



T. C.

ORDU ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

***Wolffia arrhiza* (LEMNACEAE) KULLANARAK BELEDİYE
ATIK SULARINDAN NÜTRİENT ELEMENTLERİN
UZAKLAŞTIRILMASI**

SEHER ARSLAN GÜNAL

YÜKSEK LİSANS TEZİ

MOLEKÜLER BİYOLOJİ VE GENETİK ANABİLİM DALI

ORDU 2023

TEZ BİLDİRİMİ

Tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan ve kullanılan intihal tespit programının sonuçlarına göre; bu tezin yazılmasında bilimsel ahlak kurallarına uyulduğunu, başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunulduğunu, tezin içerdiği yenilik ve sonuçların başka bir yerden alınmadığını, kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapılmadığını, tezin herhangi bir kısmının bu üniversite veya başka bir üniversitedeki başka bir tez çalışması olarak sunulmadığını beyan ederim.

Seher ARSLAN GÜNAL

Bu çalışma Ordu Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğünün B-2210 numaralı projesi ile desteklenmiştir.

ÖZET

***Wolffia arrhiza* (LEMNACEAE) KULLANARAK BELEDİYE ATIK SULARINDAN NÜTRİENT ELEMENTLERİN UZAKLAŞTIRILMASI**

Seher ARSLAN GÜNAL

ORDU ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MOLEKÜLER BİYOLOJİ VE GENETİK ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ, 96 SAYFA

(TEZ DANIŞMANI: Prof. Dr. Beyhan TAŞ)

Atık sular genellikle yüksek konsantrasyonlarda azotlu ve fosfatlı bileşikler içerir. Karmaşık organik maddelerin anaerobik parçalanmasından dolayı atık su arıtım tesislerinin çıkış suyunda bile nütrient konsantrasyonu yüksek olabilir. Bu nütrient elementler, alıcı su ortamında yüksek konsantrasyonlarda bulunduğu yüzey sularının ötrofikasyonuna yol açabilir. Biyolojik kirlenmeyi azaltmak için, ötrofik koşullarda hızla büyüme potansiyeli olan su mercimekleri doğal bir arıtım yapabilir. Bu çalışmada, dünyanın en küçük çiçekli bitkisi olan köksüz su mercimeği *Wolffia arrhiza*'nın kentsel atık su arıtım tesisi çıkış suyundan nütrient uzaklaştırma potansiyeli araştırılmıştır. Ordu ili Altınordu ilçesindeki Durugöl İleri Biyolojik Atık Su Arıtma Tesisi'nin su çıkışından alınan suda; farklı spektral ışık sistemlerinde (floresan ve LED) ve sıfır değerlikli demir nanopartikülü (Fe^0NP) ilave edilen gruplarda *W. arrhiza*'nın büyüme performansı ve nütrient uzaklaştırma potansiyeli incelenmiştir. İklim dolabında, kontrollü koşullarda 104 saat (t4.3) süren biyodenyey sonucunda; *W. arrhiza*'nın en yüksek nütrient giderimi amonyum azotunda (NH_4^+-N), floresan ışıklı ortamda tespit edilmiştir (%96). Yüksek ışık şiddetindeki Fe^0NP içeren ortamlarda (%39) ve düşük ışık şiddetindeki Fe^0NP içermeyen ortamlarda daha fazla nitrit azotu (NO_2^-N) giderimi (%42) gerçekleşmiştir. En fazla nitrat azotu (NO_3^-N) giderimi yüksek ışık şiddetiyle beraber, Fe^0NP ilave edilen floresan ışıklı ortamda gerçekleşmiştir (%70). Fe^0NP ilave edilen yüksek ve düşük ışık şiddetli ortamlarda nitrat giderim verimliliği %39–%42'dir. *W. arrhiza*'nın toplam azot (TN) giderimi %36–%55 aralığında tespit edilmiştir. En fazla TN giderimi Fe^0NP içeren mor LED'li (30M/30K) ve diğer Fe^0NP 'li gruplarda görülmüştür (%55–%45). Toplam fosfor (TP) giderim verimliliği %60'la en yüksek Fe^0NP ilave edilen floresan ışıklı ortamda tespit edilmiştir. Biyodenyey sonucunda *W. arrhiza* suyun pH değerini yükseltmiştir. *W. arrhiza*'nın çıkış suyundaki elektriksel kondüktiviteyi (EC) iyileştirmesi, Fe^0NP ilave edilen mor LED'li 100M/50K ve 30M/30K grupların sırasıyla %60 ve %59 olarak kaydedilmiştir. Deney grupları arasında yapılan ANOVA ve Tukey'in *post hoc* testiyle yapılan istatistiksel analiz sonucunda; KOİ, AKM, pH, EC, NH_4^+-N , NO_2^-N , NO_3^-N , TN ve TP giderimine yönelik önemli farklılıklar olduğu belirlenmiştir ($p<0.05$).

Köksüz su mercimeği *W. arrhiza* ile yapılan çalışmada, bitkinin kentsel atık su ileri arıtım tesisinin çıkış suyunda bile nütrient giderimi yapabildiği, farklı ışık kombinasyonları ve nanopartikül ilavesinin de suyun iyileştirilmesinde kullanılabileceği görülmüştür. *W. arrhiza*'nın diğer su mercimeği türleri arasında

ötrofikasyona yol açan ve su kalitesini bozan önemli nütrientleri uzaklaştırma potansiyeline sahip olduğu belirlenmiştir. Yapay sulak alan sistemlerinde çevre dostu ve hızlı büyüme potansiyeli olan *W. arrhiza* kullanılarak suyun iyileştirilmesi sağlanıp, elde edilen su tarımsal alanlarda, park ve bahçelerde sulama suyu olarak değerlendirilebilir.

Anahtar Kelimeler: Atık Su, Fitoremediasyon, Köksüz Su Mercimeği, Nanopartikül, Ötrofikasyon, *Wolffia*

ABSTRACT

REMOVAL OF NUTRIENT ELEMENTS FROM MUNICIPAL WASTEWATER USING *Wolffia arrhiza* (LEMNACEAE)

Seher ARSLAN GÜNAL

ORDU UNIVERSITY INSTITUTE OF NATURAL AND APPLIED
SCIENCES

MOLECULAR BIOLOGY AND GENETICS

SCIENCE TEACHER EDUCATION

MASTER THESIS, 96 PAGES

(SUPERVISOR: Prof. Dr. Beyhan TAŞ)

Waste waters often contain high concentrations of nitrogenous and phosphate compounds. Even in the effluent of wastewater treatment plants, the nutrient concentration can be high due to the anaerobic degradation of complex organic materials. These nutrient elements can lead to eutrophication of surface waters when present in high concentrations in the receiving aquatic environment. To reduce biofouling, duckweeds, which have the potential to grow rapidly in eutrophic conditions, can make a natural treatment. In this study, the nutrient removal potential of the world's smallest flowering plant, the rootless duckweed *Wolffia arrhiza*, from the effluent of an urban wastewater treatment plant was investigated. In the water taken from the water outlet of the Durugöl Advanced Biological Wastewater Treatment Plant in Altınordu district of Ordu province; The growth performance and nutrient removal potential of *W. arrhiza* were investigated in different spectral light systems (fluorescent and LED) and in groups with zero-valent iron nanoparticle (Fe^0NP). As a result of the bioexperiment lasting 104 hours (t4.3) in the climate cabinet under controlled conditions; The highest nutrient removal of *W. arrhiza* was detected in ammonium nitrogen ($\text{NH}_4^+\text{-N}$), in fluorescent light medium (96%). More nitrite nitrogen ($\text{NO}_2^-\text{-N}$) removal (42%) occurred in environments containing Fe^0NP at high light intensity (39%) and in environments without Fe^0NP at low light intensity. The highest nitrate nitrogen ($\text{NO}_3^-\text{-N}$) removal was achieved in fluorescent light medium (70%) with the addition of Fe^0NP , together with high light intensity. Nitrate removal efficiency is 39-42% in high and low light intensity environments where Fe^0NP is added. Total nitrogen (TN) removal of *W. arrhiza* was found in the range of 36%-55%. The highest TN removal was seen in Fe^0NP containing purple LED (30M/30K) and other Fe^0NP groups (55%-45%). The highest total phosphorus (TP) removal efficiency of 60% was determined in the fluorescent light medium with Fe^0NP added. As a result of the bioexperiment, *W. arrhiza* increased the pH value of the water. The improvement of the electrical conductivity (EC) in the effluent of *W. arrhiza* was recorded as 60% and 59% of the 100M/50K and 30M/30K groups with purple LED s added Fe^0NP , respectively. As a result of the ANOVA and Tukey's post hoc test performed between the experimental groups; It was determined that there were significant differences in the removal of COD, AKM, pH, EC, $\text{NH}_4^+\text{-N}$, $\text{NO}_2^-\text{-N}$, $\text{NO}_3^-\text{-N}$, TN and TP ($p < 0.05$).

In the study conducted with rootless duckweed *W. arrhiza*, it was observed that the plant can remove nutrients even in the effluent of the urban wastewater advanced treatment plant, and that different light combinations and nanoparticle addition could be used to improve water. It has been determined that *W. arrhiza* has the potential to remove important nutrients that cause eutrophication and deteriorate water quality among other duckweed species. By using *W. arrhiza*, which is environmentally friendly and has a rapid growth potential in artificial wetland systems, water can be improved and the water obtained can be used as irrigation water in agricultural areas, parks and gardens.

Keywords: Wastewater, Phytoremediation, Rootless Duckweed, Nanoparticle, Eutrophication, *Wolffia*

TEŞEKKÜR

Tez konumun belirlenmesi, çalışmanın yürütölmesi ve yazımı esnasında başta danıőman hocam Sayın Prof. Dr. Beyhan TAŞ'a; analizler sırasında yardımlarını esirgemeyen OSKİ Genel Müdürlüğü'nden Arıtma Tesisleri Dairesi Baőkanı Gültekin KIRAN'a ve Laboratuvar, Denetim ve Ruhsatlandırma Őube Müdürü Gökhan ACISU'ya çok teşekkür ederim.

Aynı zamanda, manevi desteklerini her an üzerimde hissettiğim babam, annem ve eőim İcabi Bey'e teőekkürü bir borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
TEZ BİLDİRİMİ	I
ÖZET	II
ABSTRACT	IV
TEŞEKKÜR	VI
İÇİNDEKİLER	VII
ŞEKİL LİSTESİ	IX
ÇİZELGE LİSTESİ	X
SİMGELER ve KISALTMALAR LİSTESİ	XI
1. GİRİŞ	1
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR	6
2.1 Fitoremediasyon	6
2.2 Çeşitli Tiplerde İnşa Edilmiş Sulak Alanların Temel Özellikleri	10
2.3 XXI. Yüzyılda Atıksu Arıtımı İçin İnşa Edilen Sulak Alanlar	14
2.4. Atık Su Islahında Kullanılan Bitkiler.....	17
2.5 Mikrokirleticilerin Bitkiler Üzerindeki Toksik Etkileri.....	18
2.6 Bitkiler Tarafından Mikrokirletici Kaldırmanın Etkinliği	20
2.7 Su Mercimekleri.....	25
2.8 Işık Kaynakları ve Yapılan Bazı Çalışmalar	35
2.8.1 Işık Kaynağı Olarak Işık Yayan Diyot (LED) Teknolojisi	37
2.9 Sıfır Değerlikli Demir Nanopartikülü (Fe0NP) ve Fitoremediasyon ile ilgili Yapılan Bazı Çalışmalar	40
2.10 İşletim Parametreleri	41
3. MATERYAL ve YÖNTEM	46
3.1 Bitki Materyali ve Ön Kültürü	46
3.2 Atık Su Örneklerinin Alınması ve Analizi.....	47
3.3 Kontrollü Deney Düzenegi	48
3.4 Bitki Analizleri.....	52
3.5 İstatistiksel Analiz.....	54
4. BULGULAR ve TARTIŞMA	55
4.1 pH 61	
4.2 Elektriksel İletkenlik (EC)	62
4.3 Askıda Katı Madde (AKM)	64
4.4 Kimyasal Oksijen İhtiyacı (KOİ).....	64
4.5 Toplam Fosfor (TP)	65
4.6 Amonyum Azotu (NH ₄ ⁺ -N)	67
4.7 Nitrit Azotu (NO ₂ ⁻ -N)	69
4.8 Nitrat Azotu (NO ₃ ⁻ -N).....	70
4.9 Toplam Azot (TN).....	71
4.10 Wolffia arrhiza'nın Kentsel Çıkış Suyunda Büyüme Performansı	73
4.11 Wolffia arrhiza'nın N-medium Ortamında Büyüme Performansı	75
5. SONUÇ ve ÖNERİLER	78
6. KAYNAKLAR	81
ÖZGEÇMİŞ	94

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 İnşa Edilmiş Sulak Alan Tipleri (IWA 17th International Conference, 2022)	11
Şekil 2.2 Lemnaceae Familyasının Şu Anda Kabul Edilen 36 Türünün Listesi (Bog ve ark., 2020; Tippery ve Les, 2020)	26
Şekil 3.1 Doğal ortamda <i>W. arrhiza</i> , Terme, Samsun (Orijinal, H. Topaldemir) ve Mikroskop Görüntüleri	46
Şekil 3.2 Laboratuvarda <i>W. arrhiza</i> ön kültür çalışmaları.....	47
Şekil 3.3 Ordu Atık Su Arıtma Tesisi (AAT) ve ATT Akım Şeması.....	47
Şekil 3.4 Mavi/Kırmızı LED (30/30 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ (Mor: 60 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$) PPF Meter ile Ölçümü	50
Şekil 3.5 Deney Gruplarının Hazırlanması	50
Şekil 3.6 Deney Gruplarının Hazırlanması	51
Şekil 4.1 Geri Kazanılmış Atıksuda Olabilecek Nütrient Seviyeleri.....	55
Şekil 4.2 <i>W. arrhiza</i> 'nın Farklı Deney Gruplarında AAT Çıkış Suyundan Nütrient Giderim Oranları	57
Şekil 4. 3 Sulamada Geri Kullanılacak Arıtılmış Atık Suların Sınıflandırılması (AATTUT, 2010)	59
Şekil 4.4 Sulama Suyunun Kimyasal Kalitesinin Değerlendirilmesi İçin Geliştirilmiş Tablo (AATTUT, 2010).....	60
Şekil 4.5 Arıtılmış Atıksu ile Sulanabilecek Bitkiler (AATTUT, 2010).....	60
Şekil 4.6 <i>W. arrhiza</i> 'nın Farklı Ortam Koşullarında Bağlı Büyüme Hızı	74
Şekil 4.7 <i>Wolffia arrhiza</i> 'nın N-Medium İçinde Bağlı Büyüme Hızı	75

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1 Çeşitli Atık Su Türleri İçin İnşa Edilmiş Sulak Alanların Kullanımı (Vymazal, 2022).....	15
Çizelge 2.4 Bitki Bazlı Sistemlerde Mikro Kirleticilerin Giderim Etkinliği (Polińska ve ark., 2021).....	20
Çizelge 3.1 Kontrol ve Deney Grupları	49
Çizelge 4.1 Biyodenyey Başlangıcında ve Sonucunda AAT Çıkış Suyu Analizleri ...	56
Çizelge 4.2 W. arrhiza'nın Kullanıldığı Farklı Deney Gruplarında pH Değişimi.....	61
Çizelge 4.3 W. arrhiza'nın Kullanıldığı Farklı Deney Gruplarında EC Değişimi.....	63
Çizelge 4.4 W. arrhiza'nın Kullanıldığı Farklı Deney Gruplarında AKM Miktarı ...	64
Çizelge 4.5 W. arrhiza'nın Kullanıldığı Farklı Deney Gruplarında KOİ Giderim	65
Çizelge 4.6 W. arrhiza'nın Kullanıldığı Farklı Deney Gruplarında TP Giderim Verimliliği	66
Çizelge 4.7 W. arrhiza'nın Kullanıldığı Farklı Deney Gruplarında Amonyum Giderim Verimliliği	68
Çizelge 4.8 W. arrhiza'nın Kullanıldığı Farklı Deney Gruplarında Nitrit Giderim Verimliliği	69
Çizelge 4.9 W. arrhiza'nın Kullanıldığı Farklı Deney Gruplarında Nitrat Giderim Verimliliği	70
Çizelge 4.10 W. arrhiza'nın Kullanıldığı Farklı Deney Gruplarında Toplam Azot Giderim Verimliliği.....	71

SİMGELER ve KISALTMALAR LİSTESİ

AAT:	Atıksu Arıtma Tesisinde
AATTUT:	Atıksu Arıtma Tesisleri Teknik Usuller Tebliği
AKM :	Askıda Katı Madde
BOİ :	Biyokimyasal Oksijen İhtiyacı
Cd :	Kadmiyum
CPC :	Ham Protein İçeriği
Cr(VI) :	Altı Değerlikli Krom
CW:	İnşa Edilmiş Sulak Alanlar
DEG'ler:	Metabolit Birikimleri Ve Farklı Şekilde İfade Edilen Genler
DEHP :	Bis(2-Etilheksil)
DEP:	Dietil
DIAAS:	Esansiyel Amino Asit Skoru
DIBP:	Diizobütil
DIHP:	Diizoheptil
DINP:	Diizononil
DMP:	Dimetil
DnBP:	Dibütil
DnPP:	Dipropil
EDC:	Endokrin Bozan Bileşikler
Fe⁰:	Sıfır Değerlikli Demir
Fe⁰NP:	Sıfır Değerlikli Demir Nanopartikülü
GO:	Gen Ontolojisi
HSSF CW:	Yatay yeraltı akışıyla inşa edilmiş sulak alanlar
HY5:	İşıktaki büyümenin baskılanması esas olarak temel lösin fermuar transkripsiyon faktörleri biri, uzatılmış hipokotil 5),
IVF:	Kapalı Dikey Çiftlik
KEGG:	Kyoto Genler Ve Genler Ansiklopedisi
KOİ:	Kimyasal Oksijen İhtiyacı
LB:	Beyaz LED
LED:	İşık Yayan Diyot
LM:	Mavi LED
MYC2:	<i>Savunma yanıtları</i> , transkripsiyon faktöründen biri
N:	Azot
NH₃-N:	Amonyum Azotu
NH₄⁺-N:	Amonyum Azotu
NO₂⁻-N:	Nitrit Azotu
NO₃⁻-N:	Nitrat Azotu
PCP:	Pentaklorofenol
PE:	Population Equivalent (Nüfus Eşdeğeri)
PGPB:	Bitki Büyümesini Teşvik Eden Bakteriler
PIF4:	Fitokrom etkileşim faktörü
RDA:	Artıklık analizi
RGR:	Bağıl Büyüme Hızına
RPY:	Bağıl Protein Verimi
SSF:	Yeraltı Akış Sistemleri

SYS:	Serbest Yüzeyle Yapay Sulak Alan Sistemi
TCEP:	Tris (2-Kloroetil) Fosfat
TKM:	Toplam Katı Madde
TKOİ:	Toplam Kimyasal Oksijen İhtiyacı
TN:	Toplam Azot
TOC:	Toplam Organik Karbon
UAKM:	Uçucu Askıda Katı Madde
VSSF CW:	Dikey Yer Altı Akışıyla İnşa Edilmiş Sulak Alanlar
YAS:	Yüzeyle Altı Akışlı Sulak Alan Sistemi
YDAYSA:	Yüzeyle Altı Düşey Akışlı Yapay Sulak Alan Sistemi
YYAYSA:	Yüzeyle Altı Yatay Akışlı Yapay Sulak Alan Sistemi

1. GİRİŞ

Kirlilik, modern toplumları etkileyen kritik varoluşsal sorunlardan birisidir. Geçen yüzyılın sanayi devrimi olması ve zaman içinde insan nüfusunun yoğun artışı, çevreye benzeri görülmemiş miktarda atık madde ve kirletici bırakılmasına neden olmuştur. Lancet Kirlilik ve Sağlık Komisyonu'na göre, 2015 yılında dünya genelindeki ölümlerin %16'sı hava, su ve toprak kirliliğinden kaynaklanmaktadır (Ekperusi ve ark., 2019). Suyun kimyasal ve biyolojik kirlenmesiyle ilgili çevresel sorunlar toplum, kamu yetkilileri ve endüstri için önemli bir endişe haline gelmiştir (Crini ve Lichtfouse, 2019). Su, milyonlarca yıldır dünya üzerinde döngüsü sayesinde varlığını devam ettirmektedir. Suyun miktarı aynı kalsa da değişen suyun yeryüzündeki dağılımıdır (Oluklulu, 2017). Su, yaşamın devamı için gerekli olan temel ihtiyaç maddelerinden birisidir. Dünya'daki nüfus artışı küresel su kullanımını her 15 yılda bir ikiye katlamaktadır. WHO (Dünya Sağlık Örgütü)'nun kaynaklarına göre, su kaynaklarının azlığı dünya nüfusunun %40'ından fazlası için zorluk yaratmaktadır. Yeraltı sularında ve atık sularda çok çeşitli kirletici konsantrasyonlarının artmasından dolayı milyarlarca insanın sağlığını etkilemektedir (Fu ve ark., 2014).

Atık suyun birçok tanımı bulunmaktadır. Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliği'nde (2004) atıksu "Evsel, endüstriyel, tarımsal ve diğer kullanımlar sonucunda kirlenmiş veya özellikleri kısmen ya da tamamen değişmiş sular ile maden ocakları ve cevher hazırlama tesislerinden kaynaklanan sular, yapılaşmış kaplamalı ve kaplamasız şehir bölgelerinden cadde, otopark ve benzeri alanlardan yağışların yüzey veya yüzeyaltı akışa dönüşmesi sonucunda oluşan sular" şeklinde tanımlanmaktadır. Aynı yönetmelikte alıcı ortam "Atıksuların deşarj edildiği veya dolaylı olarak karıştığı göl, akarsu, kıyı ve deniz suları ile yeraltı suları gibi yakın veya uzak çevreyi" ifade etmektedir.

Diğer bir atık su tanımlaması, endüstriyel alanlardan, konutlardan, kurumlardan ve ticari kuruluşlardan kirlenerek su ve suyla taşınan atıklarla birlikte, bu atık sulara karışan yağmur sularının karışımı olarak tanımlanabilmektedir (Yüksel, 2022). Atık sular kentsel, evsel, endüstriyel ve tarımsal olmak üzere dört grup olarak değerlendirilmektedir. Kentsel atık sular, evsel ve endüstriyel atık suların yanı sıra yağmur suyunun ve çevredeki suların sızması ile oluşan sulardır. Tarımsal atık su,

tarım faaliyetleri ve çiftliklerden bazen de kirli yeraltı sularından kaynaklanan proseslerden elde edilen atık sulardan oluşmaktadır. Evsel atık su, tuvalet ve hayvan atıklarından oluşan “siyah su” ile çeşitli atık su bileşenlerinden oluşan “gri-su” (bulaşık, çamaşır yıkama, ev temizliği ve banyo) kaynaklarından oluşan atık su olarak tanımlanmaktadır (Eriksson ve ark., 2002; Üçüncü, 2019). Yapılan bu tanımlamalar doğrultusunda atık suları, endüstriyel alan, evsel alan ve tarımsal alanlarda vb. faaliyetler sonucunda içerik özelliklerinin değişime uğramış halidir (Yüksel, 2022). Dünya genelinde, evsel atık suyunun %90’ı herhangi bir arıtma işlemi yapılmadan deşarj edilmektedir (Liu ve Chen, 2014).

Fosfor (P), canlının büyümesi için temel bir besindir ve azottan (N) sonra en sınırlayıcı ikinci besindir. Mevcut kaynaklar, küresel olarak eşit olmayan bir şekilde dağılmış ve sürdürülemez bir şekilde sömürülen P gün geçtikçe azalmaktadır. Bu durum gelecekteki mevcudiyet ve dolayısıyla gıda güvenliği ile ilgili endişelere yol açmaktadır. Su mercimekleri (Lemnaceae), atık su iyileştirmede kullanılan ve besin veya gübre olarak besin geri dönüşümü potansiyeli olan suda yaşayan makrofitlerdir (Paterson ve ark., 2020). Makrofitler, fotosentetik makinalar gibi işlev yapar ve biyolojik arıtım yaparak suyun temizlenmesinde çok önemli rol oynarlar (Taş ve Topaldemir, 2021). Ağır metallerin, radyoaktif maddelerin, pestisit ve iz elementlerin suda yol açtığı kirliliğin biyoremediasyonunda sucul makrofitlerin (emergent, submergent ve yüzen yapraklılar) kullanımının diğer arıtım yöntemlerine göre (fiziksel, kimyasal ve biyolojik) hem çevre dostu hem de ekonomik olması bakımından oldukça avantajlı olduğu bildirilmiştir (Yılmaz ve Taş, 2021). Atık suların arıtılması ve doğal suların remediasyonu için cazip ve umut verici alternatif bir arıtım teknoloji olarak kurulan yapay sulak alan sistemlerinde bazı makrofitlerin (*Azolla* Lamarck, *Ceratophyllum* L., *Eichhornia* Kunth, *Lemna* L., *Myriophyllum* L., *Pistia* L.) fitoremediasyon özelliğinden faydalanılmaktadır (Nassouhi ve ark., 2018; Tokmak ve ark., 2019; Yılmaz ve Taş, 2021).

Su mercimeği yüksek vejetatif büyüme oranlarına (Sree ve ark., 2015; Ziegler ve ark., 2015) ve doğal besleyici nitelikleri nedeniyle eşsiz biyokütle üretme potansiyellerine sahiptirler (Appenroth ve ark., 2017; Bog ve ark., 2019). Gıda ve yem için kullanımına uygun olmaları (Appenroth ve ark., 2017; Sonta ve ark., 2019),

biyogaz üretiminde kullanılabilirliği (Kaur ve ark. 2019), nişasta açısından zengin biyokütleden biyoetanol üretimde kullanılabilirliği oldukça dikkat çekicidir.

Su mercimeği üyelerine olan ilgi son 20 yılda daha da artmıştır, fakat cinsler arası ilgi farklılık göstermektedir. Lemnaceae familyasında taksonomik olarak beş cins içinde yer alan (*Spirodela*, *Landoltia*, *Lemna*, *Wolffiella* ve *Wolffia*) 36 farklı su mercimeği türü tanımlanmıştır (Sree ve ark., 2016; Bog ve ark. 2020). Morfolojik olarak *Spirodela*, *Landoltia* ve *Lemna* köklü, *Wolffiella* ve *Wolffia* köksüz su mercimeğidir (Landolt, 1986; Les ve ark., 2002). Nutrient giderimi, *Lemna minör*, *Lemna gibba*, *Spirodela polyrhiza* ve *Wolffia arrhiza* gibi su mercimekleri kullanılarak başarılmaktadır. Evsel, kentsel ve tarımsal kaynaklardan gelen atık sular genellikle yüksek konsantrasyonlarda amonyum (NH₄), nitratlar (NO₃) ve fosfatlar (PO₄), içerir. Hatta arıtma tesislerinde karmaşık organik maddelerin anaerobik parçalanmasından sonra bile bu nütrientler yüksek olabilir. Bu besleyici elementler, su ortamında büyük miktarlarda bulunduğu yüzey sularının ötrofikasyonuna yol açabilir, ancak atık sular ve kirli doğal sular üzerinde büyüyen su mercimeği tarafından kolayca uzaklaştırılırlar (Landesman ve ark., 2011).

Su mercimekleri; ekonomik olmaları, ülkemizde kolay bulunabilmesi, olumsuz koşullara dayanıklı olması, yüksek arıtım potansiyelleri, gibi özelliklerinden dolayı Türkiye’de nütrient gideriminde kullanılabilir (Topal ve Erdal, 2011). Son 40 yılda hem noktasal kaynaklardan (besleme alanları, gıda işleme tesisleri) hem de noktasal olmayan kaynaklardan gelen atık suların arıtılması için su mercimeğinin kullanımı hakkında çok sayıda araştırma yayımlanmıştır (Landesman ve ark., 2010). Bu bitkiler, tarımsal uygulamalarda kirlenmiş sulardan azot ve fosfor gibi besin maddelerini geri kazanabilir. Ayrıca dokularındaki metalleri, radyonüklidleri ve diğer kirleticileri çıkarabilir veya biriktirebilirler. Su mercimeği sistemleri, evsel atık sudan nitrojen ve fosforun %50-60'ını giderdiğini bildirmiştir (Vatta ve ark., 1994). Buna ek olarak, su mercimeği besi ve kümes hayvanları için bir yem kaynağı ve biyoyakıt üretimi için bir enerji kaynağı olarak kullanılabilir (Landesman ve ark., 2010).

Suda önemli ölçüde artan N, P ve diğer gübre birikimi, dramatik su ötrofikasyonuna ve su bitkilerinin aşırı çoğalmasına neden olmaktadır. Ötrofikasyon, küresel olarak tatlı su ve kıyı deniz ekosistemleri için en büyük stres faktörlerinden

biridir (McCrackin ve ark., 2017). Ötrofikasyon su kütlelerinin ekolojik dengesini ve su kalitesini bozar, çözülmüş oksijen içeriğini düşürür, hatta suda yaşayan canlıların ölümüne neden olur. Atık sular, mikroalg ve makrofitlerin gelişimini destekleyebilen fosfor ve azot gibi besinler içerir. Ancak fotosentetik organizmaların kontrolü, ötrofikasyonu azaltabilir ve hatta önleyebilir. Kirli suların temizlenmesi için farklı fiziksel, kimyasal ve biyolojik yaklaşımlar kullanılmış olup, bunların arasında fitoremediasyon teknolojisi etkili ve çevre dostu bir çözüm olarak kabul edilmektedir. Fitoremediasyon, suyun sürdürülebilirliğe yönelik ciddi çabalardan biridir. Makrofit bazlı atık su arıtma sistemleri, geleneksel arıtma sistemlerine kıyasla çeşitli avantajlara sahiptir. Atık su arıtımı için inşa edilmiş sulak alanlarda bitki organizmalarının kullanılması, “yeşil” arıtma proseslerinin tüm gereksinimlerini karşılar. Yüksek giderim verimliliği, basit kullanımı, düşük maliyeti ve suyun yeniden kullanılması için büyük potansiyeli nedeniyle bu arıtma yöntemi, atık su arıtımı için popüler bir seçenek haline gelmiştir (Kadlec ve Wallace, 2009; Priya ve ark., 2012; Ekperusi ve ark., 2019; Júnior ve ark., 2022).

Birçok çalışma, su mercimeğinin tarımsal, kentsel ve hatta endüstriyel atık su akışlarını içilemez temiz suya arıtmak için kullanıldığını göstermiştir. Ötrofik suyun ekolojik restorasyonu için su mercimeği kullanmanın avantajları şunlardır: (i) hızlı büyüme ve yüksek biyokütle üretimi, (ii) yüksek fotosentez etkinliği, (iii) muazzam besin alma kapasitesi, (iv) çeşitli su ekosistemlerine geniş adaptasyon ve (v) zahmetsiz hasattır. Su mercimeği, sudaki azot, fosfor ve diğer inorganik nütrientleri verimli bir şekilde kullanabilir ve suyun fizikokimyasal özelliklerini ve mikro ortamını iyileştirebilir (Liu ve ark., 2021a). Dolayısıyla, atık su arıtımı için bitkilerin kullanıldığı sistemler oldukça avantajlıdır. Dünya genelinde su mercimeği olarak *Lemna* türlerinin yaygın kullanıldığı görülmektedir. Ancak, aynı aileden olan ve bu çalışmada kullanılan dünyanın en küçük çiçekli bitkisi köksüz su mercimeği *Wolffia arrhiza* ile yapılan çalışmalar çok fazla değildir.

Lemnaceae familyasının en minik üyesi olan *W. arrhiza*; suda serbest yüzen yapraklılar grubundan, kökleri olmayan, dünyanın en küçük çiçekli bitkisidir. Köksüz su mercimeği *W. arrhiza*, mezotrofik-ötrofik sularda, taban suyu zengin ova hendeklerinde ve göletlerde gelişen Türkiye’de ilk kez Yeşilirmak Deltası’nda (Terme) kaydedilmiş (Taş ve Topaldemir, 2021) ve *L. minor* ile su yüzeyinde

topluluklar oluşturduğu gözlenmiştir. Suyun kullanıldığı alanlarda peyzaj özelliği olan *W. arrhiza*'nın (Taş ve Topaldemir, 2021), evsel atık suyun (gri su) arıtılmasında kullanılabileceği ve uzay yolculuğunda astronotların besin ve su takviyesinde değerlendirebileceği (Arslan Günal ve Taş, 2022), element içeriğinin yüksek olduğu (Taş ve Şengüllendi, 2022), özellikle azotça ve dolayısıyla protein içeriği bakımından zengin bir bitki olduğu (Taş ve Şengüllendi, 2023) yapılan araştırmalarla gösterilmiştir.

Bu çalışmada, in vitro ortamda, kontrollü koşullar altında yetiştirilen *W. arrhiza*'nın kentsel atıksu arıtma suyundan fitoremediasyon yöntemi ile nütrient giderme, özellikle azot ve fosfor giderme kapasitesinin araştırılması amaçlanmıştır. Bu çalışma ile Ordu ili Altınordu ilçesindeki Durugöl ileri biyolojik atık su arıtma tesisinin su çıkışımdan alınan suda; (i) farklı spektral LED ışık sistemlerinde yetiştirilen *W. arrhiza*'nın büyüme ve nütrient uzaklaştırma potansiyeli, (ii) atık suya sıfır değerlikli demir nanopartikülü ilave edilerek LED ışık sistemlerinde *W. arrhiza*'nın büyüme ve nütrient uzaklaştırma potansiyeli, (iii) kontrol olarak N-medium ortamında farklı LED ışık sisteminde yetiştirilen *W. arrhiza*'nın büyüme performansı incelenmiştir. Çalışmada, su analiz sonuçları Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliği (SKKY, 2004), Kentsel Atıksu Arıtımı Yönetmeliği (KAAY, 2006) ve Atıksu Arıtma Tesisleri Teknik Usuller Tebliği (AATTUT, 2010) ile karşılaştırılarak, *W. arrhiza*'nın fitoremediasyon potansiyelinin ortaya konulması, arıtılmış olan suyun sulama suyu olarak potansiyelinin belirlenmesi ve Türkiye'de henüz tanınmayan bu makrofitin ülke ekonomisine katkı sağlaması hedeflenmiştir.

2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

2.1 Fitoremediasyon

Antropojenik faaliyetler; çevreye büyük miktarda kimyasallar, evsel atıklar ve zararlı gazlar salarak ekosistemin fiziksel, kimyasal ve biyolojik özelliklerini dünya çapında değiştirir. Biyolojik ajanlar, bu kirleticileri metabolizmalarının bir parçası olarak kullanır ve onları daha az toksik veya zararsız yan ürünlere dönüştürür. Hiperakümülatörler olarak adlandırılan bazı bitkiler, çeşitli kirleticileri temizleme donanımlarına sahiptir. Bu duruma fitoremediasyon denir. Fitoremediasyon, çevrede biriken çeşitli organik ve inorganik toksinleri uzaklaştırmayı, azaltmayı, parçalamayı ve hareketsiz hale getirmeyi amaçlayan bir dizi çevre dostu teknolojidir (Deng ve Cao, (2017). Birleşmiş Milletler Çevre Programı fitoremediasyonu “Çevresel kirleticileri uzaklaştırmak, detoksifiye etmek veya hareketsiz hale getirmek için bitkilerin verimli kullanımı” olarak tanımlamıştır. Fitoremediasyon, kontamine ortamların temizlenmesi için çevre dostu ve avantajlı bir tekniktir. Fitoremediasyon mekanizması; kirleticilerin kökler yoluyla emilmesi, vücut dokularında birikmesi, kirleticilerin ayrıştırılması ve daha az zararlı formlara dönüştürülmesidir. Fitoremediasyon, bir biyoremediasyon şeklidir. Farklı ortamlarda kullanılan çeşitli fitoremediasyon teknikleri, dünya çapında birçok bilim insanı tarafından kapsamlı bir şekilde tartışılmıştır (Ansari ve ark., 2020; Pandey ve ark., 2021).

Fitoremediasyon amacı ile kullanılan bitkilerin yaşadığı sulak alanlara doğal, bataklık veya kök sulak alanları da denir. Fitoremediasyon modüllerini kullanmak, diğer arıtma tesisi türlerine göre daha avantajlıdır. Çünkü atık su eksikliğine rağmen yapımı, işletmesi daha basit ve daha düşük maliyetlidir. Bitki sistemlerini kullanarak atık su arıtmanın sonuçlarını analiz eden çalışmalar yapılmıştır. Bitki ıslahının etkinliği; kullanılan bitki türlerine, bitkilerin miktarına, işlem süresine ve ayrıca inşa edildiği sulak alandaki toprağın özelliklerine bağlıdır.

Atık suların arıtımında bitkilerin kullanımı yaklaşık 300 yıl önce başlamıştır. Şu anda fitoremediasyon, özellikle küçük ev tipi atık su arıtma tesisleri için önerilen, su arıtma için hızla gelişen bir yöntemdir. Başlangıçta bitkiler, kontamine ortamlardan ağır metalleri uzaklaştırmak, pH, elektrik iletkenliği (EC), toplam süspansiyon (TS), kimyasal oksijen ihtiyacı (KOİ) ve biyolojik oksijen ihtiyacı (BOİ₅), toplam organik

karbon (TOC) ve çözünmüş oksijen formu (DOC), toplam azot (TN), çözünmüş azot (DN), toplam fosfor (TP), orto-fosfor formu (orto-P) gibi genel su parametrelerini iyileştirmek için kullanılmıştır. Günümüzde araştırmacıların ilgi alanları, EDC grubundan bileşikler (Endokrin Bozan Bileşikler)) de dâhil olmak üzere organik mikro kirleticilerin uzaklaştırılmasında bitki organizmalarının etkinliği ve bu amaca ulaşmak için seçilmiş bitkilerin kullanım olanakları üzerine odaklanmıştır. Bir bitki veya bitkilerin doğru seçimi, toksik biyolojik bozunma oranları ve EDC'lerin giderilme oranları hakkında bilgi sağlayan ayrıntılı çalışmalar gerektirir (Justin ve ark., 2010; Polińska ve ark., 2021). Yeşil ıslah, düşük ve orta risk grubundaki kirlenmiş yerlerin ıslah edilmesinde özellikle seçilmiş, genetik olarak ayarlanmış bitkiler kullanılarak etkili ve memnun edici bir ıslah yöntemi olarak kabul edilmektedir. Bu ıslah yöntemi diğer metotlarla birlikte bir tamamlama evresi olarak da kullanılabilir.

2.1.1 Ana Fitoremediasyon Mekanizmaları

Biyotik ve abiyotik süreçlerin ksenobiyotik uzaklaştırmanın genel verimliliğine katkısı, uzaklaştırılacak olan bileşiğin türüne, konsantrasyonuna, matrisinin bileşimine, ayrıca bitki türüne ve ışığa erişime bağlıdır. Belirli bir bitki tarafından organik mikro kirleticilerin emilmesi, yalnızca kimyasal bileşiğin fizikokimyasal özelliklerine değil, aynı zamanda konsantrasyonuna da büyük ölçüde bağlıdır. Kirleticiler ışıkla parçalanamıyorsa, bitki bunları daha fazla metabolize edebilir veya biriktirebilir (Polińska ve ark., 2021).

Bitki bazlı arıtma tesislerinde kirleticilerin uzaklaştırılmasında kullanılan bazı fitoremediasyon çeşitleri aşağıda açıklanmıştır.

2.1.1.1 Fitostabilizasyon (Köklerle Sabitleme)

Fitostabilizasyon mekanizması, bazı bitki köklerinin salgı etkinliği sayesinde gerçekleşir. Bitki; topraktan/sudan kirletici maddeleri kökleri yardımı ile emer ve emdiği kirleticileri dokularında ve kök yüzeyinde absorbe eder veya kök bölgesinde kirletici maddeleri çökeltir. Kirleticilerin besin zincirine girmesini engeller. Bu, toprakta, tortularda ve çamur ortamlarında bulunan organik ve inorganik kirleticileri ortadan kaldırmak için önemli bir yöntemdir. Bu yöntemde kullanılan bitkilerin, biyotik ve abiyotik stres koşullarına dayanıklı olması gerekir (Cunningham ve Ow, 1996; Rizzi ve ark., 2004; Baştabak ve Koçar, 2019).

2.1.1.2 Fitodegradasyon veya Fitotransformasyon

Fitodegradasyon (bitkisel bozunum) metodunda; ortamda atık olan inorganik ya da organik bileşikleri bitki bünyesine alarak, çeşitli faaliyetler sonucunda daha az toksik maddelere dönüştürür. Bu bozunumun gerçekleşmesi için enzimlere ihtiyaç vardır. Emilen atıklar daha sonra enzimler yardımı ile organik bileşikler metabolik mekanizmalar vasıtasıyla daha küçük parçalara ayrılırlar. Parçalara ayrılan bu moleküller bitkiler tarafından metabolik olarak tekrar kullanılabilirler. Fitodegradasyon; sediment, çamur, yeraltı sularının ıslahında ve yüzey sularının iyileştirmesinde de kullanılmaktadır. Bu yöntem giderimde avantajlara sahiptir. Bu avantajlar, bozulma reaksiyonlarının mikroorganizmalara gereksinimi kalmadan bitki içinde gerçekleşmesidir. Bu yöntem kullanılarak yeraltı sularındaki çözücüler topraktaki petrol ve aromatik bileşikler ve havadaki uçucu bileşikler gibi birçok farklı kirletici ıslah edilebilir (Aybar ve Sağlam, 2015; Arıkan ve Bağdatlı, 2021).

2.1.1.3 Fitovolatilizasyon

Fitovolatilizasyon yöntemi ile bitkiler, organik ve inorganik kirleticileri emilir. Daha sonra bu maddeler daha az uçucu formlara dönüştürülür ve transpirasyon yolu ile havaya verilir. Bitkiler kökleriyle topraktan ve sudan aldıkları maddeleri gövdeye oradan da yapraklara götürür. Örneğin bitki tarafından toprak veya sudan elementel olarak alındıkları ağır metalleri sonra biyometilleme yoluyla gaz türlerine dönüştürülürler ve havaya salarlar. Bu olayın olumsuz tarafı atmosfere salınan bu gazlar daha sonra çökme ile ekolojik sisteme geri dönerler. Sonuç olarak daha geniş alanlara yayılmış olurlar. Fitovolatilizasyon yönteminde kökün inebildiği derinlik çok önemlidir. Yer altı sularının ıslahı söz konusu ise derin kök sistemine sahip bitkiler seçilmelidir. Kirli yer altı suları pompalarla yüzeye çıkarılarak bitki köklerinde temizlenmesi ayrıca bir yöntemdir. Yöntemin en önemli avantajlarından biri cıvalı bileşikler gibi çok zehirli bileşiklerin daha az zehirli formlara dönüştürülebilmesidir. Fitovolatilizasyon yönteminin başarılı bir şekilde uygulandığı alanlar yeraltı suları başta olmak üzere toprak, çamur ve sediment gibi yerlerdir (Chen ve ark., 2010; Rizzi ve ark., (2004; Ansari ve ark., 2020; Polińska ve ark., 2021). Cıva ve selenyum, fitovolatilizasyonda iyileştirilebilen en uygun kirletici maddelerdir (Karami ve Shamsuddin, 2010).

2.1.1.4 Rizofiltrasyon

Köklerle abiyotik, biyotik ve süzme işlemlerine bağlı olarak kirleticilerin köklerin yapısına alınması ya da bitki köklerin üzerinde tutunup kalmasıdır. Kökler rizofiltrasyonda çok önemli bir rol oynar. Rizosferdeki pH'ın değişmesi ve kök salgıları gibi faktörler, ağır metalin köklerin yüzeyinde çökmesine yardımcı olur. Uzun lifli kök sistemlerine sahip hem sucul hem de karasal bitkiler rizofiltrasyonda kullanılabilir. Bitki tüm kirletici maddeleri emdikten sonra, kolayca hasat edilebilir ve bertaraf edilebilir. Daha sonra farklı yollarla bitkiden alınabilir. Bu yöntemin suda ve karada kullanılabilirliği avantajı vardır. Ayrıca, yöntemin doğal ortamlarda uygulanabilirliğinin yanı sıra gölet, havuz, tank gibi yapay alanlarda da uygulanabilir. Rizofiltrasyon için ideal bitki önemli miktarda kök biyokütlesi veya yüzey alanı üretmeli, yüksek miktarda hedef metali biriktirebilmeli, tolere edebilmeli, düşük maliyetli olmalı ve minimum düzeyde sekonder atık üretmelidir. Çoğunlukla toprakta tutulan kadmiyum, kurşun, krom, nikel, çinko ve bakır gibi ağır metaller, rizofiltrasyon yoluyla yeterince giderilebilir (Hamutoğlu ve ark., 2012; Girdhar ve ark., 2014; Ali ve ark., 2020).

2.1.1.5 Fitoekstraksiyon veya Fitoakümülatör

Fitoekstraksiyon, aynı zamanda fitoakümülatör veya fitoabsorpsiyon olarak da bilinen; topraktan, tortulardan veya sulardan kontaminasyonları uzaklaştırmak için bitkilerin veya alglerin kullanıldığı yöntemdir. Kirleticiler, bitkiler tarafından alındıktan sonra toprak üstü sürgünlerde veya yapraklarda biriktirilir. Daha sonra bu bitkiler hasat edilir. Bu bitkiler, yüksek miktarda kirletici biriktirebilen, metal kirliliğine toleranslı, kolay yetiştirilen ve 100 kat daha fazla metal biriktirme kabiliyetine sahip hiperakümülatör bitkilere dayanmaktadır. Hiperakümülatör bitkiler, yüksek ağır metal biriktirme ve translokasyon faktörleri ile karakterize olmaktadır. Biyolojik biriktirme faktörü olarak adlandırılan biyoakümülatör faktörü, kirletici madde alma kapasitesini belirlemek için kullanılır. Bir bitkinin hiperakümülatör olarak kabul edilmesi için biyoakümülatör faktörünün 1'den fazla olması gerekmektedir. Translokasyon faktörü 1'den fazla olan bitkilerin, metallerin köklerden sürgünlere translokasyonu için yüksek verimliliğe sahip olduğu kabul edilmektedir. Bu bitkiler ağır metalleri kirlenmiş topraklardan, tortulardan veya sudan kökleri yardımıyla uzaklaştırarak toprak üstü dokularına, yani sürgünlere taşırlar ve biriktirirler. Sürgünlere metal translokasyonu çok önemli bir biyokimyasal işlemidir.

Akümülyasyon köklerde olursa köklerin hasadı genellikle uygulamaya açık olmadığından etkili bir fitoekstraksiyonda metalin sürgünlere taşınması arzu edilmektedir. Son yıllarda giderek popülaritesi artan bu yöntemle, en çok ağır metallerin uzaklaştırılması işlemi yapılmaktadır (Sak, 2011; Özhüner, 2017; Baş, 2022)

2.2 Çeşitli Tiplerde İnşa Edilmiş Sulak Alanların Temel Özellikleri

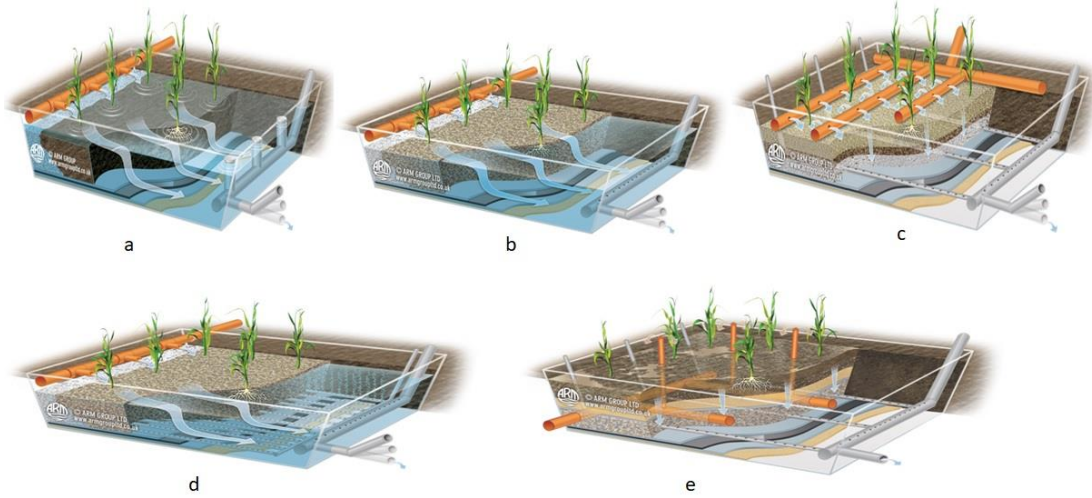
Sulak alan bitkileri tarafından atık su arıtımı ile ilgili ilk deneyler, 1950'lerin başında Almanya'da Käthe Seidel tarafından Plön'deki Max Planck Enstitüsü'nde yapılmıştır (Vymazal, 2010). Atık su arıtma tesislerinde kullanılan fitoremediasyon modülleri, sucul veya bataklık bitkileri içeren özel olarak tasarlanmış sulak alanlardır. İnşa edilen sulak alan, bir rezervuar, uygun bir filtre malzemesi (substrat) ve ekili bitki örtüsünden oluşur. Kirlenmiş su, toprak ve bitkilerle dolu bir tanka verilir ve akışın türüne bağlı olarak serbestçe veya yüzeyin altından akar ve işlem sonunda dışarıya atılır. Yüzen sucul bitki örtüsünü kullanan inşa edilmiş sulak alanlar, genellikle köklü sucul bitki örtüsüne sahip bir sistem olarak veya birincil mekanik atık su arıtma aşamasına sahip birkaç havuzdan oluşan bir zincir olarak inşa edilir (Polińska ve ark., 2021).

Yapay sulak alanlar, serbest yüzey akışlı sistemler (SYS) ve yüzey altı akışlı sistemler (YAS) olarak sınıflandırılmaktadır. SYS'lerde su yüzeyi atmosferle temas halinde, YAS'larda ise su bir dolgu malzemesi arasından aktığı için atmosferle temas halinde değildir (Yinanç ve Adiloğlu, 2017; Fidan, 2020).

Yapay sulak alan arıtma sistemlerinin giderim mekanizmaları incelendiğinde; bu sistemlerde fotosentez, fotooksidasyon ve bitki alımının yanı sıra çökeltme, filtrasyon, oksijen transferi, adsorpsiyon/absorpsiyon, iyon değiştirme, kimyasal redüksiyon, oksidasyon ve çökeltme, biyolojik ayrışma gibi mekanik veya bitkili arıtma sistemlerinin çoğunu kapsadığı görülmektedir. Yapay sulak alanlarda giderimi gerçekleşen temel kirleticiler; askıda katı madde (AKM), biyolojik oksijen ihtiyacı (BOİ₅), organik karbon, azot (N), fosfor (P), patojenler ve ağır metaller olarak sıralanabilir (Yiğit ve Kayranlı, 2022).

Atık su arıtımı için geliştirilen yapay sulak alan sistemleri atık akış yönüne bağlı olarak çeşitli modeller içermektedir. Bunlar, yalnızca atık akış yönünde farklılık

gösteren inşa edilmiş sulak alanların temel biçimleridir (Şekil 2.1).



Şekil 2.1 İnşa Edilmiş Sulak Alan Tipleri (IWA 17th International Conference, 2022)

Yatay akışlı yapay sulak alanlarda atık su, bir dağıtım sistemi aracılığıyla yatağın üst kısmına verilir (Şekil 2.1a). Yatay akışla oluşturulmuş sulak alanlar, doymuş bir durumda çalışır ve bu nedenle, yüzeye yakın olan bölgede aerobik arıtım ve yatağın daha derinlerinde anoksik ve anaerobik koşullar sağlayabilir. Bunun yanında nitrifikasyondan arındırma veya ağır metal sülfid çökeltmesi gibi belirli uzaklaştırma çalışmalarında kullanılır (IWA 17th International Conference, 2022).

Yatay yüzey akışlı yapay sulak alanlarda akış seviyesi ortam yüzeyinin üzerinde tutulur. Bu durum atık sıvının tüm yüzey boyunca kolayca dağılmasını sağlar ve yüksek katı yükleri taşıyan atık sıvılar için gereklidir. Yüzey akışlı inşa edilmiş sulak alanlar, eğer köklü makrofitler mevcutsa, makrofitlerin büyümesini desteklemek için genellikle sığ havzalardan veya toprak veya diğer uygun ortamlara sahip kanallardan oluşur. Başlıca tasarım amaçlarından biri, yavaş akan atık suyu reaktif biyolojik yüzeylerle temas ettirmektir.

Yüzey akışlı yapay sulak alanlar, makrofit tipine göre (I) serbest yüzen makrofitler, (II) yüzen yapraklı makrofitler, (III) batık makrofitler, (IV) ortaya çıkan makrofitler ve (v) ağaçları içeren olarak sınıflandırılabilir. Yüzey akışlı sulak alanlarda, organik maddeler temel olarak hem bağlı hem de serbest yaşayan bakterilerin bakteriyel metabolizması ile giderilir. Bakteriler, serbest yüzen bitkilerin köklerine ve rizomlarına veya köklenen makrofitlerin gövdelerine ve yapraklarına bağlanabilir. Askıda katı maddelerin çıkarılması, yerçekimi çökeltme yoluyla

gerçekleşir. Bitkiler, rüzgârın neden olduğu türbülansı ve su karışmasını en aza indirerek etkili tortulaşmaya izin verir. Azotun uzaklaştırılması esas olarak denitrifikasyon ile gerçekleştirilir, amonyak buharlaşması ve bitki alımı ise küçük roller oynar. Nitrifikasyon, yüzey akışlı inşa edilmiş sulak alanların çoğunda meydana gelir, ancak bu işlem atık sudan azotu uzaklaştırmaz ve sadece amonyağı nitrata çevirir. Denitrifikasyon yoluyla uzaklaştırma, sulak alanın dibindeki ayrılmış bitki materyali tabakasında gerçekleşebilir. Atık suyun toprak parçacıklarıyla sınırlı teması nedeniyle fosfor giderimi genellikle çok düşüktür (Vymazal, 2022). Yatay yüzey akışlı sistemlerde suyun dolgu yüzeyine çıkmaması ve ekilen bitkiler sayesinde soğuk hava şartları görülmesi durumunda suyun donması engellenmiş olur (Esmeray ve Armutcu, 2020).

Yatay yeraltı akışlı yapay sulak alanlar; yeraltı suyundan izole edilen bir havuzdan (0.5-1 m derinlikte) oluşmaktadır. Bu havuzda filtrasyon amacı ile yerel toprak kullanılmasına rağmen genellikle çakıl ile doldurulmaktadır (Temel, 2017). Mekanik olarak temizlenen atık su, makrofitlerle ekili olan gözenekli malzeme ile dolu filtrasyon yatağının yüzey altından yavaşça akar (Şekil 2.1b). Filtrasyon malzemesinden bu geçiş sırasında, atık su aerobik, anoksik ve anaerobik bölgelerden oluşan bir ağ ile temas eder. Aerobik bölgeler, substrata oksijen sızdıran köklere ve rizomlara bitişik dar bölgelerle sınırlıdır (Vymazal, 2001). Bu yataklardaki atık su seviyesi, atık suyun mikrobiyal biyofilmlerle tam temasını sağlayarak yatak yüzeyinin hemen altında tutulur. Bu sistemler, birincil kirletici maddeler çözünür olduğunda ve mikrobiyal etki yoluyla giderildiğinde kullanılır (IWA 17th International Conference, 2022).

Dikey akışlı yapay sulak alanlar, genellikle içinden suyun dikey yönde hareket ettiği gözenekli bir malzeme yatağından oluşur. Atık su, filtrasyon yatağının yüzeyine aralıklı olarak verilir. Su, sistemin yüzeyine pompa yardımı ile kesintili olarak gönderilir. Tabandaki drenaj sistemiyle atık su toplanır. Hızlı drenaj yapıldığında atmosferden atık su hacmine eşit hacimde oksijen çekilir. Boş yatakta hava difüzyonuna izin veren bu sistem, filtrasyon yatağının genellikle aerobik olmasını sağlar (Fonder ve Headley, 2011; TÜBİTAK-MAM, 2011; Üstün ve Tırpancı, 2015).

Doymamış dikey akışlı yapay sulak alanlar, dikey akışın en yaygın biçimidir (Şekil 2.1c). Bu sistemde su yataкта tutulmaz. Yatağın dibinde, arıtılmış atık suyu yataktan dışarı taşıyan bir toplama drenaj boruları ağına akmasına izin verilir. Toplu akış modunda çalıştırılırsa, hava, biyofilmleri yeniden havalandıran çıkış dozları arasında ortamdan geçer. Bu, dikey akış yatağını ağırlıklı olarak aerobik hale getirir ve nitrifikasyon gibi yüksek oksijen gerektiren aerobik mikrobiyal bozunma kapasitesinin artmasına neden olur (Pelissari ve ark., 2017; IWA 17th International Conference, 2022). Bir tür geliştirilmiş azot giderme tekniği olan kısmen doymuş dikey akışlı inşa edilmiş sulak alanlar, aerobik nitrifikasyon (üst doymamış bölge) ve anaerobik/anoksik denitrifikasyonun (alt doymuş bölge) birlikteliği nedeniyle kanalizasyon arıtmada giderek daha fazla ilgi görmektedir (Chen ve ark., 2022).

Doymuş dikey akışlı yapay sulak alanlar, yatay akışlı sulak alanlara benzer arıtma yeteneklerine sahiptirler. Ancak daha yüksek hidrolik yükleri daha etkin bir şekilde yönetebilirler. Akış ayrıca, yüzeydeki bir bent yoluyla çıkmak için ortam boyunca yükselen yatağın tabanından da iletilebilir. Bu, belirli bir uygulama için gerekirse tutarlı anaerobik koşulların korunmasına yardımcı olabilir (IWA 17th International Conference, 2022).

Gelgit akışlı yapay sulak alanlar, hidrolik olarak birbirine bağlı olan yan yana iki ayrı arıtma sulak alanından oluşur. Atık su, dönüşümlü olarak yeniden havalandırılan iki sulak alan arasında tekrar tekrar aktarılır. Bu sistemler, transfer sıklığında ve transfer edilen atık su oranındaki ayarlamalar yoluyla arıtma prosesinin ek kontrolünü sağlar. Çıkış suyunun transferi için güç gereklidir, ancak bu yerçekimi veya atık su başlığı kullanılarak mümkün olduğu kadar en aza indirilebilir (IWA 17th International Conference, 2022).

Havalandırılmış yapay sulak alanlar, aerobik mikrobiyal bozunma en yaygın kullanılan etki mekanizmasıdır ve standart sistemlerde oksijenin sulak alana ve biyofilmlere pasif transferine dayanır (Şekil 2.1d). Bu, oksijen transfer hızlarını önemli ölçüde artırarak daha fazla iyileştirme kapasitesi ve daha tutarlı performans sağlar. Havalandırma hem yatay hem de dikey sistemlere uygulanabilir (IWA 17th International Conference, 2022). Havalandırılmalı sistemlerde hava, sulak alanın alt kısmında bulunan hava yolları aracılığıyla yataktan aktif olarak üflenir. Aerobik bir

kemo-ototrofik mikrobiyal süreç olduğundan ve yatay yeraltı akışlı inşa edilmiş sulak alanlarda oksijen difüzyonu genellikle sınırlı olduğundan, nitrifikasyon yatay yeraltı akışlı inşa edilmiş sulak alanlar N gideriminin sınırlayıcı adımıdır. N giderim verimliliğini artırmak için, bitki mevcudiyeti, suni havalandırma sulak alan matrisinin oksijenlenmesi yoluyla nitrifikasyon mikroorganizmalarına oksijen sağlanmalıdır (Maltais, 2009).

Çamur ile arıtma yapay sulak alanlar, dikey akışla oluşturulmuş sulak alanlardan evrimleşmiştir (Şekil 2.1e). Çamur, yatak yüzeyinde filtrelemek veya hapsetmek için tasarlanmıştır. Kirleticiler çamur yatağında süzülür ve çamur yatağın üzerindeki biyofilmlerle temas yoluyla giderilebilir. Yüzeydeki çamur, yatakta büyüyen sazlar sayesinde, rüzgârın etkisi ile nemin evapotranspirasyonu ve 'rüzgâr kayası' tarafından oluşturulan çamur yüzeyindeki açıklıklar daha fazla buharlaşmaya neden olur. Çamurun daha fazla susuzlaştırılması veya mineralizasyonu, çamurdaki organiklerin kompostlanması veya mikrobiyal bozunması yoluyla gerçekleşir. Bu sistemler, kompostlaştırmanın etkili olabilmesi için yatak istirahatine izin verecek şekilde sırayla çamur içeren birkaç yatak gerektirir (IWA 17th International Conference, 2022).

Yüzen sazlıklarla arıtım sisteminde, kamışlar ve diğer makrofitler, yüzen çerçevelere takılan hindistan cevizi hasırı gibi malzemelere ekilebilir. Bunlar genellikle bir su kütesinin kenarlarına veya dibine sabitlenir ve bitkilerin köklerinin ve rizomlarının su sütunu boyunca büyümesini sağlar. Bunlar, iyileştirmeyi etkileyebilen ama aynı zamanda bazı anti-algal özelliklere sahip eksüdalar üretebilen mikroplar için bağlanma yerleri sağlayabilir. Kökler/rizomlar ayrıca yavaş akan bir su kütesindeki askıda katı maddelerin parçalanmasına da yardımcı olabilir. Ayrıca açık su kütlelerinde balıklar için koruma sağlamanın yanı sıra biyoçeşitliliği ve estetik açıdan zenginleştirmeyi de sağlar (IWA 17th International Conference, 2022).

2.3 XXI. Yüzyılda Atıksu Arıtımı İçin İnşa Edilen Sulak Alanlar

İnşa edilmiş sulak alanlar, XXI. yüzyılda dünyanın birçok ülkesinde atık su arıtımı için “sertifikalı” bir yöntem haline gelmiştir. Çin gibi bazı ülkelerde inşa edilen sulak alan sayısı yüz bini aşmıştır ve bu sayı artmaya devam etmektedir. Ayrıca Güney Amerika’da, özellikle Kolombiya, Arjantin ve Şili’de artan sayıda inşa edilmiş sulak

alan bulunmaktadır. Ne yazık ki, bu teknoloji için büyük bir potansiyelin olduğu Afrika’da, bu teknoloji önemli ölçüde yayılmamıştır (Zhang ve ark., 2009; Vymazal, 2022).

2.3.1 İnşa Edilmiş Sulak Alanların Çeşitli Atık Su Türleri İçin Kullanımı

İnşa edilmiş sulak alanların erken kullanımı, başlangıçta kanalizasyon arıtımı ile sınırlıdır. Çeşitli inşa edilmiş sulak alan türleri ve bunların kombinasyonları, Çizelge 2.1 ve 2.2’de görüldüğü gibi, çeşitli atık sular için yapay sulak alanların kullanılmasını sağlamıştır.

Çizelge 2.1 Çeşitli Atık Su Türleri İçin İnşa Edilmiş Sulak Alanların Kullanımı
(Vymazal, 2022)

(Atık) Su Türü	Kullanım Örnekleri
Kanalizasyon	Evsel, Belediye, Kombine Kanalizasyon Taşması
Drenaj	Asit/Alkali Kömür Madenleri, Metal Cevheri Madenleri, Tarımsal Kiremit Drenajı
Besi Yerleri Su Ürünleri	Hayvancılık, Kümes Hayvanları, Domuzlar, Sağımhaneler Tatlı Su Balığı, Deniz Balığı, Karides
Gıda İşleme	Süt, Peynir, Şaraphane, Bira Fabrikası, İçki Fabrikası, Şeker, Zeytin Değirmenleri, Balık, Alkolsüz İçecekler, Mezbaha, Et İşleme
Diğer Endüstriler	Tabakhane, Tekstil, Galvanik Kaplama, Kâğıt Hamuru ve Kâğıt, Cam, Patlayıcılar, Rafineriler, Petrol Sondaj Suları, Kauçuk Endüstrisi
Akış Suları	Kentsel, Otoyol, Havaalanı, Seralar, Fidanlıklar, Golf Sahaları, Tarım Alanları
Çöp Sızıntı Suyu	

Çizelge 2.2 Farklı Kirlilik Türlerinin İyileştirilmesi İçin İlk Makrofit Kullanım Örnekleri: Deneysel ve Operasyonel (Vymazal ve Kröpfelová, 2022)

DENEYSEL		OPERASYONEL	
Yıl	Atık Su	Yıl	Atık Su
1952	Fenol Atık Su	1967	Kanalizasyon
1956	Kanalizasyon ve Süt Atık Suları	1974	Çamur Susuzlaştırma
1956	Hayvancılık Atık Su	1975	Petrol Rafinerisi Atık Su
1965	Çamur Susuzlaştırma	1978	Tekstil ATIK SU
1973	Tekstil Atık Su	1979	Balık Yetiştirme Havuzu Deşarjı
1975	Fotoğraf Laboratuvarı Atık Suyu	1982	Asit Maden Drenajı
1978	Asit Maden Drenajı	1983	Kentsel Yağmur Suyu Akışı
1980	Galvanik Atık Su	1983	Kauçuk Endüstrisi Atığı
1980	Krezolün Çıkarılması	1985	Süt Atık Suyu
1980	Domuzcuk Atığı	1986	Yığılmış Domuz Çamurundan Sızıntı
1980	Mezbaha Atık Suyu	1986	Kül Havuzu Sızıntısı
1981	Ağır Metallerin Çıkarılması	1987	Termal Olarak Etkilenen Atık Su
1981	Tabakhane Atık Suyu	1988	Hayvancılık ATIK SU
1982	Tarımsal Drenaj Atık Su	1988	Selüloz/Kâğıt Fabrikası Atık Suyu
1982	Tarım İlacı	1988	Tarım İlacı
1982	Şeker Rafinerisi Atık Su	1989	Çöp Sızıntı Suyu
1982	Benzen ve Türevleri	1989	Havaalanı İkinci Tur
1982	Kauçuk Endüstrisi Atığı	1989	Göl Ötrofikasyonunun Azaltılması
1983	Selüloz/Kâğıt Fabrikası Atık Suyu	1990	Göl Suyu
1985	Deniz Ürünleri İşleme Atık Suyu	1991	Odun Atığı Sızıntı Suyu
1986	Patates Nişastası Endüstrisi Atık Su	1992	Fırın Atık Suyu
1986	Siyanürler ve Klorofenoller	1992	Kanal Yayın Balığı Gölet Atığı
1987	Et İşleme Atık Suyu	1992	Şeker Pancarı İşleme ATIK Suyu
1988	Çöp Sızıntı Suyu	1992	Kombine Kanalizasyon Taşması
1989	Tavuk Çiftliği Atık Su	1993	Tarımsal Akışta Pestisitler
1991	Balık Yetiştiriciliği	1993	Karayolu İkinci Tur
1991	Fenantren	1994	Mezbaha Atık Suyu
1994	Hidrokarbonlar	1994	Havaalanı İkinci Tur
1995	Linyit Piroliz Atık Suyu	1994	Kanatlı Atık Su
1997	Şaraphane Atık Suyu	1995	Sera ATIK Suyu
1998	Kok Fabrikası Atık Su	1995	Nitroaromatik Organik Bileşikler
2000	Doğrusal Alkilbenzensülfonatlar (LAS)	1995	Patates İşleme ATIK Suyu
2001	Çelik İşleme Endüstrisi Atık Suları	1996	Patlayıcılar
2001	Bira Fabrikası Atık Suyu	1997	Hidrokarbonlar
2001	Elektrik Tesisatı Atık Su	1997	Hastane Atık Suları
2003	Azo Boya Giderimi	1998	Alabalık Çiftliği Atığı
2004	Klorobenzen Giderme	1998	Golf Sahası Akışı
2004	Çelik Fabrikası Atık Suyu	1998	Naylon Ve Etilen Polimerleri
2006	Etanol Üretiminden Elde Edilen Şeker Kamışı Melas Karışımı	1999	Melas Bazlı İçki Fabrikası Atığı

Çizelge 2.2 (Devamı) Farklı Kirlilik Türlerinin İyileştirilmesi İçin İlk Makrofit Kullanım Örnekleri: Deneysel ve Operasyonel (Vymazal ve Kröpfelová, 2022)

DENEYSEL		OPERASYONEL	
Yıl	Atık Su	Yıl	Atık Su
2010	Tuzlu Su Kültürü Atık Su	2000	Yüzey Aktif Madde Giderme
2010	Acı Karides Yetiştirme Sistemi	2000	Otlatılan Mandıra Meralarından Yüzey Altı Drenajı
2105	Boksit Kalıntı Drenajları	2001	Tabakhane Atık Suyu
2017	Pirinç Eriştesi Atık Su	2002	Alet Fabrikası Atık Suyu
2018	Cam Endüstrisi Atık Su	2002	İlaç Kaldırma
2019	Batik Atık Su	2003	Zeytin Değirmeni ATIK SU
2020	Kuyumculuk Endüstrisi Atık Su	2004	Şeker Fabrikası Atık Suyu
		2007	Dağ Peyniri Fabrikası
		2009	Çiçek Çiftliği Atığı
		2010	Bira Fabrikası Atık Suyu
		2010	Acı Karides Yetiştiricilik Atık Suyu

2.4. Atık Su Islahında Kullanılan Bitkiler

Sulak alanlarda etkili bir kirlilik giderimi için uygun bitkiler seçilmelidir. Yapay sulak alanlarda, oksijeni köklerine taşıyabilen ve mikroorganizmalar için uygun bir oksijen bölgesi yaratan su bitkilerinin seçilmesi gerekir. Sulak alanlarda aerobik ve anaerobik bölgeler oluşur ve bu da daha yüksek bir kirletici giderme etkinliği sağlar. Bitkilerin seçimi, içinde yaşayacakları iklim koşullarının yanı sıra nötralize etmeleri gereken kirlilik türüne de bağlıdır. Düşük oksijen içeriğine sahip sulak alanlarda büyüebilmeleri ve geçici kanalizasyon kesintilerine ve getirilen kirletici maddelere karşı dayanıklı olmaları gerekir. Yapay sulak alanlarda kullanılan bitkiler, makrofitler veya hidrofitler (su bitkileri) olarak adlandırılır. Su bitkileri aşağıdaki gruplara ayrılabilir:

- **Yüzey makrofitleri (helofitler);** sulak alanlarda büyürler, bataklık veya tamamen su altında kalmış toprakta gelişirler. Örneğin; *Acorus calamus L.*, *Carex rostrata Stokes*, *Phragmites australis (Cav.) Trin. ex Steud.*, *Schoenoplectus lacustris (L.) Palla*, *Typha latifolia L.*;
- **Yüzen yapraklı makrofitler (rhizofitler);** yaprakları suyun yüzeyinde yüzer veya suya paralel durur ve kökleri toprağa bağlıdır. Örneğin; *Nymphaea alba L.*, *Nuphar lutea (L.) Sm.*;
- **Batık makrofitler;** suda yüzen ancak kökleri toprakta olan su altı bitkileridir. Örneğin; *Myriophyllum spicatum L.*, *Ceratophyllum demersum L.*;

- **Serbestçe yüzen makrofitler (pleustofitler)**; toprakta kök salmadan su yüzeyinde yüzen bitkilerdir. Örneğin; *Lemna minor* L., *Spirodela polyrhiza* L., *Eichhornia crassipes* (Polińska ve ark., 2021).

Lemnaceae familyasından bitkiler (su mercimekleri) en çok yüzen sucul bitki örtüsüne sahip sulak alan sistemlerinde kullanılır. Su mercimekleri, kutup bölgeleri hariç tüm enlemlerdeki tatlı su rezervuarlarında bulunur. Yetiştirme kolaylığı ve kontaminasyona karşı dirençleri nedeniyle, genellikle bitki ıslahı kullanan işlemlerde kullanılırlar. Su mercimeği aynı zamanda göletlerde ve akvaryumlarda süs bitkisi olarak, bitkisel ilaçlarda ve ayrıca insanlar için gıda ve hayvanlar için yem olarak (Appenroth ve ark., 2018), günümüzde biyoyakıt üretimi için de kullanılmaktadır (Polińska ve ark., 2021).

2.5 Mikrokirleticilerin Bitkiler Üzerindeki Toksik Etkileri

Çok sayıda bitki toksik koşullarda hayatta kalabilir ve bazı kirleticilerin zararlı etkilerini azaltma veya ortadan kaldırma yeteneğine sahiptir. Bununla birlikte, çoğu bitki zararlı maddelere karşı tamamen bağışık değildir ve belirli mikro kirleticilerin doğasına bağlı olarak büyümenin hızlanması veya engellenmesi, antioksidan enzimlerin sayısında artış, fotosentez sürecinin engellenmesi veya bitkilerin zehirlenmesine ve ölümüne neden olabilirler. Çeşitli faktörler, bitkinin lipidlerini ve proteinlerini yok edebilen reaktif oksijen türlerinin aşırı üretimine yol açan abiyotik strese neden olabilir. Bununla birlikte, örneğin antioksidanların sentezi veya antioksidan enzimlerin artan aktivitesi yoluyla bu koşullarla başa çıkmaya çalışan bazı bitkiler vardır. Sulak alan tanklarında yetiştirilen bitkilerin gözlemlenmesi, stresli koşullarla başa çıkabilen bitkilerin boyut olarak küçülmediğini veya gelişme geriliği göstermediğini ortaya koymuştur. Ayrıca renk değiştirmezler, bu da normal fotosentezin yanı sıra antioksidan enzim sistemlerinin etkinliğini gösterir. Bir süre sonra bitkiler, kirliliğin olduğu koşullara uyum sağlar ve normal büyüme gösterir. Çizelge 2.3'te test edilen bitkilerin çeşitli ksenobiyotik konsantrasyonlarına tepkisini göstermektedir. Bu bilgi, arıtma tesislerinin tasarımı ve inşası için temel teşkil edebilir.

Çizelge 2.3 Mikro Kirleticilerin Su Bitkileri Üzerindeki Etkisi (Polińska ve ark., 2021)

Mikro kirleticiler	Bitkiler	Abiyotik Stresin Belirtileri	Yorumlar
Dimetomorf. C = 600 µg/dm ³	<i>Lemna minor</i>	Büyümenin %21 oranında engellenmesi; fotosentezin engellenmesi	Bitki yoğunluğundaki artış; daha düşük bir büyüme oranına neden olarak 0.20 g/erlen de %26'ya ulaştı.
	<i>Spirodela polyrhiza</i>	Büyümenin %19 oranında engellenmesi; fotosentezin engellenmesi	Bitki yoğunluğundaki artış; daha düşük bir büyüme oranına neden olarak 0.20 g/erlen de %24'e ulaştı.
Oksibenzon	<i>Cyperus alternifolius</i>	Antioksidan enzimlerin artan aktivitesi	12/12 saat aydınlık/karanlık
Hidrazin. C = 0-1000 µg/dm ³	<i>Azolla filiculoides</i>	Bitki büyümesi	Hidrazin bitki için bir nitrojen kaynağıydı; 16/8 saat aydınlık/karanlık
Sodyum Dodesil Benzen Sülfonat. C = 0-40 mg/dm ³	<i>Azolla filiculoides</i>	Büyümede duraklama; etki indeksi artan konsantrasyonla artar. Antioksidan enzimlerin aktivitesi her konsantrasyonda uyarılır ve sürfaktana daha uzun süre maruz kaldığında artar. Antosiyanin içeriği, H ₂ O ₂ , antioksidan aktivite ve elektrolit sızıntısı zamanla artan konsantrasyona bağlı olarak yükselir. 7 gün sonra test edilen klorofillerin toplam içeriği artan konsantrasyonla birlikte azaldığı görülmüş.	7 gün sonra, toplam karotenoid içeriği sürfaktan tarafından 30 mg/dm ³ ve 40 mg/dm ³ konsantrasyonlarında azaltıldı; 16/8 saat aydınlık/karanlık
		%80 yapraklarda solma; daha düşük nispi yaprak sayısı (FRG) ve nispi yaprak alanı (RFA)	
Diquat. C = 44.4 µg/dm ³	<i>Lemna minor</i>	%100 yaprak solması; çok daha düşük FRG ve RFA	14/10 saat aydınlık/karanlık
Diquat. C = 222.2 µg/dm ³		Bağıl yaprak sayısı artışı; RFA düşüşü	
Fomesafen. C = 44.4 µg/dm ³	<i>Lemna minor</i>	Klorofil miktarında %64 azalma	Diklofenak, nikotin ve 3,4-diklorofenol klorofil içeriğini yaprak sayısından daha fazla inhibe etti; 16/8 saat aydınlık/karanlık
Diklofenak. C = 25 mg/dm ³		Toplam klorofil içeriği artan konsantrasyonla azaldı	
Bisfenol A			
3,4-Diklorofenol			
Ketokonazol			
Benzildimetildodesilamonyum Klorür	<i>Lemna minor</i>	Yaprakların boyutu ve sayısı azaldı ve yaprakların rengi değişti	Tesis önceki durumuna dönmekte zorlandı; 16/8 saat aydınlık/karanlık
Tırmanışazol			
Flukonazol			
Mikro Kirleticilerin Karışımı	<i>Lemna minor</i>	Büyüme hızının %100 inhibisyonu	Bisfenol A, valsartan ve 2-OH-benzotiyazol içeren atık su örnekleri
Mikro Kirleticilerin Karışımı	<i>Lemna minor</i>	Yazın bitkinin büyümesi yaklaşık %25 oranında engellenir. Kışın büyüme olmaz. Kışın daha fazla antioksidandır.	Yüzey aktif maddeler (ağır metaller, hidrokarbonlar, azot ve fosfor bileşikleri) içeren kanalizasyon numuneleri
Perflorooktanoik Asit	<i>Lemna minor</i>	Yaprak sayısında, büyüme hızında, klorofil içeriğinde ve fotosentez etkinliğinde değişiklik yok	Bitki üzerinde herhangi bir zararlı etki; 16/8 saat aydınlık/karanlık

2.6 Bitkiler Tarafından Mikrokirletici Kaldırmanın Etkinliği

Organik bileşiklerin fitoremediasyonla uzaklaştırma etkinliği kimyasal bileşiğin tipine, konsantrasyonuna, kullanılan bitkiye ve sulak alanın tipine bağlıdır. Kirletici giderme verimliliği Çizelge 2.4’te verilmiştir.

Çizelge 2.4 Bitki Bazlı Sistemlerde Mikro Kirleticilerin Giderim Etkinliği (Polińska ve ark., 2021)

Bitkiler	Bileşikler	Analit konsantrasyonları	Maruz kalma süresi	Kurulum türü. ortam türü	Kaldırma	Notlar
Benzotriazol						
<i>Lemna minor</i>	1H-benzotriazol (BTR)	150 µg/dm ³	Sürekli Aydınlatma	Laboratuvar Deneyi, SIS Ortamı	>%99.9	36 günlük deney
	4-metil-1H-benzotriazol (4TTR)				%48.2	
	5-metil-1H-benzotriazol (5TTR)				>%99.9	
	ksilitriazol				>%99.9	
	5-klorobenzotriazol (CBTR)				>%99.9	
<i>Cyperus alternifolius</i>	oksibenzon	5·10 ⁻⁶ µg/dm ³ 2.5·10 ⁻⁵ µg/dm ³	12/12sa aydınlık/ka ranlık	Laboratuvar Deneyi, Hoagland Ortamı	%86.5 %81.4	120 saatlik deney
<i>Wolffia arrhiza</i>	dibütil ftalat bis(2-etilheksil) ftalat	100 µg/dm ³	16/8sa aydınlık/ka ranlık	Laboratuvar Deneyi, AAT ve Hutner Ortamından Gelen Arıtılmamış Atık Sular	%87.2 %97.7	
<i>Lemna minor</i>	bisfenol A	1 µg/dm ³	12/12sa aydınlık/ka ranlık	Musluk Suyu	%62.5	
<i>Lemna</i> sp.		100 µg/dm ³	12/12sa aydınlık/ka ranlık	AAT'den İkincil Arıtılmış Atık Sular	%96	Dış deney, doğal koşullar
<i>Ceratophyllum demersum</i>		1–100 µg/dm ³	16/8sa aydınlık/ka ranlık	Laboratuvar Deneyi, Hoagland Ortamı	%99.2	
<i>Riccia fluitans</i>					%99.5	
<i>Spirodela polyrhiza</i>					%98.5	
<i>Limnobium laevigatum</i>					%89.9	
<i>Cyperus isocladus</i>		20 µg/dm ³		SSF-CW(yeraltı akış sistemleri)	%85.9	4 gün içinde
<i>Eichhornia crasipes</i>				Sentetik Atık Su	%87.7	
<i>Cyperus isocladus</i>					%95.5	Destek ortamı olarak çakıl ve bambu kömürü
<i>Phragmites australis</i>		~0.6 µg/dm ³		HSF-CW, Birincil Arıtma	%70.2	
<i>Heliconia pistacorum</i>				Olarak Anaerobik Havuzun Atık Suyu	%73.3	

Çizelge 2.4 (Devamı) Bitki Bazlı Sistemlerde Mikro Kirleticilerin Giderim Etkinliği
(Polińska ve ark., 2021)

Bitkiler	Bileşikler	Analit konsantrasyonları	Maruz kalma süresi	Kurulum türü, ortam türü	Kaldırma	Notlar
Lemna minor	bisfenol S bisfenol B	1 µg/dm ³	12/12sa	Musluk Suyu	%72.2	
Heliconia pistacorum Phragmites avustralis	nonilfenol		aydınlık/karanlık	HSF-CW, Birincil Aritma Olarak Anaerobik Havuzun Atık Suyu	%85.7 %62.8 %52.1	
Azolla filiculoides	hidrazin		16/8sa	Hoagland Ortamı	%93 >%99.9	24 saatlik deney 96 saatlik deney
Azolla filiculoides	sodyum dodesil benzen sülfonat	10–40 mg/dm ³	16/8sa	Nitrojen İçermeyen Ortam	%77.79	
Typha domingensis	fenol	500 mg/dm ³		Musluk Suyu	%75	15 günlük deney
Typha angustifolia	1.2-dikloroetan	390 mg/dm ³		Petrokimya Endüstrisinden Gelen Atık Su, HSSF CW(yatay yeraltı akışıyla inşa edilmiş sulak alanlar)	>%99.9	Harici deney, doğal koşullar
Spirodela polyrhiza	4-tert- bütilfenol	3.3·10 ⁻⁵ mol/dm ⁻³³	16/8sa	Su Sistemlerinden Su Örnekleri	%63	Dış deney, doğal koşullar
Eichornia Crassipes Spirodela polyrhiza	pentaklorofenol DEET	2·10 ⁻⁶ mol/DM ⁻³ 25 mg/dm ³	12/12sa 14/10sa	Aritılmış Su Sentetik Atık Sular, Laboratuvar Deneyi	%47 %32.6	12 saatlik deney
Lemna minör Spirodela polyrhiza	dimetomorf	25 µg/dm ³		Laboratuvar Deneyi, Besin Ortamı	%36 %32	
Lemna minör Spirodela polyrhiza		50 µg/dm ³			%28 %26	
Lemna minör Spirodela polyrhiza		600 µg/dm ³			%19 %14	96 saatlik deney
Lemna minor		600 µg/dm ³			%15	Bitki yoğunluğu 0.05 g/şişe
					%19	Bitki yoğunluğu 0.10 g/şişe
					%20	Bitki yoğunluğu 0.15 g/şişe
					%22	Bitki yoğunluğu 0.20 g/şişe
Spirodela polyrhiza		600 µg/dm ³			%8	Bitki yoğunluğu 0.05 g/şişe

Çizelge 2.4 (Devamı) Bitki Bazlı Sistemlerde Mikro Kirleticilerin Giderim Etkinliği (Polińska ve ark., 2021)

Bitkiler	Bileşikler	Analit konsantrasyonları	Maruz kalma süresi	Kurulum türü, ortam türü	Kaldırma	Notlar
					% 14	Bitki yoğunluğu 0.10 g/şişe
					% 17	Bitki yoğunluğu 0.15 g/şişe
					% 18	Bitki yoğunluğu 0.20 g/şişe
<i>Lemna minor</i>	dikuat	44.4 µg/dm ³ 222.2 µg/dm ³	14/10sa aydınlık/ karanlık	Aktif Kömür Kartuşlarından	>%99.9 >%99.9	16 gün deneme
	fomesafen	44.4 µg/dm ³ 222.2 µg/dm ³		Filtrelenmiş Klorsuz Musluk Suyu HSF-CW	%54.7 %74.4	
<i>Typha latifolia</i> <i>Phragmites australis</i> <i>Canna indica</i>	terbutilazin	0.4 mg/dm ³		SSF-CW	%58.4 %73.7	24 saatlik deney
	klorpirifos	100 µg/dm ³ 200 µg/dm ³ 300 µg/dm ³			%88.07 %93.76 %96.55	
<i>Phragmites australis</i> / <i>Typha orientalis</i> / <i>Vetiveria zizanioides</i> / <i>Canna indica</i>	sülfametoksazol (SMX)	2.3 µg/dm ³		HSSF-CW VSSF-CW(dikey yer altı akışıyla inşa edilmiş sulak alanlar)	%70.1– 76.3	
<i>Lemna minor</i>		10 µg/dm ³	16/8sa aydınlık/ karanlık	İkincil Biyolojik Olarak Aritılmış Atık Su	%73	14 günlük deney
<i>Cyperus alternifolius</i> <i>Cyperus alternifolius</i>	ofloksasin (OFX)	10–500 µg/dm ³		AAT'den Gelen Sentetik İkincil Atık Suyu Simüle Eden Su	<%80 %90	
<i>Cyperus alternifolius</i>	roksitromisin (ROX)				%85	
<i>Lemna minor</i>	sefadroksil (CFD)	10 µg/dm ³	16/8sa aydınlık/ karanlık	İkincil Biyolojik Olarak Aritılmış Atık Su	>%99.9 %96	14 günlük deney
<i>Lemna minor</i>	metronidazol (METRO)				%59	
<i>Lemna minor</i>	trimetoprim (TRI)					
<i>Chrysopogon zizanioides</i>	siprofloksasin (CIP)	10 mg/dm ³		AAT Kaynaklı Atık Sular	%60–94	Harici deney, doğal koşullar
	tetrasiklin (TTC)				%89- >99.9	
<i>Spirodela polyrhiza</i>	parasetamol	25 mg/dm ³	14/10sa aydınlık/ karanlık	Sentetik Atık Sularla Laboratuvar Deneyi SVF-CW. Hastanenin AAT'sinden Gelen Atık Sular	%97.7	
<i>Salix alba</i> + <i>Iris pseudacorus</i> + <i>Juncus effusus</i> + <i>Callitriche palustris</i> + <i>Carex carophyllea</i>		10 mg/dm ³			0->99.9%	Harici deney, doğal koşullar

Çizelge 2.4 (Devamı) Bitki Bazlı Sistemlerde Mikro Kirleticilerin Giderim Etkinliği (Polińska ve ark., 2021)

Bitkiler	Bileşikler	Analit konsantrasyonlar	Maruz kalma süresi	Kurulum türü, ortam türü	Kaldırma	Notlar
Phragmites australis				HSF-CW, Hastanenin AAT'sinden Gelen Atık Sular	%20–69	Harici deney, doğal koşullar
Phragmites australis + Phalaris arundinacea		35 µg/dm ³			%86.2–99.6	
Phragmites australis		30 µg/dm ³			%95	
Phragmites australis + Typha latifolia		750 ng/dm ³			%51.7–99	
Typha angustifolia + Chrysopsis zizanioides + Cyperus papyrus					%58.1	
Phragmites australis		3–71 µg/dm ³		Bir İçme Suyu Rezervuarının Havzasında, HSSF-CW	%89–99.6	Dış deney, doğal koşullar
Phalaris arundinacea		0.35–180 µg/dm ³			%86.2–88.7	
Lemna gibba	ibuprofen	0.02–1 mg/dm ³	14/10sa aydınlık/karanlık	Laboratuvar Deneyi, Murashige ve Skoog Ortamı Su Doymamış CW, Su Doymuş CW, Gazlı Su Doymuş CW, Musluk Suyu	%89–92.5	
Juncus effusus/ Typha latifolia / Berula erecta / Phragmites australis / Iris pseudacorus		10 µg/dm ³		AAT'den İkincil Arıtılmış Atık Sular	%29–99	
Lemna sp.		100 µg/dm ³	12/12sa aydınlık/karanlık	Bir İçme Suyu Rezervuarının Havzasında, HSSF-CW	%93	Dış deney, doğal koşullar
Spirogyra sp.					%92	Dış deney, doğal koşullar
Phragmites australis		1.9–64 µg/dm ³			%51.6–75	Dış deney, doğal koşullar
Phragmites australis + Phalaris arundinacea		6.6–36 µg/dm ³			%45.6–49.4	
Phragmites australis	Diklofenak	140–5400 ng/dm ³			%11.5–67.1	
Phragmites australis + Phalaris arundinacea		10–12000 ng/dm ³			%29.3–58	
Phalaris arundinacea		0.5 mg/dm ³	14/10sa aydınlık/karanlık	Laboratuvar Deneyi, Dikey Akışlı CW, Sentetik Atık Sular	%47.3	Yükleme frekansı günde 1 defa
Phalaris arundinacea					%74.2	Yükleme frekansı günde 4 defa

Çizelge 2.4 (Devamı) Bitki Bazlı Sistemlerde Mikro Kirlenmelerin Giderim Etkinliği
(Polińska ve ark., 2021)

Bitkiler	Bileşikler	Analit konsantrasyonları	Maruz kalma süresi	Kurulum türü, ortam türü	Kaldırma	Notlar
Spirogyra sp. Lemna sp.		100 µg/dm ³	12/12sa aydınlık/karanlık	AAT'den İkincil Arıtılmış Atık Sular	%54 %48	Dış deney, doğal koşullar
Scirpus validus		0.5-2 mg/dm ³	12/12sa aydınlık/karanlık	Laboratuvar Deneyi, Hoagland Ortamı	%85-98	
Phragmites australis	ketoprofen	<10-6500 ng/dm ³		Bir İçme Suyu Rezervuarının Havzasında, HSSF-CW	%46.9- 91.2	Dış deney, doğal koşullar
Phragmites australis + Phalaris arundinacea		19-2600 ng/dm ³			%18.1	
Scirpus validus	naproksen	0.5-2 mg/dm ³	12/12sa aydınlık/karanlık	Hoagland Ortamı	%90	Dış deney, doğal koşullar
Lemna sp. Spirogyra sp.	17- α -etinil estradiol	100 µg/dm ³	12/12sa aydınlık/karanlık	AAT'den İkincil Arıtılmış Atık Sular	%94 %94	Dış deney, doğal koşullar
Ceratophyllum demersum. Riccia fluitans. Limnobium laevigatum. Spirodela polyrhiza Lemna spp.		1-100 µg/dm ³	16/8 sa aydınlık/karanlık	Laboratuvar Deneyi, Hoagland Ortamı	>%99.9	Ham enzimlerin eklenmesi
		10 mg/dm ³	12/12sa aydınlık/karanlık	Laboratuvar Deneyi, Sentetik Atık Su	>95%	6 gün deneme
Cyperus isoclaudus Eichhornia crassipes Cyperus isoclaudus		20 µg/dm ³		SSF-CW, Sentetik Atık Su	%81.4 %67.8	
					>%99.9	Destek ortamı olarak çakıl ve bambu kömürü
Phragmites australis		0.94-3.62 ng/dm ³		Dikey Akışlı CW, AAT'den Çıkan Atık Su	%75.3	Dış deney, doğal koşullar
Phragmites australis + Phalaris arundinacea	estron	5.9 ng/dm ³		HSSF-CW (yatay yeraltı akışıyla inşa edilmiş sulak alanlar) Belediye Atık Suyu	%85	Dış deney, doğal koşullar
Ceratophyllum demersum. Riccia fluitans Limnobium laevigatum		1-100 µg/dm ³	16/8sa aydınlık/karanlık	Laboratuvar Deneyi, Hoagland Ortamı	>%99.9 %89.4	Ham enzimlerin eklenmesi

Çizelge 2.4 (Devamı) Bitki Bazlı Sistemlerde Mikro Kirleticilerin Giderim Etkinliği (Polińska ve ark., 2021)

Bitkiler	Bileşikler	Analit konsantrasyonları	Maruz kalma süresi	Kurulum türü, ortam türü	Kaldırma	Notlar
Lemna spp.		10 mg/dm ³	12/12sa Aydınlık/ Karanlık	Laboratuvar Deneyi, Sentetik Atık Su	>95%	6 gün deneme
Phragmites australis		1.17–6.18 ng/dm ³		Dikey Akışlı CW, Japonya'daki AAT'den Çıkan Atık Su	%67.8	
Ceratophyllum demersum. Riccia fluitans Limnobium laevigatum Ceratophyllum demersum Lemna spp.	17-β-estradiol	1–100 µg/dm ³	16/8 Saat Aydınlık/ Karanlık	Laboratuvar Deneyi, Hoagland Ortamı	>%99.9 %95.5 %95.7	Ham enzimlerin eklenmesi
Phragmites australis		2.94–4.65 ng/dm ³	12/12sa Aydınlık/ Karanlık	Laboratuvar Deneyi, Sentetik Atık Su Dikey Akışlı CW, Japonya'daki AAT'den Çıkan Atık Su	>95% %84.0	6 gün deneme
Cyperus isoclaudus Eichhornia crasipes Cyperus isoclaudus	levonorgestrel	100 µg/dm ³		SSF-CW((yeraltı akış sistemleri) Sentetik Atık Su	>%99.9 >%99.9 %99.8	Destek ortamı olarak çakıl ve bambu kömürü

2.7 Su Mercimekleri

Lemnaceae başlangıçta iki alt aileye ayrılmıştır, Lemnoideae (farklı sayıda köke sahip) ve Wolffioideae (köksüz). Alt familyalardan biri (Wolffioideae) monofiletik, diğeri (Lemnoideae) ise açıkça parafiletiktir (Les ve ark. 2002, Tippery ve ark. 2015; Bog ve ark., 2019). Bog ve ark., 2020) tarafından Lemnaceae taksonlarının belirlenmesinde kullanılan anahtar güncellemiş “Key to the determination of taxa of Lemnaceae: an update” adlı çalışmada ailenin *Spirodela*, *Landoltia*, *Lemna*, *Wolffiella* ve *Wolffia* olmak üzere beş cinsten oluşan 36 su mercimeği türü tanımlanmıştır. Şekil 2.1’de Lemnaceae ailesinin üyeleri listelenmiştir.

Key number	Genus	Section	Species
01	<i>Landoltia</i> Les & Crawford		<i>L. punctata</i> (G.Mey.) Les & D.J. Crawford
02	<i>Spirodela</i> Schleid.		<i>S. intermedia</i> W.Koch
03			<i>S. polyrhiza</i> (L.) Schleid.
04	<i>Lemna</i> L.	<i>Lemna</i>	<i>L. trisulca</i> L.
05		<i>Biformes</i> Landolt	<i>L. tenera</i> Kurz
06		<i>Alatae</i> Hegelm.	<i>L. perpusilla</i> Torr.
07		<i>Alatae</i> Hegelm.	<i>L. aequinoctialis</i> Welw.
08		<i>Lemna</i>	<i>L. turionifera</i> Landolt
09		<i>Lemna</i>	<i>L. gibba</i> L.
10		<i>Lemna</i>	<i>L. disperma</i> Hegelm.
11		<i>Lemna</i>	<i>L. obscura</i> (Austin) Daubs
12		<i>Lemna</i>	<i>L. japonica</i> Landolt
13		<i>Lemna</i>	<i>L. minor</i> L.
14		<i>Uninerves</i> Hegelm.	<i>L. minuta</i> Kunth
15		<i>Uninerves</i> Hegelm.	<i>L. valdiviana</i> Phil.
16	<i>Wolffiella</i> Hegelm.	<i>Rotundae</i> Landolt	<i>W. rotunda</i> Landolt
17		<i>Stipitatae</i> Hegelm.	<i>W. hyalina</i> (Delile) Monod
18		<i>Stipitatae</i> Hegelm.	<i>W. repanda</i> (Hegelm.) Monod
19		<i>Wolffiella</i>	<i>W. caudata</i> Landolt
20		<i>Wolffiella</i>	<i>W. neotropica</i> Landolt
21		<i>Wolffiella</i>	<i>W. welwitschii</i> (Hegelm.) Monod
22		<i>Wolffiella</i>	<i>W. denticulata</i> (Hegelm.) Hegelm.
23		<i>Wolffiella</i>	<i>W. gladiata</i> (Hegelm.) Hegelm.
24		<i>Wolffiella</i>	<i>W. lingulata</i> (Hegelm.) Hegelm.
25		<i>Wolffiella</i>	<i>W. oblonga</i> (Phil.) Hegelm.
26	<i>Wolffia</i> Horkel ex Schleid.	<i>Pseudorrhizae</i> Landolt	<i>W. microscopica</i> (Griff.) Kurz
27		<i>Wolffia</i>	<i>W. elongata</i> Landolt
28		<i>Pigmentatae</i> Landolt	<i>W. brasiliensis</i> Wedd.
29		(unassigned)	<i>W. borealis</i> (Engelm. ex Hegelm.) Landolt
30		(unassigned)	<i>W. australiana</i> (Benth.) Hartog & Plas
31		<i>Wolffia</i>	<i>W. angusta</i> Landolt
32		<i>Wolffia</i>	<i>W. neglecta</i> Landolt
33		<i>Wolffia</i>	<i>W. arrhiza</i> (L.) Horkel ex Wimm.
34		<i>Wolffia</i>	<i>W. columbiana</i> H.Karst.
35		<i>Wolffia</i>	<i>W. cylindracea</i> Hegelm.
36		<i>Wolffia</i>	<i>W. globosa</i> (Roxb.) Hartog & Plas

Şekil 2.2 Lemnaceae Familyasının Şu Anda Kabul Edilen 36 Türünün Listesi (Bog ve ark., 2020; Tippery ve Les, 2020)

Su mercimekleri, suda yaşayan monokotlardır ve dünyanın en küçük, en basit ve en hızlı büyüyen spermatofitleridir. Hızlı büyüme oranları, bitkilerin olgunlaşmak ve çiçek üretmek yerine genç bir durumda kaldığı ve sürekli olarak aseksüel olarak tomurcuklandığı ailenin neotenöz yaşam tarzından kaynaklanmaktadır (Fourounjian ve Messing, 2021). Yapılan çalışmalarda su mercimeklerinin biyokütleleri bir veya iki günde ikiye katlanabilir (Wang ve Messing, 2011; Hoang ve ark., 2022). Su mercimekleri küçük boyutları ve farklı morfolojileri sayesinde biyodenyler için çok uygun bitkilerdir. Su mercimeği 2 ila 35 °C arasındaki sıcaklıklarda hayatta kalabilir ve büyüme için optimum sıcaklık 25 °C'dir. Bu özellikler, doğal su kütlelerinde geniş dağılımına katkıda bulunur. Çeltik tarlalarında, göletlerde, göllerde ve diğer durgun sularda yetişir (Yang ve ark., 2021).

Su mercimeklerinin Burmalılar, Laoslular ve Kuzey Tayland halkı tarafından birçok nesiller boyunca bir sebze olarak kullanıldığı bilinmektedir. Bitkinin yerel Tayca adı olan “khai-nam”, kelimenin tam anlamıyla suyun yumurtaları olarak tercüme edilebilir ve bitkinin oval şeklini (uzunluk 1.5 mm, genişlik 1.0 mm) akla

getirir. Khai-nam genellikle fakir bir halkın yemeği olarak kabul edilir ve potansiyel olarak önemli bir insan gıdası kaynağı olarak çok az dikkat çekmiştir (Bhanthumnavin ve ark., 1971). Rusoff ve ark., 1980), bazı su mercimeği türlerini araştırmış ve bunları olası bir protein kaynağı olarak önermiştir. Bazı ülkelerde taze *Wolffia* bitkileri salatalar, omletler veya sebze körileri gibi çeşitli yemeklerin hazırlanmasında kullanılmaktadır (Saenghongpinit, 2017). *Wolffia* cinsinin (köksüz su mercimeği) 11 türü vardır ve dünyanın en hızlı büyüyen, en küçük çiçekli bitkisidir.

Atık sular ve insan yapımı veya doğal olarak oluşan yüzey suları, aşırı makro besinlerin ve toksik ağır metallerin ve organik ksenobiyotik bileşiklerin varlığı nedeniyle tüketim ve sulama ve/veya doğal olarak oluşan tatlı su organizmalarının sağlığı ve çoğalması için uygun olmayabilir. Su mercimekleri, bu zararlı maddeleri sudan uzaklaştırarak veya kolaylaştırarak su kalitesini iyileştirebilir (Ziegler ve ark., 2016). Makrofit bazlı atık su arıtma sistemleri, geleneksel arıtma sistemlerine kıyasla çeşitli potansiyel avantajlara sahiptir (Priva ve ark., 2012).

2.7.1 Su Mercimekleri ile Yapılan Bazı Fitoremediasyon Çalışmaları

Su mercimekleri azotlu bileşikleri (NH_4 , NO_3) hem kökleri hem de yapraklarının alt yüzeyleri yoluyla alırlar. Çevredeki yüksek NH_4 konsantrasyonları bitkiler, hayvanlar ve hatta insanlar için toksiktir (Britto ve Kronzucker, 2002). Bununla birlikte, *L. minor*'un amonyumu kolayca aldığı ve 84 mg/L'ye kadar olan iyon konsantrasyonlarında iyi büyüdüğü bildirilmiştir (Huang ve ark., 2013; Zhang ve ark., 2014; Wang ve ark., 2014). Yine de daha yüksek NH_4 konsantrasyonları büyüme hızının azalmasına ve fotosentetik pigment kaybına yol açar. Su mercimeğinin nispeten yüksek NH_4 seviyelerini alma ve tolere etme yetenekleri, genellikle bu iyondan önemli miktarda içeren evsel ve tarımsal kaynaklardan gelen atık suyun iyileştirilmesi için uygun olmasını sağlar. Amonyumun %90'ından fazlası, nitratın %70'i ve fosfatın %33 ila %85'ini uzaklaştırma potansiyelleri vardır (Ziegler ve ark., 2016). Su mercimeği türlerinden *Spirodela polyrhiza*, *L. minor* ve *L. gibba* ile yapılan fitoremediasyon çalışmalarında, atık suların su mercimeği ile arıtılmasının aynı zamanda nötr pH'ı koruduğunu, kimyasal ve biyolojik oksijen ihtiyacını azalttığını ve askıda katı maddeleri, sivrisinek larvalarını ve koliform bakterileri uzaklaştırdığı bildirilmiştir (Ziegler ve ark., 2016).

Vietnam’da domuz çiftliği atık suları genellikle anaerobik prosesler kullanılarak arıtılır. Bununla birlikte, anaerobik arıtmadan sonra atık sudaki kirleticilerin seviyesi çok yüksek kalır ve bu nedenle daha fazla arıtma gerektirir. Dinh ve Cao, (2020) tarafından yapılan bir çalışmada, bu oranı azaltmak için arıtılmış atık su 10 kat seyreltildikten sonra *L. minor* ekilmiştir. Ortam koşullarında 5 gün süresince, ekilmiş su mercimeği olan ve olmayan laboratuvar ölçekli stabilizasyon havuzları sürekli olarak beslenmiştir. Girişteki kimyasal oksijen ihtiyacı (KOİ), toplam azot (TN) ve toplam fosfor (TP) konsantrasyonları sırasıyla 260–290 mg/L, 24-28 mg/L ve 1.4–1.8 mg/L ölçülmüştür. Su mercimeği bulunan havuzdaki KOİ, TN, TP giderimleri (%74, %84 ve %84), su mercimeği olmayan havuzdakinden (%71, %55 ve %58) çok daha yüksek kaydedilmiştir. Su mercimeği havuzlarda KOİ, TN ve TP için birinci dereceden uzaklaştırma oranlarını sırasıyla 1.4, 2.0 ve 3.2 kat büyük ölçüde artırdığı analiz etmişler. Su mercimeği köklerinde oluşan biyofilmler, görünüşe göre KOİ giderimini ve organik azotun amonyağa indirgenmesini desteklediğini belirttiler. Su mercimeği ekilmiş stabilizasyon havuzlarının atık su arıtma ve biyokütle üretimi için faydalı sistemler olarak kullanılmasını önermişlerdir.

Iqbal ve ark., (2019) tarafından, kontrollü koşullar altında sentetik sızıntı suyu üzerinde ve doğal koşullar altında çöp sahası sızıntı suyu üzerinde *L. minor* büyütülerek üç test gerçekleştirilmiştir. Her bir test sırasında, su mercimeği 25.8 cm kadar bir yüzey alanına sahip 300 mL’lik plastik kaplar içinde yetiştirilmiştir. Yaklaşık 60 mg taze su mercimeği kütlesi, 9.5 cm’lik bir iç derinlikte 250 mL sızıntı suyu üzerinde büyütülmüştür. Sonuçlar, sentetik sızıntı suyuna kıyasla, su mercimeğinin KOİ, azot ve fosforu doğal iklim koşulları altında çöp sahası sızıntı suyundan daha verimli bir şekilde uzaklaştırdığını ortaya koymuştur. Bununla birlikte, kontrollü koşullar altında su mercimeği vücut kütesine emilen N ve P miktarları, sentetik sızıntı suyunda sırasıyla yaklaşık %16 ve %35 daha fazladır. Roman ve Brennan, (2019) yaptığı çalışmaya göre, su mercimeklerinin belediye, mandıra, domuz, endüstriyel ve su ürünleri atık sularının yüzeyinde hızla büyüdüğü, KOİ’yi azalttığı ve önemli miktarlarda N ve P giderdiği gösterilmiştir. Wang ve ark., (2020) Poyang Gölü havzasında bulunan su mercimeklerinin ekolojik durumunu araştırmışlardır. Analiz edilen çevresel faktörle arasında pH değeri, kimyasal oksijen ihtiyacı (COD), NH₃-N (amonyum azotu), NO₃-N (nitrat azotu), TN (toplam azot), TP (toplam fosfor) ve ağır

metal içeriği yer alır. Poyang Gölü havzasında var olan su mercimeklerinden *Lemna minor*, *L. perpusilla*, *Spirodela polyrrhiza*, *Landoltia punctata* ve *Wolffia arrhiza* türlerini toplamışlardır. *L. minor* ve *S. polyrrhiza*, bölgedeki baskın türlerdir ve *L. minor* su ortamında en geniş pH adaptasyon aralığına (5.5 ila 9.43) sahiptir. *L. minor*'un büyüdüğü sudaki NH₃-N, NO₃-N, TN ve KOİ, konsantrasyon aralıkları sırasıyla 0.18–4.25 mg/L, 0.027–3.27 mg/L, 0.38–13.28 mg/L ve 16.16–614.72 mg/L olan diğer dört türden daha geniş olduğunu bildirmişlerdir. *L. punctata* en geniş TP aralığına (0.06–268 mg/L), *L. minor* ağır metallerden bakıra (Cu), kurşuna (Pb), çinkoya (Zn) ve kobalta (Co) karşı daha geniş bir toleransa sahip olduğu, *S. polyrrhiza*'nın kroma (Cr) ve *L. punctata*'nın mangana (Mn) daha geniş tolerans gösterdiklerini tespit etmişlerdir. Yapılan istatistiksel analizde (RDA), *L. punctata* dağılımının TN, TP ve NH₃-N içeriğinden etkilendiğini göstermiştir. *S. polyrrhiza* mangandan, *L. minor* ise NO₃ azotundan etkilenmiştir. Aynı şekilde, *L. perpusilla* ve *W. arrhiza* sırasıyla Cd ve Cr elementlerinden etkilenmiştir. Bu sonuçlar, su mercimeklerinin farklı su ortamlarında büyüdüğü göstermektedir. Bununla beraber ötrofik ortamların oluşmasını engellemek için optimal değerleri elde etmek için uygun yerel çeşitleri seçilmelidir.

2.7.2 Su Mercimeklerinin Biyoyakıt Olarak Kullanımı

Fosil yakıtların sınırlı rezervleri ve bunlarla ilgili çevresel sorunlar, araştırmacıları ulaşım ve endüstrinin artan küresel enerji taleplerini karşılamak için alternatif enerji kaynakları bulmaya yöneltmiştir. Fosil rezervlerinin önümüzdeki 48 ila 64 yıl sonra petrol ve gaz ihtiyacını karşılayamayacağı tahmin edilmektedir. Bitki biyokütlesi arasında, su kaynaklı bitkiler, biyoyakıt üretimi için potansiyel bir hammaddedir. Çünkü gıda ürünleri ile rekabet etmezler, daha yüksek fotosentetik verimliliğe sahiptirler ve karasal ürünlerle karşılaştırıldığında daha yüksek yağ içeriği üretebilirler. Ayrıca atık suların temizlenmesinde ve göllerde, akarsularda ve nehirlerde ötrofikasyonu önlemede yardımcı oldukları kanıtlanmıştır (Ahmad ve ark., 2018). Ancak zamanında kurtarılmazsa hızla birikmesi su kütlelerinde ikincil kirliliğe neden olacaktır. Su mercimeği protein ve nişasta açısından zengindir, ancak lignin içeriği oldukça düşüktür, bu da onu enerji üretimi için ideal bir biyokütle hammaddesi yapar (Chen ve ark., 2022).

Su mercimekleri sürdürülebilir bir yüksek kaliteli beslenme, biyoyakıt ve farmasötik kaynağı ve ayrıca atık suların arıtımı için büyük ilgi görmektedirler (Frederic ve ark., 2006; Coughlan ve ark., 2022). Su mercimeklerinin ortalama yıllık büyüme oranı 12.4 g/m²/gün (kuru ağırlık) değerine ulaşabilir ve 1 hm² su mercimekleri yılda yaklaşık 28 ton nişasta biriktirebilir (Cheng ve Stomp, 2009). Su mercimeğindeki nişastanın %94.7'si (Xu ve ark., 2011) mısırinkinden yaklaşık sekiz kat daha fazla biyoetanol dönüşüm verimliliğindedir. Biyoetanol önemli bir biyoyakıttır. Bol nişasta içeriği olan su mercimeği türleri biyoetanol üretimi için kaynak olarak görülmektedir (Xu ve ark., 2011). Biyoetanol yollarından biri de nişastanın şekere dönüşüm verimliliğidir (Zabed ve ark., 2017). Nişasta, amiloz ve amilopektinden oluşan bir glikoz polimeridir. Bu ikisinin oranı türe göre değişir ve nişastanın şekere dönüşüm verimliliğinde bir faktördür (Lin ve ark., 2018). Su mercimekleri %35.7 amiloz ve %64.3 amilopektin içerir (Lee ve ark., 2016; Rattanaporn ve ark., 2018; Bala ve Singh, 2019).

Faizal ve ark., (2021) yaptıkları bir çalışmada; dört su mercimeği türünün (*Landoltia punctata*, *Lemna aequinoctialis*, *Spirodela polyrrhiza* ve *Wolffia arrhiza*) şekerleştirme sürecini ve biyoetanol üretim sürecini ve potansiyelini değerlendirmişlerdir. Ayrıca, nişastayı fermantasyon için bir substrat görevi görebilecek çözümlü şekerlere dönüştürmek için şekerleştirmeyi içermesi gereken olası bir üretim prosedürünü de optimize etmişlerdir. Su mercimekleri 12 gün boyunca %10 Hoagland ortamında yetiştirilmiş ve toplanıp kurutulmuştur. *Saccharomyces cerevisiae* mayasıyla biyoetanol üretimi için substratlar test edilen solüsyonlarda çözdürülmüştür. İlk olarak, nişastayı basit şekerlere dönüştürmek için kullanılan enzimin ideal oranı da dahil olmak üzere sakarifikasyon sürecini optimize etmişlerdir. En yüksek nişasta-şeker dönüşümü, amilaz ve amiloglukosidaz 2:1 (v/v) olduğunda ve 50°C'de 24 saatlik bir inkübasyon süresiyle elde edilmiştir. Sonra solüsyonlar, *S. cerevisiae* mayasıyla inkübe edilmiştir. Fermentasyon işlemi %10 (v/v) maya inokülümü ile 48 saatte gerçekleştirilmiştir. Etanol içeriği, inkübasyonun başlamasından yaklaşık 24 saat sonra maksimumdur ve şekerler ve protein, sonraki 24 saat içinde çok az değişikliklerle minimum düzeydedir. Elde edilen nihai etanol konsantrasyonu, sırasıyla; *S. polyrrhiza*, *W. arrhiza*, *L. punctata* ve *L. aequinoctialis* için 0.19, 0.17, 0.19 ve 0.16 g etanol/g kuru biyokütleden elde

edilmiştir. Bu çalışma, dört su mercimeği türünün biyoetanol kaynağı olarak bir potansiyele sahip olduğunu ortaya koymuşlardır. Yapılan diğer bir çalışmada, piroliz yoluyla *W. arrhiza*'nın biyoenerji potansiyeli araştırılmıştır. Biyokütle, şehir atık suyunun atıldığı göletten toplanmıştır. Fırında kurutulmuş toz halindeki biyokütle, inert bir ortamda termogravimetri–diferansiyel taramalı kalorimetri analizörü kullanılarak üç ısıtma hızında (10, 30 ve 50°C/dak.) termal bozunmaya maruz bırakılmıştır. Elde edilen veriler, reaksiyon kimyasını aydınlatmak için Kissenger-Akahira-Sunose (KSA) ve Flynn-Wall-Ozawa (FWO) izodönüşüm modellerine tabi tutulmuştur. E_a (136–172 kJ/mol serbest enerji) ve Gibb'in serbest enerjisi (171 kJ/mol) dahil kinetik parametreler) biyokütlenin olağanüstü biyoenerji potansiyelini göstermiştir. Ortalama entalpiler, ürün oluşumunun piroliz sırasında tercih edildiğini göstermiştir. Gelişmiş birleştirilmiş TG-FTIR-MS analizleri, evrimleşmiş gazların başlıca pirolitik ürünler olarak CO fonksiyonel grupları (aldehitler, ketonlar), aromatik ve alifatik hidrokarbonlar içeren bileşikleri içerdiğini göstermiştir. Bu düşük maliyetli bol biyokütle, enerji ve kimyasalları maliyet açısından verimli ve çevre dostu bir şekilde üretmek için kullanılabilirliğini belirtmişlerdir (Ahmad ve ark., 2018).

2.7.3 Bazı Su Mercimeklerinin Besin Değerleri ve Besin Olarak Kullanılabilirliği

Yukarıdaki özelliklerinin yanı sıra, su mercimekleri hızlı büyüme oranları, yüksek besin alım kapasiteleri, yenilebilirlikleri ve yetiştirme koşullarından etkilenen besin değerlerinin değişkenliği ile karakterize edilirler. Bunlar, insan ve hayvan beslenmesinde, biyoteknolojide veya atık su arıtımında daha fazla kullanım için kilit unsurlardır (Petersen ve ark., 2022). *Wolffia* (ördek otu) cinsine ait türler, birçok ülkede insan tüketimi için doğal su kütlelerinden hasat edilmektedir (Sree ve ark., 2015).

Spirodela, *Landoltia*, *Lemna*, *Wolffiella* ve *Wolffia* türlerinde yapılan analizler sonucunda; protein, yağ ve nişasta içerikleri ile amino asit ve yağ asidi dağılımları ortaya konulmuştur. Kuru ağırlık başına protein içeriği %20 ile %35, yağ %4 ile %7 ve nişasta içeriği %4 ile %10 arasında olduğu tespit edilmiştir. Amino asit dağılımlarının WHO'nun öngördüğü değerlerle örtüştüğü ve çoklu doymamış yağ asitleri içeriğinin ise %48 ile %71 arasında olduğu tespit edilmiştir. Çalışmada, *W. hyalina* ve *W. microscopica* türlerinin besin değerleri ile insan beslenmesine en uygun türler olduğu bildirilmiştir (Appenroth ve ark., 2017).

Mevcut çalışmamızda kullandığımız *W. arrhiza*'nın iyi bir protein kaynağı olduğu, esansiyel amino asit skorunun (DIAAS) 0.75, doymamış yağ asitlerinin toplam yağ asitleri (TFA) içindeki oranının %70.85 olduğu bildirilmiştir (El-Nakhel, ve ark., 2021). B₁₂ vitamini bakteriler tarafından fermente edilen gıdalarda bulunur. Ancak *W. globosa*'nın demir, folik asit, B₁₂ vitamini gibi mikro besinler açısından zengin olduğu belirtilmiştir (Sela ve ark., 2020). *Wolffia* cinsinin türleri, oksalat içeriğinin insanlarda sağlık sorunlarına neden olabilecek kalsiyum oksalat kristalleri şeklinde bulunmaması avantajına da sahiptir (Appenroth ve ark., 2017). Beş su mercimeği cinsinin temsili suşları üzerinde toksikolojik deneyler sonucunda hiçbir olumsuz etkiye rastlanmamıştır (McNamara, 2020; Hu ve ark., 2022).

Su mercimekleri, örneğin *L. minor*, ekotoksikolojik deneylerde model/test tür olarak yaygın olarak kullanılmaktadır.

2.7.4 *Wolffia arrhiza*

Wolffia cinsinde, genom boyutları 375 ila 2203 Mb arasında değişen ve birkaç ploidiyi temsil eden bilinen 11 tür vardır. Ortalama haploid genom boyutu ~800 Mb'dir ve baz kromozom sayısı 20'dir ($2n = 2x = 40$). Bununla birlikte, bazı türlerin triploid ($2n = 3x = 60$) ve tetraploid ($2n = 4x = 80$) temsilcileri vardır, bu da cins içindeki genom boyutlarındaki yayılmayı kısmen açıklayabilir. *W. australiana*'nın her iki dizili klonu diploiddir ve bir haploide sahiptir (Fujita ve ark., 1999; Lam ve Michael, 2022). *W. arrhiza*, yaklaşık 1 mm boyunda ne yaprağı ne de gövdesi olan ve hatta kökleri olmayan en küçük damarlı bitkidir. Yaprak adı verilen bitkinin tamamı çiçek ve tohum verebilir, ancak hızlı çoğalma tomurcuklanma ile sağlanır (Piotrowska ve ark., 2009). Tropikal ve subtropikal sularda yüzen *W. arrhiza*, bitkisel yaprakları hızla büyüdüğü için atık sudan besin maddelerinin uzaklaştırılması için uygulanabilir (Edwards ve ark., 1992; Fujita ve ark., 1999, Naskar ve ark., 1986). Yüksek protein içeren bitkisel yapraklar, balıklar ve hayvanlar için besleyici bir gıda olarak kabul edilmektedir (Naskar ve ark., 1986). Soğuk mevsimler ve açlık koşulları gibi istenmeyen durumlarda, bitkisel yapraklar durağan bir form olarak turionlara dönüşür. Kuru ağırlık bazında %40'a kadar yüksek miktarlarda nişasta içeren turionlar (Fujita ve ark., 1999), elverişsiz koşullarda hayatta kalmak için yoğunluk değişikliği nedeniyle dibe batarlar. Aslında, *W. arrhiza* sadece bir protein kaynağı olarak değil, aynı zamanda etanol ve biyoplastiklerin hammaddesi olabilen bir nişasta kaynağı

olarak da değerlidir (Xu ve ark., 2011). Mükemmel besin içeriği sayesinde *Wolffia* gibi temiz koşullarda yetiştirilen türler, en sağlıklı ve çevre dostu sebzelerden biri olmayı vaat etmektedir. Bu inanılmaz bitkilerin önemi göz önüne alındığında, araştırmacıların bu bitkilerin genetik mekanizmalarını araştırmalarına şaşmamak gerekiyor (Fourounjian ve Cao, 2020). *Wolffia*'nın sınırsız besin maddesine ve CO₂'ye erişimi olsaydı, 4 ayda 10³⁰ bitkiye yol açabileceği, kabaca Dünya'ya eşdeğer bir hacim sağlayabileceği varsayılmıştır. Bu yüzden, *Wolffia*, sentetik biyoloji (Sentetik biyoloji, yararlı amaçlar için organizmaları yeni yeteneklere sahip olacak şekilde tasarlayan ve bunu yaparken mühendislik ilkelerini uygulayan bir bilim alanıdır) için ideal olan aerodinamik bir bitki genomuna sahiptir (Lam ve Michael, 2022).

2.7.4.1 *Wolffia arrhiza* ile Nutrient Giderimine Yönelik Bazı Çalışmalar

Kotowska ve ark., (2018)'nin suların ftalatlardan ve diğer organik bileşiklerden arındırılması için *W. arrhiza* kullanarak yaptıkları çalışmada, yapay yetiştirme ortamı ve belediye atık su örneklerini kullanılarak incelemiştir. Atık sularında en sık tespit edilen sekiz ftalat dikkate alınmıştır. Bunlar dimetil (DMP), dietil (DEP), dipropil (D n PP), dibütil (D n BP), diizobütil (DIBP), bis(2-etilheksil) (DEHP), diizoheptil (DIHP) ve diizonildir (DINP). Yapay yetiştirme ortamında *W. arrhiza*'nın yedi günlük kültivasyonu sırasında gözlemlenen ftalat konsantrasyonundaki azalma %78.9 ile %99.7 arasında olmuştur. Atık sudan *W. arrhiza* tarafından ftalatların uzaklaştırıldığı (%75–78) ve oksijen ihtiyacının azaltıldığını (%93–97) belirtmişlerdir. Arıtılmamış belediye atık sularının *W. arrhiza* ile arıtma verimliliği, inşa edilmiş sulak alanlarda yaygın olarak kullanılan *Lemna minor* kullanımıyla elde edilenden daha iyi olduğunu ve geleneksel atıksu arıtma tesisinde (AAT) elde edilenden çok da kötü olmadığını bildirmişlerdir. *W. arrhiza* ile yapılan diğer bir çalışmada, izoprenoid türevli fitohormonların endojen seviyesini ve bunların farklı kadmiyum (Cd) konsantrasyonlarının (0.1, 1, 10 ve 100 µM) etkisi altındaki etkileri çalışılmıştır. Farklı Cd seviyelerinin hormon seviyelerini değiştirebileceğini tespit etmişler ve bu durumun büyümeyi etkilediğini belirtmişlerdir (Chmur ve Piotrowska, 2020; Chmur ve Bajguz, 2021). Polińska ve ark. (2022), *W. arrhiza*'yı H-benzotriazol (1H-BTR), 4-metil-1H-benzotriazol (4M-BTR), 5-metil-1H-benzotriazol (5M-BTR) ve 5 seçili

benzotriazoller (BTR'ler) sulardan bu maddeleri uzaklaştırmak için bir alternatif olarak önermişlerdir.

2.7.4.2 *Wolffia arrhiza*'nın Transgenik Bitki Olarak Kullanılmasına Yönelik Bazı Çalışmalar

Bugüne kadar, transgenik bitkilerde rekombinant proteinlerin ifadesi, klasik ifade yöntemlerine güçlü bir alternatif haline gelmektedir. Heterolog DNA'nın çevreye salınmasını güvenilir bir şekilde önleyen, hücre kültürü veya rizosekresyona dayalı muhafazalı yetiştirme sistemlerinin geliştirilmesine yönelik özel çabalar gösterilmektedir. Bu tür sistemlerin geliştirilmesi için umut verici bir nesne, biyoreaktörlerde daldırılmış bir kültür olarak kullanılabilen küçük su bitkisi *Wolffia arrhiza*'dır (Khvatkov ve ark., 2018). Son zamanlarda, bitki biyoreaktörleri, ürün güvenlikleri, ucuz üretim maliyetleri ve kolay ölçeklendirmeleri nedeniyle sentetik biyolojinin heyecan verici bir alanı haline gelmiştir. Su mercimeği en küçük ve en hızlı büyüyen su bitkisidir ve basit işleme ve daha küçük alanlarda yüksek biyokütle yetiştirme yeteneği gibi avantajlara sahiptir. Bu nedenle, su mercimeği aşular, antikolar, farmasötik proteinler ve endüstriyel enzimler gibi biyolojik ürünler için yeni bir potansiyel biyoreaktör olarak kullanılabilir. Su mercimeği, biyosentezde çığır açmıştır ve çok sayıda kullanıma ve yüksek değere sahip, bol miktarda biyolojik ürün veya biyo-türevin üretimi için kullanılmaktadır.

Bitki biyoreaktörleri, aşı antijenleri, antikolar, besin takviyeleri ve endüstriyel enzimler gibi potansiyel ticari değerlere sahip biyolojik ajanlar üretmek için genetiği değiştirilmiş mahsullerin yetiştirildiği “kimyasal fabrikalar” olarak adlandırılır (Yang ve ark., 2021). Transgenik bitkilerde rekombinant proteinlerin üretimi, klasik biyofarma yöntemlerine alternatif olmaktadır. *W. arrhiza*, Lemnaceae familyasının evrimsel olarak en gelişmiş, anatomisinde benzersiz olan türüdür. Köksüz bir su mercimeği, bir fermentörde su altında yetiştirmeye aday olarak biyolojik ilaçlama için en umut verici hedeftir (Khvatkov ve ark., 2015). *W. arrhiza*, biyoreaktörlerde batık kültürde büyüeyebilen umut verici bir ekspresyon sistemidir (Khvatkov ve ark., 2021). Khvatkov ve ark. (2015) *Wolffia*'nın gelecekteki biyoteknolojik kullanımına yönelik ilk adım olarak, *Agrobacterium* aracılı dönüşüme dayalı istikrarlı bir dönüşüm sistemi kurmuşlardır. Aşılamanın ardından salkım eksplantları, 2.0mg/L- 2,4-diklorofenoksiasetik asit ve 2.0 mg/L N⁶-benziladenin içeren ortamlarda 2 hafta

süreyile kültürlenmiştir. Eksplantlar daha sonra antibiyotiğe dirençli bitkileri seçmek için 5.0 mg/L higromisin B varlığında büyüme düzenleyici içermeyen ortama aktarılmıştır. Diğer seçici ajanlar (kanamisin ve fosfinotrisin) *Wolffia* için uygun değildir ve yabancı DNA'nın *Wolffia* eksplantlarına iletilmesi için parçacık bombardımanı uygulaması da uygun değildir. Geliştirilen agro transformasyon koşulları, 100 eksplant başına %0.2–0.4 transgen verimliliği ile Southern lekeleme ile teyit edilen *Wolffia*'nın kararlı bir şekilde transforme edilmiş hatları belirlenmiştir. Khvatkov ve ark. (2021) yaptıkları başka bir çalışmada, 8550 eksplant *Agrobacterium* aracılı transformasyona tabi tutulmuş ve %0.48 transformasyon verimliliği ile 41 bağımsız higromisine dirençli *Wolffia* hattı elde edilmiştir. Bunlardan 40'ı hirudin-1 genini (bitkilerde ekspresyon için kodon optimize edilmiş) içermektedir ve nükleer olarak dönüştürülmüş *Wolffia*'nın bağımsız hatlarıdır. Transgenik ekleme, PCR ve Southern blot analizi ile doğrulanmıştır. Hedef proteinin birikimi analiz edildiğinde üç transgenik hatta kanıtlanmıştır. Rekombinant hirudinin maksimum birikimi, bitkinin taze ağırlığının 775.5±111.9 ng/g'a karşılık gelen toplam çözünebilir proteinin %0.02'sidir. Sonuçlar, hirudin ve diğer rekombinant farmasötik proteinlerin üretimi için *Wolffia* bitkilerine dayalı bir ifade sisteminin geliştirilmesine yönelik araştırmalarda kullanılabilirliği önerilmişlerdir.

2.7.4.3 *Wolffia arrhiza*'nın Büyüme Teşvik Edici Olarak Kullanılması

W. arrhiza'nın büyüme teşvik edici maddelerinin fasulye (Rajmash çeşidi IPR 96-4) bitkisi üzerindeki etkisi, ön ıslatma tohum muamelesi ile incelenmiştir. Gözlem, bitki boyunun büyüme ve gelişiminin, bitki başına dal sayısının ve bitki başına yaprak sayısının %5 ekstrakt ile belirgin şekilde uyarıldığını ve sonucun istatistiksel olarak oldukça önemli olduğunu göstermiştir (Tiwari, 2021).

2.7.4.4 *Wolffia arrhiza*'nın Raf Ömrünü Uzatmaya Yönelik Bazı Çalışmalar

Masavang ve ark., (2022)'nin *W. arrhiza* ile yaptığı çalışmada, yüksek besin değerlerine sahip olduğu ve yüksek nem içeriği, raf ömründe sıkıntı yaratmasına rağmen, geleceğin alternatif bir gıda maddesi olarak kabul edilmiştir. Nem tutma özelliği ile gıda ürünlerinin raf ömrünü uzatmak için Nem soğurma özelliği sayesinde gıda ürünlerinin raf ömrünü uzatmak için dehidrasyon ve depolama koşullarında kullanılabilir önerisinde bulunmuşlardır.

2.8 Işık Kaynakları ve Yapılan Bazı Çalışmalar

Işık, bitkilerin büyümesini ve gelişmesini etkileyen en önemli çevresel faktörlerden biridir. Işık enerjisi, özelleşmiş pigment-protein kompleksleri olan fotoreseptörler tarafından yakalanır. Fotomorfojenез olarak bilinen gelişimsel ve fizyolojik tepkiler yoluyla fotosentetik süreçleri yürütürler ve ışık koşullarındaki (kalite ve nicelik) değişikliklere yanıt verirler. Işık ayrıca bitki metabolitinin birikmesinde ve morfolojik yapıdaki değişikliklerde önemli bir rol oynar. Karbonhidratların ve bazı C bazlı savunma bileşiklerinin, örneğin terpenoidler ve fenollerin biyosentezi, fotosentez oranlarından etkilenir. N içeren bitki sekonder metabolitleri tipik olarak azalan ışık yoğunlukları ile artar (Chen ve ark., 2018).

Işık, bitki büyümesi ve dolayısıyla fitoremediasyon için gereklidir. Bununla birlikte, ışık yoğunluğunun etkisi, iç mekân, tamamen kontrollü, istiflenmiş iyileştirme sistemlerinin gelişimini engelleyen bir bilgi açığı olan fitoremediasyon ile ilgili olarak tam olarak anlaşılammıştır. Yapılan bir çalışmada ışık yoğunluğunun (10–850 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$) *L. minor*'un fitoremediasyon potansiyeli üzerindeki etkisi değerlendirilmiştir. Bitkiler, sabit aksenik (100 mL) veya sirküle eden steril olmayan (11.7 L) sistemler kullanılarak, optimum bir büyüme ortamı (yarı güçlü Hutner's) veya sentetik süt işleme atıksu üzerinde büyütülmüştür. Yarı dayanıklı Hutner'larda yetişen *L. minor*'un nispi büyüme oranı (RGR), artan ışık yoğunluğuyla orantılı olarak artmıştır. Buna karşılık, sentetik süt ürünleri atık suyunda yetiştirilen *L. minor*'un RGR'si, 50 ila 850 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ yoğunluk aralığında ışıkla artmamıştır. Sentetik süt ürünleri atık suyunda, TN ve TP giderimi de *L. minor* olmasına rağmen 50 ve 850 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ arasında değişmeden kalmıştır. Protein içeriği (% taze ağırlık), daha yüksek ışık yoğunluklarında %1.5'ten %2'ye yükselmiştir. Daha büyük devri daim sistemi ile benzer sonuçlar elde edilmiştir. Sonuçlar, ışık yoğunluğunun ve atık su bileşiminin *L. minor*'un büyüme ve fitoremediasyon potansiyeli üzerindeki etkileşimli etkilerini göstermektedir. Verilerle, 50 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ 'nin üzerindeki ışık yoğunluklarında, su mercimeğinin atık su iyileştirmesinde mutlaka fayda sağlamayabileceği vurgulanmıştır (Walsh ve ark., 2021).

Stewart ve ark., (2021)'nin yaptığı çalışmada, büyüme foton akısı yoğunluğu (PFD) 50 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ 'lik düşük bir yoğunluk ve 1000 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ 'lik daha yüksek bir

yoğunluğu içerecek şekilde ayarlanmıştır. İki uçta aynı yüksek büyüme oranını belirtir. Su mercimeğinin çok çeşitli ışık yoğunlukları altında gelişebilme yeteneği, su mercimeği ekolojisi bağlamında anlamlıdır. Su mercimeği, gölgelik alanlarda, göl kenarlarında, tam güneş altındaki açık bir havuz gibi ortamlarda hızlı vejetatif olarak çoğalabilir.

2.8.1 Işık Kaynağı Olarak Işık Yayan Diyot (LED) Teknolojisi

Bir ek ışık kaynağı biçimi olarak ışık yayan diyot (LED) teknolojisi, bitki metabolizmasının düzenlenmesinde birçok ilerleme kaydetmiştir. LED'ler istenen yönde yüksek düzeyde ışık yayabildikleri gibi spesifik renkte de ışık yayabilirler. Bitki üretiminde kullanılan diğer ışık kaynaklarında istenmeyen renkler filtrelenir ki bu durum boşa enerji harcamasına neden olur. LED ışıklarda ise herhangi bir filtreleme olmaksızın saf renkte ışıklar üretilir (Danila ve Lucache, 2013). LED'ler, bitki metabolizmasının düzenlenmesi için ışık kalitesinin, miktarının ve fotoperiyodun kontrolüne izin verir (Chen ve ark., 2018). Kırmızı ışık (K) ve mavi ışık (M), su mercimeğinin büyümesini ve fizyolojik süreçlerini büyük ölçüde etkiler. Su mercimeğinin farklı ışık niteliklerine verdiği tepkinin altında yatan fizyolojik ve moleküler mekanizmalar ise belirsizliğini korumaktadır (Zhong ve ark., 2022).

Mavi ışık, bitkilerdeki ve bitki hücrelerindeki çoklu süreçleri global olarak düzenler. Bu süreç, fotomorfojeniz, fotosentez, kloroplast birikimi, stoma açılması, yaprak gelişimi ve çiçeklenme zamanını etkiler. Ayrıca, bazı kanıtlar, mavi ışığın ikincil metabolitlerin moleküler düzenlenmesinde rol oynadığını da göstermektedir. Örneğin, mavi ışık *Dimocarpus longan* embriyojenik kallusta rutin ve kateşinler gibi fonksiyonel metabolitlerin biyosentezini düzenlerken HY5 (ışıkta büyümenin baskılanması esas olarak temel lösün fermuar transkripsiyon faktörleri biri, uzatılmış hipokotil 5), PIF4 (fitokrom etkileşim faktörü4) ve MYC2 Savunma yanıtları, transkripsiyon faktöründen biri) anahtar düzenleyiciler olarak kabul edilir. Narenciyede karotenoidlerin birikmesi ve klorofilin bozunması mavi ışık altında meydana gelir ve meyvenin daha derin ve daha hızlı renklenmesine yol açar ve bu değişiklikler pigment metabolizmasındaki bazı yapısal genlerin yukarı regülasyonu ile ilişkilendirilmiştir. Mavi ışık ayrıca bitki yapraklarındaki yağ asitlerinin bozunmasını etkiler ve zar lipidlerinin yağ asidi bileşimini değiştirdiği belirlenmiştir (Wang ve ark., 2020). Yapılan diğer bir çalışmada, ışık kaynağının [LED beyaz (LB),

floresan beyaz (T5) ve LED mavi (LM)] ve fotoperiyodun (12:12, 16:08, 24:00 aydınlık/karanlık) 16 gün boyunca su mercimeği *Landoltia*'nın büyümesi üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Ortalama günlük nispi büyüme oranı (RGR) yaklaşık 0.519 g/güne ulaşmıştır. Hem ışık kaynağı hem de fotoperiyodun, ortalama RGR üzerinde anlamlı bir fark göstermediği belirlenmiştir (Gallego ve ark., 2022).

Petersen ve ark., (2022) yaptıkları yapay aydınlatma ve besin kontrol ve dozlama sisteminde, küçük ölçekli, devri daim yapan bir kapalı dikey çiftlik (IVF) kullanmışlardır. Farklı ışık yoğunluklarının (50, 100 ve 150 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$) ve spektral dağılımların (kırmızı/mavi oranları: %70/30, 50/50 ve 30/70) bağıl büyüme hızına (RGR) etkisi, *Lemna minor* ve *Wolffiella hyalina* su mercimeği türlerinde ham protein içeriği, bağıl protein verimi (RPY) ve klorofil içeriğine etkisi araştırılmıştır. Artan ışık yoğunluğu, *L. minor* ve *W. hyalina* için sırasıyla RGR'yi (%67 ve %76) ve RPY'yi (%50 ve %89) artırmıştır. Klorofil-a'yı ise (%27 ve %32) düşürmüştür. Spektral dağılımların araştırılan herhangi bir parametre üzerinde önemli bir etkisi olmamıştır. *W. hyalina*'dan incelenen tüm parametrelerde *L. minor*'a göre daha yüksek değerler elde edilmiştir. Bu araştırma, su mercimeğinin yapay aydınlatma ile küçük ölçekli, yeniden sirküle eden bir kapalı dikey çiftlikte başarılı bir şekilde yetiştirildiğini kanıtlamıştır. Zhong ve ark., (2022) yaptığı çalışmada, kırmızı, mavi ve beyaz ışık koşulları altında farklı tepki mekanizmalarını aydınlatmak için su mercimeği *Spirodela polyrhiza* "5510" üzerinde fizyolojik ve transkriptomik analizler kullanılmıştır. Büyüme göstergelerindeki değişiklikler, üst yapı değişiklikleri, metabolit birikimleri ve farklı şekilde ifade edilen genler (DEG'ler) ölçülmüştür. Sonuçlar, mavi ışığın hem biyokütle hem de protein birikimlerini desteklediğini, kırmızı ışığın ise nişasta birikimini desteklediğini göstermiştir. Beyaza karşı kırmızı, beyaza karşı mavi ve kırmızıya karşı mavi karşılaştırma gruplarında sırasıyla toplam 633, 518 ve 985 bulunmuştur. Gen Ontolojisi (GO) zenginleştirme analizinde, üç karşılaştırma grubunun tamamındaki DEG'ler, iki GO terimi, karboksilik asit metabolik süreç ve liyaz aktivitesi açısından önemli ölçüde zenginleştirilmiştir. Kyoto Genler ve Genler Ansiklopedisi (KEGG) analizinde, DEG'ler iki yoldan, histidin metabolizması ve izokinolin alkaloid biyosentezi açısından büyük ölçüde zenginleştirilmiştir. BL altında daha yüksek protein içeriği, GO terimleri ve KEGG yollarıyla zenginleştirilmiş çoğu DEG'nin yukarı regülasyonu

ile ilişkilendirilmiştir. Ayrıca, ışık nitelikleri, karotenoid biyosentezi gibi diğer metabolik yolların gen ekspresyon modellerini etkilemiştir. Bu genlerin düzenlenmesi, fotosentetik pigment içeriğinin seviyesini açıklayabilir. Sonuçlar, su mercimeğinin üç ışık kalitesine fizyolojik değişiklikleri ve transkriptome düzeyindeki tepkilerini ortaya çıkarmış, böylece su mercimeğinin bir biyokütle enerji kaynağı olarak yeteneği üzerine daha ileri araştırma çalışmaları için temeller sağlanmıştır.

W. arrhiza'nın C, H, N ve S içeriği analizinin yapıldığı çalışmada, farklı LED ışıkların element içeriğini değiştirdiği bildirilmiştir. Farklı spektrumlardaki kırmızı, mavi ve mor (kırmızı+mavi) LED ışıklar altında yetiştirilen *W. arrhiza*'nın en yüksek C, H, N ve S içerikleri sırasıyla; mavi-LED (C, %30.22), mavi-LED (H, %5.13), kırmızı-LED (N, %6.66) ve mor-LED (S, %0.22) ışıklarda ölçülmüştür. Çalışmada, ışık kalitesi ve çeşidinin yetiştiriciliği yapılan bitki türlerinin nutrasötik özelliklerini geliştireceği, biyoaktif bileşiklerin üretimini artırabileceği, aynı zamanda insan sağlığı için etkili olan sekonder metabolitlerin biyosentezini de etkileyeceği ifade edilmiştir. Bitkiler, çevresel koşullara bağlı olarak farklı yapısal özellikler kazanır. Hızlı üreme yeteneğine sahip olan köksüz su mercimeği *Wolffia*, model bir organizma olarak kullanılabilir ve farklı çalışmalar tasarlanarak sonuçları değerlendirilebilir (Taş ve Şengüllendi, 2022).

W. arrhiza'nın farklı LED ışıklar altında ve kontrollü koşullarda yetiştirildiği çalışmada, ham protein içeriği analiz edilmiştir. Dumas metodunun kullanıldığı çalışmada *W. arrhiza*'nın yapay aydınlatma ile farklı ışık spektrumlarında başarılı bir şekilde yetiştirildiği görülmüştür. Doğal ortamda yetişen *W. arrhiza*'nın %10 civarında olan ham protein içeriğinin, kırmızı LED ışıkta yetiştirildiğinde %41.6 protein içeriğine sahip olduğu, farklı ışık kaynaklarının ise protein içeriğine etkisinin olduğu belirtilmiştir. Yapılan araştırma sonucunda *W. arrhiza*'nın ham protein içeriğinin kırmızı-LED > mavi-LED > mor-LED > floresan şeklinde olduğu tespit edilmiştir. *W. arrhiza*'nın protein içeriğinin artırılmasında LED ışığın floresan ışığa göre daha verimli, etkili ve avantajlı olduğu görülmüştür (Taş ve Şengüllendi, 2023a). Çalışmada, *W. arrhiza*'nın yüksek protein içeriğine sahip olması, çevre dostu olması ve sürdürülebilir üretimi gibi özellikleriyle yakın gelecekte geleneksel mahsullere alternatif bir ürün olarak değerlendirilip, bitki bazlı protein ve fonksiyonel gıda pazarında hızla yer alabilecek potansiyele sahip olduğu belirtilmiştir.

2.9 Sıfır Değerlikli Demir Nanopartikülü (Fe⁰NP) ve Fitoremediasyon ile ilgili Yapılan Bazı Çalışmalar

Nanopartiküller dünya genelinde üretilip çeşitli alanlarda kullanılmaktadır (Taş ve Dalkıran, (2022)). Sıfır değerlikli demir (Fe⁰); toksik olmaması, ucuz, çevreye uygun olması ve yüzey alanının artmasından dolayı arıtma işlemleri için uygun bir alternatiftir. Son zamanlarda suda bulunan pestisitler, klorlu bileşikler, nitrat, ağır metaller ve patlayıcıları içeren çeşitli yeraltı suyu kirleticilerini gidermek için demir tozu mikropartikülleri kullanılmaktadır. Yüksek reaktivitesi ve küçük partikül boyutu nedeniyle kirlenmiş toprakların, sedimentlerin ve biyokatıların ıslahında kullanılmaktadır. Klorlu bileşiklerin hızlı uzaklaştırma etkinliğinden sonra halojenli organik bileşikler için iyileştirici bir madde olarak araştırılmıştır. Daha yakın zamanlarda sıfır değerlikli demir nanopartiküllerinin (Fe⁰ NP) klorlu alkanları hızla parçaladığı gösterilmiştir (Shih ve Tai, 2010; Fu ve ark., 2014; Türk ve Hanay 2017; Pasinszki ve Krebsz, 2020).

Brasili ve ark., (2020)'nın yaptığı çalışmada, altı değerlikli krom Cr(VI) ile kirlenmiş suyun ciddi bir çevre sorunu olduğu bildirilmiş, Fe⁰ NP indirgeme işlemi ile Cr(VI) gideriminin ve Cr(VI), Fe⁰ NP ile Fe⁰ NP ve Cr(VI) ile kombine muamelenin domates büyüme performansı üzerindeki etkisi değerlendirilmiştir. Cr(VI)'nın çimlenme kabiliyeti üzerindeki toksik etkisini değerlendirmek için tohumlar, 1000 mg/L'ye kadar artan Cr(VI) konsantrasyonlarına maruz bırakılmıştır. Cr(VI) 5 mg/L'den itibaren tohum çimlenmesinin inhibisyonu, hipokotil ve kök boyunun azalması başlamıştır. Cr(VI)+Fe⁰NP 5 mg/L ile muamele altında, tohum çimlenmesi, hipokotil ve kök uzunluğu, Cr(VI) 5 mg/L ile karşılaştırıldığında önemli ölçüde daha yüksek sonuçlar vermiştir. Kontrollere kıyasla Fe⁰NP 5 mg/L işleminden sonra yaprak klorofil ve karotenoidlerinde önemli bir artış gözlenmiştir. Olgun meyvelerde Fe⁰NP 5 mg/L ile iyileştirmeden sonra karotenoidler, yağda çözünen vitaminler ve nikotiyamin seviyelerinde önemli bir değişiklik gözlenmemiştir. Cr(VI)'yı azaltma ve domates büyümesini teşvik etme yetenekleri nedeniyle, çalışmada Fe⁰NP'nin iyileştirme amaçları için bir alternatif olarak düşünülebileceği belirtilmiştir.

Liu ve ark., (2021b) pentaklorofenol (PCP) ile kirlenmiş çeltik topraklarında güvenli pirinç üretimi için Fe⁰ NP kullanarak yeni bir toprak iyileştirme stratejisi oluşturmuşlardır. Kirlenmiş toprakta 100 mg PCP/kg toprakta Fe⁰NP içermeyen pirinç

ekimi ile karşılaştırıldığında, kg toprakta 100 mg Fe⁰NP eklenmesi tane verimini %47.1–55.0 artırdığını, tane PCP içeriğini %83.6–86.2 azalttığını gözlemlemişlerdir. PCP kaldırma oranı %49.9'dan %83.9–89.0'a yükselmiştir. Güvenli pirinç üretiminde Fe⁰NP türevli kök demir plak oluşumunun spesifik rolü açıklığa kavuşturulmuştur. PCP'nin Fe⁰NP ile kolaylaştırılmış rizosfer mikrobiyal bozunmasında tanımlanan Fe⁰NP iyileştirmesinin ve pirinç ekiminin sinerjistik etkisi tespit edilmiştir. Bu çalışma ile kirlenmiş arazilerde aynı anda güvenli mahsul üretimini sağlayabilecek toprak ıslahında nanomalzemelerin uygulanması için yeni bir strateji olduğu bildirilmiştir.

Fe⁰NP'nin olumsuz etkisi konusunda da çalışmalar vardır. Tris (2-kloroetil) fosfat (TCEP), toprakta kirletici olarak giderek artan yeni geliştirilmiş bir organofosforlu alev geciktiricidir. Nanoremediasyon, TCEP'nin kontrolü için potansiyel bir çözüm iken, etkinlik ve ekolojik riskler yeterince anlaşılmamıştır. Yang ve ark., (2023) bu konuda yaptığı araştırmada, Fe⁰NP (50–5000 mg/kg) ve TCEP'nin (50–5000 µg/kg) fizikokimyasal etkileşimlerini ve farklı konsantrasyonlardaki toksisite etkisini kırmızı Kaliforniya solucanı (*Eisenia fetida*) üzerinde araştırmışlardır. Toprakta 28 günlük bir maruz kalma sırasında, topraktaki TCEP, Fe⁰NP tarafından ne parçalanmış ne de ortadan kaldırılmıştır. TCEP'nin solucanların fizyolojilerine toksisite etkisi, Fe⁰NP'ninkinden önemli ölçüde daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Mekanik olarak, TCEP tipik bir nörotoksositeyi indüklemiş ve dolaylı olarak solucanların besin alımını ve büyüme performansını engellemiştir. Fe⁰NP kaynaklı demir zehirlenmesi bağırsak hasarını şiddetlendirmiş ve doğrudan enerji metabolizmasını inhibe etmiş, bu nedenle TCEP kaynaklı yetersiz beslenmeyi şiddetlendirmiştir. Bulgular Fe⁰NP-TCEP'nin toprak organizmalarına birlikte maruz kalmasının toksik mekanizmaları hakkında yeni bilgiler sağlıyor. Ayrıca, Qian ve ark. (2023) yaptıkları bir çalışmada Fe⁰NP ilavesinin pirinç fidesi büyümesini engelleyebileceğini göstermiştir. Risk değerlendirmesinin gerekliliğini ve yeni ortaya çıkan kontaminasyonlarda nanoremediasyonun dikkatli kullanımının altını çizmişlerdir.

2.10 İşletim Parametreleri

2.10.1 Fiziksel ve Kimyasal Parametreler

Suyun içme, evsel, tarımsal veya endüstriyel amaçlarla kullanılmadan önce test edilmesi çok gerekli ve önemlidir. Su, farklı fiziko-kimyasal parametrelerle test edilmelidir. Su, farklı türlerde yüzer, çözünmüş, askıda ve mikrobiyolojik ve ayrıca bakteriyolojik safsızlıklar içerir. Fiziksel görünümünün test edilmesi için sıcaklık, pH, bulanıklık, TDS vb. gibi bazı fiziksel testler yapılmalı, BOİ, KOİ, çözünmüş oksijen, alkalilik, sertlik ve diğer karakterler için kimyasal testler yapılmalıdır.

2.10.1.1 Azot

Azot (N), bitkiler için birincil besin maddesi ve ötrofikasyon olayında kilit bir maddedir ve giderek artan ciddi N kirliliği küresel bir endişe haline gelmiştir (Subbarao ve Searchinger, 2021; Hu ve ark., 2023). Sudaki N esas olarak kimyasal gübrelere, toprak N kaynaklarından ve atmosferik sedimantasyondan gelir. İnorganik azotun ana bileşeni olan nitrat, su bitkileri, algler ve bakteriler tarafından kolayca emilir, bu da ötrofikasyonu hızlandırabilir ve insan sağlığını tehlikeye atabilir (Gilliam ve ark., 2019). Fazla organik N, organizmalar tarafından kullanıldığında büyük miktarda oksijen tüketir ve bu da su kütlelerinde anoksik bölgelerin oluşumunu. Geçen yüzyılın ortalarından beri araştırmacılar, N kaybının, iklim faktörlerinin sıklığının ve yoğunluğunun ana itici faktörleri olduğunu belirtmiştir (Hu ve Yang, 2023).

2.10.1.2 Fosfor

Fosfor (P), sucül besin ağını oluşturan bitki ve hayvanlar için gerekli bir besin maddesidir. P tatlı suların çoğunda yetersiz bulunan besin maddesi olduğundan, doğru koşullar altında fosfordaki mütevazı bir artış bile, bir sucül ekositemde hızlı bitki büyümesi, alg patlamaları, düşük çözünmüş oksijen koşulları oluşturarak bazı balıkların, omurgasızların ve diğer suda yaşayan hayvanların ölümüne eden olabilir. Hem doğal hem de insan olmak üzere birçok P kaynağı vardır. Bunlar arasında toprak, kayalar, atık su arıtma tesisleri, gübrelenmiş çimler ve ekili alanlardan gelen akış, arızalı septik sistemler, hayvan gübresi depolama alanlarından gelen akış, bozulmuş arazi alanları, süzölmüş sulak alanlar, su arıtma ve ticari temizlik müstahzarları yer alır. Fosforun karmaşık bir hikâyesi vardır. Doğada saf “elementel” P nadir bulunur. Sucül sitemlerde P, organik fosfat ve inorganik fosfat şeklinde bulunur. Organik fosfat, bitki veya hayvan dokusunda olduğu gibi karbon bazlı bir molekülle ilişkili bir fosfat molekülünden oluşur. Organik madde ile ilişkili olmayan

fosfat inorganiktir. İnorganik fosfat bitkilerin ihtiyaç duyduğu formdur. Hayvanlar organik veya inorganik fosfat kullanabilir. Hem organik hem de inorganik P, suda çözünebilir veya su sütunundaki partiküllere bağlı olarak süspanse edilebilir (Spellman, 2014; Bhateria ve Jain, 2016).

2.10.1.3 Sıcaklık

Su sıcaklığı, çoğu biyolojik sistemde su kimyasını, biyokimyasal reaksiyonları ve biyotanın büyümesini/ölümünü doğrudan etkileyen önemli bir parametredir (Komatsu ve ark., 2007). Su sıcaklıklarındaki bir artış, kimyasal reaksiyonların kinetiğini ve kalite bozulmalarıyla birlikte hidrosistemlerin ekolojik durumunu etkiler. Yüksek sıcaklıklarda termal tabakalaşma periyodunun genişlemesi ve termoklini derinleştirmesi beklenir. Bu değişiklik ayrıca aerobik ayrışma için oksijen talebinde bir artışa yol açabilir ve hipolimniyondaki P konsantrasyonunu ve miktarını artırarak, tortulardan yukarı doğru bir P akışını teşvik edebilir. Su kalitesi modeli kullanılarak yapılan uzun vadeli tahmine dayalı olarak, küresel ısınmanın daha trofik göl koşullarına neden olduğu, alg büyümesini daha da desteklediği ve su ekosistemlerini değiştirdiği gösterilmiştir (Zwolsman ve ark., 2007). Sıcaklık, suyun oksijen içeriğini etkiler. Sıcaklık arttıkça oksijen seviyeleri düşer. Oksijen miktarı, su bitkilerinin fotosentez hızını, suda yaşayan organizmaların metabolik hızını, organizmaların toksik atıklara, parazitlere ve hastalıklara duyarlılığı etkiler. Sıcaklık değişiminin nedenleri arasında hava durumu, gölgeli akarsu kıyısı bitki örtüsünün kaldırılması, barajlar, soğutma suyunun boşaltılması, kentsel yağmur suyu ve akarsuya yeraltı suyu girişleri yer alır. Sıcaklık sadece metabolik aktiviteleri etkilemez, aynı zamanda biyolojik çamurun çökme özelliğini, gaz transfer hızı gibi faktörleri de etkilemektedir (Spellman, 2017).

2.10.1.4 Elektriksel İletkenlik

Elektriksel iletkenlik (EC), sıcaklık, pH değeri, alkalinite, toplam sertlik, kalsiyum, toplam katılar, toplam çözülmüş katılar ve suyun kimyasal oksijen talebi, klorür ve demir konsantrasyonu gibi parametreler ile önemli bir korelasyon gösterir (Bhateria ve Jain, 2016). Suyun EC değeri hem dışarıdan gelen hem de jeotermik etkilere bağlıdır, aynı zamanda tuzluluk ve sıcaklık artışına paralel olarak artış göstermektedir (Kutoğlu ve Çiçek, 2017). Akarsulardaki EC, öncelikle suyun aktığı bölgenin jeolojisinden etkilenir. Granit ana kayanın bulunduğu alanlardan geçen

akarsular daha düşük iletkenliğe sahip olma eğilimindedir, çünkü granit, suya yıkandığında iyonlaşmayan (iyonik bileşenlere çözünmeyen) daha inert malzemelerden oluşur. Killi topraklara sahip alanlardan geçen akarsular, suyla yıkandığında iyonlaşan materyallerin varlığından dolayı daha yüksek iletkenliğe sahip olma eğilimindedir. Yeraltı suyu girişleri, içinden geçtikleri ana kayaya bağlı olarak aynı etkilere sahip olabilir. Akarsulara yapılan deşarjlar, yapılarına bağlı olarak iletkenliği değiştirebilir. Arızalı bir kanalizasyon sistemi, klorür, fosfat ve nitratın varlığından dolayı iletkenliği yükseltir; bir petrol sızıntısı iletkenliği düşürür (Bhateria ve Jain, 2016). Wetzel'e göre EC 3000 $\mu\text{mhos/cm}$ değerine ulaşması halinde sularda ekolojik denge bozulur (Kutoğlu ve Çiçek, 2017).

2.10.1.5 pH

Hidrojen iyonu konsantrasyonunun etkisi enzimlerin çalışma mekanizmasını etkileme ile açıklanabilir. Atık suyun pH'sı kimyasal ve biyolojik arıtma işlemlerinin belirlenmesinde önemlidir. Suyun korozif doğasının belirlenmesinde en önemli faktör pH'dır. pH değeri ne kadar düşükse, suyun aşındırıcı özelliği o kadar fazladır. Düşen fotosentetik aktivite oranı ve karbondioksit ve bikarbonatların asimilasyonu, artan pH'dan nihai olarak sorumludur. Çeşitli faktörler suyun pH'sında değişikliklere neden olur. Gözlenen daha yüksek pH değerleri, fiziko-kimyasal durumdaki değişiklik nedeniyle karbondioksit, karbonat-bikarbonat dengesinin daha fazla etkilendiğini göstermektedir (Bhateria ve Jain, 2016).

2.10.1.6 Biyokimyasal Oksijen İhtiyacı

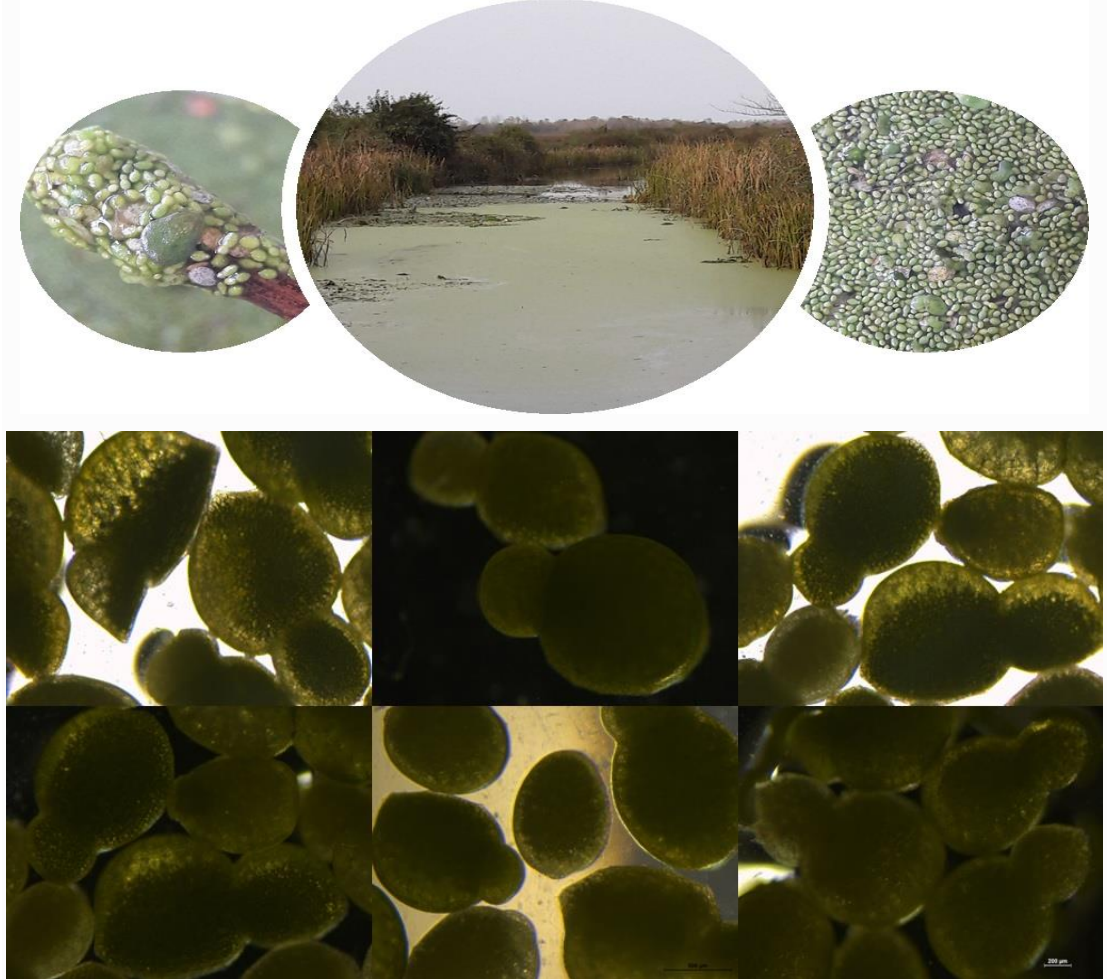
Atıksularda organik kirliliğin göstergesi olarak en fazla kullanılan parametre biyolojik oksijen ihtiyacı (BOİ) parametresidir (Yansın ve Çeçen, 2001). BOİ, sularda ve atıklarda indirgenmiş maddelerin oksidasyonu sırasında mikroorganizmalar tarafından tüketilen çözülmüş oksijenin bir ölçüsüdür. BOİ, akarsularda çözülmüş oksijen miktarını doğrudan etkiler. BOİ ne kadar büyük olursa, akıştaki oksijen o kadar hızlı tükenir. Bu, daha yüksek sucul yaşam biçimleri için daha az oksijenin mevcut olduğu anlamına gelir. Sudaki yüksek BOİ, düşük oksijende strese giren, boğulan ve ölen su canlıları kadartehlikelidir. BOİ kaynakları arasında; yapraklar ve odunsu kalıntılar, ölü bitkiler ve hayvanlar, hayvan gübresi, kâğıt hamuru ve kâğıt fabrikalarından, atık su arıtma tesislerinden, yemliklerden ve gıda işleme tesislerinden çıkan atıklar, başarısız septik sistemler ve kentsel yağmur suyu akışıdır. Klor, bir

numunedeki organik ve inorganik maddeleri ayrıştırıran mikroorganizmaları inhibe ederek veya öldürerek BOİ ölçümünü de etkileyebilir. Bir kanalizasyon arıtma tesisinden çıkan atıkların altındakiler gibi, klorlu sularda kloru sodyum tiyosülfatla nötralize etmek gerekir (Bhateria ve Jain, 2016).

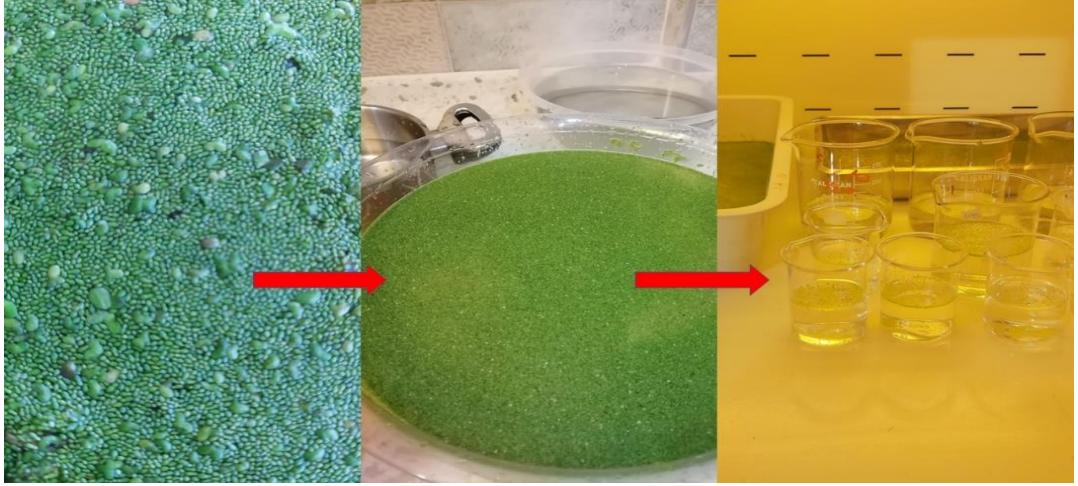
3. MATERYAL ve YÖNTEM

3.1 Bitki Materyali ve Ön Kültürü

W. arrhiza türüne ait bitkiler Türkiye'nin kuzeyinde Yeşilirmak Deltası'nın doğusunda yer alan Terme ilçesindeki (Samsun) sulak alandan toplanmıştır (Şekil 3.1). Alanda yapılan daha önceki çalışmada bu tür tanımlanmıştır (Taş ve Topaldemir, 2021). Araziden toplanan numuneler ODÜ Hidrobiyoloji Laboratuvarına getirilmiştir. Burada toplanan numuneler önce çeşme suyunda yabancı materyallerden ayıklanıp daha sonra distile suda iyice yıkanmıştır. *W. arrhiza* büyüme ortamı olarak N-medium'unda Appenroth ve ark., 1996), 14 gün boyunca iklim kabininde (GROTECH/GR08, UNITRONIKS® VISION350™) floresan ışık altında 16/8 aydınlık/karanlık fotoperiyotta, 24±1°C'de çoğaltılmıştır (Şekil 3.2).



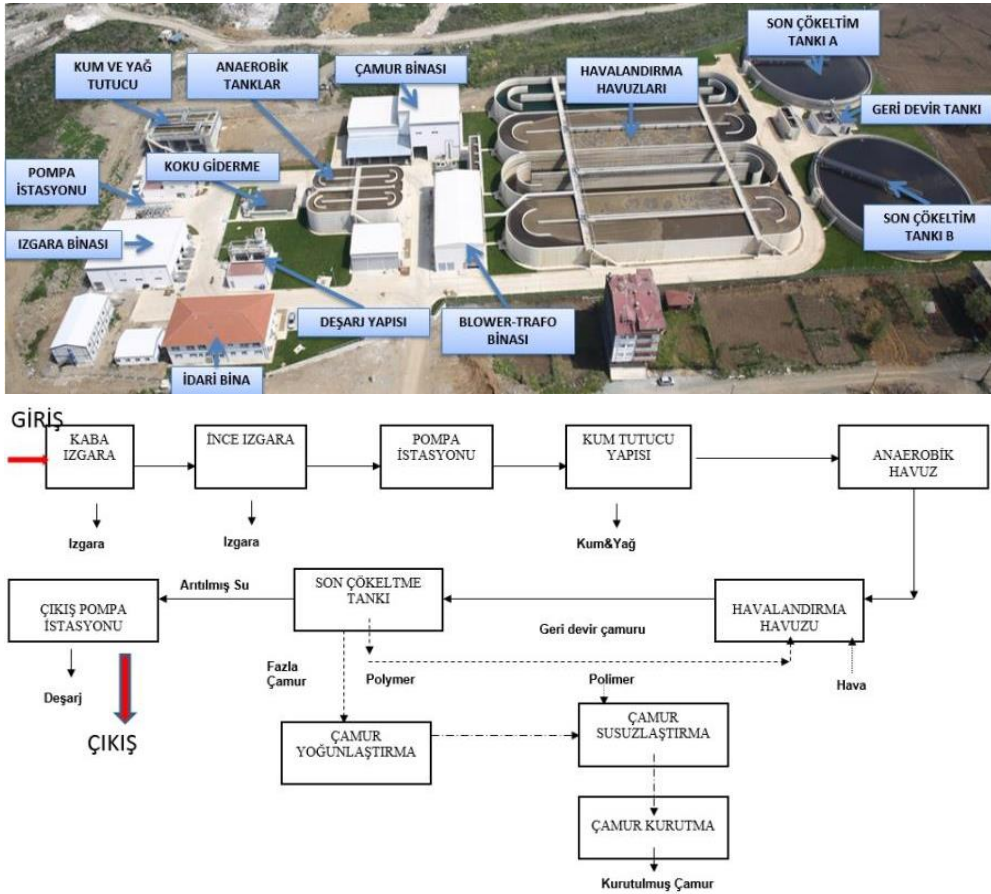
Şekil 3.1 Doğal ortamda *W. arrhiza*, Terme, Samsun (Orijinal, H. Topaldemir) ve Mikroskop Görüntüleri



Şekil 3.2 Laboratuvarda *W. arrhiza* ön kültür çalışmaları

3.2 Atık Su Örneklerinin Alınması ve Analizi

Bitki yetiştirmek için Ordu/Altınordu Durugöl Kentsel Atık Su Arıtma Tesisi çıkış suyundan su numunesi alınmıştır (Şekil 3.3).



Şekil 3.3 Ordu Atık Su Arıtma Tesisi (AAT) ve ATT Akım Şeması

Deney başlangıcında, AAT çıkış suyunda MERCK kitleri kullanılarak MERCK prosedürüne ve standart metotlara göre spektrofotometrede su analizleri yapılmıştır: TN yüksek aralık (10-150 mg/L, #HC035552), TN düşük aralık (0.5-15mg/L, #HC042455), TP yüksek aralık (3-100 mg/L, #HC028024), TP düşük aralık (0.05-5 mg/L #HC038064), NH₄⁺ yüksek aralık (4-80 mg/L, #HC996475), NH₄⁺ düşük aralık (0.010-2mg/L, #HC996860), NO₃⁻ yüksek aralık (1-50 mg /L, #HC420838), NO₂⁻ (0.03-2.3 mg/L, #HC744340), KOİ yüksek aralık standart metod (100-900 mg/L, #SM5220D), KOİ düşük aralık standart metod (0-90mg/L, #SM5220D), BOİ standart metod (#5210D) ve BOİ respirometrik metod kullanılmıştır.

Deney sonucunda, *W. arrhiza* yetiştirilen su örneklerinde de aynı analizler yapılarak sonuçlar karşılaştırılmıştır.

3.3 Kontrollü Deney Düzenegi

W. arrhiza büyüme ortamı olarak sentetik “N-medyum” kullanılmıştır (Appenroth ve ark., 1996). N-medyum su mercimeklerinin yetiştirilmesi için önerilen bir ortamdır. Bu ortam aşağıdaki kimyasalların karışımıyla hazırlanmıştır. Kullanılan tüm kimyasallar analitik saflıkta olup Merck KGaA (Almanya)’dan satın alınmıştır. **Stok 1:** 4.083 g/L KH₂PO₄; **Stok 2:** 47.23 g/L Ca(NO₃)₂.4H₂O; **Stok 3:** 161.8 g/L KNO₃, 61.8 mg/L H₃BO₃, 514.5 mg/L MnCl₄.H₂O, 9.4 mg/L Na₂MoO₄.2H₂O, 49.30 g/L MgSO₄.7H₂O; **Stok 4:** 1.835 g/L FeNaEDTA dır. Hazırlanan stoklar +4°C’de buzdolabında muhafaza edilmiştir. Bir litre besin ortamı hazırlamak için her stok solüsyondan 5 mL kullanılmış, pH 5.5’e ayarlanıp 121°C’de 15 dak. otoklavda steril edilerek oda sıcaklığına soğutulan steril ortamlar kültürlerin çoğaltılmasında kullanılmıştır. N-medyum içinde yetiştirilen *W. arrhiza* ön kültür örnekleri göz aralığı <1mm olan plastik bir elek içinde süzülüp dH₂O ile durulandıktan sonra fazla suyu uzaklaştırmak için 2 dakika kâğıt havlu üzerinde tutulmuştur. Deney grupları için hassas terazide *W. arrhiza* numunelerinden 3.750 g tartılarak başlangıç yaş ağırlıkları kaydedilmiştir. Ardından 250 mL’lik plastik kaplar içinde bulunan 200 mL’lik N-medyum ve AAT çıkış suyuna tartılan *W. arrhiza* numuneleri ilave edilmiştir. Nanopartiküllü deney gruplarında, AAT çıkış suyu içine Fe 0,0012 g (5 mg/L) ilave edilmiştir. Her bir deney grubu için üç tekerrür yapılmıştır. Deney düzeneginin şeması Çizelge 3.1’de görülmektedir.

Çizelge 3.1 Kontrol ve Deney Grupları

Kontrol Grubu	G1	G2
Floresan Işık	Nanopartikülsüz Ortam	Nanopartiküllü Ortam
Atık su + <i>W. arrhiza</i> + F (105 µmol/m ² /s)	Atık su + <i>W. arrhiza</i> + M/K LED (100/50 µmol m/s) (Mor: 105 µmol/m ² /s)	Atık su + <i>W. arrhiza</i> + Fe ⁰ NP + M/K LED: 100/50 µmol m/s (Mor: 105105 µmol/m ² /s)
Kontrol Grubu	G3	G4
Floresan Işık	Nanopartikülsüz Ortam	Nanopartiküllü Ortam
Atık su + <i>W. arrhiza</i> + Fe ⁰ NP (105 µmol/m ² /s)	Atık su + <i>W. arrhiza</i> + M/K LED (30/30 µmol/ m ² /s (Mor: 60 µmol/m ² /s)	Atık su + <i>W. arrhiza</i> + Fe ⁰ NP + M/K LED (30/30 µmol/m ² /s) (Mor: 60 µmol/m ² /s)
Kontrol Grubu	G5	G6
Floresan Işık	LED’li Ortam	LED’li Ortam
N-medium + <i>W. arrhiza</i> + F (105 µmol/m ² /s)	N- medium + <i>W. arrhiza</i> + M/K LED (100/50 µmol/m ² /s (Mor: 105 µmol/m ² /s)	N-medium + <i>W. arrhiza</i> + M/K LED (30/30 µmol/m ² /s) (Mor: 60 µmol/m ² /s)

F: Beyaz Floresan, K: Kırmızı LED, M: Mavi LED, Fe⁰NP: Sıfır değerlikli demir nanopartikülü

Bu çalışmada; floresan ve LED ışıkların kullanıldığı farklı ışık yoğunluklarında ve Fe⁰NP ilave edilmiş gruplarda AAT çıkış suyu ve N-medyum ortamında yetiştirilen *W. arrhiza* bitkisinin, Çizelge 3.1’de belirtilen koşullarda, bağıl büyüme hızına ve kentsel AAT çıkış suyunda nütrient giderim yüzdelerine bakılmıştır. Çalışmada beyaz floresan ve farklı LED ışık uygulaması için kırmızı (K) ve mavi (M) LED’ler iklim dolabı içine dizayn edilmiştir. Nanopartikül uygulaması için toksik olmayan Fe⁰NP kullanılmıştır. Nanopartikül süspansiyonlarını hazırlamak için ultrasonikatör (Daihan WiseClean® WUC-A02H, Daihan Scientific, S. Korea, 30 dak.) kullanılmıştır (Şekil 3.5).



Şekil 3.4 Mavi/Kırmızı LED (30/30 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ (Mor: 60 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$) PPFD Meter ile Ölçümü

Deneylere üç farklı ışık şiddeti uygulanmıştır (ortalama olarak 105, 105 ve 60 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$). Üç spektral işlem beyaz floresan (iklim dolabının floresan lamba (Polylux XLR™, F18W/827, Hungary; 4 adet, 4500 lux), kırmızı (650 nm)/mavi (450 nm) oranına göre: F 105, 100M/50K ve 30M/30K şeklinde ayarlanmıştır. Işık yoğunlukları, bir ışık ölçer PPFD meter (fotosentetik foton akış yoğunluğu) ile $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ olarak kontrol edilmiştir (Şekil 3.4). Fotoperiyot günde 16 saat aydınlık ve 8 saat karanlık, $24 \pm 1^\circ\text{C}$ sıcaklık, ortam nemi %70 olacak şekilde ayarlanıp, *W. arrhiza*'lı deney grupları ODÜ Hidrobiyoloji Laboratuvarı'ndaki steril iklim kabini (Grotech/GR08, Unitroniks® Vision350™) içine yerleştirilerek çalışma yapılmıştır (Şekil 3.6).



Şekil 3.5 Deney Gruplarının Hazırlanması



Şekil 3.6 Deney Gruplarının Hazırlanması

3.4 Bitki Analizleri

3.4.1 Yaş Ağırlık ve Kuru Madde Miktarı

Bitkinin yaş ağırlığını (g, YA) ölçmek için, hasat edilen numune dH₂O ile durulandıktan ve 10 dakika boyunca süzgeç içinde kurutma kâğıdı üzerinde havayla kurutulduktan sonra hassas terazide (Radwag AS220.R2) alüminyum folyo üzerinde tartılmıştır. Kuru madde miktarı (g, KM) su mercimeğinin 105°C’de sabit ağırlığa kadar, gece boyunca kurutulmasından sonra ölçülmüştür (M₁). Toplam kuru madde miktarı AOAC (2000) metoduna göre hesaplanmıştır.

$$\% \text{ Kuru madde miktarı} = [(M_1 - M_0) / m] * 100 \quad (3.1)$$

Formülde M₀ kabın darası (g), M₁ kabın darası (g) + kuru madde (g), m ise alınan örnek miktarıdır (g, yaş ağırlık).

3.4.2 Nispi Büyüme Oranları (RGR), İkiye Katlama Süreleri (DT) ve Bağlı Verimlerin Hesaplanması

Köksüz su mercimeğinin büyüme hızları ve haftalık verimleri yaş ağırlık üzerinden belirlenmiştir. Ziegler ve ark. (2015) tarafından tarif edildiği gibi 1 g yaş ağırlık ile başlayan yedi günlük kültivasyondan sonra verim olarak tanımlanan üstel yasaya göre hesaplanmıştır. Su mercimeklerinde büyüme hızları, yaprak sayısı (FN), taze ağırlık (FW) ve kuru ağırlık (DW) parametrelerinin her birinden hesaplanabilir. *W. arrhiza* günlük nispi büyüme oranları (RGR), başlangıçta (t₀) ve daha sonraki t zaman noktalarında ölçülen x parametresinin (FN, FW veya DW) değerleri kullanılarak aşağıdaki denkleme göre hesaplanmıştır (Naumann ve ark., 2007).

$$X_t = x_{t0} * e^{RGR * t} \quad (3.2)$$

$$RGR = (\ln x_{t7} - \ln x_{t0}) / t_7 - t_0 \quad (3.3)$$

Burada RGR, 1 günlük birim zaman başına parametre değerindeki artıştır. RGR genellikle bitki ağırlık artışları temelinde hesaplanır (Hoffmann ve Poorter, 2002). Bu durumda RGR, denklem (2)'deki üs RGR*t olduğundan, zamanın karşılıklı boyutuna (1. gün) sahip olacaktır. Hesaplama için yaprak sayısı artışı kullanıldığında (üreme hızı: bakınız Lemon ve ark., 2001), RGR boyutu otomatik olarak 1. gündür.

Bazı araştırmacılar (örneğin, Landolt ve Kandeler, 1987) görelî büyüme oranlarını hesaplamak için ortak logaritmayı ve aşağıdaki denklemi kullanmışlardır:

$$K = (lgxt7 - lgxt0) * 1000 / (t7 - t0) \quad (3.4)$$

İki katına çıkma süresi DT (gün olarak) şu şekilde hesaplanır:

$DT = \ln 2 / RGR$ 7 günlük ekimden sonra bir yaprak veya 1 g su mercimeği materyalinin aşılmasından elde edilen FN, FW veya DW “göreceli verim” (RY) olarak adlandırılır (RY: RGR'ye benzer, ancak 1 haftalık zaman birimi bazında). Denklem (4)'de $\ln xt7$ için çözümlenerek hesaplanmıştır:

$$\ln xt7 = \ln xt0 - RGR * (t7 - t0) \quad (3.5)$$

$t7$ 7 gün olduğundan ve $t0$ 'daki x bir yaprak veya 1 g olduğundan, $x_{t7} e^{\ln xt7}$ ye eşittir.

Rölatif büyüme oranı genellikle bitki ağırlık artışları temelinde hesaplanır (Hoffmann ve Poorter, 2002). Farklı ışık yoğunluklarında 3'erli toplamda 36 deney grubunda yetiştirilen *W. arrhiza*'nın, rölatif büyüme (RG), rölatif büyüme oranı (RGR) ve ikiye katlanma süresi (DT) yaş ağırlıklarına göre hesaplandı.

Deney başlangıcında ($t0$), kâğıt havluda nemi alınan *W. arrhiza* örnekleri hassas terazide tartım işlemi yapıldıktan sonra alüminyum folyoya sarılıp 105 °C'de etüvde 1 gece boyunca kurutuldu. Kurutma işleminden sonra kuru ağırlığı ölçüldü (Ziegler ve ark., 2015).

Günlük büyüme oranı ve ikiye katlanma süresini belirlemek için yaş ağırlık değişkeni kullanıldı. Her tekrar için ayrı ayrı rölatif büyüme oranı aşağıdaki denklemden hesaplandı (Naumann ve ark., 2007):

$$RGR = (\ln xtn - \ln xt0) / (tn - t0) \quad (3.6)$$

Bu formülde, RGR, 1 günlük birim zaman başına parametre değerindeki artıştır; x , su mercimeğinin toplam yaş ağırlığı (g); $t0$, başlangıç zamanı, tn , deney sonundaki zamandır (gün).

İki katına çıkma süresi DT (gün olarak) şu şekilde hesaplandı:

$$DT = \ln 2 / RGR \quad (3.7)$$

W. arrhiza'nın bağıl bitki büyümesi (RG) aşağıdaki eşitlikten hesaplandı (Ensley ve ark., 1994):

$$RG = (Nt - N0) / N0 \quad (3.8)$$

Burada N_t , t gününde bitki yaş ağırlığı ve N_0 , deneyin başlangıcındaki yaş ağırlığıdır.

3.5 İstatistiksel Analiz

Biyodeneş sonucu, ortalama ve standart sapmayı içeren tanımlayıcı istatistikler tek yönlü varyans analizi (one-way ANOVA) kullanılarak analiz edildi. Farklı spektral ışık dağılımlarının *W. arrhiza* ile nütrient giderim verimliliğine karşı analizi için Tukey'in *post-hoc* testi yapıldı. Tüm istatistiksel testlerin anlamlılığı $p < 0.05$ 'e göre belirlendi.

4. BULGULAR ve TARTIŞMA

İnsanların ve diğer canlıların varlıklarını ve gelişmelerini sürdürebilmeleri için çevre dengesi çok önemlidir. Ekolojik dengenin korunması için hava, su ve toprakta kirlilik ve bozulmaların önlenmesi ve çevrenin iyileştirilmesi için çeşitli çalışmalar yapılmaktadır. Atıklar/atık sular alıcı ortam olarak sucul ekosistemlere doğrudan verildiğinde sistemin ekolojik dengesi bozulmaktadır. Özellikle artan nüfus yoğunluğu açığa çıkan atık su miktarını artırmakta, suların kullanım sonucu fiziksel, kimyasal ve bakteriyolojik özellikleri değişmektedir. Bu özelliklerin bir kısmını veya tamamını tekrar kazandırabilmek ve/veya deşarj edildikleri alıcı ortam standartlarını sağlayabilecek konuma getirmek için deşarj suları mutlaka arıtılmalıdır. Deşarj suyu arıtımı fiziksel, kimyasal ve biyolojik işlem ve prosesler sayesinde AAT’lerde yapılmaktadır. AAT sistemleri olmayan yerlerde ise su bitkilerinin kullanıldığı yapay sulak alan sistemlerinde arıtım yapılabilmektedir. AAT’lerde geri kazanılmış atık su, sulama için faydalı olan üç ana nütrient-(N, P ve K) içermektedir (Çizelge 4.1). N ve P arıtılmış atık suda yeterli miktarlarda bulunur ve bitki büyümesini etkiler. Atıksu Arıtma Tesisleri Teknik Usuller Tebliği (AATTUT, 2010) Tablo E7.9’da farklı arıtma sistemleri ile geri kazanılmış atık sudaki nütrient seviyeleri görülmektedir.

Tablo E7.9 Geri kazanılmış atıksuda olabilecek nütrient seviyeleri

Elementler, mg/L	Birim	Ham atıksu	Klasik Aktif çamur	BNR	BNR+filtrasyon+ dezenfeksiyon	MBR	BNR+MF+RO+ dezenfeksiyon
Toplam azot	mg N/L	20-70	15-35	2-12	2-12	7-18	<1
Nitrat azotu	mg N/L	0-az	10-30	1-10	1-10	5-11	<1
Toplam fosfor	mg P/L	4-12	4-10	1-2	<2	0.3-5	<0.05

BNR: Biyolojik nütrient giderimi MBR: Membran biyoreaktör

Şekil 4.1 Geri Kazanılmış Atıksuda Olabilecek Nütrient Seviyeleri

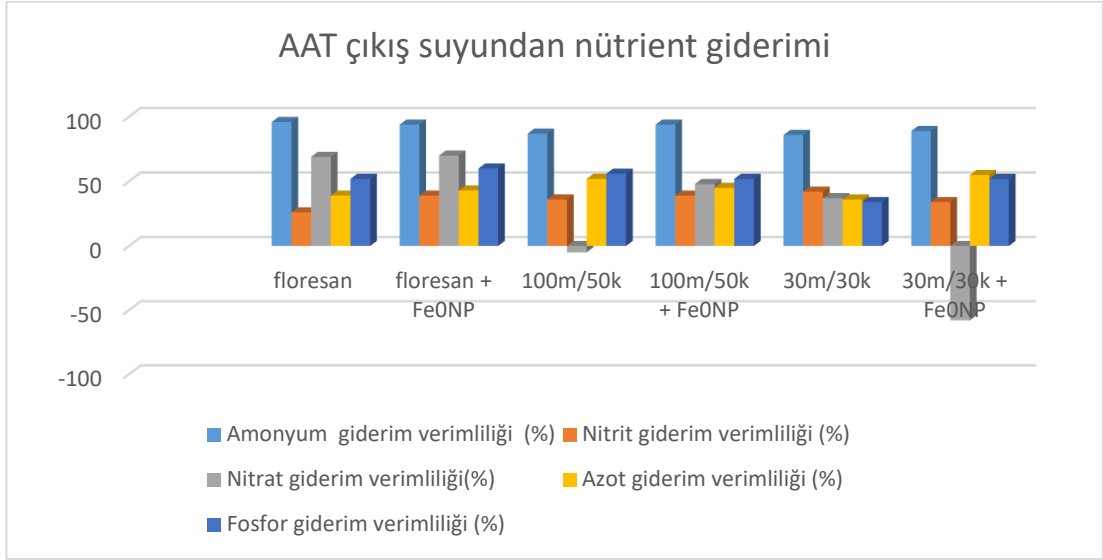
Ordu/Altınordu Durugöl mevkiinde bulunan Ordu Büyükşehir Belediyesi OSKİ Genel Müdürlüğü’ne ait İleri Biyolojik Atıksu Arıtma Tesisinde atık sular (34.000 ton/gün) arıtıldıktan sonra (0.390 m³/s) derin deniz deşarjıyla Karadeniz’e verilmektedir. Tesisin hizmet verdiği nüfus 175.000’dir (OSKİ, 2022). Çalışmamızda bu tesisin çıkış suyundan alınan su numunelerinde ön analizler yapıldıktan sonra (KOİ, AKM, pH, EC, sıcaklık, NH₄⁺-N, NO₂⁻-N, NO₃⁻-N, TN ve TP) laboratuvarında kontrollü koşullarda dizayn ettiğimiz biyodenedeyde, köksüz su mercimeği *W. arrhiza* kullanılarak mevcut çıkış suyundan nütrient giderimi incelenmiştir. Farklı LED ışık kombinasyonlarında ve floresan ışık altında AAT çıkış suyunda ve Fe⁰NP içeren

ortamda yetiştirilen *W. arrhiza*'nın fitoremediasyon potansiyeli (nütrient giderim yüzdesi) 104 saat (4.3 gün: $t_{4.3}$) süren deney sonucunda yapılan su analizleri ile değerlendirilmiştir. Çalışmada, kontrol olarak sentetik N-medyum ortamında ve farklı kombinasyonlu AAT çıkış suyunda yetiştirilen *W. arrhiza*'nın nispi büyüme oranı da değerlendirilmiştir. Deney başlangıcında ve deney sonucunda AAT çıkış suyunda yapılan analiz sonuçları Çizelge 4.2'de verilmiştir. Analiz edilen parametreler Atık Su Arıtma Tesisleri Teknik Usuller Tebliği'nin (2010) Tablo 7.1'de yer alan (Çizelge 4.3) atık suların sulama suyu olarak kullanılabilirliği değerleri ile de karşılaştırılmıştır.

Çizelge 4.1 Biyodenyey Başlangıcında ve Sonucunda AAT Çıkış Suyu Analizleri

	Parametre	Flo.	Flo.- Fe ⁰ NP	100M/50K- Fe ⁰ NP	100M/50 K	30M/3 0K	30M/30 K- Fe ⁰ NP
AAT Çıkış Suyu (t_0)	pH	7.25	7.25	7.25	7.25	7.25	7.25
	Sıcaklık (°C)	14	14	14	14	14	14
	EC (µS/cm)	1082	1082	1082	1082	1082	1082
	AKM (mg/L)	7	7	7	7	7	7
	KOİ (mg/L)	54	54	54	54	54	54
	NH ₄ ⁺ -N (mg/L)	0.935	0.935	0.935	0.935	0.935	0.935
	NO ₂ ⁻ -N (mg/L)	0.139	0.139	0.139	0.139	0.139	0.139
	NO ₃ ⁻ -N (mg/L)	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95
	TN (mg/L)	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3
	TP (mg/L)	0.27	0.27	0.27	0.27	0.27	0.27
AAT Çıkış Suyu ($t_{4.3}$)	pH	8.25	8.42	8.33	8.75	8.65	8.28
	Sıcaklık (°C)	17.5	17.3	17.6	17.4	17.5	17.2
	EC (µS/cm)	485	505	442	524	495	450
	AKM (mg/L)	22	16	9	12	14	15
	KOİ (mg/L)	63.5	49	88.75	75	71.75	76.25
	NH ₄ ⁺ -N (mg/L)	0.036	0.058	0.063	0.124	0.137	0.103
	NO ₂ ⁻ -N (mg/L)	0.104	0.086	0.085	0.089	0.081	0.092
	NO ₃ ⁻ -N (mg/L)	0.3	0.29	1	0.6	0.5	1.5
	TN (mg/L)	2	1.9	1.8	1.6	2.1	1.5
	TP (mg/L)	0.13	0.11	0.13	0.12	0.18	0.14

AAT çıkış suyunda köksüz su mercimeği kullanılarak yapılan biyodenyeyde, farklı grupların nütrient giderim yüzdeleri Şekil 4.1'de verilmiştir. En yüksek nütrient giderimi amonyum azotunda kaydedilmiştir. Bu nütrientin uzaklaştırılması hemen her deney grubunda benzer olmasına rağmen nitrat azotu giderimi farklılık göstermiştir.



Şekil 4.2 *W. arrhiza*'nın Farklı Deneş Gruplarında AAT Çıkış Suyundan Nütrient Giderim Oranları

Yönetilmeyen atık su, bir kirlilik kaynağı, insan popülasyonlarının ve çevrenin sağlığı için bir tehlike olabilir (Zhang ve ark., 2015). Kentsel atık suların tatlı su kütlelerine atılması, suya sürekli olarak nütrient eklemekte ve sudaki azot ve fosfor konsantrasyonunu artırmaktadır (Patel ve Kanungo, 2010). Sucul ekosistemlere nütrient içeriği zengin suların deşarjı sonucunda ise biyolojik bir kirlenme olan ötrofikasyon olayı yaşanmaktadır (Taş, 2011). Durgun sığ tatlı su sistemlerinde nütrient konsantrasyonunun artması, küresel iklim değişikliğinin de etkisiyle tekrarlayan ötrofikasyona neden olmaktadır. Sucul ekosistemlerin su kalitesinin bozulmaması için atık sular mutlaka arıtıldıktan sonra alıcı ortamlara deşarj edilmelidir.

Atık su arıtımı için üçüncül süreç olarak kabul edilen yapay sulak alanlar, atık su arıtımı için umut verici olarak kabul edilmektedir (Zhang ve ark., 2015). Yapay sulak alanlar geleneksel atık su arıtma sistemlerine göre, çevre dostu ve düşük maliyetlidir (Zhu ve Chen, 2014). Genellikle günümüzde fitoremediasyon çalışmalarında ve yapay sulak alan sistemlerinde Lemnaceae'den en fazla kullanılan tür *Lemna minor* türüdür (Yılmaz ve Taş, 2021). *L. minor* gibi hızlı üreme potansiyeli olan *W. arrhiza* ile yapılan araştırmaların sayısı ise çok yetersizdir.

2872 sayılı Çevre Kanunu'nun 11. maddesine (Değişik:26/4/2006-5491/8 madde) göre tesisler ve işletmeler atıklarını alıcı ortama vermeden önce

yönetmeliklerdeki standartlara uygun olarak gerekli izni alıp ve gerekli şekilde arıtma işleminden yükümlüdürler. SKKY (2004)'nin 26. maddesine göre de gerçek ve tüzel kişilerin atık sularını alıcı ortama vermeleri için yönetmelikte yer alan deşarj standartlarını sağlamaları gerekmektedir. WHO standartları temel alınarak 7 Ocak 1991 tarihinde arıtılmış atık suların yeniden kullanımına dair mevzuat birçok ülkeden önce ilk kez Türkiye'de 20748 sayılı Resmî Gazete'de yayımlanan "Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliği Teknik Usuller Tebliği'nde yer almıştır (Mesut ve İlayda, 2018). Atıksu Arıtma Tesisleri Teknik Usuller Tebliği (AATTUT, 2010) Tablo E7.1'de arıtılmış atık suların sulama suyu olarak geri kullanılabilmesi için kriterler belirtilmiştir. Tebliğin 22. maddesinin 1. bendine göre, Tablo E7.1'de yer alan Sınıf A veya Sınıf B'deki evsel nitelikli atık sular analiz sonucuna göre Tablo E7.13'teki bitki türlerinde (Şekil 4.4) sulama suyu olarak kullanılabilir. Tablo E7.2'de belirtilen parametre konsantrasyonlarının sulama suyu olarak kullanılabilmesi için, arıtma işleminden sonra bu tebliğdeki kriterleri sağlaması gerekir. Mevcut biyodeny sonucunda bazı parametrelerin analiz sonuçları tarımsal sulamaya uygunluk açısından bu tebliğ kapsamında değerlendirilmiştir.

Kudal ve Müftüoğlu, (2014) daha önce kentsel atık çıkış suyu ile sulanan toprakları 10 farklı bölgeden örnekler alarak analiz etmişlerdir. Analizler sonucu, organik karbon, organik madde, fosfor, suda eriyebilir tuz ve karbonat değerlerinde artış, azot değerlerinde düşme belirlenmiştir. Bu durumun yarardan çok zarar verebileceği, atık suyun sulama suyu olarak kullanılabilmesi için sulama suyu özelliklerine sahip olması gerektiği önerisinde bulunmuşlardır.

Tablo E7.1 Sulamada geri kullanılacak arıtılmış atıksuların sınıflandırılması

Geri kazanım türü	Arıtma tipi	Geri kazanılmış suyun kalitesi ^a	İzleme periyodu	Uygulama mesafesi ^b
Sınıf A				
<i>a-Tarımsal sulama: Ticari olarak işlenmeyen gıda ürünleriⁱ</i>				
<i>b-Kentsel alanların sulanması</i>				
a)Yüzeysel ve yağmurlama sulama ile sulanan ve ham olarak direkt olarak yenilebilen her tür gıda ürünü	-İkincil arıtma ^c -Filtrasyon ^d -Dezenfeksiyon ^e	-pH=6-9 -BOİ5 < 20 mg/L -Bulanıklık < 2 NTU ^f -Fekal koliform: 0/100 mL ^{g,h} -Bazı durumlarda, spesifik virüs, protozoa ve helmint analizi istenebilir. -Bakiye klor > 1 mg/L ⁱ	-pH: Haftalık -BOİ: Haftalık -Bulanıklık: Sürekli -Koliform: günlük -Bakiye klor: sürekli	İçme suyu temin edilen kuyulara en az 50 m mesafede
b)Her türlü yeşil alan sulaması (Parklar, golf sahaları vb.)				
Açıklamalar:				
-Tarımsal sulamada tavsiye edilen ağır metal analizlerine dikkat edilmelidir.				
-Standartları sağlamak üzere filtrasyon öncesinde koagülantı ilavesi yapılabilir.				
-Geri kullanılacak arıtılmış atıksu renksiz ve kokusuz olmalıdır.				
-Virüs ve diğer parazitlerin yok edilmesi için daha uzun dezenfeksiyon temas süreleri kullanılabilir.				
-Arıtılmış atıksu dağıtım sisteminde (en son uygulama noktasında) bakiye klor değeri 0,5 mg/L'nin üzerinde olmalıdır.				
-Virüs ve diğer parazitlerin yok edilmesi için daha uzun dezenfeksiyon temas süreleri kullanılabilir.				
-Yüksek nütrient içeriği besinleri büyüme aşamasında etkileyebilir.				
Sınıf B				
<i>a-Tarımsal sulama: Ticari olarak işlenen gıda ürünleri^m</i>				
<i>b-Girişi kısıtlı sulama alanları</i>				
<i>c- Tarımsal sulama: Gıda ürünü olmayan bitkiler</i>				
a)Meyve bahçeleri ve üzüm bağları gibi ürünlerin salma sulama ile sulanması	-İkincil arıtma ^c -Dezenfeksiyon ^e	-pH=6-9 -BOİ5 < 30 mg/L -AKM < 30 mg/L -Fekal koliform < 200 ad/100 mL ^{g,h,k} -Bazı durumlarda, spesifik virüs, protozoa ve helmint analizi istenebilir. -Bakiye klor > 1 mg/L ⁱ	-pH: Haftalık -BOİ: Haftalık -AKM: günlük -Koliform: günlük -Bakiye klor: sürekli	İçme suyu temin edilen kuyulara en az 90 m mesafede. -Yağmurlama sulama yapıyor ise halkın bulunduğu ortama en az 30 m mesafede
b)Çim üretimi ve kültür tarımı gibi halkın girişinin kısıtlı olduğu yerler				
c)Otlak hayvanları için mera sulaması				
Açıklamalar:				
-Tarımsal sulama için tavsiye edilen limitlerde gözönünde bulundurulmalıdır.				
-Püskürtmeli sulama yapılıyor ise AKM < 30 mg/L olmalıdır.				
-Yüksek nütrient içeriği besinleri büyüme aşamasında etkileyebilir.				
-Süt hayvanlarının meralara girişi sulama yapıldıktan 15 gün sonra olmalıdır. Bu süre kısa olması gerektiği durumlarda, fekal koliform değeri en fazla 14 ad/100 mL olabilir.				
^a Aksi belirtilmedikçe, arıtılmış atıksu kalitesini belirtmektedir.				
^b Su kaynaklarını ve dolayısıyla insanları arıtılmış atıksuyun etkisinden korumak için konuluş bir sınırlamadır.				
^c İkincil arıtma, aktif çamur sistemleri, biyodisk, damlatmalı filtreler, stabilizasyon havuzları, havalandırılmı lagünleri vb içerebilir.				
^d Kum filtreleri veya mikrofiltrasyon ile ultrafiltrasyon gibi membran filtreler olabilir.				
^e Dezenfektant olarak klor kullanılması, diğer dezenfeksiyon yöntemlerinin de kullanımını kısıtlamaz.				
^f Tavsiye edilen bulanıklık değeri dezenfeksiyon öncesinde sağlanmalıdır. Hiç bir zaman 5 NTU'yu geçmemelidir. Bulanıklık yerine AKM'nin kullanıldığı durumlarda, AKM değeri 5 mg/L'nin altında olmalıdır.				
^g 7 günlük ortalama değerleri karakterize eder.				
^h Fekal koliform değeri hiç bir zaman 14 ad/100 mL'yi geçmemelidir.				
ⁱ Bakiye klor değeri 30 dk temas süresi sonrasındaki değeri karakterize etmektedir.				
^j Fekal koliform değeri hiç bir zaman 800 ad/100 mL'yi geçmemelidir.				
^k Stabilizasyon havuzları fekal koliform değerini dezenfeksiyon olmadan da sağlayabilir.				
^l Teri arıtma uygulanmalıdır.				
^m Ticari olarak işlenen gıda ürünleri halka satılmadan önce patojen mikroorganizmaların öldürülmesi için fiziksel veya kimyasal bir işlemden geçirilen ürünlerdir.				

Şekil 4. 3 Sulamada Geri Kullanılacak Arıtılmış Atık Suların Sınıflandırılması (AATTUT, 2010)

Tablo E7.2 Sulama suyunun kimyasal kalitesinin değerlendirilmesi için geliştirilmiş tablo

Parametreler	Birimler	Kullanımında zarar derecesi		
		Yok (I. sınıf su)	Az – orta (II. sınıf su)	Tehlikeli (III. sınıf su)
Tuzluluk				
İletkenlik	µS/cm	< 700	700-3000	>3000
Toplam çözülmüş Madde	mg/L	< 500	500-2000	>2000
Geçirgenlik				
SAR _{Tad}	0-3	EC ≥ 0.7	0.7-0.2	< 0.2
	3-6	≥ 1.2	1.2-0.3	< 0.3
	6-12	≥ 1.9	1.9-0.5	< 0.5
	12-20	≥ 2.9	2.9-1.3	< 1.3
	20-40	≥ 5.0	5.0-2.9	< 2.9
Özgül iyon toksisitesi				
Sodyum (Na)				
Yüzey sulaması	mg/L	< 3	3-9	> 9
Damlatmalı sulama	mg/L	< 70	> 70	
Klorür (Cl)				
Yüzey sulaması	mg/L	< 140	140 –350	> 350
Damlatmalı sulama	mg/L	< 100	> 100	
Bor (B)	mg/L	< 0.7	0.7-3.0	> 3.0

Şekil 4.4 Sulama Suyunun Kimyasal Kalitesinin Değerlendirilmesi İçin Geliştirilmiş Tablo (AATTUT, 2010)**Tablo E7.13 Arıtılmış atıksu ile sulanabilecek bitkiler**

Tip	Örnek	Arıtma ihtiyacı
Tarla bitkileri	Arpa, mısır, yulaf	İkinci kademe + dezenfeksiyon
Lifli ve çekirdekli bitkiler	Pamuk	İkinci kademe + dezenfeksiyon
Ham olarak tüketilen sebzeler	Avokado, lahanası, salatalık, çilek	İkinci kademe + filtrasyon + dezenfeksiyon
Belli bir işlemden sonra tüketilen sebzeler	Enginar, şeker pancarı, şeker kamışı	İkinci kademe + dezenfeksiyon
Meyve bahçesi ve üzüm bağları	Kayısı, portakal, şeftali	İkinci kademe + dezenfeksiyon
Fidanlık	Çiçek	İkinci kademe + dezenfeksiyon
Ormanlık alanlar	Kavak vb.	İkinci kademe + dezenfeksiyon

Şekil 4.5 Arıtılmış Atıksu ile Sulanabilecek Bitkiler (AATTUT, 2010)

Biswas ve ark., (2017) yaptıkları çalışmada, Mymensingh Belediyesi'nin (Bangladeş) yeraltı suyu ve atık suyu, atık su uygulamasının toprak özellikleri üzerindeki etkilerini incelemek için arka arkaya üç yıl boyunca bir buğday tarlasını sulamak için kullanmışlardır. Çalışmada atık su ile sulanan toprağın özellikleri, tatlı

su ile sulanan toprak ile karşılaştırılmıştır. Atık su uygulaması, yüzey toprağının kütle yoğunluğunu %1.92 oranında azaltmış ve gözenekliliği %5.89 artırmıştır. Toprağın doymamış hidrolik iletkenliği ve su tutma kapasitesi, atık su ile sulama altında iyileştirilmiştir. Toprak pH'ı, atık su uygulaması nedeniyle artmış, ancak gübre uygulaması nedeniyle daha küçük bir oranda düşmüştür. Toprağın elektrik iletkenliği (EC) hem atık su hem de gübre uygulaması ile artmış, her iki parametre de 0–20 cm toprak tabakasında önemli ölçüde değişmiştir. Toprakların organik karbon (C) ve TN seviyeleri, tatlı su ile sulanan topraklara göre atık su ile sulamada daha yüksektir. Organik C, üst 20 cm'lik toprak tabakasında atık su sulama altında %23.93 artmış, toprağın N içeriği, organik C içeriği ile benzerlikler göstermiştir. Mevcut P ve S konsantrasyonları, tatlı su ile sulanan toprakla karşılaştırıldığında, atık su ile sulanan toprakta daha yüksek çıkmıştır. Değiştirilebilir katyonlar (Na, K, Ca ve Mg) ayrıca atık su uygulamasıyla önemli ölçüde artmıştır. Bu nedenle çiftçilere, tatlı su üzerindeki baskıyı hafifletmek ve toprak verimliliğini artırmak için evsel atık su ile sulama yapmaları tavsiye edilmiştir.

AAT çıkış suyundan ötrofikasyona yol açan nütrientlerin uzaklaştırılması ve çıkış suyunun sulama suyu olarak değerlendirilebilmesi için tasarlanmış olduğumuz biyodenedeyde elde ettiğimiz sonuçlar aşağıda başlıklar şeklinde açıklanmıştır.

4.1 pH

Kentsel AAT çıkış suyundan alınan numuneler ile kurulan deneyler sonucunda pH miktarı değişimi Çizelge 4.2'de verilmiştir. pH değişimi 8.25–8.75 aralığında tespit edilmiştir.

Çizelge 4.2 *W. arrhiza*'nın Kullanıldığı Farklı Deney Gruplarında pH Değişimi

Işık spektral dağılımı	pH	
	t0	t4.3
Floresan	7.25	8.25
Floresan + Fe⁰NP	7.25	8.42
100M50K	7.25	8.75
100M/50K + Fe⁰NP	7.25	8.33
30M/30K	7.25	8.65
30M/30K + Fe⁰NP	7.25	8.28

Yapay sulak alanlarda arıtılan kentsel çıkış sularının pH'sının toprak kimyasal yapısına uygun olması gerekir. Çünkü belirli bir süre istenmeyen pH'lı su

toprağın kimyasal yapısını değiştirebilir. Toprak pH'sı 4.8'den düşük olan sularla belirli bir süre sulandığında, Fe, Mn gibi bazı elementlerin çözünmesine neden olur. Sonuç olarak bitkilerin zehirlenmesine neden olabilir. Aynı zamanda, nötr sular veya tuz içeriği yüksek olan asitli sular toprağın pH'sını düşürerek aynı duruma neden olabilir. Sulama sularının pH'sının yüksek olması boru hatlarından sıcaklıkla beraber akış hızının düşmesine ve tıkanmasına neden olduğu belirlenmiştir (Bingül ve Altıkat, 2017). Biswas ve ark., (2017'nin çalışmasında, toprak pH'ının atık su uygulaması nedeniyle arttığı bildirilmiştir.

W. arrhiza ile bildircin atık suyundan nütrient gideriminin incelendiği bir çalışmada, 30 gün süren çalışmanın sonucunda suyun bazikleştiği bildirilmiştir (Suppadit, 2011). Çalışmamızda *W. arrhiza* ile 104 saat ($t_{4.3}$) süren biyodeny gruplarında, Çizelge 4.2'de görüldüğü gibi, pH değerleri >8 'dir. Mevcut çalışma sonucu literatürlerde belirtildiği gibi, *W. arrhiza* AAT çıkış suyunu bazikleştirmiştir.

W. arrhiza kullanılarak kentsel AAT çıkış suyunda nütrient giderimi çalışmasında pH için değerlendirildiğinde farklı ışık/ışık yoğunlukları ile Fe^0NP içeren ortamlar için ANOVA ve Tukey'in *post hoc* testiyle yapılan istatistiksel analiz sonucunda pH giderimine yönelik tüm deney grupları arasında $p < 0.05$ anlamlılık seviyesinde önemli fark olduğu belirlenmiştir

Şekil 4.3'te hem Sınıf A hem de Sınıf B için, arıtılmış atık suların pH'sının 6–9 aralığında olması gerektiği belirtilmiştir (AATTUT, 2010). Biyodeny gruplarından elde edilen pH değerleri mevzuatta belirtilen aralıkta olduğundan sulama suyu olarak kullanıma uygundur.

4.2 Elektriksel İletkenlik (EC)

Kentsel AAT çıkış suyundan alınan sularla kurulan deneyler sonucunda EC ($\mu S/cm$) miktarı değişimi Çizelge 4.3'te verilmiştir. *W. arrhiza*'nın EC değişimi %60–%952 aralığında tespit edilmiştir. En yüksek EC değişimi %60 verimlilikle 100M/50K+ Fe^0NP içeren grupta ölçülmüştür.

Çizelge 4.3 *W. arrhiza*'nın Kullanıldığı Farklı Deney Gruplarında EC Değişimi

Işık spektral dağılımı	EC ($\mu\text{S}/\text{cm}$)		Verimlilik (%)
	t0	t4.3	
Floresan	1082	485	56
Floresan + Fe⁰NP	1082	505	54
100M/50K	1082	524	52
100M/50K + Fe⁰NP	1082	442	60
30M/30K	1082	495	55
30M/30K + Fe⁰NP	1082	450	59

EC suda toplam çözünmüş maddenin yani tuzluluğun bir göstergesidir. Aşırı tuzluluk bitki gelişimi, verimliliği ve bitki büyümesi için belirleyici bir unsurdur. EC, toprak hidrolik iletkenliği ve geçirgenliğini azaltır (Becerra ve ark., 2015). Topal ve Erdal (2013) yaptığı bir çalışmada, sızıntı suyu arıtımı için *Spirodela polyrrhiza*, *Lemna minor*, *L. gibba* ve *Wolffia arrhiza*'dan oluşan su mercimeklerini kullanarak bitkili kesikli bir sistemde KOİ, pH ve EC değişimlerini incelemiştir. Çalışma sonucunda EC değerinin arttığını bildirmiştir. Mevcut çalışmamızda *W. arrhiza* ile 104 saat (t_{4.3}) süren biyodeneysel sonucunda, Çizelge 4.3'te görüldüğü gibi, AAT çıkış suyunda, EC değişimi en yüksek 100M/50K +Fe⁰NP ve 30M/30K +Fe⁰NP gruplarında, sırasıyla %60 ve %59 olarak gerçekleşmiştir. Mevcut çalışmaya göre, mor renkli LED ışıkta ve Fe⁰NP ortamlarda gelişen *W. arrhiza*, AAT çıkış suyundaki EC konsantrasyonunun daha fazla azaltmıştır. Yetiştirme kaplarının küçük olmasından dolayı kısmen suyun buharlaşması ve *W. arrhiza*'nın suyun bir kısmını kendi metabolizması için kullanmasına rağmen, suyun iletkenliği %50'den daha fazla azalmıştır. Biyodeneysel kullanılan *W. arrhiza*'nın, yapay sulak alanlarda iletkenliği azalmak için kullanılabilir bir potansiyele sahip olduğu görülmektedir.

W. arrhiza kullanılarak kentsel AAT çıkış suyunda nütrient giderimi çalışmasında, EC için değerlendirildiğinde farklı ışık/ışık yoğunlukları ile Fe⁰NP içeren ortamlar için ANOVA ve Tukey'in *post hoc* testiyle yapılan istatistiksel analiz sonucunda EC giderimine yönelik tüm deney grupları arasında p<0.05 anlamlılık seviyesinde önemli fark olduğu belirlenmiştir

AATTUT (2010)'de Tablo E7.2'ye göre (Şekil 4.4), arıtılmış atık suların sulama suyu olarak kullanılabilmesi için EC değeri <700 $\mu\text{S}/\text{cm}$ olan su I. Sınıf, 700-3000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ aralığında olan su II. Sınıf, >3000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ EC değeri olan su III. Sınıftır

(zarar derecesi en yüksek olan su). Biyodenyey sonucunda, EC parametresi bakımından bütün deney grupları I. Sınıf su kategorisinde olup, sulama suyu olarak kullanılabilir.

4.3 Askıda Katı Madde (AKM)

Kentsel AAT çıkış suyundan alınan numuneler ile kurulan deneyler sonucunda AKM miktarının (mg/L) değişimi Çizelge 4.4'te verilmiştir. *W. arrhiza*'nın AKM giderimi olmamakla beraber sulama suyu olarak bütün değerler uygundur.

Çizelge 4.4 *W. arrhiza*'nın Kullanıldığı Farklı Deney Gruplarında AKM Miktarı

AKM (mg/L)		
Işık spektral dağılımı	t0	t4.3
Floresan	7	22
Floresan + Fe⁰NP	7	16
100M/50K	7	12
100M/50K + Fe⁰NP	7	9
30M/30K	7	14
30M/30K + Fe⁰NP	7	15

AKM, sulardaki çökemeyen ve çökebilen katı maddelerin toplamını ifade eder. AKM miktarı arıtma tesisi çıkış suyu kalitesini ve alıcı ortamı olumsuz etkiler. Alıcı ortamda çökme ve dip çamuruna neden olmaktadır. Çalışmamızda *W. arrhiza* ile 104 saat süren biyodenyey sonucunda, AAT çıkış suyunda AKM miktarı bütün ortamlarda artmıştır. AKM, sulama sistemini tıkadığı için de önemlidir (AATTUT, 2010). Deney başlangıcında 7 mg/L olan AAT çıkış suyunun AKM'si deney sonucunda yükselmiş olmasına rağmen, Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliği Tablo 21 (SKKY, 2004) ve AATTUT Tablo E.7.1'deki değerlerle (AATTUT, 2010) karşılaştırıldığında, biyodenyey suyu sulama suyu olarak kullanılabilir.

W. arrhiza kullanılarak kentsel AAT çıkış suyunda nütrient giderimi çalışmasında AKM için değerlendirildiğinde farklı ışık/ışık yoğunlukları ile Fe⁰NP içeren ortamlar için ANOVA ve Tukey'in *post hoc* testiyle yapılan istatistiksel analiz sonucunda AKM giderimine yönelik Floresan + Fe⁰NP ile 30M/30K ve 30M/30K + Fe⁰NP ile 100M/50K + Fe⁰NP ve 30M/30K deney grupları hariç diğer gruplar arasında p<0.05 anlamlılık seviyesinde önemli fark olduğu belirlenmiştir.

4.4 Kimyasal Oksijen İhtiyacı (KOİ)

Kentsel AAT çıkış suyundan alınan numuneler ile kurulan deneyler sonucunda KOİ miktarı değişimi Çizelge 4.9'da verilmiştir. *W. arrhiza*'nın KOİ giderimi %-65

ila %10 aralığında tespit edilmiştir. En yüksek KOİ giderimi %10 verimlilikle floresan+Fe⁰NP ışıklı ortamda ölçülmüştür.

Çizelge 4.5 *W. arrhiza*'nın Kullanıldığı Farklı eney Gruplarında KOİ Giderim

Işık spektral dağılımı	KOİ (mg/L)		
	t0	t4.3	Verimlilik (%)
Floresan	54	63.5	-18
Floresan + Fe⁰NP	54	49	10
100M50K	54	75	-39
100M/50K + Fe⁰NP	54	88.75	-65
30M/30K	54	71.75	-33
30M/30K + Fe⁰NP	54	76.25	-42

KOİ, atık sularda ve suda kirliliğin derecesini en iyi gösteren değerlerden biridir. KOİ, Atık sudaki organik maddelerin kimyasal stabilizasyonları için gerekli oksijen miktarını ifade eder. Aynı zamanda asidik ortamlarda kuvvetli oksitleyiciler ile tepkimeye giren organik maddelerin oksijen eşdeğerinin ölçülmesi esasına dayanmaktadır (Turan ve Ülkü, 2013). Çalışmamızda *W. arrhiza* ile 104 saat süren biyodenyey sonucunda, AAT çıkış suyunda KOİ giderimi en fazla %10'la floresan+Fe⁰NP ışıklı ortamda ölçülürken (54 mg/L'den 49 mg/L'ye), 100M/50K+Fe⁰NP ışıklı ortamda KOİ miktarı yükselmiştir (54 mg/L'den 88.75 mg/L'ye) göstermiştir. SKKY (2004)'ye göre KOİ parametresi için alıcı ortam standardı 180 mg/L olup, bütün deney sonucundaki sular, sulama suyu olarak kullanıma uygundur.

W. arrhiza kullanılarak kentsel AAT çıkış suyunda nütrient giderimi çalışmasında AKM için değerlendirildiğinde farklı ışık/ışık yoğunlukları ile Fe⁰NP içeren ortamlar için ANOVA ve Tukey'in *post hoc* testiyle yapılan istatistiksel analiz sonucunda AKM giderimine yönelik 30M/30K + Fe⁰NP ile 100M/50K + Fe⁰NP deney grupları hariç diğer tüm gruplar arasında p<0.05 anlamlılık seviyesinde önemli fark olduğu belirlenmiştir.

4.5 Toplam Fosfor (TP)

Kurulan biyodenyeyler sonucunda kentsel AAT çıkış suyunda analizi yapılan TP parametresine ait değişim Çizelge 4.6'da verilmiştir. *W. arrhiza*'nın çıkış suyunda TP giderimi %34 ila %60 aralığında tespit edilmiştir. En yüksek TP giderimi %60 verimlilikle Floresan+ Fe⁰NP ışıklı ortamda ölçülmüştür.

Çizelge 4.6 *W. arrhiza*'nın Kullanıldığı Farklı Deney Gruplarında TP Giderim Verimliliği

Işık spektral dağılımı	TP (mg/L)		Verimlilik (%)
	t0	t4.3	
Floresan	0.27	0.13	52
Floresan + Fe⁰NP	0.27	0.11	60
100M/50K	0.27	0.12	56
100M/50K + Fe⁰NP	0.27	0.13	52
30M/30K	0.27	0.18	34
30M/30K + Fe⁰NP	0.27	0.14	52

Atık sularda fosforun fazlalığı alglerin aşırı derecede çoğalmasına neden olur. Fosfor bileşikleri organizmalar için temel nütrientlerdir. Hayvan, insan atıkları ve gıda endüstrisi gibi biyolojik madde işleyen endüstrilerin atık suları, fosfor bileşikleri için ana kaynaktır (Coşkun ve Coşkun, 2018). Esmeray ve Armutcu (2020), atık sudan nütrient giderimi konusunda yaptıkları bir araştırmada, *Aloe vera* ve *Phragmites australis* bitkisi ekili bölümden 8. gün sonunda aldıkları numunelerden elde ettikleri fosfor giderim verimliliğini sırası ile %61 ve %44 olarak belirlemişlerdir. Martínez ve ark. (2006) su mercimeği *L. gibba* ile 220 günlük arıtmanın ardından su kalitesinin fosfor yönünden en iyi %50, *Scirpus americanus* ile en iyi %38.44 iyileştirme sağladığını bildirmişlerdir. Shah, ve ark. (2015), kentsel atık suyunda su sümbülü, su mercimeği ve su marulu ile kurdukları 30 günlük deney süresi içinde fosfor giderimi çalışmasında, su sümbülünün maksimum P gideriminin ortalama olarak %18.76, su mercimeğinin %15.25 ve su marulunun %10.69 olduğunu bildirmişlerdir. Topal ve ark. (2013) ise *L. gibba* ile maksimum fosfor giderim veriminin %32 olduğunu, karışık su mercimeklerinde (*S. polyrrhiza*, *L. minor*, *L. gibba* ve *W. arrhiza*) ise serbest yüzey akışlı yapay sistemde, 9 gün arıtma işlemi sonucunda bu oranın %44.6 olduğunu tespit etmişlerdir. Çalışmamızda *W. arrhiza* ile 104 süren biyodenyey sonucunda Çizelge 4.10'da görüldüğü gibi, AAT çıkış suyunda P giderim verimliliği %60 olarak en yüksek floresan+Fe⁰NP ışıklı ortamda kaydedilmiştir. Fe⁰NP ilave edilen ortamlarda da TP giderimi yüksektir (%60 ila %52). Biyodenyey gün sayısının, bazı literatürlerdeki gün sayılarının yaklaşık yarısı veya daha azı kadar olmasına rağmen, *W. arrhiza* ile fosfor gideriminin geometrik artışa bağlı olarak 2 kattan daha fazla olduğu söyleyebiliriz. Literatür bilgileri doğrultusunda, köksüz su mercimeği *W. arrhiza*'nın diğer su mercimeği türlerinden (*L. gibba*, *S. polyrrhiza*) daha iyi fosfor remediasyonu potansiyeline sahip olduğu görülmektedir.

W. arrhiza kullanılarak kentsel AAT çıkış suyunda nütrient giderimi çalışmasında TP için değerlendirildiğinde farklı ışık/ışık yoğunlukları ile Fe⁰NP içeren ortamlar için ANOVA ve Tukey'in *post hoc* testiyle yapılan istatistiksel analiz sonucunda TP giderimine yönelik Floresan ile 30M/30K; floresan + Fe⁰NP ile 30M/30K ve 30M/30K + Fe⁰NP; 100M/50K ile 30M/30K; 30M/30K ile tüm diğer tüm deney grupları arasında $p < 0.05$ anlamlılık seviyesinde önemli fark olduğu belirlenmiştir.

Kentsel arıtılmış çıkış suyu ile tarım arazilerini sulama sonucunda gübre ihtiyacının azaldığı vurgulanmıştır. Ancak atık suların içeriğinde fosfor ve azotun ihtiyaçtan fazla olması durumu, bazı istenmeyen bitkilerin sayıca artması, bazı bitkilerin gereğinden fazla büyümesi ve yer altı/yer üstü sularının kirlenmesi gibi olumsuz sonuçlara yol açmaktadır. Bitkilerin su ve nütrient ihtiyaçları türlerine göre değişmektedir. Bu nedenle arıtılmış atık su ile sulama yapılacak sahada bitki türleri suyun özelliklerine göre seçilmeli veya direk arıtılmış atık suyun kullanılması yerine temiz su ile seyreltilerek kullanılması önerisinde bulunmuşlardır (Mesut ve İlayda, 2018). Yapay sulak alan sistemlerinde su bitkileri kullanılarak da nütrient giderimi yapılabilir ve elde edilen biyomas farklı alanlarda değerlendirilirken, sağlıklı sulama suyu elde edilebilir. Su mercimekleri, özellikle köksüz su mercimeği kullanılarak, bu konuda daha kapsamlı çalışmalar yapılmalıdır. Mevcut çalışma sonucuna göre, yapay sulak alan sistemlerinde istenmeyen fazla fosforu gidermek amacıyla *W. arrhiza* kullanılabilir.

4.6 Amonyum Azotu (NH₄⁺-N)

Çizelge 4.7'de kentsel AAT çıkış suyundan alınan su numuneleri ile kurulan deneyler sonucunda NH₄⁺-N miktarı değişimi görülmektedir. *W. arrhiza*'nın NH₄⁺-N giderimi %86 ila %96 aralığında tespit edilmiştir. En yüksek NH₄ giderimi %96 verimlilikle floresan ışıklı ortamda ölçülmüştür.

Çizelge 4.7 *W. arrhiza*'nın Kullanıldığı Farklı Deney Gruplarında Amonyum Giderim Verimliliği

Işık spektral dağılımı	NH ₄ ⁺ -N (mg/L)		
	t0	t4.3	Verimlilik (%)
Floresan	0.935	0.036	96
Floresan + Fe⁰NP	0.935	0.058	94
100M/50K	0.935	0.124	87
100M/50K + Fe⁰NP	0.935	0.063	94
30M/30K	0.935	0.137	86
30M/30K + Fe⁰NP	0.935	0.103	89

Su mercimeği, atık sudan NH₄ ve NO₃ iyonlarını kolayca emebilir. Kanalizasyondaki koloidal veya partikül formdaki organik azotun önce bakteriler tarafından NH₄ iyonuna ayrıştırılması gerekir. Su mercimeği kaplı kanalizasyon lagünlerinde amonyak gideriminin, nitrifikasyon-denitrifikasyon, su mercimeği (pH>8), alg ve mikrobiyal asimilasyon yoluyla giderilebildiği, bununla birlikte, anaerobik koşullar altında veya nitrifikasyon inhibitörünün varlığında, nitrifikasyon-denitrifikasyon gerçekleşme olasılığının olmadığı belirtilmiştir. Toplam çökelmemiş numune sindirilir ve analiz edilirse, mikrobiyal asimilasyon gerçek bir uzaklaştırma olarak gösterilmeyecektir. Bu tür koşullar altında, yalnızca su mercimekleri amonyağı uzaklaştırma mekanizmalarıdır. Bununla birlikte, su mercimeğinin hasat edilmesi, bağlı bakterileri ve besin içeren parçacıklı maddeleri de istemeden ortadan kaldırabilir (Al-Nozaily ve ark., 2000). Serbest yüzey akışlı sulak alan sistemlerinde, 0.5 mg/L'nin üzerindeki NH₄⁺-N giderim verimliliği ve uygun gün olarak belirtilen 10 gün arıtma işlemi sonunda yaklaşık %70'lerde kararlı hale geçtiğini bildirmişlerdir (Tunçsiper ve Akça, 2006). Yine, Topal ve ark. (2013) yaptıkları bir çalışmada, karışık su mercimekleri (*L. minor*, *L. gibba*, *S. polyrrhiza* ve *W. arrhiza*) kullanarak 9 gün boyunca atık sudan NH₄⁺-N giderimini incelemişler, çalışma sonucunda %75.3 verimlilik tespit etmişlerdir. Çalışmamızda *W. arrhiza* ile 104 saat süren biyodeneş sonucunda, Çizelge 4.11'de görüldüğü gibi, AAT çıkış suyunda NH₄⁺-N giderim verimliliği %96 olarak en yüksek floresan ışıklı ortamda kaydedilmiştir. Yine, Fe⁰NP ilave edilen ortamlarda da NH₄⁺-N giderimi oldukça yüksektir (%89–%94). Diğer bütün ortamlarda bazı literatürlerin tersine NH₄ giderim verimliliğinin %70'den daha fazla olduğu belirlenmiştir. Yapılan çalışmalarda su mercimeklerinin nitrata göre amonyumu almaya yönelik daha donanımlı oldukları ve doğrudan protein sentezinde bu iyonu tercih ettikleri bildirilmiştir (Ullrich ve ark.,

1984; El-Shafai ve ark., 2007). Bu bağlamda, *W. arrhiza* türünün kullanılacağı yapay sulak alan sistemlerinde diğer su mercimeği türlerinden daha yüksek amonyum giderim potansiyelinin olduğunu söyleyebiliriz. Bu nedenle yapay sulak alan sistemlerinde evsel/hayvansal atık suların arıtımında bu tür kullanılabilir.

W. arrhiza kullanılarak kentsel AAT çıkış suyunda nütrient giderimi çalışmasında, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ için değerlendirildiğinde farklı ışık/ışık yoğunlukları ile Fe^0NP içeren ortamlar için ANOVA ve Tukey'in *post hoc* testiyle yapılan istatistiksel analiz sonucunda $\text{NH}_4^+\text{-N}$ giderimine yönelik tüm deney gruplar arasında $p < 0.05$ anlamlılık seviyesinde önemli fark olduğu belirlenmiştir.

4.7 Nitrit Azotu ($\text{NO}_2^-\text{-N}$)

Kentsel AAT çıkış suyundan alınan su numuneleri ile kurulan deneylerde $\text{NO}_2^-\text{-N}$ giderim verimliliği Çizelge 4.8'de verilmiştir. *W. arrhiza*'nın farklı gruplarda $\text{NO}_2^-\text{-N}$ giderimi %26–%42 aralığında tespit edilmiştir. En yüksek $\text{NO}_2^-\text{-N}$ giderimi %42 verimlilikle 30M/30K ışıklı ortamda ölçülmüştür.

Çizelge 4.8 *W. arrhiza*'nın Kullanıldığı Farklı Deney Gruplarında Nitrit Giderim Verimliliği

Işık spektral dağılımı	$\text{NO}_2^-\text{-N}$ (mg/L)		Verimlilik (%)
	t0	t4.3	
Floresan	0.139	0.104	26
Floresan + Fe^0NP	0.139	0.086	39
100M/50K	0.139	0.089	36
100M/50K + Fe^0NP	0.139	0.085	39
30M/30K	0.139	0.081	42
30M/30K + Fe^0NP	0.139	0.092	34

Topal ve ark., (2013) yaptıkları çalışmada, karışık su mercimeklerini kullanarak (*L. minor*, *L. gibba*, *S. polyrrhiza* ve *W. arrhiza*) 9 gün boyunca atık sudan nitrit giderimini incelemişler ve çalışmalarında çıkış suyunda $\text{NO}_2^-\text{-N}$ miktarının arttığını tespit etmişlerdir. Martínez ve ark. (2006) *L. gibba* ile 220 günlük çalışmalarında nitrit gideriminin %90.23 olduğunu bildirmişlerdir. Çalışmamızda *W. arrhiza* ile 104 saat süren biyodeneş sonucunda, AAT çıkış suyunda tüm deney gruplarında nitrit giderimi gerçekleşmiştir. En yüksek nitrit gideriminin 30M/30K (%42) ortamında olduğu belirlenmiştir. Topal ve ark. (2013)'ün karışık su mercimeği kullandıkları çalışmayla kıyaslandığında, mevcut çalışmamızda hem farklı ışık

kaynaklarının hem de Fe⁰NP kullanmanın *W. arrhiza*'nın çıkış suyundan NO₂⁻-N miktarını azalttığı yönünde etkili olduğunu söyleyebiliriz. Mevcut çalışma sonucu göre, yüksek ışık şiddetindeki Fe⁰NP içeren ortamlarda (%39) ve düşük ışık şiddetindeki Fe⁰NP içermeyen ortamlarda daha fazla NO₂⁻-N giderimi olmuştur (%42).

W. arrhiza kullanılarak kentsel AAT çıkış suyunda nütrient giderimi çalışmasında, NO₂⁻-N için değerlendirildiğinde farklı ışık/ışık yoğunlukları ile Fe⁰NP içeren ortamlar için ANOVA ve Tukey'in *post hoc* testiyle yapılan istatistiksel analiz sonucunda NO₂⁻-N giderimine yönelik 100M/50K ile Floresan + Fe⁰NP hariç diğer tüm deney grupları arasında p<0.05 anlamlılık seviyesinde önemli fark olduğu belirlenmiştir.

4.8 Nitrat Azotu (NO₃⁻-N)

Kentsel AAT çıkış suyundan alınan numune ile kurulan biyodenyeler sonucunda NO₃⁻-N miktarı değişimi Çizelge 4.13'te verilmiştir. *W. arrhiza*'nın NO₃⁻-N giderimi %-58-%70 aralığında tespit edilmiştir. En yüksek NO₃⁻-N giderimi %70 verimlilikle floresan+Fe⁰NP içeren grupta ölçülmüştür.

Çizelge 4.9 *W. arrhiza*'nın Kullanıldığı Farklı Deney Gruplarında Nitrat Giderim Verimliliği

Işık spektral dağılımı	NO ₃ ⁻ -N (mg/L)		
	t0	t4.3	Verimlilik (%)
Floresan	0.95	0.3	69
Floresan + Fe⁰NP	0.95	0.29	70
100M/50K	0.95	0.6	37
100M/50K + Fe⁰NP	0.95	1	-5
30M/30K	0.95	0.5	48
30M/30K + Fe⁰NP	0.95	1.5	-58

L. minor, *L. gibba*, *S. polyrrhiza* ve *W. arrhiza*'nın karışık olarak kullanıldığı atık sudan nütrient uzaklaştırma çalışmasında, dokuz günün sonunda nitrat gideriminin olmadığı, aksine artış olduğunu belirtilmiştir (Topal ve ark., 2013). Mevcut çalışmamızda farklı deney gruplarında hem artma hem de azalma kaydedilmiştir. Yapılan bazı çalışmalarda, nitrat miktarının daha düşük olma nedeni *W. arrhiza* tarafından absorbe edilmesidir (Tuntulweat veTuntulweat, 2004; Suppadit ve ark., 2008; Suppadit ve ark., 2011). Gökyay ve Balcıgil (2017), *L. minor* kullandıkları sentetik atık sudan NO₃⁻-N uzaklaştırma çalışmasının 7. gün testlerinde arıtım oranını %92, ham atık sudan giderim oranını %81 olarak hesaplamışlardır. Tarlan ve ark.

(2005) kampüs atık suyundan *L. minor* ile 7 gün baz alınarak, 0.3 mg/L NO₃⁻-N içeren giriş suyunda %90 giderim sağlamışlardır. Nivala ve ark. (2007)'nin yaptığı çalışmada, sulak alanlarda yeterli oksijen sağlandığında nitrifikasyon sonucu NO₃⁻-N değerinin arttığını, havalandırma yokken belirgin nitrat artışının olmadığını bildirmişlerdir. Çalışmamızda *W. arrhiza* ile 104 saat süren biyodeneyle sonuçunda Çizelge 4.13'te görüldüğü gibi, AAT çıkış suyunda en yüksek nitrat absorpsiyonunun floresan+Fe⁰NP içeren ortamda olduğu görülmüştür. Buna bağlı olarak, en yüksek nispi büyüme oranı da bu ortamda gerçekleşmiştir (RGR=0.108). Nitrat artışının gerçekleştiği ortamlar ise Fe⁰NP içermeyen mor LED'li ortam (100M/50K) ile Fe⁰NP içeren mor LED'li (30M/30K+Fe⁰NP) gruplardır. Çalışma sonucuna göre, *W. arrhiza* yüksek ışık miktarıyla beraber, Fe⁰NP içeren ortamda daha fazla nitrat alımını gerçekleştirmiştir. Floresan ışığın etkisi ise LED ışıkların etkisinden daha yüksektir.

W. arrhiza kullanılarak kentsel AAT çıkış suyunda nütrient giderimi çalışmasında, NO₃⁻-N için değerlendirildiğinde farklı ışık/ışık yoğunlukları ile Fe⁰NP içeren ortamlar için ANOVA ve Tukey'in *post hoc* testiyle yapılan istatistiksel analiz sonucunda NO₃⁻-N giderimine yönelik floresan ile 30M/30K + Fe⁰NP ve 30M/30K + Fe⁰NP ile floresan + Fe⁰NP deney grupları arasında p<0.05 anlamlılık seviyesinde fark olduğu belirlenmiştir.

4.9 Toplam Azot (TN)

Kentsel AAT çıkış suyu ile yapılan biyodeneylelerde biyodeneylelerde, başlangıç ve deney sonucu ölçülen TN miktarı değişimi Çizelge 4.10'da verilmiştir. *W. arrhiza*'nın TN giderimi %36–%55 aralığında tespit edilmiştir. En yüksek TN giderimi %55 verimlilikle 30M/30K+Fe⁰NP içeren grupta hesaplanmıştır.

Çizelge 4.10 *W. arrhiza*'nın Kullanıldığı Farklı Deney Gruplarında Toplam Azot Giderim Verimliliği

Işık spektral dağılımı	TN (mg/L)		
	t0	t4.3	Verimlilik (%)
Floresan	3.3	2	39
Floresan + Fe⁰NP	3.3	1.9	43
100M/50K	3.3	1.6	52
100M/50K + Fe⁰NP	3.3	1.8	45
30M/30K	3.3	2.1	36
30M/30K + Fe⁰NP	3.3	1.5	55

Kirli sularda azot giderim yöntemleri; yüksek pH'da kesif olarak havalandırma, damlatmalı filtreler ile tasfiye, biyolojik tasfiye (nitrifikasyon ve denitrifikasyon birimleriyle), yeraltı suyunun suni olarak beslenmesi ve kuyularla çekilmesi, kum filtreler kullanılarak süzme, kırılma noktası klorlaması ve iyon değiştirmedir. Bu yöntemlerin amacı nitrifikasyon ve denitrifikasyon ile anoksik şartlar altında azot gazı hâlinde sudan uzaklaştırmaktır (Coşkun ve ark., 2018).

W. arrhiza ile 104 saat süren fitoremediasyon çalışmasında, AAT çıkış suyunda TN (mg/L) gideriminin en yüksek %55 verimlilikle 30M/30K+Fe⁰NP içeren ortamda olduğu belirlenmiştir. *W. arrhiza* nispi büyüme oranının bu ortamda diğer gruplara göre en düşük orana sahip olduğu belirlenmiştir (RGR=0.0271). Bu sonuca göre, Fe⁰NP ilave edilen ortamlarda TN giderimi yüksektir (%52–%45). Dolayısıyla, köksüz su mercimeği *W. arrhiza*, düşük ışıkta ve Fe⁰NP içeren ortamlarda azot giderimi için kullanılabilir.

Iqbal ve Baig (2016) yaptıkları bir çalışmada, *L. minor* kullanarak seyreltilmiş sızıntı suyundan azot giderimini incelemişler, pH=7.1'de ve 22 gün süren çalışmada, %50 seyreltilmiş sızıntı suyundan %71, %90 seyreltilmiş sızıntı suyundan %91 azot gideriminin gerçekteştiğini bildirmişlerdir. Körner ve ark. (1998) başka bir su mercimeği olan *L. gibba* türünü kullanarak atık sudan azot giderimini incelemişler, yapılan çalışmada giderimin %42 olduğunu, nitrifikasyon-denitrifikasyonla, çökeltme ve buharlaşma yoluyla azot gideriminin ise %16 olduğunu bildirmişlerdir. Yapılan araştırmalarda, azotu uzaklaştırmak için bitkili sistemlerin bitkisiz sistemlere göre önemli ölçüde daha verimli olduğu, pH>6.5 olan durumlarda N gideriminin uçucu hale getirme ile gerçekteşebileceği belirtilmiştir (Shah ve ark., 2015).

W. arrhiza kullanılarak kentsel AAT çıkış suyunda nütrient giderimi çalışmasında, TN için değerlendirildiğinde farklı ışık/ışık yoğunlukları ile Fe⁰NP içeren ortamlar için ANOVA ve Tukey'in post-hoc testiyle yapılan istatistiksel analiz sonucunda TN giderimine yönelik tüm deney gruplar arasında %95 anlamlılık seviyesinde önemli fark olmadığını belirlenmiştir (p>0.05).

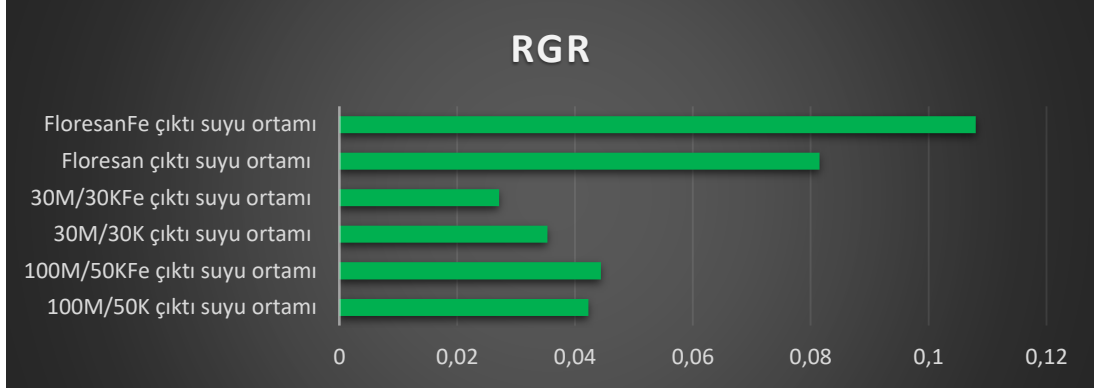
Sulama suyu olarak kullanılma durumunda eğer değerler yüksekse, fosfor toprak ortamından çökeltme ve süzülürken adsorpsiyon ile giderilebilir. Fakat azot fazlalığı oksijen ile yükseltgenerek nitrata dönüşür, bu durumda yeraltı suyunda ciddi

problemlere neden olabilir. Bu nedenle yapay sulak alan sistemlerinde atık suların bitkili sistemler kullanılarak içeriğindeki fazla nütrientlerin uzaklaştırılması, sonra alıcı ortamlara verilmesi ya da sulama suyu olarak kullanılması gerekir.

Ataklı ve Balık (2022), Ordu ilinin kıyı yerleşim bölgelerinden (Altınordu, Fatsa, Gülyalı, Perşembe, Ünye) denize deşarj yapan yedi evsel atık su arıtma istasyonunun atık su giriş ve çıkış suyunda (2018 yılında her ay, ayda iki kez) yaptıkları analiz sonuçlarını yönetmeliklerdeki (Kentsel Atık Su Arıtımı Yönetmeliği ve Su Kirliliği Kontrol Yönetmeliği) üst sınır değerlerini dikkate alarak, kriterlere uygunluk bakımından incelemişler ve çalışmaları sonucunda yapılan analizlerde üst ve alt değerler aralıkları ; pH 7.17-7.46, AKM 9.13-215.75 mg/L, BOİ₅ 14.66-147.21 mg/L, KOİ 39.38-300.67 mg/L, TN 7.70-31.41 mg/L, TP 0,32-4.21 mg/L aralıklarında ölçülmüştür. İleri arıtma sistemine sahip olan yerlerde sorun tespit edilmemiş, fakat Fatsa ilçesinde KAAY (2006)' ye göre değerlerin yüksek olduğunu bildirmişlerdir. Bu gibi durumlarda, kentsel atık su arıtım tesisi olmayan yerleşim yerlerine yapay sulak alan sistemleri inşa edilerek ya da arıtım sonrası sisteme ilave bitki bazlı yapay sulak sistemleri kurarak sudan nütrient giderimi yapılabilir. Bu sistemlerde köksüz su mercimeği *W. arrhiza* kullanarak daha fazla nütrient giderimi sağlanabilir.

4.10 *Wolffia arrhiza*'nın Kentsel Çıkış Suyunda Büyüme Performansı

Rölatif büyüme oranı genellikle bitki ağırlık artışları temelinde hesaplanır (Hoffmann ve Poorter, 2002). Kentsel AAT çıkış suyunda kurulan biyodeny gruplarına, başlangıç yaş ağırlığı 3.750 g olan *W. arrhiza* eklenmiştir. Dört günü aşan süre (104 saat= $t_{4.3}$) sonunda *W. arrhiza*'nın rölatif büyüme oranı (RGR) yaş ağırlıklarına göre hesaplanmıştır. Şekil 4.2'de kentsel AAT çıkış suyunda kurulan farklı deney gruplarında *W. arrhiza*'nın RGR hesaplamaları sonucuna göre elde edilen grafik verilmiştir.



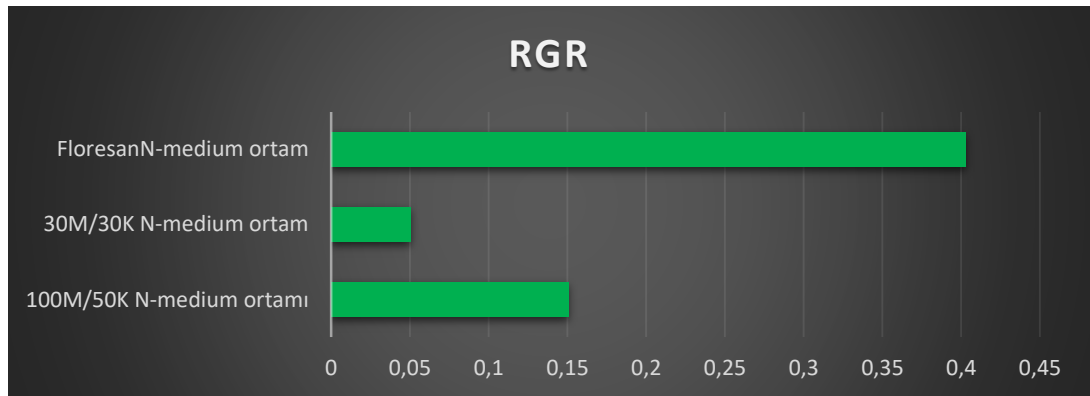
Şekil 4.6 *W. arrhiza*'nın Farklı Ortam Koşullarında Bağlı Büyüme Hızı

Yapılan çalışmada, *W. arrhiza*'nın t4.3 sonunda en yüksek RGR değeri günde 0.10 olarak hesaplanmıştır. Bu değer Fe⁰NP içeren floresan ışıklı ortamda tespit edilmiştir. Floresan ve mor LED ışıklı (100M/50K) koşullarda ortama Fe⁰NP eklenmesi rölatif büyüme hızını artırmıştır. Daha düşük spektral ışıklı koşullarda (30K/30M LED) Fe⁰NP'li ortamda *W. arrhiza*'nın rölatif büyüme hızının daha düşük olduğu görülmektedir. Çalışmaya göre, *W. arrhiza*'nın aynı ışık şiddetindeki (105 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$) floresan ışıklı ortamda mor LED'li ortama göre daha yüksek bağlı büyüme hızına sahip olduğu belirlenmiştir. Arslan Günel ve Taş (2022) tarafından yapılan bir çalışmada, %5'lik gri su ortamında ve floresan ışıklı ortamda altı gün sonunda (t₆) *W. arrhiza*'nın RGR'sinin 0.11 olduğu bildirilmiştir. Soda ve ark. (2013)'ün yaptığı matematiksel modelleme çalışmasında, *W. arrhiza*'nın spesifik büyüme hızının günde 0.35–0.38 olduğu, düşük azot içeren koşulların spesifik büyüme hızını azalttığı (günde 0.085–0.12) ve bu değerlerin altına düştüğünde turion oluşumunun indüklendiğini belirtmişlerdir. Yapılan diğer bir çalışmada, ışık kaynağının (beyaz LED, beyaz floresan ve mavi LED) ve fotoperiyodun (12:12, 16:08, 24:00 aydınlık/karanlık) 16 gün boyunca su mercimeği *Landoltia*'nın büyümesi üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Ortalama günlük RGR'nin yaklaşık 0.519 değerine ulaştığı çalışmada hem ışık kaynağının hem de fotoperiyodun ortalama RGR üzerinde anlamlı bir fark göstermediği belirtilmiştir. Bununla birlikte, farklı parametre etkileşimlerinin su mercimeğinin büyümesi üzerinde önemli etkileri olduğu bildirilmiştir (Gallego ve ark., 2022). Petersen ve ark. (2022) artan ışık yoğunluğunun *L. minor* ve *W. hyalina* için sırasıyla RGR'lerini %67 ve %76 artırdığını, fakat ışık spektral dağılımlarının herhangi bir parametre üzerinde önemli bir etkisinin olmadığını vurgulamışlardır. Stewart ve ark. (2021) tarafından yapılan başka bir çalışmada, büyüme hızını, PFD (foton

akı yoğunluğu) aralığı düşük (50 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$) ve yüksek (1000 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$) olacak şekilde araştırmışlar ve iki uçta da aynı yüksek büyüme oranını belgelemişlerdir. Walsh ve ark. (2021), sentetik süt atık sularında *L. minor* kullanarak TN ve TP giderimini incelemişler, 50 ve 850 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ arasında bu nütrientlerin değişmeden kaldığını, protein içeriğinin ise (% taze ağırlık) daha yüksek ışık yoğunluklarında %1.5'ten %2'ye arttığını bildirmişlerdir. Çalışma sonuçları ışık yoğunluğunun ve atık su bileşiminin su mercimeği *L. minor*'ün büyüme ve fitoremediasyon potansiyeli üzerindeki etkileşimli etkilerini göstermektedir. Elde edilen verilerden, 50 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ üzerindeki ışık yoğunluklarının su mercimeğinin atık su iyileştirmesinde kesin fayda sağlayamayabileceğini belirtmişlerdir. Mevcut çalışmamızda da farklı ışık kaynakları, farklı ışık yoğunlukları ve Fe^0NP ilave edilen ortamlarda *W. arrhiza*'nın farklı büyüme hızları ve nütrient giderim verimliliği belirlenmiştir.

4.11 *Wolffia arrhiza*'nın N-medium Ortamında Büyüme Performansı

Su mercimeğinin büyümesini etkileyen birçok etmen vardır. Örneğin atık suyun belirli bir element açısından nispeten zayıf olduğu durumlarda, su mercimeği büyümesini artırmak için ek besinlere ihtiyaç duyulabilir (Van Dam ve ark., 2010; Appenroth, 2019). N-medium ortamı su mercimekleri için uygun bir ortamdır. Mevcut çalışmada, N-medium ortamında yetiştirilen *W. arrhiza*'nın t4.3 sonunda en yüksek RGR değeri floresan ışık (105 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$), 100M/50 K ve 30K/30M mor LED'li ortamlarda sırasıyla günde 0.4029, 0.1508 ve 0.0506 olarak belirlenmiştir (Şekil 4.3). Çalışmaya göre, düşük LED ışık şiddetinde *W. arrhiza*'nın RGR hızının daha düşük olduğu, aynı ışık şiddetindeki floresan ışığın (105 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$) mor LED'lere (105 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$) göre RGR'yi artırdığı belirlenmiştir.



Şekil 4.7 *Wolffia arrhiza*'nın N-Medium İçinde Bağıl Büyüme Hızı

Walsh ve ark., (2020) sentetik süt ürünleri endüstrisi atık suyunda yetiştirdikleri su mercimeği *L. minör* ile yaptıkları çalışmada, sentetik atık sudaki Ca/Mg oranının büyüme için önemli bir faktör olduğunu belirtmişlerdir. Deneyler, magnezyumu kalsiyuma tercih eden bir oranın *L. minor* büyümesini ve fotosentetik verimi olumsuz etkilediğini ve RGR'lerin günde 0.05'e kadar düşük olmasına yol açtığını göstermişlerdir. Kalsiyum sülfatın eklenmesi yoluyla bu oranın kalsiyum lehine değişmesi, günlük RGR'leri 0.2–0.3 artırmıştır.

Konsantre atık suların seyreltilmesi de gerekebilir. Çeşitli araştırmalar, atık suların seyreltme oranının, yüksek konsantrasyonlarda domuz lagünü suyuyla ilişkili olarak, azalan bitki büyümesi ve azalan fitoremediasyon seviyeleri ile su mercimeği performansını etkileyebileceğini göstermiştir (Dinh ve ark., 2020; Cheng ve ark., 2002).

Khairina ve ark., (2021) bazı bakteriler bitki büyümesini olumlu yönde etkiler fakat *L. gibba* ile yapılan bir çalışmada, sınırlı azot bulunan ortamda bitki büyümesini teşvik eden bakterilerden *Acinetobacter calcoaceticus* ve *Pseudomonas fulva* büyümesini desteklemediğini hatta inhibe ettiğini, sınırlı azot metabolizmasına sahip bir bakteri grubu olan *Chryseobacterium* suşlarının baskın olarak etkili bitki büyümesini teşvik eden bakteri olarak seçildiğini bildirmişlerdir. Sınırlı azotun, konukçu su mercimeği ile mineral besinler için rekabet yoluyla *A. calcoaceticus*'un bitki büyümesini inhibe edici davranışını indükleyen çok önemli çevresel faktör olduğunu göstermişlerdir.

Atık suyun su mercimeği büyümesi için bir ortam olarak kullanılmasındaki bir diğer zorluk ise, besin maddelerinin aşırı ve yetersiz yüklenmesine yol açan zaman içinde bileşimdeki değişkenliktir; bu, atık su akışı üzerinde sıkı kontroller ve bileşimin gerçek zamanlı izlenmesini gerektirebilir (Coughlan ve ark., 2022).

Sonuç olarak, *W. arrhiza* nütrientleri atık sudan uzaklaştırmak için kullanılabilir (Naskar ve ark., 1986; Edwards ve ark., 1992; Fujita ve ark., 1999), çünkü bitki çok hızlı büyür ve büyük miktarda besin emer (Ziegler ve ark., 2016). Su mercimeklerinin bağıl büyümesini etkileyen birçok çevresel faktör de vardır. Bu çevresel faktörlerin ayrı ayrı ve bütünlük olarak kapsamlı olarak çalışılması ve su mercimeklerinden hem biyomas elde etme hem de fitoremediasyon çalışmalarında en

verimli sonucu elde etmek için *W. arrhiza*'nın potansiyelinin değerlendirilmesi gerekmektedir.

5. SONUÇ ve ÖNERİLER

Ordu Büyükşehir Belediyesi OSKİ Genel Müdürlüğü'ne ait İleri Biyolojik AAT'nin çıkış suyundan alınan su numunelerinde, köksüz su mercimeği *W. arrhiza* türünün mevcut çıkış suyundan nütrient gideriminin incelendiği çalışmada, farklı ışık kombinasyonları (floresan ve LED) ve akı yoğunluğu altında, ortama Fe⁰NP de eklenerek bir fitoremediasyon düzeneği tasarlanmıştır. *W. arrhiza*'nın fitoremediasyon potansiyeli, 104 saat (4.3 gün=t_{4.3}) süren deney sonucunda yapılan su analizleri ile değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçları kısaca özetleyecek olursak;

- AAT çıkış suyunda NH₄⁺-N giderim verimliliği %96 olarak en yüksek floresan ışıklı ortamda kaydedilmiştir. Yine, Fe⁰NP ilave edilen ortamlarda da NH₄⁺-N giderimi yüksektir (%89-%94). Mevcut çalışma sonucuna göre, *W. arrhiza*'nın NH₄⁺-N giderim potansiyelinin diğer su mercimeği türlerinden daha yüksek olduğunu söyleyebiliriz. Bu nedenle yapay sulak alan sistemlerinde evsel/hayvansal atık suların arıtımında bu tür kullanılabilir.

- Yüksek ışık şiddetindeki Fe⁰NP içeren ortamlarda da AAT çıkış suyundan NO₂⁻-N giderimi daha fazladır (%39). Düşük ışık şiddetindeki Fe⁰NP içermeyen ortamlarda da daha fazla giderim tespit edilmiştir (%42).

- *W. arrhiza* yüksek ışık şiddetiyle beraber, ortama Fe⁰NP katılan floresan ışıklı koşullarda daha fazla NO₃⁻-N alımı gerçekleştirmiştir

- 30M/30K+Fe⁰NP ve Fe⁰NP ilave edilen diğer gruplarda TN giderimi yüksektir (%55-%45). Mevcut çalışma sonucuna göre, *W. arrhiza*, düşük ışık şiddetli mor (K/M) LED'li ve Fe⁰NP içeren ortamlarda azot giderimi için kullanılabilir.

- TP giderim verimliliği %60 olarak en yüksek floresan+Fe⁰NP ışıklı ortamda kaydedilmiştir. Doğal sucul ekosistemlerde ötrofikasyonu engellemek için, kurulacak yapay sulak alan sistemlerinde atık sudaki fazla fosforu gidermek amacıyla *W. arrhiza* kullanılabilir.

- EC değişimi en yüksek 100M/50K+Fe⁰NP ve 30M/30K+Fe⁰NP gruplarında tespit edilmiş, giderim verimliliği sırasıyla %60-%59 olarak hesaplanmıştır. Mevcut çalışmaya göre, Fe⁰NP ilave edilen, mor LED'lerin kullanıldığı ortamlarda EC daha

fazla azalmıştır. Biyodenyde kullanılan *W. arrhiza*, yapay sulak alanlarda iletkenliği azalmak için kullanılabilir.

- *W. arrhiza* suyu bazikleştirmiştir.
- *W. arrhiza* kullanılarak kentsel AAT çıkış suyunda nütrient giderimi çalışmasında parametreler değerlendirildiğinde, farklı ışık/ışık yoğunlukları ile Fe⁰NP içeren ortamlar için ANOVA ve Tukey'in post-hoc testiyle yapılan istatistiksel analiz sonucunda;
 - pH giderimine yönelik tüm deney gruplar arasında p<0.05 anlamlılık seviyesinde önemli fark olduğu belirlenmiştir.
 - EC giderimine yönelik tüm deney gruplar arasında, p<0.05 anlamlılık seviyesinde önemli fark olduğu belirlenmiştir.
 - AKM giderimine yönelik Floresan + Fe⁰NP ile 30M/30K ve 30M/30K + Fe⁰NP ile 100M/50K + Fe⁰NP ve 30M/30K deney grupları hariç diğer gruplar arasında p<0.05 anlamlılık seviyesinde önemli fark olduğu belirlenmiştir.
 - TP giderimine yönelik Floresan ile 30M/30K; floresan + Fe⁰NP ile 30M/30K ve 30M/30K + Fe⁰NP; 100M/50K ile 30M/30K; 30M/30K ile tüm diğer tüm deney grupları arasında p<0.05 anlamlılık seviyesinde önemli fark olduğu belirlenmiştir.
 - NH₄⁺-N giderimine yönelik tüm deney gruplar arasında p<0.05 anlamlılık seviyesinde önemli fark olduğu belirlenmiştir.
 - NO₂⁻-N giderimine yönelik 100M/50K ile Floresan + Fe⁰NP hariç diğer tüm deney gruplar arasında p<0.05 anlamlılık seviyesinde önemli fark olduğu belirlenmiştir.
 - NO₃⁻-N giderimine yönelik floresan ile 30M/30K + Fe⁰NP ve 30M/30K + Fe⁰NP ile floresan + Fe⁰NP deney gruplar arasında p<0.05 anlamlılık seviyesinde fark olduğu belirlenmiştir.
 - TN giderimine yönelik tüm deney gruplar arasında p<0.05 anlamlılık seviyesinde önemli fark olmadığı belirlenmiştir (p>0.05).

Dünyanın en küçük çiçekli bitkisi olan *W. arrhiza* ile yapılan çalışmada, bitkinin kentsel atık suda floresan ve farklı LED ışıklarda yetişebildiği, amonyum,

nitrit, nitrat, N ve P gibi ötrofikasyona yol açan ve su kalitesini bozan önemli nütrientleri uzaklaştırma potansiyeline sahip olduğu belirlenmiştir. Bu özelliğiyle, *W. arrhiza* en uygun yapay sulak alan sistemlerinde atık suların arıtımında ve in vitro ortamda N-mediumda istenildiği miktarda çoğaltılabilir.

Sera gazlarının artması sonucunda küresel ısınma ve iklim değişikliği olmaktadır. Bu iklim değişikliği sonucu özellikle tatlı su kaynakları kısıtlı hale gelmektedir. Dünya genelinde ve Türkiye’de olduğu gibi en fazla tatlı su kullanımı tarımsal faaliyetlerde olmaktadır. Arazilerde uygun sulama sistemleri olmadığı için suyun israfı da söz konusudur. Su tasarrufu için *W. arrhiza* kullanılarak iyileştirilen atık sular, yönetmeliklerde bildirilen uygun parametreler doğrultusunda bazı bitkilerin ve tarım ürünlerinin sulanmasında kullanılabilir.

Su mercimekleri, vücut yapılarının basitliği ve son derece hızlı vejetatif üremeleri nedeniyle 1960’lardan beri birçok nesil biyoloğu büyülemiştir. Bitki moleküler biyolojisi çağının başlangıcından bu yana, su mercimekleri, bitki bazlı uygulamaların yanı sıra temel araştırmalarda önemli bulgularla model bitkiler olarak ortaya çıkmıştır. Omik araçlar ve tekniklerdeki son gelişmeler, su mercimekleri üzerindeki araştırmaları canlandırmış ve genomik, transkriptomik ve epigenomik kaynaklar hakkında sahada hızlı bir çalışma başlamıştır. Bu son ilerleme ile bu sahada kullanılan su mercimeklerinden biri de *W. arrhiza*’dır. *W. arrhiza* genomik, transkriptomik ve epigenomik, stres fizyolojisi, fitotoksiste, su bitkilerinin adaptif stratejileri ve suda yaşayan mikroorganizmalar ve bitkiler arasındaki moleküler etkileşimler ile ilgili biyolojik soruları ele almak için aday su bitkilerinden biridir. Geçtiğimiz on yıllar boyunca, atık su arıtımı, hayvan yemi ve insan beslenmesi için protein açısından zengin biyokütle kullanımı, yenilenebilir enerji kaynağı olarak ve bitki türevli farmasötikler üreten fabrikalar olarak nişasta açısından zengin biyokütle kullanımı gibi *W. arrhiza* hayal edilemeyecek kadar geniş uygulamalara sahip bir potansiyeldir. Gelecekte bu harika tesisler için ve birçok yeni işlevsel teknoloji hakkında daha derin çalışmalar yapmak gerekmektedir. Bu konuda köksüz su mercimeği *W. arrhiza* umut vadeden, çevre dostu bir su bitkisidir.

6. KAYNAKLAR

- Ahmad, M. S., Mehmood, M. A., Liu, C. G., Tawab, A., Bai, F. W., Sakdaronnarong, C., ... & Gull, M. (2018). Bioenergy potential of *Wolffia arrhiza* appraised through pyrolysis, kinetics, thermodynamics parameters and TG-FTIR-MS study of the evolved gases. *Bioresource technology*, 253, 297-303.
- Ali, S., Abbas, Z., Rizwan, M., Zaheer, I. E., Yavaş, İ., Ünay, A., ... & Kalderis, D. (2020). Application of floating aquatic plants in phytoremediation of heavy metals polluted water: A review. *Sustainability*, 12(5), 1927.
- Al-Nozaily, F., Alaerts, G. J. F. R., & Veenstra, S. (2000). Performance of duckweed-covered sewage lagoons—II. Nitrogen and phosphorus balance and plant productivity. *Water Research*, 34(10), 2734-2741.
- Ansari, A. A., Naeem, M., Gill, S. S., & AlZuaibr, F. M. (2020). Phytoremediation of contaminated waters: An eco-friendly technology based on aquatic macrophytes application. *The Egyptian Journal of Aquatic Research*, 46(4), 371-376
- Appenroth, K. J., Sree, K. S., Bog, M., Ecker, J., Seeliger, C., Böhm, V., ... & Jahreis, G. (2018). Nutritional value of the duckweed species of the genus *Wolffia* (Lemnaceae) as human food. *Frontiers in chemistry*, 6, 483.
- Appenroth, K. J., Sree, K. S., Böhm, V., Hammann, S., Vetter, W., Leiterer, M., & Jahreis, G. (2017). Nutritional value of duckweeds (Lemnaceae) as human food. *Food Chemistry*, 217, 266-273.
- Appenroth, K. J., Teller, S., & Horn, M. (1996). Photophysiology of turion formation and germination in *Spirodela polyrhiza*. *Biologia Plantarum*, 38(1), 95-106.
- Arıkan, E. N., & Bağdatlı, M. C. (2021). Bazı ağır metallerce kirlenmiş tarım topraklarının çim bitkisi (*Lolium perenne* L.) kullanılarak fitoremediasyon yöntemleriyle doğal arıtımı (Master's thesis, Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi).
- Arslan Günal, S., Taş, B. (2022). Uzay çalışmalarında biyorejeneratif yaşam destek sistemleri için potansiyel bir tür: Dünyanın en küçük spermatofiti, köksüz su mercimeği (*Wolffia arrhiza*). *International Scientific Research Congress Dedicated to the 30th Anniversary of Baku Eurasia University, Proceedings Book*, 305–316.
- Ataklı, S., Balık, İ. (2022). Ordu İli kentsel kıyı yerleşim yerlerinden denize verilen evsel atık su deşarjlarının araştırılması. *Aquatic Research*, 5(3), 186195
- Aybar, M., Bilgin, A., & Sağlam, B. (2015). Fitoremediasyon yöntemi ile topraktaki ağır metallerin giderimi. *Doğal Afetler ve Çevre Dergisi*, 1(1-2), 59-65. -
- Bala, A., & Singh, B. (2019). Development of an environmental-benign process for efficient pretreatment and saccharification of *Saccharum* biomasses for bioethanol production. *Renewable Energy*, 130, 12-24.
- Baş, S. (2022). Nanopartiküllerin *Ceratophyllum Demersum* L.'nin Fitoremediasyon Potansiyeli Üzerindeki Etkisinin Belirlenmesi (Master's thesis).

- Baştabak, B., & Koçar, G. (2019). Toprak Kirliliği Mücadelesinde Enerji Bitkilerinin Kullanılması ve Biyokütle Enerjisi Dönüşüm Yöntemleri ile Değerlendirilmesi. *Yenilenebilir enerji kaynakları sempozyumu. Antalya*.
- Becerra-Castro, C., Lopes, A. R., Vaz-Moreira, I., Silva, E. F., Manaia, C. M., & Nunes, O. C. (2015). Wastewater reuse in irrigation: A microbiological perspective on implications in soil fertility and human and environmental health. *Environment International*, 75, 117-135.
- Bhateria, R., & Jain, D. (2016). Water quality assessment of lake water: a review. *Sustainable Water Resources Management*, 2, 161-173.
- Bingül, Z., & ALTIKAT, A. (2017). Evsel nitelikli atıksu arıtma tesisi çıkış sularının tarımsal sulamada kullanılabilirliği. *Journal of the Institute of Science and Technology*, 7(4), 69-75.
- Biswas, S. K., Mojid, M. A., & Wyseure, G. C. L. (2017). Physicochemical properties of soil under wheat cultivation by irrigation with municipal wastewater in Bangladesh. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 48(1), 1-10.
- Bog, M., Appenroth, K. J., & Sree, K. S. (2019). Duckweed (Lemnaceae): its molecular taxonomy. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 3, 117.
- Bog, M., Appenroth, K. J., & Sree, K. S. (2020). Key to the determination of taxa of Lemnaceae: an update. *Nordic Journal of Botany*, 2020: e02658.
- Brasili, E., Bavasso, I., Petruccelli, V., Vilardi, G., Valletta, A., Dal Bosco, C., ... & Di Palma, L. (2020). Remediation of hexavalent chromium contaminated water through zero-valent iron nanoparticles and effects on tomato plant growth performance. *Scientific Reports*, 10(1), 1920.
- Britto, D. T., & Kronzucker, H. J. (2002). NH₄⁺ toxicity in higher plants: a critical review. *Journal of Plant Physiology*, 159(6), 567-584.
- Chen, G., Zhao, K., Li, W., Yan, B., Yu, Y., Li, J., ... & Fang, Y. (2022). A review on bioenergy production from duckweed. *Biomass and Bioenergy*, 161, 106468.
- Chen, J. C., Wang, K. S., Chen, H., Lu, C. Y., Huang, L. C., Li, H. C., ... & Chang, S. H. (2010). Phytoremediation of Cr (III) by *Ipomoea aquatica* (water spinach) from water in the presence of EDTA and chloride: Effects of Cr speciation. *Bioresource Technology*, 101(9), 3033-3039.
- Chen, J., Gao, M., Zhao, Y., Guo, L., Jin, C., Ji, J., & She, Z. (2022). Nitrogen and sulfamethoxazole removal in a partially saturated vertical flow constructed wetland treating synthetic mariculture wastewater. *Bioresource Technology*, 358, 127401.
- Chen, Y., Zhou, B., Li, J., Tang, H., Tang, J., & Yang, Z. (2018). Formation and change of chloroplast-located plant metabolites in response to light conditions. *International Journal of Molecular Sciences*, 19(3), 654.
- Cheng, J. J., & Stomp, A. M. (2009). Growing duckweed to recover nutrients from wastewaters and for production of fuel ethanol and animal feed. *Clean–Soil, Air, Water*, 37(1), 17-26.

- Chmur, M., & Bajguz, A. (2021). Brassinolide enhances the level of brassinosteroids, protein, pigments, and monosaccharides in *Wolffia arrhiza* treated with brassinazole. *Plants*, 10(7), 1311.
- Chmur, M., Bajguz, A., & Piotrowska-Niczyporuk, A. (2020). Effect of Cadmium on the Level of Isoprenoid-Derived Phytohormones in Duckweed *Wolffia arrhiza*. *Journal of Plant Growth Regulation*, 39, 1518-1530.
- Coşkun, Ç., Pulatsü, S., & Coşkun, T. (2018). Eysel Atıksulardan Azot ve Fosforun Biyolojik Giderilme Yöntemleri. *Kilis 7 Aralık Üniversitesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, 2(2), 53-63.
- Coughlan, N. E., Walsh, É., Bolger, P., Burnell, G., O'Leary, N., O'Mahoney, M., ... & Jansen, M. A. (2022). Duckweed bioreactors: Challenges and opportunities for large-scale indoor cultivation of Lemnaceae. *Journal of Cleaner Production*, 336, 130285.
- Crini, G., & Lichtfouse, E. (2019). Advantages and disadvantages of techniques used for wastewater treatment. *Environmental Chemistry Letters*, 17, 145-155.
- Deng, Z., & Cao, L. (2017). Fungal endophytes and their interactions with plants in phytoremediation: a review. *Chemosphere*, 168, 1100-1106
- Dinh, T. T. U., Soda, S., Nguyen, T. A. H., Nakajima, J., & Cao, T. H. (2020). Nutrient removal by duckweed from anaerobically treated swine wastewater in lab-scale stabilization ponds in Vietnam. *Science of The Total Environment*, 722, 137854.
- Edwards, P., Hassan, M. S., Chao, C. H., & Pacharaprakiti, C. (1992). Cultivation of duckweeds in septage-loaded earthen ponds. *Bioresource Technology*, 40(2), 109-117.
- Ekperusi, A. O., Sikoki, F. D., & Nwachukwu, E. O. (2019). Application of common duckweed (*Lemna minor*) in phytoremediation of chemicals in the environment: State and future perspective. *Chemosphere*, 223, 285-309
- El-Shafai, S. A., El-Gohary, F. A., Nasr, F. A., Van Der Steen, N. P., & Gijzen, H. J. (2007). Nutrient recovery from domestic wastewater using a UASB-duckweed ponds system. *Bioresource Technology*, 98(4), 798-807.
- Eriksson, E., Auffarth, K., Henze, M., & Ledin, A. (2002). Characteristics of grey wastewater. *Urban water*, 4(1), 85-104.
- Esmeray, E., & Armutcu, Ö. (2020). Karabük Üniversitesi Kampüs Atıksularının “Phragmites Australis” Ve “Aloe Vera” Bitkileri İle Yapay Sulak Alanlarda Arıtımı. *Konya Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 8(2), 404-417.
- Fidan, A. (2020) Yozgat ilinde bulunan kentsel-endüstriyel atıksu arıtma tesisleri ve yapay sulak alanların durumlarının incelenmesi, yaşanan problemlerin tespiti ve çözüm önerileri (*Master's thesis, Fen Bilimleri Enstitüsü*).
- Fonder, N., & Headley, T. (2011). Systematic classification, nomenclature and reporting for constructed treatment wetlands. *Water and Nutrient Management in Natural and Constructed Wetlands*, 191-219.
- Fourounjian, P., Fakhoorian, T., & Cao, X. H. (2020). Importance of duckweeds in basic research and their industrial applications. *The Duckweed Genomes*, 1-17.

- Fourounjian, P., Slovin, J., & Messing, J. (2021). Flowering and seed production across the lemnaeae. *International Journal of Molecular Sciences*, 22(5), 2733.
- Frederic, M., Samir, L., Louise, M., & Abdelkrim, A. (2006). Comprehensive modeling of mat density effect on duckweed (*Lemna minor*) growth under controlled eutrophication. *Water Research*, 40(15), 2901-2910.
- Fu, F., Dionysiou, D. D., & Liu, H. (2014). The use of zero-valent iron for groundwater remediation and wastewater treatment: a review. *Journal of Hazardous Materials*, 267, 194-205
- Fujita, M., Mori, K. ve Kodera, T. (1999). *Wolffia arrhiza*'nın yetiştirilmesi yoluyla besin giderimi ve nişasta üretimi. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 87 (2), 194-198.
- Gallego, L. M., Chien, Y. H., & Angeles Jr, I. P. (2022). Effects of light source and photoperiod on growth of duckweed *Landoltia punctata* and its water quality. *Aquaculture Research*, 53(2), 398-408.
- Gilliam, F. S., Burns, D. A., Driscoll, C. T., Frey, S. D., Lovett, G. M., & Watmough, S. A. (2019). Decreased atmospheric nitrogen deposition in eastern North America: Predicted responses of forest ecosystems. *Environmental Pollution*, 244, 560-574.
- Girdhar, M., Sharma, N. R., Rehman, H., Kumar, A., & Mohan, A. (2014). Comparative assessment for hyperaccumulatory and phytoremediation capability of three wild weeds. *3 Biotech*, 4, 579-589.
- Gökyay, O., & Balcıgil, M. (2017). Ham ve Sentetik Atıksularda Su Mercimeği (*Lemna minor* L.) Kullanılarak Karbon ve Besi Maddelerinin Gideriminin İncelenmesi ve Karşılaştırılması. *Marmara Fen Bilimleri Dergisi*, 29(4), 124-130.
- Hamutoğlu, R., Dinçsoy, A. B., Cansaran-Duman, D., & Aras, S. (2012). Biyosorpsiyon, adsorpsiyon ve fitoremediasyon yöntemleri ve uygulamaları. *Türk Hijyen ve Deneysel Biyoloji Dergisi*, 69(4), 235-53.
- Hoang, P. T., Fuchs, J., Schubert, V., Tran, T. B., & Schubert, I. (2022). Chromosome Numbers and Genome Sizes of All 36 Duckweed Species (Lemnaceae). *Plants*, 11(20), 2674.
- Hoffmann, W. A., & Poorter, H. (2002). Avoiding bias in calculations of relative growth rate. *Annals of Botany*, 90(1), 37-42
- Hu, D., Zhou, R., Sun, Y., Tong, L., Li, M., & Zhang, H. (2012). Construction of closed integrative system for gases robust stabilization employing microalgae peculiarity and computer experiment. *Ecological Engineering*, 44, 78-87.
- Hu, J., Ouyang, W., & Yang, Z. (2023). Impacts of extreme climate on nitrogen loss in different forms and pollution risk with the copula model. *Journal of Hydrology*, 620, 129412
- Hu, Z., Fang, Y., Yi, Z., Tian, X., Li, J., Jin, Y., ... & Zhao, H. (2022). Determining the nutritional value and antioxidant capacity of duckweed (*Wolffia arrhiza*) under artificial conditions. *LWT*, 153, 112477.

- Huang, L., Lu, Y., Gao, X., Du, G., Ma, X., Liu, M., Cuo, J., & Chen, Y. (2013). Ammonium-induced oxidative stress on plant growth and antioxidative response of duckweed (*Lemna minor* L.). *Ecological Engineering*, 58, 355-362.
- Hüseyin, Cüce Kalıpcı, E., Beyhan, Taş., & Yılmaz, M. (2020). Rakım farklılığı nedeniyle oluşan meteorolojik değişimlerin su kalitesine olan etkilerinin CBS ile değerlendirilmesi: Morfolojik olarak farklı iki göl için bir karşılaştırma. *Karadeniz Fen Bilimleri Dergisi*, 10(1), 1-26.
- Iqbal, J., & Baig, M. A. (2016). Effect of nutrient concentration and pH on growth and nutrient removal efficiency of duckweed (*Lemna minor*) from natural solid waste leachate. *International Journal of Health and Medicine*, 1(3), 1-7.
- Iqbal, J., Javed, A., & Baig, M. A. (2019). Growth and nutrient removal efficiency of duckweed (*Lemna minor*) from synthetic and dumpsite leachate under artificial and natural conditions. *PloS one*, 14(8), e0221755.
- IWA 17th International Conference. (2022). IWA 17th International Conference on Wetland Systems for Water Pollution Control 6 – 10 November 2022, Lyon, France.
- Júnior, J. C. A. B., de Almeida Silva, M. C., Hoyos, N. L. M., & Monteggia, L. O. (2022). Evaluation of UASB effluent post-treatment in pilot-scale by microalgae HRP and macrophytes pond for nutrient recovery. *Journal of Cleaner Production*, 357, 131951.
- Justin, M. Z., Pajk, N., Zupanc, V., & Zupančič, M. (2010). Phytoremediation of landfill leachate and compost wastewater by irrigation of *Populus* and *Salix*: biomass and growth response. *Waste management*, 30(6), 1032-1042.
- Kadlec, R. H. (2009). Comparison of free water and horizontal subsurface treatment wetlands. *Ecological engineering*, 35(2), 159-174.
- Karami, A., & Shamsuddin, Z. H. (2010). Phytoremediation of heavy metals with several efficiency enhancer methods. *African Journal of Biotechnology*, 9(25), 3689-3698.
- Kaur, M., Kumar, M., Singh, D., Sachdeva, S., & Puri, S. K. (2019). A sustainable biorefinery approach for efficient conversion of aquatic weeds into bioethanol and biomethane. *Energy Conversion and Management*, 187, 133-147.
- Khairina, Y., Jog, R., Boonmak, C., Toyama, T., Oyama, T., & Morikawa, M. (2021). Indigenous bacteria, an excellent reservoir of functional plant growth promoters for enhancing duckweed biomass yield on site. *Chemosphere*, 268, 129247.
- Khvatkov, P., Chernobrovkina, M., Okuneva, A., Pushin, A., & Dolgov, S. (2015). Transformation of *Wolffia arrhiza* (L.) Horkel ex Wimm. *Plant Cell, Tissue and Organ Culture (PCTOC)*, 123, 299-307
- Khvatkov, P., Firsov, A., Shvedova, A., Kozlov, O., Chernobrovkina, M., Pushin, A., ... & Dolgov, S. (2021). *Wolffia arrhiza* as a promising producer of recombinant hirudin. *3 Biotech*, 11, 1-10.
- Khvatkov, P., Firsov, A., Shvedova, A., Shaloiko, L., Kozlov, O., Chernobrovkina, M., ... & Dolgov, S. (2018). Development of *Wolffia arrhiza* as a producer for

- recombinant human granulocyte colony-stimulating factor. *Frontiers in Chemistry*, 6, 304.
- Komatsu, E., Fukushima, T., & Harasawa, H. (2007). A modeling approach to forecast the effect of long-term climate change on lake water quality. *Ecological Modelling*, 209(2-4), 351-366.
- Kotowska, U., Karpinska, J., Kapelewska, J., Kowejsza, E. M., Piotrowska-Niczyporuk, A., Piekutin, J., & Kotowski, A. (2018). Removal of phthalates and other contaminants from municipal wastewater during cultivation of *Wolffia arrhiza*. *Process Safety and Environmental Protection*, 120, 268-277.
- Körner, S., Lyatuu, G. B., & Vermaat, J. E. (1998). The influence of *Lemna gibba* L. on the degradation of organic material in duckweed-covered domestic wastewater. *Water Research*, 32(10), 3092-3098.
- Kudal, M., & Müftüoğlu, N. M. (2014). Kentsel Atıksu ile Sulanan Topraklarda Bazı Verimlilik Özelliklerinin İncelenmesi. *ÇOMÜ Ziraat Fakültesi Dergisi*, 2(1), 77-81.
- Kutoğlu, S., & Çiçek, E. (2017). Tatların Baraj Gölü'ndeki su kirliliğinin bazı Cyprinidae türlerine genotoksik etkisinin mikronükleus testi ile belirlenmesi (*Master's thesis, Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi*).
- Lam, E., & Michael, T. P. (2022). *Wolffia*, a minimalist plant and synthetic biology chassis. *Trends in Plant Science*, 27(5), 430-439.
- Landesman, L., Fedler, C., & Duan, R. (2010). Plant nutrient phytoremediation using duckweed. In *Eutrophication: Causes, consequences and control* (pp. 341-354). Springer, Dordrecht.
- Landesman, L., Fedler, C., & Duan, R. (2011). *Eutrophication: causes, consequences and control. Plant nutrient phytoremediation using duckweed*. Berlin: Springer Science+ Business Media BV, 341-354.
- Landolt, E. (1987). Biosystematic investigations in the family of duckweeds (Lemnaceae) (Vol 2). The family of Lemnaceae—a monographic study. *Veroeffentlichungen des Geobotanischen Instituts der ETH*, Vol 1, Stiftung Ruebel, Switzerland.
- Lee, C. J., Yangcheng, H., Cheng, J. J., & Jane, J. L. (2016). Starch characterization and ethanol production of duckweed and corn kernel. *Starch-Stärke*, 68(3-4), 348-354.
- Les, D. H., Crawford, D. J., Landolt, E., Gabel, J. D., & Kimball, R. T. (2002). Phylogeny and systematics of Lemnaceae, the duckweed family. *Systematic Botany*, 27(2), 221-240.
- Lin, L., Zhang, L., Cai, X., Liu, Q., Zhang, C., & Wei, C. (2018). The relationship between enzyme hydrolysis and the components of rice starches with the same genetic background and amylopectin structure but different amylose contents. *Food Hydrocolloids*, 84, 406-413.
- Liu, Y., Wu, T., White, J. C., & Lin, D. (2021). A new strategy using nanoscale zero-valent iron to simultaneously promote remediation and safe crop production in contaminated soil. *Nature Nanotechnology*, 16(2), 197-205.

- Liu, Y., Xu, H., Yu, C., & Zhou, G. (2021). Multifaceted roles of duckweed in aquatic phytoremediation and bioproducts synthesis. *Gcb Bioenergy*, 13(1), 70-82.
- Martínez-Cruz, P., Hernández-Martínez, A., Soto-Castor, R., Esquivel Herrera, A., & Rangel Levario, J. (2006). Use of constructed wetlands for the treatment of water from an experimental channel at Xochimilco, Mexico. *Hidrobiológica*, 16(3), 211-219.
- Masavang, S., Winckler, P., Tira-umphon, A., & Phahom, T. (2022). New insights into moisture sorption characteristics, nutritional composition, and antioxidant and morphological properties of dried duckweed [*Wolffia arrhiza* (L.) Wimm]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 102(5), 2135-2143
- McCrackin, M. L., Jones, H. P., Jones, P. C., & Moreno-Mateos, D. (2017). Recovery of lakes and coastal marine ecosystems from eutrophication: A global meta-analysis. *Limnology and Oceanography*, 62(2), 507-518.
- McNamara, M. (2020). Co-Optimization of duckweed biomass, nutritional quality & input-use efficiency for human consumption in space. *University of Colorado Boulder, Colorado, USA*.
- Mesut, A. K., & İlayda, T. O. P. (2018). Arıtılmış kentsel atıksuların tarımsal sulama amaçlı kullanımı. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 24(6), 1161-1168.
- Naskar, K., Banerjee, A. C., Chakraborty, N. M., & Ghosh, A. (1986). Yield of *Wolffia arrhiza* (L.) Horkel ex Wimmer from cement cisterns with different sewage concentrations, and its efficacy as a carp feed. *Aquaculture*, 51(3-4), 211-216.
- Nassouhi, D., Ergönül, M. B., Fikirdeşici, Ş., Karacakaya, P., & Atasagun, S. (2018). Ağır metal kirliliğinin biyoremediasyonunda sucul makrofitlerin kullanımı. *Süleyman Demirel Üniversitesi Eğirdir Su Ürünleri Fakültesi Dergisi*, 14(2), 148-165.
- Nivala, J., Hoos, M. B., Cross, C., Wallace, S., & Parkin, G. (2007). Treatment of landfill leachate using an aerated, horizontal subsurface-flow constructed wetland. *Science of The Total Environment*, 380(1-3), 19-27.
- Oluklulu, S. (2017). Kentsel atık su yönetimi: Türkiyede büyükşehir belediyelerinde kamusal mal ve hizmet olarak atık su arıtma tesislerinin etkinliğine dair bir inceleme.
- Pandey, N., Chandra, J., Xalxo, R., & Sahu, K. (2021). Concept and types of phytoremediation. *Approaches to the Remediation of Inorganic Pollutants*, 281-302.
- Pasinszki, T., & Krebsz, M. (2020). Synthesis and application of zero-valent iron nanoparticles in water treatment, environmental remediation, catalysis, and their biological effects. *Nanomaterials*, 10(5), 917.
- Paterson, J. B., Camargo-Valero, M. A., & Baker, A. (2020). Uncoupling growth from phosphorus uptake in *Lemna*: Implications for use of duckweed in wastewater remediation and P recovery in temperate climates. *Food and Energy Security*, 9(4), E244.

- Pelissari, C., Ávila, C., Trein, C. M., García, J., de Armas, R. D., & Sezerino, P. H. (2017). Nitrogen transforming bacteria within a full-scale partially saturated vertical subsurface flow constructed wetland treating urban wastewater. *Science of The Total Environment*, 574, 390-399.
- Petersen, F., Demann, J., Restemeyer, D., Olf, H. W., Westendarp, H., Appenroth, K. J., & Ulbrich, A. (2022). Influence of Light Intensity and Spectrum on Duckweed Growth and Proteins in a Small-Scale, Re-Circulating Indoor Vertical Farm. *Plants*, 11(8), 1010.
- Petersen, F., Demann, J., Restemeyer, D., Olf, H. W., Westendarp, H., Appenroth, K. J., & Ulbrich, A. (2022). Influence of light intensity and spectrum on duckweed growth and proteins in a small-scale, re-circulating indoor vertical farm. *Plants*, 11(8), 1010.
- Piotrowska, A., Bajguz, A., Godlewska-Żyłkiewicz, B., Czerpak, R., & Kamińska, M. (2009). Jasmonic acid as modulator of lead toxicity in aquatic plant *Wolffia arrhiza* (Lemnaceae). *Environmental and Experimental Botany*, 66(3), 507-513.
- Polińska, W., Kotowska, U., Kiejza, D., & Karpińska, J. (2021). Insights into the use of phytoremediation processes for the removal of organic micropollutants from water and wastewater; a review. *Water*, 13(15), 2065.
- Polińska, W., Piotrowska-Niczyporuk, A., Karpińska, J., Struk-Sokołowska, J., & Kotowska, U. (2022). Mechanisms, toxicity and optimal conditions-research on the removal of benzotriazoles from water using *Wolffia arrhiza*. *Science of The Total Environment*, 847, 157571.
- Priya, A., Avishek, K., & Pathak, G. (2012). Assessing the potentials of *Lemna minor* in the treatment of domestic wastewater at pilot scale. *Environmental Monitoring and Assessment*, 184(7), 4301-4307
- Qian, C., Wu, J., Wang, H., Yang, D., & Cui, J. (2023). Metabolomic profiles reveals the dose-dependent effects of rice grain yield and nutritional quality upon exposure zero-valent iron nanoparticles. *Science of The Total Environment*, 879, 163089.
- Rattanaporn, K., Tantayotai, P., Phusantisampan, T., Pornwongthong, P., & Sriariyanun, M. (2018). Organic acid pretreatment of oil palm trunk: effect on enzymatic saccharification and ethanol production. *Bioprocess and Biosystems Engineering*, 41, 467-477.
- Rizzi, L., Petruzzelli, G., Poggio, G., & Guidi, G. V. (2004). Soil physical changes and plant availability of Zn and Pb in a treatability test of phytostabilization. *Chemosphere*, 57(9), 1039-1046.
- Roman, B., & Brennan, R. A. (2019). A beneficial by-product of ecological wastewater treatment: An evaluation of wastewater-grown duckweed as a protein supplement for sustainable agriculture. *Ecological Engineering*, 142, 100004.
- Rusoff, L. L., Blakeney Jr, E. W., & Culley Jr, D. D. (1980). Duckweeds (Lemnaceae family): a potential source of protein and amino acids. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 28(4), 848-850.

- Saengthongpinit, W. (2017). Indigenous cuisine with a modern flare. *In Duckweed Forum* (Vol. 5, No. 8).
- Sela, I., Yaskolka Meir, A., Brandis, A., Krajmalnik-Brown, R., Zeibich, L., Chang, D., ... & Shai, I. (2020). *Wolffia globosa*–mankai plant-based protein contains bioactive vitamin B12 and is well absorbed in humans. *Nutrients*, 12(10), 3067.
- Shah, M., Hashmi, H. N., Ghumman, A. R., & Zeeshan, M. (2015). Performance assessment of aquatic macrophytes for treatment of municipal wastewater. *Journal of the South African Institution of Civil Engineering*, 57(3), 18-25.
- Shih, Y. H., & Tai, Y. T. (2010). Reaction of decabrominated diphenyl ether by zerovalent iron nanoparticles. *Chemosphere*, 78(10), 1200-1206.
- Soda, S., Kawahata, Y., Takai, Y., Mishima, D., Fujita, M., & Ike, M. (2013). Kinetics of nutrient removal and biomass production by duckweed *Wolffia arrhiza* in continuous-flow mesocosms. *Ecological Engineering*, 57, 210-215.
- Sońta, M., Rekiel, A., & Batorska, M. (2019). Use of duckweed (*Lemna L.*) in sustainable livestock production and aquaculture—a review. *Annals of Animal Science*, 19(2), 257-271.
- Spellman (2014) Handbook of water and wastewater treatment plant operations, 3rd edn. *Taylor and Francis group*, ISBN: 978-1-4665-5385-5
- Spellman, F. R. (2017). *The drinking water handbook*. *CRC Press*.
- Sree, K. S., Bog, M., & Appenroth, K. J. (2016). Taxonomy of duckweeds (*Lemnaceae*), potential new crop plants. *Emirates Journal of Food and Agriculture*, 291-302.
- Sree, K. S., Sudakaran, S., & Appenroth, K. J. (2015). How fast can angiosperms grow? Species and clonal diversity of growth rates in the genus *Wolffia* (*Lemnaceae*). *Acta Physiologiae Plantarum*, 37, 1-7.
- Stewart, J. J., Adams III, W. W., López-Pozo, M., Doherty Garcia, N., McNamara, M., Escobar, C. M., & Demmig-Adams, B. (2021). Features of the duckweed *Lemna* that support rapid growth under extremes of light intensity. *Cells*, 10(6), 1481.
- Subbarao, G. V., & Searchinger, T. D. (2021). A “more ammonium solution” to mitigate nitrogen pollution and boost crop yields. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 118(22), e2107576118.
- Suebsamran, I., Dachyong, A., Tira-Umphon, A., Soubsub, K., & Phahom, T. (2023). Structural changes kinetics, drying characteristics, antioxidant properties and the correlation between quality parameters of dried duckweed (*Wolffia arrhiza* (L.) Wimm) affected by different microwave powers. *Journal of the Science of Food and Agriculture*.
- Suppadit, T. (2011). Nutrient removal of effluent from quail farm through cultivation of *Wolffia arrhiza*. *Bioresource technology*, 102(16), 7388-7392.
- Suppadit, T., Phoochinda, W., Phuthilerphong, S., & Nieobubpa, C. (2008). Treatment of effluent from shrimp farms using watermeal (*Wolffia arrhiza*). *Scienceasia*, 34, 163-168.

- Tao, X., Fang, Y., Xiao, Y., Jin, Y. L., Ma, X. R., Zhao, Y., ... & Wang, H. Y. (2013). Comparative transcriptome analysis to investigate the high starch accumulation of duckweed (*Landoltia punctata*) under nutrient starvation. *Biotechnology for Biofuels*, 6(1), 1-15.
- Tarlan, E., Gür, K. ve Yılmaz, Z. (2005). S.Ü. Kampüs atık sularının karakterizasyonu ve su mercimeği (*Lemna minor* L.) ile arıtılabilirliği. *Selçuk Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 20, 4-12.
- Taş, B., & Dalkıran, T. G. (2022). Investigation of the effect of zero-valent iron nanoparticle on *Chlorella* sp. growth in autotrophic, mixotrophic and heterotrophic cultures. *Review of Hydrobiology*, 15, 1-20.
- Taş, B., & Topaldemir, H. (2021). Assessment of aquatic plants in the Miliç Coastal Wetland (Terme, Samsun, Turkey). *Review of Hydrobiology*, 14(1-2), 1-23.
- Taş, B., Şengüllendi, F.T (2023). Farklı LED ışıklar altında yetiştirilen köksüz su mercimeğinin (*Wolffia arrhiza*) Dumas yöntemi kullanılarak ham protein içeriğinin belirlenmesi. *Aquatic Research*, 6(3), 189-200.
- Taş, B., & Şengüllendi, F.T. (2022b). Effect of different led lights on the element content of rootless duckweed. *7th Asia Pacific International Modern Sciences Congress, November 4-5, 2022/Jakarta, Indonesia, VII - Proceedings Book*, 163–173.
- Taş, B., & Şengüllendi, F.T. (2023). Farklı LED ışıklar altında yetiştirilen köksüz su mercimeğinin (*Wolffia arrhiza*) Dumas yöntemi kullanılarak ham protein içeriğinin belirlenmesi. *Aquatic Research*, 6(3), 189-200.
- Temel, F. A. (2017). Endüstriyel atıksuların arıtımında yapay sulak alanların kullanımı. *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi*, 8(1), 213-226.
- Tippery NP, Les DH, & Crawford DJ (2015). Evaluation of phylogenetic relationships in Lemnaceae using nuclear ribosomal data. *Plant Biology*, 17(1), 50–58.
- Tippery, N. P., & Les, D. H. (2020). Tiny plants with enormous potential: phylogeny and evolution of duckweeds. *The Duckweed Genomes*, 19-38.
- Tiwari, A. (2021). Impact Of *Wolffia Arrhiza* Extracts On Growth Behaviour Of Rajmash Plant. *Indian Journal of Scientific Research*, 11(2), 131-135.
- Tokmak, M., Bertiz, D., Özbey, D., Ekşi, I., Ak, M. & Güneş, A. (2019). Design proposal model for improving rivers with phytoremediation method. *International Journal of Landscape Architecture Research (IJLAR)*, 3(1): 31–38.
- Topal, M., Karagözoğlu, B., Öbek, E., & Arslan Topal, E. I. (2011). Bazı su mercimeklerinin nutrient gideriminde kullanımı. *Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 2(2), 12-28.
- Topal, M., Karagözoğlu, B., & Öbek, E. (2013). Sızıntı suyunun arıtımı için su mercimekleri karışımının kullanılması: I. Nutrientler. *Cumhuriyet Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Fen Bilimleri Dergisi*, 34(1), 1-20.
- Tuntulweat, M., & Tuntulweat, M. (2004). Chemistry of water and wastewater.

- Turan, F., & Ülkü, G. (2013). Gökpınar ve Çürüksu çaylarının kirlilik parametre ve yüklerinin izlenmesi. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 19(3), 133-144.
- TÜBİTAK-MAM (2011). Yapay sulak alanlar el kitabı. Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu-Marmara Araştırma Merkezi, Çevre Enstitüsü, Kocaeli, 111
- Türk, H., & Hanay, Özge, (2017). Nano boyutlu sıfır değerlikli demir ile sulu ortamlarda klortetrasiklin giderim mekanizmasının incelenmesi. *Sakarya University Journal of Science*, 21(5), 1000-1007.
- Ullrich, R.W., Larsson, M., Larsson, C.M., Lesch, S., & Novacki, A. (1984). Ammonium uptake in LemnagibbaG1, related membran potential changes, and inhibition of an ion uptake. *Physiol. Plant*, Vol. 61, 369-376.
- Ustaoğlu, F., Taş, B., Tepe, Y., & Topaldemir, H. (2021). Comprehensive assessment of water quality and associated health risk by using physicochemical quality indices and multivariate analysis in Terme River, Turkey. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(44), 62736-62754.
- Üçüncü, O. (2019). Atıksu Arıtımı, Atıksu Deşarjı, Su Kirliliği ve Halk Sağlığı: Trabzon İli Örneği. *Türk Hidrolik Dergisi*, 3(2), 14-29.
- Üstün, G., & Tırpancı, A. (2015). Gri suyun arıtımı ve yeniden kullanımı. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 20(2), 119-139.
- Van Dam, R. A., Hogan, A. C., McCullough, C. D., Houston, M. A., Humphrey, C. L., & Harford, A. J. (2010). Aquatic toxicity of magnesium sulfate, and the influence of calcium, in very low ionic concentration water. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 29(2), 410-421.
- Vatta, G., Rota, R., Boniardi, N., & Nano, G. (1994). Removal of water pollutants by Lemna gibba. *Chemical Engineering Journal*, 57, B37-B48.
- Vymazal, J. (2001). Types of constructed wetlands for wastewater treatment: their potential for nutrient removal. Transformations of nutrients in natural and constructed wetlands, 1-93.
- Vymazal, J. (2010). Constructed wetlands for wastewater treatment. *Water*, 2(3), 530-549.
- Vymazal, J. (2022). The historical development of constructed wetlands for wastewater treatment. *Land*, 11(2), 174.
- Walsh, É., Kuehnhold, H., O'Brien, S., Coughlan, N. E., & Jansen, M. A. (2021). Light intensity alters the phytoremediation potential of Lemna minor. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(13), 16394-16407.
- Walsh, É., Paolacci, S., Burnell, G., & Jansen, M. A. (2020). The importance of the calcium-to-magnesium ratio for phytoremediation of dairy industry wastewater using the aquatic plant *Lemna minor* L. *International Journal of Phytoremediation*, 22(7), 694-702.
- Wang, P., Chen, S., Gu, M., Chen, X., Chen, X., Yang, J., ... & Ye, N. (2020). Exploration of the effects of different blue LED light intensities on flavonoid and

- lipid metabolism in tea plants via transcriptomics and metabolomics. *International Journal of Molecular Sciences*, 21(13), 4606.
- Wang, W., & Messing, J. (2011). High-throughput sequencing of three Lemnoideae (duckweeds) chloroplast genomes from total DNA. *PLoS one*, 6(9), e24670.
- Wang, W., Yang, C., Tang, X., Gu, X., Zhu, Q., Pan, K., Hu, Q., & Ma, D. (2014). Effects of high ammonium level on biomass accumulation of common duckweed *Lemna minor* L. *Environmental Science and Pollution Research*, 21(24), 14202-14210.
- Wang, X. L., Gao, G. Q., Liu, B., Gong, Z. H., Luo, J., Wang, K., ... & Huang, T. (2020). Distribution of duckweed germplasm resources and its response to water environment factors in Poyang Lake basin. *Chinese Journal of Applied & Environmental Biology*, 26(4), 999-1008
- Xu, J., Cui, W., Cheng, J. J., & Stomp, A. M. (2011). Production of high-starch duckweed and its conversion to bioethanol. *Biosystems Engineering*, 110(2), 67-72.
- Y. Liu, J. Chen, in *Encyclopedia of Ecology (Second Edition)*, 2014
- Yang, G. L., Feng, D., Liu, Y. T., Lv, S. M., Zheng, M. M., & Tan, A. J. (2021). Research progress of a potential bioreactor: *Duckweed*. *Biomolecules*, 11(1), 93.
- Yang, M., Wu, X., He, C., Zhang, J., Hou, J., & Lin, D. (2023). nZVI-induced iron poisoning aggravated the toxicity of TCEP to earthworm in soil. *Environmental Pollution*, 317, 120785.
- Yansın, Ç., & Çeçen (2001) Düzenli depolama sızıntı sularında seyrelme ve manometrik yöntemlerle biyokimyasal oksijen ihtiyacı (BOİ) ölçümü. XV. *Ulusal Kimya Kongresi*, İstanbul, 2001.
- Yılmaz, Ö., & Taş, B. (2021). Feasibility and assessment of the phytoremediation potential of green microalga and duckweed for zeta-cypermethrin removal. *Desalination and Water Treatment*, 209, 131-143.
- Yiğit, E. S., & Kayranlı, B. (2022). Yapay sulak alan atık su arıtma sistemlerin evsel atık suların arıtılmasında kullanılmasında karşılaşılan sorunlar ve öneriler. *Aksaray University Journal of Science and Engineering*, 6(1), 17-26.
- Yinanç, A., & Adiloğlu, S. (2017). Arıtmada doğal bitkilerin kullanımı, modeller ve pilot çalışma örneği: Kozan ilçesi. *Tekirdağ Ziraat Fakültesi Dergisi*, 14(1), 114-124.
- Zabed, H., Sahu, J. N., Suely, A., Boyce, A. N., & Faruq, G. (2017). Bioethanol production from renewable sources: Current perspectives and technological progress. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 71, 475-501.
- Zhang, D. Q., Jinadasa, K. B. S. N., Gersberg, R. M., Liu, Y., Tan, S. K., & Ng, W. J. (2015). Application of constructed wetlands for wastewater treatment in tropical and subtropical regions (2000–2013). *Journal of Environmental Sciences*, 30, 30-46
- Zhang, D., Gersberg, R. M., & Keat, T. S. (2009). Constructed wetlands in China. *Ecological Engineering*, 35(10), 1367-1378.

- Zhang, K., Chen, Y. P., Zhang, T. T., Zhao, Y., Shen, Y., Huang, L., Zhang, K., Chen, Y. P., Zhang, T. T., Zhao, Y., Shen, Y., Huang, L., Gao, X., & Guo, J. S. (2014). The logistic growth of duckweed (*Lemna minor*) and kinetics of ammonium uptake. *Environmental Technology*, 35(5), 562-567.
- Zhong, Y., Wang, L., Ma, Z., & Du, X. (2022). Physiological responses and transcriptome analysis of *Spirodela polyrhiza* under red, blue, and white light. *Planta*, 255, 1-15.
- Zhu, S., & Chen, H. (2014). The fate and risk of selected pharmaceutical and personal care products in wastewater treatment plants and a pilot-scale multistage constructed wetland system. *Environmental Science and Pollution Research*, 21(2), 1466-1479
- Ziegler, P., Adelman, K., Zimmer, S., Schmidt, C., & Appenroth, K. J. (2015). Relative in vitro growth rates of duckweeds (Lemnaceae)—the most rapidly growing higher plants. *Plant Biology*, 17, 33-41.
- Ziegler, P., Sree, K. S., & Appenroth, K. J. (2016). Duckweeds for water remediation and toxicity testing. *Toxicological & Environmental Chemistry*, 98(10), 1127-1154.
- Zwolsman, J. J. G., & Van Bokhoven, A. J. (2007). Impact of summer droughts on water quality of the Rhine River—a preview of climate change? *Water Science and Technology*, 56(4), 45-55.

ÖZGEÇMİŞ

Eğitim Bilgileri	
Lisans	
Üniversite	Atatürk Üniversitesi
Fakülte	Kazım Karabekir Eğitim Fakültesi
Bölümü	Biyoloji Eğitimi/Öğretmenliği
Mezuniyet Yılı	08.07.2000
Yüksek Lisans	
Üniversite	Ordu Üniversitesi
Enstitü Adı	Fen Bilimleri Enstitüsü
Anabilim Dalı	Moleküler Biyoloji ve Genetik Anabilim Dalı
Mezuniyet Tarihi	.../.../ 2023
Yayınlar	
Uluslararası Yayın	Arslan Günal, S., & Taş, B. (2022). Uzay çalışmalarında biyorejeneratif yaşam destek sistemleri için potansiyel bir tür: Dünyanın en küçük spermatofiti, köksüz su mercimeği (<i>Wolffia arrhiza</i>). <i>International Scientific Research Congress Dedicated to the 30th Anniversary of Baku Eurasia University</i> , Proceedings Book, 305–316.
Projeler	Araştırmacı: <i>Wolffia arrhiza</i> (Lemnaceae) kullanarak belediye atık sularından nütrient elementlerin uzaklaştırılması. Ordu Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi, B-2210 nolu proje.
Diğer Etkinlikler	
2006-2007	Milli Eğitim Bakanlığı Eğitim Araştırma ve Geliştirme Dairesi Bakanlığı “İlköğretim Öğrencilerine Yönelik Fen ve Matematik Proje” Yarışmasında Türkiye Birinciliği
2019-2020	TEKNOFEST GAZİANTEP 2020_kapsamında ‘Akıllı Ulaşım Yarışmasında Türkiye Finalistliği
2008- 2009	TÜBİTAK “Ortaöğretim Öğrencileri Arası Araştırma Projeleri” Bölge Yarışması’nda Bölge Finalistliği
2017-2018	“Ortaöğretim Öğrencileri Arası Araştırma Projeleri Bölge Yarışmasında Bölge Finalistliği
26/10/2021	“F20B661” nolu Projede yürütücülük

26/10/2021 “F20B66” nolu Projede danışmanlık
24/05/2018 “J18B942” nolu fuarda danışmanlık
24/05/2018 “J18B942” nolu fuarda yürütücülük görevi
2016-2017 TÜBİTAK “Ortaöğretim Öğrencileri Arası Araştırma Projeleri” Bölge Yarışmasında Bölge Finalist Projesine Rehberlik
2016-2017 TÜBİTAK “Ortaöğretim Öğrencileri Arası Araştırma Projeleri” Türkiye Yarışmasında Finalist Projesine Rehberlik
2017-2018 TÜBİTAK tarihinde düzenlenen “Ortaöğretim Öğrencileri Arası Araştırma Projeleri” Bölge Yarışmasında Bölge Finalist Projesine Rehberlik
2006-2007 “Bu Benim Eserim” Türkiye Finalist Projesine Rehberlik
02.10.2020 “Milli Teknoloji Hamlesi” Kapsamında Rehberlik
2006-2007 Eğitim- öğretim yılında “Bu Benim Eserim” proje yarışmasında bölge finalist t projesine rehberlik
28-30/5/2009 Uluslararası 6. İzmir Eğitim ve Bilim Olimpiyatları Türkiye Finalist
5/06/2013 Giresun Valiliği İl Milli Eğitim Müdürlüğü Bilim Şenliği Rehberlik
2018-2019 4. İyilik Okulları Uygulamalı İyilik Projesinde Rehberlik
2021-2022 5. 4. İyilik Okulları Uygulamalı İyilik Projesinde rehberlik
2011-2012 TÜBİTAK tarihinde düzenlenen “Ortaöğretim Öğrencileri Arası Araştırma Projeleri” Bölge Yarışmasında Bölge Finalist Projesine Rehberlik
2012-2013 TÜBİTAK tarihinde düzenlenen “Ortaöğretim Öğrencileri Arası Araştırma Projeleri” Bölge Yarışmasında Bölge Finalist Projesine Rehberlik
2013-2014 TÜBİTAK tarihinde düzenlenen “Ortaöğretim Öğrencileri Arası Araştırma Projeleri” Bölge Yarışmasında Bölge Finalist Projesine Rehberlik
2015-2016 TÜBİTAK tarihinde düzenlenen “Ortaöğretim Öğrencileri Arası Araştırma Projeleri” Bölge Yarışmasında Bölge Finalist Projesine Rehberlik

2016-2017 TUBİTAK tarihinde düzenlenen
“Ortaöğretim Öğrencileri Arası Araştırma Projeleri” Bölge
Yarışmasında Bölge Finalist Projesine Rehberlik