından tutulan kirleticiler daha az uçucu formlara dönüştürülerek transpirasyon yolu ile doğaya salınmaktadır. Bilindiği gibi su, köklerden alınarak gövde ve yapraklara iletilirler. Böylece kirleticiler, bitkiyi çevreleyen havaya terleme ve gaz formuna dönüşerek karışır (Aybar ve ark., 2015). Bitki topraktaki Hg ve Se gibi elementleri yapraklarına kadar taşıyarak element yapısını atmosfere verilecek şekilde değiştirmektedir. Yöntemin en önemli avantajı çok zehirli bileşiklerin (Hg) daha az zehirli formlara dönüştürülmesidir. Ancak zehirli gazların atmosfere bırakılması da bir dezavantajdır. As, Hg ve Se gibi metaller doğada gaz formunda bulunabilmektedir (Yurdakul, 2015).

Fitoremediasyon tekniklerinde artık bitkisel malzemenin nihai giderim yolları; bu teknik ile toprak veya su tarafından tutulmuş halde bulunan metallerin daha kontrol edilebilir ve taşınabilir forma dönüştürülmektedir. Bu nedenle fitoremediasyon yöntemi, nihai bir uzaklaştırma veya giderme yöntemi olarak düşünülmemektedir. Nihai uzaklaştırma veya giderim, fitoremediasyon sonucunda ortaya çıkan bitkilerin yakılarak veya uygun bir depolama alanında depolanarak gerçekleştirilebilmektedir. Bitkide biriken selenyum gibi bazı metallerin hayvan beslenmesinde yararlı olması nedeniyle bu tür bitkilerin, hayvan yemi olarak değerlendirilmesi de mümkündür (Hamutoğlu, 2012).

Çizelge 2.7. Metallerin fitoremediasyonunda kullanılan bazı bitki türleri (Terzi ve ark., 2011)

Metal	Ortam	Metot	Bitki
As	Toprak	Fitoekstraksiyon	<i>Pteris vittata</i>
		Fitostabilizasyon	<i>Panicum sativum</i>
B	Toprak	Fitoekstraksiyon	<i>Gypophila sphaerocephala</i>
Cd	Toprak	Fitoekstraksiyon	<i>Oryza sativa</i>
		Fitostabilizasyon	<i>Vetiveria zizanioides</i>
Co	Su	Rizofiltrasyon	<i>Lemna minor</i>
	Toprak	Fitoekstraksiyon	<i>Berkheya coddii</i>
Cr	Toprak	Fitoekstraksiyon	<i>Brassica juncea</i>
		Su	Rizofiltrasyon
Cu	Toprak	Fitoekstraksiyon	<i>Elsholtzia splendens</i>
		Fitostabilizasyon	Fitostabilizasyon
Hg	Su	Rizofiltrasyon	<i>Lemna minor</i>
	Toprak	Fitoekstraksiyon	<i>Marrubium vulgare</i>
Mn	Toprak	Rizofiltrasyon	<i>Pistia stratiotes</i>
		Fitoekstraksiyon	<i>Phytolacca americana</i>
Ni	Toprak	Fitoekstraksiyon	<i>Alyssum lesbiacum</i>
		Fitostabilizasyon	<i>Agropyron elongatum</i>
Pb	Su	Rizofiltrasyon	<i>Lemna minor</i>
	Toprak	Fitoekstraksiyon	<i>Chenopodium album</i>
Se	Toprak	Fitostabilizasyon	<i>Vetiveria zizanioides</i>
		Su	Rizofiltrasyon
Zn	Toprak	Fitoekstraksiyon	<i>Brassica rapa</i>
		Fitovolatilizasyon	<i>Brassica spp.</i>
	Toprak	Fitoekstraksiyon	<i>Cynodon dactylon</i>
	Su	Rizofiltrasyon	<i>Brassica juncea</i>

Akuatik bitkiler (makrofitler) su ortamında bulunan metal iyonlarını ve toksinleri bünyelerine alarak biyolojik filtre görevi görürler. Bu makrofitler ortamdaki P ve N gibi besin iyonlarının ve metallerin konsantrasyonunu azaltabilmekte ve su ortamının kontrolü için kullanılabilir. Birçok serbest yüzen, emers (su üstüne çıkan) ve submers (suya batık) makrofitlerin ağır metalleri akümüle ettiği tespit edilmiştir. Submers bitkiler biyomaslarında daha fazla oranda ağır metal akümüle edebildiklerinden, su ortamındaki ağır metal kirliliğinin uzaklaştırılmasında daha faydalıdır. Çok düşük oranlardaki ağır metalleri bile akümüle etme yeteneklerinden dolayı makrofitler, kirliliklerin izlenmesinde indikatör olarak kullanılabilir (Doğan, 2017).

Çizelge 2.8. Akuatik makrofitler tarafından uzaklaştırılan bazı metaller (Doğan, 2017)

Serbest yüzen makrofitler	Metal iyonları
Eichhornia crassipes	Pb, Cr, Cu, Cd, Zn, Mn, Ag
Ludwigia sp	Cu, Zn, Pb, Cd, Ni, Hg
Salvinia herzogii	Cr, Cd
Pistia stratiotes	Cd, Hg, Cr
Azolla spp	Hg, Cr
Lemna minor	Ni, Cd, Zn, Al
Lemna spp	Pb
Submers (suya batık) makrofitler	Metal iyonları
Hydrilla verticillata	Cu, Cd
Elodea canadensis	Cd, Pb, Cu, Ni, Cr, Co, Cu, Mn, Al, Zn
Elodea nuttallii	Cd, Pb, Cu, Zn
Ceratophyllum demersum	Ni, Cr, Co, Zn, Mn, Pb, Cd, Hg, Fe
Myriophyllum sp	Cu, Zn, Pb, Cd, Ni
Groenlandia densa	Cd, Cu
Potamogeton spp	Pb, Zn, Cu, Cd, Mn, Ni
Potamogeton natans	Zn, Cu, Cd, Mn, Ni
Potamogeton lucens	Pb, Zn, Cr, Cu, Ni, Cd, Mn
Potamogeton pectinatus	Cd, Pb, Cr, Ni, Zn, Cu, Mn
Hydrophila polysperma	Cu, Zn, Pb, Cd, Ni
Hydromistia stolonifera	Cd
Ipomea aquatica	Hg
Emers (su üstüne çıkan) makrofitler	Metal iyonları
Typha latifolia	Ni, Cr, Co, Zn, Mn, Pb, Cd, Hg, Fe
Typha angustifolia	Cd, Pb, Ni, Zn, Cu
Phragmites australis	Ni, Cr, Co, Zn, Mn, Pb, Cd, Hg, Fe

Sazlıdere deltasında bölgeye adapte olabileceği tahmin edilen *C. undulata* ve *E. amazonicus* bitkileri seçilerek fitoremediasyon tekniği ile ortamdan metal uzaklaştırmanın esasları belirlenmeye çalışılmıştır. İlk sette bitkisiz yürütülen, ikinci sette *C. undulata* ve *E. amazonicus* ile gerçekleştirilen denemelerde sediment yapıda haftalık izlenen element miktarlarına bakıldığında; *C. undulata* bitkisiyle yürütülen çalışmada sediment yapıdaki Zn elementi hariç bütün elementlerde, *E. amazonicus* bitkisiyle yürütülen çalışmada ise Cd elementi hariç bütün elementler için sedimentte iyileşme gerçekleştiği. Her iki bitkinin de sedimentten Mg, Fe ve Pb alım kapasitelerinin yakın olduğu, Ca ve Cd elementlerini sedimentten alarak *C. undulata*'nın sedimentte daha iyi iyileştirme gerçekleştirdiği; *E. amazonicus* bitkisinin sedimentte izlenen Cr, Mn, Ni, Cu ve Zn elementlerini diğer deney bitkisine oranla daha fazla alımını gerçekleştirdiği; Genelde Cr elementinin sedimentte kararlı olduğu deney bitkilerinin sediment yapıda bu elementi hareketlendirdiği çok fazla alamadığı tespit edilmiştir (Aliyeva, 2014).

Çiftçi (2016) biyodizel hammaddesi elde edilebilecek iki potansiyel enerji ürünü olan Aspir (*Carthamus tinctorius*) ve Yabani hint yağı (*Ricinus communis*) ile yapmış olduğu fitoremediasyon çalışmasında; çoklu metallerle (Cd, Pb ve Zn) aşırı düzeyde

kirlenmiş kumlu tınlı bir toprağın, killi tınlı temiz bir toprağa % 0 (kontrol ve temiz), 25, 50, 75 ve 100 oranında karıştırılmasıyla beş toprak karışımı yaparak, üç aylık bir büyüme döneminde bitki boyu, toplam kök ve yeşil aksam bitki kuru biyokütlesi, klorofil içeriği, metal derişimi ve alımı, tolerans indeksi (TI), biyokonsantrasyon faktörü (BKF) ve translokasyon faktörünü (TF) araştırmıştır. Yapılan deneyler sonucunda; topraklarda artan çoklu metal derişimine bağlı olarak her iki bitkide de Cd, Pb ve Zn alımı büyük ölçüde arttığı, yüksek derişimlerde artan kirletici derişimine bağlı olarak aspir ve yabani hint yağı bitkilerinin kök ve yeşil aksamı azdan çoğa doğru $Zn > Cd > Pb$ biriktirdiği tespit edilmiştir. Aspir ve yabani hint yağı bitkilerinde köklerin, yeşil aksamından daha fazla metal biriktirdiği görülmüştür. Her iki bitkide çoklu metale karşı yüksek tolerans gösterdiğinden biyodizel üretimi için çoklu metalle (Cd, Pb ve Zn) ile kirlenmiş arazilerde ekilebilir olduğu tespit edilmiştir.

Bu çalışmanın amacı, tez kapsamında kullanılacak bitki olan *Ceratophyllum demersum L.* ile kimyasal yöntemlere göre daha avantajlı olan fitoremediasyon yöntemi kullanılarak, çevre için ciddi tehlike oluşturan ağır metallere; Cd, Cr, Ni ve Zn'nun *C. demersum* bitkisi tarafından; farklı gün ve konsantrasyonlarında ki maruziyetlere karşılık en iyi arıtma veriminin tespit edilmesidir.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Cihazlar ve Kimyasal

Çalışmada kullanılan kimyasallar analitik saflıktadır. HNO₃ Merk firmasından temin edilmiştir. Deiyonize su Millipore Milli-Q Plus su saflaştırma cihazından sağlanmıştır. Analiz sonuçları; alevli, grafit fırın ve hidrür sisteminden oluşan, dalgaboyu aralığı en az 190-870 nm arasında, hem referans ışını hem de numune ışını aynı anda ölçebilecek 2 ayrı ve bağımsız kanallı özel Solid-State (Katı hal) veya PMT tipte bir dedektör olan Perkin Elmer marka Atomic Absorption Spectrometer AAnalyst 800 cihazı ile okunmuştur. Bitkilerin kurutulmasında Memmert 100-800 model Etüv cihazı, CEM MarsXpresshassas mikrodalga yakma fırını, tartımlar için AND GH-202 (Min 1 mg- Max 220 g) marka hassas terazi, süzme işlemleri için GE Healthcare Life Sciences Whatman marka 185 mm filtre kağıtları, pH ölçümleri için HACH HQ40d marka pH metre cihazı kullanılmıştır. Bitkilerin deney süresince bulunduğu ortamın ışık şiddeti Sper Scientific 840020 marka lüks metre ile ölçülmüştür.

3.2. Bitki Materyali

Ceratophyllum demersum L. Ceratophyllaceae familyasına ait tamamen su altında yaşayan köksüz, çok yıllık ve dağılışı içinde kozmopolit bir su bitkisidir (Şekil 3.1).



Şekil 3.1. *Ceratophyllum demersum* L. bitkisi

Bu suya batmış makrofit, vejetatif üreme ve biyokütle üretimi için mütevazı beslenme koşullarında bile yüksek bir kapasiteye sahiptir (Chorom ve ark., 2012).

Durgun ya da yavaş akan sularda yetişir. Gövdeleri 15 cm'den uzundur. Yapraklar koyu yeşil, 6-16 mm uzunlukta, 1-2 kez çatallanmış, sert yapıda, segmenler linear, dentikulattır. Koyu yeşilden açık yeşile kadar değişen renklerde olabilen çatallı yapıdaki yaprakları, gövde üzerinde halkasal dizilmişlerdir. Bu halkalar, gövde ucuna doğru sıklaşarak tilki kuyruğu görünümünü aldıklarından sucul ortamda 'tilki kuyruğu' olarak da bilinirler. Kökleri bulunmaz fakat bazı modifiye yapıları sayesinde (rizoid) suyun dip kısımlarına tutunabilir (Doğan, 2017) ve kök dokusu ile ağır metalleri emebilirler (Suryani ve ark., 2017). Kapalı Dengeli Biyolojik Su Sisteminde (CEBAS) kullanım için bir oksijenatör olarak faydalıdır (Chorom ve ark., 2012). Su ortamları için ağır metallerin ve diğer kirleticilerin gideriminde fitoremediasyon yöntemiyle kullanılan ve iyi bilinen bir yüzer makrofittir (Asim ve ark., 2019). Cd, Cr, Zn ve Ni gibi bir çok ağır metal için biyofiltre olabilir (Chorom ve ark., 2012).

Bu çalışmada kullanılan *Ceratophyllum demersum L.* bitkisi, Necmettin Erbakan Üniversitesi Biyoteknoloji Bölümünden Doç. Dr. Muhammad ASİM tarafından çoğaltılmıştır. Karataş ve Aasim (2016) tarafından geliştirilmiş protokol kullanılarak; rejenerasyon için 1 mg/L BAP içeren sıvı besi ortamı ve eksplant olarak 3-4 mm' lik nodal segment eksplantlar izole edilerek kullanılmıştır.

Bitkiler farklı konsantrasyonlara sahip ağır metal içerikli atıksularda içerisinde 1,3 ve 5 günlük deney süreleri boyunca; beyaz LED' lerle (1920 LUX) 16 saat ışık alacak ve 23 ± 1 °C sıcaklığa sahip ortam düzeneği içerisinde bekletilecektir (Şekil 3.2).



Şekil 3.2. 1,3 ve 5 gün boyunca numunelerin bekletildiği ortam düzeneği

3.3. Atıksu Örnekleri

Bu çalışmada kullanılan gerçek atıksu örnekleri, Konya Kentsel Atıksu Arıtma tesisi çıkış suyundan temin edilmiştir.

Laboratuvar ortamında deiyonize su ile hazırlanan ağır metal içeren atıksular ise; Cd için $3\text{CdSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, Cr için $\text{CrCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, Ni için $\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ve Zn için ZnCl_2 tuzlarıyla stok çözeltileri hazırlanarak kullanılmıştır.

3.4. Yöntem

3.4.1. Stok Çözeltilerin Hazırlanması

Çözeltiler hazırlanmadan önce her bir ağır metal uygulaması için $3\text{CdSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, $\text{CrCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, $\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ve ZnCl_2 tuzlarıyla stok çözeltiler oluşturulmuştur. Daha sonra bu stok çözeltilerden belirlenen konsantrasyonlarda alınarak strelize plastik kaplara spike edilmiştir. Çözeltilerin hazırlanmasında kimyaca inert ve yeterli büyüklükteki cam materyaller kullanılmıştır.

3.4.2. Doz Belirleme Çalışması

Fitoremediasyon çalışması için *Ceratophyllum demersum L.* bitkisi ve Cd, Cr, Ni ve Zn ağır metalleri kullanılmıştır. Deiyonize su içerisine Cd, Cr, Ni ve Zn'un tuzları kullanılarak farklı konsantrasyonlarda numuneler hazırlanmıştır (Çizelge 3.1). Her bir ağır metal için çalışılan konsantrasyon aralığı bu konu hakkında daha önce yapılan çalışmalar baz alınarak belirlenmiştir. Tüm konsantrasyonlar için iki tekrar ve kontrol amaçlı içerisinde ağır metal içermeyen sadece ultra deiyonize su ve bitki bulunan numuneler hazırlanmıştır.

Çizelge 3.1. *Ceratophyllum demersum* bitkisine uygulanan metal konsantrasyonları (mg/L) (n=2)

Cd	Cr	Ni	Zn	Konya Kentsel Atıksu Cd-Cr-Ni-Zn
0 (kontrol)	0 (kontrol)	0 (kontrol)	0 (kontrol)	0 (kontrol)
0.5	3	1	3	0.25
1	6	2	5	0.5
2	9	4	7	1
4	12	6	9	
	15			

Gerçek atıksu numuneleri ise Konya Kentsel Atıksu Arıtma tesisi çıkış suyundan alınmış tüm konsantrasyonlar için iki tekrar ve kontrol amaçlı içerisinde sadece tesis çıkış suyu ve bitki bulunan numuneler hazırlanmıştır.

Deiyonize su içerişine Cd, Cr, Ni ve Zn'un tuzları kullanılarak hazırlanan numuneler 1, 3 ve 5 gün, gerçek atıksu ile hazırlanan numuneler ise 1 ve 3 gün süre ile bekletilmiş, bu süre sonunda bitki bünyesine alınan ve suda kalan ağır metal miktarı ön işlemlerden sonra AAS cihazı ile üç tekrarlı şekilde okunarak tespit edilmiştir.

3.4.3. Bitki ve Atıksu Analizleri

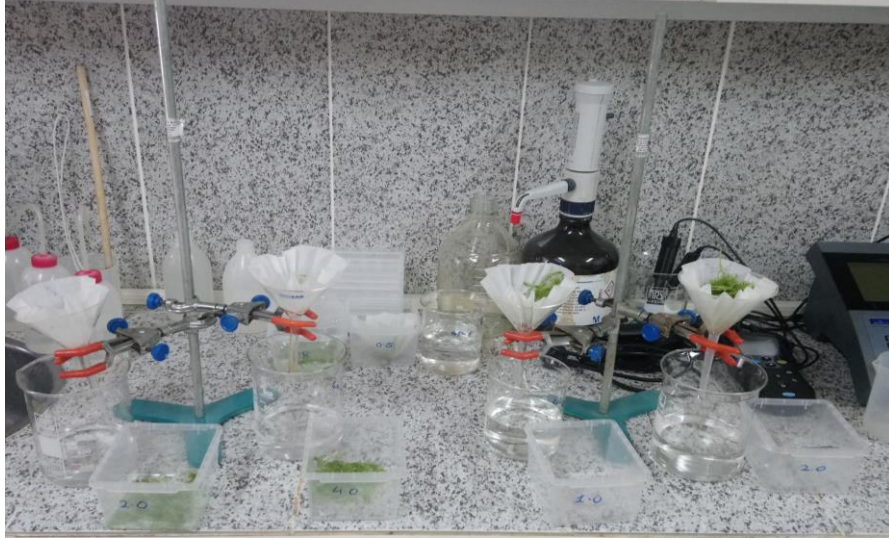
Cd, Cr, Ni ve Zn ağır metallerinin her biri için farklı konsantrasyonlarda iki tekrar ve kontrol amaçlı içerisinde ağır metal içermeyen sadece deiyonize su ve bitki bulunan numuneler hazırlanmıştır. İçerisinde belirli miktarda yaklaşık 7.0 pH'a sahip deiyonize su ve gerçek atıksu numunesi bulunan sterilize plastik kapların her birine belirlenen miktarda (7.5 g/L) bitki konulmuş ve ağır metal konsantrasyonu spike edilmiştir. Hazırlanan numuneler 1, 3 ve 5 gün süre ile bekletilecekleri ortam düzeneğine konulmuştur. Gerçek atıksu numunesi ile yapılan çalışmada Cd, Cr, Ni ve Zn metalleri birlikte spike yapılmıştır. Tüm numuneler iki tekrar ve kontrol amaçlı içerisinde sadece tesis çıkış suyu ve bitki bulunan numuneler hazırlanmıştır. Hazırlanan numuneler 1 ve 3 gün süre ile bekletilecekleri ortam düzeneğine konulmuştur.

Belirlenen günler sonunda hazırlanan ortam düzeneğinden alınan numuneler öncelikle ağırlıklarındaki değişimi belirlemek için hassas terazi ile tartılmıştır (Şekil 3.3).



Şekil 3.3. Bitki yaş ağırlık tartımı

Ardından plastik kaptaki kalan ağır metal içeren atıksular kaba filtre kağıdı yardımı ile süzölmüştür (Şekil 3.4).



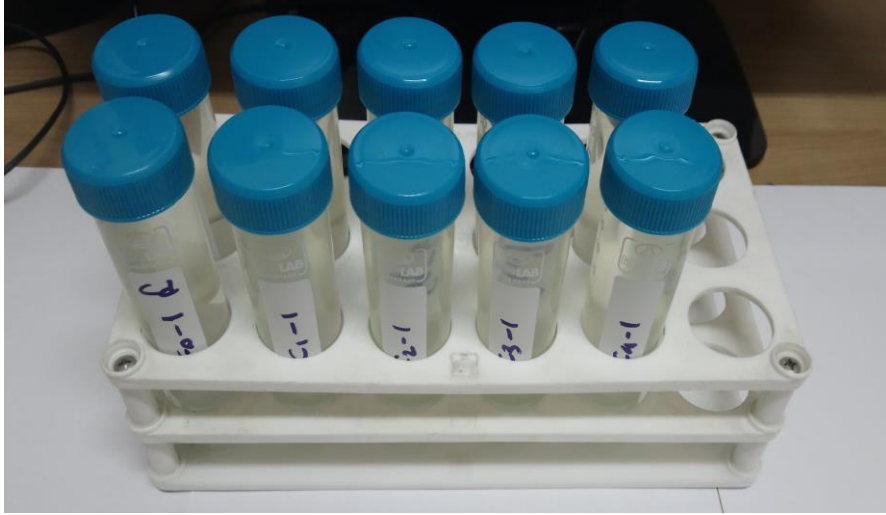
Şekil 3.4. Filtre kağıdı ile bitki süzme işlemi

Süzme işlemi tamamlandıktan sonra tartımı yapılan bitkiler kaba filtre kağıtlarına konularak 70 °C’de ki etüvde 4 gün boyunca bekletilmiştir (Şekil 3.5).



Şekil 3.5. Bitkilerin etüve yerleştirilmesi

Bitkiler etüve yerleştirildikten sonra, farklı ağır metal konsantrasyonuna sahip atıksuların mevcut pH’ ları ölçülüp ardından %65’lik HNO₃ (Merck) ile pH’ları 2.0’ye ayarlanarak 50 mL’lik sterilize plastik falkon tüplere aktarılmıştır (Şekil 3.6).

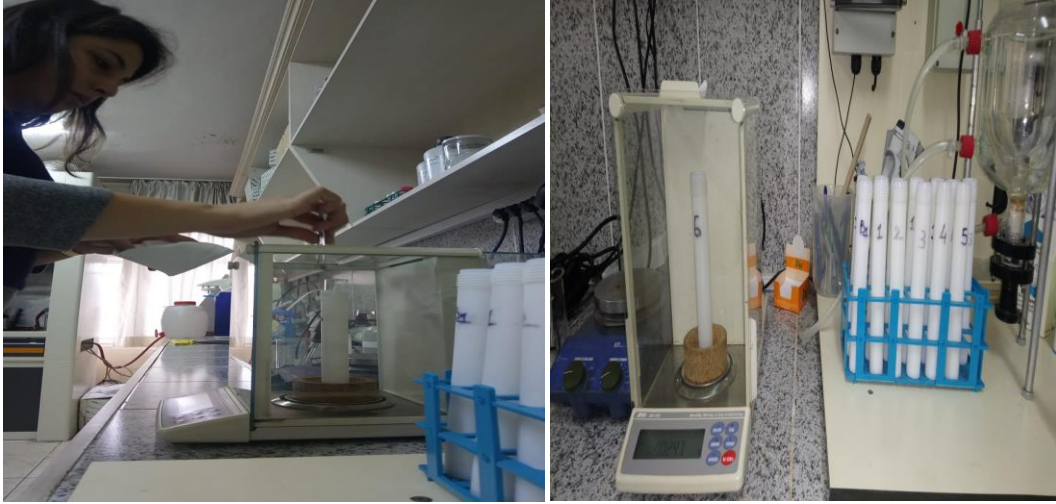


Şekil 3.6. pH'ı 2.0'ye ayarlanmış farklı Cd konsantrasyona sahip 50 mL'lik su numuneleri

4 gün boyunca etüvde tutulan bitkiler bu süre sonunda etüvden çıkartılmış (Şekil 3.7) ve kuru ağırlıkları hassas terazi ile belirlenmiştir.



Şekil 3.7. 4 gün sonunda etüvden çıkartılan bitkiler



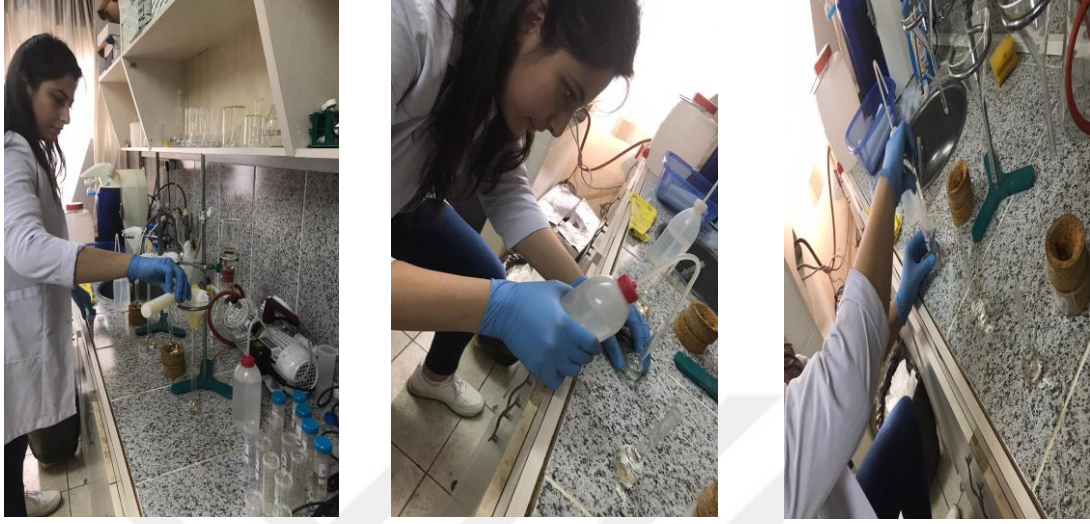
Şekil 3.8. Bitki kuru ağırlık tartımı ve mikrodalga fırın tüpüne yerleştirilmesi

Tartımı tamamlanan bitkiler çözünme işlemi için mikrodalga fırın tüplerine konulmuş (Şekil 3.8) ve üzerlerine 10 mL % 65 HNO₃ eklenerek mikrodalga fırın (CEM, MarsXpress) içerisine yerleştirilmiştir (Şekil 3.9). Kontrol amaçlı bir tüp içerisine de sadece 10 mL HNO₃ eklenmiş ve diğer numuneler ile mikrodalga fırın içerisine yerleştirilmiştir. Mikrodalga fırını 1600 W (ramp 15 dk) 180°C ve bekleme süresi 15 dk olarak ayarlanmıştır.



Şekil 3.9. Mikrodalga fırını

Çözme işleminin ardından mikrodalga fırından çıkartılan numuneler filtre kağıdı kullanılarak süzölmüş ardından deiyonize su ile 25 mL'ye tamamlanarak sterilize falkon tüplerine konulmuştur (Şekil 3.10).



Şekil 3.10. Mikrodalga fırından alınan numunelerin süzme işlemi

Bitki ve içerisinde 1, 3 ve 5 gün boyunca bulunduğu su numuneleri içerisindeki ağır metal miktarının tayini için alevli, grafit ve hidrür sistem ile donatılmış AAS cihazı kullanılmıştır (Şekil 3.11). Kalibrasyon standart hazır çözeltiler kullanılarak yapılmıştır. AAS cihazında numuneler düşük konsantrasyondan yüksek konsantrasyona doğru okunmuş ve cihaz her numuneyi 3 tekrarlı okuyarak ortalama değer verecek şekilde ayarlanmıştır. Cihazın stabilitesini değerlendirmek için her 10 örnekte bir standart okuması yapılmıştır.



Şekil 3.11. Atomik Absorpsiyon Spektrofotometresi (AAS)

3.4.4. Ağır Metal Giderim Verimlerinin Hesaplanması

Ağır metal giderim verimi Eşitlik (3.1) de verildiği gibi başlangıç ağır metal konsantrasyonundan giderim sonucu elde edilen çıkış ağır metal konsantrasyonunun çıkartılıp, başlangıç konsantrasyonuna bölünmesi ile hesaplanmıştır.

$$\% \text{ Giderim verimi} = ((C_0 - C_e) / C_0) \times 100 \quad \text{Eşitlik (3.1)}$$

Burada:

C_0 : Başlangıç ağır metal konsantrasyonu (mg/L)

C_e : Çıkış ağır metal konsantrasyonu (mg/L)

3.4.5. Biyokonsantrasyon Faktörünün (BKF) Hesaplanması

Biyokonsantrasyon faktörü (BKF) Eşitlik (3.2) de verildiği gibi fitoremediasyon çalışmalarında kullanılan bitkilerdeki ağır metal derişiminin, uygulanan ağır metal derişimlerine bölünmesiyle hesaplanmıştır (Chorom ve ark., 2012).

$$\text{BKF} = \frac{\text{Fitoremediasyon sonrası bitkilerdeki ağır metal konsantrasyonu (mg/kg)}}{\text{Başlangıçta su ortamına eklenen metal konsantrasyonu (mg/L)}} \quad \text{Eşitlik (3.2)}$$

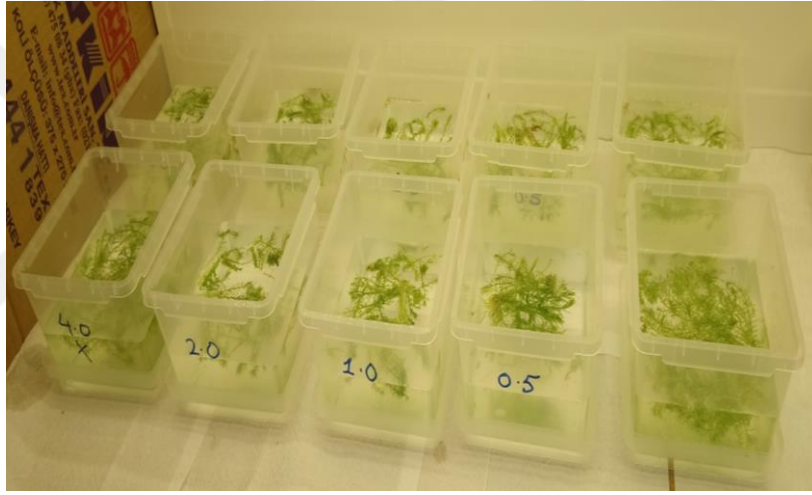
3.4.6. İstatistiksel Analiz Metodu

Elde edilen verilerin anlamlılık seviyesi Duncan testi kullanılarak tespit edilmiştir. Duncan'ın Çoklu Aralık Testi (DMRT) $p = 0.01$ anlamlılık düzeyinde uygulanmıştır (Asim ve ark., 2019).

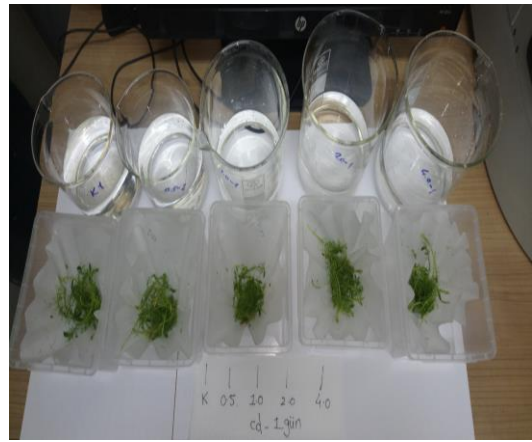
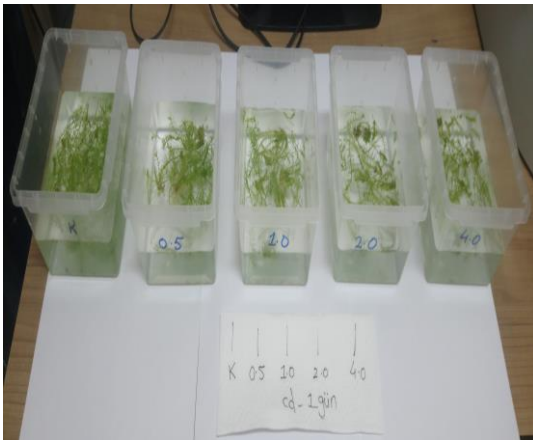
4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

4.1. Cd Fitoremediasyon Çalışması

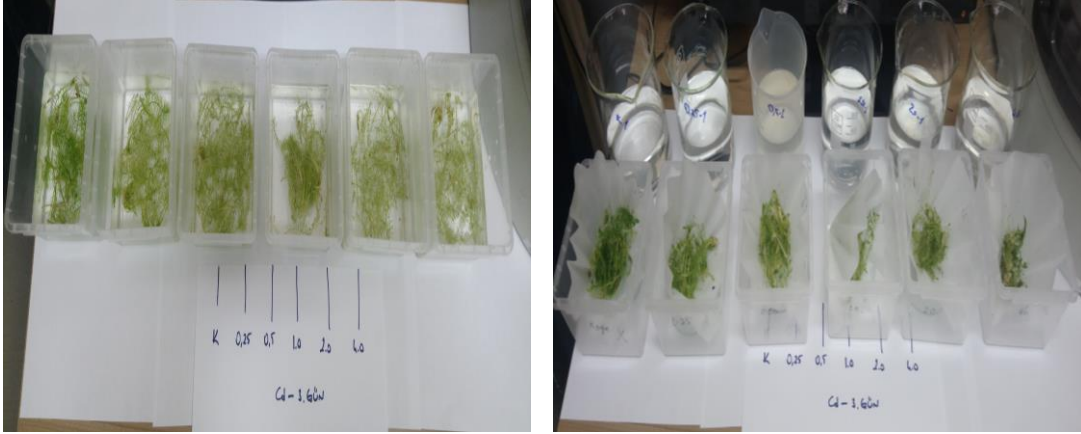
Fitoremediasyon potansiyelini araştırmak amacıyla Cd 0, 0.5, 1, 2 ve 4 mg/L konsantrasyon aralığında, 400 mL deiyonize su ortamında (7.5 g/L) bitki kullanılarak çalışılmıştır. 1., 3. ve 5. günler içerisinde bitkilerde meydana gelen görsel değişimlerde; 1. günde bitkilerin renkleri arasında pek fark gözlemlenmezken, 3. ve özellikle 5. gün sonunda Cd konsantrasyonu arttıkça bitki renklerinin solmaya başladığı, 0 (sıfır) Cd konsantrasyonu içeren kontrol numunesinde ki bitkilerin ise üç farklı günde de renginin değişmediği gözlemlenmiştir. Üç farklı günde de suyun renginde herhangi bir değişim tespit edilmemiştir (Şekil 4.1, Şekil 4.2, Şekil 4.3, Şekil 4.4).



Şekil 4.1. Cd çalışması için hazırlanan numunelerin 0. gün görünümü



Şekil 4.2. 1. gün sonunda Cd ile muamele edilmiş bitkilerin görünümü



Şekil 4.3. 3. gün sonunda Cd ile muamele edilmiş bitkilerin görünümü



Şekil 4.4. 5. gün sonunda Cd ile muamele edilmiş bitkilerin görünümü

4.1.1. Maruz Kalma Süresi Etkisi

Fitoremediasyon çalışması için kültürlenmiş bitkilerin muamele süresinin etkileri incelendiğinde bitkinin yaş ağırlığı ve kuru ağırlığı, su ve bitki içinde Cd oranı ile BKF istatistiksel olarak önemli bulunmuştur (Çizelge 4.1).

Çizelge 4.1. Cd' a maruz kalma süresinin (gün) fitoremediasyon üzerindeki etkisi

Gün	pH	Yaş ağırlık (g)	Kuru ağırlık (g)	Suda kalan Cd (mg/L)	Bitki bünyesine alınan Cd (mg/kg)	BKF
1	6.29c	5.05a	0.136a	0.080a	1422.15c	703.79c
3	6.45b	4.97ab	0.115b	0.026b	4851.21a	2467.45b
5	6.80a	4.67ab	0.116b	0.026b	4525.73b	2591.48a

*Aynı sütunda farklı harflerle gösterilen ortalamalar arasında fark $p < 0.01$ düzeyinde önemlidir.

Maruz kalma süresi arttıkça; bitkinin yaş ağırlığının azaldığı, pH değerinin ise arttığı gözlemlenmiştir. Bitkinin en yüksek (5.05 g) yaş ağırlığa 1.gün, en düşük (4.67 g) yaş ağırlığa ise 5. gün sahip olduğu belirlenmiştir (Çizelge 4.1).

Maruz kalma süresinin artması ile birlikte suda ki Cd miktarı giderek azalırken bitki bünyesinde ki Cd miktarı ise artmaktadır. Suda kalan Cd oranı 1 gün sonra 0.08 mg/L iken 3 gün sonra 0.026 mg/L olarak tespit edilmiştir. 3. ve 5. gün sonra her hangi değişikliği kaydedilmemiştir. Buna karşı, bitki içinde en fazla Cd birikimi 3 gün sonra kaydedilirken, 1422.1- 4851.20 arasında değişmiştir (Çizelge 4.1).

4.1.2. Konsantrasyon Etkisi

Cd konsantrasyonun fitoremediasyon üzerindeki etkisi incelendiğinde pH, yaş ağırlığı ve kuru ağırlığı orandaki artışı ile azalma gözlemlenmiştir. pH, yaş ağırlığı ve kuru ağırlığı kontrol grubuna karşılaştırıldığında daha düşük sonuçlar elde edilmiştir. Buna karşı, su ve bitki içindeki Cd oranı ise Cd oranının artışı ile iki kat artışı göstermiştir (Çizelge 4.2).

Çizelge 4.2. Cd konsantrasyonun fitoremediasyon üzerindeki etkisi

Cd (mg/L)	pH	Yaş ağırlık (g)	Kuru ağırlık (g)	Suda kalan Cd (mg/L)	Bitki bünyesine alınan Cd (mg/kg)	BKF
0	6.39b	5.35a	0.140a	0d	0e	0c
0.5	6.36b	5.05a	0.126b	0.012c	1196.65d	2393.28b
1	6.57a	4.85ab	0.121b	0.023c	2294.50c	2294.50b
2	6.67a	4.44b	0.115c	0.045b	5159.65b	2579.82a
4	6.58a	4.81ab	0.110c	0.139a	9347.68a	2336.93b

*Aynı sütunda farklı harflerle gösterilen ortalamalar arasında fark $p < 0.01$ düzeyinde önemlidir.

4.1.3. Süre × Konsantrasyon Etkisi

Maruz kalma süresi x Cd konsantrasyonu incelendiğine pH, yaş ağırlığı ve kuru ağırlığı istatistiksel olarak önemli bulunmuştur. En yüksek pH 2 mg/L'lik konsantrasyon için 5. günde elde edilirken, en düşük pH kontrol grubunda 1. gün kaydedilmiştir. Yaş ve kuru ağırlık ise Cd içeren ortamlarda kontrol grubuna göre genel olarak daha az bulunmuştur. Kontrol grubunda hem bitki hem de su içinde Cd tespit edilmemiştir. Bitkiler 5. güne kadar beklettiğinde su içinde Cd oranında herhangi bir fark gözlemlenmemiştir (Çizelge 4.3).

Çizelge 4.3. Süre x Cd konsantrasyonunun fitoremediasyon üzerindeki etkisi

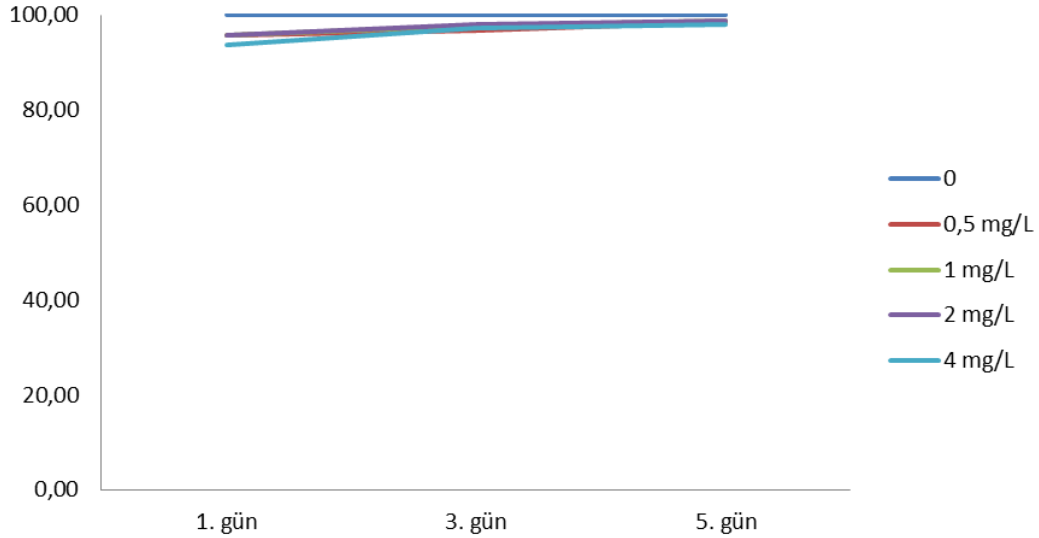
Cd (mg/L)	pH			Yaş Ağırlık (g)			Kuru Ağırlık (g)		
	1g	3g	5g	1g	3g	5g	1g	3g	5g
0	6.16f	6.37def	6.63bcd	3.67f	6.27a	6.11ab	0.129b	0.141a	0.150a
0.5	6.22ef	6.26def	6.62bcd	5.27abc	5.66ab	4.20def	0.144a	0.128b	0.106d
1	6.28def	6.48cdef	6.94ab	5.30abc	5.14bcd	4.10def	0.140a	0.122bc	0.102de
2	6.43cdef	6.52cde	7.06a	5.04bcde	3.74f	4.55cdef	0.144a	0.089f	0.111cd
4	6.37def	6.62bcd	6.73bc	5.98ab	4.06ef	4.39cdef	0.125b	0.095ef	0.111cd

Cd (mg/L)	Suda kalan Cd (mg/L)			Bitki bünyesine alınan Cd (mg/kg)			BKF		
	1g	3g	5g	1g	3g	5g	1g	3g	5g
0	0d	0d	0d	0j	0j	0j	0g	0g	0g
0.5	0.022cd	0.007d	0.007d	424.40ij	1358.45h	1807.10h	848.75f	2716.95d	3614.15ab
1	0.042c	0.013cd	0.013cd	725.95i	2676.70g	3480.85f	725.95f	2676.70d	3480.85b
2	0.086b	0.025cd	0.025cd	1816.50h	7553.55c	6108.90d	908.250f	3776.75a	3054.45c
4	0.248a	0.085b	0.085b	4143.90e	12667.35a	11231.80b	1036.00e	3166.85c	2807.95d

*Aynı sütunda farklı harflerle gösterilen ortalamalar arasında fark $p < 0.01$ düzeyinde önemlidir.

4.1.4. Giderim Verimi

Cd ile yapılan fitoremediasyon çalışmasında; 1. gün en yüksek giderim verimi 1 mg/L konsantrasyonda, 3. ve 5. gün en yüksek giderim verimi ise 2 mg/L konsantrasyonda tespit edilmiştir. Bitkinin Cd içeren suda bekleme günü arttıkça giderim veriminin de arttığı gözlemlenmiştir. Genel olarak bakıldığında % 95 oranında bir giderim elde edilmiştir (Şekil 4.5).



Şekil 4.5. Cd giderim verimi (%)

4.1.5. Biyokonsantrasyon Faktörü (BKF)

Maruz kalma süresinin BKF üzerine etkisi incelendiğinde; BKF zaman ile artış gösterirken, en fazla 5. gün sonunda 2591.48 olarak kaydedilmiştir (Çizelge 4.1). Al-Ubaidy ve arkadaşlarının 2015 yılında Cd ile yaptığı çalışmada da benzer BKF sonuçları elde ettiği gözlemlenmiştir (Al-Ubadiy ve ark., 2015).

Konsantrasyon etkisi; BKF kontrol grubu için 0, diğer konsantrasyonlar için ise 2294.50 ile 2579.82 arasında kaydedilmiş, konsantrasyon miktarı ile belirsiz etkiler göstermiştir. En fazla BKF ise 2 mg/L Cd içeren su ortamında kaydedilmiştir (Çizelge 4.2).

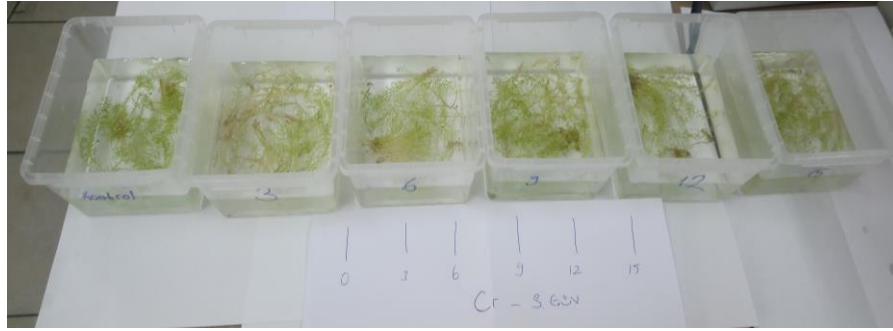
Son olarak süre \times konsantrasyon etkisine bakıldığında; bitki içindeki Cd oranı ve BKF zaman ve oranında artışı ile etkilenirken karşılıklı olarak artış göstermiştir. En fazla BKF ise 2 mg/L' lik konsantrasyon için 3 gün kaydedilmiştir (Çizelge 4.3).

4.2. Cr Fitoremediasyon Çalışması

Fitoremediasyon potansiyelini araştırmak amacıyla Cr için 0, 3, 6, 9, 12 ve 15 mg/L konsantrasyon aralığında, 400 ml deiyonize su ortamında (7.5 g/L) bitki kullanılarak çalışılmıştır. Bitki ve suda üç farklı gün içerisinde meydana gelen görsel değişimler kıyaslandığında çok belirgin bir renk değişiminin olmadığı gözlemlenmiştir (Şekil 4.6, Şekil 4.7, Şekil 4.8).



Şekil 4.6. 1. gün sonunda Cr ile muamele edilmiş bitkilerin görünümü



Şekil 4.7. 3. gün sonunda Cr ile muamele edilmiş bitkilerin görünümü



Şekil 4.8. 5. gün sonunda Cr ile muamele edilmiş bitkilerin görünümü

4.2.1. Maruz Kalma Süresi Etkisi

Tüm parametrelerde maruz kalma süresine bağlı olarak artış gözlemlenmiştir. En yüksek yaş ağırlık (5.14 g) ve kuru ağırlık (0.092 g) 5.günde kaydedilmiştir. Maruz kalma süresi arttıkça bitki tarafından akümüle edilen Cr miktarında da artış görülmüştür. Bitki bünyesine alınan en yüksek Cr miktarı 6509.67 mg/kg olarak tespit edilmiştir (Çizelge 4.4).

Çizelge 4.4. Cr' a maruz kalma süresinin (gün) fitoremediasyon üzerindeki etkisi

Gün	pH	Yaş ağırlık (g)	Kuru ağırlık (g)	Suda kalan Cr (mg/L)	Bitki bünyesine alınan Cr (mg/kg)	BKF
1g	5.88b	2.99c	0.057b	1.091c	2586.92c	406.58c
3g	5.84b	4.91b	0.090a	4.316b	4916.08b	724.58b
5g	6.12a	5.14a	0.092a	5.086a	6509.67a	927.50a

*Aynı sütunda farklı harflerle gösterilen ortalamalar arasında fark $p < 0.01$ düzeyinde önemlidir.

4.2.2. Konsantrasyon Etkisi

Cr konsantrasyonu arttıkça pH' ın azaldığı, bitki bünyesine alınan Cr miktarının 3-9 mg/L ve 12-15 mg/L konsantrasyonlar arasında fark göstermediği tespit edilmiştir (Çizelge 4.5).

Çizelge 4.5. Cr konsantrasyonunun fitoremediasyon üzerindeki etkisi

Cr (mg/L)	pH	Yaş ağırlık (g)	Kuru ağırlık (g)	Suda kalan Cr (mg/L)	Bitki bünyesine alınan Cr (mg/kg)	BKF
0	6.73a	4.18bc	0.076c	0f	0c	0e
3	6.44b	4.06c	0.077c	0.475e	5039.67b	1679.83a
6	6.07c	4.35abc	0.081ab	1.870d	5667.67b	944.83b
9	5.62d	4.64a	0.084a	4.043c	5145.33b	571.50c
12	5.48e	4.45ab	0.080bc	5.774b	6569.83a	547.50c
15	5.34f	4.39abc	0.081ab	8.825a	5602.83a	373.67d

*Aynı sütunda farklı harflerle gösterilen ortalamalar arasında fark $p < 0.01$ düzeyinde önemlidir.

4.2.3. Süre × Konsantrasyon Etkisi

Süre × Cr konsantrasyonunun fitoremediasyon etkisi incelendiğinde; 1. gün yaş ağırlıklara bakıldığında konsantrasyonlar arasında herhangi bir fark gözlemlenmemiştir. 3 ve 5 gün ise 4.398-5.557 g ve 4.593-5.762 g arasında değişken, en yüksek yaş ağırlık (5.762 g) ve en yüksek kuru ağırlıkta (0.0104 g) 5. gün 15 mg/L' lik Cr konsantrasyonu ile elde edilmiştir. Genel olarak, bitkinin yaş ve kuru ağırlığı kontrol grubundan daha yüksek bulunmuştur. Bitki içinde Cr birikimi ise 1, 3 ve 5 gün sonra 2766-3393 mg/kg, 5103-7536 mg/kg, ve 6229-9145 mg/kg arasında değişmiştir. Bitki içinde en yüksek Cr alımı (9145 mg/kg) 12 mg/L' lik konsantrasyon için 5. günde ortaya çıkmıştır (Çizelge 4.6).

Çizelge 4.6. Süre × Cr konsantrasyonunun fitoremediasyon üzerindeki etkisi

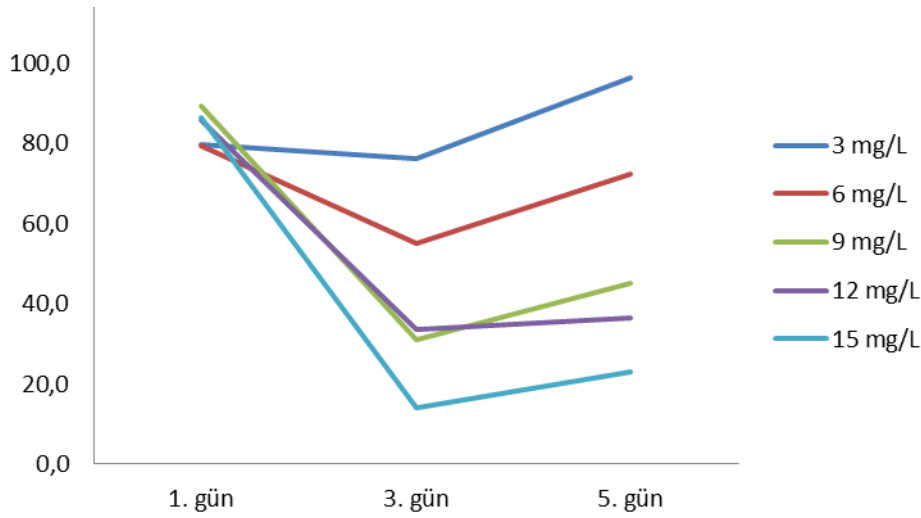
Cr (mg/L)	pH			Yaş Ağırlık (g)			Kuru Ağırlık (g)		
	1g	3g	5g	1g	3g	5g	1g	3g	5g
0	6.85b	6.17d	7.17a	2.848f	4.574de	5.134bcd	0.052g	0.094bc	0.082e
3	6.52c	5.97e	6.84b	2.827f	4.765cde	4.593de	0.055fg	0.088cde	0.087cde
6	6.17d	5.82e	6.23d	3.376f	4.813cde	4.862cde	0.060f	0.094bc	0.089cde
9	5.41g	5.91e	5.55f	3.021f	5.557ab	5.343abc	0.059f	0.093bc	0.099ab
12	5.30h	5.64f	5.50f	2.899f	5.328abc	5.120bcd	0.060f	0.089cde	0.090cd
15	5.03i	5.55g	5.43g	3.001f	4.398e	5.762a	0.057fg	0.082de	0.0104a

Cr (mg/L)	Suda kalan Cr (mg/L)			Bitki bünyesine alınan Cr (mg/kg)			BKF		
	1g	3g	5g	1g	3g	5g	1g	3g	5g
0	0k	0k	0k	0f	0f	0f	0i	0i	0i
3	0.606j	0.713ij	0.106jk	3302e	5588d	6229cd	1100.50c	1862.50a	2076.50a
6	1.246hi	2.703f	1.663gh	3393e	5382d	8227ab	565.50efg	897.50cd	1371.50b
9	0.962ij	6.222d	4.945e	3033e	5103d	7301bc	336.50gh	567.00efg	811.00de
12	1.721gh	7.988c	7.614c	3029e	7536b	9145a	252.50hi	628.00ef	762.00de
15	2.015g	12.890a	11.570b	2766e	5887d	8156ab	184.50hi	392.50fgh	544.00efg

*Aynı sütunda farklı harflerle gösterilen ortalamalar arasında fark $p < 0.01$ düzeyinde önemlidir.

4.2.4. Giderim Verimi

Cr ile yapılan fitoremediasyon çalışmasında; en düşük konsantrasyon olarak belirlenen 3 mg/L için en iyi giderim verimi 5. günde, diğer konsantrasyonlar için ise en iyi giderim verimi 1. günde elde edilmiştir. Genel olarak bakıldığında ise; 1. gün %80 ve üzerinde giderim verimi elde edilirken, 3. gün giderim verimi düşüşe geçerek Cr için en düşük giderim verimini vermiştir. 5. gün giderimi verimi tekrar artmış olsa da genel olarak % 55'lik bir giderim verimi elde edilmiştir (Şekil 4.9).



Şekil 4.9. Cr giderim verimi (%)

4.2.5. Biyokonsantrasyon Faktörü (BKF)

Maruz kalma süresinin fitoremediasyon üzerindeki etkisini gösteren Çizelge 4.4. incelendiğinde; gün ilerledikçe BKF' nün artış gösterdiği, 5.gün elde edilen 927.50 BKF ile en yüksek sonuç elde edilmiştir (Çizelge 4.4).

Konsantrasyonlar için bakıldığında; en yüksek BKF, 3 mg/L Cr konsantrasyonu ile 1679.83 olarak kaydedilmiştir (Çizelge 4.5).

Süre × konsantrasyon etkisi ise; Cr konsantrasyonunun artışı ile BKF' nde azalmaya en düşük BKF 15 mg/L Cr içeren ortamında 1, 3 ve 5 gün muamele süresi ile ortaya çıktığı tespit edilmiştir (Çizelge 4.6).

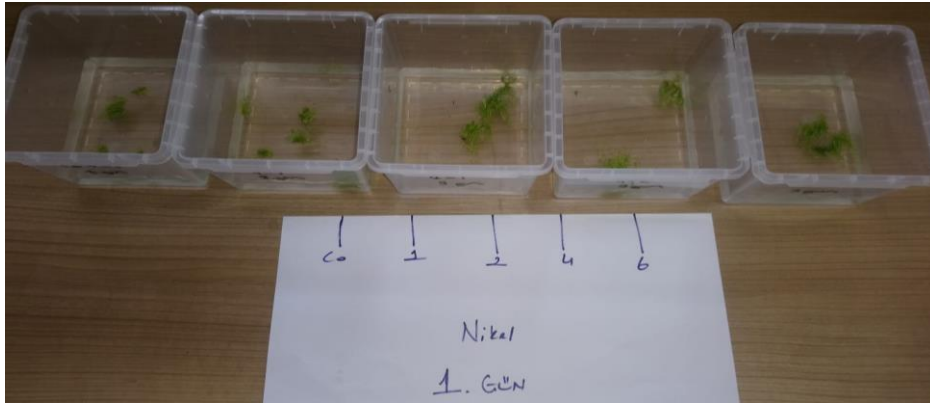
4.3. Ni Fitoremediasyon Çalışması

Fitoremediasyon potansiyeli araştırmak amacıyla Ni için 0, 1, 2, 4 ve 6 mg/L konsantrasyon aralığında, 200 ml su ortamında (7.5 g/L) bitki kullanılarak çalışılmıştır. Bitkilerde 1., 3. ve 5. günler içerisinde meydana gelen görsel değişimler

kıyaslandığında; 1.günde bitkilerin konsantrasyon farkına ve ilk güne kıyasla renklerinde bir değişim olmadığı, 3.gün ise bitkilerin renginde pek bir değişim görünmezken suların hafif bulanmaya başladığı tespit edilmiştir. 5.günde ise bitkilerin iyice cansızlaştığı ve içerisinde bekletildikleri suyun 3. güne kıyasla daha da bulanıklaştığı tespit edilmiştir. Her üç gün için bakıldığında yine kontrol numunesindeki bitkilerin ilk gün ki gibi kaldığı, renk ve suyunda herhangi bir değişim olmadığı gözlemlenmiştir. (Şekil 4.10, Şekil 4.11, Şekil 4.12, Şekil 4.13).



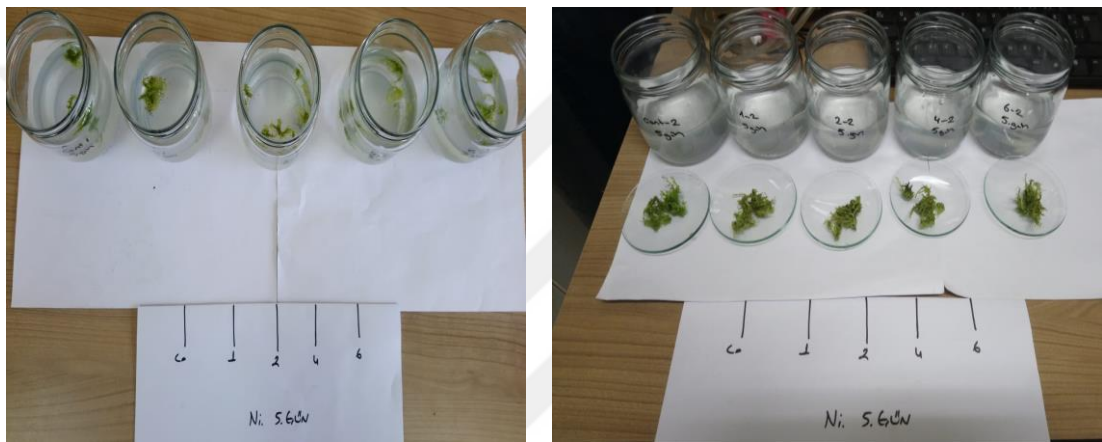
Şekil 4.10. Ni çalışması için hazırlanan numunelerin 0. gün görünümü



Şekil 4.11. 1. gün sonunda Ni ile muamele edilmiş bitkilerin görünümü



Şekil 4.12. 3. gün sonunda Ni ile muamele edilmiş bitkilerin görünümü



Şekil 4.13. 5. gün sonunda Ni ile muamele edilmiş bitkilerin görünümü

4.3.1. Maruz Kalma Süresi Etkisi

Maruz kalma süresi arttıkça; bitkinin yaş ağırlığının arttığı, en yüksek yaş ağırlığa 5. gün, en düşük yaş ağırlığa ise 1. gün sahip olduğu belirlenmiştir (Çizelge 4.7). Bitki bünyesine alınan yani bitki tarafından akümüle edilen Ni miktarı maruz kalma süresi ile doğru orantılı şekilde artmıştır (Çizelge 4.7).

Çizelge 4.7. Ni' e maruz kalma süresinin (gün) fitoremediasyon üzerindeki etkisi

Gün	pH	Yaş ağırlık (g)	Kuru ağırlık (g)	Suda kalan Ni (mg/L)	Bitki bünyesine alınan Ni (mg/kg)	BKF
1	6.58b	2.301b	0.051a	0.447b	1103.81c	576.075b
3	6.35c	2.507a	0.051a	0.861a	3621.50b	1842.16a
5	6.86a	2.512a	0.050a	0.851a	4574.55a	2410.33a

*Aynı sütunda farklı harflerle gösterilen ortalamalar arasında fark $p < 0.01$ düzeyinde önemlidir.

4.3.2. Konsantrasyon Etkisi

Kontrol hariç diğer konsantrasyonlar için yaş ağırlıkları arasında herhangi bir fark görünmemiştir. Ni konsantrasyonu ile yaş ağırlık arasında istatistiksel bir önem bulunmamıştır (Çizelge 4.8).

Çizelge 4.8. Ni konsantrasyonun fitoremediasyon üzerindeki etkisi

Ni (mg/L)	pH	Yaş ağırlık (g)	Kuru ağırlık (g)	Suda kalan Ni (mg/L)	Bitki bünyesine alınan Ni (mg/kg)	BKF
0	6.72a	2.685a	0.049ab	0c	0e	0b
1	6.52b	2.304b	0.048b	0.048c	1622.72d	833.76b
2	6.43b	2.452b	0.054a	0.136c	2505.73c	1279.38b
4	6.53b	2.356b	0.050b	0.840b	5405.47b	2824.01a
6	6.77a	2.403b	0.052b	2.554a	5919.85a	3110.46a

*Aynı sütunda farklı harflerle gösterilen ortalamalar arasında fark $p < 0.01$ düzeyinde önemlidir.

Fitoremediasyondan sonra bitki tarafından akümüle edilen Ni miktarı ortamdaki Ni oranının artışı ile artış göstermiştir, BKF değerinde ise ise; 0 mg/L, 1 mg/L ve 2 mg/L konsantrasyonlarının aynı BKF aralığında olduğunu, konsantrasyonun artması ile BKF' nün değişmediği, aynı şekilde farklı bir aralıkta da 4 mg/L ve 6 mg/L konsantrasyonların olduğu belirlenmiştir (Çizelge 4.8).

4.3.3. Süre × Konsantrasyon Etkisi

Süre × Ni konsantrasyonu, yaş ağırlık üzerinde belirsiz etkilere sebep olduğu, yaş ağırlığın 1.986 g – 2.755 g arasında değişkenlik gösterdiği tespit edilmiştir. Bitki ağırlığı kontrol grubundan daha yüksek bulunmuştur. Bitki, aynı konsantrasyona sahip numunelerden gün ilerledikçe daha fazla Ni akümüle etmiştir. En yüksek akümülasyon (8616.25 mg/kg) 5.gün 6 mg/L konsantrasyonda elde edilmiştir (Çizelge 4.9).

Çizelge 4.9. Süre × Ni konsantrasyonunun fitoremediasyon üzerindeki etkisi

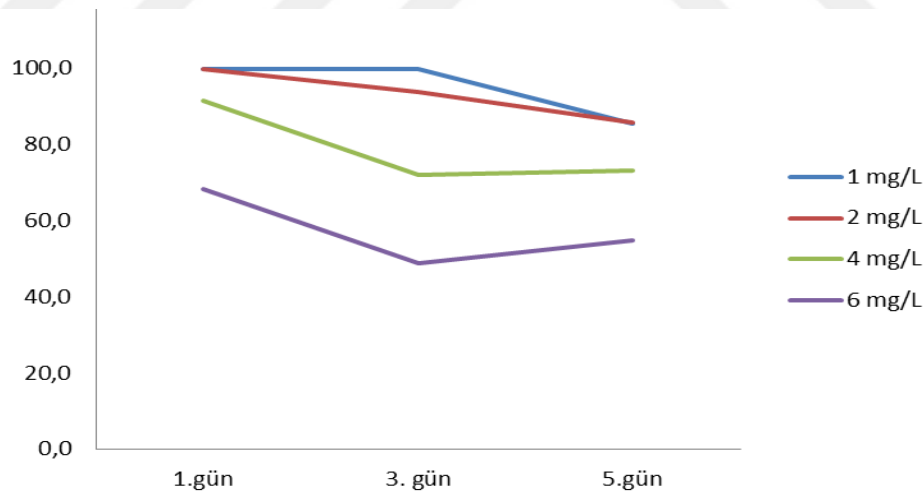
Ni (mg/L)	pH			Yaş Ağırlık (g)			Kuru Ağırlık (g)		
	1g	3g	5g	1g	3g	5g	1g	3g	5g
0	6.62cd	6.56d	7.00a	2.755a	2.725a	2.576abc	0.050abc	0.047bc	0.049bc
1	6.56d	6.33ef	6.68bcd	2.239bcd	2.310abcd	2.362abcd	0.048bc	0.049abc	0.048bc
2	6.51de	5.93g	6.86ab	2.361abcd	2.571abc	2.423abcd	0.057a	0.051abc	0.053abc
4	6.53de	6.29f	6.79abc	1.986d	2.395abcd	2.686ab	0.045c	0.053ab	0.051abc
6	6.70bcd	6.64cd	6.97a	2.164cd	2.533abc	2.512abc	0.053abc	0.054ab	0.050abc

Ni (mg/L)	Suda kalan Ni (mg/L)			Bitki bünyesine alınan Ni (mg/kg)			BKF		
	1g	3g	5g	1g	3g	5g	1g	3g	5g
0	0f	0f	0.066ef	0h	0h	0h	0d	0d	0d
1	0f	0f	0.146ef	681.75g	1840.60f	2345.80f	352.15d	935.10d	1214.03cd
2	0f	0.125ef	0.283ef	1029.00g	2581.75e	3906.45d	543.55d	1267.95cd	2026.63bcd
4	0.338e	1.117d	1.064d	1741.85f	6544.75c	7929.80c	870.25d	3336.08abc	4265.70ab
6	1.898b	3.066a	2.698b	2066.45f	7076.85c	8616.25a	1114.43cd	3671.68ab	4545.28a

*Aynı sütunda farklı harflerle gösterilen ortalamalar arasında fark $p < 0.01$ düzeyinde önemlidir.

4.3.4. Giderim Verimi

Ni ile yapılan çalışmada; 1. ve 3. gün en düşük konsantrasyon olan 1 mg/L için ve 1. gün 2 mg/L %100 giderim elde edilmiştir. 4 mg/L ve 6 mg/L konsantrasyonları içinde en iyi giderim 1. günde elde edilmiştir. Genel olarak bakıldığında ise % 65 üzerinde bir giderimin olduğu görülmektedir (Şekil 4.14).



Şekil 4.14. Ni giderim verimi (%)

4.3.5. Biyokonsantrasyon Faktörünü (BKF)

Biyokonsantrasyon faktörü maruz kalma süresi ve konsantrasyon artışı ile doğru orantılı artış göstermiştir. BKF değeri en yüksek değere istatistik olarak 3. ve 5. günde ulaşmışken, konsantrasyonda ise 4 mg/L ve 6 mg/L lik değerlerde en yüksek değere ulaştığı tespit edilmiştir (Çizelge 4.7, Çizelge 4.8).

BKF' ne süre x Ni konsantrasyonunun etkisi incelendiğinde ise; en yüksek BKF (4545.275) 5. gün 6 mg/L Ni, en düşük BKF (352.150) ise 1. gün 1 mg/L' lik Ni konsantrasyonunda tespit edilmiştir (Çizelge 4.9).

4.4. Zn Fitoremediasyon Çalışması

Fitoremediasyon potansiyeli araştırmak amacıyla Zn için 0, 3, 5, 7 ve 9 mg/L konsantrasyon aralığında, 200 ml su ortamında (7.5 g/L) bitki kullanılarak çalışılmıştır. Bitkilerin renginin gün geçtikçe solmaya başladığı, suyun renginde ise herhangi bir değişim olmadığı gözlemlenmiştir. Daha önceki çalışmalarda olduğu gibi kontrol bitkisinde üç gün içinde bir değişim olmamıştır (Şekil 4.15, Şekil 4.16, Şekil 4.17, Şekil 4.18).



Şekil 4.15. Zn çalışması için hazırlanan numunelerin 0. gün görünümü



Şekil 4.16. 1. gün sonunda Zn ile muamele edilmiş bitkilerin görünümü



Şekil 4.17. 3. gün sonunda Zn ile muamele edilmiş bitkilerin görünümü



Şekil 4.18. 5. gün sonunda Zn ile muamele edilmiş bitkilerin görünümü

4.4.1. Maruz Kalma Süresi Etkisi

Maruz kalma süresi arttıkça kuru ağırlık ve suda kalan Zn miktarının azaldığı ve bitki bünyesine alınan Zn miktarının ise arttığı, yaş ağırlıkta ise günler arasında istatistiksel olarak önemli bir fark olmadığı tespit edilmiştir (Çizelge 4.10).

Çizelge 4.10. Zn'a maruz kalma süresinin (gün) fitoremediasyon üzerindeki etkisi

Gün	pH	Yaş ağırlık (g)	Kuru ağırlık (g)	Suda kalan Zn (mg/L)	Bitki bünyesine alınan Zn (mg/kg)	BKF
1	6.53a	2.510ös	0.053a	2.522a	2470.83c	444.04c
3	6.46b	2.452ös	0.052a	2.322b	4784.68b	848.88b
5	6.51ab	2.448ös	0.046b	1.319c	7590.55a	1328.75a

*Aynı sütunda farklı harflerle gösterilen ortalamalar arasında fark $p < 0.01$ düzeyinde önemlidir. ös: önemsiz

4.4.2. Konsantrasyon Etkisi

Zn konsantrasyonunun fitoremediasyon üzerindeki etkisi incelendiğinde; konsantrasyon miktarının artması ile bitki bünyesine alınan Zn miktarında artış gözlemlenmiştir. Yaş ağırlıkta ise düzenli bir artış yada azalış tespit edilememiştir. Bitkinin 3 mg/L' lik Zn konsantrasyonunun neredeyse tamamını akümüle ettiği, diğer konsantrasyonlarda ise yaklaşık %50 oranında ağır metalin bitki tarafından akümüle edildiği tespit edilmiştir (Çizelge 4.11).

Çizelge 4.11. Zn konsantrasyonunun fitoremediasyon üzerindeki etkisi

Zn (mg/L)	pH	Yaş ağırlık (g)	Kuru ağırlık (g)	Suda kalan Zn (mg/L)	Bitki bünyesine alınan Zn (mg/kg)	BKF
0	6.35b	2.711a	0.055a	0e	0e	0d
3	6.52a	2.533b	0.052ab	0.670d	3879.43d	1293.12a
5	6.56a	2.294c	0.047c	1.863c	6233.93c	1246.80a
7	6.55a	2.321c	0.049bc	3.141b	6878.47b	982.63b
9	6.52a	2.492b	0.050bc	4.598a	7622.03a	846.90c

*Aynı sütunda farklı harflerle gösterilen ortalamalar arasında fark $p < 0.01$ düzeyinde önemlidir.

4.4.3. Süre × Konsantrasyon Etkisi

Bitki bünyesine alınan Zn miktarı 2225.35 mg/kg – 11836.60 mg/kg arasında değişiklik göstererek, süre ve konsantrasyon arttıkça artış göstermiştir. Yaş ağırlıkta ise süre × konsantrasyon belirsiz etkiler göstermiştir (Çizelge 4.12).

Çizelge 4.12. Süre × Zn konsantrasyonunun fitoremediasyon üzerindeki etkisi

Zn (mg/L)	pH			Yaş Ağırlık (g)			Kuru Ağırlık (g)		
	1g	3g	5g	1g	3g	5g	1g	3g	5g
0	6.41c	6.23d	6.41c	2.729ab	2.609ab cd	2.794a	0.056abc	0.057ab	0.052abcde
1	6.53bc	6.78a	6.25d	2.378cde	2.674abc	2.546abcde	0.051bcde	0.056ab	0.049cdef
2	6.59b	6.57b	6.54b	2.366cde	2.303de	2.212e	0.050cdef	0.046efg	0.046efg
4	6.56b	6.49bc	6.61b	2.371cde	2.238d	2.355cde	0.053abcd	0.052abc de	0.042g
6	6.58b	6.26c	6.73a	2.706abcd	2.434bcde	2.335de	0.057a	0.049def	0.044fg

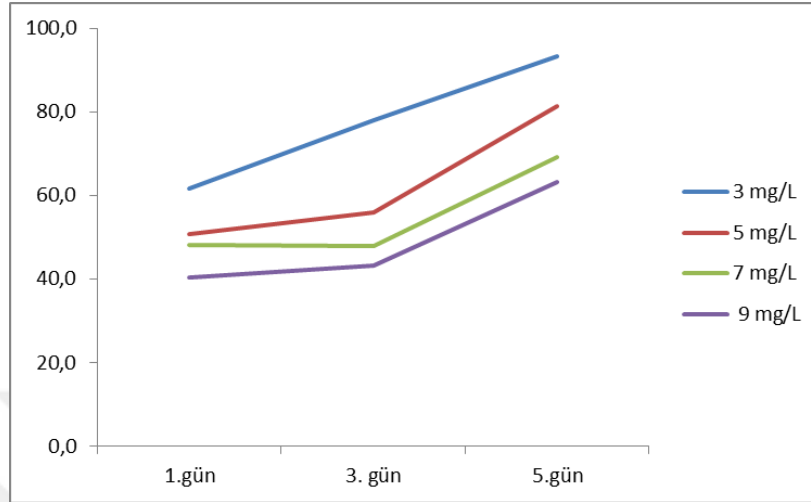
Zn (mg/L)	Suda kalan Zn (mg/L)			Bitki bünyesine alınan Zn (mg/kg)			BKF		
	1g	3g	5g	1g	3g	5g	1g	3g	5g
0	0f	0f	0f	0g	0g	0g	0g	0g	0g
1	1.148d	0.660e	0.201f	2225.35f	3683.65e	5729.30d	741.75de	1227.85c	1909.75a
2	2.464c	2.197c	0.929e	2856.70ef	6592.05cd	9253.05b	571.35ef	1318.45c	1850.60a
4	3.622b	3.651b	2.151c	3378.25e	6279.55cd	10977.60a	482.60f	897.10d	1568.20b
6	5.374a	5.102a	3.318b	3820.60e	7208.90c	11836.60a	424.50f	801.00d	1315.20c

*Aynı sütunda farklı harflerle gösterilen ortalamalar arasında fark $p < 0.01$ düzeyinde önemlidir.

4.4.4. Giderim Verimi

Zn için yapılan çalışmada; giderimin gün geçtikçe arttığı gözlemlenmiştir. Örneğin; en yüksek konsantrasyon olarak belirlenen 9 mg/L için 1. gün %40, 3. gün %

43, 5.gün ise en yüksek giderim sağlanarak % 65 lik bir verim elde edilmiştir. Genel olarak baktığımızda da tüm konsantrasyonlar için en iyi giderim verimi 5.günde elde edilmiştir (Şekil 4.19).



Şekil 4.19. Zn giderim verimi (%)

4.4.5. Biyokonsantrasyon Faktörünü (BKF)

Biyokonsantrasyon faktörü maruz kalma süresi ve konsantrasyon miktarı ile farklı değişiklikler göstermiştir. Maruz kalma süresi arttıkça BKF' nün arttığı, buna zıt olarak konsantrasyon miktarı arttıkça BKF' nün azaldığı tespit edilmiştir (Çizelge 4.10, Çizelge 4.11).

BKF'ne süre \times konsantrasyonun etkisi incelendiğinde; 1.gün 4 mg/L ve 6 mg/L' lik konsantrasyonlar arasında fark görülmezken daha düşük konsantrasyonlarda daha yüksek BKF elde edilmiştir. En düşük BKF (424.50) ile 1. gün 6 mg/L konsantrasyonda, en yüksek BKF (1909.75) ise 5. Gün 1 mg/L konsantrasyonda elde edilmiştir (Çizelge 4.12).

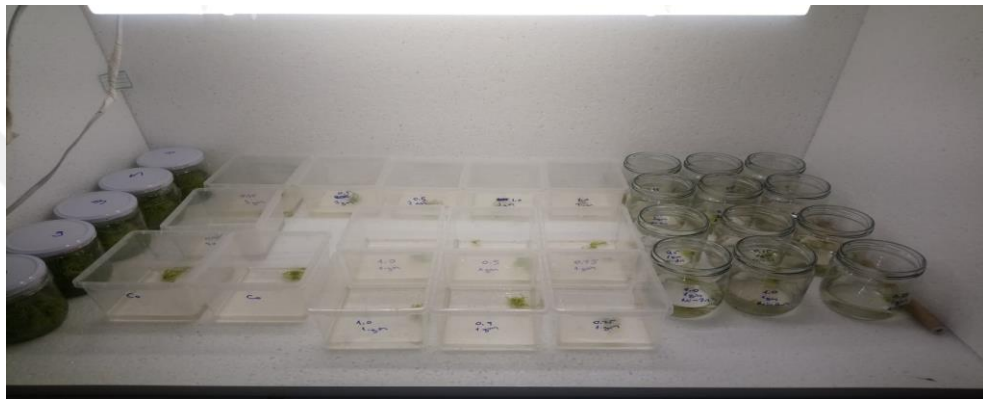
4.5. Gerçek Atıksu ile Cd – Cr – Ni - Zn Çalışması

Fitoremediasyon potansiyellerini araştırmak amacıyla 100 ml Konya Kentsel Atıksu arıtma tesisi çıkış suyu (7.5 g/L) bitki kullanılarak, içerisine eşit konsantrasyonlarda spike edilen Cd, Cr, Ni ve Zn ağır metalleri için, 0, 0.25, 0.5 ve 1 mg/L konsantrasyon aralığında 1 ve 3 gün çalışılmıştır.

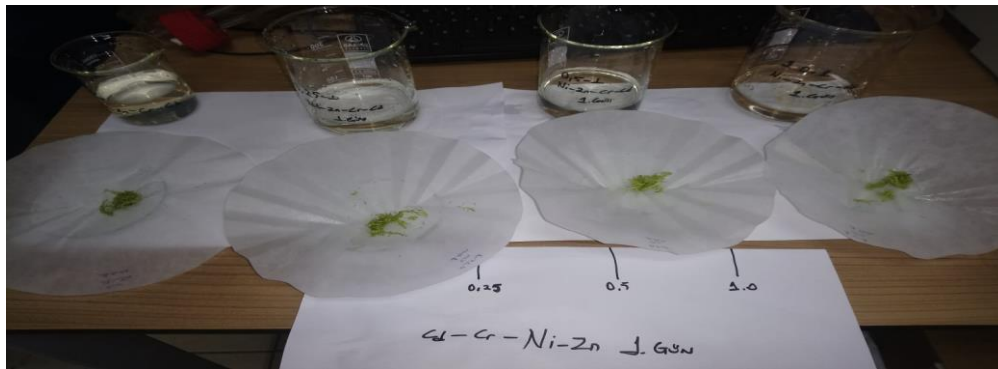
Her konsantrasyon için 4 ağır metalin AAS' da ayrı ayrı okuması yapılmıştır. Gerçek atıksu numunesi içerisine ağır metaller spike yapılmadan önce, atıksuda 0.105

mg/L Ni, 0.030 mg/L Zn, 0.110 mg/L Cr ve 0.039 mg/L Cd bulunduğu AAS ile yapılan okuma sonucunda tespit edilmiştir.

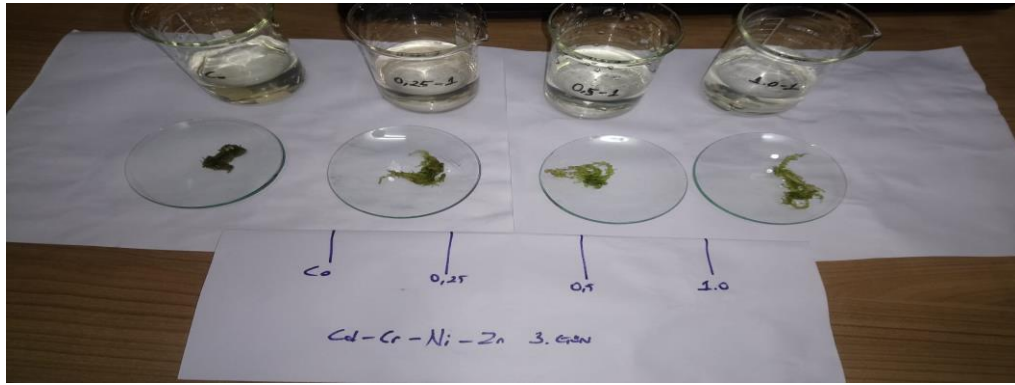
Tüm ağır metal konsantrasyonları ile gerçek atıksu kullanılarak yapılan fitoremediasyon çalışmasında; 1. gün sonunda bitkilerde urme gözlemlenmezken sadece renklerinin solmaya başladığı, 3.gün sonunda ise kontrol bitkisinin tamamen urdğ, 0.25 mg/L konsantrasyon bitkisinin de kontrol bitkisi kadar olmasa da urmeye başladığı, 0.5 ve 1 konsantrasyonlara sahip bitkilerde yavaş yavaş urmeye başladığı gözlemlenmiştir (şekil 4.20, şekil 4.21, şekil 4.22).



şekil 4.20. Gerçek atıksu, Cd-Cr-Ni-Zn alışması için hazırlanan numunelerin 0. gün görünümü



şekil 4.21. Gerçek atıksu Cd-Cr-Ni-Zn alışması için hazırlanan numunelerin 1. gün görünümü



Şekil 4.22. Gerçek atıksu Cd-Cr-Ni-Zn çalışması için hazırlanan numunelerin 3. gün görünümü

4.5.1. Maruz Kalma Süresi Etkisi

Cd, Cr, Ni ve Zn etkisindeki bitkinin yaş ağırlığı, kuru ağırlığı ile atıksuda kalan ağır metal miktarlarında, 1. gün ve 3. gün sonunda istatistiksel olarak önemli bir fark gözlemlenmemiştir. Bitki bünyesine, en fazla alımın 3.gün 1.39 mg/kg Cr ile en az alımın ise 0.01 mg/kg Ni ile 1. gün olduğu tespit edilmiştir (Çizelge 4.13, Çizelge 4.14, Çizelge 4.15, Çizelge 4.16).

Çizelge 4.13. Maruz kalma süresinin (gün) Cd fitoremediasyon üzerindeki etkisi

Gün	pH	Yaş ağırlık (g)	Kuru ağırlık (g)	Atıksuda kalan Cd (mg/L)	Bitki bünyesine alınan Cd (mg/kg)	BKF
1	8.25ös	1.180ös	0.025ös	0.23ös	0.09ös	0.46ös
3	8.42ös	1.134ös	0.022ös	0.14ös	0.11ös	0.48ös

*Aynı sütunda farklı harflerle gösterilen ortalamalar arasında fark $p < 0.01$ düzeyinde önemlidir. ös: önemsiz

Çizelge 4.14. Maruz kalma süresinin (gün) Cr fitoremediasyon üzerindeki etkisi

Gün	pH	Yaş ağırlık (g)	Kuru ağırlık (g)	Atıksuda kalan Cr (mg/L)	Bitki bünyesine alınan Cr (mg/kg)	BKF
1	8.25ös	1.180ös	0.025ös	0.575ös	0.56ös	1.60ös
3	8.42ös	1.134ös	0.022ös	1.252ös	1.390ös	4.15ös

*Aynı sütunda farklı harflerle gösterilen ortalamalar arasında fark $p < 0.01$ düzeyinde önemlidir. ös: önemsiz

Çizelge 4.15. Maruz kalma süresinin (gün) Ni fitoremediasyon üzerindeki etkisi

Gün	pH	Yaş ağırlık (g)	Kuru ağırlık (g)	Atıksuda kalan Ni (mg/L)	Bitki bünyesine alınan Ni (mg/kg)	BKF
1	8.25ös	1.180ös	0.025ös	0.296ös	0.01ös	0ös
3	8.42ös	1.134ös	0.022ös	0.254ös	0.03ös	0.05ös

*Aynı sütunda farklı harflerle gösterilen ortalamalar arasında fark $p < 0.01$ düzeyinde önemlidir. ös: önemsiz

Çizelge 4.16. Maruz kalma süresinin (gün) Zn fitoremediasyon üzerindeki etkisi

Gün	pH	Yaş ağırlık (g)	Kuru ağırlık (g)	Atıksuda kalan Zn (mg/L)	Bitki bünyesine alınan Zn (mg/kg)	BKF
1	8.25ös	1.180ös	0.025ös	0.151ös	0.19ös	1.69ös
3	8.42ös	1.134ös	0.022ös	0.067ös	0.20ös	1.08ös

*Aynı sütunda farklı harflerle gösterilen ortalamalar arasında fark $p < 0.01$ düzeyinde önemlidir. ös: önemsiz

4.5.2. Konsantrasyon Etkisi

Konsantrasyonun yaş ağırlık üzerinde belirsiz etkilere neden olduğu gözlemlenmiştir. Cd ve Ni için konsantrasyon arttıkça bitki bünyesine alınan ağır metal miktarı artarken, Cd alımında bitkinin belirsiz etkiler gösterdiği, Zn alımında ise istatistiksel olarak 0.25 mg/L, 0.5 mg/L ve 1 mg/L için aynı kabul edilebilecek derece önemsiz farkların olduğu tespit edilmiştir. Bitki bünyesine en iyi alım Cr ağır metalinde 1 mg/L konsantrasyon için 1.38 mg/kg olarak, en düşük alım ise 0 mg/kg ile 0 mg/L ve 0.25 mg/L konsantrasyonlar için Ni' de elde edildiği tespit edilmiştir (Çizelge 4.17, Çizelge 4.18, Çizelge 4.19, Çizelge 4.20).

Çizelge 4.17. Gerçek atıksudaki Cd konsantrasyonun fitoremediasyon üzerindeki etkisi

Cd (mg/L)	pH	Yaş ağırlık (g)	Kuru ağırlık (g)	Atıksuda kalan Cd (mg/L)	Bitki bünyesine alınan Cd (mg/kg)	BKF
0	8.13c	1.067c	0.018b	0.045d	0.04c	1.05d
0.25	8.37b	1.320a	0.026a	0.145c	0.10b	0.35b
0.5	8.43a	1.054c	0.025a	0.228b	0.12b	0.25c
1	8.41a	1.187b	0.024a	0.317a	0.16a	0.15a

*Aynı sütunda farklı harflerle gösterilen ortalamalar arasında fark $p < 0.01$ düzeyinde önemlidir.

Çizelge 4.18. Gerçek atıksudaki Cr konsantrasyonun fitoremediasyon üzerindeki etkisi

Cr (mg/L)	pH	Yaş ağırlık (g)	Kuru ağırlık (g)	Atıksuda kalan Cr (mg/L)	Bitki bünyesine alınan Cr (mg/kg)	BKF
0	8.13c	1.067c	0.018b	0.585d	0.48d	4.35a
0.25	8.37b	1.320a	0.026a	0.810c	0.87c	3.45b
0.5	8.43a	1.054c	0.025a	1.025b	1.18b	2.33c
1	8.41a	1.187b	0.024a	1.233a	1.38a	1.38d

*Aynı sütunda farklı harflerle gösterilen ortalamalar arasında fark $p < 0.01$ düzeyinde önemlidir.

Çizelge 4.19. Gerçek atıksudaki Ni konsantrasyonun fitoremediasyon üzerindeki etkisi

Ni (mg/L)	pH	Yaş ağırlık (g)	Kuru ağırlık (g)	Atıksuda kalan Ni (mg/L)	Bitki bünyesine alınan Ni (mg/kg)	BKF
0	8.13c	1.067c	0.018b	0d	0c	0b
0.25	8.37b	1.320a	0.026a	0.150c	0c	0b
0.5	8.43a	1.054c	0.025a	0.334b	0.03b	0.05a
1	8.41a	1.187b	0.024a	0.617a	0.05a	0.05a

*Aynı sütunda farklı harflerle gösterilen ortalamalar arasında fark $p < 0.01$ düzeyinde önemlidir.

Çizelge 4.20. Gerçek atıksudaki Zn konsantrasyonunun fitoremediasyon üzerindeki etkisi

Zn (mg/L)	pH	Yaş ağırlık (g)	Kuru ağırlık (g)	Atıksuda kalan Zn (mg/L)	Bitki bünyesine alınan Zn (mg/kg)	BKF
0	8.13c	1.067c	0.018b	0.057d	0.13b	4.10a
0.25	8.37b	1.320a	0.026a	0.137b	0.19a	0.78b
0.5	8.43a	1.054c	0.025a	0.152a	0.21a	0.43c
1	8.41a	1.187b	0.024a	0.090c	0.24a	0.23d

*Aynı sütunda farklı harflerle gösterilen ortalamalar arasında fark $p < 0.01$ düzeyinde önemlidir.

4.5.3. Süre × Konsantrasyon Etkisi

Süre × konsantrasyonun, yaş ağırlık üzerinde belirsiz etkiye sebep olduğu tespit edilmiştir. Bitki bünyesine alınan Cd ve Cr miktarı gün ve konsantrasyon artışı ile artarken, bitki bünyesine alınan Ni ve Zn için belirsiz etki gösterdiği gözlemlenmiştir. Bitki bünyesine en fazla alınan ağır metal miktarının; 1.83 mg/kg ile Cr olduğu tespit edilmiştir. Ni ve Zn' nun bitki bünyesine alımı ise 0.5 mg/kg altında kalmıştır (Çizelge 4.21, Çizelge 4.22, Çizelge 4.23, Çizelge 4.24).

Çizelge 4.21. Süre × Cd konsantrasyonunun fitoremediasyon üzerindeki etkisi

Cd (mg/L)	pH		Yaş Ağırlık (g)		Kuru Ağırlık (g)	
	1g	3g	1g	3g	1g	3g
0	7.86c	8.40ös	1.191bc	0.943e	0.022c	0.015d
0.25	8.31b	8.44ös	1.198bc	1.442a	0.027a	0.024abc
0.5	8.42a	8.44ös	1.094cd	1.014de	0.025ab	0.026ab
1	8.41a	8.41ös	1.235b	1.139bc	0.026ab	0.023bc

Cd (mg/L)	Atıksuda kalan Cd (mg/L)		Bitki bünyesine alınan Cd (mg/kg)		BKF	
	1g	3g	1g	3g	1g	3g
0	0.044g	0.046g	0.05de	0.03e	1.20a	0.90b
0.25	0.193d	0.097f	0.09cd	0.11bc	0.30d	0.40c
0.5	0.297b	0.159e	0.10c	0.14ab	0.20e	0.30d
1	0.366a	0.268c	0.14ab	0.18a	0.15f	0.15f

*Aynı sütunda farklı harflerle gösterilen ortalamalar arasında fark $p < 0.01$ düzeyinde önemlidir. ös: önemsiz

Çizelge 4.22. Süre × Cr konsantrasyonunun fitoremediasyon üzerindeki etkisi

Cr (mg/L)	pH		Yaş Ağırlık (g)		Kuru Ağırlık (g)	
	1g	3g	1g	3g	1g	3g
0	7.86c	8.40ös	1.191bc	0.943e	0.022c	0.015d
0.25	8.31b	8.44ös	1.198bc	1.442a	0.027a	0.024abc
0.5	8.42a	8.44ös	1.094cd	1.014de	0.025ab	0.026ab
1	8.41a	8.41ös	1.235b	1.139bc	0.026ab	0.023bc

Cr (mg/L)	Atıksuda kalan Cr (mg/L)		Bitki bünyesine alınan Cr (mg/kg)		BKF	
	1g	3g	1g	3g	1g	3g
0	0.264g	0.906d	0.29e	0.66d	2.70d	6.00a
0.25	0.482f	1.137c	0.42e	1.32b	1.65e	5.25b
0.5	0.731e	1.320b	0.60d	1.76a	1.15f	3.50c
1	0.821de	1.645a	0.93c	1.83a	0.90f	1.85e

*Aynı sütunda farklı harflerle gösterilen ortalamalar arasında fark $p < 0.01$ düzeyinde önemlidir. ös: önemsiz

Çizelge 4.23. Süre × Ni konsantrasyonunun fitoremediasyon üzerindeki etkisi

Ni (mg/L)	pH		Yaş Ağırlık (g)		Kuru Ağırlık (g)	
	1g	3g	1g	3g	1g	3g
0	7.86c	8.40ös	1.191bc	0.943e	0.022c	0.015d
0.25	8.31b	8.44ös	1.198bc	1.442a	0.027a	0.024abc
0.5	8.42a	8.44ös	1.094cd	1.014de	0.025ab	0.026ab
1	8.41a	8.41ös	1.235b	1.139bc	0.026ab	0.023bc

Ni (mg/L)	Atıksuda kalan Ni (mg/L)		Bitki bünyesine alınan Ni (mg/kg)		BKF	
	1g	3g	1g	3g	1g	3g
0	0e	0e	0d	0d	0ös	0b
0.25	0.137de	0.163cd	0d	0d	0ös	0b
0.5	0.382b	0.286bc	0.01d	0.06b	0ös	0.10a
1	0.666a	0.568a	0.02c	0.08a	0ös	0.10a

*Aynı sütunda farklı harflerle gösterilen ortalamalar arasında fark $p < 0.01$ düzeyinde önemlidir. ös: önemsiz

Çizelge 4.24. Süre × Zn konsantrasyonunun fitoremediasyon üzerindeki etkisi

Zn (mg/L)	pH		Yaş Ağırlık (g)		Kuru Ağırlık (g)	
	1g	3g	1g	3g	1g	3g
0	7.86c	8.40ös	1.191bc	0.943e	0.022c	0.015d
0.25	8.31b	8.44ös	1.198bc	1.442a	0.027a	0.024abc
0.5	8.42a	8.44ös	1.094cd	1.014de	0.025ab	0.026ab
1	8.41a	8.41ös	1.235b	1.139bc	0.026ab	0.023bc

Zn (mg/L)	Atıksuda kalan Zn (mg/L)		Bitki bünyesine alınan Zn (mg/kg)		BKF	
	1g	3g	1g	3g	1g	3g
0	0.044f	0.070e	0.17ab	0.08c	5.50a	2.70b
0.25	0.173b	0.102d	0.16b	0.23ab	0.65d	0.90c
0.5	0.240a	0.065e	0.18ab	0.24a	0.35f	0.50e
1	0.149c	0.032f	0.24a	0.24a	0.25g	0.20g

*Aynı sütunda farklı harflerle gösterilen ortalamalar arasında fark $p < 0.01$ düzeyinde önemlidir. ös: önemsiz

4.5.4. Giderim Verimi

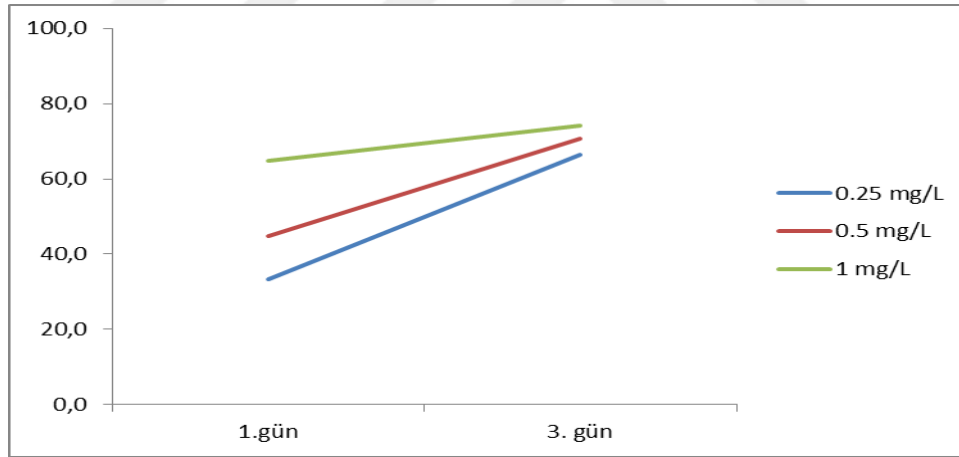
Cd, Cr, Ni ve Zn metalleri kullanılarak gerçek atıksu numunesinde yapılan fitoremediasyon çalışmasında her metal için ayrı ayrı değerlendirme yapılacak olunursa;

Bitkinin Cd giderim verimine bakıldığında; gün ilerledikçe ve konsantrasyon arttıkça giderim veriminin arttığı, en iyi giderimin 1 mg/L konsantrasyon için 3.günde olduğu tespit edilmiştir (Şekil 4.23).

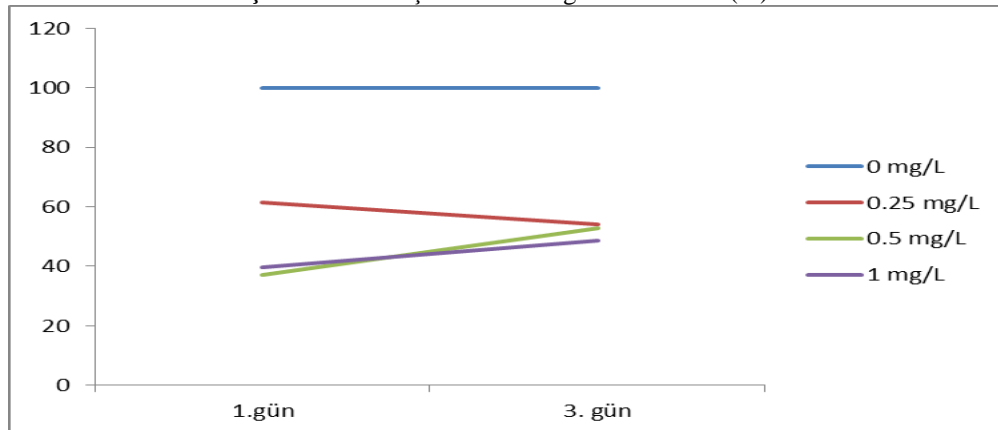
Bitkinin gerçek atıksu ile yapılan bu çalışmada 1. ve 3. günde de Cr ağır metalinin gideremediği gözlemlenmiştir (Şekil 4.24).

Ni giderim veriminde; 0.25 mg/L konsantrasyon için en iyi giderim verimi 1. gün elde edilmişken, 0.5 mg/L ve 1 mg/L için en iyi giderim verimi 3. gün elde edilmiştir. Konsantrasyon miktarı arttıkça Ni giderim verimi de her iki gün içerisinde azalmıştır (Şekil 4.25).

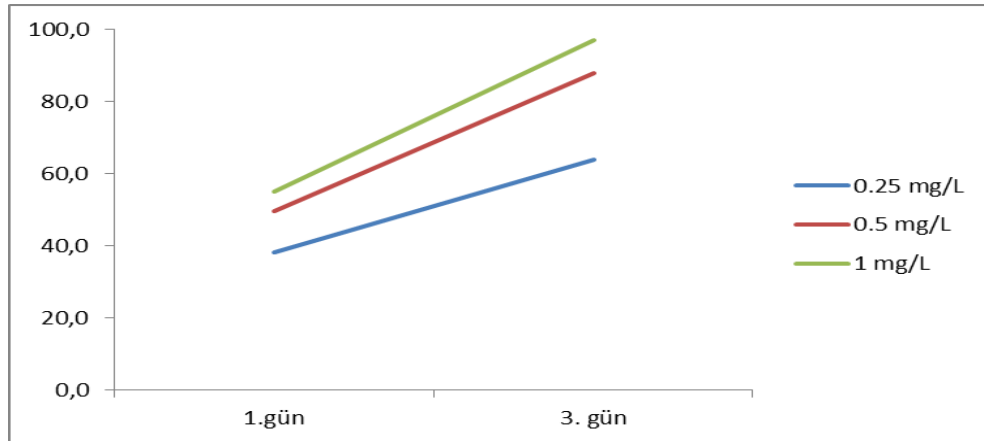
Zn giderim verimine bakıldığında ise; Cd' da olduğu gibi gün ve konsantrasyon arttıkça giderim veriminin arttığı, en iyi giderimin 1 mg/L konsantrasyon için 3.günde olduğu tespit edilmiştir (Şekil 4.26).



Şekil 4.23. Gerçek atıksu Cd giderim verimi (%)



Şekil 4.24. Gerçek atıksu Ni giderim verimi (%)



Şekil 4.25. Gerçek atıksu Zn giderim verimi (%)

4.5.5. Biyokonsantrasyon Faktörünü (BKF)

Bitkinin gelecek atıksu içerisinde Cd, Cr, Ni ve Zn ağır metallerine 1 ve 3 gün süre ile maruz bırakılmasının BKF' ne etkisi incelendiğinde, tüm ağır metaller için 1. ve 3. gün sonunda istatistiksel olarak önemli bir fark gözlemlenmemiştir. En yüksek BKF (0.483) Cd ağır metali için 3. gün sonunda, en düşük BKF (0) ise Ni için 1. gün sonunda elde edildiği tespit edilmiştir (Çizelge 4.13, Çizelge 4.14, Çizelge 4.15, Çizelge 4.16).

Farklı konsantrasyonların BKF' ne etkisi gözlemlendiğinde; Cd, Cr ve Zn için konsantrasyonun artması ile BKF' nün azaldığı, Ni de ise konsantrasyonun artması ile BKF' nün arttığı tespit edilmiştir (Çizelge 4.17, Çizelge 4.18, Çizelge 4.19, Çizelge 4.20).

BKF' ne süre \times konsantrasyon etkisi; Cd, Cr ve Zn' da süre ve konsantrasyonun artması ile BKF' nün azaldığı, Ni için ise tam tersi süre \times konsantrasyonun artması ile BKF' nün azaldığı tespit edilmiştir. En yüksek BKF' ü (6.000) Cr ağır metali için 3. gün sonunda 0 mg/L konsantrasyonda elde edilmiştir. Ni' in 1. gün sonunda tüm konsantrasyonlar için ve 3. gün ise 0 – 0.25 mg/L konsantrasyonlarda BKF' nün 0 olduğu gözlemlenmiştir (Çizelge 4.21 Çizelge 4.22, Çizelge 4.23, Çizelge 4.24).

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

5.1. Sonuçlar

Deiyonize su kullanılarak yapılan fitoremediasyon çalışmalarında *C. demersum* bitkisinin yaş ağırlıkları kıyaslandığında; gün ilerledikçe Ni, Zn ve Cr etkisinde olan bitkilerin yaş ağırlığının arttığı, Cd etkisine bırakılan bitkinin ağırlığının azaldığı tespit edilmiştir. Gerçek atıksu kullanılarak yapılan Cd-Cr-Ni-Zn fitoremediasyon çalışmalarında ise; gün ilerledikçe bitki yaş ağırlığında azalma olduğu tespit edilmiştir. Sonuç olarak; deiyonize su çalışmaları ile gerçek atıksu çalışmaları kıyaslandığında bitkinin gerçek atıksuya maruz kaldığında daha çok ağırlık kaybettiği gözlemlenmiştir.

Konsantrasyon ve süre \times konsantrasyonun yaş ağırlık üzerindeki etkileri incelendiğinde de her iki faktör içinde belirsiz etkiler tespit edilmiştir. Benzer sonuçlar daha önce yapılan çalışmalarda da elde edilmiştir. Örneğin; Mishra ve arkadaşlarının yapmış olduğu çalışmada; *C. demersum* bitkileri 1-7 gün boyunca 0, 1, 10, 25, 50 ve 100 mg/L Pb etkisinde bekletilmiş ve deney sonucunda en düşük bitki ağırlığı 7. gün sonunda 100 mg/L Pb içeren ortamda kaydedilmiştir (Mishra ve ark., 2006). Chen ve arkadaşlarının yapmış olduğu çalışmada da 7-21 gün süresince 5-80 mg/L Pb etkisine bırakılan *C. demersum* bitkilerinin taze ağırlıklarının artan Pb derişimi ve uygulama süresi ile azaldığını tespit etmiştir (Chen ve ark., 2015). Piotrowska ve ark. yaptıkları çalışmada ise 7-14 gün boyunca 1-1000 μ M Pb etkisine bırakılan *Wolffia arrhiza* bitkisinin en düşük yaş ağırlığa 14 gün sonunda 1000 μ M Pb uygulamasında ulaştığı sonucuna varmışlardır (Piotrowska ve ark., 2009). Benzer şekilde Erdaş, Çinkonun *Epilobium hirsutum* bitkisi üzerindeki büyüme parametrelerine etkisi ve bitkinin Zn'nun fitoremediasyon yönteminde kullanılabilirliğini araştırdığı çalışmasında; Zn konsantrasyonu ile bitkinin kök uzunluğu, gövde uzunluğu, yaprak sayısı ve taze ağırlığı arasında istatistiksel olarak negatif bir ilişki olduğunu, ayrıca, *E. hirsutum* bitkisinin, 30 mg/L Zn konsantrasyonun en iyi gelişim gösterdiğini tespit etmiştir (Erdaş, 2019).

Giderim verimlerine bakıldığında; deiyonize su ile yapılan çalışmalarda tüm ağır metallerde en az bir konsantrasyon için bile olsa %100 giderim veriminin elde edildiği, en yüksek giderimin % 97 ile Cd çalışmasında, en düşük giderim verimleri ise % 60' a yakın giderim ile Cr ve Zn çalışmalarında elde edildiği tespit edilmiştir. Gerçek atıksu ile yapılan Cd-Cr-Ni-Zn çalışmasında ise en iyi giderim Ni çalışmasında, en kötü

giderim ise % 0 giderim ile Cr çalışmasında tespit edilmiştir. Maha (2012) *Ceratophyllum demersum* ve *Lemna gibba L.* bitkilerini kullanılarak yaptığı fitoremediasyon çalışmasında, bitkileri farklı konsantrasyonlarda 2, 4, 6, 9 ve 12 gün boyunca Cr ve Pb ağır metallarına maruz bırakılmıştır. 12 günlük inkübasyon süresi boyunca giderimin devam ettiği ve en yüksek giderimin 12. gün %95 Pb ve %84 Cr giderimi ile elde edildiğini tespit etmiştir. Bu sonuçlarla Maha her iki bitkininde seçilen ağır metallerin gideriminin de verimli olduğu kanısına varmıştır.

Biyokonsantrasyon faktörü bitkiye uygulanan metal konsantrasyonunun bitki tarafından akümüle edilme yeteneğinin bir göstergesidir (Kara ve ark., 2007). Gerçek atıksu ile yapılan çalışmalarda günün BKF'nü etkilemediği, deiyonize su ile yapılan çalışmalarda ise gün arttıkça BKF'nde artış olduğu tespit edilmiştir. Konsantrasyon farkının BKF üzerindeki etkisi ise; deiyonize su ile hazırlanan numunelerde Cd çalışmasında belirsiz bir etki gösterirken, Cr ve Zn çalışmalarında konsantrasyonun artması ile BKF azalmış, Ni çalışmasında ise konsantrasyonun artması ile BKF'de artış göstermiştir. Gerçek atıksu kullanılarak hazırlanan numunelerde ise; Cd-Cr-Ni-Zn çalışmasında konsantrasyonun artması ile BKF'nde azalma tespit edilmiş en düşük BKF'nün ise Ni için elde edildiği tespit edilmiştir. Yapılan fitoremediasyon çalışmalarında süre × konsantrasyonun BKF'ne etkisi incelendiğinde; deiyonize su ile hazırlanan numunelerde, Cd çalışmasında belirsiz etkiler tespit edilmiş, Cr ve Zn için gün ilerledikçe BKF artarken konsantrasyon arttıkça BKF'nün azaldığı, Ni çalışmasında ise konsantrasyon ve maruz kalma süresinin artması ile BKF'nün de arttığı tespit edilmiştir. Örneğin; Das ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada; *Eichhornia crassipes solms* bitkisini 5-20 mg/L Cd konsantrasyonuna 0-21 gün süre maruz bırakmış ve çalışma sonucunda BKF değerlerinin genel olarak azaldığını kaydetmiştir (Das ve ark., 2016). Kara ve Zeytunluoglu, (2007) *Groenlandia densa (L.) Fourr* bitkisini 1-7 mg/L Cd toksisitesi altında 1-4 gün süre ile bekletmiş ve BKF değerini hesaplamışlardır. BKF değerleri aynı konsantrasyon içerisinde uygulanan süreye göre artış gösterirken, artan Cd konsantrasyonu ile BKF değerleri azalış göstermiştir (Kara ve Zeytunluoglu, 2007).

Ceratophyllum demersum L. bitkisinin Arsenik (As) alımının incelendiği fitoremediasyon çalışmasında, As akümülyasyonun pH 5.0' te en yüksek değerde olduğu ve daha sonra pH arttıkça birikimin azaldığı tespit edilmiş buda pH' ın As birikimi üzerinde önemli ($p < 0.001$) bir etkiye sahip olduğunu göstermiştir. Çeşitli konsantrasyonlardaki As^{+3} e 24 ve 48 saat süresince maruz bırakın bitki önce tolerans

ardındanda toksik tepkiler sergilemiş ve birikimin As^{+3} konsantrasyonlarına ve maruz kalma süresine bağlılığı önemli ($p < 0.001$) bulunmuştur (Khang ve ark., 2012).

Çin’de yapılan fitoremediasyon çalışmasında As ile kirlenmiş sudan, (*Vallisneria natans* (Lour.) Hara., *Potamogeton crispus* L., *Myriophyllum spicatum* L., *Ceratophyllum demersum* L. ve *Hydrilla verticillata* (L.f.) Royle) bitkilerinden hangisinin As’i en iyi akümüle ettiği incelendiğinde *V. natans* bitkisinin en fazla As birikimine sahip olduğu tespit edilmiştir. Ortamdaki As konsantrasyonunun ve maruz kalma süresinin akümülyasyonda etkili olduğu, 21 gün sonunda BKF’ nün 1300’ e ulaştığı ve bitki tarafından akümüle edildikten sonra As^{+5} in As^{+3} e indirgendiği sonucuna varılmıştır (Chen ve ark., 2015).

Ceratophyllum Demersum L. bitkisinin, 1, 2, 4 ve 7 gün süresince farklı konsantrasyonlardaki Cr^{+3} ve Cr^{+4} 'ya maruz bırakıldı çalışmada, hem Cr^{+3} hem de Cr^{+4} uygulamaları için konsantrasyonun anlamlı bir etkisi olduğu sonucuna varılmıştır (Duman, 2014).

Pb için yapılan fitoremediasyon çalışmasında, 10, 15, 20, 30 ve 50 mg/L Pb ağır metal konsantrasyonlarına 4, 7, 14, 21 ve 28 gün boyunca maruz bırakılan *E. crassipes* ve *C. Demersum* bitkilerinin istatistiksel analiz sonuçları anlamlı bulunmuş, konsantrasyonlar ve günler arasındaki farklar ($p < 0.05$) tespit edilmiş ve her iki bitkininde fitoremediasyon yöntemi uygulanarak Pb gideriminin de başarılı olduğu kanısına varılmıştır (Al-Rubaie ve ark., 2015).

5.2. Öneriler

Bu tez için yapılan fitoremediasyon çalışmasında 1, 3 ve 5 günlük maruz kalma süreleri uygulanmış ve 1. gün yüksek giderimler tespit edilmiştir. Saatlik maruziyet süreleri uygulanarak 1 gün içerisinde en iyi giderimin hangi saat aralığında olduğu tespit edilebilir. Bitki ağırlıklarının giderim üzerine etkisini incelemek için aynı ağır metal konsantrasyonu için farklı bitki ağırlıkları ile çalışma yapılabilir. Gerçek atıksu kullanılarak yapılan fitoremediasyon çalışmasında ise Cd-Cr-Ni-Zn ağır metalleri birlikte kullanıldığı için toksik etkilerin oluştuğu bu sebeple yüksek giderimin elde edilemediği tahmin edilmektedir. Bu sebeple deiyonize su çalışmasında olduğu gibi gerçek atıksu ile de her ağır metal için ayrı çalışmalar yapılarak daha iyi giderim verimleri elde edilip edilemeyeceği konusunda literatüre katkı sağlanabilir.

6. KAYNAKLAR

- Aliyeva, G., 2014 Fitoremediasyon Yöntemi (Bitki) İle Sucul Sistemlerin İyileştirilmesi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, 18-21-22-133
- Al-Rubaie, A.S.A., and Al-Kubaisi, A.R.A., 2015 Removal of Lead from Water by Using Aquatic Plants (*Ceratophyllum demersum* and *Eichhorina crassipes*), International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences, Vol: 4, No: 11, 45
- Al-Ubaidy, H., Rasheed K. 2015 Phytoremediation of Cadmium in River Water by *Ceratophyllum demersum*, World Journal Of Experimental Biosciences, 3: 14-17
- Asim, M. ve ark., 2019 Investigation of the bioaccumulation potential of in vitro regenerated plants of aquatic macrophyte – *Ceratophyllum demersum* to Cadmium (Cd) under laboratory conditions, Asian Journal of Agriculture and Biology, 1, 2
- Asim, M. ve ark., 2019 A Lab Study about Phytoremediation Potential of Aquatic Macrophyte *Ceratophyllum demersum* against Chromium, Journal of Applied Biological Sciences, 1
- Aybar, M. ve ark., 2015 Fitoremediasyon Yöntemi İle Topraktaki Ağır Metallerin Giderimi, Artvin Çoruh Üniversitesi, Doğal Afetler Uygulama ve Araştırma Merkezi, Doğal Afetler ve Çevre Dergisi, Artvin, 60-61-62
- Budak Özlü, E., 2016 Metal Kaplama Endüstrisi Atıksularının İleri Arıtım Yöntemi ile Arıtılmasının İncelenmesi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul, 11-166-168
- Chen, G., Liu, X., Brookes, P.C., and Xu, J., 2015 Opportunities for Phytoremediation and Bioindication of Arsenic Contaminated Water Using a Submerged Aquatic Plant: *Vallisneria spiralis* (Lour.) Hara, International Journal of Phytoremediation 17, 249
- Chen, M., Zhang, L.L., Li, J., Cai, J.C., 2015 Bioaccumulation and Tolerance Characteristics of a Submerged Plant (*Ceratophyllum demersum* L.) Exposed to Toxic Metal Lead, Ecotoxicology and Environmental Safety, 313
- Chorom, M., Parnian, A. and Jaafarzadeh, N., 2012 Nickel Removal by the Aquatic Plant (*Ceratophyllum Demersum* L.), International Journal of Environmental Science and Development, Vol. 3, No. 4, 372, 373
- Çevre Yönetim Genel Müdürlüğü, 2012 ‘Türkiye’de San. Kaynaklanan Tehlikeli Atıkların Yönetiminin İyileştirilmesi’

- Çiftçi, A., 2016 Çoklu Metal (Kadmiyum, Kurşun Ve Çinko) İle Kirlenmiş Bir Toprağın Arıtımında Yabani Hint Yağı (*Ricinus Communis*) Ve Aspir (*Carthamus Tinctorius*) Bitkilerinin Fitoremediasyon Kapasitesinin araştırılması, Mersin Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, Mersin, 69
- Das, S., Goswami, S., ve Talukdar, A.D., 2016 Physiological Responses of Water Hyacinth, *Eichhornia crassipes* (Mart.) Solms, to Cadmium and Its Phytoremediation Potential, *Turkish Journal of Biology*, 40, 84-94.
- Deniz Yaşar, Ö., 2018 Metal Kaplama Atıksuyundan Elektrokoagülasyon Flokları, Klinoptilolit ve Kaolin Kullanarak Nikel(II) İyonlarının Giderimi, On Dokuz Mayıs Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi
- Doğan, M., 2017 In Vitro Koşullarda Çoğaltılan Su Bitkilerinin Fitoremediasyon Potansiyellerinin Araştırılması, Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi, Doktora Tezi, 3-4-5-6-7-10-11-39
- Duman, F., Koca, F.D., 2014. Single and combined effects of exposure concentration and duration on biological responses of *Ceratophyllum demersum* L. Exposed to Cr species. *Int. J. Phytoremediat.* 16, 1192
- Eman Gökseven, Ş., 2019 Süs Lahanasının (*brassica oleraceae var. capitata*) Topraktaki Bor Elementinin Giderilmesi Amacıyla Fitoremediasyonda Hiper Toplayıcı Bitki Olarak Kullanılma Potansiyelinin Araştırılması, Ankara Üniveristesesi Doktora Tezi, Ankara, 20
- Erdaş, N., 2019 Epilobium Hirsutum L. Bitkisinin Fitoremediasyon Kapasitesinin Araştırılması Ve In Vitro Şartlarda Çoğaltımı, Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, Kütahya, 6
- Ergene, B., 2013 Metal Kaplama Endüstrisi Atıksularının Arıtımı, İstanbul Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul, 1-9-10
- Eroğlu, H., 2019 Ağır Metal Nanopartiküllerinin Sınırlı Ot (*Plantago*) Bitkileriyle Fitoremediasyonu, İstanbul Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul,
- Evliyaoğulları, N.E., 2019 Bitki Özütü Kullanılarak Sentezlenmiş Nanoparçacıkların Sulardan Ağır Metal Gideriminde Kullanımı, Konya Teknik Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, Konya, 7
- Filiz, E., 2007 Doğal Kaynaklardan Elde Edilen Adsorbanlarla Sulardan Ağır Metal Giderimi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul, 21
- Göker, M., 2019 Topraklarda Krom Ağır Metalinin Mısır (*Zea Mays L.*) Bitkisi Kullanılarak Fitoremediasyon Tekniği İle Giderilmesi, Namık Kemal Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, Tekirdağ, 54
- Hamutoğlu, R., ve ark., 2012 Biyosorpsiyon, adsorpsiyon ve fitoremediasyon yöntemleri ve uygulamaları, *Türk Hijyen ve Deneysel Biyoloji Dergisi*, 245

- Kara, Y., and Zeytunluoglu, A., 2007 Bioaccumulation of Toxic Metals (Cd and Cu) by *Groenlandia densa* (L.) Fourr, Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology, 609-612.
- Karataş M., Aasim M., Dazkirlı M., 2016 Influence of light emitting diodes and benzylaminopurine on adventitious shoot regeneration of water hyssop (*Bacopa monnieri* L. Pennell) in vitro. Arch Biol Sci 68: 501–508
- Khang, H.V., Hatayama ,M., Inoue, C., 2012 Arsenic accumulation by aquatic macrophyte coontail (*Ceratophyllum demersum* L.) exposed to arsenite, and the effect of iron on the uptake of arsenite and arsenate, Environmental and Experimental Botany, 47
- Koca, S., 2012 Bazı Bitkilerin Hidroponik Ortamda Fitoremediasyon Kapasitelerinin Araştırılması, Pamukkale Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, Denizli, 57
- Kösesakal T., 2011 Tatlı Su Eğreltisi *Azolla Filiculoides* Lam. Kullanılarak Petrol Hidrokarbonlarının Fitoremediasyonu, İstanbul Üniversitesi, Doktora Tezi, İstanbul, 113
- Küçükay, B., 2015 Metal Kaplama Endüstrisi Mevcut En İyi Teknikler Uygulama Alanları, On Dokuz Mayıs Üniversitesi, Bitirme Tezi, Samsun,7-8-9
- Maha, A.M.A., 2012 Phytoremediation of heavy metals from aqueous solutions by two aquatic macrophytes, *Ceratophyllum demersum* and *Lemna gibba* L., Environmental Technology Vol. 33, No. 14, 1609
- Mishra, S. ve ark., 2006 Lead Detoxification by Coontail (*Ceratophyllum demersum* L.) Involves Induction of hytochelatins and Antioxidant System in Response to Its Accumulation. Chemosphere, 1030
- Mücevher, O., 2010 Doğal Yollarla Konya Çöp Depo Sahasında Yetişen Çeşitli Baskın Bitki Türlerinde, Krom Birikiminin Ve Bitki Büyümesindeki Etkilerinin Araştırılması, Selçuk Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, Konya, 206
- Piotrowska, A., ve ark., 2009 Jasmonic Acid as Modulator of Lead Toxicity in Aquatic Plant *Wolffia arrhiza* (Lemnaceae), Environmental and Experimental Botany, 66, 507-513.
- Suryani Y., Cahyanto T., Sudjarwo T., Panjaitan D.V., Paujiah E., 2017, Chromium Phytoremediation of Tannery Wastewater using *Ceratophyllum demersum*, Jaenudin M. Biosaintifika Journal of Biology & Biology Education, 234.
- Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliği, 31.12.2004 tarih ve 25687 sayılı.
- Terzi, H., ve Yıldız, M., 2011 Ağır Metaller ve Fitoremediasyon: Fizyolojik ve Moleküler Mekanizmalar, Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, 2-4

- Tuna, N., 2013 Çinko Ve Nikel Kaplanmış Düşük Karbonlu Çelik Plaka Ve Vidaların Korozyon Davranışının İncelenmesi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul, 1-15-16-17
- Tütün, K., 2017 Endüstride Kullanılan Metal Kaplama Tesislerindeki Atıksuyun Geri Kazanımı, Prosesin Hammadde Su ve Enerji Açısından İncelenerek Verimliliğinin Artırılması, İstanbul Aydın Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul, 3-14
- Uzun Parlak, N, 2008 Metal Kaplama Prosesi Durulama Banyo Atıksularının Elektrokoagülasyon ile Arıtımı, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi
- Yılmaz, S., 2008 Metal Kaplama Endüstrisi Atıksularının Fenton Oksidasyonu ile Arıtımı, Selçuk Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, Konya, 6-7-45-46
- Yurdakul, İ., 2015 Kirletilmiş Topraklarda ve Sularda Bitkisel İyileştirme Teknikleri ve Önemi, Siirt Üniversitesi, Türkiye Tarımsal Araştırma Dergisi, 56-57-58
- Zhu, Y.L., ve ark., 1999 Phytoremediation of trace elements by wetland plants: II. Water Hyacinth, Journal Environmental Quality, 28: 339-344

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Canan SOĞUKPINAR
Uyruğu : Türkiye
Doğum Yeri ve Tarihi : Akşehir-25.08.1990
Telefon : 0506 888 63 79
Faks : -
e-mail : canansgkpnr@gmail.com

EĞİTİM

Derece	Adı, İlçe, İl	Bitirme Yılı
Lise	Mehmet Akif Ersoy Lisesi (YDAL) Selçuklu/Konya	2008
Üniversite	Süleyman Demirel Üniversitesi Merkez/Isparta	2013
Yüksek Lisans	Necmettin Erbakan Üniversitesi Meram/KONYA	Halen Devam Ediyor

İŞ DENEYİMLERİ

Yıl	Kurum	Görevi
2013-2014	ÇESGEM İş Sağlığı Güvenliği Eğitim Dan. Müh. San. Tic. Ltd. Şti.	Çevre Mühendisi
2014-2015	Bursa Ekoloji Dan. End. Atık. Taş. San. Tic.	Çevre Mühendisi
2015-2016	Dünya Engelliler Birliği & GlobalGROUP Uluslararası Sertifikasyon Hiz. Ltd. Şti.	USTAD Standart Koordinatörü
2016-2019	Çevre Uzmanı Dan. Müh. Mad. İnş. San. ve Tic. Ltd. Şti.	Çevre Mühendisi

UZMANLIK ALANI

Çevre Mühendisliği

YABANCI DİLLER

İngilizce

YAYINLAR

Aydın M.E., Soğukpınar C., Aydın S., Ulvi A., 2019, Metal Kaplama Atıksuları Ve Arıtımı, Uluslararası Bilimsel Araştırmalar Kongresi (UBAK), 14 – 17 Şubat 2019, 85-95, Yalova.