

**T.C.
PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**SUCUL ORTAMLARDAN FİTOREMEDİASYON
YÖNTEMİ İLE AĞIR METAL GİDERİMİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

FARIDA BAGHIROVA

DENİZLİ, MART - 2020

**T.C.
PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**



**SUCUL ORTAMLARDAN FİTOREMEDİASYON YÖNTEMİ
İLE AĞIR METAL GİDERİMİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

FARIDA BAGHIROVA

DENİZLİ, MART - 2020

Bu tezin tasarımı, hazırlanması, yürütülmesi, araştırmalarının yapılması ve bulgularının analizlerinde bilimsel etiğe ve akademik kurallara özenle riayet edildiğini; bu çalışmanın doğrudan birincil ürünü olmayan bulguların, verilerin ve materyallerin bilimsel etiğe uygun olarak kaynak gösterildiğini ve alıntı yapılan çalışmalara atfedildiğine beyan ederim.

FARIDA BAGHIROVA



ÖZET

SUCUL ORTAMLARDAN FİTOREMEDİASYON YÖNTEMİ İLE AĞIR METAL GİDERİMİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

FARIDA BAGHIROVA

PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

(TEZ DANIŞMANI:DR. ÖĞR. ÜYESİ MESUT AK)

DENİZLİ, MART - 2020

Ağır metallerin oluşturdukları ciddi sağlık problemleri nedeni ile sucul ortamlardan uzaklaştırılmaları zorunludur. Yeşil ıslah olarak bilinen fitoremediasyon, ağır metaller başta olmak üzere, pek çok toksik bileşenin uzaklaştırılması için kullanılan çevreci, etkili, ucuz ve kolay bir yöntemdir. *Pistia stratiotes* ve *Salvinia natans* bitkilerinin sucul ortamlardan kurşun, bakır ve nikel ağır metallerini alma kapasitelerinin belirlenmesi ile ilgili yapılan bu fitoremediasyon çalışmaları sonucunda, bu bitkilerin sucul ortamlardan ağır metal giderme amacı ile verimli bir şekilde kullanılabileceği belirlenmiştir. Morfolojik olarak bakıldığında *Salvinia natans* bitkisi *Pistia stratiotes* bitkisine göre ağır metal kirliliğinden daha az etkilenmiş ve ağır metal alımında çok daha iyi sonuçlar vermiştir. *Salvinia natans* bitkisi Pb ve Cu alımında *Pistia stratiotes* bitkisine göre yaklaşık iki kat daha etkili olurken, Ni alımındaki verimliliğinin *Pistia stratiotes* bitkisine göre 5-6 kat daha fazla olduğu tespit edilmiştir. Bitkilerin metal alım verimlerinin en yüksekte en düşüğe doğru sırasıyla Pb, Cu, Ni şeklinde olduğu belirlenmiştir. Deneysel çalışmalarda kullanılan Central Composite Design istatistiksel programı ile belirlenen bağımsız değişkenlerden hem metal konsantrasyonunun ve hem de temas süresinin bitkilerin metal alımlarında etkili olduğu tespit edilmiş, matematiksel formülleri oluşturulmuştur. Her bir bitki ve metal için minimum metal alımlarının 24 saat sonunda 17,5 mg/L konsantrasyonda gerçekleştiği gözlemlenirken, maksimum metal alımlarının ise *Pistia stratiotes* bitkisi için tüm metallerde ve *Salvinia natans* bitkisinin kurşun alımında 126,43 saat sonunda 26,34 mg/L konsantrasyonda, *Salvinia natans* bitkisinin bakır ve nikel alımlarında ise 144 saat sonunda 30 mg/L konsantrasyonlarda olduğu tespit edilmiştir.

ANAHTAR KELİMELELER: Doğal Arıtma, Fitoremediasyon, Ağır Metal Giderimi, Su Marulu, Su Eğreltisi.

ABSTRACT

HEAVY METAL REMOVAL BY PHYTOREMEDIATION METHOD FROM AQUATIC MEDIA

MSC THESIS

FARIDA BAGHIROVA

PAMUKKALE UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE
CIVIL ENGINEERING

(SUPERVISOR:ASSIST. PROF. DR. MESUT AK)

DENİZLİ, MARCH 2020

Due to serious health problems caused by heavy metals, they must be removed from aquatic environments. Phytoremediation, known as green breeding, is an environmentally friendly, effective, inexpensive and easy method used to remove many toxic components, especially heavy metals. As a result of these phytoemediation studies on determining the capacities of *Pistia stratiotes* and *Salvinia natans* plants from the aquatic environments to uptake lead, copper and nickel heavy metals, it has been determined that these plants can be used efficiently to remove heavy metals from aquatic environments. From a morphological perspective, the *Salvinia natans* plant was less affected by heavy metal pollution than the *Pistia stratiotes* plant and gave much better results in heavy metal uptake. While *Salvinia natans* plant is about two times more effective in Pb and Cu uptake than *Pistia stratiotes* plant, its efficiency in Ni uptake is found to be 5-6 times higher than *Pistia stratiotes* plant. It has been determined that the metal uptake efficiency of the plants is from the highest to the lowest, respectively Pb, Cu, Ni. From the independent variables determined by the Central Composite Design statistical program used in experimental studies, it was determined that both the metal concentration and the contact time were effective in the metal uptake of the plants and their mathematical formulas were created. The minimum metal intakes for each plant and metal were observed to occur at a concentration of 17.5 mg/L at the end of 24 hours, while the maximum metal intakes were in all metals for the *Pistia stratiotes* plant and at the concentration of 26.34 mg/L after 126.43 hours at the lead intake of the *Salvinia natans* plant. It was determined that *Salvinia natans* plant had concentrations of 30 mg/L after 144 hours in copper and nickel intakes.

KEYWORDS: Natural Treatment, Phytoremediation, Heavy Metal Removal, *Pistia Stratiotes*, *Salvinia Natans*.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET.....	i
ABSTRACT	ii
İÇİNDEKİLER	iii
ŞEKİL LİSTESİ	iv
TABLO LİSTESİ	v
ÖNSÖZ.....	vi
1. GİRİŞ.....	1
2. FİTOREMEDİASYON	3
2.1 Fiteremediasyonun Mekanizmaları	4
2.1.1 Bitkisel Özümleme (Fitoekestraksiyon)	5
2.1.2 Bitkisel Parçalanma (Fitodegradasyon)	5
2.1.3 Bitkisel Buharlaşıma (Fitobuharlaşıma)	6
2.1.4 Köklerle Süzme (Rizofiltrasyon)	7
2.1.5 Köklerle Sabitleme (Fitostabilizasyon)	8
2.2 Fitoremediasyon Verimliliğini Etkileyen Faktörler	9
2.3 Akuatik Makrofitler	9
2.4 Hiperakümülatörler	11
3. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI.....	14
4. MATERYAL VE METOD	18
4.1 Çalışmada Kullanılan Bitkiler	18
4.1.1 <i>Pistia stratiotes</i>	20
4.1.2 <i>Salvinia natans</i>	21
4.2 Sentetik Tekli Ağır Metal Çözeltileri	21
4.3 Deney Düzeneği ve Çalışma Planı	22
4.4 İstatistiksel Analiz	24
4.5 Bitki ve Sentetik Atıksu Analizleri	26
5. BULGULAR VE TARTIŞMA	28
5.1 <i>Pistia Stratiotes</i> Bitkisi ile Yapılan Çalışmalar	28
5.1.1 <i>Pistia Stratiotes</i> Bitkisinin Morfolojik Değişimi.....	29
5.1.2 <i>Pistia Stratiotes</i> Bitkisinin Pb Alımı	31
5.1.3 <i>Pistia Stratiotes</i> Bitkisinin Cu Alımı	33
5.1.4 <i>Pistia Stratiotes</i> Bitkisinin Ni Alımı.....	35
5.2 <i>Salvinia Natans</i> Bitkisi ile Yapılan Çalışmalar	37
5.2.1 <i>Salvinia Natans</i> Bitkisinin Morfolojik Değişimi	37
5.2.2 <i>Salvinia Natans</i> Bitkisinin Pb Alımı	39
5.2.3 <i>Salvinia Natans</i> Bitkisinin Cu Alımı	41
5.2.4 <i>Salvinia Natans</i> Bitkisinin Ni Alımı	43
6. SONUÇ ve ÖNERİLER.....	45
7. KAYNAKLAR.....	47
8. ÖZGEÇMİŞ	53

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1: Fitoremediasyon mekanizmaları.....	4
Şekil 2.2: Fitoekstraksiyon.....	5
Şekil 2.3: Fitodegradasyon.....	6
Şekil 2.4: Fitobuharlaştırma.....	7
Şekil 2.5: Rizofiltrasyon.	8
Şekil 2.6: Fitostabilizasyon.	8
Şekil 2.7: Su bitkilerinin bölgelere göre dağılımı	10
Şekil 2.8: Hiperakümülatör olmayan (sol) ve hiperakümülatör (sağ) bitkilerin ağır metal alım mekanizması: (1) Ağır metalin hücre duvarına bağlanması; (2) Kök alımı; (3) Sitazol içinde bağlanma; (4) Kökten gövdeye translokasyon.	13
Şekil 4.1: <i>Pistia stratiotes</i> bitkisi (Su marulu).....	20
Şekil 4.2: <i>Salvinia natans</i> bitkisi (Su eğreltisi).....	21
Şekil 4.3: Kurşun, nikel ve bakır tekli ağır metal stok çözeltileri.....	22
Şekil 4.4: Ağır metal çözeltileri ve bitki uygulamaları	23
Şekil 4.5: Ağızları şeffaf folyo ile kaplanmış deney düzeneği örnekleri.....	24
Şekil 5.1: <i>Pistia stratiotes</i> bitkisinin ağır metal uygulamalarındaki morfolojik değişimi: (a): Pb uygulaması; (b): Cu uygulaması; (c): Ni uygulaması.	30
Şekil 5.2: <i>Pistia stratiotes</i> bitkisinin Pb (mg/kg) alımının farklı konsantrasyon ve temas süresine bağlı olarak değişimi.....	32
Şekil 5.3: <i>Pistia stratiotes</i> bitkisinin Cu (mg/kg) alımının farklı konsantrasyon ve temas süresine bağlı olarak değişimi.....	34
Şekil 5.4: <i>Pistia stratiotes</i> bitkisinin Ni (mg/kg) alımının farklı konsantrasyon ve temas süresine bağlı olarak değişimi.....	36
Şekil 5.5: <i>Salvinia natans</i> bitkisinin ağır metal uygulamalarındaki morfolojik değişimi: (a): Pb uygulaması; (b): Cu uygulaması; (c): Ni uygulaması.	38
Şekil 5.6: <i>Salvinia natans</i> bitkisinin Pb (mg/kg) alımının farklı konsantrasyon ve temas süresine bağlı olarak değişimi.....	40
Şekil 5.7: <i>Salvinia natans</i> bitkisinin Cu (mg/kg) alımının farklı konsantrasyon ve temas süresine bağlı olarak değişimi.....	42
Şekil 5.8: <i>Salvinia natans</i> bitkisinin Ni (mg/kg) alımının farklı konsantrasyon ve temas süresine bağlı olarak değişimi.....	44

TABLO LİSTESİ

Sayfa

Tablo 2.1: Türkiye’de rastlanan bazı hiperkümülatör bitkiler.	12
Tablo 4.1: <i>Pistia stratiotes</i> ve <i>Salvinia natans</i> bitkilerinin özellikleri.....	19
Tablo 4.2: <i>Pistia stratiotes</i> ve <i>Salvinia natans</i> bitkilerinin ölçülen bazı fiziksel özellikleri.....	20
Tablo 4.3: Central Composite Design’a göre <i>Pistia stratiotes</i> ve <i>Salvinia natans</i> bitkilerinin Pb, Cu ve Ni’in farklı konsantrasyon ve temas sürelerindeki deney kombinasyonları	25
Tablo 5.1: Deney kombinasyonları için hazırlanan her bir metal çözeltisinde iletkenlik, sıcaklık ve pH değerleri.	28
Tablo 5.2: <i>Pistia stratiotes</i> için Central Composite Design istatistiksel programı ile belirlenen farklı kombinasyonlar için hesaplanan Pb, Cu ve Ni alım sonuçları.....	29
Tablo 5.3: <i>Pistia stratiotes</i> bitkisinin Pb alımı için ikinci dereceden modelin ANOVA sonuçları.....	31
Tablo 5.4: <i>Pistia stratiotes</i> bitkisinin Cu alımı için ikinci dereceden modelin ANOVA sonuçları.....	33
Tablo 5.5: <i>Pistia stratiotes</i> bitkisinin Ni alımı için ikinci dereceden modelin ANOVA sonuçları.....	35
Tablo 5.6: <i>Salvinia natans</i> için Central Composite Design istatistiksel programı ile belirlenen farklı kombinasyonlar için hesaplanan Pb, Cu ve Ni alım sonuçları.	37
Tablo 5.7: <i>Salvinia natans</i> bitkisinin Pb alımı için ikinci dereceden modelin ANOVA sonuçları.....	40
Tablo 5.8: <i>Salvinia natans</i> bitkisinin Cu alımı için ikinci dereceden modelin ANOVA sonuçları.....	41
Tablo 5.9: <i>Salvinia natans</i> bitkisinin Ni alımı için ikinci dereceden modelin ANOVA sonuçları.....	43

ÖNSÖZ

Bu çalışmanın gerçekleşme sürecinde danışmanlığımı yürüten, tez çalışmamın seçiminde, yürütülmesinde, sonuçlandırılmasında ve sonuçlarının değerlendirilmesinde 2 yıl boyunca değerli bilgilerini benimle paylaşan, ihtiyaç duyduğum her an yardımlarını benden esirgemeyen saygıdeğer hocam Sayın Dr. Öğr. Üyesi Mesut AK'a, laboratuvar çalışmalarında yardımcı olan Arş. Gör. Yağmur Meltem AYDIN KIZILKAYA'ya ve yüksek lisansı kazanmamdan bitirmeme kadar sevgisini ve desteğini üzerimde hissettiren çok değerli annem Raida BAGHIROVA'ya teşekkürü bir borç bilirim.



1. GİRİŞ

Canlı yaşamı için su vazgeçilmez bir maddedir. Nüfus ve sanayileşmedeki hızlı artışa ilaveten yaşam standartlarının yükselmesi insanların suya olan ihtiyacını da arttırmıştır. Fakat kentsel atıklar, endüstriyel ve tarımsal faaliyetler, termik ve nükleer santraller ve daha birçok insan faaliyetine paralel olarak temiz su kaynakları da gün geçtikçe kirlenmektedir. Bu sebeplerle var olan temiz su kaynaklarını korumak ve iyi bir şekilde faydalanmak gerekmektedir. Bu da mevcut su kaynaklarının geri kazanımı ve tekrar kullanımı için alternatif yöntemlerin daha yoğun bir şekilde araştırılmasını gerektirmiştir.

Endüstriyel, tarımsal vb. faaliyetler sonucu sucul ortamlara karışan organik ve inorganik bileşikler, deterjanlar, mikroorganizmalar, yağlar, pestisitler, ağır metaller ve petrol ürünleri suyu kirleten başlıca kirleticilerdir. Kimyasal kirlilik sınıfında yer alan ağır metaller biyodegradasyona uğramadıklarından sucul ortamlardaki en önemli canlı hayatını tehdit eden kirletici gruplarından biridir. Biyodegradasyona uğramadıkları için kolaylıkla birikebilmekte ve kompleks yapılar oluşturarak toksik etkilere neden olmaktadır.

Ağır metallerin çevrede yüksek konsantrasyonlarda birikmesi fauna ve flora üzerinde toksik etki yapmaktadır (Xue ve diğ. 2010). Toksik metallerin uzaklaştırılması için geleneksel fiziksel ve kimyasal yöntemler mevcuttur, ancak ağır metallerin sulu çözeltilerden uzaklaştırılması ve geri kazanımı için daha ucuz ve etkili bir alternatif olarak biyolojik yöntemler önerilmektedir (Hanif ve diğ. 2009). Sucul bitki biyokütlesi ağır metalleri biriktirmek için oldukça iyi bir kapasiteye sahiptir ve bu nedenle dünya çapında ağır metalleri uzaklaştırmak için çevre dostu atıksu arıtma teknolojileri geliştirmek için bol bulunur bir biyolojik kaynaktır (Dhir ve diğ. 2008, 2009a, 2009b; Vyzamal ve diğ. 2009).

Ağır metal kirliliği içeren atıksular suda yaşayan ve bu suyu kullanan canlılar için çok tehlikeli ve toksiktir. Bu nedenle bu tür suların biyolojik olarak arıtılması arıtılmada etken mikroorganizmaları da öldürücü etki gösterdiğinden mümkün değildir (Gadd ve Griffiths 1978; Cheng ve diğ. 2002). Toksik ağır metallerin

endüstriyel atıksudan giderimi için adsorpsiyon, kimyasal çöktürme gibi geleneksel fiziko-kimyasal arıtma yöntemlerinin yanısıra alternatif yöntemler kullanılmaya başlanmıştır. Bu yöntemlerden fitoremediasyon daha ucuz ve daha kullanılabilir bir seçenek olarak karşımıza çıkmaktadır.



2. FİTOREMEDİASYON

Fitoremediasyon sucul ortamlardan ağır metal giderimi için en önemli yöntemdir. Fitoremediasyon (phytoremediation) “phyto” (bitki) ve “remediation” (ıslah) kelimelerinden üretilmiştir. Fitoremediasyon yerine biyoremediasyon, bitki ile iyileştirme ifadeleri de kullanılmaktadır. Fitoremediasyon ile inorganik ve organik maddeler bitki kullanılarak kirlilik ortamından bitki bünyesine alma yolu ile uzaklaştırılmaktadır (Ismail 2012; Pilon-Smits ve Freeman 2006).

Metal hiperakümülatörü olarak bilinen bitkiler, dokularında yüksek konsantrasyonlarda ağır metalleri biriktirme özelliğine sahiptirler. Ağır metallerin giderilmesinde kullanılan fiziko-kimyasal arıtma tekniklerinin çoğu yüksek konsantrasyonlarda ağır metal ile kirlenmiş suların yerinde ya da farklı bir yerde arıtımlarında yararlanılan temel yöntemlerdir fakat düşük kirletici konsantrasyonlarında ve kirleticilerin dağınık olarak bulunduğu geniş alanlarda etkili olamayan yöntemlerdir. Fitoremediasyonda, kirlenmiş alanların genişliği veya dağınıklığı sorun oluşturmamaktadır. Bu durumda diğer yöntemlere kıyasla fitoremediasyon daha ucuz ve daha kullanılabilir bir seçenek olarak karşımıza çıkmaktadır (Rulkens ve diğ. 1998; Cheng ve diğ. 2002).

Fitoremediasyonun performansı kirlilik konsantrasyonu, kirleticilerin mikroorganizmalar tarafından kullanılabilir olması, kirleticinin bitkiler tarafından alınabilmesi gibi faktörlere bağlıdır (Vangrosveld 2009). Bunun yanında fitoremediasyonda kullanılacak bitkilerin yüksek metal konsantrasyonlarında yaşayabilmeleri, köklerinin uzunluğu ve yoğunluğu, ortam şartlarına çok hassas olmamaları ve hızlı büyüyor olmaları önemli parametrelerdir (Watanabe 1997; Reeves ve Baker 2000).

Fitoremediasyon amacı ile kullanılan bitkiler su üstünde gelişenler, su üstünde yüzen veya serbest yüzenler, köklü yapraklılar, su altında gelişenler ve ağaçlar olarak kategorilere ayrılabilir. Su üstünde gelişen ve su üstünde yüzen bitkilerde en iyi ağır metal alma yolu kökleri sayesinde olmaktadır. Tamamen suya batık yapraklı, serbest yüzen batık yapraklı veya serbest yüzen bitkiler ise metalleri

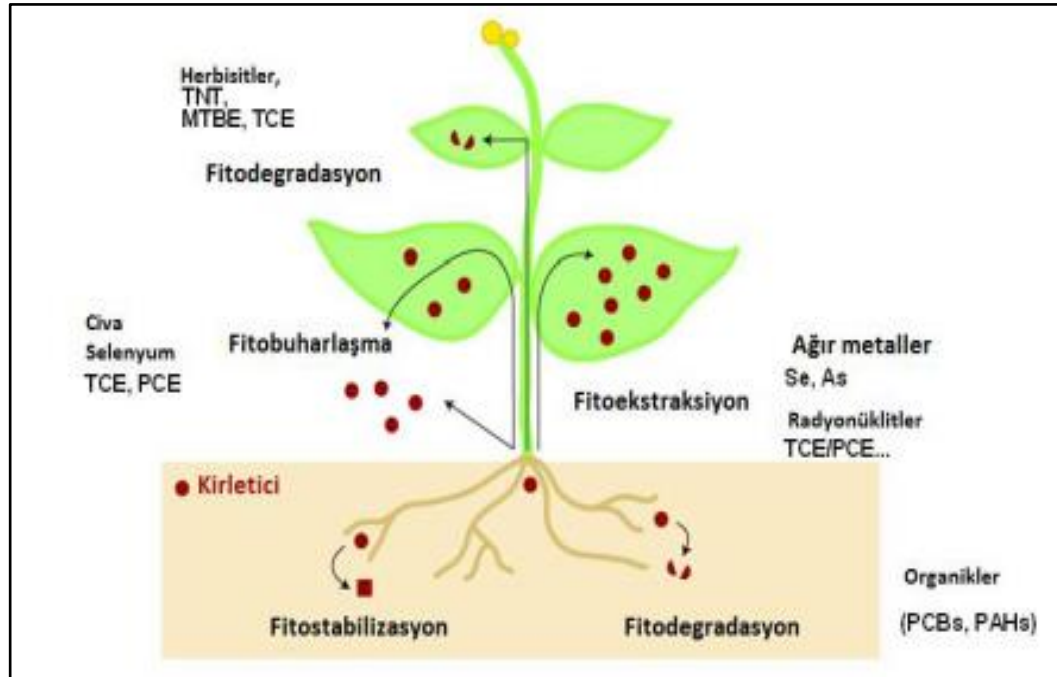
kökleri ve yaprakları sayesinde tutmaktadır. Su altında gelişen köklü bitkiler suda olduğu kadar sedimanlarda da metalleri ekstrakte etme potansiyeline sahiptir (Sheoran 2006).

2.1 Fiteremediasyonun Mekanizmaları

Fitoremediasyon sürecinde birçok farklı mekanizma yer almaktadır. Fitoremediasyon yöntemindeki mekanizmalar aşağıda sıralanmış, görsel olarak ta Şekil 2.1’de verilmiştir (Yapaar ve diğ. 2008).

- Fitoekstraksiyon
- Fitodegradasyon
- Fitobuharlaşıma
- Rizofiltrasyon
- Fitostabilizasyon

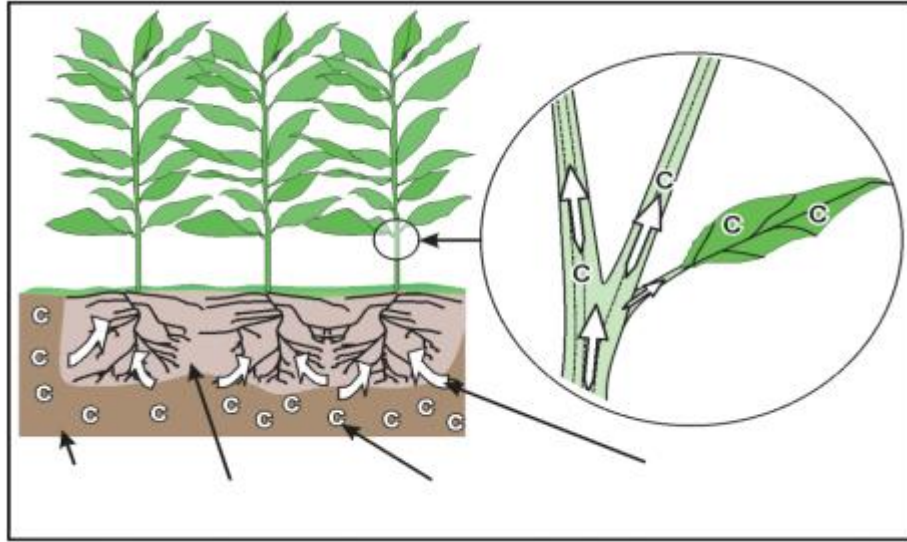
Fitoremediasyon ile giderim sürecinde uygun mekanizmaya göre uygun bitki türlerinin seçilmesi önemlidir.



Şekil 2.1: Fitoremediasyon mekanizmaları.

2.1.1 Bitkisel Özümleme (Fitoekstraksiyon)

Kirleticilerin toprak ve sudan bitki kökleri veya sürgünleri tarafından alınmasıdır (Yıldız 2011; Ali ve diğ. 2013). Kirliliğin dağılık olduğu alanların iyileştirilmesinde oldukça etkili bir yöntemdir (Yaapar ve diğ. 2008). Kirlenmiş bölgeye dikilen bitkinin hasatı ile kirlilik ortamdan uzaklaştırılmış olur (Şekil 2.2). Hasatı yapılan bu kısımlar gübre olarak kullanılabileceği gibi içeriğindeki ağır metaller tekrar kazanılabilir. Bitkisel madencilik (phytomining) denilen bu yöntem; işlenerek çıkarılması ekonomik olmayan maden cevherlerinin elde edilebilmesi yolunu açmaktadır. Bu yöntemle altın ve nikel gibi değerli elementler geri kazanılmaktadır. Bu teknoloji daha çok ağır metallerle kirlenmiş topraklarda uygulanmaktadır (EPA 2000).

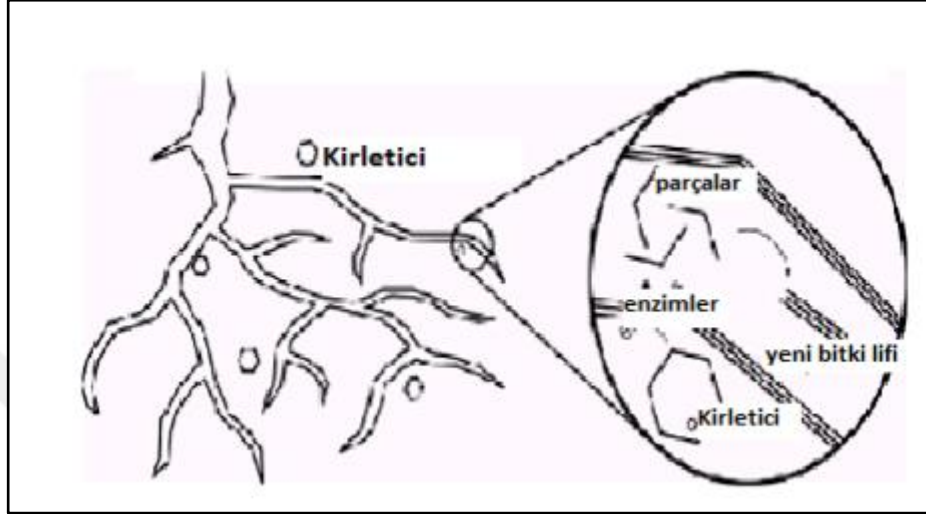


Şekil 2.2: Fitoekstraksiyon.

2.1.2 Bitkisel Parçalanma (Fitodegradasyon)

Bitkisel parçalanma, kirleticilerin bitki bünyesine alınarak metabolik faaliyetler esnasında bitkiler tarafından üretilen enzimler gibi bileşiklerin etkisiyle bozunması yöntemidir (Şekil 2.3). Bozunma işlemi bitkinin dışarıya verdiği bileşiklerle bitki dışında da olabilmektedir. Fitoremediasyon işleminde bitkinin, kirleticileri bünyesine alması beklenmektedir. Bu işlem özellikle kök bölgesi ve yaprak kısımları ile sınırlıdır (EPA 2000; Yapaar ve diğ. 2008).

Yöntemin en önemli avantajı indirgenme veya bozulmanın fizyolojik olaylar doğrultusunda bitki içinde olması ve mikroorganizmalara bağlı olmamasıdır. Yöntemin dezavantajı ise bozulma sırasında zehirli ara ve son ürünler oluşabilmesi ve bunların çok zor tespitidir. Fitodegradasyon yöntemiyle giderilebilen kirleticiler; klorlu bileşikler, pestisitler, askeri kimyasal maddeler ve fenollerdir (EPA 2000).



Şekil 2.3: Fitodegradasyon.

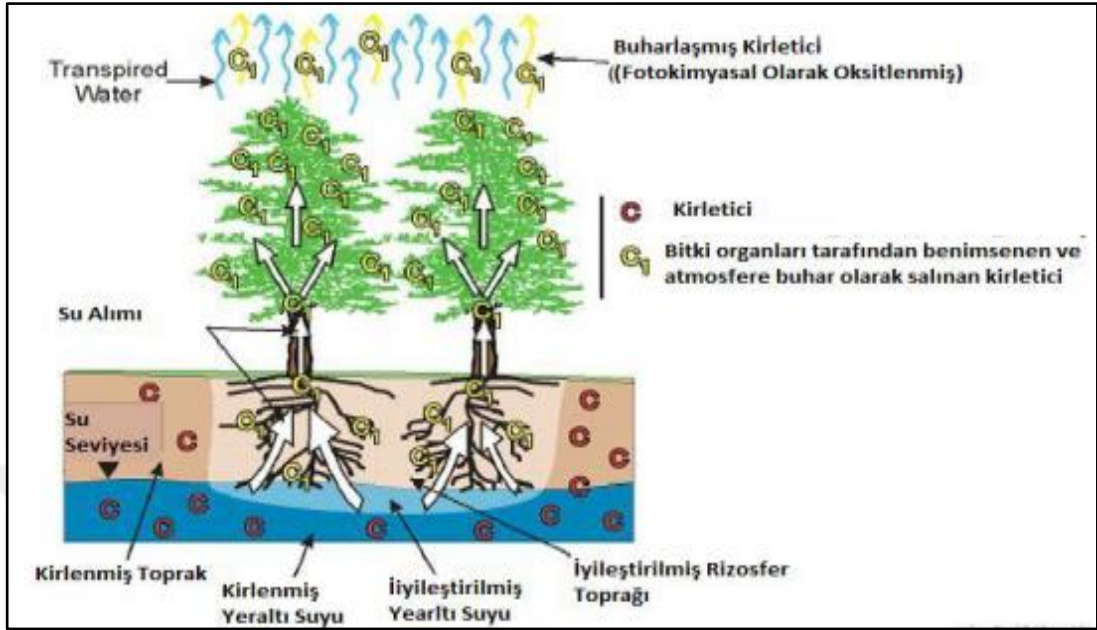
2.1.3 Bitkisel Buharlaşma (Fitobuharlaşma)

Fitobuharlaşma, organik ve inorganik kirleticilerin bitki bünyesine alınarak, yapısının atmosfere verilecek şekilde değiştirilmesi ve atmosfere verilmesidir (Yapaar ve diğ. 2008).

Bitkisel buharlaşma yöntemi ile civalı bileşikler gibi çok zehirli bileşiklerin daha az zehirli bileşiklere dönüştürülmesi avantaj olarak kabul edilirken, çok zararlı bileşiklerin atmosfere verilmesi ise dezavantaj olarak değerlendirilmektedir (Pilon-Smits ve Freeman 2006).

Bu sistemde kök derinliği çok önemlidir. Fitobuharlaşma yöntemi ile yeraltı suları başta olmak üzere toprak, sediment ve çamur alanlarından kirleticilerin giderilmesi mümkündür. Bu yöntemin uygulanabildiği kirleticiler arasında, organik

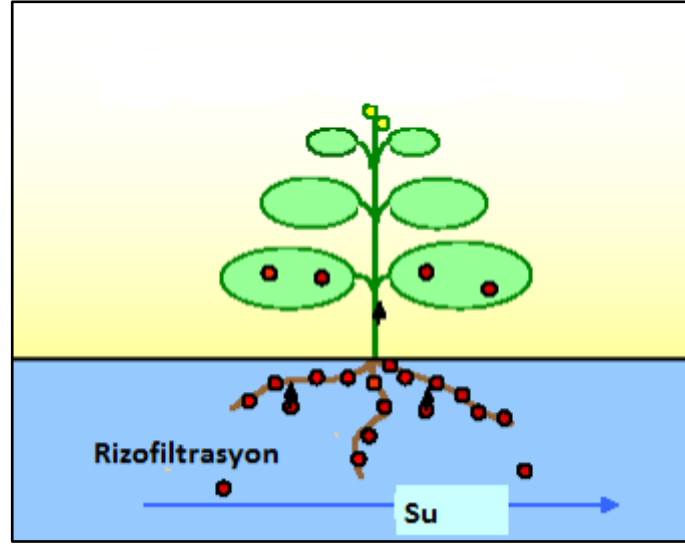
klorlu çözücüler ve Se, Hg ve As gibi inorganik kirleticiler yer almaktadır (EPA 2000).



Şekil 2.4: Fitobuharlaşma.

2.1.4 Köklerle Süzme (Rizofiltrasyon)

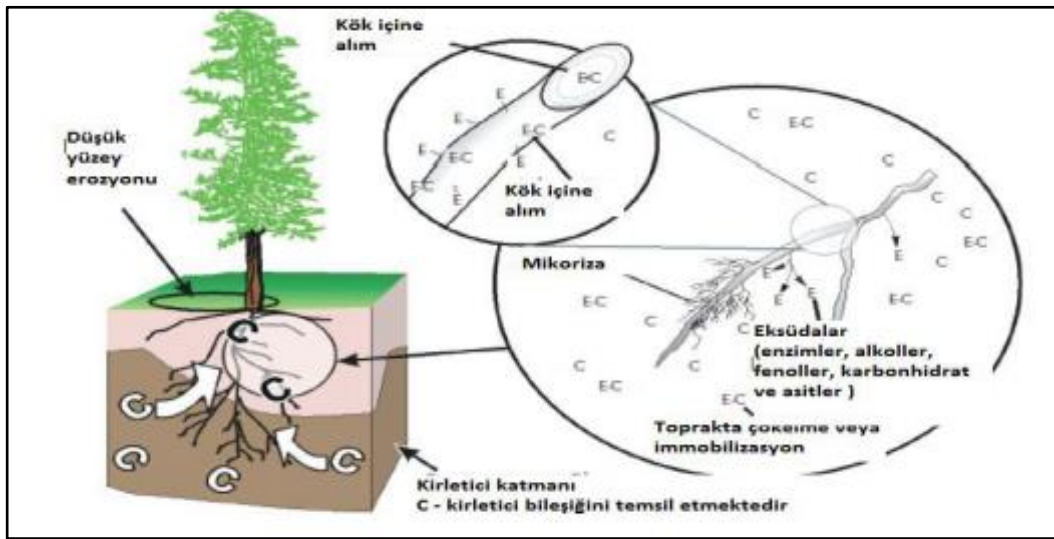
Rizofiltrasyon (köklere süzme) kirleticilerin köklerin içine alınması ya da bitki köklerinin üzerine adsorpsiyonudur (Şekil 2.5). Bu yöntemde temel olan kirleticilerin bitki üzerinde veya içinde tutulması ve daha sonra çeşitli yollarla bitkiden alınmasıdır. Karasal ya da sucul bitkiler kullanılabilir, ayrıca sistem doğal ortamlarda uygulanabilirliğinin yanısıra havuz, tank, gölet gibi yapay alanlarda da uygulanabilir. Bu yöntem az kirlenmiş büyük hacimli suların temizlenmesinde daha çok kullanılır (Yapaar ve diğ. 2008). Bu yöntem ile Pb, Cd, Cu, Ni, Zn, Cr gibi ağır metaller, Uranium (U), Cesium (Cs) ve Strontium (Sr) gibi radyonükleidler giderilebilmektedir (EPA 2000).



Şekil 2.5: Rizofiltrasyon.

2.1.5 Köklerle Sabitleme (Fitostabilizasyon)

Köklere sabitleme toprak, sediment ve çamurda uygulanabilmektedir (Şekil 2.6) (Yapaar ve diğ. 2008). Bu yöntem ile bitki köklerinin kirleticilerin hareketinin engellenmesi hedeflenir. Kirlenmiş karasal arazileri stabilize etmek ve geri kazanmak için bitkilerin kullanımını içerir. Bitki kökleri aynı zamanda toprakta pH ve toprağın nem içeriği gibi şartları da değiştirmektedir (Rai 2009; Rajakaruna ve diğ. 2006).



Şekil 2.6: Fitostabilizasyon.

Fitostabilizasyonun en önemli dezavantajı kirlilik etmenlerinin alanda kalarak birikmesi ve yıkanarak taban suyuna karışabilmesidir. Kök derinliği sistemin etkinliği bakımından çok önemlidir (EPA 2000).

2.2 Fitoremediasyon Verimliliğini Etkileyen Faktörler

Kirlenmiş bir bölgenin ıslahı için fitoremediasyonun uygun bir alternatif olup olmadığını belirlemek için göz önünde bulundurmanız gereken hususları şu şekilde sıralayabiliriz:

- Kirlenmiş ortamın özellikleri,
- Kirlenici maddenin tipi ve konsantrasyonu ile kirlenmiş bölgede bitkinin yetiştirme potansiyeli.

Fitoremediasyon genellikle kirlenmiş toprak veya yeraltısuyu alanının bitkilendirilmesiyle yerinde uygulanmaktadır. Aynı zamanda, toprak kazılarak ıslahın uygulanacağı bir arıtım ünitesine taşınabilmektedir.

Kirlenici konsantrasyonunun fitotoksik olup olmadığını belirlemek için bir literatür araştırması ile öncelikli laboratuvar çalışması veya pilot ölçekli bir arazi çalışmasının yapılması gerekmektedir. Aynı zamanda, maliyet ve arıtım süresi de konsantrasyon kadar göz önünde bulundurulması gereken konulardır. Buna ek olarak toksisite araştırmaları, bitkilerin ağır metallerle karşı mikroorganizmalardan daha az hassas olduğunu göstermiştir. Bu nedenle biyoremediasyonun başarısız olduğu durumlarda fitoremediasyonun etkili olması mümkündür (USEPA 2000).

2.3 Akuatik Makrofitler

Makrofitler gözle görülebilecek büyüklükte, akuatik ortamlarda yaşayan fotosentetik organizmalar olarak adlandırılmaktadır. Sucul makrofitler tohumlu bitkiler, algler, eğrelti otları ve akuatik karayosunları gibi farklı taksonomik grup içermektedir (Wetzel 2011).

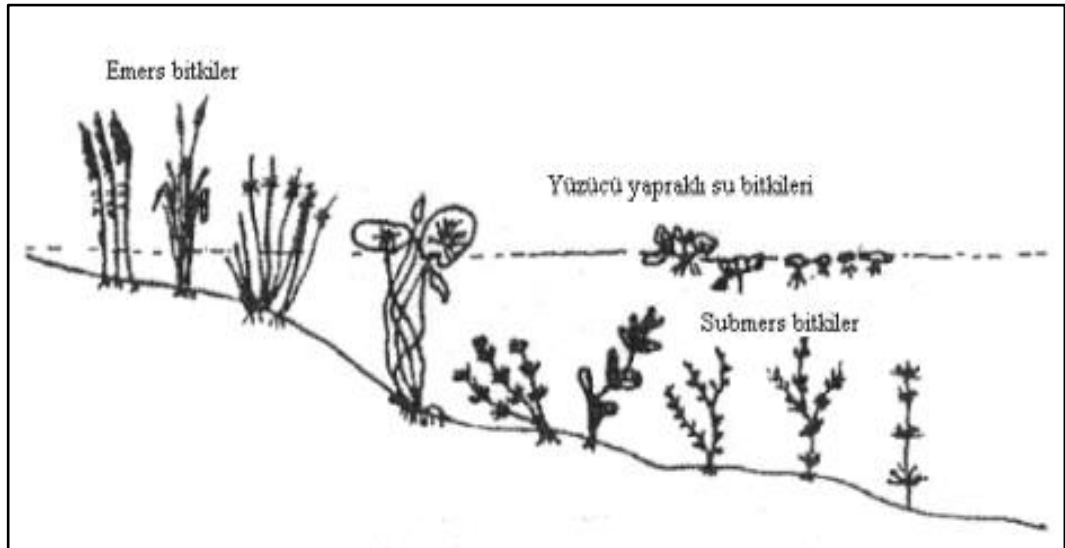
Su bitkileri, bulundukları ortamları, formları, gelişim özellikleri, biçim ve boyutları gibi özellikleriyle sulak alanlarda sınıflandırılır. Yüzen sucul bitkiler iki tipte gelişir: bir çeşidi kökleriyle sediment tutunur ve yaprakları su yüzeyinde yüzer, diğer çeşidi de sedimentle alakalı değildir ve yüzey suyunda serbest yüzer (Kırım ve diğ. 2014). Akuatik makrofitler su yüzeyine göre pozisyonları dikkate alınarak; emers, submers ve serbest yüzen olmak üzere üç gruba ayrılır:

1. Yaprakları su yüzeyinde (emers) yüzen sucul bitkiler. Örnek olarak *Phragmites* spp., *Typha* spp. ve bazı *Potamogeton* spp. bitki türleri verilebilir.

2. Tamamen su altında yaşayan (submers) bitkiler. Submers'in bazı türleri su içinde özgür olarak yüzerler, bazıları ise kökleri ile tabana tutunmuş şekilde yaşarlar. Örnek olarak *Ceratophyllum demersum* ve *Myriophyllum spicatum* bitki türleri verilebilir.

3. Kökleri su altındaki veya çamur tabanına tutunmuş bir şekilde, yapraklarının çoğu ile çiçekleri ise su yüzeyinde bulunan bitkiler. Örnek olarak *Eichhornia crassipes*, *Pistia stratiote* ve *Lemna* spp. bitki türleri verilebilir.

Submersler tümüyle su altında yaşarken mers bitkiler kıyılarda kökleri suyun tabanında olup diğer organlarının bir kısmı suyun üzerinde olan bitkilerdir. Şekil 2.7'de su bitkilerinin bölgelere göre dağılımları verilmiştir (Cirik 2004).



Şekil 2.7: Su bitkilerinin bölgelere göre dağılımı.

Sucul makrofitler karasal bitkilere göre daha yüksek bir büyüme hızına, biyokütle üretimine ve yüksek emilim kapasitesine sahip oldukları için daha avantajlı olarak kabul edilmektedirler (Aurangzeb ve diğ. 2014).

Akuatik makrofitlerin dezavantajları şu şekilde sıralanabilir:

- Çoğaldıklarında ölme ve çürümeleri neticesinde su ünitelerinde organik madde artışı görülür, parçalandıklarında ise oksijen tüketimine yol açarlar.
- Su yüzeyini kaplayarak ışığın geçişini buna bağlı olarakta fotosentezi azaltırlar. Bu durumda, fotosentezin ve atmosferden oksijen geçişinin azalmasına bağlı olarak sucul ortamda çözünmüş oksijen azalır, anaerobik şartlar oluşabilir.
- Balık yetiştiriciliği, avcılığı ve rekreasyonel açıdan problem oluşturabilirler.

Makrofitlerin bir su kütleinde bulunuşunu ışık, sıcaklık, pH, tuzluluk, basınç, su hareketi ve sediment yapısı gibi faktörler etkilemektedir.

2.4 Hiperakümülatörler

Bitkilerin metal depolama kapasiteleri ve metal toksisitesine karşı dirençleri fitoremediasyonda büyük önem taşımaktadır.

Hiperakümülatörler yüksek konsantrasyonlarda ağır metal içeren toprak ya da sucul ortamlarda yaşayabilen ve ağır metalleri kökleri aracılığı ile alarak diğer dokularında biriktirebilen bitkilerdir. Hiperakümülatör bitkilerde, kökler topraktan ağır metalleri yüksek bir miktarda alır ve gövdeye iletir, böylece yapraklarda yüksek miktarlarda depolanabilir (Rascio ve diğ. 2011).

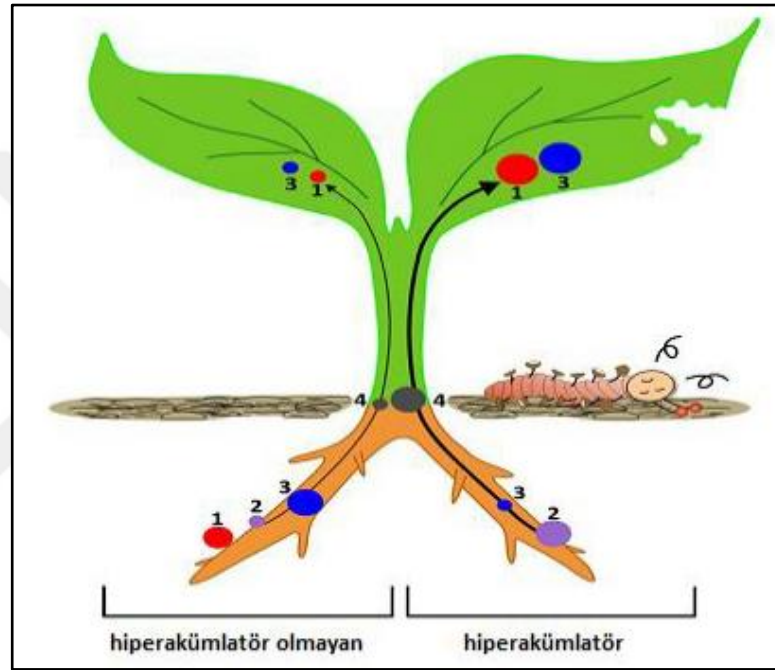
Hiperakümülatörler en çok ılıman ve tropikal bölgelerde bulunmaktadır ama genellikle mineralli toprak ve kaya türleri üzerinde büyüyen endemik bitki türleri ile sınırlıdır (Nazir ve diğ. 2011). Tablo 2.1’de Türkiye’de rastlanan bazı hiperakümülatör bitkiler verilmiştir (Davis ve diğ. 1988; Güner ve diğ. 2000).

Tablo 2.1: Türkiye’de rastlanan bazı hiperkümülatör bitkiler.

Familiya	Tür	Lokasyon
Amaranthaceae	<i>Amaranthus retroflexus</i> L.	Batı Karadeniz, Orta Anadolu
Betulaceae	<i>Betula pendula</i> Roth.	Doğu Anadolu, Trabzon, Erzurum, Çoruh ve Kars
Brassicaceae	<i>Arabidopsis thaliana</i> Heynh.	Kuzey Türkiye’de 1800 metreye kadar, Güneydoğu
Brassicaceae	<i>Brassica napus</i> L.	Anadolu
Brassicaceae	<i>Isatis pinnatifolia</i> P. H. Davis.	Çayırılık alanlar
Caryophyllaceae	<i>Minuartia hirsuta</i> L.	Batı Akdeniz
Caryophyllaceae	<i>Minuartia verna</i> L.	Orta ve Kuzey Anadolu
Caryophyllaceae	<i>Silene compacta</i> L.	Kırklareli, Gümüşhane, Kars
Convolvulaceae	<i>Calystegla sepium</i> L.	Ege, Marmara, Orta Anadolu ve Antalya civarı
Cyperaceae	<i>Carex echinata</i> L.	Kuzeydoğu Anadolu, Marmara bölgesine Denizli civarı
Cyperaceae	<i>Eriophorum angustifolium</i> L.	Bursa, Ordu, Rize, Kütahya
Euphorbiaceae	<i>Ricinus communis</i> L.	Doğu Anadolu ve Kars
Fabaceae	<i>Melilotus officinalis</i> L.	Çanakkale, Antalya, İstanbul
Fabaceae	<i>Trifolium pratense</i> L.	Ege, Orta ve Doğu Anadolu
Fabaceae	<i>Trifolium repens</i> L.	Çayırılık alanlar
Geraniaceae	<i>Pelargonium</i> L.	Çayırılık alanlar
Malvaceae	<i>Gossypium hirsutum</i> L.	Orta ve Güney Anadolu
Oleaceae	<i>Fraxinus angustifolia</i> L.	Ege ve Akdeniz bölgesi
Onagraceae	<i>Epilobium hirsutum</i> L.	Batı, Orta ve Güney Anadolu
Plumbaginaceae	<i>Armeria maritima</i> Wild.	Kuzey, Orta Anadolu, Erzurum, Antalya ve Siirt
Poaceae	<i>Agrostis capillaris</i> L.	İstanbul
Poaceae	<i>Agrostis stolonifera</i> L.	Genelde Anadolu’nun kuzey kısımları, çoğunlukla Kastamonu, Ilgaz, Amasya ve Ordu’da 1950 metreye kadar, Kayseri
Poaceae	<i>Anthoxanthum odoratum</i> L.	Marmara, Doğu Karadeniz, Ege, Orta ve Güney Anadolu
Poaceae	<i>Brachypodium sylvaticum</i>	Batı ve Güney Anadolu
Poaceae	<i>Bromus ramosus</i> Hudson.	Marmara, Karadeniz bölgesi, Hatay, Mardin ve Maraş
Poaceae	<i>Cynodon dactylon</i> L.C.M.	Batı ve Kuzey Doğu Anadolu, Akdeniz ve Orta Anadolu
Poaceae	<i>Danthonia decumbens</i> L.	Türkiye’nin kuzey kısımları
Poaceae	<i>Deschampsia caespitosa</i>	Kuzey Anadolu, Karadeniz, Bölgesi, Van, Adana, Hakkari
Poaceae	<i>Festuca rubra</i> L.	Batı Anadolu
Poaceae	<i>Holcus lanatus</i> L.	Kuzey ve Batı Anadolu
Poaceae	<i>Hordelymus europaeus</i> L.	Kuzey Anadolu
Poaceae	<i>Lolium multiflorum</i> L.	Kuzey Anadolu, Marmara, Maraş ve Erzurum
Poaceae	<i>Nardus stricta</i> L.	Kuzey Batı, Kuzey Doğu ve Orta Anadolu
Portulacaceae	<i>Portulaca oleracea</i> L.	Çayırılık alanlarda
Salicaceae	<i>Populus tremula</i> L.	Ege, Orta ve Doğu Anadolu
Salicaceae	<i>Salix viminalis</i> L.	İstanbul
Solanaceae	<i>Solanum nigrum</i> L.	Anadolu
Violaceae	<i>Viola arvensis</i> L.	İstanbul, İzmir ve Trabzon

Hiperakümülatör bitkiler metalleri toprak üstü organlarında diğer bitkilere kıyasla çok daha yüksek konsantrasyonlarda depolayabilirler. Hiperakümülatör türler genellikle yüksek metal içeriği konusunda özellikle madencilik alanında indikatör bitki olarak kullanılabilir.

Metal alım potansiyeli etkili düzeylerde olan hiperakümülatörlerin çoğu küçük biyokütle ve yavaş büyüme hızına sahiptirler. Bu nedenle büyük ölçekli uygulamalarda bu bitkilerin performansları yavaştır (Glick 2010).



Şekil 2.8: Hiperakümülatör olmayan (sol) ve hiperakümülatör (sağ) bitkilerin ağır metal alım mekanizması: (1) Ağır metalin hücre duvarına bağlanması; (2) Kök alımı; (3) Sitazol içinde bağlanma; (4) Kökten gövdeye translokasyon. Noktalar farklı mekanizmaların geliştiği bitki organlarını, nokta boyutları ise onların seviyesini göstermektedir (Rascio ve Navari-Izzo, 2011).

3. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde ağır metallerin ya da besin maddelerinin (azot ve fosfor) hem sentetik olarak hazırlanmış tekli ya da çoklu çözeltilerden hem de gerçek atıksudan giderilmesine yönelik çalışmalara rastlanılmaktadır.

Maine ve diğ. (2000) 4 farklı makrofitin (*Salvinia herzogii*, *Pistia stratiotes*, *Hydromistia stolonifera* ve *Eichhornia crassipes*) 4 farklı kadmiyum konsantrasyonuna karşı (1, 2, 4 ve 6 ppm) emilim kapasitelerini ölçmüşlerdir. Araştırmanın sonucunda en çok emilimin ilk 24 saatte *P. stratiotes* bitkisi tarafından gerçekleştirildiği tespit edilmiştir.

Odjegba ve Fasidi (2004) yaptıkları çalışmada *Pistia stratiotes* bitkisini kullanarak 21 gün boyunca toksik 8 eser elementin (gümüş, kadmiyum, krom, bakır, civa, nikel, kurşun ve çinko) biyosorbsiyonunu incelemişlerdir. Çalışma sonucunda bitkinin çinkoya karşı yüksek toleranslı, cıvaya karşı düşük toleranslı olduğunu tespit etmişlerdir.

Mishra ve Tripathi (2008) 15 gün boyunca 3 farklı makrofiti (*Pistia stratiotes*, *Spirodela polyrrhiza* ve *Eichhornia crassipes*) 3 farklı konsantrasyonda (1, 2 ve 5 ppm) 5 ağır metal içeren karışıma (demir, çinko, krom ve kadmiyum) maruz bırakarak bu bitkilerin ağır metallerin uzaklaştırılmasındaki etkililiğini araştırmışlardır. Araştırma sonucunda bu bitkilerin bütün bu ağır metallere karşı geniş bir direnç statüsüne sahip oldukları görülmüştür. Bu bitkilerin atıksuların ağır metal arıtımında kullanımı önerilmiştir.

Mishra ve diğ. (2009) 2 farklı makrofitin (*Pistia stratiotes* ve *Azolla pinnata*) kömür madeninin akıntısındaki cıvayı ortamdan uzaklaştırabilme kapasitelerini gözlemlemişlerdir. Sonuç olarak 21 günün sonunda 10 µg/L cıva içeren suyun %80 oranında *P.stratiotes* ve %68 oranında *A.pinnata* tarafından emilimi saptanmıştır.

Mufarrege ve diğ. (2010) krom, nikel, çinko ağır metallerine ve fosfora maruz bırakılan *Pistia stratiotes* bitkisinin, kök anatomik yapısı, büyümesi ve klorofil a

konsantrasyonundaki değişiklerini gözlemlemişlerdir. Sonuç olarak krom, nikel ve çinko ağır metallerin karışımına, fosfor ilavesi yapılan deney grubuna maruz bırakılan bitkinin ağır metallere karşı daha çok toleranslı bir hal aldığı fakat bitki ve kök büyümesinin kontrol grubuna göre oldukça yavaşladığı görülmüştür.

Lu ve diğ. (2010) *Pistia stratiotes* bitkisinin fosfor ve azot emilimlerini 2 yıl boyunca in-situ olarak araştırmışlardır. Çalışma boyunca pH, elektriksel iletkenlik, bulanıklık, askıda katı maddeler ve besin maddeleri devamlı olarak ölçülmüştür. Araştırmanın sonucu bu bitkinin ötrofik göllerde besin madde emiliminde çok etkili olabileceğini göstermiştir.

Lu ve diğ. (2011) *Pistia stratiotes*'in ağır metal emilimini ex-situ ortamda incelemişlerdir. Sonuç olarak bu bitkinin Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb ve Zn için hiper akümülatör olduğunu bulmuşlardır.

Vesely ve diğ. (2011) kadmiyum ve kurşun emilimlerini 4 farklı makrofitte (*Pistia stratiotes*, *Salvinia auriculata*, *Salvinia minima* ve *Azolla filiculoides*) incelemişlerdir. Ayrıca 14 gün boyunca bitkinin klorofil içeriklerine ve terleme hızlarına bakılarak, kadmiyum (9,5 ve 10,5 ppm) ve kurşunun (25 ve 125 ppm) bitkide yarattığı stres belirtileri incelenmiştir. Sonuç olarak bu bitkilerin her iki elemente karşı yüksek emilime sahip olduğu gösterilmiştir. Ayrıca kurşuna maruz kalan bitkilerde terleme oranında düşüş gözlemlenirken kadmiyuma maruz kalan bitkilerde ilk 48 saatte terleme oranında önemli bir yükseliş gözlemlenmiştir.

Espinoza-Quinones ve diğ. (2009) *Pistia stratiotes*'te Cd ve Pb alımını incelemişler ve ilk 24 saatten sonra sıvı fazda Pb konsantrasyonunda %50'lik bir azalma tespit etmişlerdir. Kadmiyum birikimi, 5 mg/L konsantrasyonda 8. günde yapraklarda 223 mg/kg ve 14. günde köklerde 1315 mg/kg olarak tespit edilmiştir. Birinci gün *P. stratiotes*'te Pb 25 mg/L ve 125 mg/L konsantrasyonlar için sırasıyla 506 mg/kg ve 11458 mg/kg olarak hesaplanmıştır. Sonuç olarak ağır metal konsantrasyonları arttıkça, bitki dokularındaki ağır metal birikiminin de arttığı tespit edilmiştir.

Nurhayati ve diğ. (2012) çalışmalarında 20 ppm çinko konsantrasyonu içeren sızıntı suyunda *Pistia stratiotes*'in çinko alımını araştırmışlardır. Bu çalışmada

rejenerasyonlu ve rejenerasyonsuz olmak üzere iki yöntem kullanılmıştır. Bunlardan rejenerasyonlu yöntemde, *Pistia stratiotes* her gün yenisiyle değiştirilmiştir. *Pistia stratiotes* hazırlanan çözeltiliye eklenerek 4 gün beklenmiştir. Günde bir kez çinko konsantrasyonu ölçümü yapılmıştır. Rejenerasyonsuz yöntemde dördüncü gün sonunda alınan çinko konsantrasyonu 17,9971 ppm ve emilen çinko yüzdesi %10,0147 olarak hesaplanmıştır. Rejenerasyonlu yöntemde birinci günde alınan çinko konsantrasyonu 7,9420 ppm (%60,29), ikinci günde 5,3879 ppm (%73,0605), üçüncü günde 2,9013 ppm (%85,4935) ve dördüncü günde 2,4295 ppm (%87,8525) olarak ölçülmüştür.

Ugya ve diğ. (2015) çalışmalarında Kaduna Rafineri ve Petrokimya Şirketi'nden çıkan atıksularla kirlenmiş bir dereден bazı ağır metallerin (Hg, Cd, Mn, Ag, Pb, Zn) giderilmesinde *Pistia stratiotes* kullanımı ile ilgili laboratuvar deneyleri yapmışlardır. İlk 48 saat kadar hızlı alım ve 120 saat sonra kademeli olarak denge görülmüştür. Elde edilen sonuçlara göre *Pistia stratiotes*'in metalleri biyoakümülyasyona uğratarak Hg ve Ag'yi bitki kökleriyle yüksek oranda atık sulardan uzaklaştırma verimliliği olduğu tespit edilmiştir.

Lu ve diğ. (2018) suda bulunan besin maddelerini uzaklaştırmak amacıyla 3 farklı bitkinin arıtım kapasitesini incelemişlerdir. 28-30 °C sıcaklıkta azot arıtımında en yüksek değer %89,4 ile *Eichhornia crassipes* bitkisinde fosfat için ise en yüksek değer *Pistia stratiotes* bitkisinde %93,6 olarak belirlenmiştir. Bu iki bitkinin azot giderimindeki başarıları gelişmiş kökleri sayesinde ve mikrobiyal denitrifikasyon/nitrifikasyona bağlı olduğu *Myriophyllum spicatum* bitkisi ile karşılaştırılarak gösterilmiştir.

Yin Sim ve Chan (2017) yaptığı çalışmada *Salvinia molesta* bitkisini palm yağı fabrikasının atıksuyuna 16 gün boyunca maruz bırakmıştır. Arıtım sonucunda atıksudaki fosfat %95 oranında, nitratta önemli ölçüde arıtılmıştır. Ayrıca suyun bulanıklığı 7,56 NTU'dan 0,94 NTU'ya düşmüştür.

Mukherjee ve diğ. (2015) bir imalathanenin atıksuyuna *Pistia stratiotes* bitkisini maruz bırakarak, bu bitkinin su değerlerindeki özellikle amonyak, nitrat ve fosfat değerlerindeki değişimler gözlemlenmiştir. Sonuç olarak sırasıyla %98, %70 ve %65 olarak bir arıtım görülmüştür.

Victor ve diğ. (2016) atıksuyun toksikliğini *Pistia stratiotes* ve *Eichhornia crassipes* bitkilerinin arıtmadan önce ve arıtmadan sonra *Sarotherdon melanotheron* balık türü üzerinde denemişlerdir. Çalışmanın sonucu *Eichhornia crassipes* tarafından arıtılan suda yaşayan balıkların ömrünün 24 saatten fazla olduğunu göstermiştir.



4. MATERYAL VE METOD

Bu çalışmada *Pistia stratiotes* (su marulu) ve *Salvinia natans* (su eğretilisi) bitkilerinin sucul ortamlarda en sık rastlanan ağır metallere olan kurşun, nikel ve bakır alım performansı incelenmiştir. Deneysel çalışmalar Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Çevre Mühendisliği Bölümü Laboratuvarında yürütülmüştür.

Daha önceki çalışmalar gözönünde tutularak çalışmada kullanılan ağır metallerin konsantrasyonları 5 mg/L - 30 mg/L aralığında, temas süresi ise 1 gün (24 saat) - 6 gün (144 saat) olarak belirlenmiştir.

Çalışmalarda kullanılan bitkiler Antalya ilinin Kepez bölgesinde bulunan akvaryum bitkileri üreten özel bir serasından temin edilmiştir. *Pistia stratiotes* ve *Salvinia natans* bitkilerinin yeşil ve sağlıklı olan bireyleri, yaprak sayıları ve kök uzunluklarına dikkat edilerek benzer olanları seçilmiştir. Ağır metal çözeltileri öncelikle 1 g/L konsantrasyonda stok çözelti olarak hazırlanmıştır. Fitoremediasyon çalışmaları stok çözeltilerden seyreltilerek hazırlanmış 500 mL'lik çözeltiler ile doldurulmuş 600 mL'lik cam beherlerde yapılmıştır. Stok çözelti hazırlama ve seyreltme işlemlerinde deiyonize su kullanılmıştır.

4.1 Çalışmada Kullanılan Bitkiler

Bitki seçimi yapılırken bitkilerde aşağıdaki özelliklerin bulunmasına dikkat edilmiştir (Gupta ve diğ. 2012).

- Bakım ihtiyacının laboratuvar şartlarına uygun olması;
- Işık ihtiyacının düşük olması;
- Sert sularda ve değişik pH değerlerinde yaşayabilmeleri;
- Sonuçların diğer çalışma sonuçlarıyla kıyaslanabilir olması;
- Bakım ihtiyacının az olması;
- Az hacme sahip sularda yaşayabilmeleri;
- Metal alım kapasitelerinin yüksek olması

Bu parametreler ve yapılan literatür araştırmaları sonucu üzerinde daha az çalışma yapılmış, metal alım kapasiteleri yüksek, farklı ortam şartlarına dayanıklı ve ülkemizde de yetiştirilebilen *Pistia stratiotes* ve *Salvinia natans* bitkileri fitoremedisyon çalışmaları için uygun görülmüştür.

Düzgün boyutta olan ve herhangi bir görsel bozulmaya uğramamış (turgor kaybı, kloroz ve/veya yaprak nekrozu) bitkiler deneysel çalışmalar için seçilmiştir. Tablo 4.1’ de *Pistia stratiotes* ve *Salvinia natans* bitkilerinin bazı özellikleri verilmiştir (www.akvaryumda.com. 2019a, 2019b).

Tablo 4.1: *Pistia stratiotes* ve *Salvinia natans* bitkilerinin özellikleri.

Özellikleri	<i>Pistia stratiotes</i>	<i>Salvinia natans</i>
Alem	Plantae	Plantae
Bölüm	Spermatophyta	Pteridophyta
Sınıf	Monocotyledonae	Polypodiopsida
Takım	Arales	Salvinales
Familiya	Araceae	Salvinaceae
Tür	<i>Pistia stratiotes</i> L.	<i>Salvinia natans</i> (L.) All.
Habitat	Kozmopolit	Asya
Uzunluk	Köküyle beraber bitki uzunluğu bir metre dolaylarını bulabilir. Ancak küçükken sadece birkaç cm boyunda olmaktadır.	1-3 cm
Optimum sıcaklık	12-30 °C	12-30 °C
Işık toleransı	Orta - Çok yüksek	Yüksek - Çok yüksek
Uygun su sertliği	Orta- Sert	Yumuşak- Orta- Sert
pH toleransı	5,0 – 8,0	5,5 – 9,0
Gelişim hızı	Yavaş	Orta
Bakım ihtiyacı	Orta	Orta

Deneysel çalışmalarda mümkün olduğu kadar birbirine yakın büyüklükte, kütlede, yaprak sayısında ve kök uzunluğunda bitkiler kullanılmaya çalışılmıştır. Tablo 4.2’de *Pistia stratiotes* ve *Salvinia nata* bitkilerinin deneyler öncesi ölçülen bazı fiziksel özellikleri verilmiştir.

Tablo 4.2: *Pistia stratiotes* ve *Salvinia natans* bitkilerinin ölçülen bazı fiziksel özellikleri.

Fiziksel Özellikleri	<i>Pistia stratiotes</i>	<i>Salvinia natans</i>
Kütle (g)	4,7 ± 0,2	1,1 ± 0,1
Kök uzunluğu (cm)	17 ± 0,5	3,7 ± 0,2
Yaprak sayısı (adet)	6,5 ± 0,5	9,5 ± 0,5
Yaprak uzunluğu (cm)	4,1 ± 0,1	1,4 ± 0,1
Yaprak eni (cm)	2,6 ± 0,1	1,5 ± 0,1

4.1.1 *Pistia stratiotes*

Su marulu olarak adlandırılan *Pistia stratiotes* (Şekil 4.1) Aracea familyasına bağlı çok yıllık ve serbest yüzen, gövdesiz, stolonlu ve saçak köklere sahip bir bitkidir (Tackholm 1974). Tropik ve sub-tropik sularda yayılım gösterir. *Pistia stratiotes* esasen asidik ortamlarda daha iyi gelişim göstermekle birlikte geniş bir sıcaklık ve pH aralığında gelişebilir. Yüzücü olduğu, hızlı büyüme gösterdiği, kolay hasat edilebildiği ve bünyesinde yüksek oranda kirletici biriktirebildiği için atıksularda kirletici maddelerin gideriminde sıklıkla kullanılmaktadır (Das ve diğ. 2014; Galal ve Farhat 2015).



Şekil 4.1: *Pistia stratiotes* bitkisi (Su marulu).

Biyolojik özelliklerine bakacak olursak; *Pistia stratiotes* suda serbest yüzen, rozet yaprakları sapsız ve stolonlu bir bitkidir. Yaprakları soluk yeşil, 20 cm'ye kadar uzayabilen, 10 cm'ye kadar da genişleyebilen çoğunluk spatula şekilli veya

geniş ters oval yapılıdır. Yaprığın her iki yüzü özellikle alt yüzü yoğun yünsü beyaz tüylerle kaplıdır (Holm ve diğ. 1977; Sainty ve Jacobs 1981). Hem vejetatif hem de generative üreme şeklinde çoğalır. Vejetatif üremeyi stolonları yardımıyla yapar.

Pistia stratiotes 15 °C-35 °C arasında yaşayabildiği için dünyanın bir çok tatlı su sisteminde bulunabilmektedir. Bu bitkinin optimum büyüme ısı 22 °C ile 30 °C arasındadır. Akvaryum şartlarında bitki çapı 5-6 cm'ye kadar genişleyebilmektedir. Yüksek ışık seven bu bitki yan tarafından verdiği sürgünler ile kolayca çoğalır.

4.1.2 *Salvinia natans*

Su yüzeyinde veya su içinde yaşayan sucul bitkilerdir. Salviniaceae familyasındandır. Akarsu, göl ve bataklıklarda su derinliği fazla olmayan yerlerde yaşarlar. Yapraklarının üzerinde su birikmesini önleyen tüycükler vardır. Genellikle yüzeyi iyi kaplarlar (www.akvaryumda.com 2019a).



Şekil 4.2: *Salvinia natans* bitkisi (Su eğreltisi).

4.2 Sentetik Tekli Ağır Metal Çözeltileri

Deneyisel çalışmalarda kullanılan 1 g/L konsantrasyonundaki kurşun, nikel ve bakır tekli ağır metal stok çözeltileri sırasıyla katı formda $Pb(NO_3)_2$ (Sigma Alorich marka, Cas-No: 10099-74-8, Saflık>%99), $Cu(NO_3)_2 \cdot 3H_2O$ (Merck marka, Cas-No:

10031-43-3 Saflık $\geq$ %99,5) ve $\text{Ni}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (Sigma Alorich marka, Cas-No:13478-00-7, Saflık $\geq$ %97) kullanılarak hazırlanmıştır (Şekil 4.3).

Daha önceki çalışmalar gözönünde tutularak çalışmada kullanılan ağır metallerin konsantrasyonları 5-30 mg/L aralığında seçilmiştir. Fitoremediasyon çalışmaları stok çözeltilerden seyreltilerek hazırlanmış 500 mL'lik çözeltiler ile doldurulmuş 600 mL'lik cam beherlerde yapılmıştır. Stok çözelti hazırlama ve seyreltme işlemlerinde deiyonize su kullanılmıştır.



Şekil 4.3: Kurşun, nikel ve bakır tekli ağır metal stok çözeltileri.

4.3 Deney Düzenegi ve Çalışma Planı

Antalya ilinin Kepez bölgesinde bulunan akvaryum bitkileri üreten özel bir serasından seçilmiş çalışmalarda kullanılan *Pistia stratiotes* ve *Salvinia natans* bitkilerinin yeşil, sağlıklı, eşit yaprak sayıları ve kök uzunluklarına sahip olan bireyleri 4 Kasım 2019 tarihinde Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Çevre Mühendisliği Bölümü Araştırma Laboratuvarına getirilmiştir. Bitkiler öncelikle kloru uçurulmuş musluk suyunda 10 gün süre ile deney şartlarına ve

laboratuvar ortamına alıştırıldıktan sonra deneysel çalışmalara başlanmıştır. Daha önceden hazırlanmış 500 mL’lik farklı konsantrasyonlardaki kurşun, bakır ve nikel çözeltilerinin bulunduğu 600 mL’lik beherlerin her birine birer tane konulmuştur (Şekil 4. 4). Deneysel çalışmalarda kullanılan konsantrasyon ve temas süresi ile ilgili kombinasyonlar bölüm 4.4.’te istatistiksel analiz kısmında verilmiştir. Ağır metallerin çözelti içerisinde çözünmüş halde kalması bitki kökleri tarafından metallerin alımı için önemlidir. Bu nedenle çözeltilerin pH’ları bitkiler konulmadan önce %65’lik (HNO_3) nitrik asit kullanılarak $4,5 \pm 0,2$ seviyelerine getirilmiştir. Buna karşılık stres altında bitkilerin maksimum metal alım kapasitelerini belirlemek için çözeltilere herhangi bir besin maddesi ilavesi yapılmamıştır.



Şekil 4.4: Ağır metal çözeltileri ve bitki uygulamaları.

Deney süresince bitkilerin dış etkenli herhangi bir kirliliğe maruz kalmaması ve buharlaşma yolu ile konsantrasyonunun değişmemesi için beherlerin ağızları şeffaf folyo ile kaplanmış, belirli zaman aralıkları ile gerekli oksijenin temini açısından folyolar kaldırılarak havalandırma işlemi yapılmıştır (Şekil 4.5).

Deneyler oda sıcaklığında (24 ± 2 °C) ve beherler içerisindeki bitkiler gün ışığından optimum derecede faydalanabilecek şekilde güney-batı yönelimindeki bir cam kenarına konulmuş, ilave bir aydınlatma işlemi yapılmamıştır. Mevsimsel şartlar dolayısıyla ortalama olarak bitkiler 14 saat karanlığa 10 saat aydınlığa maruz kalmıştır.



Şekil 4.5: Ağzıları şeffaf folyo ile kaplanmış deney düzeneği örnekleri.

4.4 İstatistiksel Analiz

Son yıllarda deney tasarımı metotları birçok farklı alanda yaygın olarak kullanılmaktadır. Çok değişkenli ve birden fazla bağımlı değişkene sahip sistemlerin tanımlanmasında sorunlar yaşanabilmektedir. Bu durumda, deneysel modeller ve istatistiksel analiz metotları önemli rol oynamaktadırlar. Özellikle mühendislik alanındaki problemlere yaklaşım genellikle deneysel verilerin toplanması ve sonrasında elde edilen verilerin kullanılarak ampirik modellerin geliştirilmesi yönündedir. Deneysel olarak yürütülen bu çalışmalar çoğunlukla değişkenlerin tüm kombinasyonlarını içerecek şekilde gerçekleştirilir. Tüm kombinasyonları ile gerçekleştirilen bir çalışma ise zaman, emek ve mali destek gerektirir. Fakat kullanılacak uygun bir istatistiksel yöntem ile zaman, emek ve mali destek ihtiyacı minimuma indirilerek probleme ait formülleri oluşturmak ve değişkenlerin optimum değerlerini bulmak mümkündür (Panneton 1999; Tuğba 2016).

Bu çalışmada Design Expert 11 programının deneme sürümünde bulunan Central Composite Design (Yanıt Yüzeyi Metodoloji) kullanılarak metal konsantrasyonu (X_1) ve temas süresi (X_2) değişkenlerinin *Pistia stratiotes* ve *Salvinia natans* bitkilerinin Pb, Cu ve Ni alım performanslarına etkisi araştırılmış ve optimum analiz sayısı elde edilmiştir.

Deney sonuçlarının değerlendirilmesinde tanımlayıcı istatistiksel metotların (değişkenlerin metal alımına etkisinde anlamlı fark olup olmadığı, standart sapma vb.) yanı sıra grupların çoklu karşılaştırılmaları bir varyans analizi (ANOVA) ile değerlendirilmiştir. Modelin ve R^2 katsayılarının uygunluğu ve istatistiksel önemi aynı program kullanılarak F testi ile kontrol edilmiştir. Gerçek ve model verilerini karşılaştırmak ve eksiksiz bir yüzey yanıt metodolojisi tasarımı seti için her bir bitki ve metal için 11 deney gerçekleştirilmiştir. Her değişkenin düşük, orta ve yüksek seviyeleri sırasıyla $-k$, 0 ve $+k$ olarak belirlenmiştir. Bitkilerin ağır metal alım değerleri teker teker ve farklı konsantrasyonlar ve temas süreleri için karşılaştırmalı olarak tablolar halinde verilmiş ve yapılan yorumlar görsel olarak desteklenmiştir. Tablo 4.3'te Central Composite Design'a göre *Pistia stratiotes* ve *Salvinia natans* bitkilerinin Pb, Cu ve Ni'in farklı konsantrasyon ve temas sürelerindeki deney kombinasyonları verilmiştir.

Tablo 4.3: Central Composite Design'a göre *Pistia stratiotes* ve *Salvinia natans* bitkilerinin Pb, Cu ve Ni'in farklı konsantrasyon ve temas sürelerindeki deney kombinasyonları.

Çalışma	X ₁ : Konsantrasyon (mg/L)		X ₂ : Süre (saat)	
	Kodlanmış Değişkenler		Gerçek Değişkenler	
	X ₁	X ₂	X ₁	X ₂
1	-k	0	5	84
2	+k	0	30	84
3	-1	-1	8,66	41,57
4	0	0	17,5	84
5	0	0	17,5	84
6	+1	+1	26,34	126,43
7	0	0	17,5	84
8	-1	+1	8,66	126,43
9	0	-k	17,5	24
10	0	+k	17,5	144
11	+1	-1	26,34	41,57

Sistemin performansı (4.1) denkleminde verilen yanıt fonksiyonu ile tanımlanmıştır:

$$Y = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + b_{12}X_1X_2 + b_{11}X_1^2 + b_{22}X_2^2 \quad (4.1)$$

Burada,

Y: Tahmin edilen yanıt fonksiyonu, (Bitkilerin Pb, Cu ve Ni alım miktarını);

X₁ ve X₂: Kodlanmış bağımsız değişkenler (Konsantrasyon ve temas süresi);

b₀: Model sabiti;

b₁, b₂: Doğrusal katsayıları;

b₁₂: Faktörler arasındaki etkileşim katsayılarını;

b₁₁, b₂₂: İkinci dereceden model katsayılarıdır (Adnan ve Arzu 2006).

Elde edilen deneysel veriler, her bir bağımsız değişken için yanıt fonksiyonu katsayılarının saptanması için kullanılmıştır. Yanıt fonksiyonunun katsayıları deneysel Pb, Cu ve Ni alım verimleri her bir bitki (*P.stratiotes* ve *S.natans*) için ayrı ayrı kullanılarak elde edilmiştir.

4.5 Bitki ve Sentetik Atıksu Analizleri

Deney kombinasyonları için çözeltiler hazırlandıktan sonra çözeltilerin iletkenlik ve sıcaklık değerleri WTW Oxi 730, pH değeri ise WTW pH 720 cihazları kullanılarak ölçülmüştür.

Pb için 11, Cu için 11 ve Ni için 11 deney kombinasyonu olmak üzere herbir bitki için 33, toplamda iki bitki için 66 bitki örneği deneysel çalışmalar sonrası toplanmıştır. Bitki numuneleri maksimum temas süresi olan 144 saat boyunca Central Composite Design programı ile belirlenmiş saatlere uygun şekilde alınmıştır. Deneylerde kullanılan bitkiler haricinde kontrol bitkisi olarak kullanılmak üzere birer adet de herhangi bir metale maruz bırakılmamış *Pistia stratiotes* ve *Salvinia natans* deneylerde kullanılan bitkiler ile birlikte analizlenmek üzere kullanılmıştır.

Bulundukları cam beherlerden deneyin belirli saatlerinde alınan bitkilerin kökleri kök ıslaklığı ile çözültiden gelebilecek metalleri uzaklaştırmak amacı ile deiyonize su kullanılarak hassas bir şekilde yıkandıktan sonra bitkiler 105 °C etüvde 48 saat kurutulmuştur. Kurutulan bitkiler hassas terazi ile tartılarak gram olarak kuru kütleleri kaydedilmiş ve önceden deiyonize su ile yıkanıp kurutulmuş 50 mL'lik beherler içerisinde cam karıştırma çubukları ile ezilerek küçük parçalara ayrılmıştır. Parçalanmış her bir kuru *Pistia stratiotes* ve *Salvinia natans* bitkisinden 25 mg örnek alınarak 10 mL'lik cam tüplere konulmuş ve üzerlerine bitkilerin parçalanarak (özütleme-digest) ağır metallerin salınımını sağlamak için 5 mL %65'lik nitrik asit eklendikten sonra 1 hafta bekletilmiştir (Holtra ve diğ. 2014). 1 haftanın sonunda tamamen çözülmüş bitki örneklerinin bulunduğu 5 mL'lik nitrik asit çözülteleri 100'er mL'lik kapaklı polietilen numune kaplarında deiyonize su ile 55 mL'ye seyreltilmiş ve ağızları kapatıldıktan sonra tüm bitkiler için bu işlem tekrarlanıncaya kadar analizlenmek üzere +4 °C'de buzdolabında saklanmıştır. Bu işlemler sonrası toplanan 66 bitki örneğinin tekli ağır metal ölçümleri Perkin Elmer Optima 2100 DV marka ve model ICP-OES cihazı kullanılarak PAU İLTAM ileri teknoloji uygulama ve araştırma merkezinde yapılmıştır.

5. BULGULAR VE TARTIŞMA

Pistia stratiotes ve *Salvinia natans* bitkilerinin kurşun, bakır ve nikel ağır metallerini sucul ortamdan alması ile ilgili yapılan fitoremediasyon çalışmaları sonucunda bu bitkilerin mg/kg olarak metal alım kapasiteleri belirlenmiştir. Hem yapılan deneysel çalışmaların planlanması hem de sonuçların değerlendirilmesi aşamalarında Central Composite Design istatistiksel programı kullanılmıştır.

Deney kombinasyonları için hazırlanan her bir metal çözeltisinde deneylere başlamadan önce iletkenlik, sıcaklık ve pH değerleri ölçülmüş, Tablo 5.1’de verilmiştir. Çözeltilerin pH değerleri %65’lik nitrik asit kullanılarak düşürülmüştür.

Deneysel çalışmalarda kullanılan *Pistia stratiotes* ve *Salvinia natans* bitkilerinin hiç metale maruz bırakılmamış kontrol örneklerinde Pb, Cu ya da Ni metallerine rastlanılmamıştır.

Tablo 5.1: Deney kombinasyonları için hazırlanan her bir metal çözeltisinde iletkenlik, sıcaklık ve pH değerleri.

	Pb	Cu	Ni
Elektriksel iletkenlik ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	1014 $\pm$ 50	1008 $\pm$ 50	985 $\pm$ 50
Sıcaklık ($^{\circ}\text{C}$)	21 $\pm$ 1	21 $\pm$ 1	21 $\pm$ 1
pH	4,5 $\pm$ 0,2	4,5 $\pm$ 0,2	4,5 $\pm$ 0,2

5.1 *Pistia Stratiotes* Bitkisi ile Yapılan Çalışmalar

Pistia stratiotes bitkisi ile yapılan fitoremediasyon çalışmaları sonucunda sucul ortamdan ağır metal alımının iki değişkeni olarak kabul edilen konsantrasyon ve temas süresine bağlı olarak Central Composite Design istatistiksel programı ile belirlenen farklı kombinasyonlar için hesaplanan Pb, Cu ve Ni alım sonuçları Tablo 5.2’de verilmiştir.

Tablo 5.2: *Pistia stratiotes* için Central Composite Design istatistiksel programı ile belirlenen farklı kombinasyonlar için hesaplanan Pb, Cu ve Ni alım sonuçları.

Çalışma	Konsantrasyon (mg/L)	Süre (saat)	Pb alımı (mg/kg)	Cu alımı (mg/kg)	Ni alımı (mg/kg)
1	5	84	6094	2816	297
2	30	84	9097	6028	1001
3	8,661	41,57	4092	2057	132
4	17,5	84	6578	3575	473
5	17,5	84	6446	3531	506
6	26,339	126,43	9185	7007	1045
7	17,5	84	6501	3509	528
8	8,661	126,43	6303	3344	385
9	17,5	24	2695	1210	88
10	17,5	144	7436	5302	561
11	26,339	41,57	5005	2937	352

5.1.1 *Pistia Stratiotes* Bitkisinin Morfolojik Değişimi

Pistia stratiotes bitkisinde genel olarak maksimum temas süresi olan 144. saat (6. gün) sonunda bitki örnekleri karşılaştırıldığında, Pb, Cu ve Ni ağır metal uygulamalarında yeşilden sarı-kahve rengine dönüşüm, nekrotik kahverengi oluşumlar, çürümeler, parçalanmalar ve yumuşamalar gözlenmiştir. Ni uygulamalarında yapraklarda sararma ve parçalanmalar gözlenmiştir. En az hasar Pb uygulamalarında gözlenmiş olup, bitkinin sararmalar ve yapraklarındaki hafif çürümeler dışında bütünlüğünü ve sertliğini koruduğu görülmüştür. En çok doku hasarı, parçalanmalar ve bitkide yumuşama Cu uygulamalarında gözlenmiş ve bitkinin deney sonuna doğru morfolojisinin neredeyse tamamen bozulduğu görülmüştür (Şekil 5. 1).

Pistia stratiotes bitkisinde; kurşun konsantrasyonu arttıkça bitkilerde sararmalar gözlemlenmiş, bakırda konsantrasyonun artmasına bağlı olmaksızın düşük konsantrasyonlarda dahi bitkilerde kahverengileşme ve yumuşamalar olmuş, nikelde ise konsantrasyonun etkisi çok fazla gözlemlenmemiştir.



(a)



(b)



(c)

Şekil 5.1: *Pistia stratiotes* bitkisinin ağır metal uygulamalarındaki morfolojik değişimi;
(a): Pb uygulaması; (b): Cu uygulaması; (c): Ni uygulaması.

5.1.2 *Pistia Stratiotes* Bitkisinin Pb Alımı

Pistia stratiotes bitkisinin Pb alım kapasitesini belirlemek amacı ile Central Composite Design istatistiksel programı kullanılarak yapılan farklı kombinasyonlardaki deneysel çalışmalar sonucu elde edilen veriler aynı program kullanılarak değerlendirilmiştir.

Pistia stratiotes bitkisinin Pb alımı için ikinci dereceden modelin ANOVA sonuçları Tablo 5.3'te verilmiştir. F-değerinin 323,53 olması modelin istatistiksel olarak anlamlı olduğunu, p-değerinin 0,05'ten küçük olması ise model şartlarının önemli olduğunu göstermektedir.

Uyum eksikliği için F-değerinin 8,02 olması uyum eksikliğinin teorik hataya kıyasla anlamlı olmadığını ifade eder. Anlamlı olmayan uyum eksikliği modelin uygunluğu bakımından olumlu olarak değerlendirilmektedir.

0,9792 değerindeki tahmini R^2 ile 0,9938 değerindeki düzeltilmiş R^2 arasındaki farkın 0.2'den oldukça küçük olması modelin tasarım alanının eksik veri noktaları kullanılmasında dahi uygun olduğunu göstermektedir. Düzeltilmiş R^2 değeri olan 0,9938 *Pistia stratiotes* bitkisinin Pb alımı için toplam varyasyonun %99,38'lik kısmının bağımsız değişkenlere dayandığını, toplam varyasyonun sadece %0,62'sinin model tarafından açıklanamayacağını göstermektedir.

Tablo 5.3: *Pistia stratiotes* bitkisinin Pb alımı için ikinci dereceden modelin ANOVA sonuçları.

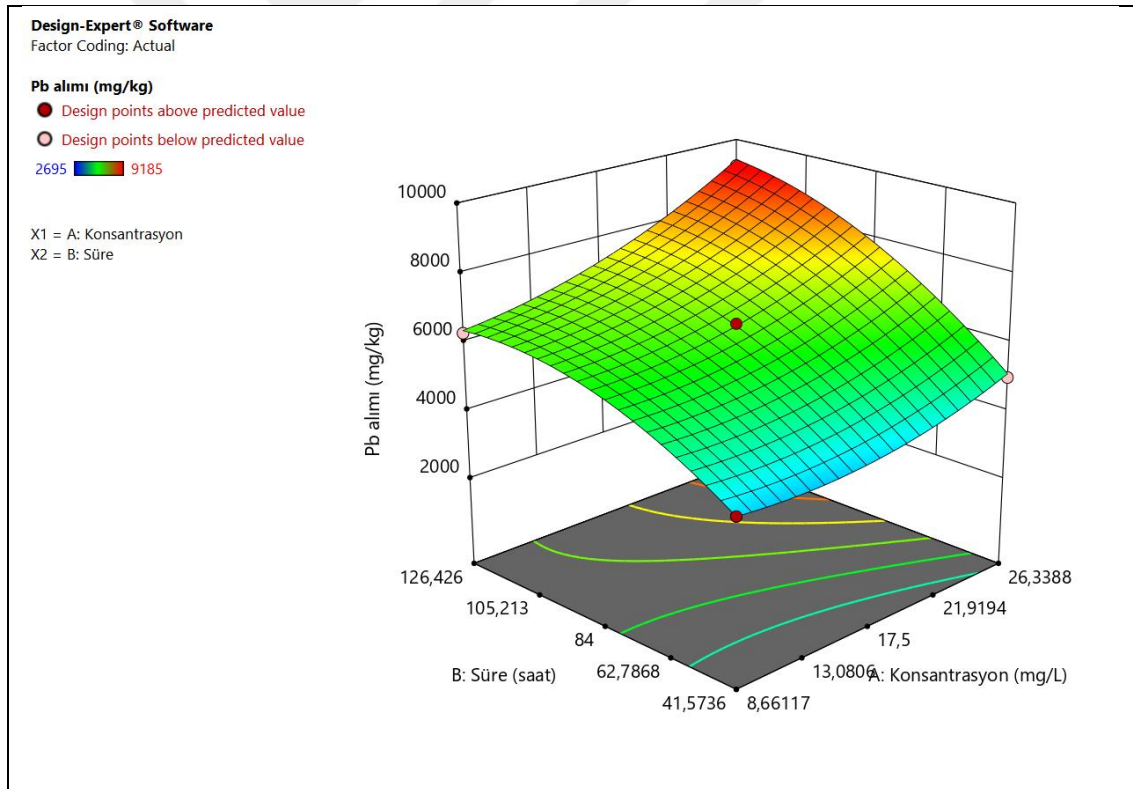
Kaynak	Kareler Toplamı	Serbestlik Derecesi	Ortalama Kare	F-Değeri	p-Değeri	
Model	3,705E+07	5	7,410E+06	323,53	< 0.0001	Anlamlı
A Konsantrasyon	8,084E+06	1	8,084E+06	352,95	< 0.0001	
B Temas süresi	2,144E+07	1	2,144E+07	935,96	< 0.0001	
AB	9,692E+05	1	9,692E+05	42,32	0,0013	
A ²	1,398E+06	1	1,398E+06	61,03	0,0006	
B ²	3,326E+06	1	3,326E+06	145,22	< 0.0001	
Kalıntı	1,145E+05	5	22904,27			
Uyum eksikliği	1,057E+05	3	35242,90	8,02	0,1129	Anlamsız
Hata	8792,67	2	4396,33			
Toplam	3,717E+07	10				
R² = 0,9969, Düzeltilmiş R² = 0,9938, Tahmini R² = 0,9792, Yeterli hassasiyet = 60,0725						

Yeterli hassasiyet, sinyal-gürültü oranını göstermektedir. Bu oranın 4'ten büyük olması istenmektedir. Buradaki 60,0725 yeterli hassasiyet değeri ise modelin uygunluğunu göstermektedir.

Pistia stratiotes bitkisinin Pb (mg/kg) alımının farklı konsantrasyon ve temas süresine bağlı olarak değişimi Şekil 5.2'de verilmiştir. En düşük Pb alımının 24 saat sonunda 17,5 mg/L konsantrasyonda 2695 mg/kg olduğu, en yüksek Pb alımının ise 126,43 saat sonunda 26,34 mg/L konsantrasyonda 9185 mg/kg olduğu tespit edilmiştir.

Pistia stratiotes bitkisinin Pb alımının (Y) ikinci dereceden model için tahmin edilen formülü aşağıda (5.1) denkleminde verilmiştir.

$$Y = 6508,33 + 1005,24X_1 + 1636,97X_2 + 492,25X_1X_2 + 497,52X_1^2 - 767,48X_2^2 \quad (5.1)$$



Şekil 5.2: *Pistia stratiotes* bitkisinin Pb (mg/kg) alımının farklı konsantrasyon ve temas süresine bağlı olarak değişimi.

5.1.3 *Pistia Stratiotes* Bitkisinin Cu Alımı

Pistia stratiotes bitkisinin Cu alım kapasitesini belirlemek amacı ile Central Composite Design istatistiksel programı kullanılarak yapılan farklı kombinasyonlardaki deneysel çalışmalar sonucu elde edilen veriler aynı program kullanılarak değerlendirilmiştir.

Pistia stratiotes bitkisinin Cu alımı için ikinci dereceden modelin ANOVA sonuçları Tablo 5.4'te verilmiştir. F-değerinin 1155,65 olması modelin istatistiksel olarak anlamlı olduğunu, p-değerinin 0,05'ten küçük olması ise model şartlarının önemli olduğunu göstermektedir.

Uyum eksikliği için F-değerinin 6,83 olması uyum eksikliğinin teorik hataya kıyasla anlamlı olmadığını ifade eder. Anlamlı olmayan uyum eksikliği modelin uygunluğu bakımından olumlu olarak değerlendirilmektedir.

0,9942 değerindeki tahmini R^2 ile 0,9983 değerindeki düzeltilmiş R^2 arasındaki farkın 0.2'den oldukça küçük olması modelin tasarım alanının eksik veri noktaları kullanılmasında dahi uygun olduğunu göstermektedir. Düzeltilmiş R^2 değeri olan 0,9983 *Pistia stratiotes* bitkisinin Cu alımı için toplam varyasyonun %99,83'lik kısmının bağımsız değişkenlere dayandığını, toplam varyasyonun sadece %0,17'sinin model tarafından açıklanamayacağını göstermektedir.

Tablo 5.4: *Pistia stratiotes* bitkisinin Cu alımı için ikinci dereceden modelin ANOVA sonuçları.

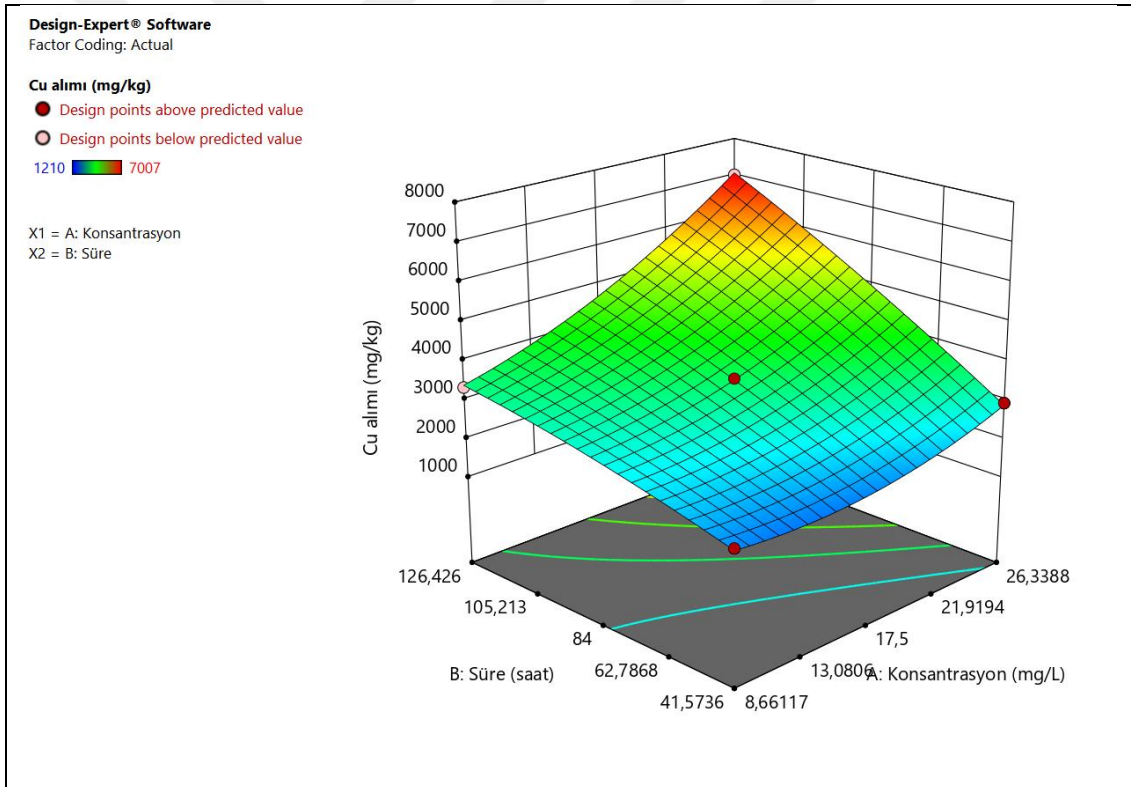
Kaynak	Kareler Toplamı	Serbestlik Derecesi	Ortalama Kare	F-Değeri	p-Değeri	
Model	2,933E+07	5	5,867E+06	1155,65	< 0.0001	Anlamlı
A Konsantrasyon	1,032E+07	1	1,032E+07	2032,56	< 0.0001	
B Temas süresi	1,552E+07	1	1,552E+07	3057,94	< 0.0001	
AB	1,936E+06	1	1,936E+06	381,42	< 0.0001	
A ²	1,099E+06	1	1,099E+06	216,48	< 0.0001	
B ²	1,136E+05	1	1,136E+05	22,38	0,0052	
Kalıntı	25382,23	5	5076,45			
Uyum eksikliği	23123,57	3	7707,86	6,83	0,1305	Anlamsız
Hata	2258,67	2	1129,33			
Toplam	2,936E+07	10				
R² = 0,9991, Düzeltilmiş R² = 0,9983, Tahmini R² = 0,9942, Yeterli hassasiyet = 109,7930						

Yeterli hassasiyetin (sinyal-gürültü oranı) 4'ten büyük olması istenmektedir. Buradaki 109,793 değerindeki yeterli hassasiyet modelin uygunluğunu göstermektedir.

Pistia stratiotes bitkisinin Cu (mg/kg) alımının farklı konsantrasyon ve temas süresine bağlı olarak değişimi Şekil 5.3'de verilmiştir. En düşük alımın 24 saat sonunda 17,5 mg/L konsantrasyonda 1210 mg/kg olduğu, en yüksek alımın ise 126,43 saat sonunda 26,34 mg/L konsantrasyonda 7007 mg/kg olduğu gözlenmiştir.

Pistia stratiotes bitkisinin Cu alımının (Y) ikinci dereceden model için tahmin edilen formülü aşağıda (5.2) denkleminde verilmiştir:

$$Y = 3538,33 + 1135,68X_1 + 1393X_2 + 695,75X_1X_2 + 441,15X_1^2 - 141,85X_2^2 \quad (5.2)$$



Şekil 5.3: *Pistia stratiotes* bitkisinin Cu (mg/kg) alımının farklı konsantrasyon ve temas süresine bağlı olarak değişimi.

5.1.4 *Pistia Stratiotes* Bitkisinin Ni Alımı

Pistia stratiotes bitkisinin Ni alım kapasitesini belirlemek amacı ile Central Composite Design istatistiksel programı kullanılarak yapılan farklı kombinasyonlardaki deneysel çalışmalar sonucu elde edilen veriler aynı program kullanılarak değerlendirilmiştir.

Pistia stratiotes bitkisinin Ni alımı için ikinci dereceden modelin ANOVA sonuçları Tablo 5.5'te verilmiştir. F-değerinin 71,14 olması modelin istatistiksel olarak anlamlı olduğunu, p-değerinin 0,05'ten küçük olması ise model şartlarının önemli olduğunu göstermektedir.

Uyum eksikliği için F-değerinin 4,96 olması uyum eksikliğinin teorik hataya kıyasla anlamlı olmadığını ifade eder. Anlamlı olmayan uyum eksikliği modelin uygunluğu bakımından olumlu olarak değerlendirilmektedir.

0,9094 değerindeki tahmini R^2 ile 0,9723 değerindeki düzeltilmiş R^2 arasındaki farkın 0.2'den oldukça küçük olması modelin tasarım alanının eksik veri noktaları kullanılmasında dahi uygun olduğunu göstermektedir. Düzeltilmiş R^2 değeri olan 0,9723 *Pistia stratiotes* bitkisinin Ni alımı için toplam varyasyonun %97,23'lik kısmının bağımsız değişkenlere dayandığını, toplam varyasyonun sadece %2,77'sinin model tarafından açıklanamayacağını göstermektedir.

Tablo 5.5: *Pistia stratiotes* bitkisinin Ni alımı için ikinci dereceden modelin ANOVA sonuçları.

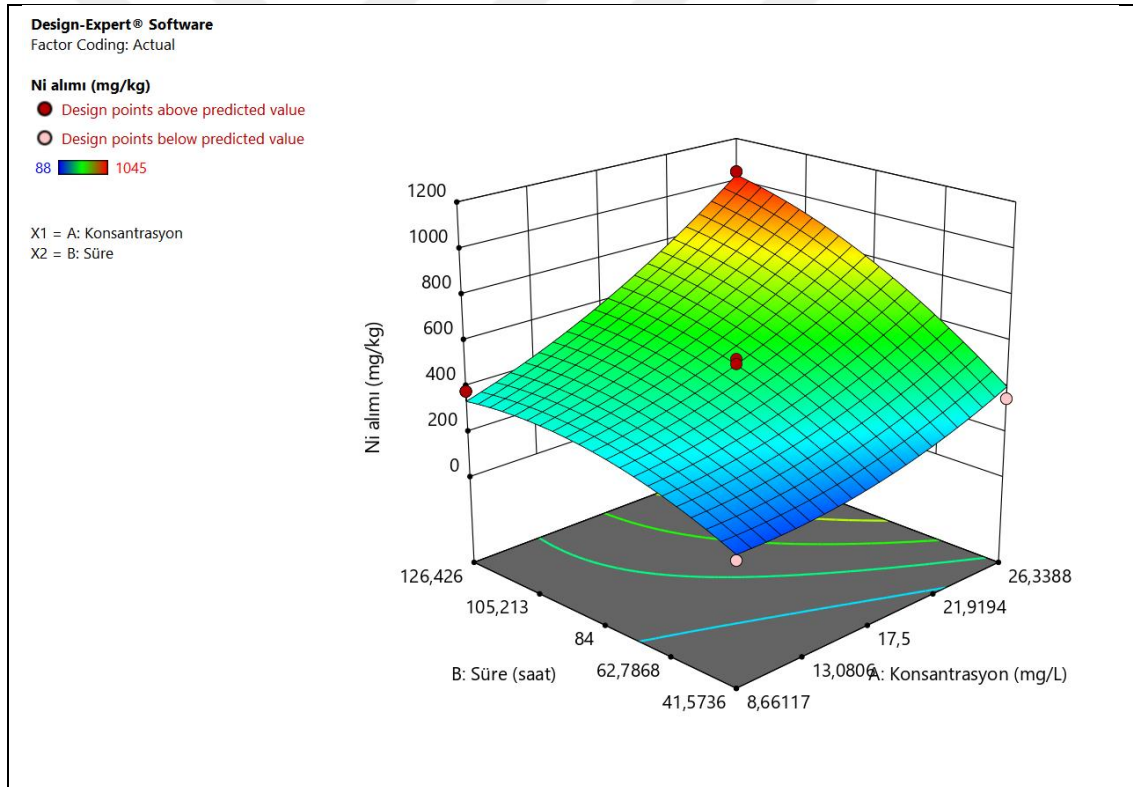
Kaynak	Kareler Toplamı	Serbestlik Derecesi	Ortalama Kare	F-Değeri	p-Değeri	
Model	9,203E+05	5	1,841E+05	71,14	0,0001	Anlamlı
A Konsantrasyon	4,397E+05	1	4,397E+05	169,97	< 0.0001	
B Temas süresi	3,260E+05	1	3,260E+05	126,01	< 0.0001	
AB	48400,00	1	48400,00	18,71	0,0075	
A ²	28684,41	1	28684,41	11,09	0,0208	
B ²	46741,88	1	46741,88	18,07	0,0081	
Kalıntı	12935,85	5	2587,17			
Uyum eksikliği	11403,19	3	3801,06	4,96	0,1724	Anlamsız
Hata	1532,67	2	766,33			
Toplam	9,332E+05	10				
R² = 0,9861, Düzeltilmiş R² = 0,9723, Tahmini R² = 0,9094, Yeterli hassasiyet = 26,4615						

Yeterli hassasiyetin (sinyal-gürültü oranı) 4'ten büyük olması istenmektedir. Buradaki 26,4615 değerindeki yeterli hassasiyet modelin uygunluğunu göstermektedir.

Pistia stratiotes bitkisinin Ni (mg/kg) alımının farklı konsantrasyon ve temas süresine bağlı olarak değişimi Şekil 5.4'te verilmiştir. En düşük alımın 24 saat sonunda 17,5 mg/L konsantrasyonda 88 mg/kg olduğu, en yüksek alımın ise 126,43 saat sonunda 26,34 mg/L konsantrasyonda 1045 mg/kg olduğu belirlenmiştir.

Pistia stratiotes bitkisinin Ni alımının (Y) ikinci dereceden model için tahmin edilen formülü aşağıda (5.3) denkleminde verilmiştir:

$$Y = 502,33 + 234,45X_1 + 201,87X_2 + 110X_1X_2 + 71,27X_1^2 - 90,98X_2^2 \quad (5.3)$$



Şekil 5.4: *Pistia stratiotes* bitkisinin Ni (mg/kg) alımının farklı konsantrasyon ve temas süresine bağlı olarak değişimi.

5.2 *Salvinia Natans* Bitkisi ile Yapılan Çalışmalar

Salvinia natans bitkisi ile yapılan fitoremediasyon çalışmaları sonucunda sucul ortamdan ağır metal alımının iki değişkeni olarak kabul edilen konsantrasyon ve temas süresine bağlı olarak Central Composite Design istatistiksel programı ile belirlenen farklı kombinasyonlar için hesaplanan Pb, Cu ve Ni alım sonuçları Tablo 5.6'da verilmiştir.

Tablo 5.6: *Salvinia natans* için Central Composite Design istatistiksel programı ile belirlenen farklı kombinasyonlar için hesaplanan Pb, Cu ve Ni alım sonuçları.

Çalışma	Konsantrasyon (mg/L)	Süre (saat)	Pb alımı (mg/kg)	Cu alımı (mg/kg)	Ni alımı (mg/kg)
1	5	84	13574	4730	1137
2	30	84	20394	9924	3337
3	8,661	41,57	9306	2805	663
4	17,5	84	13024	4950	1797
5	17,5	84	13464	4290	1650
6	26,339	126,43	21010	9482	3227
7	17,5	84	14366	5148	1577
8	8,661	126,43	13772	5170	1357
9	17,5	24	4708	1870	403
10	17,5	144	18832	8074	2053
11	26,339	41,57	12936	4378	1283

5.2.1 *Salvinia Natans* Bitkisinin Morfolojik Değişimi

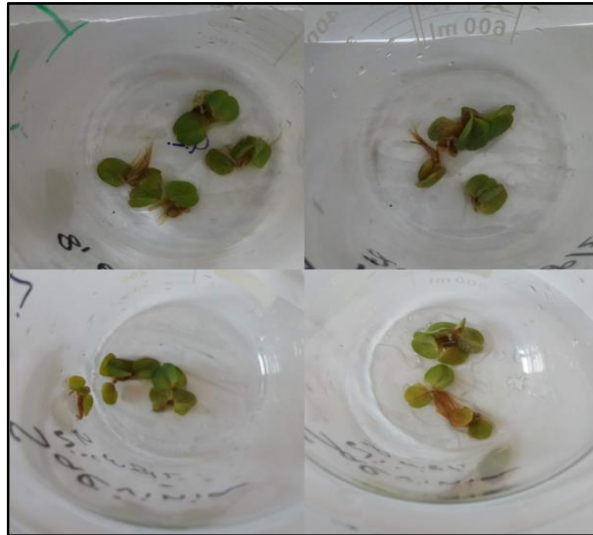
Salvinia natans bitkisinin maksimum temas süresi olan 144. saat (6. gün) sonunda bitki örnekleri karşılaştırıldığında en az Pb grubu bitki örneklerinin etkilendiği belirlenmiştir. Pb grubu örneklerinde çeşitli parçalanmalar dışında her hangi olumsuz etki ya da bitki yapraklarında gözle görülür morfolojik bozunum gözlemlenmemiştir. Ni grubunda çoklu parçalanmalar, kahverengi nekrotik oluşumlar ve sararmalar görülmüştür. *Pistia stratiotes* bitkisinde olduğu gibi *Salvinia natans* bitkisinde de en çok hasar Cu grubunda gözlenmiştir. Bitkide kloroz ve nekrozların yanı sıra parçalanma ve yumuşama görülmüştür (Şekil 5.5).



(a)



(b)



(c)

Şekil 5.5: *Salvinia natans* bitkisinin ağır metal uygulamalarındaki morfolojik değişimi; **(a)** : Pb uygulaması; **(b)** : Cu uygulaması; **(c)**: Ni uygulaması.

Salvinia natans bitkisinde Pb konsantrasyonu arttıkça düşük seviyede sararmalar gözlenmiştir, Cu da *Pistia stratiotes*'te olduğu gibi bitkide yumuşamalar tespit edilmiştir, Ni de ise konsantrasyon arttıkça bitkide sararmalar görülmüştür.

5.2.2 *Salvinia Natans* Bitkisinin Pb Alımı

Salvinia natans bitkisinin Pb alım kapasitesini belirlemek amacı ile Central Composite Design istatistiksel programı kullanılarak yapılan farklı kombinasyonlardaki deneysel çalışmalar sonucu elde edilen veriler aynı program kullanılarak değerlendirilmiştir.

Salvinia natans bitkisinin Pb alımı için ikinci dereceden modelin ANOVA sonuçları Tablo 5.7'de verilmiştir. F-değerinin 26,83 olması modelin istatistiksel olarak anlamlı olduğunu, p-değerinin 0,05'ten küçük olması ise model şartlarının önemli olduğunu göstermektedir.

Uyum eksikliği için F-değerinin 5,07 olması uyum eksikliğinin teorik hataya kıyasla anlamlı olmadığını ifade eder. Anlamlı olmayan uyum eksikliği modelin uygunluğu bakımından olumlu olarak değerlendirilmektedir.

0,7647 değerindeki tahmini R^2 ile 0,9281 değerindeki düzeltilmiş R^2 arasındaki farkın 0.2'den küçük olması modelin tasarım alanının eksik veri noktaları kullanılmasında dahi uygun olduğunu göstermektedir. Düzeltilmiş R^2 değeri olan 0,9281 *Salvinia natans* bitkisinin Pb alımı için toplam varyasyonun %92,81'lik kısmının bağımsız değişkenlere dayandığını, toplam varyasyonun sadece %7,19'unun model tarafından açıklanamayacağını göstermektedir.

Yeterli hassasiyet değerinin 4'ten büyük olması istenmektedir. Buradaki 16,9396 yeterli hassasiyet değeri ise modelin uygunluğunu göstermektedir.

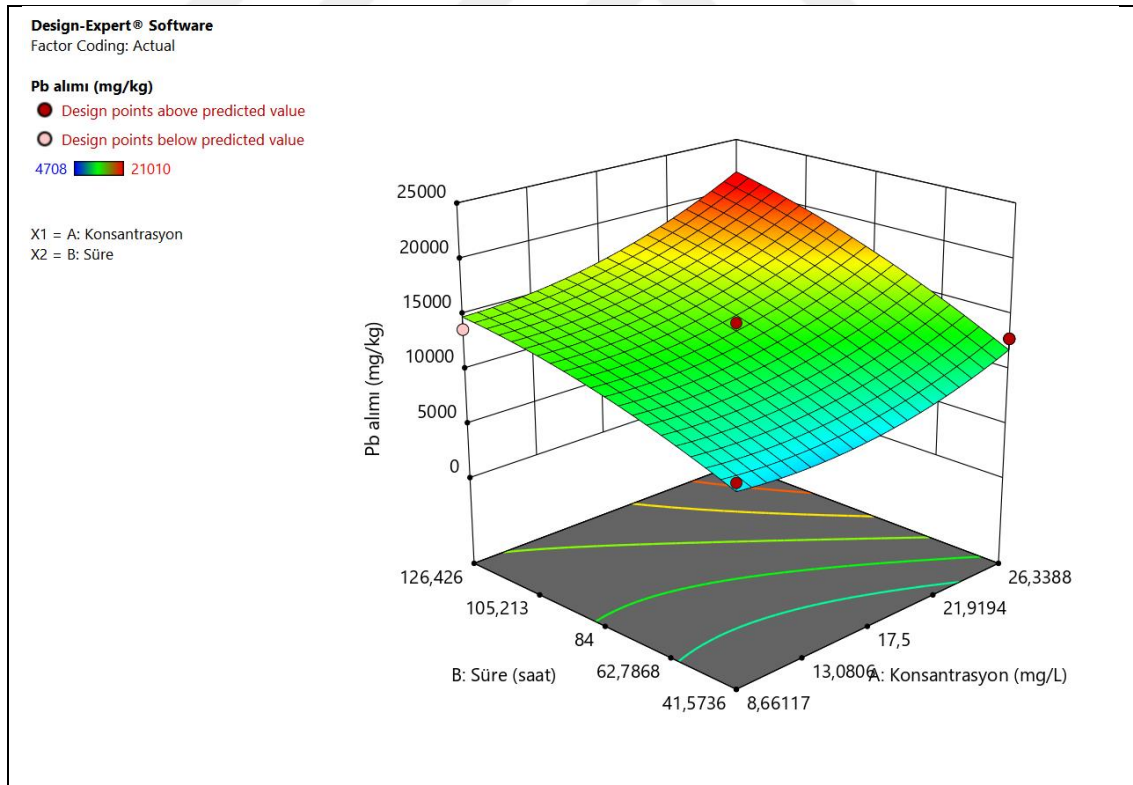
Salvinia natans bitkisinin Pb (mg/kg) alımının farklı konsantrasyon ve temas süresine bağlı olarak değişimi Şekil 5.6'da verilmiştir. En düşük alımın 24 saat sonunda 17,5 mg/L konsantrasyonda 4708 mg/kg olduğu, en yüksek alımın ise 126,43 saat sonunda 26,34 mg/L konsantrasyonda 21010 mg/kg olduğu tespit edilmiştir.

Tablo 5.7: *Salvinia natans* bitkisinin Pb alımı için ikinci dereceden modelin ANOVA sonuçları.

Kaynak	Kareler Toplamı	Serbestlik Derecesi	Ortalama Kare	F-Değeri	p-Değeri	
Model	2,163E+08	5	4,325E+07	26,83	0,0013	Anlamlı
A Konsantrasyon	5,260E+07	1	5,260E+07	32,62	0,0023	
B Temas süresi	1,321E+08	1	1,321E+08	81,97	0,0003	
AB	3,254E+06	1	3,254E+06	2,02	0,2146	
A ²	1,543E+07	1	1,543E+07	9,57	0,0271	
B ²	5,142E+06	1	5,142E+06	3,19	0,1342	
Kalıntı	8,061E+06	5	1,612E+06			
Uyum eksikliği	7,125E+06	3	2,375E+06	5,07	0,1690	Anlamsız
Hata	9,361E+05	2	4,680E+05			
Toplam	2,243E+08	10				
R² = 0,9641, Düzeltilmiş R² = 0,9281, Tahmini R² = 0,7647, Yeterli hassasiyet = 16,9396						

Salvinia natans bitkisinin Pb alımının (Y) ikinci dereceden model için tahmin edilen formülü aşağıda (5.4) denkleminde verilmiştir.

$$Y = 13618 + 2564,12X_1 + 4064,29X_2 + 902X_1X_2 + 1652,75X_1^2 - 954,25X_2^2 \quad (5.4)$$



Şekil 5.6: *Salvinia natans* bitkisinin Pb (mg/kg) alımının farklı konsantrasyon ve temas süresine bağlı olarak değişimi.

5.2.3 *Salvinia Natans* Bitkisinin Cu Alımı

Salvinia natans bitkisinin Cu alım kapasitesini belirlemek amacı ile Central Composite Design istatistiksel programı kullanılarak yapılan farklı kombinasyonlardaki deneysel çalışmalar sonucu elde edilen veriler aynı program kullanılarak değerlendirilmiştir.

Salvinia natans bitkisinin Cu alımı için ikinci dereceden modelin ANOVA sonuçları Tablo 5.8’de verilmiştir. F-değerinin 35,10 olması modelin istatistiksel olarak anlamlı olduğunu, p-değerinin 0,05’ten küçük olması ise model şartlarının önemli olduğunu göstermektedir.

Uyum eksikliği için F-değerinin 2,37 olması uyum eksikliğinin teorik hataya kıyasla anlamlı olmadığını ifade eder. Anlamlı olmayan uyum eksikliği modelin uygunluğu bakımından olumlu olarak değerlendirilmektedir.

0,8326 değerindeki tahmini R^2 ile 0,9446 değerindeki düzeltilmiş R^2 arasındaki farkın 0.2’den küçük olması modelin tasarım alanının eksik veri noktaları kullanılmasında dahi uygun olduğunu göstermektedir. Düzeltilmiş R^2 değeri olan 0,9446 *Salvinia natans* bitkisinin Cu alımı için toplam varyasyonun %94,46’lık kısmının bağımsız değişkenlere dayandığını, toplam varyasyonun sadece %5,54’ünün model tarafından açıklanamayacağını göstermektedir.

Tablo 5.8: *Salvinia natans* bitkisinin Cu alımı için ikinci dereceden modelin ANOVA sonuçları.

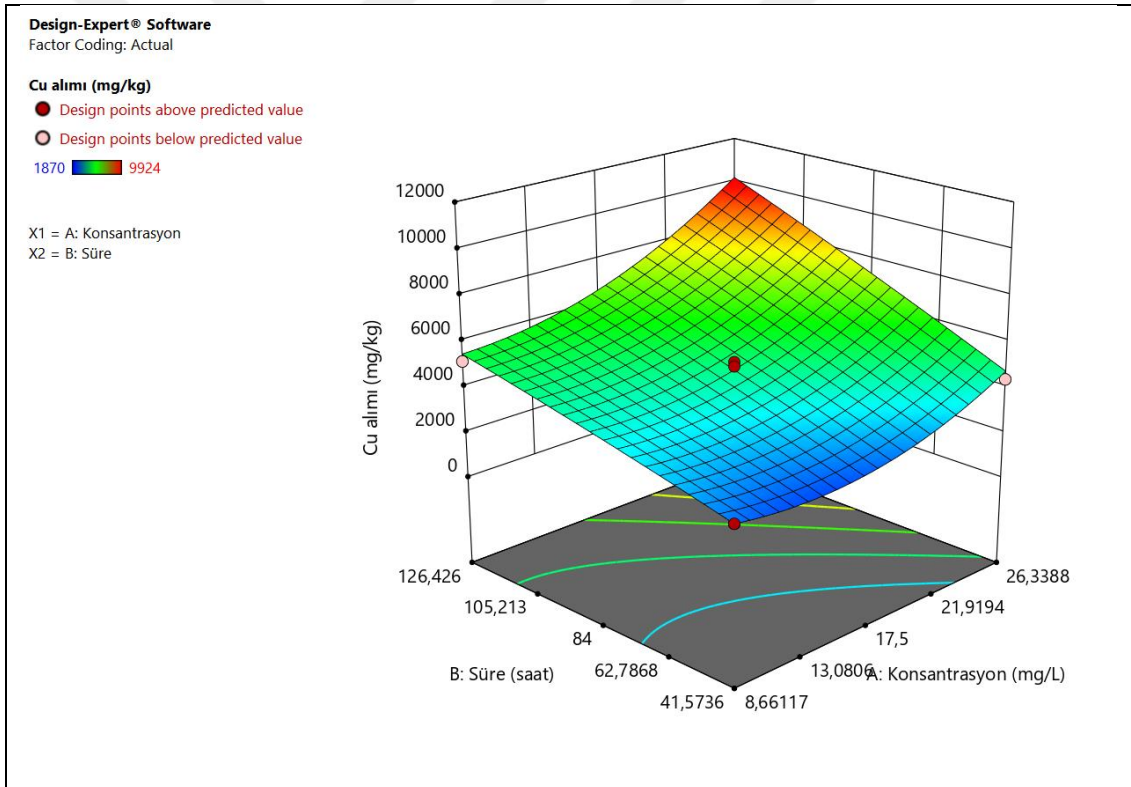
Kaynak	Kareler Toplamı	Serbestlik Derecesi	Ortalama Kare	F-Değeri	p-Değeri	
Model	6,450E+07	5	1,290E+07	35,10	0,0007	Anlamlı
A Konsantrasyon	2,188E+07	1	2,188E+07	59,54	0,0006	
B Temas süresi	3,298E+07	1	3,298E+07	89,75	0,0002	
AB	1,876E+06	1	1,876E+06	5,10	0,0734	
A ²	6,744E+06	1	6,744E+06	18,35	0,0078	
B ²	40500,55	1	40500,55	0,1102	0,7534	
Kalıntı	1,837E+06	5	3,675E+05			
Uyum eksikliği	1,434E+06	3	4,779E+05	2,37	0,3107	Anlamsız
Hata	4,037E+05	2	2,018E+05			
Toplam	6,634E+07	10				
$R^2 = 0,9723$, $Düzeltilmiş R^2 = 0,9446$, $Tahmini R^2 = 0,8326$, $Yeterli hassasiyet = 18,8021$						

Yeterli hassasiyetin (sinyal-gürültü oranı) 4'ten büyük olması istenmektedir. Buradaki 18,8021 değerindeki yeterli hassasiyet modelin uygunluğunu göstermektedir.

Salvinia natans bitkisinin Cu (mg/kg) alımının farklı konsantrasyon ve temas süresine bağlı olarak değişimi Şekil 5.7'de verilmiştir. En düşük alımın 24 saat sonunda 17,5 mg/L konsantrasyonda 1870 mg/kg olduğu, en yüksek alımın ise 144 saat sonunda 30 mg/L konsantrasyonda 9924 mg/kg olduğu gözlenmiştir.

Salvinia natans bitkisinin Cu alımının (Y) ikinci dereceden model için tahmin edilen formülü aşağıda (5.5) denkleminde verilmiştir:

$$Y = 4796 + 1653,8X_1 + 2030,35X_2 + 684,75X_1X_2 + 1092,81X_1^2 - 84,69X_2^2 \quad (5.5)$$



Şekil 5.7: *Salvinia natans* bitkisinin Cu (mg/kg) alımının farklı konsantrasyon ve temas süresine bağlı olarak değişimi.

5.2.4 *Salvinia Natans* Bitkisinin Ni Alımı

Salvinia natans bitkisinin Ni alım kapasitesini belirlemek amacı ile Central Composite Design istatistiksel programı kullanılarak yapılan farklı kombinasyonlardaki deneysel çalışmalar sonucu elde edilen veriler aynı program kullanılarak değerlendirilmiştir.

Salvinia natans bitkisinin Ni alımı için ikinci dereceden modelin ANOVA sonuçları Tablo 5.9'da verilmiştir. F-değerinin 35,10 olması modelin istatistiksel olarak anlamlı olduğunu, p-değerinin 0,05'ten küçük olması ise model şartlarının önemli olduğunu göstermektedir.

Uyum eksikliği için F-değerinin 2,37 olması uyum eksikliğinin teorik hataya kıyasla anlamlı olmadığını ifade eder. Anlamlı olmayan uyum eksikliği modelin uygunluğu bakımından olumlu olarak değerlendirilmektedir.

0,9268 değerindeki tahmini R^2 ile 0,9754 değerindeki düzeltilmiş R^2 arasındaki farkın 0.2'den oldukça küçük olması modelin tasarım alanının eksik veri noktaları kullanılmasında dahi uygun olduğunu göstermektedir. Düzeltilmiş R^2 değeri olan 0,9754 *Salvinia natans* bitkisinin Ni alımı için toplam varyasyonun %97,54'lik kısmının bağımsız değişkenlere dayandığını, toplam varyasyonun sadece %2,46'sının model tarafından açıklanamayacağını göstermektedir.

Tablo 5.9: *Salvinia natans* bitkisinin Ni alımı için ikinci dereceden modelin ANOVA sonuçları.

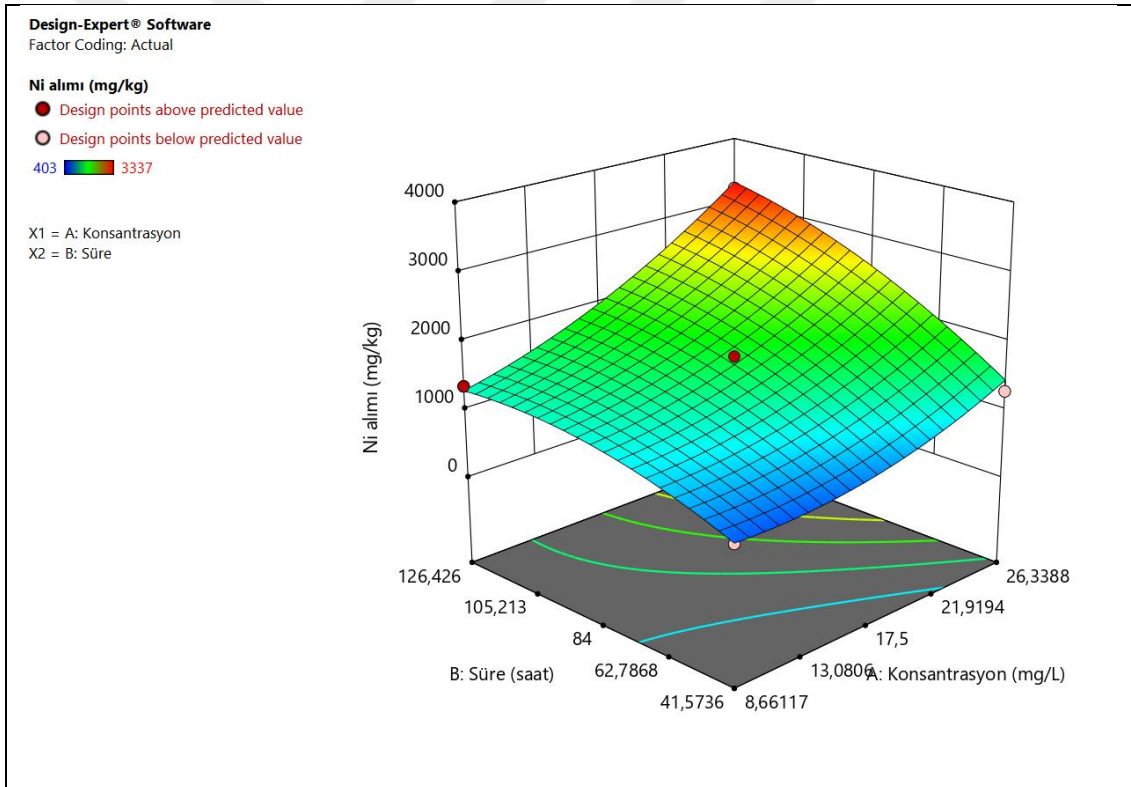
Kaynak	Kareler Toplamı	Serbestlik Derecesi	Ortalama Kare	F-Değeri	p-Değeri	
Model	8,420E+06	5	1,684E+06	80,23	< 0.0001	Anlamlı
A Konsantrasyon	3,922E+06	1	3,922E+06	186,83	< 0.0001	
B Temas süresi	3,089E+06	1	3,089E+06	147,18	< 0.0001	
AB	3,906E+05	1	3,906E+05	18,61	0,0076	
A ²	3,706E+05	1	3,706E+05	17,65	0,0085	
B ²	3,483E+05	1	3,483E+05	16,59	0,0096	
Kalıntı	1,050E+05	5	20990,67			
Uyum eksikliği	79840,68	3	26613,56	2,12	0,3365	Anlamsız
Hata	25112,67	2	12556,33			
Toplam	8,525E+06	10				
$R^2 = 0,9877$, $Düzeltilmiş R^2 = 0,9754$, $Tahmini R^2 = 0,9268$, $Yeterli hassasiyet = 28,1997$						

Yeterli hassasiyetin (sinyal-gürültü oranı) 4'ten büyük olması istenmektedir. Buradaki 28,1997 değerindeki yeterli hassasiyet modelin uygunluğunu göstermektedir.

Salvinia natans bitkisinin Ni (mg/kg) alımının farklı konsantrasyon ve temas süresine bağlı olarak değişimi Şekil 5.8'de verilmiştir. En düşük alımın 24 saat sonunda 17,5 mg/L konsantrasyonda 403 mg/kg olduğu, en yüksek alımın ise 144 saat sonunda 30 mg/L konsantrasyonda 3337 mg/kg olduğu belirlenmiştir.

Salvinia natans bitkisinin Ni alımının (Y) ikinci dereceden model için tahmin edilen formülü aşağıda (5.6) denkleminde verilmiştir:

$$Y = 1674,67 + 700,16X_1 + 621,43X_2 + 312,5X_1X_2 + 256,17X_1^2 - 248,33X_2^2 \quad (5.6)$$



Şekil 5.8: *Salvinia natans* bitkisinin Ni (mg/kg) alımının farklı konsantrasyon ve temas süresine bağlı olarak değişimi.

6. SONUÇ ve ÖNERİLER

Pistia stratiotes ve *Salvinia natans* bitkilerinin kurşun, bakır ve nikel ağır metallerini sucul ortamdan alması ile ilgili yapılan fitoremediasyon çalışmaları sonucunda bu bitkilerin sucul ortamlardan ağır metal giderme amacı ile kullanılabileceği belirlenmiştir. Her iki bitki de ortam şartlarına iyi bir uyum sağlamış deneysel çalışmanın değişkenlerinden olan konsantrasyon ve temas süresinin maksimum değerlerinde dahi ağır metal alımına devam etmiştir. Morfolojik olarak bakıldığında *Salvinia natans* bitkisi *Pistia stratiotes* bitkisine göre ağır metal kirliliğinden daha az etkilenmiş ve ağır metal alımında çok daha iyi sonuçlar vermiştir. *Salvinia natans* bitkisi Pb ve Cu alımında *Pistia stratiotes* bitkisine göre yaklaşık iki kat daha etkili iken, Ni alımındaki verimliliğinin *Pistia stratiotes* bitkisine göre 5-6 kat daha fazla olduğu tespit edilmiştir.

Pistia stratiotes bitkisinin bakıra maruz bırakıldığı tüm çözeltilerinde morfolojik bir bozulma gözlenmiş fakat bu durum temas süresi ve konsantrasyon olarak belirlenen iki değişkenin maksimum değerlerinde dahi bitkinin metal alımını olumsuz yönde etkilememiştir. Bunun yanı sıra her iki bitkide de maksimum konsantrasyon ve temas sürelerinde çözeltiye geri metal salınımı ölçülmemiştir. Bu da bize her iki bitkinin de deneysel çalışmalar için seçilen maksimum temas süresi olan 144 saat ve maksimum konsantrasyon olan 30 mg/L'nin üzerindeki değerlerde de metal alımında etkili olacağını göstermiştir. Bulunan ANOVA sonuçlarındaki R^2 'lerin birbirine olan yakınlığı da bunun kanıtı niteliğindedir.

Temas süresine bağlı olarak metal alımları değerlendirildiğinde her iki bitkinin de ilk 24 saatte maksimum oranda metalleri aldığı daha sonra zamana bağlı olarak metal almaya devam ettikleri fakat aynı oranda doğrusal bir metal alımının gerçekleşmediği gözlenmiştir. Bu sonuç Mishra ve diğ. (2008) ve Ugya ve diğ. (2015) tarafından yapılan çalışmalarla da uyumludur. Bitkiler tarafından metal alımının temas süresine bağlı olarak kademeli bir şekilde azalmasının nedeninin bitkinin metale doygunluğu ve bitkinin çözeltideki metali alımı sonrasında çözeltideki metal konsantrasyonunun zamanla azalması şeklinde değerlendirilebilir.

Deneyisel çalışmanın diğer değişkeni olan metal konsantrasyonların artması ile de bitkilerin metal alımları artmıştır. Bu durum 30 mg/L metal konsantrasyonlarında 84 saat sonundaki metal alımlarının aynı temas süresi sonrasında 5 mg/L konsantrasyonlarında çok daha yüksek olması ile desteklenmektedir. Benzer sonuçlar Axtell ve diğ. (2003) ve Khellaf ve Zerdaoui (2009) tarafından yapılan çalışmalar sonunda da bulunmuştur.

Pistia stratiotes ve *Salvinia natans* bitkilerinin deneyisel çalışmalar için seçilen ağır metalleri alım verimleri değerlendirildiğinde her iki bitkinin de kurşunu diğer ağır metallere oranla daha fazla aldığı belirlenmiştir. Bitkilerin metal alım verimleri $Pb > Cu > Ni$ olarak gözlenmiştir. Bhupinder ve Sheela (2011) *Salvinia natans* ile yaptıkları çalışmada bizim bulduğumuz sonuçlara benzer şekilde bakırın nikel göre bitki tarafından daha fazla alındığını tespit etmişlerdir.

Her bir bitki ve metal için minimum metal alımlarının 24 saat sonunda 17,5 mg/L konsantrasyonda gerçekleştiği gözlemlenirken, maksimum metal alımlarının ise *Pistia stratiotes* bitkisi için tüm metallerde ve *Salvinia natans* bitkisinin kurşun alımında 126,43 saat sonunda 26,34 mg/L konsantrasyonda, *Salvinia natans* bitkisinin bakır ve nikel alımlarında ise 144 saat sonunda 30 mg/L konsantrasyonlarda olduğu tespit edilmiştir.

Pistia stratiotes ve *Salvinia natans* bitkileri ile Central Composite Design istatistiksel programı kullanılarak yapılan farklı kombinasyonlardaki deneyisel çalışmalar sonucu her iki bitkinin Pb, Cu ve Ni alımları için anlamlı matematiksel formüller oluşturulmuştur. Böylece gerçek ve büyük ölçekli çalışmaların önü açılmıştır.

İleride ağır metal içerikli gerçek atıksular kullanılarak yapılacak fitoremediasyon çalışmaları ile sentetik metal çözeltileri kullanılarak yapılan bu çalışmanın sonuçları kıyaslanarak bulunan matematiksel formüllerin ve seçilen değişkenlerin uygunluğu kontrol edilebilir.

7. KAYNAKLAR

Adnan, D. and Arzu, Y., “Optimizasyon esaslı çalışmalara ilişkin teorik esaslar ve tarımsal mekanizasyon uygulamaları”, *Tarım Makinaları Bilimi Dergisi*, 2 (2), 111-115, (2006).

Ali, H., Khan, E. and Sajad, M. A., “Phytoremediation of heavy metals-concepts and applications”, *Chemosphere*, 91, 869-881, (2013).

Aurangzeb, N., Nisa, S., Bibi, Y., Javed, F. and Hussain, F., “Phytoremediation potential of aquatic herbs rom steel foundry effluent.”, *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, 31, 881-886, (2014).

Axtell, N. R., Stenberg, P. K. and Clausse, K., “Lead and nikel removal using *Microspora* and *Lemna minor*”, *Bioresource Technology*, 89,41-48, (2003).

Bhupinder, D. and Sheela, S. “Heavy metal removal from a multi-metal solution and wastewater by *Salvinia natans*”, *Ecological Engineering*, 37 (6), 893-896, (2011).

Cheng, S., Grosse, W., Karrenbrock, F. and Thoennessen, M., “Efficiency of constructed wetlands in decontamination of water polluted by heavy metals”, *Ecological Engineering*, 18, 317-325, (2002).

Cirik, ř. and Cirik, S., Su bitkileri (deniz bitkilerinin biyolojisi, ekolojisi yetiştirme teknikleri), Bornova–İzmir: Ege Üniversitesi Su Ürünleri Fakóltesi Yayınları, (2004).

Das, S., Goswami, S. and Talukdar, A. D., “A study on cadmium phytoremediation potential of water lettuce”, *Pistia stratiotes* L. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 92 (2), 169-174, (2014).

Davis, P.H., Mill, R.R. and Tan, K., Flora of Turkey and East Aegean Islands, Edinbrugh: Edinburgh Univ. Press, 10, (1988).

Dhir, B., Sharmila, P. and Pardha Saradhi, P., “Photosynthetic performance of *Salvinia natans* exposed to chromium and zinc rich wastewater”, *Braz. J. Plant Physiol.*, 20, 61-70, (2008).

Dhir, B., Sharmila, P. and Pardha Saradhi, P., “Potential of aquatic macrophytes for removing contaminants from the environment”, *Crit. Rev. Environ. Sci. Technol.*, 39, 1-28, (2009a).

Dhir, B., Sharmila, P. and Pardha Saradhi, P., Nasim, S.A., “Physiological and antioxidant responses of *Salvinia natans* exposed to chromium-rich wastewater”, *Ecotoxicol. Environ. Saf.*, 72, 1790-1797, (2009b).

EPA (Environmental Protection Agency), Introduction to Phytoremediation, Ohio: National Risk Management Research Laboratory Office of Research and Development U.S. Environmental Protection Agency Cincinnati, 45268, (2000).

Espinoza-Quiñones Fernando, R., Módenes Aparecido, N., Costa Ismael, L., Palácio Soraya, M., Szymanski, N., Trigueros Daniela, E.G., Kroumov Alexander, D. and Silva Edson, A., “Kinetics of lead bioaccumulation from a hydroponic medium by aquatic macrophytes *Pistia stratiotes* L. Water”, *Air Soil Pollut*, 203 (1-4), 29-37, (2009).

Gadd, G.M. and Griffiths, A.J., “Micro organisms and heavy metal toxicity”, *Microbial Ecology*, 4, 303-317, (1978).

Galal, T. M. and Farahat, E. A., “The invasive macrophyte *Pistia stratiotes* L. as a bioindicator for water pollution in Lake Mariut, Egypt.”, *Environmental Monitoring and Assessment*, 187 (11), 701, (2015).

Gözel, H., “*Salvinia Natans*”, (27 Nisan 2019), <https://www.akvaryumda.com/salvinia-natans/>, (2019a).

Gözel, H., “*Su Marulu-Pistia Stratiotes*”, (27 Nisan 2019), <https://www.akvaryumda.com/su-marulu-pistia-stratiotes/>, (2019b).

Güner, A., Özhatay, N., Ekim, T. and Başer, K.H.C., “Flora of Turkey and East Aegean Islands”, *Edinburgh Univ. Press., Edinburgh*, 11 (2), (2000).

Glick, B.R., “Using Soil Bacteria to Facilitate Phytoremediation”, *Biotechnology Advances*, 28, 367-374, (2010).

Gupta, P., Roy, S. and Mahindrakar, A. B., “Treatment of water using water hyacinth, water lettuce and vetiver grass”, *Resources and Environmental*, 2 (5), 202-215, (2012).

Hanif, A. and Bhatti, H.N., "Removal and recovery of Cu (II) and Zn (II) using immobilized *Mentha arvensis* distillation waste biomass.", *Ecol. Eng.*, 35, 1427-1434, (2009).

Holm, L. G., Plucknett, D. L., Pancho, J. V. and Herberger J. P., *The world's worst weeds: distribution and biology*, Honolulu: University Press of Hawaii, 609, (1977).

Holtra, A. and Zamorska-Wojdyla, "Bioaccumulation capacities of copper (II) ions in *Salvinia natans*", *Environment Protection Engineering*, 40 (4), 41-51, (2014).

Ismail, S., "Phytoremediation: A Green Technology", *Iranian Journal of Plant Physiology*, 3 (1), 567-576, (2012).

Khellaf, N. and Zerdaoui, M., "Phytoaccumulation of zinc by the aquatic plant *Lemna gibba* L.", *Bioresour. Technol.*, 100, 6137-6140, (2009).

Kırım, B., Çoban, D. And Güler, M. "Floating aquatic plants and their impact on wetlands in Turkey", *Water Resources and Wetlands*, 2285 (7923), 102-109, (2014)

Lu, B., Xu, Z., Li, J. and Chai, X., "Removal of water nutrients by different aquatic plant species: An alternative way to remediate polluted rural rivers", *Ecological Engineering*, 110, 18-26, (2018).

Lu, Q., He, Z. L. and Graetz, D. A., "Uptake and distribution of metals by water lettuce (*Pistia stratiotes* L.)", *Environmental Science and Pollution Research*, 18, 978-86, (2011).

Lu, Q., He, Z. L., Graetz, D. A., Stoffella, P. J. and Yang, X., "Phytoremediation to remove nutrients and improve eutrophic stormwaters using water lettuce (*Pistia stratiotes* L.)", *Environmental Science and Pollution Research*, 17 (1), 84-96, (2010).

Maine, M. A., Duarte M. V. and Sune, N. L. "Cadmium uptake by floating macrophytes", *Water Research*, 35(11), 2629-2634, (2000).

Marschner, H., *Mineral nutrition of higher plants*, London: Academic Press, (1995).

Mishra, V. K., Upadhyaya, A. R., Pandey, S. K. and Tripathi, B. D., “Heavy metal pollution induced due to coal mining effluent on surrounding aquatic ecosystem and its management due through naturally occurring aquatic macrophytes”, *Bioresour Technol*, 99 (5), 930-936, (2008).

Mishra, V.K., Tripathi, B.D. and Kim, K.H., “Removal and accumulation of mercury by aquatic macrophytes from an open cast coal mine effluent”, *Journal of Hazardous Materials*, 172 (2-3), 749-754, (2009).

Mufarrege, M. M., Hadad, H. A. and Maine, M. A., “Response of *Pistia stratiotes* to heavy metals (Cr, Ni and Zn) and phosphorous”, *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 58, 53-61, (2010).

Mukherjee, B., Majumdar, M., Gangopadhyay, A., Chakraborty, S. and Chatterjee, D., “Phytoremediation of parboiled rice mill wastewater using water lettuce (*Pistia stratiotes*)”, *International Journal Phytoremediation*. 17 (7), 651-656, (2015).

Nazir, A., Malik, R. N., Ajaib, M., Khan, N., and Siddiqui, M. F., “Hyperaccumulators of heavy metals of industrial areas of Islamabad and Rawalpindi”, *Pakistan Journal of Botany*, 43 (4), 1925-1933, (2011).

Nurhayati P., “Water Lettuce (*Pistia stratiotes*, Linn) potency as one of eco-friendly phytoextraction absorbers of zinc heavy metal to solve industrial waste problem in indonesia” *International Conference on Environmental Biomedical and Biotechnology*, 41, 151-156, (2012).

Odjegba, H., and Fasidi, I., O., “Accumulation of trace elements by *Pistia stratiotes*: implications for phytoremediation”, *Ecotoxicology*, 13 (7), 637-646, (2004).

Panneton. B., Pillion, H., Dutilleul, P., Theriault, R. and Khelifi, M., “Full factorial design versus central composite design: Statistical comparison and implications for spray droplet deposition experiments”, *Transactions of the ASAE*, 42 (4), 877-883, (1999).

Pilon-Smits, E. and Freeman J.L., “Environmental cleanup using plants: biotechnological advances and ecological considerations”, *Frontiers in Ecology and the Environment*, 4 (4), 203-210, (2006).

Rai, P.K., “Heavy metal phytoremediation from aquatic ecosystems with special reference to macrophytes”, *Environmental Science and Technology*, 39, 697-753, (2009).

Rajakaruna, N., Tompkins, K.M. and Pavicevic, P.G., “Phytoremediation: an affordable green technology for the clean-up of metal- contaminated sites in Sri Lanka”, *Ceylon Journal of Science*, 35 (1), 25-39, (2006).

Rascio, N. and Navari-Izzo, F., “Heavy metal hyperaccumulating plants: how and why do they do it? and what makes them so interesting?”, *Plant Science*, 180, 169-181, (2011).

Reeves, R.D. and Baker, A. J. M., Metal Accumulating Plants in: Raskin, I. and Ensley, B.D., Eds. *Phytoremediation of Toxic Metals: Using Plants to Clean-Up the Environment*: New York, John Wiley and Sons, 193-230, (2000).

Rulkens, W. H., Tichy, R. and Grotenhuis, J. T. C., “Remediation of polluted soil and sediment: perspectives and failures”, *Water Sci. Technol.*, 37, 27-35, (1998).

Sainty, G. R. and Jacobs S. W. L., *Water Plants of New South Wales*, Sydney, Australia: Water Resources Commission for New South Wales, (1981).

Sheoran, A. S. and Sheoran, V., “Heavy metal removal mechanism of acid mine drainage in wetlands: A critical review”, *Minerals Engineering*, 19, 105-116, (2006).

Tackholm, V., *Student’s flora of Egypt*, Beirut: Cairo University, cooperation printing company, 2nd ed., 888, (1974).

Tuğba, T., “Investigation of arsenic leaching From copper slag by using central composite design”, *Hacettepe Üniversitesi Yerbilimleri Uygulama ve Araştırma Merkezi Bülteni*, 37 (3), 193-202, (2016).

Ugya, A. Y., Imam, T.S. and Tahir, S.M., “The use of *Pistia stratiotes* to remove some heavy metals from Romi Stream: a case study of kaduna refinery and petrochemical company polluted stream”, *Journal of Environmental Science, Toxicology and Food Technology*, 2319-2399 (9), (2015).

USEPA, *Introduction to phytoremediation*, Ohio, Cincinnati: EPA/600/R-99/107, Office of Research and Development, 45268, (2000).

Vangronsveld, T., “Phytoremediation of contaminated soils and groundwater: lessons from the field”, *Environmental Science and Pollution Research*, 16 (7), 765-94, (2009).

Vesely, T., Tlustos, P. and Szakova, J. “The use of water lettuce (*Pistia stratiotes* L.) for rhizofiltration of a highly pollutes solution by cadmium and lead”, *International Journal of Phytoremediation*, 13 (9), 859-872, (2011).

Victor, K. K., Seka, Y., Norbert, K. K., Sanogo, T. A. and Celestin, A. B., “Phytoremediation of wastewaters toxicity using water hyacinth (*Eichhornia crassipes*) and water lettuce (*Pistia stratiotes*)”, *International Journal of Phytoremediation*, 18 (10), 949-955, (2016).

Watanabe, M. E., “Phytoremediation on the brink of commercialization”. *Environ. Sci. Technol. News*, 31, 182a-186a, (1997).

Wetzel. R. G., *Constructed Wetlands for Water Quality Improvement*, Boca Raton, FL: CRC Press, (1993).

Xue, P., Li, G., Liu, W. and Yan, C., “Copper uptake and translations in a submerged aquatic plant *Hydrilla verticillata* (L.f.) Royle”, *Chemosphere*, 81, 1098-1103, (2010).

Yaapar, M. N., Masri, İ. N. B., Baharom, N. B., Shyi, Y. J. and Ali, H. B. M., *Phytoremediation*, (27 Nisan 2019), <http://www.biology-online.org/articles/phytoremediation-a-lecture/phytostabilization.html>, (2014).

Yıldız, E., “Küçükçekmece Gölü Sediment Matriksindeki Ağır Metal Fraksiyonlarının Araştırılması”, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri, (2011).

Yin Sim, Ng. and Chan, D. J. C., “Wastewater phytoremediation by *Salvinia molesta*”, *Journal of Water Process Engineering*, 15, 107-115, (2017).

8. ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : FARIDA BAGHIROVA

Doğum Yeri ve Tarihi : 30.03.1995

Lisans Üniversite : Azerbaycan Devlet Petrol ve Sanayi
Üniveristesi

Elektronik posta : fbagirova95@gmail.com

İletişim Adresi : Kınıklı mah., 6078 Sok. No: 8
Pamukkale / Denizli