

T.C.
ONDOKUZ MAYIS ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI



**TARIMSAL DRENAJ SULARININ YAPAY SULAK ALAN VE
REAKTİF BARIYER SİSTEMLERİYLE İYİLEŞTİRİLMESİ**

Yüksek Lisans Tezi

İremnaz GÜLMÜŞ

Danışman
Doç. Dr. Emre Burcu ÖZKARAOVA

Bu çalışma Ondokuz Mayıs Üniversitesi tarafından PYO.MUH.1904.22.013 proje numarası ile desteklenmiştir.

SAMSUN
2022

BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK BEYANI

Hazırladığım Yüksek Lisans tezinin bütün aşamalarında bilimsel etiğe ve akademik kurallara riayet ettiğimi, çalışmada doğrudan veya dolaylı olarak kullandığım her alıntıya kaynak gösterdiğimi ve yararlandığım eserlerin Kaynaklar'da gösterilenlerden oluştuğunu, her unsurun enstitü yazım kılavuzuna uygun yazıldığını ve TÜBİTAK Araştırma ve Yayın Etiği Kurulu Yönetmeliği'nin 3. bölüm 9. maddesinde belirtilen durumlara aykırı davranılmadığını taahhüt ve beyan ederim.

Etik Kurul Gerekli mi?

Evet (Gerekli ise ekler kısmına ekleyiniz)

Hayır

... /... / 2022

İremnaz GÜLMÜŞ

TEZ ÇALIŞMASI ÖZGÜNLÜK RAPORU BEYANI

Tez Başlığı: TARIMSAL DRENAJ SULARININ YAPAY SULAK ALAN VE REAKTİF BARIYER SİSTEMLERİYLE İYİLEŞTİRİLMESİ

Yukarıda başlığı belirtilen tez çalışması için şahsım tarafından 30.05.2022 tarihinde intihal tespit programından alınmış olan özgünlük raporu sonucunda;

Benzerlik oranı : % 6

Tek kaynak oranı : % 2 çıkmıştır.

İmza

... /... / 2022

Doç. Dr. Emre Burcu ÖZKARAOVA

ÖZET

TARIMSAL DRENAJ SULARININ YAPAY SULAK ALAN VE REAKTİF BARIYER SİSTEMLERİYLE İYİLEŞTİRİLMESİ

İremnaz GÜLMÜŞ

Ondokuz Mayıs Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Çevre Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Yüksek Lisans, Temmuz/2022

Danışman: Doç. Dr. Emre Burcu ÖZKARAOVA

Dünya, nüfusunun katlanarak artması ve sanayi anlamında hiç durmadan gelişme göstermesi, sınırlı su kaynaklarının kullanımının artmasına sebep olmuştur. Bu yüzden önüne geçemediğimiz bu gelişmelere alternatif çözümler arayarak ve kaynaklara takviyeler yapılması sağlanarak entegre projeler geliştirilmeli ve çözüm yolları aranmalıdır. Bu amaçla çalışmada yapay sulak alan ve aktif bariyer sistemi bir arada kullanılarak literatür kapsamında birleşik sistem uygulamalarına örnek teşkil etmesi istenmiştir. Tarımsal drenaj sularındaki dönemsel kirlilik yüklerindeki ve debilerindeki farklılıklar göz önüne alınarak bu seçime gidilmiştir. Birleşik sistemin yapay sulak alan kısmında yüzer bitkiler olarak Lemna minor ve Pistia kullanımı sağlanmıştır. Batık bitkiler için Elodea densa, Micranthemum micranthemoides, Ceratophyllum demersum bitkileri kullanılmıştır. Ayrıca aktif bariyer sisteminde kenevir kökü kullanımı bulunmayan ama dünya üzerinde oldukça farklı alanlarda iyileştirici özellikleri bilinen kenevirin artığı olarak kullanımı sağlanmıştır. Reaktif bariyer sisteminde kullanılan kenevir nitrat giderimi için, kalsine midye kabuğu fosfat için, zeolit ise amonyum giderimi için kullanılmıştır.

Çalışmanın hem sistem olarak sürekli birleşik sistem oluşu hem de yapay sulak alan ve reaktif bariyer kısımlarında kullanılan bitki ve reaktifler yenilikçi bir çalışma kapsamında literatüre katkı sağlamaktadır. Sistemlerde nitrat azotu ($\text{NO}_3\text{-N}$), amonyum azotu ($\text{NH}_4\text{-N}$), fosfat (PO_4), pH, çözünmüş oksijen (ÇO) ve elektriksel iletkenlik (EC) sonuçları değerlendirilmiştir. Çalışmalar kesikli sistem çalışmalarının ardından sürekli drenaj suyu akışlı sistemde test edilmiştir. Sulak alan sisteminde gerçekleştirilen kesikli çalışmalar esnasında Lemna minor, Elodea densa ve Micranthemum bitkileri %90'ın üzerinde $\text{NO}_3\text{-N}$ giderim verimine sahip olarak bulunmuştur. Pistia bitkisinin %80 verimle $\text{NH}_4\text{-N}$ giderimi sağladığı kaydedilmiştir. Sürekli akışlı sistemde birleşik sistem çalışmaları 16 gün boyunca 12,5 mL/dk hızla sisteme beslenen sentetik drenaj suyu yaklaşık 10 mg/L nitrat, 1 mg/L amonyum, 0,1 mg/L fosfat ve 1 g/L sodyum klorür içermektedir. Yüksek tuzluluğa sahip drenaj suyu akışı altında birleşik sistem çıkışında nitratın %95'i, amonyumun %74'ü uzaklaştırılmıştır. Fosfat miktarı sürekli akış altında artış göstermiştir.

Sistemde devamlılığın sağlanabilmesi ve verimin arttırılabilmesi için sunulan öneriler; karbon miktarının artırmadaki öneminden dolayı kenevir organığının sistemdeki miktarı reaktör tasarımı değiştirilerek arttırılabilir. Sistemi destekleyen sulak alan tankındaki bitkilerin miktarı ve çeşidi değerlendirilerek ve geliştirilerek drenaj suyu reaktif sistemine aktarılmadan önce fosfat ve amonyum miktarı daha da azaltılabilir.

Anahtar Sözcükler: Yapay sulak alan, Tarımsal drenaj, Geçirgen reaktif bariyer, Amonyum ve nitrat giderimi

ABSTRACT

IMPROVEMENT OF AGRICULTURAL DRAINAGE WATER WITH ARTIFICIAL WETLAND AND REACTIVE BARRIER SYSTEMS

İremnaz GÜLMÜŞ

Ondokuz Mayıs University

Institute of Graduate Studies

Department of Environmental Engineering

Master, July/2022

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Emre Burcu ÖZAKARAOVA

The exponential increase in the population of the world and its unceasing development in terms of industry have led to an increase in the use of limited water resources. Therefore, by seeking alternative solutions to these developments that we cannot prevent and by providing reinforcements to the resources, integrated projects should be developed and solutions should be sought. For this reason a combination of artificial wetland with reactive barrier (PRB) systems was evaluated as an example. This combination was decided regarding the variable nature of agricultural drainage water flow rate and contaminant load. In the artificial wetland part of the combined system, *lemna minor* and *pistia* were used as floating plants. *Elodea densa*, *micranthemum micranthemoides*, *ceratophyllum demersum* plants were used for submerged plants. Roots as residues from a plantation of hemp, a known plant for the health and textile sectors, was investigated as a substrate for PRB for the first time. In the PRB system hemp roots were used for nitrate removal, calcined mussel shell for phosphate and zeolite for ammonium removal.

The fact that the study is a continuous unified system as well as the plants and reagents used in the artificial wetland and reactive barrier parts contribute to the literature within the scope of an innovative study. Nitrate nitrogen ($\text{NO}_3\text{-N}$), ammonium nitrogen ($\text{NH}_4\text{-N}$), phosphate (PO_4), pH, dissolved oxygen (DO) and electrical conductivity (EC) results were evaluated in the systems. The studies were tested in the system with continuous drainage water flow after the intermittent system studies. During the intermittent studies carried out in the wetland system, *Lemna minor*, *Elodea densa* and *Micranthemum* plants were found to have a $\text{NO}_3\text{-N}$ removal efficiency of over 90 %. It has been noted that the *Pistia* plant provides $\text{NH}_4\text{-N}$ removal with 80 % efficiency. Combined system studies in continuous flow system, synthetic drainage water fed into the system at a rate of 12,5 mL/min for 16 days contains approximately 10 mg/L nitrate, 1 mg/L ammonium, 0,1 mg/L phosphate and 1 g/L sodium chloride. Under high salinity drainage water flow, 95 % of nitrate and 74 % of ammonium were removed at the combined system outlet. The amount of phosphate increased under continuous flow.

Suggestions offered to ensure continuity in the system and increase efficiency; Due to the importance of carbon content in treatment, the amount of hemp organic in the system can be increased by changing the reactor design. By evaluating and improving the amount and variety of plants in the wetland tank that supports the system, the amount of phosphate and ammonium can be further reduced before the drainage water is transferred to the reactive system.

Keywords: Artificial wetland, Agricultural drainage, Permeable reactive barrier, Ammonium and nitrate removal

ÖN SÖZ VE TEŞEKKÜR

Lisans ve Yüksek Lisans eğitimim boyunca çalışmalarım esnasındaki tüm yardımlarının yanında insani ve ahlaki olarak gelişmeye katkı sağlayan ve her koşulda yanımda olan değerli danışman hocam Doç. Dr. Emre Burcu ÖZKARAOVA'ya teşekkür ederim.

Yüksek lisans eğitimimde ders alma fırsatı bulduğum ve saygı değer hocalarıma ve Ondokuz Mayıs Üniversitesi Çevre Mühendisliği Bölümü'nde kendimi geliştirmeme katkı sağlayan herkese teşekkürü borç bilirim. Çalışmalarına yardımcı olan Ondokuz Mayıs Üniversitesi Seramik Bölümü'nden, Doktor Öğretim Üyesi Fidan TONZA HELVACIKARA'ya teşekkürlerimi sunarım.

Yüksek lisans eğitimim boyunca hayatımın her evresinde olduğu gibi maddi ve manevi desteklerini hiç eksik etmeyen ve bana daima inanarak güç veren annem Hülya BULUT'a ve babam Sakip GÜLMÜŞ'e sonsuz kez teşekkür ederim. Bu yolda psikolojik olarak bana katkıda bulunan canım kardeşim Melisa GÜLMÜŞ'e ve motivasyon kaynağım olan küçük kardeşlerim Yiğithan ve Merthan GÜLMÜŞ'e sevgilerimi ve teşekkürlerimi iletirim.

Tüm bunların yanında her zaman yanımda olan ve beni sürekli destekleyen, motive eden ve çalışmalarım esnasında fikirleriyle ufkumu açan Samet ASLANTÜRK'e teşekkür ederim.

İremnaz GÜLMÜŞ

İÇİNDEKİLER

TEZ KABUL VE ONAYI	i
BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK BEYANI	ii
TEZ ÇALIŞMASI ÖZGÜNLÜK RAPORU BEYANI	ii
ÖZET	iii
ABSTRACT.....	iv
ÖN SÖZ VE TEŞEKKÜR.....	v
İÇİNDEKİLER.....	vi
SİMGELER VE KISALTMALAR	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ	xi
TABLolar DİZİNİ	xiii
1. GİRİŞ	1
2. GENEL BİLGİLER.....	3
2.1. Tarımsal Drenaj	3
2.1.1. Tarımsal Drenaj Şekilleri	3
2.1.1.1. Yeraltı drenajı.....	3
2.1.1.2. Yüzey Drenajı.....	4
2.1.2. Drenaj Suyunun Kalitesi	4
2.1.3. Drenaj Suyu Kalitesini Etkileyen Faktörler	4
2.1.3.1. Drenaj Suyu İçeriğindeki Kirleticiler	6
2.2. Yapay Sulak Alan Sistemleri	7
2.2.1. Yapay Sulak Alan Sistemi Çeşitleri.....	7
2.2.1.1. Serbest Yüzey Akışlı Yapay Sulak Alan Sistemleri (SYA)	7
2.2.1.2. Yüzey Altı Akışlı Yapay Sulak Alan Sistemleri (YASA).....	10
2.2.2. Yapay Sulak Alanlarda Kirleticiler Giderim Mekanizmaları.....	12
2.2.3. Yapay Sulak Alanlarda Giderilen Başlıca Kirleticiler	13
2.2.3.1. Askıda Katı Madde Giderimi (AKM)	13
2.2.3.2. Biyokimyasal Oksijen İhtiyacı (BOİ).....	13
2.2.3.3. Azot	14
2.2.3.4. Fosfor.....	14
2.2.4. Yenilikçi Yapay Sulak Alan Sistemleri	15
2.2.4.1. YSA’lardaki Son Gelişmeler	15
2.3. Reaktif Bariyer Sistemleri.....	22
2.3.1. GRB Türleri	23
2.3.2. Geçirimli Reaktif Bariyer Sistemlerindeki İyileştirme Süreçleri.....	24
2.3.3. Reaktifler ve Reaksiyon Mekanizmaları.....	25
2.3.4. GRB’lerin avantaj ve dezavantajları	28
2.3.5. GRB Sistemleriyle Gerçekleştirilen Nutrient Giderimi Çalışmaları.....	28
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	30
3.1. Materyaller	30
3.1.1. Deneysel Çalışmalarda Kullanılan Sentetik Drenaj Suları	30
3.1.2. Deneysel Çalışmalarda Kullanılan Bitkiler.....	31
3.1.2.1. Elodea Densa	31
3.1.2.2. Lemna Minor	32
3.1.2.3. Micranthemum Micranthemoides.....	32
3.1.2.4. Pistia (Su Marulu).....	32
3.1.2.5. Ceratophyllum Demersum.....	33
3.1.3. Deneysel Çalışmalarda Kullanılan Reaktifler.....	33
3.1.3.1. Kenevir	33
3.1.3.2. Zeolit.....	33
3.1.3.3. Midye Kabukları (Cardiidae).....	35
3.2. Deneysel Çalışma	35
3.2.1. Kesikli Çalışmalar.....	37

3.2.1.1. Reaktiflerin Arıtım Potansiyellerinin Araştırılması.....	37
3.2.1.2. Bitkilerin Arıtım Potansiyellerinin Araştırılması	39
3.2.2. Sürekli Akışlı Çalışmalar	40
3.2.2.1. Deney Düzenegi ve Hazırlık Çalışması.....	40
3.2.2.2. Sürekli Akışlı Sistemin Çalıştırılması	42
3.2.3. Analiz Yöntemleri.....	43
3.2.4. Hesaplamalar.....	44
3.2.4.1. Kirletici Giderim Verimlerinin Hesaplanması.....	44
3.2.5. Kullanılan Kimyasallar ve Cihazlar	44
3.2.5.1. Kullanılan Cihazlar	44
3.2.5.2. Kullanılan Kimyasallar.....	45
4. DENEYSEL BULGULAR VE DEĞERLENDİRME.....	46
4.1. Kesikli Çalışmalar.....	46
4.1.1. Yapay Sulak Alan Bitki Türlerinin Seçimi	46
4.1.2. Reaktiflerin Seçimi	52
4.1.2.1. Nitrat Giderici Reaktif Seçimi.....	52
4.1.2.2. Amonyum Giderimi İçin Reaktif Seçimi.....	54
4.1.2.3. Fosfat Giderimi İçin Reaktif Seçimi.....	56
4.2. Sürekli Sistem Çalışmaları.....	57
4.2.1. Sürekli Akışın Yapay Sulak Alan Üzerine Etkileri.....	57
4.2.2. Sürekli Akışın Reaktif Tankı Üzerine Etkileri.....	59
4.2.3. Birleşik Sistemin Kirletici Konsantrasyonu Üzerindeki Etkileri	62
4.2.4. Sürekli sistemde KOİ değişimleri	64
4.2.5. Birleşik Sistemdeki pH, EC ve ÇO Değişimleri	65
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	66
6. KAYNAKÇA.....	69
ÖZ GEÇMİŞ.....	75

SİMGELER VE KISALTMALAR

AAC	: Otoklavlanmış Beton
ABS	: Absorbsiyon
AKM	: Askıda Katı Madde
Al ₂ O ₃	: Alüminyum oksit
Am	: Amerikyum
AOX	: Adsorplanabilir organik halojenürler
As	: Arsenik
BOİ	: Biyokimyasal Oksijen İhtiyacı
BTEX	: Benzen, Toluen, Etilbenzen ve Ksilen
C ₃ H ₈ O ₃	: Gliserin
Ca	: Kalsiyum
CaO	: Kalsiyum Oksit
Cd	: Kaldmiyum
Ce	: Seryum
CEC	: Katyon Değişirme Kapasitesi
CH ₄	: Metan
Cl ⁻	: Klor
Co	: Kobalt
CO	: Karbon Monoksit
CO ₂	: Karbon Dioksit
Cr	: Krom
Cr ₂ O ₃	: Kromyum(III) Oksit
Cs	: Sezyum
Cu	: Bakır
ÇF	: Partiküler Fosfor
ÇIK	: Çözünmüş İnorganik Karbon
ÇO	: Çözünmüş Oksijen
ÇOF	: Çözünmüş Organik Fosfor
ÇOK	: Çözünmüş Organik Karbon
DYSA	: Dikey yüzey altı akışlı yapay sulak alan sistemleri
EC	: Elektriksel İletkenlik
Fe	: Demir
Fe ₂ O ₃	: Demir (III) Oksit

GAC	: Granüler Aktif Karbon
GRB	: Geçirgen Reaktif Bariyer
H ⁺	: Hidrojen İyonu
HCl	: Hidroklorik Asit
Hg	: Cıva
HTS	: Hidrolik Tutma Süresi
HYT	: Hidrolik Yükleme Hızı
K ⁺	: Potasyum
K ₂ Cr ₂ O ₇	: Potasyum Dikromat
KH ₂ PO ₄	: Mono Potasyum Fosfat
K ₂ O	: Potasyum Oksit
KOİ	: Kimyasal Oksijen İhtiyacı
MgO	: Magnezyum Oksit
MnO	: Manganez
Mo	: Molibden
Na ⁺	: Sodyum
NaCl	: Sodyum Klorür
NaNO ₃	: Sodyum nitrat
Na ₂ O	: Sodyum Oksit
NH ₄	: Amonyum
NH ₄ -N	: Amonyum azotu
(NH ₄) ₂ SO ₄	: Amonyum sülfat
Ni	: Nikel
NO ₂	: Nitrit
NO ₂ -N	: Nitrit Azotu
NO ₃	: Nitrat
NO ₃ -N	: Nitrat Azotu
PAH	: Polisiklik aromatik hidrokarbonlar
Pb	: Kurşun
pH	: Çözünmüş Hidrojen İyonu
PO ₄	: Fosfat
P ₂ O ₅	: Fosfor Pentoksit
PF	: Partiküler Fosfor
POF	: Partiküler Organik Fosfor
POK	: Partiküler Organik Karbon

Se	: Selenyum
SiO ₂	: Silisyum Dioksit
SnCl ₂	: Kalay (II) Klorür
SO ₂	: Kükürt Dioksit
Sr	: Strontium
SYA	: Serbest yüzey akışlı yapay sulak alan sistemleri
Tc	: Teknesyum
TN	: Toplam Azot
VOC	: Uçucu Organik Bileşik
YSA	: Yüzey altı akışlı yapay sulak alan sistemleri
YASA	: Yapay Sulak Alan
YYSA	: Yatay yüzey altı akışlı yapay sulak alan sistemleri
Zn	: Çinko
ZnO	: Çinko Oksit
ZVI	: Sıfır Değerlikli Demir
µs	: Mikrosiemens

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. Yeraltı drenajlı bir toprak profilinin şeması.....	3
Şekil 2.2. Serbest yüzey akışlı yapay sulak alan kesiti	8
Şekil 2.3. SYA alanlardaki başlıca arıtma mekanizmaları.....	9
Şekil 2.4. Dikey yüzey altı akışlı bir sulak alan enine kesiti.....	11
Şekil 2.5. Yatay yüzey altı akışlı bir sulak alan enine kesiti.....	11
Şekil 2.6. Yapay sulak alan sistemlerinde karbon döngüsü	13
Şekil 2.7. Azot döngüsü	14
Şekil 2.8. Yapay sulak alan sistemlerinde fosfor döngüsü.....	15
Şekil 2.9. Yapay sulak alan sisteminin devridaimle çalışma örneği	18
Şekil 2.10. (a) Hava fanı ve dağıtım borusu ile oksijenlendirme, (b) Kademeli sistemin kullanımı ile oksijenlendirme	19
Şekil 2.11. Şaşırtmalı, yüzey altı akışlı inşa edilmiş sulak alan kesiti	19
Şekil 2.12. Kule hibrit yapılı sulak alanın akış şeması (1: sistem tablası; 2: kule aşaması; 3: deşarj; 4: sulak alan bitkileri; 5: alt dairesel hücre; 6: orta dairesel hücre; 7: üst dairesel hücre; 8: çağlayan)	20
Şekil 2.13. GRB sisteminin şematik gösterimi	22
Şekil 2.14. Reaktif bariyer çeşitleri.....	23
Şekil 2.15. GRB'nin geçirgen reaktif bölgesi içindeki mekanizmalar	25
Şekil 3.1. Elodea Densa	31
Şekil 3.2. Lemna Minor	32
Şekil 3.3. Micranthemum Micranthemoides.....	32
Şekil 3.4. Pistia	32
Şekil 3.5. Ceratophyllum Demersum	33
Şekil 3.6. Kalsinasyon işlemi.....	35
Şekil 3.7. Deneysel çalışma akış şeması	36
Şekil 3.8. Nitrat giderimi için gerçekleştirilen liç deneyleri	37
Şekil 3.9. Deneylerde kullanılan farklı boyutlardaki zeolitlerin gösterimi	38
Şekil 3.10. Su banyosunda gerçekleştirilen adsorpsiyon deneyleri	38
Şekil 3.11. Kesikli yapay sulak alan çalışmaları.....	40
Şekil 3.12. Birleşik yapay sulak alan tankı	40
Şekil 3.13. Reaktif tankı hidrolik denemeleri	41
Şekil 3.14. Sürekli sistem için tasarlanan reaktif tankının üstten görünümü	41
Şekil 3.15. Deneysel çalışmanın şematik gösterimi (1: Sentetik drenaj suyu giriş tankı, 2: laboratuvar pompası, 3: yapay sulak alan sistemi, 4: reaktif bariyer sistemi, 5: çıkış suyu depolama tankı)	42
Şekil 3.16. Birleşik arıtım sistemi.....	42
Şekil 3.17.KOI kalibrasyon grafiği	43

Şekil 4.1. Lemna minor bitkisinin nitrat ve amonyum giderim verimi.....	49
Şekil 4.2. Micra bitkisinin nitrat ve amonyum giderim verimi.....	49
Şekil 4.3. Pistia bitkisinin nitrat ve amonyum giderim verimi	49
Şekil 4.4. Yosun (Bafra) bitkisinin nitrat ve amonyum giderim verimi	50
Şekil 4.5. Elodea Densa bitkisinin nitrat ve amonyum giderim verimi	50
Şekil 4.6. Ceratophyllum bitkisinin nitrat ve amonyum giderim verimi	50
Şekil 4.7. Ortak yapay sulak alan sistemi nitrat/amonyum giderim verimleri.....	51
Şekil 4.8. Sadece kenevirle arıtımın denenmesi sonucu nitrat arıtım verimleri.....	53
Şekil 4.9. %20, %40, %60 oranında kenevirle arıtımın denenmesi sonucu nitrat arıtım verimleri	54
Şekil 4.10. Farklı kompozisyonlarda kenevirin nitrat giderimi üzerine etkisi	54
Şekil 4.11. Zeolitlerin amonyum arıtım verimleri	55
Şekil 4.12. Basit fosfat kiti ile gerçekleştirilen fosfat tayini	56
Şekil 4.13. Yapay sulak alan sistemindeki kirletici konsantrasyonundaki değişimler.....	58
Şekil 4.14. Yapay sulak alan sistemi kirletici giderim verimleri (C_0 = Drenaj suyu giriş konsantrasyonu, C = reaktif tank çıkış konsantrasyonu).....	59
Şekil 4.15. Reaktif tankının sürekli akış altında son çıkışta izlenen kirletici konsantrasyonlarının zamanla değişimi.....	60
Şekil 4.16. Reaktif tankı son çıkışta kirletici giderim verimlerindeki zamana bağlı değişim (C_0 = Sulak alan tankı çıkış konsantrasyonu, C = reaktif tank çıkış konsantrasyonu).....	62
Şekil 4.17. Birleşik sistem kirletici konsantrasyon değişim grafiği, (a) Sulak alan sistemi kirletici konsantrasyon değişimleri, (b) Reaktif bariyer sistemi kirletici konsantrasyon değişimleri	63
Şekil 4.18. Birleşik sistem kirletici giderim verimleri (C_0 = Drenaj suyu giriş konsantrasyonu, C = reaktif tank çıkış konsantrasyonu).....	64
Şekil 4.19. Sistemdeki KOI konsantrasyon değişimi.....	64
Şekil 4.20. Birleşik sistemdeki pH, EC ve ÇO değişimleri, (a) Sulak alan sistemi pH, EC ve ÇO değişimleri, (b) Reaktif bariyer sistemi pH, EC ve ÇO değişimleri.....	65

TABLULAR DİZİNİ

Tablo 2.1. Yapay sulak alan sistemlerinin karşılaştırılması.....	12
Tablo 2.2. BOİ ve KOİ giderimi için hibrit YSA’larda geliştirme teknikleri.....	16
Tablo 2.3. GRB uygulamalarında başlıca kirleticiler ve reaktifler	27
Tablo 2.4. Yenilikçi GRB sistemi litratür çalışmaları.....	29
Tablo 3.1. Örnek drenaj suyu içerikleri	30
Tablo 3.2. Bafra Balık Gölü Su Kalite Parametre Değerleri.....	30
Tablo 3.3. Çalışmada kullanılmak üzere hazırlanan sentetik drenaj sularının karakteristik özellikleri.....	31
Tablo 3.4. Geçirgen reaktif bariyer sisteminde kullanılan zeolitin özellikleri.....	34
Tablo 4.1. Bitkilerin 1 HTS sonucunda ölçülen kirletici konsantrasyonları.....	46
Tablo 4.2. Bitkilerin 2 HTS sonucunda ölçülen kirletici konsantrasyonları.....	47
Tablo 4.3. Bitkilerin 3 HTS sonucunda ölçülen kirletici konsantrasyonları.....	47
Tablo 4.4. Bitkilerin 4 HTS sonucunda ölçülen kirletici konsantrasyonları.....	47
Tablo 4.5. Bitkilerin 5 HTS sonucunda ölçülen kirletici konsantrasyonları.....	47
Tablo 4.6. Bitkilerin (Pistia, Lemna Minor, Elodea Densa, Ceratophyllum, Micra) ortak sistemde farklı hidrolik bekleme sürelerinde ölçülen kirletici konsantrasyonları ..	51
Tablo 4.7. Kenevir ile 10 günlük nitrat giderim deney sonuçları	52
Tablo 4.8. Farklı kombinasyonlarda kenevir bitkisinin nitrat giderim düzeyleri.....	53
Tablo 4.9. Amonyum gideriminde zeolit verimleri	55
Tablo 4.10. Spektrofotometrik ölçüm yapılan fosfat deneylerinin verileri.....	57
Tablo 4.11. Yapay sulak alan tankındaki kirletici konsantrasyonundaki değişimler.....	58
Tablo 4.12. Reaktif tankındaki kirletici konsantrasyonundaki değişimler.....	60
Tablo 4.13. Gözlem noktalarındaki konsantrasyon verileri	61
Tablo 4.14. Birleşik sistemdeki kirletici konsantrasyonundaki değişimler	63

1. GİRİŞ

Sulak alanlar; su bitki ve toprak kombinasyonunun oluşturduğu geçiş alanlarıdır. Arıtım için inşa edilen yapay sulak alanlar; bitkileri, mikroorganizmaları, hayvan ve uçul ortamı oluşturan ekosistemin kompleks bir bütünü olan sistemlerdir. Yapay sulak alanlar farklı kombinasyonlarla oluşturulabilecek ve bu sistemler oluşumu sırasında; iklim, toprak yapısı, ekosistemle uyum sağlayacak hayvan türlerinin çevredeki varlığı gibi pek çok etken dikkate alınarak inşa edilmektedir. Çeşitli boyutlarda ve amaçlarla tasarlanmış yapay sulak alanlar atık su arıtımı için Dünya'nın pek çok yerinde 1950'li yıllardan beri etkin olarak kullanılmaktadır. Sulak alan bitkileri tarafından atık su arıtma olasılığını amaçlayan ilk deneyler, 1950'lerin başında Plön'deki Max Planck Enstitüsü'nde Almanya'daki Käthe Seidel tarafından yapılmıştır (Vasudevan vd., 2011). Arıtımı sağlayan mekanizmalar fizikokimyasal ve mikrobiyolojik tabanlıdır. Arıtım için kullanılan bu kompleks sistemler yüksek besin tutma kapasitesine, istikrarlı bir prosese, basit işletme ve bakım şartlarına, düşük kurulum maliyetlerine sahip olmakla birlikte aynı zamanda çamur üretimi de yok denecek kadar azdır. Yapay sulak alanlar uygun koşullar sağlanırsa; su kalitesinin artırılması, besin dönüşümleri, ekolojik yaşam alanı oluşturma, pasif ve aktif dinlenme, eğitim ve araştırma, estetik görünüm amaçlarıyla da sıklıkla kullanılmaktadır. Su kaynaklarının hızla tükenmekte olduğu günlerde tüketimin önüne geçmemiz çok zor ve olası görünmemektedir. Bunun yerine yeniden kullanım sağlayarak kaynak yaratmak önemli bir durum olmaktadır. Doğaya entegre edilebilen sistemlerin geliştirilerek atık su arıtımında doğrudan kullanılmasıyla pek çok fayda elde edilebilir. Günümüzdeki geleneksel yapay sulak alan sistemleri için başta; hidrolik yükleme oranı, hidrolik yükleme hızı, bitki seçimi, dolgu malzemesi seçimi başta olmak üzere sistemleri geliştirmek için ısı yalıtımı, havalandırma sistemlerinin geliştirilmesi gibi yapısal değişiklikler uygulanmaya başlanmıştır. Bunların yanında mikrobiyal faaliyetlerin geliştirilmesi için biyofilm mekanizmalarının geliştirilmesinde gerçekleştirilen araştırmalar arasındadır.

Reaktif bariyer sistemleri yeraltı suyundan nitrat ve amonyum gideriminde etkin şekilde kullanılmaktadır (Simon, 2015). En umut verici iyileştirme teknolojilerinden biri, yeraltındaki kirletici varlığını durdurmak ve arıtmak için reaktif malzemeler ile doldurulmuş geçirgen reaktif bariyerlerin (GRB'ler) kullanılmasıdır. Son on yılda, GRB'lerin geliştirilmesine ve uygulanmasına yönelik faaliyetlerde ciddi bir artış söz

konusudur (ITRC, 2011). Bunun nedeni, GRB maliyet/fayda oranı ve GRB'lerin diğer temizleme yöntemleriyle yönetilmesi zor ve pahalı olduğu kanıtlanmış kirleticilerin yayılmasını azaltma potansiyelidir (ITRC, 2011). Bu sistemlerin bir kez kurulduktan sonra çok uzun yıllar boyunca, derece düşük bakım maliyetleri ile işletilebilmektedir.

GRB teknolojisi kullanılarak kirletici iyileştirme sürecinde önemli birkaç konu göz önünde bulundurulmalıdır. Bunlar, kirleticinin doğasını ve kirleticiyi dönüştürebilen ancak uzun süreler boyunca yerinde reaktif kalabilen reaktif ortamların mevcudiyetini içermektedir (Snow, 1999).

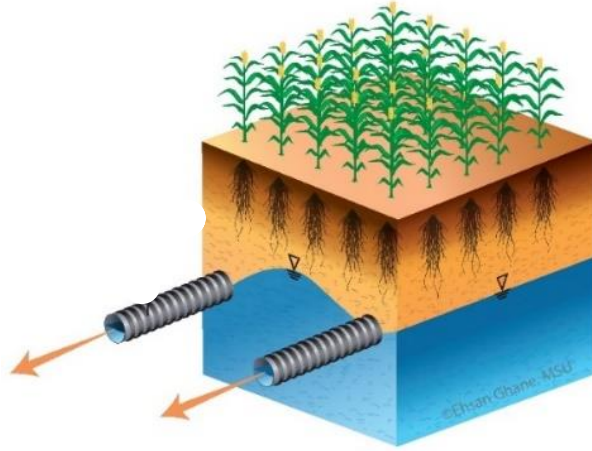
Gerçekleştirilen çalışmanın amacı drenaj sularının içeriğindeki nitrat, amonyum ve fosfat kirleticilerinin alıcı ortamdaki canlı hayatını olumsuz etkilemesinin önüne yine doğal yöntem ve materyallerin kullanımıyla geçilebilmesinin araştırılmasıdır. Doğada bulunan bitki türleriyle kirletici gideriminin birleşik bir sistem ile yüksek verimlerle çalışmasını mümkün olması tezin amaçlarından birini oluşturur. Çalışmada boyunca kesikli ve sürekli sistem çalışmaları ayrı ayrı yürütülmüş olup, kesikli sistem çalışmalarında kullanılan *Elodea densa*, *Micranthemum micranthemoides*, *Ceratophyllum demersum*, *Pistia* ve *Lemna* minör bitkileri sürekli sistem çalışmalarında değerlendirilmiş olup bu bitki türlerinin tuzlu drenaj suyuna karşı verdiği tepkilerin araştırılması amaçlanmıştır. Bunun yanında reaktif bariyer sistemlerinin organik ve mineral içerikli doğal materyallerle desteklenerek doğal arıtıma fayda sağlamsı amaçlanmıştır. Reaktif bariyer sistemlerinde sık kullanılmayan kenevir organığının özellikle değerlendirilemeyen kök bölgelerinin nitrat giderici olarak sistemde kullanımı sağlanmıştır. Tasarlanan reaktif bariyer sistemi sürekli reaktif bariyer sistemi olarak kullanılmasına karşı tasarlanan düzenekte suyun akışının menderes şeklinde olmasına karar verilmiştir. Sistem tasarımının buna göre oluşturulmasının amacı, kirleticilerin reaktiflerle temasının arttırılması ve sistemdeki ölü bölgelerin en aza indirilmesini sağlamaktır. Birbirini destekleyen iki istemin birleştirilmesinin ayrı sistemlerdeki olumsuzlukları minimize edeceği düşünülmüştür.

2. GENEL BİLGİLER

2.1. Tarımsal Drenaj

Sürdürülebilir tarım, çok sayıda biyolojik, fiziksel, ekonomik ve sosyal etkenin birlikte veya teksel olarak, dengeli biçimde uygulanmasını gerektiren ileri düzeyde bir tarımsal işlev sayılmaktadır. Sürdürülebilir tarımın gerçekleştirilmesi için uygun niteliklerde kök bölgesi koşulları yaratmak, toprak suyu, hava ve tuz düzeyi arasında uygun ve kabul edilebilir bir dengenin yaratılmasına bağlıdır (Ezzati vd., 2019).

Tuzlu taban suyunun mevcut sulama sonucunda kılcal yükseliş ve doğrudan kök bölgesine ulaşmasıyla ve bitki kök bölgesinde belirli bir süre kalmasıyla bitki gelişimi ve mahsul verimi olumsuz etkilendiğinden, bunun yanında tuzlulukta toprakta alkali yapının bozulmasıyla olumsuzluklar ve çevre sorunları oluşmaktadır. Şekil 2.1.'de görüldüğü gibi taban suyunun kök bölgesinden uzaklaştırılması dren sistemleriyle sağlanmaktadır ve bu tür drenaj sistemlerinin varlığı çevresel sorunların çözümü için gerekliliktir. Bu durumun önüne tarımsal drenaj ile geçilmektedir (Ezzati vd., 2019).



Şekil 2.1. Yeraltı drenajlı bir toprak profilinin şeması (Ghane, 2018)

2.1.1. Tarımsal Drenaj Şekilleri

2.1.1.1. Yeraltı drenajı

Toprak altındaki fazla suyun toprak profile içine yerleştirilen dren boruları ve/veya kanalları ile uzaklaştırılması prensibine dayanmaktadır. Yeraltı drenajının amaçları arasında; yüzeysel suyun uzaklaştırılması ve taban suyu düzeyinin kontrol altında tutulması sayılabilir. Ayrıca yer altı drenajı derin açık kanallar vasıtasıyla da sağlanabilmektedir (Tanji vd., 2002).

Yeraltı drenajı, zayıf drene edilmiş olan toprakların verimliliğini pozitif olarak ekiler;

- Su tablasının indirgenmesi sağlanır
- Toprağın havalandırılmasında rol oynar
- Bahar aylarında toprağın daha hızlı kurumasını ve ısınmasını sağlayarak avantaj yaratır (Blann vd., 2009).

2.1.1.2. Yüzey Drenajı

Yüzey drenajının amacı; arazi yüzeyinden fazla suyun kanallarla uzaklaştırılmasıdır. Açık kanallar olarak sınıflandırılan sığ hendeklerin oluşturulmasıyla gerçekleştirilir (Tanji vd., 2002).

Yüzey drenajının dezavantajları mevcuttur;

- Sediman tabakası ve tortu oluşumundan dolayı düzenli temizliğe ihtiyaç duyulmaktadır,
- Araziden toprak kaybı söz konusudur,
- Ekstra maliyet ve bakım gerektirir (Blann vd., 2009).

2.1.2. Drenaj Suyunun Kalitesi

Drenaj suyu kalitesi değişkendir. Bunun sebeplerinden birkaçı; sulama suyu kalitelerinin farklılığı, kullanılan gübre, zirai ilaç (miktar) ve farklılıkları ve çeşitli konsantrasyonlarda besleme suyu içeriğindeki değişkenlerin varlığıdır. Özellikle tarım kimyasalları (pestisitler, azotlu gübreler, susuz amonyak, vb.) sulama ve yüzeysel akışa karışan yağmur sularıyla toprakta filtrasyona uğrayarak yeraltı drenajına karışmaktadır. Yüzey drenajında da yüzeysel suların ve sulama suyunun varlığında drenaj suyu kalitesi aynı şekilde bozulmaktadır. Yeraltı drenajı çözülmüş mineraller vb. çözünebilir bileşenler açısından zengindir (Tanji vd., 2002).

2.1.3. Drenaj Suyu Kalitesini Etkileyen Faktörler

Jeoloji ve Hidroloji: Sulamanın gerçekleştirildiği bölgenin jeolojik özellikleri drenaj suyu kalitesinde doğrudan rol oynar. Arazideki kayaçların çözünmesi sonucu drenaj suyu kompozisyonunda sodyum, klorür, sülfat, bor minerallerinin varlığı söz konusu olmaktadır. Sulanan arazide bulunan mineraller hidrolojik süreçler sonucu çözünerek toprağa ve dren sistemine karışmaktadır (Tanji vd., 2002).

Toprak Yapısı ve Özellikler: Toprak, sulama ve yağış sonucu gözenekli ve geçirgen yapısıyla su içinde çözülmüş ve/veya askıda katı partiküllerin taşınmasına ve drenaj suyuna karışmasına neden olmaktadır. Su tablasının diğer arazilere nazaran yüzeye yakın olduğu bölgelerde yüzeysel suların toprakta filtrasyonu ile bitki kök bölgelerinde kılcal su yükselişi meydana gelir. Bu durumda hem drenaj suyu miktarı hem de bitki büyümesi farklı şekilde etkilenmektedir. Ayrıca pestisit ve herbisit kalıntıları da toprağın gözenekli yapısından kaynaklı olarak drenaj suyuna karışmaktadır. Toprağın yapısı ve özellikleri drenaj suyunun kompozisyonu ve kalitesiyle doğrudan ilişkilidir (Dam vd., 1997).

İklim: İklimsel değişimler ve bölgedeki meteorolojik etmenler sudaki ayrışma ve kimyasalların çözünmesinde rol oynamaktadır. Buharlaştırmanın fazla olduğu bölgelerde toprağa verilen su ve yağış suları hızla araziden uzaklaşır bu durumda su seviyesi azalmaktadır. Yağışın fazla olduğu ve sıcaklığın ortalamanın altında seyrettiği bölgelerde ise buharlaşma fazla olmayacağından yüzeysel sular toprakta daha derine hareket eder. Su miktarının fazla oluşu drenaj suyuna karışan kirleticilerin daha fazla çözünmesine sebep olabileceği gibi daha fazla seyrelmeye ve kirletici konsantrasyonunun azalmasına neden olabilmektedir (Ezzati vd., 2019).

Tarımsal Girdilerin Kullanımı: Tarım arazilerinde kullanılan zirai ilaç, sentetik ve/veya organik gübre uygulamaları sonucu drenaj suyu kalitesi büyük ölçüde etkilenmektedir. Arazide toprak iyileştirme faaliyetlerinin uygulanması, sulama koşulları, yetiştirilen mahsul için farklı gübreleme ve ilaçlama faaliyetlerinin varlığı doğrudan drenaj suyu için önemli parametreler olarak karşımıza çıkar.

Azot içeren gübreler toprakta çözünerek sulama ve yağış sonucu toprağın yıkanmasıyla tarımsal drenaj kanallarına ulaşır. Amonyum ve susuz amonyak barındıran gübrelerin bir kısmı toprakta absorbe edilmektedir. Bunun yanında amonyum, nitrata oksitlenerek drenaj suyuna karışır. Fosforlu gübrelerin kullanılmasıyla drenaj suyu daha sağlıklı şekilde karşımıza çıkabilir fosforlu gübrelerin toprakta çözünürlüğü ve dolayısıyla toprak içinde hareketi azotlu gübrelere nazaran daha azdır (Ezzati vd., 2019).

Sulama ve Drenaj Yönetimi: Drenaj suyu miktarı ve kalitesi sulama şekliyle doğrudan ilişkilidir. Çözünen maddelerin taşınımını toprak özelliklerinin etkisi kadar kullanılan su miktarı ve drenajın durumu da etkilemektedir. Sulama yönetiminde

arazideki mahsullerin su gereksinimlerine, ilaçlama ve gübreleme zamanına ilişkin zamanlama yönetiminin yapılması çözünür ve taşınır element ve kirleticilerin kontrol edilmesinde önemli bir faktördür. Drenaj yönetimi, taşınan maddelerin durumunu drenaj kalitesi açısından etkilemektedir (Ezzati vd., 2019).

2.1.3.1. Drenaj Suyu İçeriğindeki Kirleticiler

İyonlar: Drenaj suları tuz içeriği yüksek olan suları oluşturmaktadır. Tuzluluğa neden olan anyon ve katyonlar; sodyum, kalsiyum, magnezyum, potasyum, bikarbonat, sülfat, klorür ve nitrat olarak sayılabilir. Toprakta derine sızan sular yüzeyde ve toprak içinde biriken tuz iyonlarını toprağa tutunan tuzları kimyasal ayrışmaya uğramadan drenaj suyuna taşır (FAO, 1997).

Toksik Eser Elementler: Drenaj suyu içeriğinde çevre kirliliği açısından endişe uyandıran elementlerden birkaçı; arsenik, bor, kadmiyum, krom, bakır, kurşun, cıva, molibden, nikel, selenyum, stronsiyum, uranyum, vanadyum ve çinkodur. Örnek verilen elementlerden bazıları organik madde ile kompleks oluşturarak karşımıza çıkmaktadır (metal organik kompleksleri). Bu şekilde oluşan kompleksler ekolojik olarak daha zararlı olabilmektedir.

Toprak bünyesinde bulunan eser elementlerden bazıları (arsenic, selenium, molibden ve uranium gibi) diğer toksik elementlere nazaran daha hareketsiz olmakla birlikte özellikle alıcı ortamda yaşayan canlı yaşamını olumsuz etkilemektedir. İndirgenmiş formda karşımıza çıkan elementler oksidasyon sırasında absorbe edilmekte ve toprakta daha hareketli hale gelmektedir. Sulama sonucu ayrılan veya taşınan iz elementlerde drenaj suyuna karışarak kirlilik oluşturmaktadır (Van Dam vd., 1997).

Tarımsal Kirleticiler: Zirai ilaçlar ve besinler tarımsal drenaj sularında bulunan ana kirleticiler olarak sayılabilir. Pestisit ve herbisitler düşük sorpsiyon katsayısına sahip olmakla birlikte aynı zamanda su içinde yüksek çözünürlüğe sahiptir. Hidroliz ve fotokimyasal ayrışma sonucu pestisitler/herbisitler kimyasal olarak bozunmaktadır. Bunun yanında toprak mikroorganizmaları tarafından biyolojik olarak da bozulan zirai ilaçlar drenaj suyu içeriğinde karşımıza çıkar. Yüzey drenajında fazla sayıda pestisitlerin karşımıza çıkma sebeplerinden biri fotokimyasal bozunmanın varlığı olarak düşünülebilir (NRC, 1993).

2.2. Yapay Sulak Alan Sistemleri

Yapay sulak alan sistemleri doğal arıtım metotlarının taklit edilmesiyle oluşturulmuştur. Başta atık su içerisindeki azotlu bileşikler olmak üzere pek çok kirleticiyi sudan uzaklaştırmak için kullanılmaktadır. Bu sistemler, küçük arıtma tesislerinden oluşabileceği gibi büyük alıkonma alanlarına kadar çok farklı çeşitlerde boyutlandırılabilir. Sulak alan bitkileri sistemdeki besinleri almanın yanında sulak alanların substratına ve arıtım sürecine doğrudan katkıda bulunmaktadır. Oluşturulan sulak alanlar, yağış sularının toplanması, suların sistemde toplanması/dengelenmesi ve biyoçeşitliliğin desteklenmesi faaliyetlerine hizmet etmektedir (Vymazal, 2010). Sistemde aerobik mikroorganizma faaliyetleri fotokimyasal olayların geliştiği yüzeye yakın bölgede gerçekleşirken, anaerobik mikroorganizmalar köklerin etrafında ve alt toprak tabakasında bulunur. Sistem tasarımı genellikle iki şekilde oluşturulur. Yüzey altı akışlı ve serbest yüzey alanlı olmak üzere.

Sistemin tasarlanması sırasında göz önünde bulundurulması gereken faktörler yapay sulak alan sisteminin nasıl oluşturulması gerektiği hakkında bilgi vermektedir (Shutes, 2001).

Bu sistemler oluşturulurken göz önüne alınması gereken faktörler;

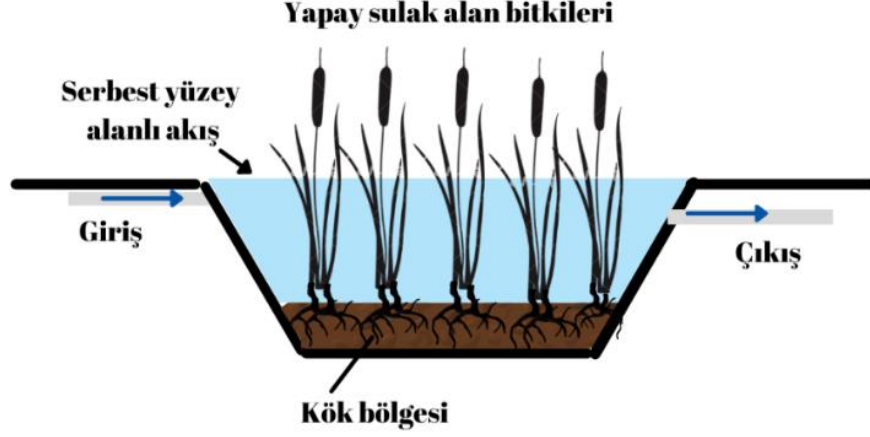
- Atık su standartlarına göre arıtma verimliliği
- Kirleticilerin çevreye emisyon miktarları
- Sistemin çalışması sırasında atık üretimi
- Yeniden kullanılabilirlik potansiyeli
- Kimyasal kullanımı
- Sistem için kullanılacak alan
- Çevresel etkiler olarak sıralanmaktadır (Brix, 1994).

2.2.1. Yapay Sulak Alan Sistemi Çeşitleri

2.2.1.1. Serbest Yüzey Akışlı Yapay Sulak Alan Sistemleri (SYA)

Şekil 2.2.'de belirtilen sistem serbest yüzey akışlı yapay sulak alan sisteminin kesit alanının şematik gösterimini ifade etmektedir. SYA sistemleri atmosferle temas halinde bir su yüzeyine sahiptir. Sisteme verilen atık su ilerlerken aynı zamanda parçacıklar çökmeye ve patojenler yok edilmeye başlamaktadır. Sistemdeki

organizmalar ve sucul bitkiler besinleri kullanır. Su sistem içerisinde eşzamanlı olarak kimyasal, fiziksel ve biyolojik süreçlerle askıdaki katıları filtrelerken, organik maddelerin bozunmasına ve atık sudaki besin maddelerinin uzaklaştırılmasına yol açmaktadır. Askıdaki katılardan daha ağır olan partiküller dibe çökme eğilimindedir.



Şekil 2.2. Serbest yüzey akışlı yapay sulak alan kesiti (EPA, 2000)

Bitkiler ve yaşam formu gösteren mikroorganizmalar azot ve fosfor gibi besinleri kullanır. Kimyasal reaksiyonların varlığı atık sudaki diğer elementlerin çökmesine neden olabilmektedir. Patojenler; doğal çürüme, yüksek oranda organizma predasyonu, sedimentasyon ve UV ışımalarının varlığında sudan aktif şekilde uzaklaştırılmaktadır. Sistemin alt tabakasındaki toprak tabakası anaerobik olmasına rağmen dip bitkileri ve sucul bitki kökleri bu bölgenin oksijenlenmesini ve böylece karmaşık biyolojik ve kimyasal aktivitelerin gerçekleşmesi için uygun ortam koşullarının oluşmasını sağlamaktadır. Bu tür sistemlerde bitki yoğunluğu bitkilerin türüne de bağlı olarak ortalama 1-4 bitki/m² arasında değişkenlik göstermektedir (EPA, 2000).

SYA Avantajları;

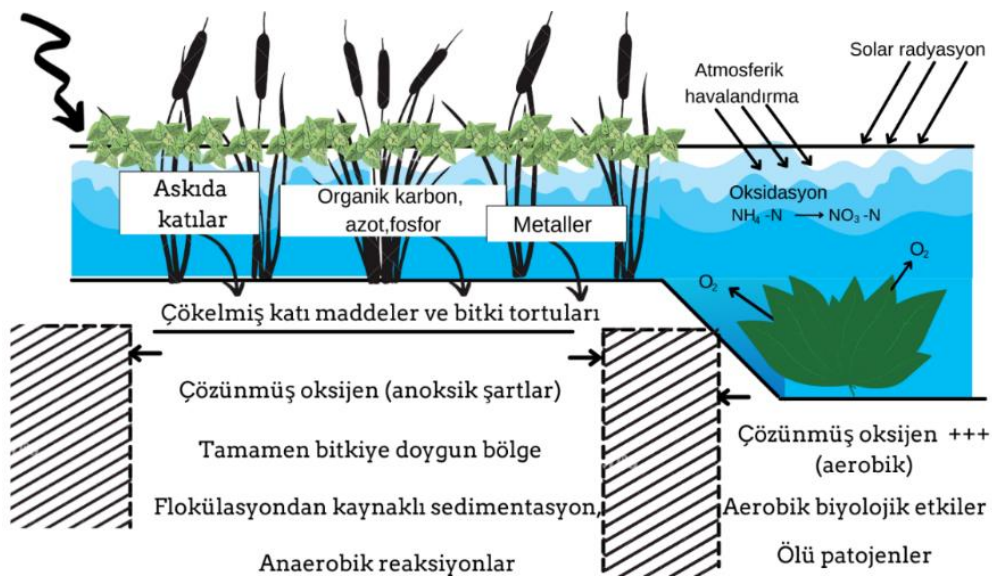
- Ekolojik döngüye doğrudan katkı sağlar,
- Patojen giderimi için uygundur,
- BOİ'nin yüksek oranda indirgenmesine fayda sağlar,
- Enerji tüketimi gerektirmez,
- İşletme maliyetleri düşüktür.

SYA Dezavantajları;

- Sivrisinek ve koku problemleriyle karşılaşılabilir,
- Geniş bir araziye yayılır,
- Sistemin tam kapasite sağlayabilmesi için uzun bir başlatma süresine ihtiyaç duyulmaktadır.
- Sistem bakımı, kısa devrelerin en aza indirilmesi ve su çıkışının engellenmesi gibi parametrelerin önüne geçmek için önemlidir. Bitkilerin düzenli olarak seyreltilmesi gerekebilmektedir (Guo vd., 2019).

Yüzer bitkilerin bulunduğu SYA sistemleri; atık su içerisindeki nütrientlerin giderilmesi ve alg oluşumunun kontrol altına alınması için su mercimeği (duck weed), su sümbülü (water hyacinth) gibi yüzer bitki türlerini barındıran sistemler olarak sınıflandırılabilir. Sistem yüzeyindeki bitki topluluklarının tek bir noktada yığılmasını ve rüzgarla dağılmasının önüne geçmek için yüzücü bariyerler kullanılabilir. Yüzer bitki gövdeleri ve yüzer bariyerler su içindeki türbülansı azaltarak askıdaki katıların daha kolay çökebilmesini sağlayabilmektedir (Parihar ve Babu, 2019).

Batık (su altı) bitkileriyle oluşturulan SYA sistemleri (Şekil 2.3); bu tür sistemler genelde birincil ve ikincil arıtım sonrasında mevcut durumun daha da iyileştirilmesi için kullanılmaktadır. Günümüzde su altı bitkiler su altı oksidasyona yardımcı olduğu ve nutrient giderimine katkı sağladığı için bu tip sistemler geliştirilmektedir (Brix ve Arias, 2005).



Şekil 2.3. SYA alanlardaki başlıca arıtma mekanizmaları (Kadlec ve Wallace, 2009)

2.2.1.2. Yüzey Altı Akışlı Yapay Sulak Alan Sistemleri (YASA)

Atmosferle su yüzeyinin ayrıldığı ve temas etmediği bu tür sistemlerde; yüzeye bakterilerin tutunmasıyla bir filtre yüzeyi oluşturulmuş olur. Sulak alan içerisinde fakültatif ve anaerobik bakteriler organik maddelerin bozunmasına yol açsa da bitki köklerindeki oksijen aerobik koşulların oluşmasına katkı sağlar. Bitkilerin kök bölgesi filtre geçirgenliğinin korunmasında rol oynamaktadır. YSA sistemlerinde tıkanma sorununun ortadan kaldırılması gereklidir. Arıtma veriminin periyodik olarak azalmaması için bu birincil koşul olarak karşımıza çıkar. Sistemde akışın uniform dağılışının sağlanması için giriş bölgesinin geniş olarak tasarlanması gerekmektedir. Bu aynı zamanda kısa devrenin engellenmesinin yoludur. Su altı akışlı sistemlerde su seviyesi genelde yüzeyin 5-15 cm altında tutularak tasarlanır (Maiga vd., 2019).

YSA Avantajları;

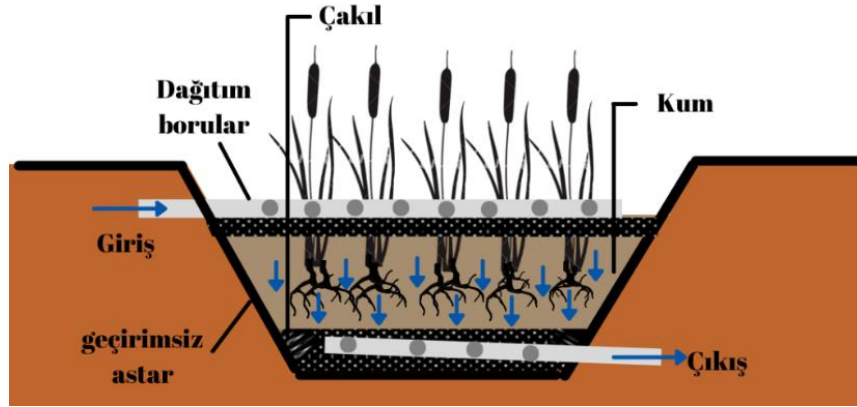
- BOİ, AKM ve patojenlerin yüksek verimle azaltılmasını sağlar,
- Koku ve sivrisinek sorunları mevcut değildir,
- Enerji gerektirmez,
- İşletme maliyetleri diğer arıtım faaliyetlerine göre daha düşüktür.

YSA Dezavantajları;

- Sistemin kurulacağı alan geniş olmalıdır,
- Besin giderimi SYA'a göre daha düşüktür,
- Tıkanma sorunları mevcut olabilir,
- Sistemin tam kapasite sağlayabilmesi için uzun bir başlatma süresine ihtiyaç duyulmaktadır (Maiga vd., 2019).

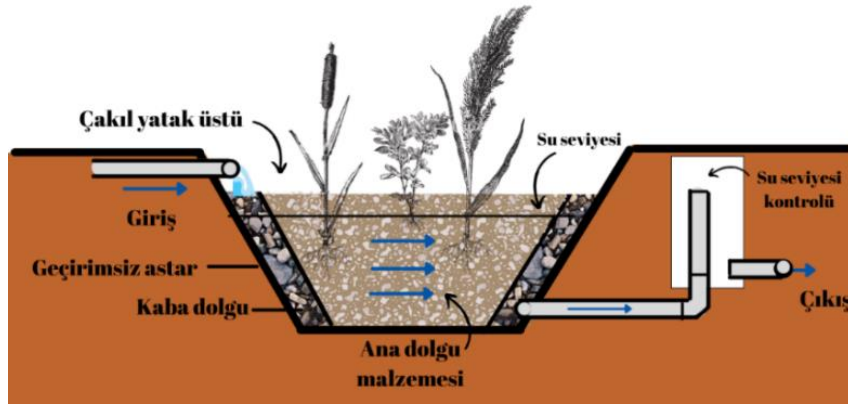
Dikey yüzey altı akışlı yapay sulak alan sistemleri (DYSA); bu tür sistemler de sulak alan sistemine kesikli şekilde yüksek debilerle su iletilmektedir. Sulak alan yüzeyini kaplayan su üst yüzeyi kaplayan tabakadan süzülerek dip bölgeye ilerlemektedir. Doygun olmayan bölgeye ilerleyen su bu esnada boşluklar bırakır ve bu boşluklar hava ile dolar. Bu oluşum sistemde oksijen transferinin ana kaynaklarından biridir. Sistemde nitrifikasyon prosesinin gerçekleşmesi sağlanmaktadır. Yeterli anaerobik koşulların sağlanamamasıyla denitrifikasyon sınırlı şekilde gerçekleşmektedir. DYSA (Şekil 2.4) sistemlerinde biyolojik azot gideriminin sağlanması denitrifikasyon azlığından pek mümkün olmamaktadır. Ayrıca bunun

yanında fosfor gideriminde tek başına kullanılan sistemlerde başarılı olamadığı görülmüştür (Koyuncu vd., 2013).



Şekil 2.4. Dikey yüzey altı akışlı bir sulak alan enine kesiti (Makopondo vd., 2020)

Yatay yüzey altı akışlı yapay sulak alan sistemleri (YYSA); Yatay yüzey altı akışlı sistemlerde dikey akışlılardan farklı olarak su dağıtım borularıyla değil tek bir giriş kanalından sisteme gönderilmektedir (Şekil 2.5). Bu tür sistemlerde çakıl ve taştan oluşan bir dolgu bölgesi bulunmaktadır. Su, dolgu bölgesinde yatay düzlemde hareketi sonucu çıkış bölgesine ulaşır. Sistemin en üst tabakasında ince bir toprak tabakası yer almaktadır (Kadlec ve Wallace, 2009).



Şekil 2.5. Yatay yüzey altı akışlı bir sulak alan enine kesiti (Kadlec ve Wallace, 2009).

Tablo 2.1.'de karakteristik özellikleri açısından anlatılan yapay sulak alan sistemleri karşılaştırılmaktadır. Bölge koşullarına ve arıtılması istenilen suyun özelliklerine göre uygun yapay sulak alan sistemi ekonomik fayda gözetilerek seçilmektedir. Doğaya dayalı sürdürülebilir olması nedeniyle her geçen gün uygulama sayıları artmaktadır.

Tablo 2.1. Yapay sulak alan sistemlerinin karşılaştırılması (Mao ve Huang, 2019).

Karakteristik Parametreler	Serbest Yüzey Akışı	Yatay Yer Altı Akışı	Dikey Yer Altı Akışı
Hidrolik yük	Daha düşük	Daha düşük	Daha yüksek
Arıtma efekti	Genel	BOİ, KOİ ve ağır metallerde daha etkili arıtım	Azot ve fosfor arıtımında daha etkili
Sistem kontrolü	Sezon boyu kolay	Nispeten karmaşık	Nispeten karmaşık
Çevresel durum	Koku ve sivrisinek problemi	İyi	Yazın koku ve sivrisinek problemi

2.2.2. Yapay Sulak Alanlarda Kirletici Giderim Mekanizmaları

Yapay sulak alan sistemlerinde kirletici giderimi altı temel biyolojik reaksiyonla gerçekleşmektedir.

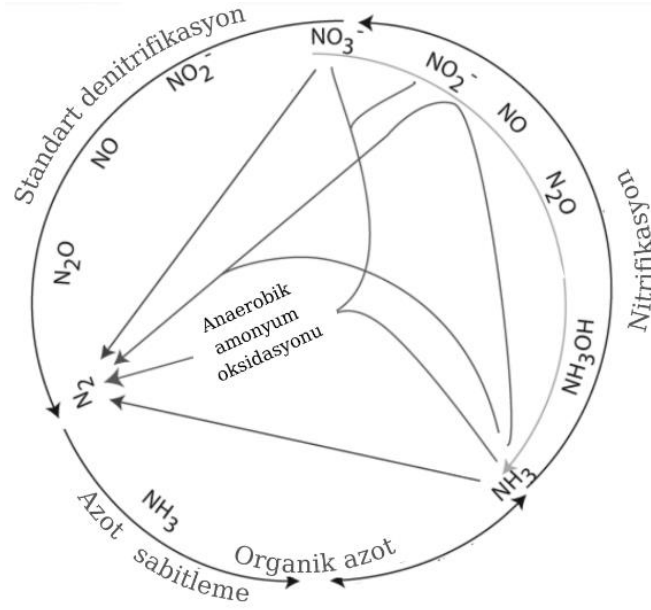
- Bitki solunumu,
- Fotosentez,
- Fermantasyon,
- Nitrifikasyon,
- Denitrifikasyon,
- Mikrobiyolojik fosfor giderimi.

Biyolojik reaksiyonlar sırasında giderilemeyen kirleticiler ise (metaller vb.) kimyasal reaksiyonlarla çözünemeyen bileşikler haline geldikten sonra çökeltilerek sistemden uzaklaştırılarak atık su arıtımı sağlanmış olur (Makopondo vd., 2020).

Yapay sulak alanlarda genel olarak karbon döngüsü etkilidir (Şekil 2.6). Sulak alan sistemlerinde mevcut olan ayrışabilir karbon sistem tarafından kullanılmaktadır. Ayrıca bu ayrışma ve mikrobiyolojik faaliyetler sonucunda atmosfere CO₂ ve CH₄ salınımı mevcuttur. Sulak alan içerisindeki biokütlelerin yaşam döngüsü esnasında harcanan karbon, karbon döngüsüyle bağlantılıdır. Gerçekleşen döngü esnasında humik maddeler ve organik moleküller sisteme verilir (Yinanç vd., 2017).

2.2.3.3. Azot

Yapay sulak alan sistemlerinde nitrifikasyon prosesi amonyağın indirgenerek nitrate dönüştürülmesiyle azotun gideriminin başlamasına sebep olmaktadır. Denitrifikasyon da giderilen kirlilik heterotrofik bakterilerce sağlanır ve prosesin gerçekleşme hızı sistem içerisindeki organik karbon miktarına bağlıdır. YSA sistemlerinde azotun giderimi bitki ve tüm sistem katmanlarında doğal döngüye bağlı olarak gerçekleştirilmektedir (Yinanç vd., 2017)) (Şekil 2.7).

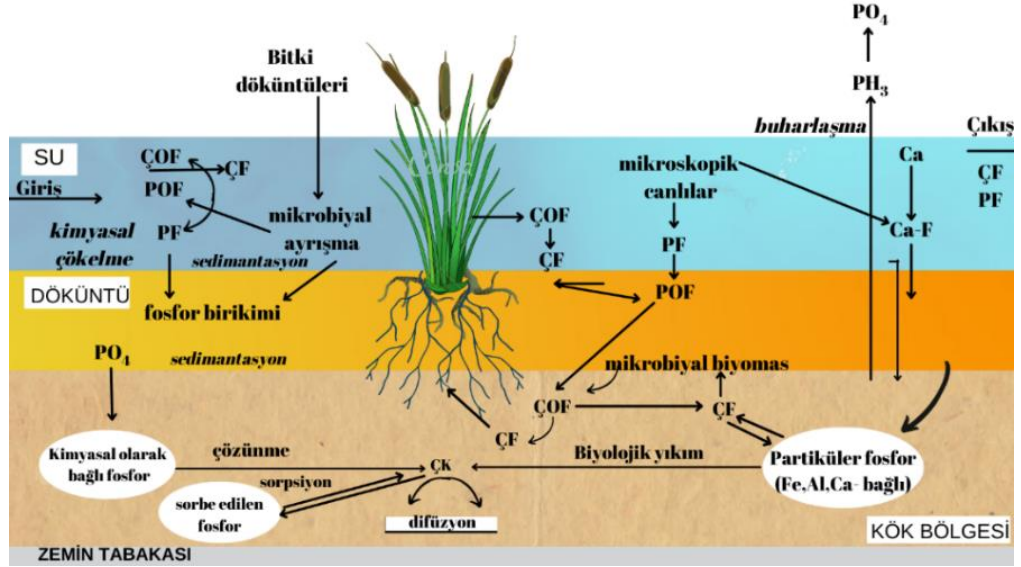


Şekil 2.7. Azot döngüsü (Brandes vd., 2007)

2.2.3.4. Fosfor

Sulak alan bünyesine iletilen atık su içerisindeki fosforun temel giderimi; adsorpsiyon, filtrasyon, çökeltim (kimyasal ve fiziksel) yollarıyla sağlanmaktadır (Şekil 2.8). Fosforun kaynağı atık suyun yanı sıra yüzeysel suların varlığı ve atmosfer kaynaklı olabilmektedir. Çözünmüş haldeki fosforun adsorplanması mümkün olmaktadır bunun yanında partikül halinde sistemde bulunan fosfor çökeltim ile atık sudan uzaklaştırılabilmektedir.

Gerçekleştirilen çalışmalarda fosforun yüzer su bitkileriyle gideriminin mümkün olduğu sonuçlar elde edilmiştir. Yüzer bitkilerden su mercimeği fosfor giderimi için sistemlerde kullanılmaktadır (Yinanç vd., 2017).



Şekil 2.8. Yapay sulak alan sistemlerinde fosfor döngüsü (Yinanç vd., 2017)

2.2.4. Yenilikçi Yapay Sulak Alan Sistemleri

2.2.4.1. YSA'lardaki Son Gelişmeler

Geleneksel yaklaşımla inşa edilen yapay sulak alanlar günümüzde atık su arıtımı için kullanılırken geliştirilmeye başlanmıştır. Hidrolik gereksinimlerin karşılanması ve giderim verimlerinin sağlanması amacıyla sistemler değişik varyasyonlar denenerak geliştirilmekte veya sistemde kullanılan geleneksel materyallerin iyileştirilmesi sağlanmaya çalışılmaktadır. Hibrit ve paralel sistemlerin kullanımı arıtım verimini arttırdığı gibi tank yükünü azaltarak sistem ömrünün uzamasına katkı sağlar.

YSA tasarımı ve işletimi için kriterler; Bitki seçimi, substrat seçimi, atık su tipi, malzeme seçimi, hidrolik yükleme hızı (HYH), hidrolik tutma süresi (HTS), su derinliği ve bakım prosedürleri olarak sıralanabilir (Akratos vd., 2009). Sistemlerde daha yüksek yükleme hızı sistemden geçen atık suyun sistemi daha hızlı terk etmesini sağlar. Bunun sonucunda optimum temas süresi azalır.

En kritik parametrelerden biri YSA'lardaki bitkilerin seçimidir. YSA'ların sürdürülebilir tasarımında kullanılacak bitkilerin; anoksik koşullara olan toleransı ve hiperötrofik koşullara ve kirletici kapasitesine verdiği cevap, yüksek kirlilik koşullarına adaptasyonu ve absorpsiyon kriterleri önemlidir. Son yıllarda YSA'larda kullanılanabilecek bitkiler detaylı şekilde araştırılmaya başlanmıştır. Günümüzde Dünya'da YSA'larda en sık kullanılan bitki Phragmites'tir (Zhang vd., 2012). Daha yüksek toleransa sahip bitkilerin kullanılması sistemlerin daha uzun kullanılmasına ve

ilk olarak maliyetin düşmesine sebep olacaktır. Çeşitli bitkilerin YSA’larda kullanımları üzerinde incelemeler devam etmektedir.

Sulak alanlarda kirletici besleme modu yükseltgenme ve indirgenmeyi etkileyen parametrelerdendir. Gerçekleştirilen çalışmalar sonucunda denitrifikasyon prosesine bağlı olarak sürekli çalışmayla yeterli verimin elde edilmediği görülmüştür (Sudarsan vd., 2021).

Sistem tasarımında geliştirilmek için incelenen bir diğer dolgu malzemesinin seçimidir. Seçilen dolgu malzemesi atık suyun arıtma etkisini, sucul bitkilerin büyümesini ve mikroorganizmaların uygun ortamı sağlaması için dikkate alınır. Günümüzde toprak dolgu malzemesi, çakıl dolgu, seramik dolgu ve benzeri materyaller yaygın olarak kullanılmaktadır. Her ortam maddesinin avantaj ve dezavantajları mevcuttur.

Günümüzde yapay sulak alanların veriminin artırılması için tüm ortamlarda aşağıda belirtilen parametrelerin sağlanması istenmektedir.

- Ortamın dokusu hafif ve gevşek olmalıdır,
- Geniş yüzey alanı sağlamalıdır, daha fazla gözenek, mikroorganizmaların dolgu malzemesi üzerindeki yaşamına yardımcı olur, sulak alanların hidrolik performansını iyileştirir,
- Zararlı maddelerin girişimi olmamalıdır ve iyi kimyasal özelliklere sahiptir,
- Şekil faktörü yüksektir ve güçlü adsorpsiyon kapasitesine sahiptir,
- Filtrasyon etkisi iyidir (Mao ve Huang, 2019).

Organik kirleticilerin YSA’lar ile arıtımında ortaya çıkan gelişmelerin sonuçlarından bazıları Tablo 2.2.’de özetlenmiştir.

Tablo 2.2. BOİ ve KOİ giderimi için hibrit YSA’larda geliştirme teknikleri (Kassa, 2019)

Sulak alan çeşidi	Geliştirme teknikleri	BOİ iyileştirme verimi	KOİ iyileştirme verimi
	Doğal havalandırma	90.3-99.1	-
	Havalandırma borusu, Elektrikli fan havası	97.2-97.5	-
Yatay Yeraltı Akışlı	-	85	74
Dikey Yeraltı Akışlı	Çeşitli yükleme oranları	87	83
	-	92-96	81-84
	Çok katmanlı sistemler	93	90

Günümüzde devam eden geliştirme süreçleri olması gerekenden yavaştır. Bunun yanında diğer tüm arıtım sistemlerinde de olduğu gibi çevresel faktörler yapay sulak alan sistemlerinin verimliliği üzerinde doğrudan etkilidir (Kassa, 2019). Geleneksel tank tasarımlarının yanında havalandırma sistemiyle donatılmış tanklardaki BOİ ve KOİ gideriminin daha iyi olduğu sonuçları gözlemlenmiştir (Kassa, 2019).

Azot gideriminin geliştirilmesi: YSA’ sistemlerinde azot giderim mekanizması atık suyun sistemde kalış süresine bağlı olarak doğrudan değişmektedir. Son yıllarda düşük bekleme süresinin sağlanması üzerine çalışmalar yürütülmektedir. Sürekli sistemin varlığında hidrolik yükleme süresinin kısaltılma ihtimali geleneksel sistemlerin gelişmesinde büyük rol oynayacaktır. Tasarım parametrelerinin geliştirilmesi arıtıma doğrudan katkı sağlayan unsurlardan biridir (Bai vd., 2016).

Ayrıca azot giderimini etkileyen çevresel faktörlerden biri sıcaklık ve baskın bitki türlerinin çeşididir. Bunun ana nedeni çevresel faktörlerin hidroliği doğrudan etkilemesi olarak açıklanmaktadır. Çoğu araştırmacının gözlemlerine dayanarak Guo ve diğerleri tarafından yürütülen (Guo vd., 2019) deneyde hidrolik yükleme süresinin kısaltılması amonyum giderme verimliliğini düşürerek olumsuz sonuçlara sebep olmuştur. Yükleme süresi ve miktarı üzerine değişikliklerin yapılmasının olası hale getirilmesi için çalışmalar sürdürülmektedir (Kassa, 2019).

Yapısal değişikliklerle arıtma veriminin geliştirilmesi üzerine çalışmalar birkaç farklı başlık altında incelenmektedir. Bunlar; atık su devridaimi, suni havalandırma, atık su akış şeklinin değiştirilmesi, ısı yalıtımının kullanılması ve özel dolgu malzemelerinin kullanımı başlıkları altında incelenmiştir.

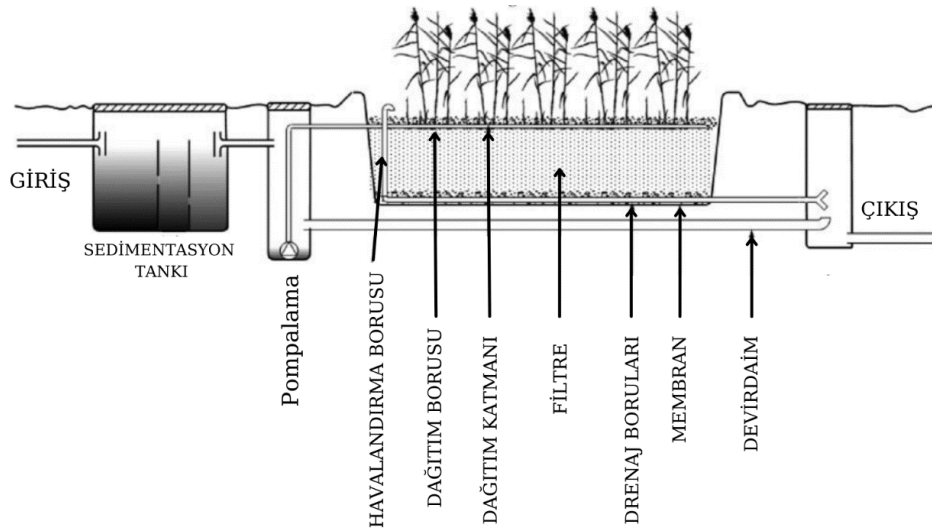
- ***Atık su devridaimi***

Atık su devridaiminin ana amacı, aerobik mikrobiyal aktiviteyi bitki köklerine yakın olan kirleticiler ve mikro organizmalar arasındaki yoğun etkileşimlerin gerçekleştirilmesiyle yüzeyde önemli bir değişiklik olmaksızın arıtım veriminin arttırılmasıdır. Hibrit YSA’larda devridaim uygulaması yatay ve dikey-yeraltı akış YSA’larda ile seri olarak çalıştırılarak TN’de de etkili olduğu araştırmalarla kanıtlanmıştır (Brix ve Arias, 2005). Ancak yapılan diğer araştırmalarda devridaimin sulak alanların doyum kapasitesini çabuk doldurmasına sebep olduğuna ve birtakım olumsuzlukları beraberinde getirdiğini ispatlayan çalışmalar gerçekleştirilmiştir.

Bununla birlikte, artan hidrolik basınç göz önüne alındığında, atık su devridaimi, yatay akışlı YSA'larda sorunlara neden olabilir sonucuna ulaşılmıştır (Brix ve Arias, 2005).

YSA'larda performansı artırmak için devridaim kullanımı, aşağıdakiler de dahil olmak üzere birçok faktöre bağlıdır.

- YSA türleri ve etkili yükler. (Ayrıca, tam ölçekli işletim tesislerinde, bu değişiklik işletmeyi artırabilir)
- Pompalama için ek enerji tüketimi verilen maliyetler (Wu vd., 2014).

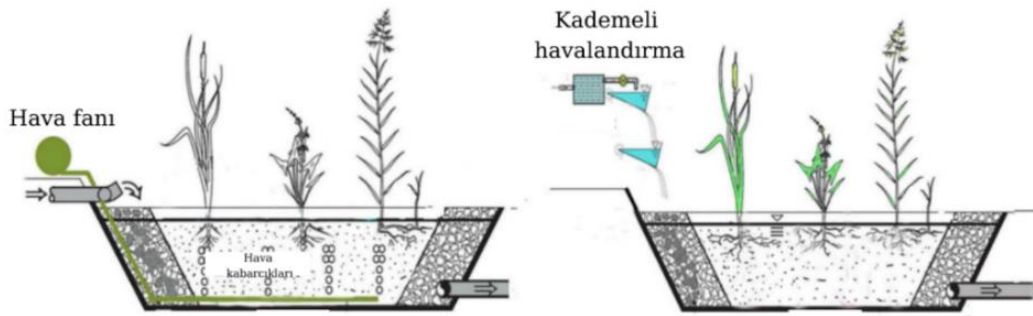


Şekil 2.9. Yapay sulak alan sisteminin devridaimle çalışma örneği (Brix ve Arias, 2005)

- **Suni havalandırma**

Geleneksel YSA sistemlerinde zayıf oksijen varlığının genellikle arıtım faaliyetlerini olumsuz etkilediği bulguları araştırmacılar tarafından belirlenen sorunlardan biridir (Wu vd., 2014). Bitki köklerinde oldukça fazla oksijen bulunmasına rağmen makrofitlerin faaliyetleri yalnızca sistemin havalandırılmasıyla daha verimli çalışmamaktadır. Şekil 2.10'da yapay sulak alan sistemlerine eklenmiş suni havalandırma şekilleri gösterilmeye çalışılmıştır. Bu tür sistemlerde bitki gruplarının sıklığı da önemli bir faktör olarak belirlenmiştir (Ouellet-Plamondon vd., 2006). Yapılan çalışmalarda YSA'ların suni havalandırma ile oksijenlendirilmesinin azot giderimi üzerinde arıtma veriminin ortaya çıktığı sonuçlar bulunsa da denitrifikasyon proseslerinin anaerobik koşulların olumsuz etkilenmesi sonucu arıtım veriminin azaldığı sonuçlarda mevcuttur (Fan vd., 2013).

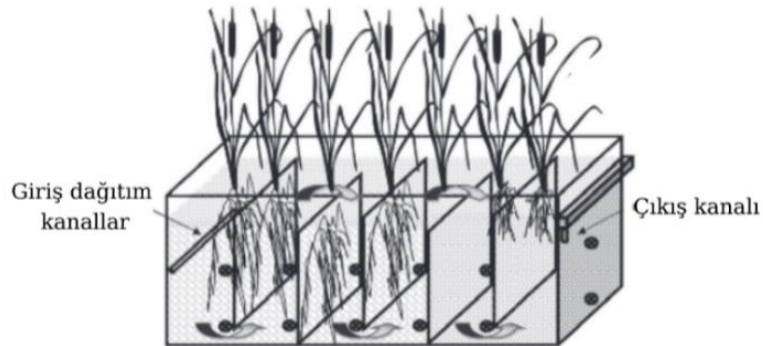
Yapay havalandırma ayrıca mikrobiyal aktiviteleri artırarak hem mikrobiyal topluluk yapısında hem de çeşitlilikte bir değişikliğe yol açabilir. Ayrıca, bu gibi farklı havalandırma yöntemleri aralıklı ve sürekli olarak karşılaştırılarak devam etmektedir. Sistemin dezavantajlarından biri de havalandırma borularındaki tıkanıklıkların giderilmesi için sistem maliyetlerinin artacağı yönündedir. Bu nedenle, YSA'lar üzerinde suni havalandırmanın uzun vadeli etkileri daha fazla araştırılmalıdır (Chazarenc vd., 2009)



Şekil 2.10. (a) Hava fanı ve dağıtım borusu ile oksijenlendirme, (b) Kademeli sistemin kullanımı ile oksijenlendirme (Wu vd., 2014)

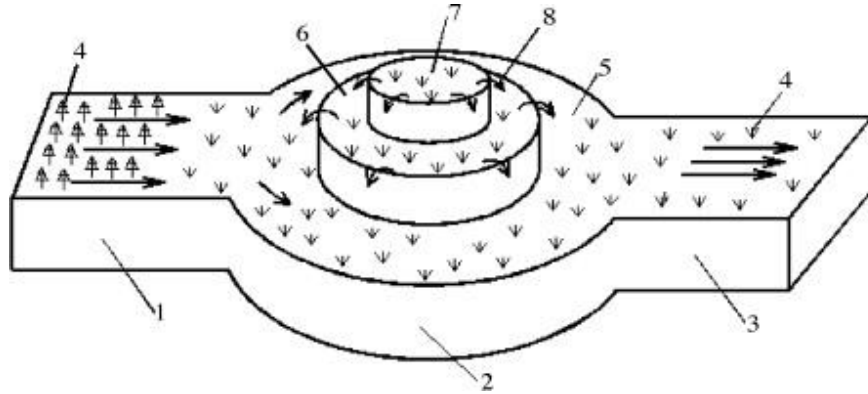
- *Atık su akış şeklinin değiştirilmesi*

YSA içerisinde suyun hareketinin değiştirilmesi atık suyun bitkilerle daha fazla temas etmesine ve daha uzun yol almasına el verecek şekilde tasarlanabilir. Şekil 2.11'de sulak alan sistemindeki kirlilik içeriği bulunan suyun sistem içerisinde şaşırtmalı akış ile sistemden geçirilmesi anlatılmaktadır. Bununla ilgili geliştirilen sistemlerdeki denemelerde arıtma veriminin arttığı ve sistem şeklinin değiştirilmesi ve geliştirilmesi üzerine detaylı çalışmalar devam ettirilmektedir (Tee vd., 2012).



Şekil 2.11. Şaşırtmalı, yüzey altı akışlı inşa edilmiş sulak alan kesiti (Tee vd., 2012)

Peng ve diğerleri sulak alan sisteminin şekilsel değişimi üzerinde radikal değişiklik uygulayarak sistemlerin dairesel şekilde ve akışta olması üzerine yaptığı araştırmada birbirine birkaç koridor şeklinde bağlı sistemin son bölümünü bir taşma savağı olarak kullanmışlardır (Şekil 2.12). Sistemde TN gideriminde önemli faydalar keşfedilmesinin yanında su miktarının seyreltilmesinde ulaşılan sonuçlardan biri olarak kaydedilmiştir. Ayrıca oluşturulan sistemde tıkanmaların daha az yaşandığı sonucuna da varılmıştır (Peng vd., 2012).



Şekil 2.12. Kule hibrit yapılı sulak alanın akış şeması (1: sistem tablası; 2: kule aşaması; 3: deşarj; 4: sulak alan bitkileri; 5: alt dairesel hücre; 6: orta dairesel hücre; 7: üst dairesel hücre; 8: çığlayan) (Ye ve Li, 2009)

Son yıllarda yapay sulak alanların geliştirilmesi üzerine sistemsel tasarım parametrelerinin kirleticiler üzerine incelemeler devam etmektedir. Sisteme eklenen her parametrenin avantaj ve dezavantajları bulunmaktadır. Son yıllarda verimi yükseltile sistemlerle hem arazi entegrasyonuna daha uyumlu hale getirilmeye çalışılan YSA sistemleri hem de maliyet açısından diğer sistemlere göre göreceli olarak daha avantajlı olmasıyla geliştirilmeye açık sistemler olarak daha çok tercih edilmeye başlanmıştır.

• ***Özel dolgu malzemesi seçimi ve mikrobiyal filmlerin sistemlere entegrasyonu***

Farklı araştırmacılar sistemlerde değişik dolgu malzemeleri kullanmayı deneyerek arıtım veriminin değerlendirilmesini sağlamışlardır. Killerin dolgu malzemesi olarak kullanıldığı sistemlerde verimin daha yüksek olabileceği sonucuna ulaşılmıştır. Birleşik olarak kullanılan dolgu malzemesi (zeolit, çakıl, cüruf, vb.) bakteriyel toplulukların hayatta kalma koşullarını iyileştirmiş ve mikroorganizmalar için daha uygun yaşam koşulları sağlanmıştır (Calheiros vd., 2009).

Son zamanlarda sistemlerde biyofilm oluşumunun sisteme katkısı araştırılmaktadır. Sistemlerde farklı substratların kullanımı mikrobiyal toplulukların yapısını etkilemektedir. YSA sistemlerinde biyofilmlerin uygulanması sistem için geniş yüzey alanı sağlayarak verime etki eder (Seeger vd., 2013). Henüz çok üzerinde durulmamış olan bu konu hakkındaki çalışmalardan biri yüzer bir dolgu yatak yardımıyla bitki köklerine yakın bölümde oluşturulacak biyofilm tabakanın artırım verimi üzerindeki değişimini incelemeye devam etmektedir.

- ***YSA sistemlerinde ısı yalıtımının kullanılması***

Sulak alan sistemlerinde mevsimsel artırım verimi değişiklikleri mevcuttur. Bunun en önemli nedeni sıcaklık değişimlerinden etkilenen bitki bünyesi ve mikrobiyal faaliyetlerin sıcaklığa bağlı değişkenlik göstermesidir. Bu nedenle soğuk iklimlerde kullanılmak istenen YSA'lar için çözüm yollarından biri olarak yalıtımın kullanılması ele alınan parametrelerden olmuştur (Bai vd., 2016).

Serbest yüzeyli yapay sulak alan sistemleri diğer sistemlere göre soğuk iklimlerde daha dezavantajlıdır. Su yüzeyinin atmosferle doğrudan teması su yüzeyinde donmalara neden olmaktadır. Yer altı akışlı sistemlerde ise buharlaşmanın bulunmaması ve soğuk havayla temasın bulunmaması enerji kayıplarını düşürür ve mikrobiyal topluluklar iklimin getirdiği olumsuzluklardan korunmuş olur (Wallace vd., 2001). Her iki sistem türü içinde bitki kök bölgelerinin aşırı soğuk havanın olumsuzluklarından korumak için yapılan araştırmalarda dip bölgede yalıtım malzemesi olarak kullanılan malç tabakasının verimi incelenmiştir. Araştırmalarda yalıtım malzemesi olarak saman, talaş gibi malzemelerin yalıtım için kullanılabilir olduğu sonuçlarına varılmıştır (Wallace vd., 2001).

Sistemde kullanılacak malç malzemesi aşağıdaki özellikleri sağlamalıdır;

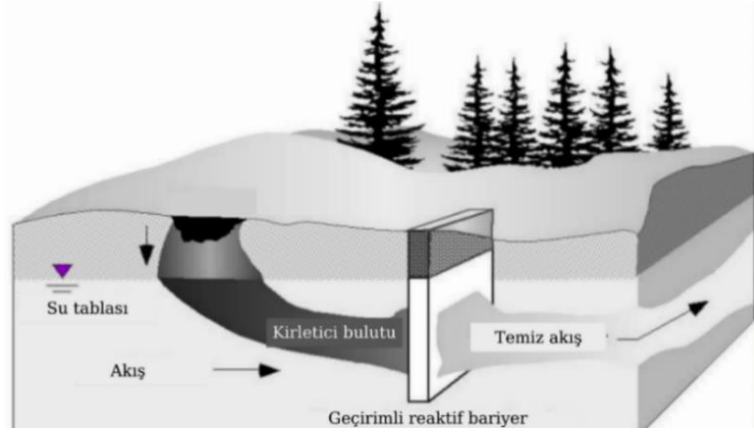
- Dengeli bir besin bileşimine ve çevresel bir pH'a sahip olmalıdır,
- İyi bir ısı yalıtımı sağlayan ve yıkanmayan, yüksek lif içerikli kabarık bir yapıya sahip olmalıdır,
- İkincil bir organik yüklemesiz büyük ölçüde bozunmamalıdır,
- Fidelerin kuraklık stresine maruz kalmaması için nem tutma kapasitesine sahip olmalıdır (Wallace vd., 2001).

Araştırmalar çeşitli malç malzemelerinin kullanımıyla soğuk iklimlerdeki YSA sistemlerinin giderim verimlerinin artırılabilirliğini göstermektedir.

2.3. Reaktif Bariyer Sistemleri

Geçirgen reaktif bariyer (GRB) sistemleri kirlenmiş yeraltı suyunun iyileştirilmesi ve/veya yeniden arıtılması için kullanılan sistemlerdir. Şekil 2.13'te görülen GRB sistemleri, doğal hidrolik eğimin etkisi altında duman içinden akarken kirlenmiş bulutu reaktif bölgeden geçerken kirlenmesini durdurmak alıkoymak ve tedavi etmek için kirlenmiş yeraltı suyunun akış yolu boyunca reaktif malzemeler içeren geçirgen bir bariyerin yerleştirilmesini içerir (Obiri-Nyarko vd., 2014).

GRB sistemleri içerisindeki malzemeler, yerinde kararlı ve mevcut duruma göre daha az tehlikeli maddelerin oluşturulması için adsorpsiyon, çökelme, redoks reaksiyonları ve bozunma yollarıyla arıtılmak istenen sudaki çözünmüş maddelerle fizikokimyasal ve/veya biyolojik olarak yeraltı suyundan giderimi sağlanmaktadır. Sistemde kullanılan materyallerin geçirgenlikleri, hidrodinamik dağılım katsayıları gibi parametreler kirlenmiş suyun hareketini doğrudan etkilemektedir. Bu sistemlerin optimum performansı kirlenmiş suyun GRB'de kalma süresiyle büyük ölçüde ilgilidir. GRB sistemlerinde giderilmesi düşünülen kirlenmiş suyun temas yüzeyi de (GRB kalınlığı) giderim performansını etkileyen faktörlerden biridir (Chen vd., 2016).



Şekil 2.13. GRB sisteminin şematik gösterimi (Snow, 1999).

Günümüzde yeraltı suyuyla ilişkilendirilen GRB sistemlerinin farklı alanlarda kullanımının yaygınlaştırılması mümkündür. Bir GRB sisteminin kuruluşu;

- Temel işlem sürecine (fiziksel/kimyasal/biyolojik)
- Hidrojeolojik verilere (hidrolik iletkenlik katsayısı, akifer kalınlığı, vb.)
- Jeoteknik tasarımlara bağlıdır.

Oluşturulacak GRB sisteminde göz önünde bulundurulması gereken parametrelerden biri, kirletici topluluğunun GRB ile tamamen temas ettirilmesinin sağlanmasıdır. GRB sisteminde kirliliğin tümünü tedavi edecek uzunlukta kullanılması gerekir. GRB'nin kalınlığı kirleticilerin bariyerden ayrılmadan önce iyileştirilmesi için yeterli olmalıdır. Tüm bunların yanında GRB'ler hidrojeolojik koşullar göz önünde bulundurularak tasarlanmalıdır (Thakur vd., 2020)

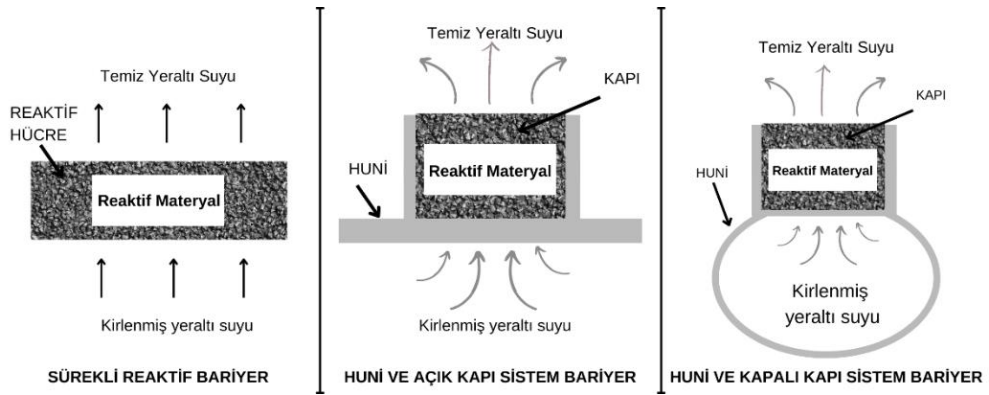
2.3.1. GRB Türleri

GRB tekniklerinin önemli bir yararı, yerinde bir teknoloji olarak, çok çeşitli kirleticilerin giderilebilir olmasıdır. Kirletici konsantrasyonları genellikle tespit limitlerinin altına düşürülür. Kurulum için başlıca iki ana konfigürasyon türü vardır.

(a) sürekli reaktif bariyer

(b) "huni ve kapı" sistemleri (Şekil 2.14)

Sürekli reaktif sistemler kirletici bulutunun tamamı boyunca tek bir reaktif bölge barındırırken, huni ve kapı sistemi kirletici bulutunu reaktif bölgeye ileten iki geçirimsiz duvar arasında bulunan bir reaktif bölgeden oluşmaktadır (Suponik, 2010).



Şekil 2.14. Reaktif bariyer çeşitleri (Suponik, 2010)

İki konfigürasyon arasındaki seçim hem sahanın hidrojeolojik özelliklerine hem de reaktif malzeme maliyetine bağlıdır. Maliyeti yüksek bir reaktif malzeme kullanıldığında, reaktif bölge daha az malzeme gerektirdiğinden huni ve kapı konfigürasyonu tercih edilir. Ancak, sürekli tip bariyerin yapım maliyeti, huni ve kapı sistemine göre çok daha ucuzdur. Bu nedenle, hedef kirletici ve ulaşılabilecek kaldırma seviyesine göre reaktif malzeme maliyeti ile bariyerin yapım maliyeti arasında bir denge kurulmalıdır. Huni ve kapı kurulumunda ard arda veya seri olarak çoklu reaktif ortam kurulabilir (Suponik, 2010).

2.3.2. Geçirimli Reaktif Bariyer Sistemlerindeki İyileştirme Süreçleri

GRB sistemlerini diğer sistemlerden ayıran en belirgin özellik enerji gereksinimi olmadan pasif çalışma özelliğidir. Geçirgen bariyer sistemleri oluşturulmadan önce;

- Kirlenici türlerinin tayini ve konsantrasyonları
- Saha karakterizasyonu ve kirlilik dağılımı
- Reaksiyon şekilleri, hızları
- Bariyer konumu ve konfigürasyonu değerlendirilir.

GRB'lerin geçirgenliğini iyileştirmek amacıyla reaktiflerin arasına çakıl taşı eklenmektedir. Seçilecek giderim süreci hedeflenen kirleniciler için istenilen giderim düzeyi ve şekline (fiziksel-kimyasal-biyolojik) bağlı olarak belirlenir (Şekil 2.15). Bunun haricinde hangi giderim süreci seçildi ise süreci destekleyecek ve etkinliğini arttıracak koşullar için yardımcı materyaller ve sistemler entegre edilir. İnorganik anyon ve katyonların iyileştirilmesi indirgenme (genelde abiyotik) ve immobilizasyon olarak gruplandırılabilir. Biyolojik olarak indirgenme, immobilizasyon (bakteriyel sülfat indirgenmesi ve metallerin sülfür olarak çökmesi), adsorpsiyon ve çökeltme reaksiyonları aracılığıyla gerçekleştirilmektedir (Blowes vd., 2000).

İmmobilizasyon süreci; kirliliğin tutulmasını ve kirlenicilerin çökeltmesini içerir. Adsorban şeklinde görev yapan dolgu malzemeleri kirlenicileri adsorplayarak kirlenmiş yeraltı suyundan giderimi sağlar.

Dönüşüm süreci; kirlenici adsorplanma ve çökeltim işlemlerinde toksik olan formdan daha az toksik bir forma dönüşür. Bunun en avantajlı yanı kirlenicilerin tamamen uzaklaştırılmasının gerekli olmayışıdır. Dönüşüm sürecinde redoks reaksiyonları gerçekleşmektedir.

Biyoremediasyon; bu süreç iki ana süreci kapsamaktadır

Biyostimülasyon; mikroorganizma temel aktivitesinin artırılması/teşvik edilmesi sonucu kirlenicinin biyolojik bozunmasını içerir.

Biyo-büyüme; mikroorganizmaların beslenmesi sonucunda gelişmesini içerir, kirlenici düzeyinin yetersiz olduğu yerlerde kullanılır (Thakur vd., 2020).

GRB sisteminde kullanılacak reaktiflerin seçimi; kirlenici türüne ve iyileştirme yaklaşımına bağlıdır. Genel olarak kirlenicilerin sudan uzaklaştırılma süreçleri;

Çökeltme; insol oluşumu ile kirletici hareketlerinin kısıtlanması ve bu bileşiklerin (mineraller) kontaminasyonu azaltıldıktan sonra daha az çözünür bir hale gelmektedir.

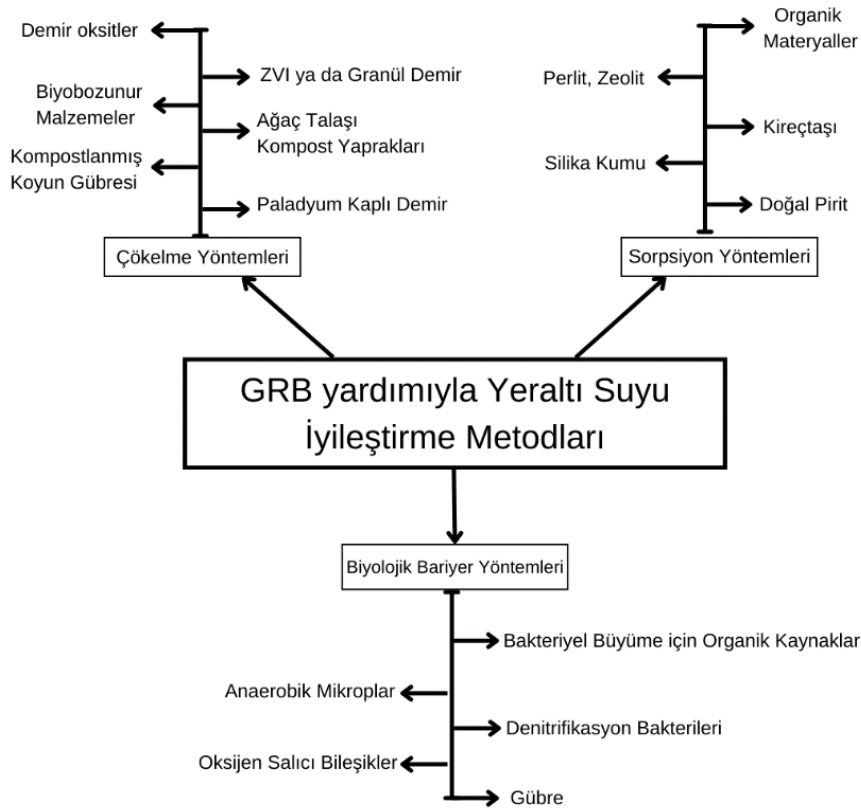
Sorpsiyon; kirleticilerin adsorpsiyon ve kompleksler yoluyla tutularak giderimi sağlanır.

Bozunma; organik kirleticilerin kimyasal ve/veya biyolojik ayrışmasına yol açan reaksiyonlar sonucu reaktif bariyer sisteminde giderilmesidir.

2.3.3. Reaktifler ve Reaksiyon Mekanizmaları

GRB'lerde kullanılan reaktiflerde istenen özellikler;

- Reaktif ortam ve kirletici ortamı uyumlu olmalıdır,
- Reaktif ve kirleticiler reaksiyona girdiklerinde olumsuz kimyasal reaksiyonlar ve/veya yan ürünler oluşmamalıdır,
- Reaktifler kolay çözünebilir olmamalı ve kolay temin edilebilir olmalıdır.
- Maliyetin düşük olması amacıyla seçilen reaktifler uzun süre dayanıma sahip olmalıdır (EPA, 1998).



Şekil 2.15. GRB'nin geçirgen reaktif bölgesi içindeki mekanizmalar (Thakur ve Kumar, 2021)

Kullanılan bazı reaktif malzemeler;

Sıfır Değerli Demir: Çeşitli kirleticiler için verimli sonuçlar elde edilmiş bir reaktif olup halojenli hidrokarbonların uzaklaştırılması kullanılan uygulama olarak günümüze gelmiştir. Sıfır değerli demir; inorganik metallerin, organik bileşiklerin ve radyoaktif nükleidlerin giderimi için uzun yıllardır başarılı şekilde kullanılmaktadır (Chen vd., 2016).

Granül aktif karbon ve biyokömürler: Granül aktif karbonun reaktif olarak kullanılmasının en önemli avantajı yan ürünlerin oluşmamasıdır. İnorganik ve organik kirleticilerin giderilmesinde kullanılan granül aktif karbon mekanizması hidrofobik bağlanmadan kaynaklanan adsorpsiyon olabilmektedir. Günümüzde biochar'ların GRB sistemlerinde kullanımıyla inorganik ve organik kirleticilerin giderilmesi sağlanmaktadır (Thakur vd., 2020).

Zeolit: Zeolitler açık tetrahedral çerçevesi iyon değişimine ve tersine çevrilebilir dehidrasyona izin veren alüminosilikattır (Hong vd., 2019). Zeolit, gözenekli üç boyutlu bir yapıya sahiptir. Silisyum, alüminyum ve oksijen iyonlarından oluşur. Silisyum iyonları kristal yapıda nötr olarak yüklenir. Alüminyum iyonları negatif alanların oluşmasına neden olur. Yükü dengeli tutmak için gözeneklere karşı iyon olarak bir katyon (Na^+ , K^+ ...) veya bir proton (H^+) yerleştirilir. Her zeolit türü, tüm kristal yapı boyunca eşit büyüklükte gözeneklere sahiptir. Kristal yapı kısmen kristal yapının halka boyutuyla belirlenir. Alüminyum ve silikon arasındaki oranın değiştirilmesi, karşı iyonun yanı sıra gözenek boyutunu da etkileyebilir. Tüm doğal zeolitler alüminyum içerir ve hidrofiliktir. Bu malzemeler polar maddeler için iyi bir emici oluşturur (örneğin, suda ve suda çözünür maddeler). Alüminyum çıkarıldığında, zeolit hidrofobik hale gelir ve VOC'ler gibi apolar maddeleri adsorbe edebilir (Harraz, 2017).

Kenevir (Cannabis): Endüstriyel kenevir, fitoremediasyon için umut verici bir adaydır. Kenevir derin köklere sahiptir ve farklı metallerin birikimine karşı toleranslıdır. Ek olarak, mahsul biyokütlesi, hasat tamamlandıktan sonra birçok potansiyel ticari kullanıma sahiptir. Endüstriyel kenevir, düşük gübre talebi olan ve pestisit gerektirmeyen, çevre dostu ve hızlı büyüyen bir biyokütle mahsulüdür (Placido ve Lee, 2022). Farklı toprak türlerinde büyüyebilir ve bitkiye özgü mekanizmalar yoluyla ağır metal kontaminasyonunu tolere ettiği kanıtlanmıştır (Vos vd., 2022).

Midye Kabuğu (Cardiidae): Midye kabuklarının sürdürülebilir ve doğal bir materyal olması atık sudan kirlenici giderimi üzerine son zamanlarda popüler hale gelmesini sağlamıştır. Kabukların fosfat giderme kapasitesinin özellikle yüksek CaO içeriğinden kaynaklandığı söylenebilir. Fosfat gidermenin, pozitif yüklü kalsiyuma bağlanmaya ve kalsiyum fosfatların çökmesine ve ayrıca adsorbanın yüzeyinde fosfat adsorpsiyonuna dayandığı öne sürülmüştür (Peinemann vd., 2019).

Martins ve arkadaşları adsoplama kapasitesine sahip midye kabuklarının daha etkin kullanımı için doğal ve kalsine edilmiş şekilde kullanılmasıyla atık sudan fosfat giderim veriminin değerlendirilmesi üzerine çalışmalar gerçekleştirmiştir. Kalsinasyon işlemi sonucunda midye kabuklarının atık sudan fosfat adsorpsiyon kapasitesinin arttığı sonucuna ulaşmıştır (Martins vd., 2017).

Tablo 2.3. GRB uygulamalarında başlıca kirleniciler ve reaktifler (Obiri-Nyarko vd., 2014)

Kirleniciler	Reaktif malzemeler
PCE, TCE, DCE, TCA, VC	ZVI, GAC, H ₂ /Paladium, SMZ, Zn ⁰ , Malç, Kum/talaş, Lastik kauçuk
BTEX	GAC, ORC, Kompost, Turba, Testere tozu, Ögütülmüş kauçuk, Yaprak çöpü, ZVI, SMZ, H ₂ /Paladium, Cyclophane I, II
Fenol	GAC, SMZ
Nitrobenzen	ZVI
PCB, PAH'lar, DDE, DDT, DDD	GAC, ZVI
Ni, Cu, Zn, Pb, Cd, Fe, As, Cr, Hg vb.	Kireçtaşı, Zeolitler, OC, ZVI, Kemik kömürü, Apatit (Klinoptilolit), Boksit, Aktif alümina, Uçucu kül, Atomize cüruf Turba yosunu, Kompost Sodyum-ditionit, Bentonit, Ferrik oksihidroksitler, TRM, Kitosan
U, Tc, Mo, Se, ¹³⁷ Cs, ⁹⁰ Sr, Pu, Am	ZVI, Kemik kömürü fosfat, Hidroksiapatit, Kireçtaşı AFO, BOF, Zeolit Apatit II, Pekan kabukları, Linyit, Kömür, Titanyum oksit, Demir klorür, Demir nitrat
KOİ, AOX, NO₃⁻, NH₄⁺	ZVI, Testere tozu, Pekan kabuğu O ₂ /Klinoptilolit, Talaşlar, Apatit II, Kompost, Polistiren, Buğday samanı, Yumuşak ağaç ve kum, Mısır koçanları, zeolit
PO₄³⁻	OC, ZVI, Demir oksit, Turba/kum, Kireçtaşı, Okra
SO₄²⁻	Kireçtaşı, SMZ OC, Mantar-kompost TRM, ZVI
Cl⁻	Geza kayası, ZVI, Zeolit, AC

2.3.4. GRB'lerin Avantaj ve Dezavantajları

Avantajlar;

- Kullanılan reaktifler canlılar için zarar teşkil etmez,
- Çoklu kirletici temizliği için birden fazla arıtım aynı sistem üzerinde çoklu reaktif kullanımıyla gerçekleştirilebilir,
- 20-30 yıllık uzun süreler boyunca aktif olarak kullanılabilir,
- Kirleticilerin pompalanması gerekmemektedir (Chen vd., 2016).

Dezavantajları;

- Tasarlanan süreden daha kısa zamanda bariyer reaktif özelliğini kaybedebilir,
- Bariyerin boyutları maliyeti etkileyebilmektedir,
- Biyolojik aktivite pasif bariyer geçirimsizliğini olumsuz etkileyebilmektedir (Güler vd., 2006).

Tarımsal drenaj suyu içeriğindeki nitrat, amonyum, metal kirleticileri, sülfat, besinlerin, tarımsal kirleticilerin iyileştirilmesi geçirimli reaktif bariyer sistemleriyle sağlanabilir. Tüm bunların yanında yapay sulak alan sistemleri de aynı anda incelendiğinde iki sistem birbiriyle uyumlu şekilde tuzluluk faktörü de dahil olmak üzere drenaj suyundaki kirleticilerin giderilip kirli tarımsal drenajın kirleticilerden giderimini sağlayarak sulama suyu standartları göz önünde bulundurularak yeniden kaynak olarak kullanımı mümkün olabilir. Bunun için GRB sistemlerinde giderilen tarımsal kirletici gideriminin üzerinde durulması gereklidir.

2.3.5. GRB Sistemleriyle Gerçekleştirilen Nutrient Giderimi Çalışmaları

Bednarek vd.'i 2010 yılında tarım alanlarındaki azot yükünün azaltılması amacıyla geçirimli reaktif bariyer sistemlerinin performansı üzerine gerçekleştirdiği çalışmada azot varlığının %90 oranında azaltıldığı sonucunu rapor etmiştir. Bu çalışmada geçirimli sistemlerde, çam talaş karışımı yer altı akışına dik şekilde toprağa gömülmesiyle inşa edilmiştir. Araştırmacılar aldıkları yüksek performans ile tarımsal arazilerdeki azot döngüsünün düşük maliyetli bir seçenek olan reaktif bariyer sistemleriyle kontrol altına alınabileceğini savunmuştur (Bednarek vd., 2010).

Bus vd. tarafından 2018 yılında gerçekleştirilen reaktif bariyer sistemi çalışmasında reaktif olarak; otoklavlanmış beton (AAC), polonite, zeolit ve kireç taşı olmak üzere dört farklı malzeme fosforla kirlenmiş tarımsal yüzey akışı için denenmiştir. Kolon çalışması olarak gerçekleştirilen çalışma sonucunda sonuçlar kirli

sudan %65-%99 arasında PO₄-P kirleticisinin uzaklaştırılmasının olumlu sonuçları rapor edilmiştir. AAC ve Polonite, zeolit ve kireç taşına oranla daha yüksek verimle fosforun sudan uzaklaştırılmasını sağlamıştır. Araştırmacılar çalışma sonucunda dört reaktifinde yüzeysel tarımsal drenaj suyundan fosfor giderilebileceği sonucunu vurgulamışlardır (Bus vd., 2019).

Wen ve ark. 2020 yılında tahıl üretim alanlarında nitratla kirlenmiş yeraltı suyunun iyileştirilmesi için saman dolgulu bir geçirimli reaktif bariyer sistemi ile in-situ arıtım performansının değerlendirilmesi için bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Çalışmada hidrolik tutma süresi 22-25 dakika olarak belirlenmiş ve su akış debisi yeraltı suyu akışı ile aynı olacak şekilde ayarlanmıştır. Çalışma sonucunda GRB sistemiyle %60'ın üzerinde NO₃-N giderim verimi elde edilmiştir (Wen vd., 2020).

Tablo 2.4. Yenilikçi GRB sistemi literatür çalışmaları

Yer	Kirletici	Kullanılan Reaktif	Çalışma Özeti	Referans
İrlanda	NO ₃ ⁻	Malç	Araştırmacılar, denitrifikasyon PRB'si olarak inşa ettiği sistemde, 280 mg / L'ye kadar giriş konsantrasyonlarında (NO ₃ ⁻ uzaklaştırma yüzdeleri ≥ %97 ile) NO ₃ ⁻ 'ü yeraltı suyundan uzaklaştırmada başarılı olmuştur.	Gibert vd., 2019.
Sri Lanka	BOİ ₅ KOİ NH ₃ -N	-Şap çamuru -Yıkanmış taş ocağı tozu -Deniz kumu -Kırmızı toprak -Bio char -Talaş	Kankanige ve diğer araştırmacılar, 2 GRB'den oluşan birleşik bir sistem inşa ederek çöz sızıntı sularından kirletici giderimi üzerine gerçekleştirdiği çalışma sonucunda; BOD ₅ (88%), COD (84%), NH ₃ -N (95%) verimle kirletici giderimi sağlamışlardır.	Kankanige vd., 2019.
Danimarka	NH ₄ -N NO ₃ -N NO ₂ -N	Kompost	Araştırmacılar, GRB'lerde kompost kullanımının mikrobiyal bolluğu arttıracığına ve farklı bir mikrobiyal topluluğun oluşmasına yol açtığına, ancak kompostla reaktif bariyerler oluşturmanın avantajlı olup olmadığı, giriş suyunda bulunan kirleticilere ve adaptasyonun gerçekleşmesinin beklenip beklenemeyeceğine bağlı olacağına karar vermişlerdir.	Modrzyński vd., 2021
Çin	NH ₄	Elektrokimyasal reaktif bariyer	Çalışmada amonyakla kirlenmiş suların elektrokimyasal reaktif bariyerlerle, aktif klor varlığında, atık sudaki amonyağın, istenmeyen nitrit/nitrat yerine etkin bir şekilde nitrojene dönüştürülebileceğini kanıtlamışlardır.	Mao vd., 2018

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Materyaller

3.1.1. Deneysel Çalışmalarda Kullanılan Sentetik Drenaj Suları

Deneysel çalışmada kullanılmak üzere hazırlanan drenaj suyu içeriği pek çok tarımsal drenaj örneği incelenerek oluşturulmuştur. Bunun yanında Samsun'un Bafra ilçesindeki çeltik tarlalarından alınan drenaj suyu örneği ve balık göllerindeki kirletici konsantrasyonları irdelenerek sentetik suyun içeriğine karar verilmiştir.

Tablo 3.1. Örnek drenaj suyu içerikleri

Çalışma Bölgesi	Bitki Adı	Nitrat (mg/L)	Amonyum (mg/L)	Fosfat (mg/L)	ÇO (mg/L)	EC (µS/cm)	pH	Referans
İtalya	Çeltik	8,80	0,10	0,20	-	-	-	(Lavrić vd., 2018)
Mısır	Mısır	12,80	-	-	7,20	-	-	(Assar vd., 2019)
Çin	Çeltik	7,36	0,93	0,42	-	-	-	(Shao vd., 2013)
Mısır	-	3,70	-	-	3,15	2962,50	8,10	(Nasr ve Zahran, 2016)
Mısır	Pamuk Çeltik Mısır	3,90	0,75	0,60	-	1375,00	7,30	(Allam vd., 2013)

Drenaj suyu içeriği için referans alınan çalışmalardaki verileri Tablo 3.1. de verilmiştir. Tarımsal drenaj suyu içeriğindeki nitrat, amonyum, fosfat, tuzluluk değerleri mevsimsel ortalamalar baz alınarak oluşturulmuştur. Tablo 3.2'de ise Bafra ilçesindeki balık göllerinin mevsimsel verileri gösterilmektedir.

Tablo 3.2. Bafra Balık Gölü Su Kalite Parametre Değerleri (Ariman ve Koyuncu, 2019)

Parametreler	Ph	ÇO (mg/L)	EC (µS/cm)	Toplam Azot (mg/L)	Fosfor (mg/L)	Sıcaklık (°C)
Ortalama Değerler	8,59	10,31	1688,22	4,77	0,08	19,39

Dünyadaki örnekler incelenerek ve referans alınan Bafra bölgesindeki su kalite parametreleri göz önüne alınarak oluşturulan sentetik drenaj suyu içeriği Tablo 3.3'de belirtilmiştir.

Tablo 3.3. Çalışmada kullanılmak üzere hazırlanan sentetik drenaj sularının karakteristik özellikleri

Parametreler	Ortalama Değer
	(mg/L)
NO ₃ -N	2,00
NH ₄ -N	0,80
PO ₄	0,16
NaCl	1000,00

3.1.2. Deneysel Çalışmalarda Kullanılan Bitkiler

Yapay sulak alan sisteminde kullanılan bitkiler; Elodea Densa (Egeria), Lemna Minor (Su sümbülü), Micranthemum Micranthemoides (Micra), Pistia (Su marulu) ve Ceratophyllum Demersumdur (Tilki kuyruğu çam) (Şekil 3.1-3.5).

E. densa'nın atık su arıtma verimini olumlu etkilediği görülmüştür (Białowiec vd., 2019) . Su mercimeği (Lemna minör L.), Türkiye'nin uygun iklim koşullarına sahip olması sebebiyle geniş bir uygulama alanına sahiptir (Özengin vd., 2007). Dünya genelinde yapay sulak alan çalışmalarına bakılarak Lemna minör bitkisinin arıtmada büyük bir rol oynaması göz önüne alınarak sistemde kullanılması uygun bulunmuştur. Buradan yola çıkarak sistemde kullanılması planlanmıştır. Su marulu bitkisinin, düzenli hasatla kolayca çoğalan ve önemli bir fitokütleyi işlemek için kanalizasyondan besinleri kullanma yeteneği, onu atıksu fitoremediasyonunda kullanılacak en uygun bitkilerden biri yapmaktadır (Kengne vd., 2002).

3.1.2.1. Elodea Densa

Çalışmada yapay sulak alan tankında kullanılan Elodea Densa bitkisi e-ticaret üzerinden temin edilmiş ve diğer bitkilerden ayrı bir tankta büyütülmesi ve hasatlanması sağlanmıştır. Sistemde hem batık hem de köklü olarak kullanılabilen bu bitki türü kökleri dolgu malzemesine sabitlenerek kullanılmıştır. Çalışmada 10-15 cm uzunluğunda 50 kök ile bitki kullanılmıştır.



Şekil 3.1. Elodea Densa (Leslie, 2009)

3.1.2.2. Lemna Minor

Sistemde kullanılan Lemna Minor bitkisi yüzer bitkiler arasında kullanılmıştır ve 100 adet satın alınan bitki çoğaltılmış ve adedi arttırılmıştır.



Şekil 3.2. Lemna Minor (Vidéki, 2017)

3.1.2.3. Micranthemum Micranthemoides

Satın alınan micra bitkisi dolgu malzemesi (bazalt kum) içerisine yerleştirilerek çoğaltılmıştır. Yaklaşık 20 kök mikra bitkisi başlanan çalışmada mikra boyutları 5-10 cm arasındadır.



Şekil 3.3. Micranthemum Micranthemoides (Lovell, 2001)

3.1.2.4. Pistia (Su Marulu)

Çalışmada pistia bitkisi yüzer bir bitki olarak kullanılmıştır. Üç kök bitkiyle başlayan çalışma düzenli hasat ve bakımla arttırılmıştır.



Şekil 3.4. Pistia (Winterton, 2008)

3.1.2.5. Ceratophyllum Demersum

Ülkemizde Tilki kuyruğu çamı olarak bilinen bitki çalışmada köklü bitki olarak kullanılmıştır. Yüzer bitki olarak da kullanılabilen bitkinin dolgu malzemesi içerisine sabitlenmesinin en büyük nedeni çok hızlı uzaması ve çoğalmasındır. Kullanılan bitkiler 10-15 cm uzunluğundadır.



Şekil 3.5. Ceratophyllum Demersum (Winterton, 2001)

3.1.3. Deneysel Çalışmalarda Kullanılan Reaktifler

3.1.3.1. Kenevir

Drenaj suyu içeriğinden nitrat iyileştirilmesinde başarılı sonuçlar elde edilen ve çalışmada kullanılan kenevir Samsun'un Vezirköprü ilçesinde yetiştirilmiştir. Kenevir bitkisinin hem sapı hem de diğer çalışma alanlarında çok kullanılmayan kök kısmı eşit şekilde sistemde kullanılmıştır. Kenevirler ortalama 0,5-1,5 mm olacak şekilde parçalandıktan sonra 4°C'de, sulu ortamda deneysel çalışma için buz dolabında bekletilmiştir.

3.1.3.2. Zeolit

Çalışmada amonyum giderimine katkı sağlayan zeolit seçimi için Manisa bölgesine ve Çorum bölgesine ait iki farklı zeolit kesikli deneylerle test edilmiş ve Çorum zeolitinin rezervinin durumları nedeniyle Manisa zeolitinin kullanılmasına karar verilmiştir. Çalışmada kesikli deneyler sonucunda sürekli sistemde 1,18-2 mm arasında Manisa (Gördes) zeoliti kullanılmıştır. ROTA Madencilik'ten temin edilen zeolit özellikleri Tablo 3.4'de verilmektedir.

Tablo 3.4. Geçirgen reaktif bariyer sisteminde kullanılan zeolitin özellikleri

MİNERAL İÇERİĞİ	Yüzdesel (%)
Klinoptilolit	90-95
Kristobalit	0-5
Tridimit	0-5
KİMYASAL İÇEİĞİ	Yüzdesel (%)
SiO ₂	65-72
Al ₂ O ₃	10-12
CaO	2,4-3,7
K ₂ O	2,5-3,8
Fe ₂ O ₃	0,7-1,9
MgO	0,9-1,2
Na ₂ O	0,1-0,5
LOI***	9-14
MnO	0-0,08
Cr ₂ O ₃	0-0,01
P ₂ O ₅	0,02-0,03
SiO ₂ /Al ₂ O ₃	5,4-7,2
FİZİKSEL ÖZELLİKLER	Zeolitin Yapısal Özellikleri (Fiziki)
Görünüm	Fil dışı beyazı
Koku	Yok
Porozite	45-50 %
Sertlik	2-3 Mohs
Çamurlaşma	Yok
Su absorpsiyonu	42-50 %
Plastiklik	Minör
Yağ absorpsiyonu (mL/100 gr)	57
Aşınma (mg/ 100 gr)	87
Tek nokta yüzey alanı	43-47 m ² /gr
Mikropor alanı	10-12 m ² /gr
Mezopor alanı	28-30 m ² / gr
Etkin por çapı	4 angstrom
Çözünübilirlik	Yok
pH	7,0-8,0
Yumuşama	1150 °C
Erime	1300 °C
Yığın yoğunluğu	0,6-0,8 gr/cm ³
Gerçek yoğunluk	2,2-2,4 gr/cm ³
KATYON DEĞİŞTİRME KAPASİTESİ	(CEC)
	meq/gr
Toplam CEC	1,5-2
KATYONLAR	ANA DEĞİŞTİRİLEBİLİR
Rb, Li, K, Cs, NH ₄ , Na, Ca, Ag, Cd, Pb, Zn, Ba, Sr, Cu, Hg, Mg, Fe, Co, Al, Cr	

3.1.3.3. Midye (Cardiidae) Kabukları

Samsun Atakum'dan toplanan midye kabukları öğütme, eleme ve kalsinasyon işlemlerinden geçirilerek ön değerlendirilmeye tabi tutulmuştur. Kesikli denemeler sonucunda (Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Güzel Sanatlar Fakültesi, Seramik Bölümü'nde) midye kabuklarının tamamı sistemde 900°C de 3 saat kalsinasyon (Martins vd., 2017) işlemine maruz bırakılmış daha sonrasında elenerek, 1,18-2 mm ve 2-3 mm boyutlarında kullanılmıştır.



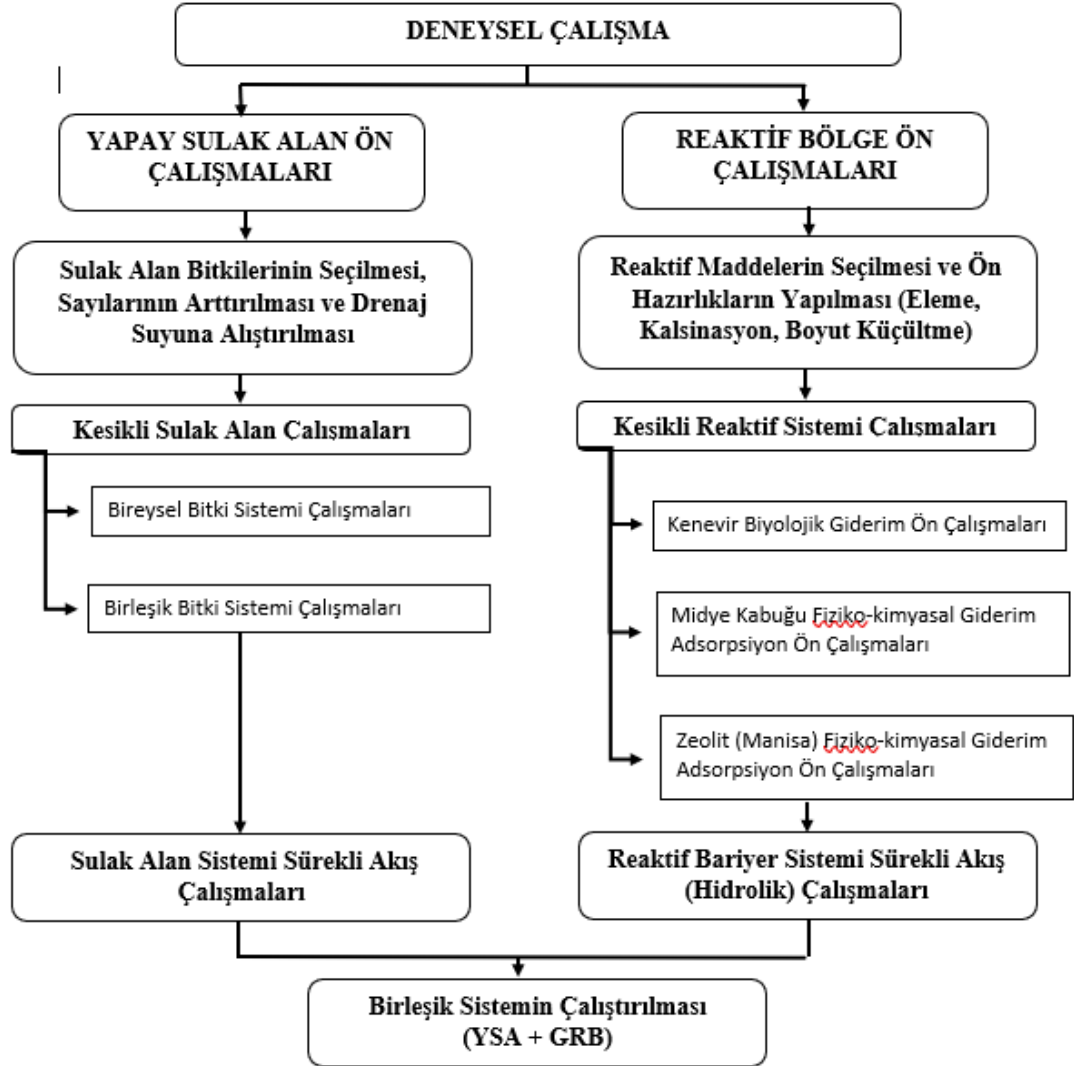
Şekil 3.6. Kalsinasyon işlemi

Sürekli sistemde fosfat kirliliğinin giderilmesi için kalsinasyonu sağlayan midye kabuklarının kullanılmasına karar verilmiştir.

3.2. Deneysel Çalışma

Sürekli sistemin çalıştırılmasından önce yapay sulak alan sisteminde kullanılacak bitkilerin kesikli çalışmalarla bireysel olarak arıtım kapasiteleri denenmiştir. Daha sonra birleşik bitki sistemi çalışmalarıyla sürekli sistemde kullanılacak bitkilerin seçilmesi sağlanmıştır. Reaktif bariyer sistemi için seçilen doğal mineraller ve reaktiflerin ön çalışmaları tamamlandıktan sonra kenevir organiği için biyolojik giderim çalışmaları, midye kabuğu ve zeolit için fiziko-kimyasal giderim adsorpsiyon ön çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Birleşik sulak alan ve reaktif bariyer sistemleri için hidrolik çalışmalar gerçekleştirildikten sonra iki sistem sürekli akış altında birleşik olarak çalıştırılmıştır. Deneysel kurulumun akış şeması Şekil 3.7'de açıklanmıştır. Birleşik sistemin kurulmasıyla gerçekleştirilmek istenen amaç; yapay

sulak alan sistemlerindeki giderim mekanizması faaliyetlerinin geliştirilmesi ve desteklenmesi için geçirimli reaktif bariyer sistemleriyle tarımsal drenaj suyu içeriğindeki kirletici giderim faaliyetlerinin artırılmasının sağlanmasıdır. Bu amaçla yola çıkılarak sentetik olarak hazırlanan drenaj suyu arıtımı için sürekli akışlı birleşik sistemdeki arıtım potansiyelinin araştırılması ve geliştirilmesi hedeflenmiştir.



Şekil 3.7. Deneysel çalışma akış şeması

Sürekli sistemde en yüksek verimli adsorbanların belirlenmesi için organik ve doğal metreyeler (kenevir sapı, kenevir kökü, pomza, Çorum zeoliti, Manisa zeoliti, bentonit, kaolinit, sepiolit ve benzeri) ham olarak kullanılmıştır.

Bafra'da bulunan çeltik tarlasından alınan drenaj sularının analizleri ve Bafra balık göllerindeki su analizlerinden yola çıkılarak sentetik drenaj suyunun nitrat,

amonyum, nitrit, fosfat, pH ve elektriksel iletkenlik değerleri dikkate alınarak oluşturulmuştur. Kesikli alışmalar sonucunda sistemde kullanılmak üzere atık suyun arıtımında en çok başarı sağlayan materyal ve bitkiler ile s¼rekli sistem çalışmaları başlatılmıştır.

3.2.1. Kesikli alışmalar

3.2.1.1. Reaktiflerin Arıtım Potansiyellerinin Araştırılması

Doğal materyallerin kesikli çalışmalarında katı/sıvı oranı 1/100 uygulanmıştır. 24 saat, oda sıcaklığında (17-25°C) gerçekleştirilen çalkalama işlemi 190 rpm karıştırma hızında gerçekleştirilmiştir. S¼rekli akışlı sistemde akış sebebiyle toz haldeki tanelerin s¼r¼klenmemesi ve diğer materyal b¼lmelerine karışmaması için materyaller elenerek 1,18-2 mm aralığındaki tane boyutlarında kullanılmıştır. Kenevir k¼k¼ ve sapı ise 1,5-4 mm olarak kesikli deneylerde kullanılmıştır.

Kenevir

Kenevir organik maddesi nitrat giderimi için liç deneyi şeklinde farklı temas s¼relerinde denenmiştir. Li deneyleri öncelikle hazırlanan nitrat sol¼syonu ile gerçekleştirilmiştir. Y¼ksek giderim verimi elde edilen kenevir ile daha sonra hazırlanan sentetik drenaj suyuyla denemeler gerçekleştirilmiştir.

İlk olarak Sodyum nitrat (NaNO_3) katısından 0,09775 gr tartılarak ve 1 litre balon jofede 500 mL hacme tamamlanan nitrat sol¼syonu hazırlanmıştır. Daha sonra %40 sap kenevir-%60 çakıl ve %40 k¼k kenevir-%60 çakılın bulunduğu iki farklı sistem 100 mL'lik borosilikat cam şişelere yerleştirilmiş, cam şişelerin tamamı hazırlanan nitrat sol¼syonu ile doldurulmuştur. şişelerden biri yalnızca nitrat sol¼syonu ile doldurulmuştur. Hazırlanan liç deneyleri 10 g¼n s¼reyle karanlık ortamda muhafaza edilmiştir.



şekil 3.8. Nitrat giderimi için gerçekleştirilen liç deneyleri

10. günün sonunda nitrat solüsyonu, kenevir kökü ve kenevir sapı olan numuneler 0,45 µm şırınga filtrelerden geçirildikten sonra; nitrat ve amonyum konsantrasyonu ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Ölçümler esnasında nitrat solüsyonu 1/6 oranında seyreltilerek nitrat ölçümleri sağlanmıştır. Kenevirlerin 10 gün sonunda suya saldıkları amonyumun belirlenmesi için numunelerdeki amonyum ölçümleri de gerçekleştirilmiştir.

Zeolit

1 gr katı 100 mL solüsyonla gerçekleştirilen adsorpsiyon deneyleri. 24 saat boyunca maksimumu rpm ile su banyosunda ve oda sıcaklığında gerçekleştirildi. Numunelerden biri yalnızca 100 mL sentetik drenaj suyu olarak (katı madde olmayan) düzeneğe koyuldu.



Şekil 3.9. Deneysel ortamda kullanılan farklı boyutlardaki zeolitlerin gösterimi



Şekil 3.10. Su banyosunda gerçekleştirilen adsorpsiyon deneyleri

24 saat sonunda alınan numuneler önce 30 dakika santrifüjlendi. Daha sonra, önce kaba filtreden sonrasında 0,45 mikronluk şırınga filtreden geçirildikten sonra amonyum değerleri ölçülmüştür.

Midye Kabukları

Ölçülen materyaller 24 saat maksimum çalkalama hızında ve oda sıcaklığında adsorpsiyon deneyine maruz bırakılmıştır. Hazırlanan deneylerde başlangıçtaki fosfat konsantrasyonu 12 mg/L olarak hazırlanmış ve ölçülerek doğrulanmıştır.

Çalışma esnasında doğal mineral ve organik materyallerin her biri için nitrat ($\text{NO}_3\text{-N}$), amonyum ($\text{NH}_4\text{-N}$), fosfat (PO_4), pH, elektriksel iletkenlik (EC) ölçümleri yapılmıştır. Numunelerdeki fosfat giderimi öncelikle renk değişimi üzerine hazırlanan basit bir kit ile denenmiş giderimi konusunda emin olunan reaktif materyallerin ölçümü daha sonrasında HACH metotları ile ölçümleri yapılmıştır. Sudaki nitrit varlığının saptanması için belirli aralıklarla, musluk suyunun ve sentetik drenaj suyunun analizleri sağlanmıştır. Kenevir sap ve kök kısımları kullanılarak yapılan kesikli deneylerde salınan organik karbon düzeyini saptamak için KOİ deneyleri yapılmıştır.

Kesikli çalışmalar esnasında tüm numuneler çalkalama sonrasında 30 dk maksimum rpm'de santrifüjlendikten sonra spektrofotometre ölçümlerinin yüksek hassasiyette gerçekleştirilebilmesi için 0,45 μm MF-Milipore MCE şırınga filtrelerden geçirilmiştir.

3.2.1.2. Bitkilerin Arıtım Potansiyellerinin Araştırılması

Yapay sulak alan sisteminde kullanılmak üzere seçilen farklı bitki türlerinin arıtım verimlerinin belirlenmesi için ayrı ayrı sistemlerde ve toplu olarak hazırlanan tankta hidrolik bekleme süreleri değiştirilerek kullanıma uygun bitkilerin belirlenmesi sağlanmıştır. 1, 2, 3, 4 ve 5 günlük hidrolik bekleme sürelerinin arıtım verimine etkisi incelenmiştir. Bu çalışma esnasında çiçeklerin kirleticilerle teması sonucu bitki tepkileri incelenmiş ve dayanıklılığı yüksek bitkilerin kullanılması sağlanmıştır. Kesikli deneyler sırasında her bekleme süresi sonunda $\text{NO}_3\text{-N}$, $\text{NH}_4\text{-N}$, pH, EC ve çözülmüş oksijen değerleri ölçülmüştür. Bitkilerde kullanılan drenaj suyu ölçümlerden önce 0,45 μm şırınga filtreden geçirilmiştir.



Şekil 3.11. Kesikli yapay sulak alan çalışmaları

3.2.2. Sürekli Akışlı Çalışmalar

3.2.2.1. Deney Düzenegi ve Hazırlık Çalışması

Laboratuvarda oluşturulan birleşik sistem için iki farklı tank kullanılmıştır. İlk tank 40 litre hacme sahip PVC tanktır ve çiçeklerin sulak alan sisteminin oluşturulmasında kullanılmıştır. Kesikli çalışmada elde edilen sonuçlara göre belirlenen bitkiler bu tankta bir araya getirilmiştir.



Şekil 3.12. Birleşik yapay sulak alan tankı

İkinci arıtım adımı için ise reaktiflerin yerleştirilmesi için 65 litre hacme sahip şaşırtmalı akışın hâkim olacağı cam akvaryum kullanılmıştır. Reaktif tankının giriş ve çıkışlarında suyun dengelenmesi için savaklanmanın mevcut olduğu bölmeler oluşturulmuştur. Reaktiflerin yerleştirileceği tank 3 farklı bölmeye ayrılmıştır. Giriş bölmesinden savaklanarak gelen su birinci bölmeden bulunan organik maddeden geçerek ikinci reaktifin (aktifleştirilmiş midye) bulunduğu bölmeden ve sonrasında

da üçüncü reaktifin (zeolit) bulunduğu bölmeden geçerek savaklanır ve çıkış bölümüne geçer.

Atık suyun temas süresinin aldığı yolla artacağı bilindiği için piston akışlı (menderes) şekilde tasarlanan akvaryumda öncelikle pompa debisinin ve hidrolik bekleme süresi için debi hızının belirlenmesi için tank 2-3 mm çakıllarla doldurularak denenmiştir. Bu esnada suyun hareketinin daha net anlaşılabilmesi ve ölü bölgelerin varlığının saptanabilmesi için seyreltik vişne suyu kullanılmıştır.



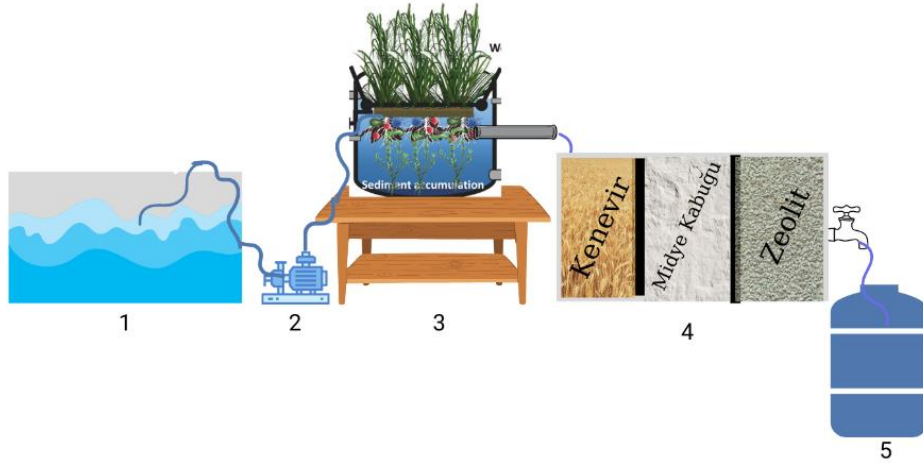
Şekil 3.13. Reaktif tankı hidrolik denemeleri



Şekil 3.14. Sürekli sistem için tasarlanan reaktif tankının üstten görünümü

Bekleme süresi hesaplamaların ve geçmiş çalışmalardaki hidrolik alıkonma süresi göz önüne alınarak belirlenmiştir. Bekleme süresi için reaktif tankında hidrolik deneyler gerçekleştirilmiştir. Bunun sonucunda 2 günlük hidrolik bekleme süresinin sağlanması için pompa 12,5 mL/dk debide çalıştırılmak üzere sisteme yerleştirilmiştir.

3.2.2.2. Sürekli Akışlı Sistemin Çalıştırılması



Şekil 3.15. Deneysel çalışmanın şematik gösterimi (1: Sentetik drenaj suyu giriş tankı, 2: laboratuvar pompası, 3: yapay sulak alan sistemi, 4: reaktif bariyer sistemi, 5: çıkış suyu depolama tankı)

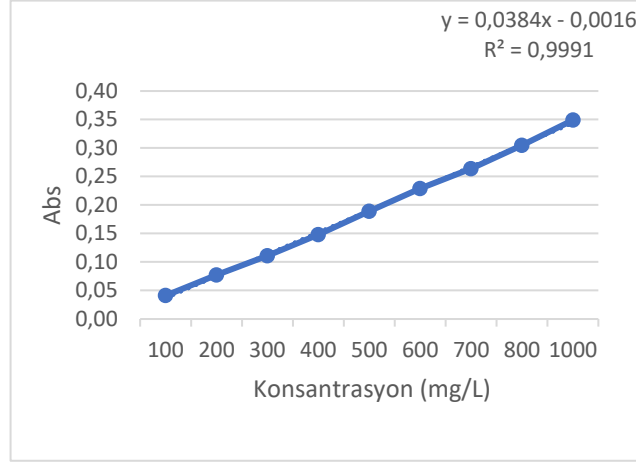
Sürekli sistemde yapay sulak alan sistemi ilk tank reaktiflerin bulunduğu bariyerli sistem ise ikinci tank olarak kullanılmıştır. Gerçekleştirilen kesikli çalışmalar doğrultusunda reaktif tankında kenevir sapı ve kökü (eşit oranda aynı bölmede), zeolit ve midye kabuğu kullanılmasına karar verilmiştir. Tankın her bir bölümü sistem ömrünü uzatmak adına %100 reaktiflerle doldurulmuştur. Sürekli akış altında drenaj suyunun ortak bitki sistemi sonrasında reaktif tankına aktarılarak arıtım verimi performansının artırılması amaçlanmıştır.

Tüm deneysel çalışma oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. Sistemden alınan anlık numunelerin her biri için $\text{NO}_3\text{-N}$, $\text{NH}_4\text{-N}$, PO_4 , KOI, pH, EC ve ÇO tayin edilmiş her ölçüm öncesinde numuneler girişim olmaması adına $0,45 \mu\text{m}$ şırınga filtreden geçirilmiştir. 2 günlük bekleme süresinin sağlanması için pompa %20 verimle akış düğmesi açılarak frekansı %24,6-25 ayarında sisteme bağlanmıştır.



Şekil 3.16. Birleşik arıtım sistemi

Sistemde KOİ konsantrasyonlarının belirlenmesinde kullanılan hazır kimyasallara bağlı Şekil 3.17’de gösterilen kalibrasyon grafiği kullanılmıştır.



Şekil 3.17.KOI kalibrasyon grafiği

600 nm’de ölçümü gerçekleştirilen KOİ deneyleri için “ $y=0,0384x-0,0016$ ” denklemini kullanılarak numunelerdeki KOİ konsantrasyonları hesaplanmıştır. Buna göre drenaj suyu, yapay sulak alan tankı ve reaktif tankından alınan numunelerle ölçüm tarihlerine bağlı olarak Şekil 4.19’daki KOİ grafiği oluşturulmuştur.

3.2.3. Analiz Yöntemleri

Çözünmüş Oksijen: HACH-HQ430d flexi cihazı ve Lüminesan/optik çözünmüş oksijen elektrot türü ile ölçülmüştür.

pH ve Elektriksel İletkenlik (EC): Thermo Scientific-Orion Star A215 cihazı kullanılmıştır. ROSS Ultra Triode epoksi-gövde pH/ATC elektrotlu, DuraProbe 4 hücreli iletkenlik sensörü ile ölçümler yapılmıştır.

Nitrat (NO_3): HACH Lange DR6000 cihazındaki kayıtlı programlardan 353 N, Nitrate MR PP 400 nm seçilerek spektrofotometrik olarak ölçülmüştür. HACH’ın kullanılan Metot 8171’i kadmiyum indirgeme yöntemine dayanmaktadır.

Nitrit (NO_2): HACH Lange DR6000 cihazındaki kayıtlı programlardan 373 M, Nitrit HR PP 585 nm seçilerek spektrofotometrik olarak ölçülmüştür. HACH’ın kullanılan Metot 8153’ü demir sülfat yöntemine dayanmaktadır.

Amonyum (NH_4): HACH Lange DR6000 cihazındaki kayıtlı programlardan 380 N, Amonyak Ness 425 nm seçilerek spektrofotometrik olarak ölçülmüştür. HACH’ın kullanılan Metot 8038’i Nessler yöntemine dayanmaktadır.

KOI: USEPA reaktör sindirim yöntemine (Metot 8000) göre gerçekleştirilmiştir. Solüsyonların tamamı ve kalibrasyon aralığı ve işlemleri APHA/AWWA/WPCF (1998) göre yapılmıştır. Ölçüm için tüplere önce 0,9 ml dikromat, 2,1 ml sülfürik asit ve 1,5 ml numune eklenip ters yüz ederek çalkalanmıştır. 148°C’de 2 saatlik kaynatma işlemi sonrasında soğuması beklenen tüplerin HACH LANGE DR6000 cihazında tek dalga boyunda (600 nm) ölçümleri yapılmıştır.

3.2.4. Hesaplamalar

3.2.4.1. Kirletici Giderim Verimlerinin Hesaplanması

Çalışma boyunca kirletici gideriminin belirlenmesi için aşağıdaki denklemde belirtilen basit verim hesaplaması kullanılmıştır.

$$\% \text{ Verim} = \left(\frac{C_o - C_e}{C_o} \right) \times 100$$

C_o = Başlangıçta atık suda bulunan kirletici konsantrasyonu (mg/L)

C_e = Arıtma sonrasında suda bulunan kirletici konsantrasyonunun miktarı (mg/L)

3.2.5. Kullanılan Kimyasallar ve Cihazlar

3.2.5.1. Kullanılan Cihazlar

- pH ve elektriksel iletkenlik ölçümlerinde “Thermo - ORION STAR A212” cihazı kullanılmıştır.
- Kesikli çalışmalarda “Julabo SW22” ısıtıcılı su banyosu kullanılmış ve sonrasında santrifüj işlemi “SIGMA 3-16P” marka cihaz ile 50 ml kapasiteli “ISOLAB” santrifüj tüpleri ile gerçekleştirilmiştir.
- Tartımlar için “RADWAG AS220.R2” marka analitik tartıdan yararlanılmıştır.
- Tane boyutlarının belirlenmesi için BAZ MAKİNA elek seti kullanılmıştır.
- Çalışmalar sırasındaki tüm cam malzemelerin temizlenmesi ve çözeltilerin seyreltilmesi için diyonize su “nuve- ND4” saf su cihazından elde edilmiştir.
- KOİ ölçümleri için “HACH” termoreaktörlerinden yararlanılmıştır.
- Atık sudaki ve giderimi sağlanan drenaj suyundaki kirletici seviyelerinin belirlenmesi “HACH LANGE- DR 6000” model spektrofotometre cihazında gerçekleştirilmiştir.

- Sürekli sistemde sentetik drenaj suyunun akışı “AQUA 100 HC” marka laboratuvar pompası ile sağlanmıştır.

3.2.5.2. Kullanılan Kimyasallar

- (HACH) Nitriver Kat. 2106169
- (HACH) Nitriver Kat. 2107569
- (HACH) Nessler Kat. 2119449
- (HACH) PhosVer 3. 2106069
- Sodyum klorür (NaCl)-(%99,0 saflık)
- Sodyum nitrat (NaNO₃)- (%99,0 saflık)
- Amonyum sülfat ((NH₄)₂SO₄)- (%99,0 saflık)
- Mono potasyum fosfat (KH₂PO₄) -(%99,0 saflık)
- Hidroklorik asit (HCl) -(%37,0 saflık)
- Potasyum Dikromat (K₂Cr₂O₇) -(%99,5 saflık)
- Kalay (II) klorür (SnCl₂)
- Gliserol (C₃H₈O₃)

4. DENEYSEL BULGULAR VE DEĞERLENDİRME

Çalışma kesikli ve sürekli çalışma olarak iki farklı şekilde ele alınmıştır. Kesikli çalışma bulgularından yararlanılarak sürekli sistemi şekillendirilmesi sağlanmıştır. Senttik drenaj suyu ile gerçekleştirilen deneyler için hazırlanan atık su içerikleri bu bölümde ayrıntılı olarak gösterilmiştir. Kinetik çalışmalardan elde edilen verilerle kirlenici giderim verimleri değerlendirilmiş ve açıklanmıştır.

4.1. Kesikli Çalışmalar

Kesikli çalışmalar esnasında uygun reaktiflerin belirlenmesi ve uygun bitki seçimlerinin yapılması sağlanmıştır. Bunun için denenen farklı reaktiflerin kirlenici giderim verimleri sayısal olarak belirlenmiş ve karşılaştırılmıştır.

4.1.1. Yapay Sulak Alan Bitki Türlerinin Seçimi

Çalışmada kullanılması planlanan bitki türleri ayrı ayrı ve ortak olarak sulak alan tanklarında çoğaltılarak hidrolik tutma süreleri (HTS) ve arıtım verimlerinin karşılaştırılması için denenmiştir. Tablo 4.1- 4.5’de bitkilerin ayrı olarak bekleme süreleri sonucundaki kirlenici değerlerindeki değişim sonuçları verilmiştir.

Tablo 4.6’da bitkilerin ortak bir tank içerisinde hazırlanan yeni drenaj suyu ile kirlenici konsantrasyon değişimlerinin belirlenmesi için 5 günlük bir seri şeklinde ölçümler gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen kesikli çalışmalar durgun drenaj suyu içerisinde yapılmış olup sistemde kullanılacak bitki türleri seçildikten sonra sürekli akışı sistem denemeleri yapılmıştır.

Tablo 4.1. Bitkilerin 1 HTS sonucunda ölçülen kirlenici konsantrasyonları

Çiçekler	T (°C)	pH	EC (µs/cm)	ÇO (mg/O ₂ L)	Nitrat (mg/L)	Amonyum (mg/L)	Süre (Saat)
Giriş	19-20	7,20	528,30	9,94	2,10	0,78	
Lemna Minor	19-20	8,62	542,00	9,04	0,50	0,32	
Micranthemum	19-20	7,98	533,80	10,02	1,10	0,28	
Pistia	19-20	8,03	531,10	9,91	1,40	0,18	24
Yosun (Bafra)	19-20	7,56	534,20	8,95	1,10	0,29	
Elodea Densa	19-20	8,21	534,90	10,92	0,40	0,24	
Ceratophyllum Demersum	19-20	8,13	542,20	10,87	1,40	0,28	

Tablo 4.2. Bitkilerin 2 HTS sonucunda ölçülen kirletici konsantrasyonları

Çiçekler	T (°C)	pH	EC (µs/cm)	ÇO (mg/O ₂ L)	Nitrat (mg/L)	Amonyum (mg/L)	Süre (Saat)
Giriş	18-20	7,20	528,30	9,94	2,10	0,78	48
Lemna Minor	18-20	8,70	601,60	10,30	0,30	0,26	
Micranthemum	18-20	8,44	549,00	11,24	0,70	0,20	
Pistia	18-20	8,41	545,40	10,62	1,30	0,15	
Yosun (Bafra)	18-20	7,99	556,10	9,34	0,90	0,24	
Elodea Densa	18-20	8,66	543,90	11,47	0,40	0,20	
Ceratophyllum Demersum	18-20	8,64	546,70	11,43	1,10	0,25	

Tablo 4.3. Bitkilerin 3 HTS sonucunda ölçülen kirletici konsantrasyonları

Çiçekler	T (°C)	pH	EC (µs/cm)	ÇO (mg/O ₂ L)	Nitrat (mg/L)	Amonyum (mg/L)	Süre (Saat)
Giriş	19-20	7,20	528,30	9,94	2,10	0,78	72
Lemna Minor	19-20	9,22	628,40	9,98	0,20	0,21	
Micranthemum	19-20	9,09	564,80	9,90	0,40	0,15	
Pistia	19-20	9,01	563,10	10,35	0,70	0,12	
Yosun (Bafra)	19-20	8,35	564,80	8,87	0,80	0,21	
Elodea Densa	19-20	9,49	547,80	10,26	0,20	0,15	
Ceratophyllum Demersum	19-20	9,42	548,90	10,87	0,80	0,15	

Tablo 4.4. Bitkilerin 4 HTS sonucunda ölçülen kirletici konsantrasyonları

Çiçekler	T (°C)	pH	EC (µs/cm)	ÇO (mg/O ₂ L)	Nitrat (mg/L)	Amonyum (mg/L)	Süre (Saat)
Giriş	19-20	7,20	528,30	9,94	2,10	0,78	96
Lemna Minor	19-20	9,22	628,40	9,98	0,10	0,18	
Micranthemum	19-20	9,19	564,80	9,90	0,20	0,14	
Pistia	19-20	9,01	563,10	10,35	0,60	0,11	
Yosun (Bafra)	19-20	8,35	564,80	8,87	0,70	0,20	
Elodea Densa	19-20	9,49	547,80	10,26	0,20	0,15	
Ceratophyllum Demersum	19-20	9,42	548,90	10,87	0,60	0,14	

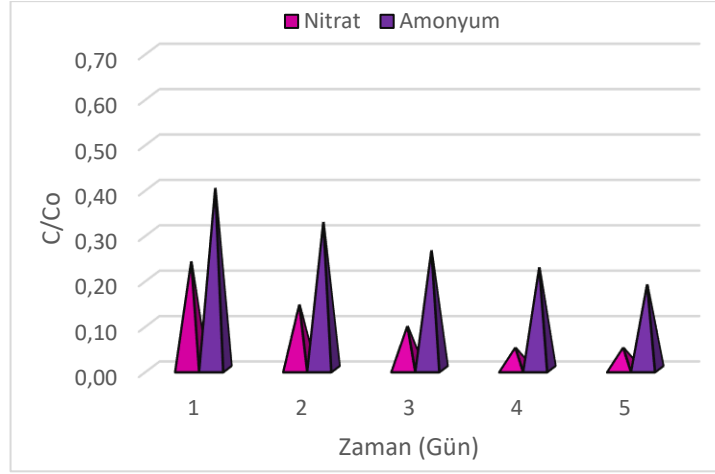
Tablo 4.5. Bitkilerin 5 HTS sonucunda ölçülen kirletici konsantrasyonları

Çiçekler	T (°C)	pH	EC (µs/cm)	ÇO (mg/O ₂ L)	Nitrat (mg/L)	Amonyum (mg/L)	Süre (Saat)
Giriş	19-21	7,20	528,30	9,87	2,10	0,78	120
Lemna Minor	19-21	7,98	634,70	10,45	0,10	0,15	
Micranthemum	19-21	8,01	629,80	10,87	0,10	0,12	
Pistia	19-21	8,18	566,20	10,74	0,20	0,09	
Yosun (Bafra)	19-21	7,87	575,50	9,54	0,50	0,18	
Elodea Densa	19-21	8,68	586,00	11,52	0,10	0,12	
Ceratophyllum Demersum	19-21	8,72	577,50	11,62	0,40	0,12	

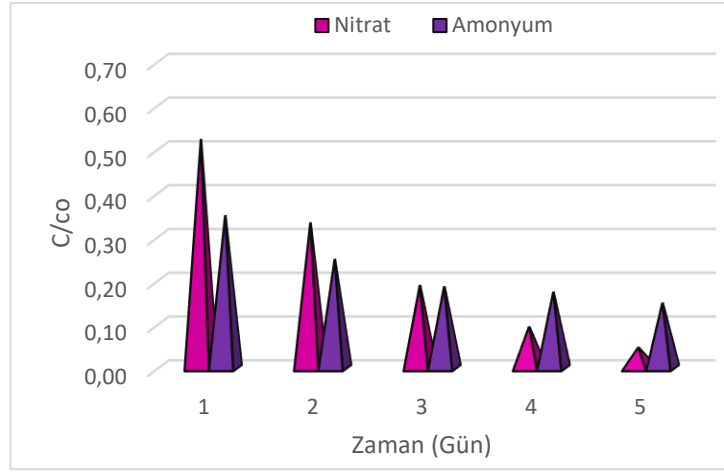
Lemna Minor, Micranthemum, Pistia, Yosun (Bafra), Elodea Densa, Ceratophyllum Demersum bitkileriyle gerçekleştirilen kesikli çalışmada bitkilerin nitrat giderim verimleri 24 saatte sırasıyla; %77, %48, %34, %48, %81, %34 olarak bulunmuştur. Elodea Densa bitkisi nitrat gideriminde en etkin rol oynayan bitkidir. Bunun yanında amonyum giderim verimleri 24 saate sırasıyla; %59, %64, %77, %63, %69, %65 olarak hesaplanmıştır. Pistia bitkisi atık sudan amonyum giderimi konusunda diğer bitki türlerinden daha fazla başarı göstermiştir.

Yapılan çalışmalardan hareketle sistemde yapay sulak alan tankı için hidrolik bekleme süresinin 48 saat olması planlanmıştır. İki günlük bekleme süresi içerisinde Lemna Minor bitkisi nitrat kirleticisini %85 verimle atık sudan uzaklaştırırken amonyağı da %67 oranında arıtmıştır. Micranthemum bitkisi 48 saatte %67 verimle nitrat uzaklaştırırken %75 oranında amonyum giderimi sağlamıştır. Pistia yüzer bir bitki olarak %38 verimle nitrat arıtımı sağlarken %81 verimle amonyum kirleticisini gidermiştir. Diğer bitkilere nazaran nitrat gideriminde daha az verim elde edilen Pistia bitkisi amonyum gideriminde yüksek oranda başarılı olmuştur. Bafra yöresine ait ve Kızılırmak Deltasından alınan yosun türü iki günde %57 verimle nitrat gidermiş bunun yanında %70 verimle amonyum uzaklaştırmıştır. Elodea Densa bitkisi planlanan iki günlük hidrolik bekleme süresi altında %81 verimle nitrat giderimi sağlarken %75 verimle amonyum gidermiştir. Köklü bir bitki olan ve diğer bitkilere göre daha hızlı çoğalan Ceratophyllum Demersum iki gün içinde %48 verimle nitrat giderimi sağlarken atık sudan %69 verimle amonyağı uzaklaştırmıştır.

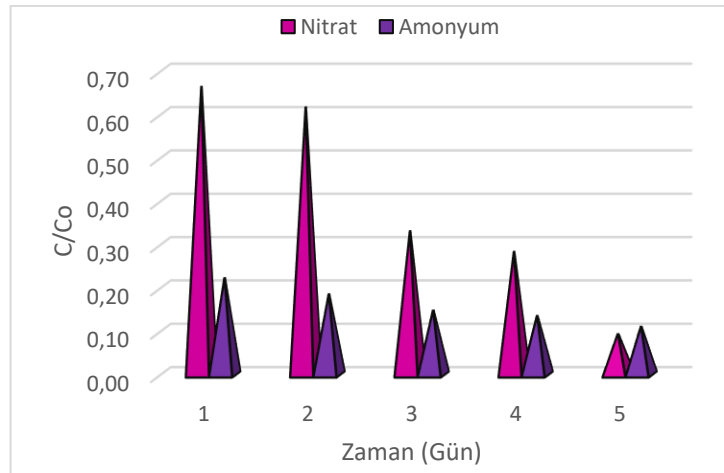
Bitkilerin tümü amonyum arıtımında %50 den fazla verim göstermiştir. Nitrat gideriminde diğer bitkilere göre daha az verime sahip bitki türlerinin yapay sulak alan tankında kullanılmasının sebebi amonyum gideriminde yüksek başarı göstermeleridir. Bitki türleri için arıtım derecelendirmesinin yapılması amacıyla her bitki için ayrı ayrı nitrat ve amonyum giderim verim grafikleri Şekil 4.1-4.6'da verilmiştir.



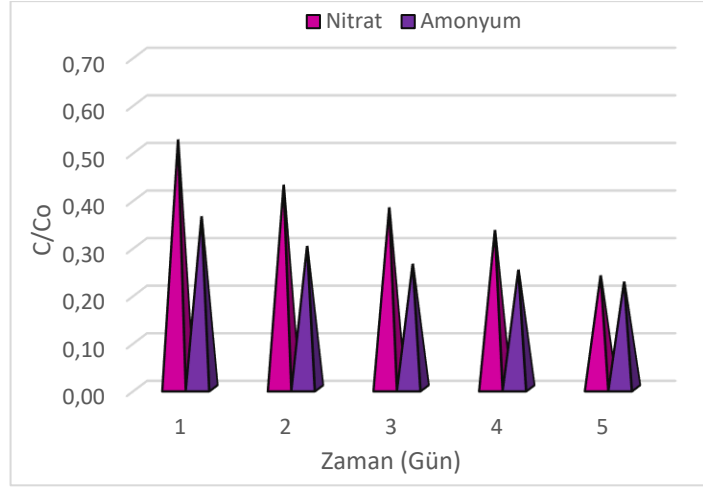
Şekil 4.1. Lemna minor bitkisinin nitrat ve amonyum giderim verimi



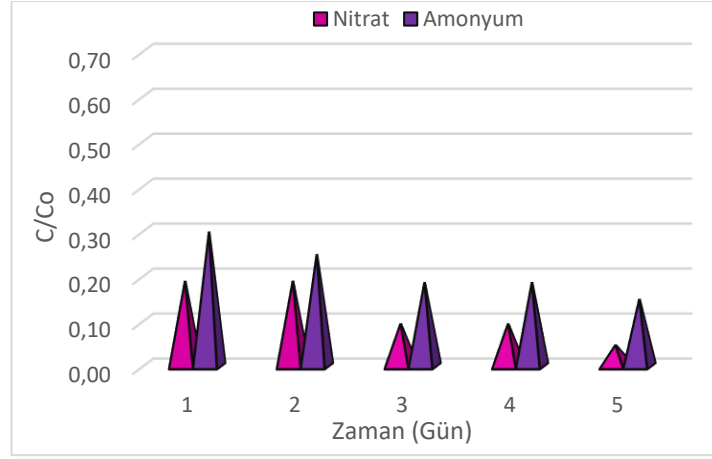
Şekil 4.2. Micra bitkisinin nitrat ve amonyum giderim verimi



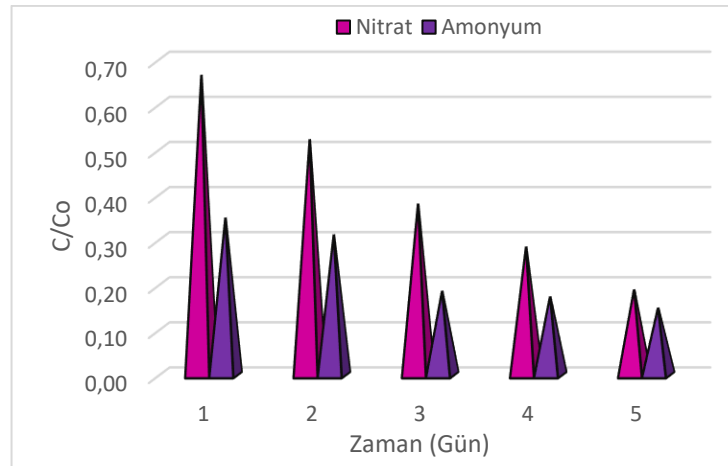
Şekil 4.3. Pistia bitkisinin nitrat ve amonyum giderim verimi



Şekil 4.4. Yosun (Bafra) bitkisinin nitrat ve amonyum giderim verimi



Şekil 4.5. Elodea Densa bitkisinin nitrat ve amonyum giderim verimi



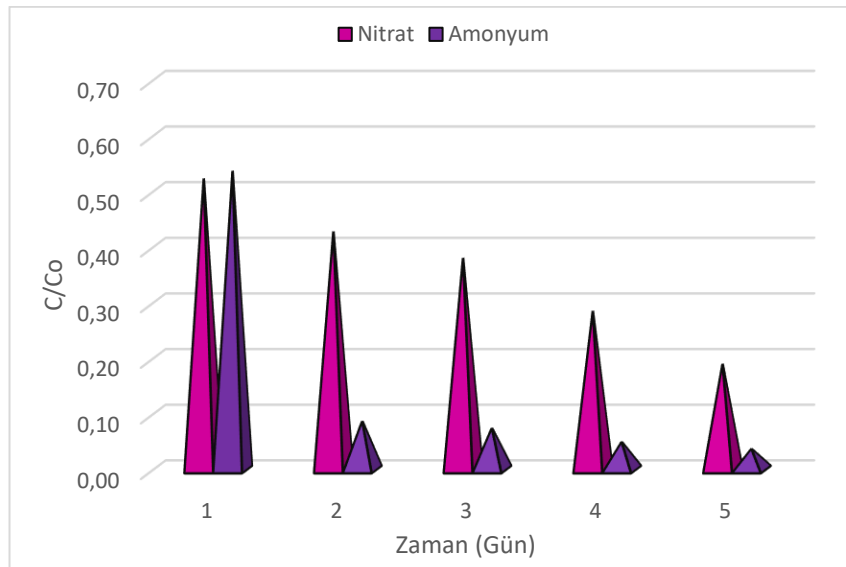
Şekil 4.6. Ceratophyllum bitkisinin nitrat ve amonyum giderim verimi

Bitki türleri ayrı ayrı ölçüldükten sonra kullanılması planlanan bitkiler kesikli olarak çalışacak ortak bir tankta 1-5 günlük bekleme süreleri için nitrat ve amonyum giderim verimleri incelenmiştir. Ölçüm sonuçları Tablo 4.6’da gösterilmektedir.

Tablo 4.6. Bitkilerin (Pistia, Lemna Minor, Elodea Densa, Ceratophyllum, Micra) ortak sistemde farklı hidrolik bekleme sürelerinde ölçülen kirletici konsantrasyonları

Bekleme Süresi Gün	Nitrat (mg/L)	Amonyum (mg/L)
Giriş	2,00	0,87
1	1,10	0,43
2	0,90	0,07
3	0,80	0,06
4	0,60	0,04
5	0,40	0,03

Kesikli çalışmalar esnasında 72 saatlik ölçümler gerçekleştirilirken çiçek tankının, seyreltme için kullanılan musluk suyunun ve hazırlanan sentetik drenaj suyunun fosfat değerleri de izlenmiştir. 72 saat sonunda giriş suyunda bulunan 2,00 mg/L NO₃-N değeri 0,40 mg/L NO₃-N değerine (80 verim), 0,87 mg/L NH₄-N değeri 0,03 mg/L NH₄-N değerine (%96 verim) düşürülmüştür. Bitkilerin fosfat giderimi üzerine potansiyellerinin anlaşılması amacıyla 1 mg/L PO₄ olarak ölçülen fosfat değeri 0,14 mg/L’ye kadar düşerek yaklaşık %86 verimle artırılmıştır.



Şekil 4.7. Ortak yapay sulak alan sistemi nitrat/amonyum giderim verimleri

Elodea Densa (Egeria), Lemna Minor (Su Mercimeği), Micranthemum Micranthemoides (Micra), Pistia (Su Marulu), Ceratophyllum Demersum (Tilki Kuyruğu Çam) bitkilerinden oluşturulan ortak tanka diğer bitkileri istila etmemesi

adına Bafra bölgesinden alınan yosun türü eklenmeden kesikli ortak tank deneyleri gerçekleştirilmiştir.

4.1.2. Reaktiflerin Seçimi

Reaktif bariyer sistemi için oluşturulan tank bölmelerinde kullanılacak reaktiflerin seçimi için farklı materyaller 100 ml drenaj suyu içeren erlene eklenen 1 gr reaktifle 190 rpm çalkalama hızında 24 saat temas ettirilmiştir. Reaksiyon sonucunda çalkalayıcıdan alınan numuneler 50 mL satrifüj kaplarına alınarak 30 dk santrifüjlenmiş ve şırınga filtreden geçirilmiştir. Organik bir madde olan kenevir için ayrıca 24 saatlik ve 10 günlük liç deneyleri liç deneyleri sağlanmıştır.

Literatür bilgisine dayanarak denenen reaktifler gideriminin sağlanması planlanan kirlenici konsantrasyonları için gerekli nitrat, fosfat, amonyum, pH ve EC ölçümleri yapılmıştır. Yüksek verimli bulunan reaktifler için desorpsiyon yapıp yapmadığına bakılması amacıyla diğer parametrelerin ölçümü sağlanmıştır.

4.1.2.1. Nitrat Giderici Reaktif Seçimi

Nitrat giderimi için kullanılan kök kenevir ve sap kenevir için artım verimleri ayrı ayrı incelenmiş olup her iki giderim deneyinde de giderim verimi %99 olarak ölçülmüştür. Performansının anlaşılması için 10 gün sonunda kenevirin nitratin neredeyse tamamını drenaj suyundan uzaklaştırmada başarı göstermiştir. Deney sonucunda elde edilen bulgular hem kök kenevirin hem de sap kenevirin nitrat giderimi için kullanılabileceği sonucuna ulaşmamızı sağlamıştır (Tablo 4.7).

Tablo 4.7. Kenevir ile 10 günlük nitrat giderim deney sonuçları

Materyal	Çıkış Nitrat (mg/L)	Çıkış Amonyum (mg/L)	Bekleme Süresi (Gün)
Giriş	25,20	-	10
Sap Kenevir	0,20	1,32	10
Kök Kenevir	0,10	1,29	10

Deneylerin ikinci aşmasında farklı oranlarda beraber kullanılan sap ve kök kenevir için 24 saat süreli deneyler gerçekleştirilmiştir. Bu deneyler esnasında kullanılan atık su içeriği Tablo 4.8.'de ayrıntılı olarak verilmiştir.

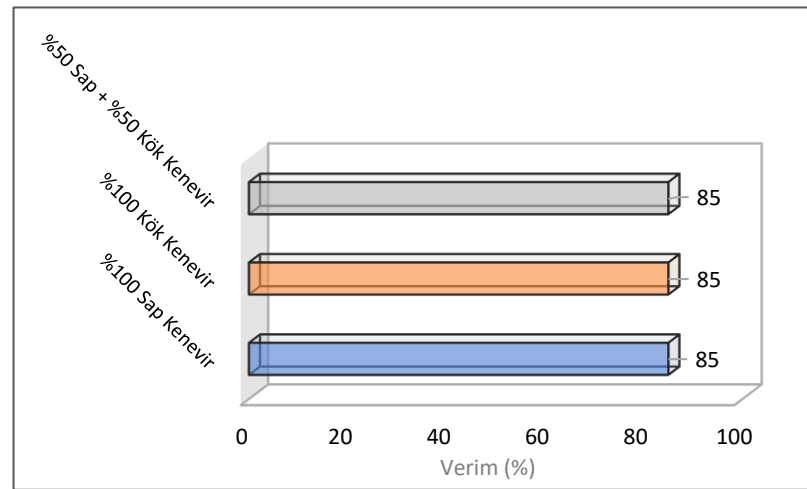
Tablo 4.8. Farklı kombinasyonlarda kenevir bitkisinin nitrat giderim düzeyleri

Materyal	Giriş Nitrat (mg/L)	Çıkış Nitrat (mg/L)	Çıkış Amonyum (mg/L)	Süre (Saat)
%100 Sap Kenevir	2,10	0,30	1,87	24
%100 Kök Kenevir	2,10	0,30	1,50	24
%50 Sap + %50 Kök Kenevir	2,50	0,40	1,59	24
%20 Sap + Kök Kenevir	1,80	0,60	0,56	24
%40 Sap + Kök Kenevir	1,80	0,20	0,84	24
%60 Sap + Kök Kenevir	1,80	0,20	1,18	24

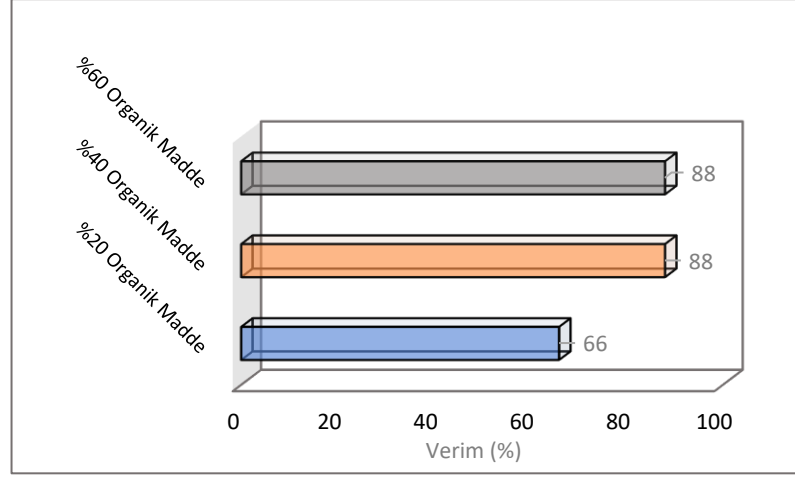
24 saat süreyle gerçekleştirilen denemelerde, deneyler %100 sap ve %100 kök kenevirin ayrı ayrı incelenmesi sonucunda hem sap kenevirin hem de kök kenevirin %85 arıtım verimiyle kirletici giderdiği belirlenmiştir. Sistemde kök ve sap kenevirin ortak kullanımının uygun olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Eşit oranda (%50 sap kenevir + %50 kök kenevir) karıştırılarak 24 saat sentetik drenaj suyuyla temas eden kenevirler yaklaşık %85 verimle nitratın drenaj suyundan uzaklaştırılmasını sağlamıştır (Şekil 4.8).

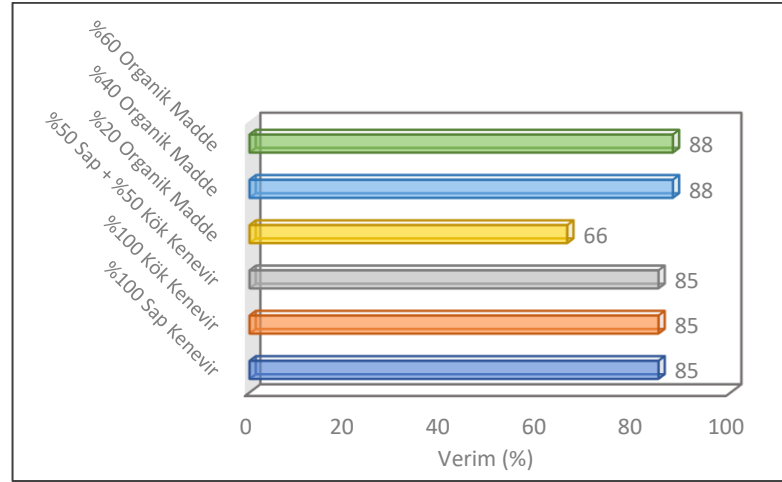
Yine 24 saat süreyle gerçekleştirilen %20, %40, %60 organik madde ve geriye kalan kısmın çakıl olarak gerçekleştirildiği üç farklı deneyde sırasıyla %66, %88 ve %88 verimle nitrat giderimi sağlanmıştır. Organik madde miktarının yaklaşık %50 oranında sağlanması %80 üzerinde verimle kirletici konsantrasyonunun giderilmesini sağlamaktadır (Şekil 4.9).



Şekil 4.8. Sadece kenevirle arıtımın denemesi sonucu nitrat arıtım verimleri



Şekil 4.9. %20, %40, %60 oranında kenevirle arıtımın denemesi sonucu nitrat arıtım verimleri



Şekil 4.10. Farklı kompozisyonlarda kenevirin nitrat giderimi üzerine etkisi

4.1.2.2. Amonyum Giderimi İçin Reaktif Seçimi

Uzun yıllardır amonyak giderici olarak zeolitlerin kullanıldığı bilinmektedir. Bu bilgiden yola çıkarak ve nitrat giderimi esnasında yüksek nitrat giderim verimleri göstermesine rağmen amonyak desorpsiyonuna neden olan kenevir bitkisinin kullanımı sonucunda amonyağın yüksek verimle giderilebilmesi için zeolitlerin denemesi uygun bulunmuştur.

Manisa ve Çorum bölgesine ait iki farklı zeolit ile çalışmalar gerçekleştirildi. Bunların yanında dolomit ve bentonit içinde aynı denemeler yapılmış ancak amonyum giderimi konusunda verimli sonuçlara ulaşılmadığı için kullanılmaları uygun bulunmamıştır. Tablo 4.9'da dolomit ve bentonit için ölçülen değerlere de yer

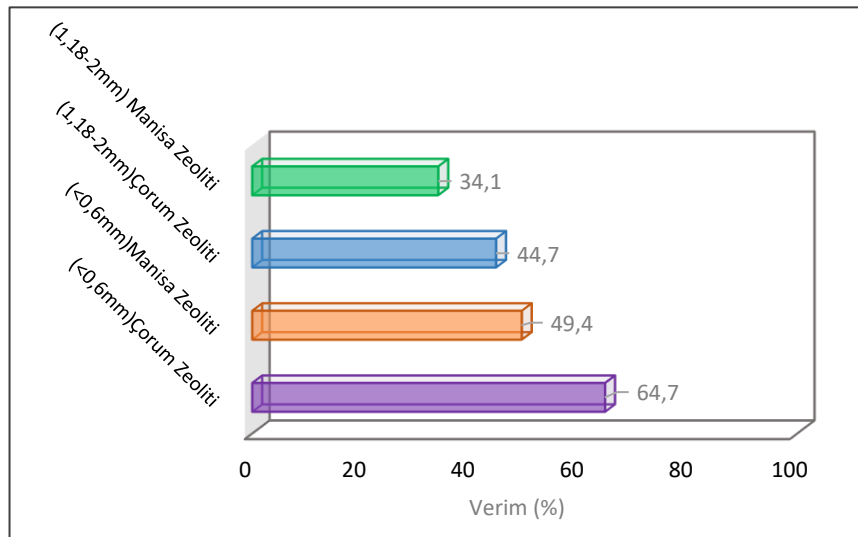
verilmiştir. Deneyler iki set şeklinde gerçekleştirilmiş ve sonuçlar %98 oranında aynı olarak bulunmuştur.

Tablo 4.9. Amonyum gideriminde zeolit verimleri

Materyaller	Çıkış Nitrat (mg/L)	Çıkış Amonyum (mg/L)	Süre (Saat)
Giriş	1,70	0,85	-
(<0,6mm) Çorum Zeoliti	0,88	0,30	24
(1,18-2mm) Çorum Zeoliti	1,90	0,47	24
(<0,6mm) Manisa Zeoliti	1,07	0,43	24
(1,18-2mm) Manisa Zeoliti	1,08	0,56	24
(<0,6 mm) Dolomit	1,90	0,82	24
(<0,6mm) Bentonit	2,00	0,54	24

Hazırlanan drenaj suyunun deney öncesinde ölçülen amonyum (NH₄-N) değeri yaklaşık 0,85 mg/L olarak kaydedilmiştir. 0,6 mm'den küçük olan Çorum ve Manisa zeolitinin amonyum giderim verimi sırasıyla %65 ve %49 olarak ölçülmüştür. 1,18-2 mm boyutlarındaki Çorum zeoliti %45, Manisa zeoliti ise %34 artırım verimine sahiptir.

Gerçekleştirilen deneyler sonucunda zeolitlerin nitrat üzerine etkileri de incelenmiştir. Zeolit sistemde kullanılmasının seçimi üzerine nitrat kirliliğine etkisi olmaması da büyük bir etkidir. Şekil 4.11'de denen katı maddelerin verimleri ayrıntılı olarak gösterilmiştir.



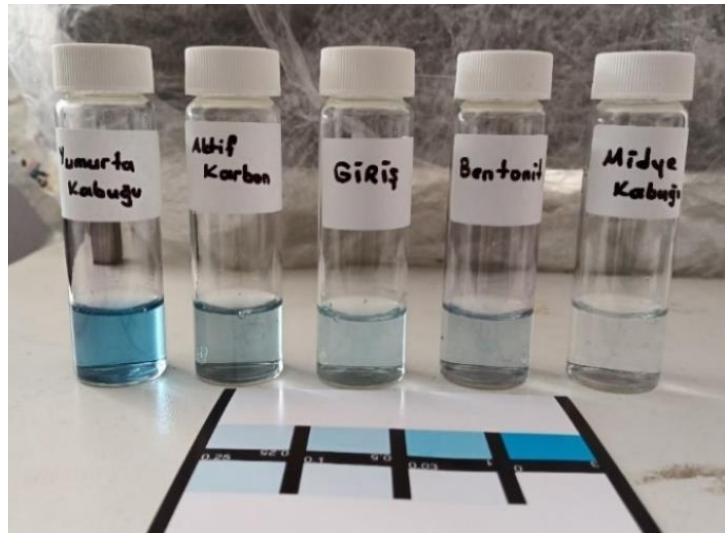
Şekil 4.11. Zeolitlerin amonyum artırım verimleri

Gerçekleştirilen deneyler sonucunda zeolitinin amonyum kirliliğini önemli oranda giderebildiği sonucuna varılmıştır. Sürekli sistemde kullanılmak üzere artırım

verimi en yüksek olan <0,6mm Çorum zeolitinin kullanılması daha uygun olmasına rağmen Manisa zeolitinin günümüzde rezerv olarak daha fazla bulunması ve tedarikinde kalite kontrolünün yapılması nedeniyle tercih edilmesine karar verilmiştir.

4.1.2.3. Fosfat Giderimi İçin Reaktif Seçimi

Fosfat giderimi için denen materyallerin ölçümleri 0,00-3,00 mg/L ölçüm aralığına sahip basit fosfat kiti yardımıyla ölçülmüştür. Literatür bilgisinden yararlanılarak bu denemeler esnasında yumurta kabuğu, aktif karbon, bentonit ve midye kabuğu denenmiştir. Renk değişimiyle gözlemlenen giderim Şekil 4.12.'de gösterilmiştir.



Şekil 4.12. Basit fosfat kiti ile gerçekleştirilen fosfat tayini

Kitin renk skalasına göre değerlendirilen sonuçlarda giriş fosfat değeri yaklaşık 0,25 mg PO₄ /L arasında tespit edilmiştir. Yumurta kabuğunun 24 saatlik deney sonucunda fosfatı arttırdığı bulunmuştur. Bunun yanında aktif karbon ve bentonit 0,10-0,15 mg/L değerinde gözlemlenmiştir. Midye kabuğu ise fosfatı atık sudan tamamen giderdiği sonucuna ulaşılmıştır.

Sistemde en yüksek verimle fosfat giderdiği düşünülen midye kabuklarının kullanılmasına karar verilmiştir. Midye kabukları Samsun'un Atakum ilçesindeki sahilden toplanmıştır. Bunun için kalsine edilen ve kalsinasyona maruz bırakılmayan midye kabuklarıyla bir dizi deney gerçekleştirilmiştir. Kalsinasyon işlemi 900 °C'de 3 saat olacak şekilde gerçekleştirilmiştir.

Fosfat deneyinin gerçekleştirilmesi için drenaj suyu yüksek fosfat (10-12 mg/L) içeriğine sahip olarak hazırlanarak midye kabuğunun fosfat giderim potansiyeli araştırılmıştır.

Tablo 4.10. Spektrofotometrik ölçüm yapılan fosfat deneylerinin verileri

Materyaller	Fosfat
	(mg/L PO ₄)
Giriş	12
1,18-2 mm kalsine midye kabuğu	0,07
1,18-2mm kalsine olmayan midye kabuğu	1,65

Gerçekleştirilen deneylere göre kalsinasyon yapılan midye kabukları %99 verimle fosfat kirleticisini uzaklaştırırken kalsinasyon yapılmayan midye kabukları %86 verimle kirleticiyi atık sudan uzaklaştırmıştır.

4.2. Sürekli Akışlı Sistem Çalışmaları

Sürekli sistem çalışmalarında kesikli deney sonuçlarından yararlanılarak giderim verimi yüksek olarak saptanan kenevir, kalsine midye kabuğu ve zeolitin; sırasıyla nitrat, amonyum ve fosfat giderimi için reaktif bariyer tankında kullanılmasına karar verilmiştir. Kullanılan midye kabuğu ve zeolit sistem ömrünün uzun olması için %100 oranında kullanılmıştır. Sürekli sistemde yüksek verimle nitrat kirliliğini gideren kenevir bitkisinin aynı zamanda fosfat ve amonyum artışına neden olduğu saptanmıştır. Birleşik sistem olarak çalıştırılan arıtım sistemi çıkış suyunda nitrat ve amonyum kirliliğini başarılı şekilde gidermiştir.

Çalışma boyunca sistemde KOİ değerleri de ölçülmüş ve birleşik sistem içerisinde KOİ artışına neden olan kenevirin kullanılmasının yanında midye kabuklarının ve zeolitin kenevirin arttırdığı KOİ kirliliğini giderdiği sonucuna ulaşılmıştır.

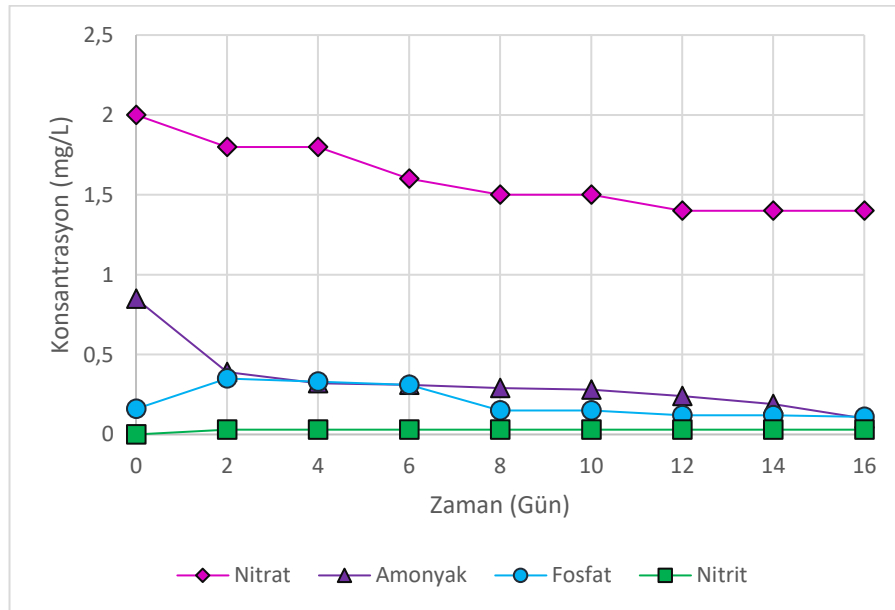
4.2.1. Sürekli Akışın Yapay Sulak Alan Üzerine Etkileri

Kesikli deneyler sonucu arıtım faaliyetlerinde başarılı bulunan bitkiler 40 litre hacme sahip yapay sulak alan tankına yerleştirilmiştir. Hidrolik bekleme süresi 2 gün olarak ayarlanan laboratuvar pompası yardımıyla sürekli akış altında kirleticilerdeki sonuçlar Tablo 4.11.'de gösterilmiştir.

Tablo 4.11. Yapay sulak alan tankındaki kirletici konsantrasyonundaki değişimler

Gün	Nitrat (mg/L)	Amonyum (mg/L)	Fosfat (mg/L)	Nitrit (mg/L)
Giriş	2,00	0,85	0,16	0,00
2	1,60	0,39	0,35	0,03
4	1,60	0,11	0,31	0,03
6	1,50	0,22	0,15	0,03
8	1,50	0,18	0,15	0,03
10	1,40	0,20	0,12	0,03
12	1,40	0,20	0,12	0,03
14	1,30	0,19	0,11	0,03
16	1,30	0,10	0,11	0,03

Sentetik olarak hazırlanan drenaj suyu ortalama 2,00 mg/L NO₃-N, 0,85 NH₄-N, 0,16 PO₄ ve 1 g/L NaCl içeriğine sahiptir. 16 gün boyunca iki günlük hidrolik bekleme süresi ayarlamasında ölçülen sulak alan deneyleri sonucunda bitkilerin sentetik drenaj suyuna alışma sürecinin bulunduğu bu sürede kirletici gideriminin daha yavaş gerçekleştiği sonucuna ulaşılmıştır. Gerçekleştirilen son deney verilerine göre yapay sulak alan tankı iki günlük hidrolik bekleme süresi sonunda, 2,00 mg/L NO₃-N değerini 1,40 mg/L NO₃-N değerine düşürmüştür. Giriş suyunda bulunan 0,85 mg/L NH₄-N değeri 0,10 mg/L NH₄-N değerine düşürülerek amonyum gideriminde nitrat gideriminden daha fazla etki gözlemlenmiştir. Tankta ilk 6 gün boyunca artış gösteren fosfat miktarı 16. günün sonunda 0,16 mg/L PO₄ değerinden 0,11 mg/L PO₄ değerine düşürülmüştür. Yapay sulak alan tankı çıkışında NO₃-N, NH₄-N ve PO₄ kirleticilerinin giderimleri Şekil 4.13’de detaylı olarak gösterilmiştir.



Şekil 4.13. Yapay sulak alan sistemindeki kirletici konsantrasyonundaki değişimler

Kirletici arıtım verimleri Şekil 4.14’de grafik yardımıyla gösterilmiştir. Fosfat kirleticisi 4. günden itibaren çiçekler tarafından giderilmeye başlanmıştır. Bunun nedeni çiçeklerin tuzlu drenaj suyuna ve sürekli akışa adapte olması olarak açıklanabilir. Başlangıçta nitrat giderimi düşük olsa da zamana bağlı olarak giderimde artış gözlenmiştir.



Şekil 4.14. Yapay sulak alan sistemi kirletici giderim verimleri (C_0 = Drenaj suyu giriş konsantrasyonu, C = reaktif tank çıkış konsantrasyonu)

Gerçekleştirilen deney serisi sonunda sürekli sistemde %26 verimle nitrat, %87 verimle amonyum ve %31 verimle fosfat giderilmiştir. Amonyum gideriminin diğer kirleticilere göre daha yüksek olma sebebi çiçek tankındaki bitki türlerinin seçimi ile doğrudan ilgilidir. Kesikli olarak gerçekleştirilen çalışmalar sonucunda kullanılan bitki türlerinden çoğunun amonyum kirleticisi üzerinde daha etkili olduğu görülmüştür. Buna bağlı olarak ortak bitki sisteminde amonyum gideriminin daha yüksek oluşu bu sonuçlarla uyumludur. Ayrıca kirletici arıtımındaki en önemli faktörün bekleme süresinin değişimi olduğu açıktır.

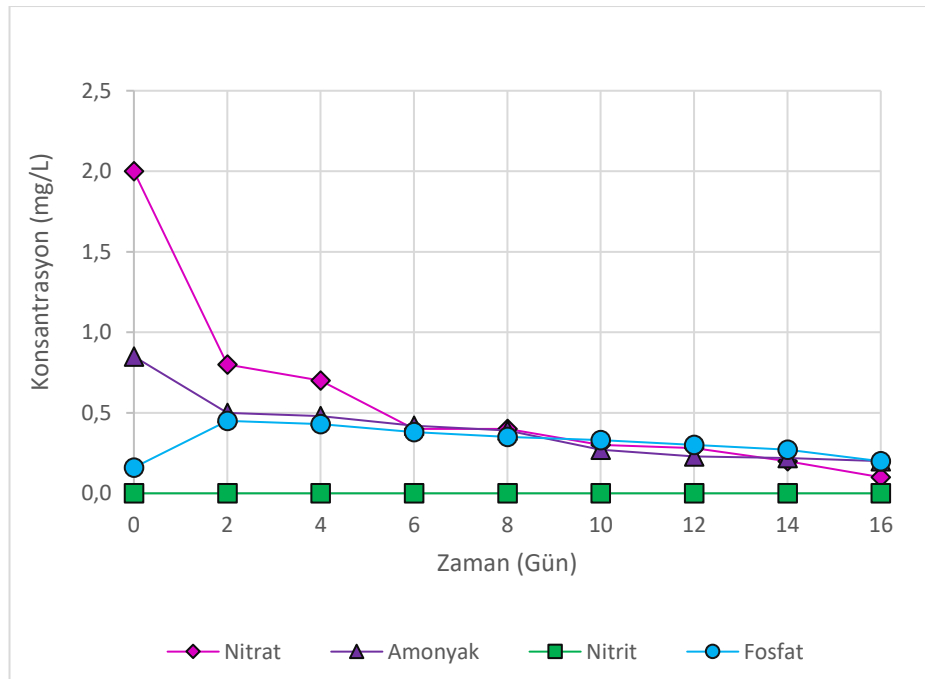
4.2.2. Sürekli Akışın Reaktif Tankı Üzerine Etkileri

Sürekli sistem ölçümleri için hem sistem ömrünün uzun olması hem de reaktiflerin davranışlarının anlaşılması için reaktif tankına kenevir, midye kabuğu ve zeolit %100 oranında sisteme yerleştirilmiştir. Yapay sulak alan sonrasına yerleştirilen reaktif bariyer tankının iki günlük hidrolik bekleme süresi için ayarlanan debi değerinde gerçekleştirilen deney sonuçları Tablo 4.12’de gösterildiği gibidir.

Tablo 4.12. Reaktif tankındaki kirletici konsantrasyonundaki değişimler

Gün	Nitrat (mg/L)	Amonyum (mg/L)	Fosfat (mg/L)	Nitrit (mg/L)
Giriş	Ortak bitki sisteminin çıkışı			
2	0,80	0,50	0,45	0,00
4	0,70	0,48	0,43	0,00
6	0,40	0,39	0,38	0,00
8	0,40	0,23	0,35	0,00
10	0,30	0,34	0,33	0,00
12	0,30	0,23	0,35	0,00
14	0,20	0,22	0,27	0,00
16	0,10	0,20	0,20	0,00

Sulak alan sisteminden çıkan drenaj suyu reaktif sistemine girdikten sonraki konsantrasyon değişimleri kaydedilmiştir. İki gün aralıklarla gerçekleştirilen ölçüm sonuçlarına bakıldığında nitrat kenevirlerin mevcut olmasıyla yüksek oranda (%90'ın üzerinde artırım verimi) giderilmiştir. Bunun yanında amonyum çiçek tankı çıkışındaki değerlere göre artış göstermiştir. 16 günlük seri ölçümler sonucunda çiçek tankı çıkışında %88 verim ile giderilen amonyum reaktif tankı çıkışında sulak alan sistemi çıkışındaki konsantrasyon değerlerine göre ortalama %100 oranında artış göstermiştir. Kirletici konsantrasyonlarındaki miktarların grafiksel gösterimi Şekil 4.15'de belirtilmiştir.



Şekil 4.15. Reaktif tankının sürekli akış altında son çıkışta izlenen kirletici konsantrasyonlarının zamanla değişimi

Fosfat kirleticisi reaktif tankında benzer oranda artış göstermiştir. Sisteme yerleştirilen deniz kabuklarının fosfatı tuttuğu, kenevir sonrasında ve deniz kabukları sonrasında yer alan kum bölmesine yerleştirilen borular yardımıyla belirli aralıklarla alınan numunelerde yapılan ölçümlerden anlaşılmaktadır. Sisteme yerleştirilen (kenevir bölmesi çıkışı ve midye kabuğu bölmesi çıkışı) gözlem borularından alınan sonuçlara göre kenevirle temas eden drenaj suyu içeriğindeki amonyum ve fosfat düzenli olarak artış gösterirken, midye kabuğu çıkışından alınan numunelere göre fosfat midye kabukları tarafından arıtılmıştır. Son çıkış suyu örneklerinden elde edilen verilere göre ise, zeolit amonyum arıtımını sağlamıştır. Tablo 4.13.'de gözlem borularından elde edilen sonuçlar gösterilmiştir.

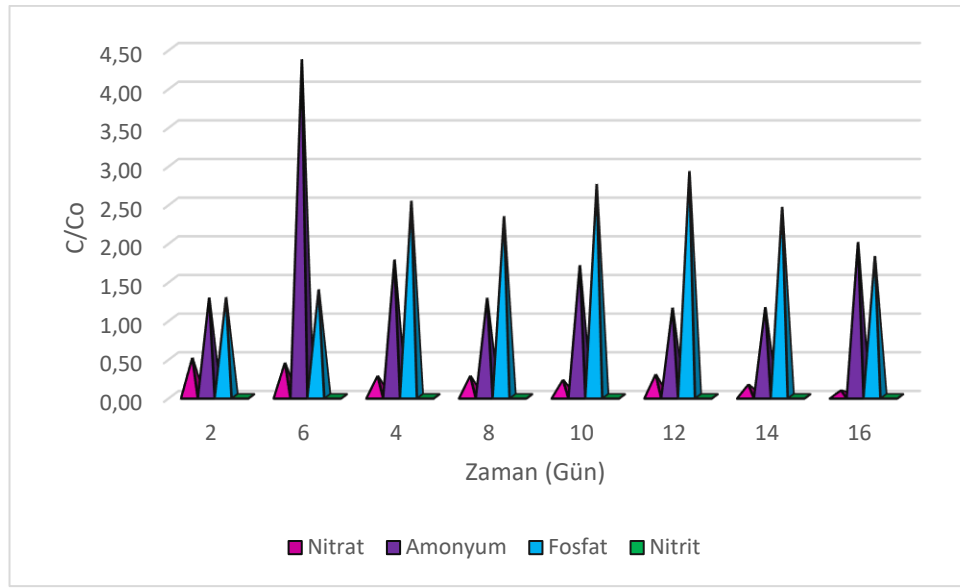
Gözlem borularından alınan veriler incelendiğinde kenevir sonrasına yerleştirilen gözlem noktasından 4. gün alınan verilere göre kenevir tarafından sistemde giderimi sağlanan nitrat sulak alan sistemi sonrası kenevir ile arıtıldıktan sonra 0,70 mg/L ile sistem çıkışına ulaşmıştır. 10. ve 14. günlerde de gerçekleştirilen çalışmada sistemde nitrat salınımı yapan herhangi bir reaktifin olmadığı sonucuna ulaşılmıştır.

Tablo 4.13. Gözlem noktalarındaki konsantrasyon verileri

Gün	Nitrat (mg/L)	Amonyum (mg/L)	Fosfat (mg/L)	Nitrit (mg/L)
Kenevir Çıkışı				
4	0,70	1,80	1,48	0,00
10	0,30	0,67	0,80	0,00
14	0,20	0,42	0,80	0,00
Midye Kabuğu Çıkışı				
4	0,50	1,80	0,26	0,00
10	0,60	0,60	0,38	0,00
14	0,20	0,40	0,21	0,00

Sulak alan sistemi sonrasında arıtımı gerçekleştirilen amonyum değeri 4. günün sonunda 0,32 mg/L NH₄-N değerinden kenevir çıkışında 1,80 mg/L NH₄-N olarak ölçülmüştür. Midye kabuğu çıkışında da aynı ölçülen değer amonyum artışına kenevirin sebep olduğunun anlaşılmasını sağlamıştır. Midye kabuğu bölmesinin sonundan alınan numunelerin ölçülmesiyle elde edilen veriler, midye kabuklarının amonyum üzerinde bir etki göstermediğini kanıtlamıştır. Sistem çıkışında amonyum zeolitin varlığında 0,48 mg/L'ye düşürülmüştür. 10. ve 14. günlerde alınan sonuçlar bu sonucu desteklemektedir.

Sistemdeki fosfat değerler incelendiğinde ise 4. gün alınan numunelere göre PO₄ konsantrasyonunun sulak alan çıkışı sonrası 0,31 mg/L değerine çıktığı, kenevir reaktif bölgesi sonrasındaki gözlem noktasında ise 1,48 mg/L olarak ölçüldüğü görülmüştür. Sulak alan tankında ve kenevir varlığında artış gösteren fosfat miktarı midye kabuklarının arıtıma dahil olmasıyla 0,26 mg/L değerine kadar düşürülebilmıştır. Sistemin çalıştığı günün sonuna kadar girişteki fosfat miktarı kenevirin sürekli fosfat salınımı yapması neticesinde sürekli olarak artış gösterse bile 16. günün sonundaki artışın 4. gündeki artış kadar yüksek olmadığı saptanmıştır.



Şekil 4.16. Reaktif tankı son çıkışta kirlenici giderim verimlerindeki zamana bağlı değişim (C₀ = Sulak alan tankı çıkış konsantrasyonu, C = reaktif tank çıkış konsantrasyonu)

Reaktif tankında bulunan kenevirin salgıladığı organik karbon ile gerçekleşen heterotrofik denitrifikasyon süreci sonucunda nitrat kirliliği 16 gün sonra %92 verimle drenaj suyundan giderilmiştir. Amonyum ve fosfat kirlenici için ise çiçek tankında gerçekleştirilen arıtım sonrasında reaktif tankında artış görülmüştür.

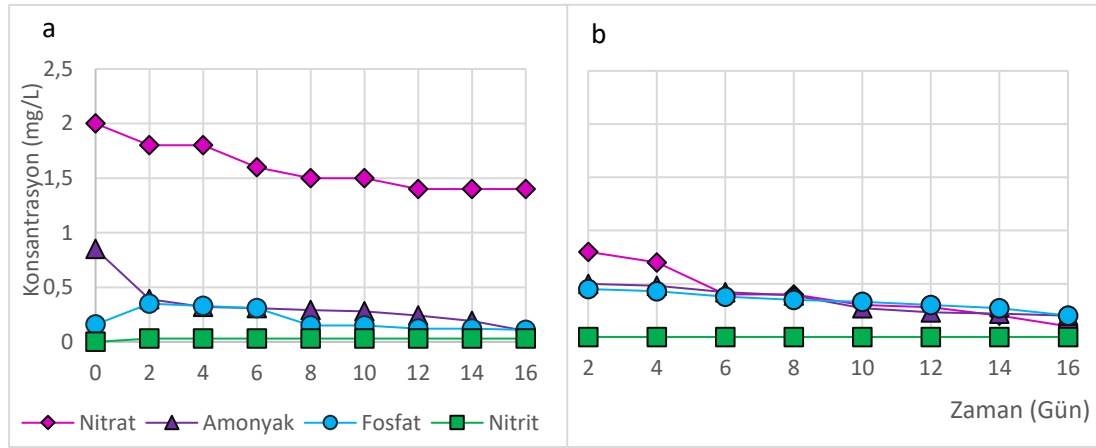
4.2.3. Birleşik Sistemin Kirlenici Konsantrasyonu Üzerindeki Etkileri

Gerçekleştirilen sürekli sistem çalışmalarında yapay sulak alan tankı ve reaktif sistemi ardışık olarak çalıştırılması sonucunda elde edilen kirlenici değişimleri zamana bağlı olarak izlenmiştir. İlk sistem için arıtım verimleri yapay sulak alan tankı ve reaktif bariyer birleşik sistemi için sentetik drenaj suyu girişi ve reaktif tank çıkışı göz önünde bulundurularak Tablo 4.14’de gösterilmiştir.

Sistem genelinde nitrat kirliliği %90'ın üzerinde ve amonyum kirliliği %70'den fazla giderilmiştir. Fosfatta giriş konsantrasyonuna göre %50 den fazla artışla çıkışa ulaşmıştır.

Tablo 4.14. Birleşik sistemdeki kirletici konsantrasyonundaki değişimler

Gün	Nitrat (mg/L)	Amonyum (mg/L)	Fosfat (mg/L)	Nitrit (mg/L)
Giriş	2,00	0,85	0,16	0,00
2	0,80	0,50	0,45	0,00
4	0,70	0,48	0,43	0,00
6	0,40	0,39	0,38	0,00
8	0,40	0,23	0,35	0,00
10	0,30	0,34	0,33	0,00
12	0,30	0,23	0,35	0,00
14	0,20	0,22	0,27	0,00
16	0,10	0,20	0,20	0,00

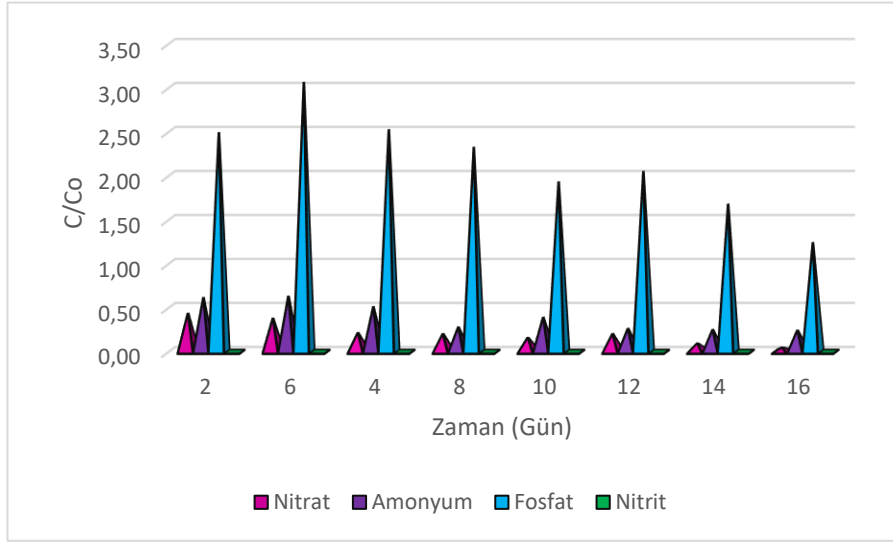


Şekil 4.17. Birleşik sistem kirletici konsantrasyon değişim grafiği, (a) Sulak alan sistemi kirletici konsantrasyon değişimleri, (b) Reaktif bariyer sistemi kirletici konsantrasyon değişimleri

Nitrat kirleticisi birleşik sistemde, yapay sulak alan yardımıyla hızla drenaj suyundan uzaklaştırılmaya başlanmıştır. Giriş suyunda bulunan ortalama 2,00 mg/L $\text{NO}_3\text{-N}$ değeri son ölçüm sonucuna göre 0,10 mg/L $\text{NO}_3\text{-N}$ değerine düşürülmüştür. %95 verimle drenaj suyundan uzaklaştırılan nitrat kirleticisi için kenevirin birleşik sistemde kullanımı başarılı sonuçlara ulaşılmasını sağlamıştır.

Sistemde amonyum artış göstermiştir. Ancak bu artış giriş konsantrasyonundan düşüktür. Kenevirler amonyumu arttırmasına rağmen zeolit reaktifinin varlığı birleşik sistem çıkışında amonyum kirliliğinin giderimini sağlamıştır. Böylece amonyum giriş suyundan %76 verimle arıtılmıştır. Giriş suyunda 0,85 mg/L $\text{NH}_4\text{-N}$ kirleticisi 0,20

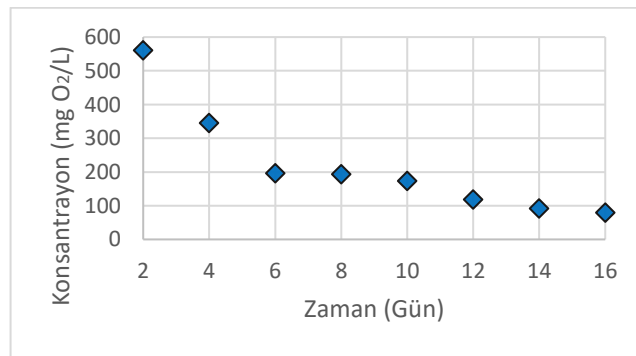
mg/L NH₄-N değerine düşürülmüştür. Birleşik sistem çalışması sonucunda ilk sistem için kirletici giderim verimleri Şekil 4.18’de grafik üzerinde açıklanmıştır.



Şekil 4.18. Birleşik sistem kirletici giderim verimleri (C_0 = Drenaj suyu giriş konsantrasyonu, C = reaktif tank çıkış konsantrasyonu)

4.2.4. Sürekli sistemde KOİ değişimleri

Sürekli sistemde kullanılan sentetik drenaj suyu musluk suyu kullanılarak oluşturulduğu için aralıklı olarak musluk suyunun kirletici konsantrasyonları incelenmiştir. Drenaj suyu ve çiçek tankında KOİ değerinin beklenmemesinin yanında reaktif tankında bulunan kenevir KOİ değerinde artışa sebep olmuştur. Bunun yanında midye kabukları ve zeolit sürekli akış altında kenevirin arttırdığı KOİ değerini düşürmüş ve sisteme olumlu yönde katkı sağlamıştır.

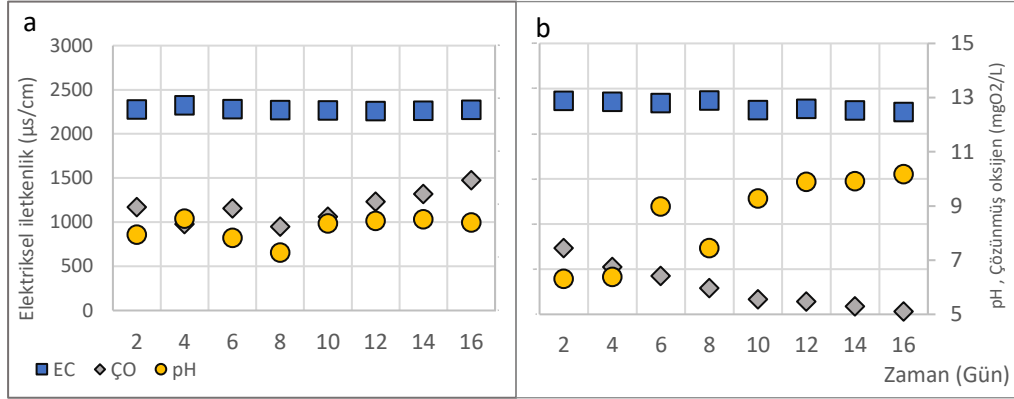


Şekil 4.19. Sistemdeki KOİ konsantrasyon değişimi

Giriş suyunda ve çiçek tankında KOİ seviyesi göz ardı edilecek kadar düşüktür. Musluk suyuyla hazırlanan drenaj suyunun KOİ içeriğinin karşılaştırılabilmesi için musluk suyu da düzenli olarak KOİ deneylerinde ölçülmüş ve drenaj suyuyla aynı

değerlere sahip olduğu bulunmuştur. Bunun yanında reaktif tankında bulunan kenevir organigi tank içerisindeki KOİ seviyesini ilk günden başlayarak arttırmıştır. İlk ölçümde 561 mg/L olarak ölçülen KOİ seviyesi zamanla 100 mg/L'nin altına düşmüştür. Reaktif tankında bulunan midye kabukları ve zeolit KOİ kirliliğinin azaltılmasında etkin rol oynamıştır.

4.2.5. Birleşik Sistemdeki pH, EC ve ÇO Değişimleri



Şekil 4.20. Birleşik sistemdeki pH, EC ve ÇO değişimleri, (a) Sulak alan sistemi pH, EC ve ÇO değişimleri, (b) Reaktif bariyer sistemi pH, EC ve ÇO değişimleri

Drenaj sularındaki en büyük problemlerden biri yüksek tuzluluk oranına sahip olmasıdır. Bu durumda sistemdeki materyallerin kirleticilerin gideriminin sağlanması esnasında tuzluluğu arttırmaması istenmektedir. Sistemin değişik noktalarından alınan numunelerde düzenli olarak pH, EC ve ÇO değerlerinin de ölçümü sağlanmıştır.

Elektriksel iletkenlik tüm sistem boyunca 2300-2500 µs/cm değeri aralığında değişkenlik göstermiştir. Sentetik drenaj suyundaki ortalama iletkenlik değeri ortalama 2265 µs/cm değerine sahiptir. Yapay sulak alan ve reaktif sisteminde tuzluluk için bir iyileştirme söz konusu olmamakla birlikte tuzluluk aşırı yükselmediği için olumsuz sonuçlar elde edilmemiştir. Çözünmüş oksijen değeri sulak alan sisteminde artış gösterirken reaktif sisteminde periyodik olarak düşmüştür. Yapay sulak alan bitkilerinin fotosentez varlığında gerçekleştirdiği besin dönüşümleri sonucu çözünmüş oksijen seviyesindeki artış beklenen bir durumdur. Girişte ortalama 9,18 mg O₂ /L değerindeki ÇO değeri sulak alan tankında 16 gün sonunda yaklaşık %20 artış gösterirken reaktif tankındaki ÇO değeri giriş seviyesine göre yaklaşık %39 düşüş göstermiştir. pH değerleri incelendiğinde sulak alan sisteminde pH giriş suyuna göre yüksek bir değişiklik göstermezken reaktif sistemi çıkışında (birleşik sistem çıkışı) pH değeri 8,32 değerinden 10,18 değerine yükselmiştir.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Çalışma boyunca elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde sulak alan ve reaktif bariyer sistemlerinin birlikte kullanılması sonucu nitrat ve amonyum kirleticilerinin drenaj sularından arıtımının yüksek verimlilik ile mümkün olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Yapay sulak alan sistemleri ile tarımsal drenaj sularının nitrat ve amonyum kirliliğinin iyileştirilmesi kesikli olarak gerçekleştirilen ayrı bitki sistemi çalışmalarında nitrat 5 günlük hidrolik bekleme süresi sonucunda yaklaşık %95 verimle Lemna Minor, Micranthemum ve Elodea Densa bitkileri tarafından 2,10 mg/L NO₃-N değerinden 0,10 mg/L NO₃-N değerine düşürülmüştür. Ayrı sistemlerde gerçekleştirilen deneylerde en düşük NO₃-N verimi ise (%76) verimle Bafra bölgesinden alınan Yosun bitkisinde saptanmıştır. Bunun yanında 5 günlük bekleme süresi sonucunda amonyum kirleticisinin en verimli şekilde iyileştirildiği bitki sistemi (%88 verimle) Pistia sistemidir. NH₄-N miktarı 0,85 mg/L'den 0,20 mg/L'ye düşürülmüştür. Bitkiler ayrı ayrı incelendiğinde nitratı daha fazla arıtan bitkilerin amonyum kirleticisi için daha az giderim sağladığı ve amonyum iyileştiren bitkilerinde daha az nitrat kirleticisi giderdiği sonucuna ulaşılmıştır. Ortak bitki sistemindeki sonuçlar incelendiğinde 5. günün sonunda nitrat 2,10 mg/L NO₃-N değerinden 0,40 mg/L NO₃-N değerine (%80 verim) düşürülmüştür. Amonyum ise tüm bitkilerin ortak sistem içinde çalışması sonucu %96 verimle drenaj suyundan giderilmiştir. Sürekli şekilde tuzlu drenaj suyunun beslendiği sistemde ise 5 günlük nitrat ve amonyum verileri incelendiğinde NO₃-N giderim veriminin %16 değerine düştüğü amonyum giderim veriminin ise kesikli sistem çalışmalarıyla kısmen uyumlu (%60) olduğu sonucuna varılmıştır. Sulak alan sistemlerinde bekleme süresinin değiştirilmesi, çiçek seçiminin kirleticieye bağlı seçimi, sürekli akış hızının bitkilerin arıtım verimi üzerinde etkisinin çok önemli olduğu sonuçları çıkartılmıştır. Bekleme süresi arttıkça bitki sistemindeki arıtım veriminin arttırdığı görülmüştür. Tuzluluk bazı bitkileri etkilemezken bazıları üzerinde olumsuz etki sağladığından sistemlerdeki arıtım miktarları düşmüştür. Özellikle sürekli sistemde sisteme beslenen tuzlu drenaj suyu zamanla bitki sayılarında azalmaya yol açmış ve çıkış suyu kalitesini olumsuz etkilemiştir. Bunun yanında çalışma sonucunda, yüksek tuzluluk içeriğine sahip drenaj sularına karşı toleransa sahip bitki türlerinin varlığı saptanmıştır. Elodea densa ve Ceratophyllum Demersum bitkileri drenaj suyu gibi tuz içeriği yüksek atık suların gideriminde kullanılacak alternatif bitkiler olarak literatüre örnek teşkil

etmektedir. Amonyum arıtımında daha etkili olan Elodea Densa bitkisinin tuzluluğa karşı gösterdiği direnç daha yüksek olarak gözlemlenmiştir. Buna bağlı olarak sürekli sistemde amonyum arıtım veriminde daha başarılı sonuçlar elde edildiği sonucuna ulaşılmıştır.

Çalıştırılan sürekli sistemde reaktif bariyer sisteminin nitratı yüksek verimlilikle giderirken amonyum ve fosfat konsantrasyonunu arttırdığı sonucuna ulaşılmıştır. Kenevir ve midye kabuğu bölmelerine yerleştirilen gözlem noktaları sayesinde sistemdeki amonyum ve fosfat artışı saptanmış bunun yanında midye kabuklarının ve zeolitin amonyum ve fosfat kirliliği gideriminde etkin rol oynadığı belirlenmiştir. Birleşik olarak çalıştırılan sistemde iki sistemin birbirini desteklemesi sonucu drenaj suyu giriş değerinden daha düşük bir nitrat ve amonyum konsantrasyonu ile çıkışa ulaşmıştır. Sentetik olarak hazırlanan 2,00 mg/L NO₃-N değerine sahip drenaj suyu sistem sonunda 0,10 mg/L NO₃-N değerine düşürülmüştür. Sistemden %95 verimle nitrat kirleticisinin giderimi sağlanmıştır. Bunun yanında 0,85 mg/L NH₄-N ile sisteme beslenen sentetik drenaj suyu içeriği sistem sonunda %76 verimlilikle giderilmiş ve 0,20 mg/L NH₄-N olarak saptanmıştır. Fosfat miktarı 0,16 mg/L olarak hazırlanan drenaj suyu 16 günün sonunda 0,20 mg/L değerine çıkmıştır. Bu artışın sebebinin gözlem noktalarından alınan verilere göre sistemdeki kenevir varlığı olduğu sonucuna varılmıştır.

Karbon varlığında mikroorganizmaların gerçekleştirdiği organik madde varlığındaki arıtım sistem boyunca devam etmiştir. KOİ değerlerine bakıldığında 493 mg/L değeri ile çalışmaya başlayan sistemde zaman içerisinde bu değer 30 mg/L değerine gerilemiştir. Sürekli sistem organik maddenin yıkanmasıyla salınımın azalmasına yol açmıştır. Bu durum kenevir organığının fosfat ve amonyum salmasıyla da doğrudan ilgilidir. Sistemin son gününde ölçülen fosfat değeri öncesinde ölçülen değerden daha düşük olarak bulunmuştur.

Sistemde devamlılığın sağlanabilmesi ve verimin artırılabilmesi için sunulan öneriler; karbon miktarının arıtımdaki öneminden dolayı kenevir organığının sistemdeki miktarı reaktör tasarımı değiştirilerek artırılabilir. Sistem daha uzun çalıştırılarak fosfat ve amonyum salınımının azaltılması zamanla sağlanabilir. Sistemi destekleyen sulak alan tankındaki bitkilerin miktarı ve çeşidi değerlendirilerek ve geliştirilerek drenaj suyu reaktif sistemine aktarılmadan önce fosfat ve amonyum miktarı daha da azaltılabilir. Böylece reaktif tankına daha az miktarda kirleticinin

aktarılmamasıyla amonyum ve fosfat tutucu reaktiflerin daha yüksek verimle çalışması sağlanabilir. Bu çalışma kısa süreli bir çalışma olduğu için sistemlerdeki değişimi değerlendirmek amacıyla daha uzun vadeli laboratuvar çalışmaları gerçekleştirilmelidir.

KAYNAKÇA

- Adiloğlu, A., Bellitürk, K., Adiloğlu, S., Solmaz, Y. (2020). Effect of Farmyard Manure on Mineral Nutrition of Rye (*Secale cereale* L.) Plant. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Tarım ve Doğa Dergisi*. <https://doi.org/10.18016/ksutarimdog.a.vi.606574>
- Akratos, C. S., Papaspyros, J. N. E., Tsihrintzis, V. A. (2009). Total nitrogen and ammonia removal prediction in horizontal subsurface flow constructed wetlands: Use of artificial neural networks and development of a design equation. *Bioresource Technology*, 100(2), 586–596. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2008.06.071>
- Allam, A., Negm, A. M., Allam, A. E., Negm, A. M. (2013). *Agricultural drainage water quality analysis and its suitability for direct reuse in irrigation: case study: Kafr El-Sheikh Governorate, Egypt*.
- APHA/AWWA/WPCF (1998): Standard Methods for Examination of Water and Wastewater. 20th Ed. Washington D.C., American Public Health Association (APHA), the American Water Works Association (AWWA) and the Water Environment Federation (WEF).
- Ariman, S., Koyuncu, S. (2019). Su Kirliliği Açısından Hassas Alanların İzlenmesi: Kızılırmak Deltası-Balık Gölü. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 7(4), 705–714. <https://doi.org/10.21923/jesd.531195>
- Assar, W., Ibrahim, M. G., Mahmod, W., Fujii, M. (2019). Assessing the agricultural drainage water with water quality indices in the El-Salam Canal Mega Project, Egypt. *Water (Switzerland)*, 11(5). <https://doi.org/10.3390/w11051013>
- Bai, S., Lv, T., Ding, Y., Li, X., You, S., Xie, Q., Brix, H. (2016). Multilayer substrate configuration enhances removal efficiency of pollutants in constructed wetlands. *Water (Switzerland)*, 8(12). <https://doi.org/10.3390/w8120556>
- Bednarek, A., Stolarska, M., Ubraniak, M., Zalewski, M. (2010). Application of permeable reactive barrier for reduction of nitrogen load in the agricultural areas - preliminary results. *Ecohydrology and Hydrobiology*, 10(2–4), 355–361. <https://doi.org/10.2478/v10104-011-0007-6>
- Białowiec, A., Sobieraj, K., Pilarski, G., Manczarski, P. (2019). The oxygen transfer capacity of submerged plant *Elodea densa* in wastewater constructed wetlands. *Water (Switzerland)*, 11(3). <https://doi.org/10.3390/w11030575>
- Blann, K. L., Anderson, J. L., Sands, G. R., Vondracek, B. (2009). Effects of agricultural drainage on aquatic ecosystems: A review. In *Critical Reviews in Environmental Science and Technology* (Vol. 39, Issue 11, pp. 909–1001). <https://doi.org/10.1080/10643380801977966>
- Blowes D., Ptacek J., Banner G., McRae W. T., Bennett A., Plus W. (2000). *Treatment of inorganic contaminants using permeable reactive barriers*.
- Brandes, J. A., Devol, A. H., Deutsch, C. (2007). New developments in the marine nitrogen cycle. *Chemical Reviews*, 107(2), 577–589. <https://doi.org/10.1021/cr050377t>
- Brix, H. (1994). Use of constructed wetlands in water pollution control: Historical development, present status, and future perspectives. *Water Science and Technology*, 30(8 pt 8), 209–223. <https://doi.org/10.2166/wst.1994.0413>

- Brix, H., Arias, C. A. (2005). Danish guidelines for small-scale constructed wetland systems for onsite treatment of domestic sewage. *Water Science and Technology*, 51(9), 1–9. <https://doi.org/10.2166/wst.2005.0275>
- Bus, A., Karczmarczyk, A., Baryła, A. (2019). Permeable reactive barriers for preventing water bodies from a phosphorus-polluted agricultural runoff-column experiment. *Water (Switzerland)*, 11(3). <https://doi.org/10.3390/w11030432>
- Calheiros, C. S. C., Duque, A. F., Moura, A., Henriques, I. S., Correia, A., Rangel, A. O. S. S., Castro, P. M. L. (2009). Substrate effect on bacterial communities from constructed wetlands planted with *Typha latifolia* treating industrial wastewater. *Ecological Engineering*, 35(5), 744–753. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2008.11.010>
- Chazarenc, F., Gagnon, V., Comeau, Y., Brisson, J. (2009). Effect of plant and artificial aeration on solids accumulation and biological activities in constructed wetlands. *Ecological Engineering*, 35(6), 1005–1010.
- Chen, J. S., Hsu, S. Y., Li, M. H., Liu, C. W. (2016). Assessing the performance of a permeable reactive barrier–aquifer system using a dual-domain solute transport model. *Journal of Hydrology*, 543, 849–860. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.11.002>
- De Vos, B., Souza, M. F., Michels, E., Meers, E. (2022). Industrial hemp (*Cannabis sativa* L.) in a phytoattenuation strategy: Remediation potential of a Cd, Pb and Zn contaminated soil and valorization potential of the fibers for textile production. *Industrial Crops and Products*, 178. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2022.114592>
- Ezzati, G., Healy, M. G., Christianson, L., Feyereisen, G. W., Thornton, S., Daly, K., Fenton, O. (2019). Developing and validating a decision support tool for media selection to mitigate drainage waters. *Ecological Engineering: X*, 2. <https://doi.org/10.1016/j.ecoena.2019.100010>
- Fan, J., Wang, W., Zhang, B., Guo, Y., Ngo, H. H., Guo, W., Zhang, J., Wu, H. (2013). Nitrogen removal in intermittently aerated vertical flow constructed wetlands: Impact of influent COD/N ratios. *Bioresour. Technol.*, 143, 461–466. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.06.038>
- Ghane, E. (2018). *Agriculture Drainage*. Extension Bulletin E3370. Michigan State University.
- Gibert O, Assal A, Devlin H, Elliot T, Kalin RM. Performance of a field-scale biological permeable reactive barrier for in-situ remediation of nitrate-contaminated groundwater. *Sci Total Environ.* 2019 Apr 1;659:211-220. doi: 10.1016/j.scitotenv.2018.12.340. Epub 2018 Dec 24. PMID: 30599340.
- Güler, C., Alpaslan, M. (2006). Petrol Türevleri Tarafından Kirlenmiş Akiferlerde Uygulanan Yerde İyileştirme Teknolojileri In-Situ Remediation Technologies Appliedfor Petroleum Hydrocarbon Contaminated Aquifers. In *Jeoloji Mühendisliği Dergisi* (Vol. 30, Issue 2).
- Guo, C., Cui, Y., Shi, Y., Luo, Y., Liu, F., Wan, D., Ma, Z. (2019). Improved test to determine design parameters for optimization of free surface flow constructed wetlands. *Bioresour. Technol.*, 280, 199–212. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.02.020>
- Harraz, H. Z. (2017). *Zeolite and its uses*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.34536.47365>

- Hong, M., Yu, L., Wang, Y., Zhang, J., Chen, Z., Dong, L., Zan, Q., Li, R. (2019). Heavy metal adsorption with zeolites: The role of hierarchical pore architecture. *Chemical Engineering Journal*, 359, 363–372. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.11.087>
- Koyuncu İ., Öztürk İ., Aydın A.F., Alp K., Arıkan O., Altınbaş M., Özdoğru A. (2013). Atıksı Aritma Tesisleri Tasarım Rehberi.
- ITRC. (2011). *Prepared by The Interstate Technology Regulatory Council PRB: Technology Update Team*. www.itrcweb.org.
- Jose, J. (2000). *Manual Constructed Wetlands Treatment of Municipal Wastewaters*. <http://www.epa.gov/ORD/NRMRL>
- Kadlec, R. H., Wallace, S. D. (2009). *Treatment wetlands*. CRC Press.
- Kankanige, Dinuka., Dayanthi, W., Nagasinghe, I., Disanayaka, A., Kawamoto, Ken. (2019). Low-Cost Permeable Reactive Barrier (PRB) System to Treat the Organic Compounds and Nutrients in the Groundwater Contaminated by the Landfill-Leachate. *Engineer: Journal of the Institution of Engineers, Sri Lanka*. 52. 15. 10.4038/engineer.v52i2.7350.
- Kassa, Y. (2019). Recent Advances in Application of Constructed Wetland Technologies for Enhanced Wastewater Treatment. *Journal of Academia and Industrial Research (JAIR)*, 8(7).
- Kengne, I. M., Fonkou, T., Agendia, P., Kengne, I., Akoa, A., Nya, J., Théophile, F. (2002). *Potentials of water lettuce (Pistia stratiotes) in domestic sewage treatment with macrophytic lagoon systems in Cameroon*.
- Lavrnić, S., Braschi, I., Anconelli, S., Blasioli, S., Solimando, D., Mannini, P., Toscano, A. (2018). Long-term monitoring of a surface flow constructed wetland treating agricultural drainagewater in Northern Italy. *Water (Switzerland)*, 10(5). <https://doi.org/10.3390/w10050644>
- Leslie, J. (2009). *Mehrhoff, Connecticut Üniversitesi, Bugwood.org*.
- Lovell, G. (2001). *Alabama Koruma ve Doğal Kaynaklar Departmanı, Bugwood.org*.
- Madramootoo, C. A., Johnston, W. R., & Willardson, L. S. (Eds.). (1997). *Management of agricultural drainage water quality (Vol. 13)*. Food & Agriculture Org.
- Maiga, Y., von Sperling, M., Mihelcic, J. R. (2019). Constructed Wetlands. In J. R. Mihelcic M. E. Verbyla (Eds.), *Water and Sanitation for the 21st Century: Health and Microbiological Aspects of Excreta and Wastewater Management (Global Water Pathogen Project)*. Michigan State University.
- Makopondo, R. O. B., Rotich, L. K., Kamau, C. G. (2020). Potential Use and Challenges of Constructed Wetlands for Wastewater Treatment and Conservation in Game Lodges and Resorts in Kenya. *Scientific World Journal*, 2020. <https://doi.org/10.1155/2020/9184192>
- Mao, Xuhui., Xiong, Lili., Hu, Xinyu., Yan, Zhiping., Wang, Lei., Xu, Gang. (2018). Remediation of ammonia-contaminated groundwater in landfill sites with electrochemical reactive barriers: A bench scale study. *Waste Management*. 78. 69-78. 10.1016/j.wasman.2018.05.015.
- Mao, Y., Huang, H. (2019). Research on performance improvement of constructed wetland wastewater treatment system. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 384(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/384/1/012173>

- Martins, M. C., Santos, E. B. H., Marques, C. R. (2017). First study on oyster-shell-based phosphorous removal in saltwater — A proxy to effluent bioremediation of marine aquaculture. *Science of the Total Environment*, 574, 605–615. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.09.103>
- Modrzynski, Jakub., Aamand, Jens., Wittorf, Lea., Badawi, Nora., Hubalek, Valerie., Canelles Garcia, Arnau., Hallin, Sara., Albers, Christian. (2021). Combined removal of organic micropollutants and ammonium in reactive barriers developed for managed aquifer recharge. *Water Research*. 190. 116669. [10.1016/j.watres.2020.116669](https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.116669).
- Nasr, M., Zahran, H. F. (2016). Performance evaluation of agricultural drainage water using modeling and statistical approaches. *Egyptian Journal of Aquatic Research*, 42(2), 141–148. <https://doi.org/10.1016/j.ejar.2016.04.006>
- Nationalty Research Council. (1993). Soil and Water Quality. In *Soil and Water Quality*. National Academies Press. <https://doi.org/10.17226/2132>
- Obiri-Nyarko, F., Grajales-Mesa, S. J., Malina, G. (2014). An overview of permeable reactive barriers for in situ sustainable groundwater remediation. In *Chemosphere* (Vol. 111, pp. 243–259). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2014.03.112>
- Ouellet-Plamondon, C., Chazarenc, F., Comeau, Y., Brisson, J. (2006). Artificial aeration to increase pollutant removal efficiency of constructed wetlands in cold climate. *Ecological Engineering*, 27(3), 258–264. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2006.03.006>
- Ozkaraova, E., (2020). Sustainable Groundwater Remediation With Biobarriers Using Agricultural or Plant Production Residues, *Academic Studies in ENGINEERING SCIENCES*, ISBN: 978-2-38236-050-7. Sy; 185.
- Özengin, N., Elmacı, A., Environ Biol, J., Özengin, N., Elmacı, A. (2007). Performance of Duckweed (*Lemna minor* L.) on different types of wastewater treatment. *Article in Journal of Environmental Biology*, 2, 307–314.
- Parihar S., Babu C.R. (2019). *Constructed Wetland as an Alternative Technology for Sewage Management in India* (Sharma P., Tiwari N., Mohan V., Goyal P., Eds.).
- Peinemann, J. C., Krenz, L. M. M., Pleissner, D. (2019). Is seashell powder suitable for phosphate recovery from fermentation broth? *New Biotechnology*, 49, 43–47. <https://doi.org/10.1016/j.nbt.2018.08.003>
- Peng, J., Song, Y., Liu, Z., Gao, H., Yu, H. (2012). Performance of a novel Circular-Flow Corridor wetland toward the treatment of simulated high-strength swine wastewater. *Ecological Engineering*, 49, 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2012.08.005>
- Placido, D. F., Lee, C. C. (2022). Potential of Industrial Hemp for Phytoremediation of Heavy Metals. In *Plants* (Vol. 11, Issue 5). MDPI.
- Powell, R. M., R W. Puls, D. W. Blowes, J. L. Vogan, R. W. Gillham, P. D. Powell, D. Schultz, R. Landis, AND T. Sivavec. (1998). *Permeable reactive barrier Technologies for contaminant remediation*. U.S. Environmental Protection Agency, Washington, D.C., EPA/600/R-98/125 (NTIS 99-105702), 1998.
- Seeger, E. M., Maier, U., Grathwohl, P., Kusch, P., Kaestner, M. (2013). Performance evaluation of different horizontal subsurface flow wetland types by characterization of flow behavior, mass removal and depth-dependent contaminant load. *Water Research*, 47(2), 769–780. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2012.10.051>

- Shao, D., Tan, X., Liu, H., Yang, H., Xiao, C., Yang, F. (2013). Performance analysis of on-farm irrigation tanks on agricultural drainage water reuse and treatment. *Resources, Conservation and Recycling*, 75, 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2013.03.011>
- Shutes, R. B. E. (2001). *Artificial wetlands and water quality improvement*. www.elsevier.com/locate/envint
- Simon, F. G., Meggyes, T. (2014). Effective cleanup of groundwater contaminated with radionuclides using permeable reactive barriers. In *Permeable Reactive Barrier: Sustainable Groundwater Remediation* (pp. 151–176). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781351228886-9>
- Snow, D. H. (1999). *Overview of Permeable Reactive Barriers*.
- Sudarsan, J. S., Annadurai, R., Nithiyantham, S., Prathap, M. G., Sudharson, G. (2021). Treatment of wastewater with modified constructed wetland system as a tertiary treatment unit. *International Journal of Environment and Sustainable Development*, 20(2), 189–200. <https://doi.org/10.1504/IJESD.2021.114564>
- Suponik, T. (2010). Ensuring Permeable Reactive Barrier Efficacy and Longevity. *Suponik Tomasz*.
- Tanji, K. K., Kielen, N. C., Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2002). *Agricultural drainage water management in arid and semi-arid areas*. Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Tee, H. C., Lim, P. E., Seng, C. E., Nawi, M. A. M. (2012). Newly developed baffled subsurface-flow constructed wetland for the enhancement of nitrogen removal. *Bioresource Technology*, 104, 235–242. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.11.032>
- Thakur, A.K. and Kumar, M., Reappraisal of Permeable Reactive Barrier as a sustainable groundwater remediation technology, in M. Kumar, D.D. Snow, R. Honda and S. Mukherjee (Ed.), *Contaminants in drinking and wastewater sources, Challenges and reigning technologies*, Springer Nature Singapore Pte Ltd., ISBN 978-981-15-4598-6, 2021. pp. 179-208
- Thakur, A. K., Vithanage, M., Das, D. B., Kumar, M. (2020). A review on design, material selection, mechanism, and modelling of permeable reactive barrier for community-scale groundwater treatment. In *Environmental Technology and Innovation* (Vol. 19). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2020.100917>
- Van Dam, J. C., Huygen, J., Wesseling, J. G., Feddes, R. A., Kabat, P., Van, P. E. v., Groenendijk, W. P., Van, C. A., Report, D. (1997). *Theory of SWAP version 2.0 Simulation of water flow, solute transport and plant growth in the Soil-Water-Atmosphere-Plant environment*.
- Vasudevan, P., Griffin, P., Warren, A., Thapliyal, A., Tandon, M. (2011). Localized domestic wastewater treatment: part I-constructed wetlands (an overview). In *Localized Domestic Wastewater Treatment: Part- I, Constructed Wetlands Journal of Scientific Industrial Research* (Vol. 70).
- Vidéki, R. (2017). *Doronicum Kft., Bugwood.org*.
- Vymazal, J. (2010). Constructed wetlands for wastewater treatment. In *Water (Switzerland)* (Vol. 2, Issue 3, pp. 530–549). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/w2030530>
- Wallace, S., Parkin, G., Cross, C. (2001). *Cold climate wetlands: design and performance*.

- Winterton, S. (2001). *Aquarium and Pond Plants of the World, Edition 3, USDA APHIS PPQ Highlight*.
- Winterton, S. (2008). *Aquarium and Pond Plants of the World, Edition 3, USDA APHIS PPQ*.
- Wu, S., Kusch, P., Brix, H., Vymazal, J., Dong, R. (2014). Development of constructed wetlands in performance intensifications for wastewater treatment: A nitrogen and organic matter targeted review. In *Water Research* (Vol. 57, pp. 40–55). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2014.03.020>
- Ye, F., Li, Y. (2009). Enhancement of nitrogen removal in tower hybrid constructed wetland to treat domestic wastewater for small rural communities. *Ecological Engineering*, 35(7), 1043–1050. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2009.03.009>
- Yinanç, A., Adiloğlu, S. (2017). Arıtmada Doğal Bitkilerin Kullanımı, Modeller ve Pilot Çalışma Örneği: Kozan İlçesi. In *Tekirdağ Ziraat Fakültesi Dergisi Journal of Tekirdag Agricultural Faculty Yinanç ve Adiloğlu* (Issue 01).
- Zhang, D. Q., Tan, S. K., Gersberg, R. M., Zhu, J., Sadreddini, S., Li, Y. (2012). Nutrient removal in tropical subsurface flow constructed wetlands under batch and continuous flow conditions. *Journal of Environmental Management*, 96(1), 1–6. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2011.10.009>
- Zhang, W., Shan, N., Bai, Y., Yin, L. (2020). The innovative application of agriculture straw in in situ field permeable reactive barrier for remediating nitrate-contaminated groundwater in grain-production areas. *Biochemical Engineering Journal*, 164. <https://doi.org/10.1016/j.bej.2020.107755>

ÖZ GEÇMİŞ

İremnaz GÜLMÜŞ Samsun Canik İMKB Anadolu Lisesi'ni bitirdikten sonra Ondokuz Mayıs Üniversitesi Mühendislik Fakültesi'nden 2020 yılında mezun oldu. 2021 yılında Çift anadal programı olan Kimya Mühendisliği bölümünü bitirdi. 2020 yılında OMÜ LEE Çevre Mühendisliği Yüksek Lisans programına girdi.

İletişim Bilgileri

ORCID ID : [0000-0001-8416-5272](https://orcid.org/0000-0001-8416-5272)

Yayınlar:

1. Gülmüş İ., Özkaraova E. B., (2022). *Tarımsal Drenaj Sularının Yapay Sulak Alan Sistemleriyle İyileştirilmesinin İncelenmesi.*, 1st International Conference on Applied Engineering and Natural Sciences. ICEANS Proceeding book, sf; 1552.